

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Рекомендації до виконання розрахункової роботи

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів електричної енергії»
спеціальності G3 Електрична інженерія

Укладачі: Г. С. Белоха

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2025

УДК XXX.XX (XXX)
XXX

Укладачі: *Белоха Галина Сергійвна*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Зайченко С.В.*, д-р техн. наук, проф.,
проф. кафедри АЕМК, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Дерев'янку Д.Г.* д-р техн. наук, доц

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 26.06.2025р.)
за поданням вченої ради навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменджменту
(протокол № 10 від 29.05.2025р.)*

XXX **Перехідні процеси в електроенергетиці** [Електронний ресурс] : рек. до виконання розрахунк. роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Системи забезпечення споживачів електричної енергії» спец. G3 Електрична інженерія / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Г.С. Белоха. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 37 с.

Розрахункова робота має на меті поглиблення, узагальнення і закріплення знань студентів з навчальної дисципліни "Перехідні процеси в електроенергетиці", застосування набутих знань при вирішенні конкретного фахового завдання і вироблення вміння самостійно працювати з навчальною і науковою літературою, електронно-обчислювальною технікою, використовуючи сучасні інформаційні засоби та технології.

УДК XXX.XX (XXX)

Реєстр. № НП 24/25-590. Обсяг 1 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ.....	7
2. ЗМІСТ, ОБСЯГ І СТРУКТУРА	8
3. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ	9
3.1 Довизначення по довіднику типу елементів схеми і неvistачаючих для розрахунку КЗ вхідних даних	9
3.2 Побудова спрощеної загальної схеми заміщення і розрахунок параметрів елементів схеми заміщення в іменованих одиницях	10
3.3 Побудова, еквівалентування схеми заміщення і розрахунок сумарного надперехідного струму трифазного КЗ для першої К1 ⁽³⁾ точки трифазного КЗ.....	11
3.4 Розподіл струму в елементах розрахункової схеми і визначення залишкових напруг в її вузлах для К1 ⁽³⁾	11
3.5 Визначення характеристик трифазного КЗ з використанням методу типових кривих (ТК) для К1 ⁽³⁾	12
4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ.....	15
5. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	18
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	20
ДОДАТОК А. Початкові дані до виконання розрахункової роботи згідно варіантів.....	21
ДОДАТОК Б. Схеми за варіантами.....	26
ДОДАТОК В. Розрахунок параметрів схем заміщення	34
ДОДАТОК Г. Формули для перетворення схем та визначення струморозподілу	37

ВСТУП

Розрахункова робота є одним із видів індивідуальних завдань навчально-дослідницького, творчого та проєктно-конструкторського характеру, яка має на меті не лише поглиблення, узагальнення і закріплення знань студентів з навчальної дисципліни "Перехідні процеси в електроенергетиці", а й застосування їх при вирішенні конкретного фахового завдання і вироблення вміння самостійно працювати з навчальною і науковою літературою, електронно-обчислювальною технікою, лабораторним обладнанням, використовуючи сучасні інформаційні засоби та технології.

Перехідні процеси в системах електропостачання (СЕР) – результат зміни режимів, спричинених експлуатаційними умовами або наслідками пошкодження ізоляції чи струмовідних частин електроустановок.

Причинами виникнення перехідних процесів можуть бути впливи на елементи системи:

- вмикання, вимикання чи перемикання джерел електричної енергії, трансформаторів, ліній електропередач, електроприймачів та інших елементів;
- поява несиметрії фазних струмів і напруг через вимикання окремих фаз, несиметричних змін навантаження, обриви фаз тощо;
- короткі замикання (КЗ) в елементах СЕР;
- прискорення збудження синхронних машин та гасіння їх магнітного поля;
- раптові накиди та скиди навантаження;
- асинхронний пуск двигунів та синхронних компенсаторів;
- реверсування асинхронних двигунів;
- асинхронний хід синхронних машин після їх випадання із синхронізму;
- кліматичні впливи на елементи СЕР;

- повторні вмикання та вимикання короткозамкнених ланцюгів мереж.

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

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

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

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

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

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

При КЗ можуть траплятися різні небезпечні наслідки: недопустиме нагрівання електроустаткування та його терміч- не пошкодження через значне зростання струмів (у 10...15 разів і більше); виникнення великих механічних зусиль між струмоведучими частинами, які призводять до їх пошкодження або руйнування; зниження напруги та спотворення її фазної симетрії, що негативно впливає на роботу споживачів енергії. Так, при зниженні напруги на 30-40 % протягом не менше секунди розпочинається процес гальмування електродвигунів, внаслідок чого можливі порушення технологічного циклу на підприємствах, поява браку продукції та інші відхилення, пов'язані з народногосподарськими втратами; наведення при несиметричних КЗ в сусідніх лініях зв'язку та сигналізації е.р.с., небезпечних для обслуговуючого персоналу і апаратури; порушення стійкості роботи окремих елементів та режиму СЕП цілому, що призводить до аварійних ситуацій з вимкненням значної кількості споживачів електричної енергії; спалахування електроустановок.

Розрахунок електромагнітних перехідних процесів в СЕП при коротких замиканнях, як найбільш характерних збудженнях, має важливе значення для проєктування та експлуатації. Такий розрахунок передбачає обчислення значень напруг, струму та інших параметрів режиму КЗ у точці виникнення КЗ або в інших точках СЕП чи вітках мережі при заданих умовах. На початковому етапі розрахунку складають розрахункову схему. На цій схемі в однолінійному зображенні показують джерела СЕП, точки КЗ та всі силові елементи, по яким можливо протікання струму КЗ і його складових, тобто генератори, синхронні компенсатори, джерела реактивної потужності, мало віддалених від точок КЗ узагальнених навантажень, силові трансформатори, реактори, ПЛ, КЛ, що зв'язують джерела живлення з точками КЗ.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Тема розрахункової роботи: "Розрахунок струмів короткого замикання в системах електропостачання".

Мета – отримання студентом знань по перехідним процесам, що проходять в системах електропостачання як єдине ціле явище в ланцюгах взаємозв'язаних елементів.

Для цього студенту треба здобути вміння розраховувати процеси та прогнозувати по зміні параметрів системи кількісні зміни її режимів.

Виконання розрахункової роботи дає можливість отримати студенту досвід використання практичних методів розрахунку.

Завдання. Об'єктом для розрахунку КЗ є електрична мережа вище 1кВ, типова СЕП. Необхідно визначити струм в точці КЗ, розподіл струмів та розрахунок струмів КЗ в довільний момент часу з використанням методів типових кривих.

Для вирішення поставленого завдання необхідно:

- обрати параметри схеми (додаток А) та навести розрахункову схему СЕП (додаток Б),
- провести вибір по довіднику типу елементів СЕП і бракуючих для розрахунку КЗ даних;
- навести схему заміщення СЕП розрахунок параметрів схеми заміщення;
- провести еквівалентування схеми заміщення і розрахунок сумарного надперехідного струму трифазного КЗ (навести схеми заміщення по етапах перетворення)
- розподіл струму КЗ по елементах розрахункової схеми і визначення залишкових напруг в її вузлах;
- розрахунок струмів КЗ в довільний момент часу з використанням методу типових кривих.

2. ЗМІСТ, ОБСЯГ І СТРУКТУРА

Робота складається з графічної схеми СЕП та розрахунку струму короткого замикання.

Обсяг до 30 сторінок.

Структура роботи:

ВСТУП

1. Побудова загальної розрахункової схеми. Довизначення по довіднику типу елементів схеми і неvistачаючих для розрахунку КЗ вхідних даних

2. Побудова спрощеної загальної схеми заміщення і розрахунок параметрів елементів схеми заміщення в іменованих одиницях

3. Побудова, еквівалентування схеми заміщення і розрахунок сумарного надперехідного струму трифазного $KЗ - I_{\Sigma t=0}^{11(3)}$ для першої $K1^{(3)}$ точки трифазного КЗ

4. Розподіл струму $I_{\Sigma t=0}^{11(3)}$ в елементах розрахункової схеми і визначення залишкових напруг в її вузлах для $K1^{(3)}$

5. Визначення характеристик трифазного КЗ з використанням методу типових кривих (ТК) для $K1(3)$.

ВИСНОВКИ

3. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1 Довизначення по довіднику типу елементів схеми і невивставаючих для розрахунку КЗ вхідних даних

Розрахунок режиму КЗ необхідно починати зі складання розрахункової схеми згідно варіанту (додаток А і Б).

Розрахункова схема (РС) – це спрощена однолінійна схема СЕП, на якій позначені всі наявні джерела живлення що беруть участь в підживленні точки КЗ, і елементи СЕП, що проводять струм КЗ. На РС усі елементи представляють своїми вихідними (паспортними) даними, які потрібні для розрахунку [1 – 4].

Як приклад на рисунку 3.1 представлена розрахункова схема.

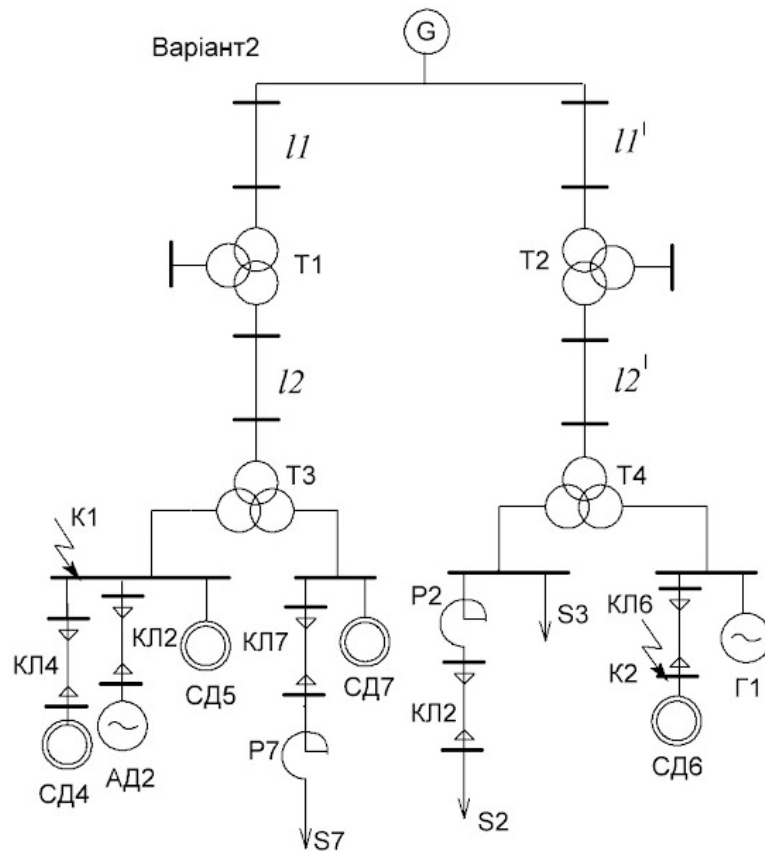


Рисунок 3.1 – Варіант схеми

На схемі зображені дві точки короткого замикання. Розрахунок спочатку ведеться для однієї точки при розрахунку у іменованих одиницях з точним зведенням, а також за допомогою різних типів розрахункових кривих.

На всіх схемах зображено:

електроенергетична системи С;

трансформатори Т1, Т2, Т3, Т4;

повітряні лінії електропередачі ПЛ1, ПЛ1;

синхронні СД та асинхронні двигуни АД,

кабельні лінії КЛ;

реактори Р;

узагальнене навантаження (УН).

Визначаємо параметри необхідні для розрахунку опорів і е.р.с для схеми заміщення. Заносимо до таблицьки.

3.2 Побудова спрощеної загальної схеми заміщення і розрахунок параметрів елементів схеми заміщення в іменованих одиницях

Схема заміщення (СЗ) – це електрична схема, яка відповідає за структурою РС і в якій усі магнітні (трансформаторні) зв'язки замінені електричними. СЗ складається для однієї фази як сукупність СЗ її окремих елементів, зв'язаних між собою в тій же послідовності, що і на РС.

Схема заміщення складається на основі даних отриманих в п.2.1 та за допомогою схем заміщення, наведених в додатку В.

Так як розрахунок режиму КЗ необхідно виконувати для декількох точок КЗ, складаємо загальну СЗ і розрахунок параметрів елементів СЗ здійснюємо один раз при загальних базисних умовах.

Параметри усіх елементів СЗ розраховуються в одних одиницях виміру і виражають на одному ступені напруги, який називається основним. На основному ступені напруги обирають базисну напругу. Ця процедура є необхідною, щоб позбутися магнітних зв'язків.

3.3 Побудова, еквівалентування схеми заміщення і розрахунок сумарного надперехідного струму трифазного КЗ для першої К1⁽³⁾ точки трифазного КЗ

На цьому етапі необхідно провести еквівалентування схеми заміщення відносно точки К1.

Шляхом еквівалентних перетворень схема заміщення СЕП зводиться до найпростішого вигляду для визначення результуючого опору короткозамкненого контуру. З цією метою використовують відомі методи перетворення лінійних електричних ланцюгів: послідовне і паралельне складання опорів; заміна кількох джерел з різними е.р.с. та опорами, приєднаних до загальної точки мережі, одним еквівалентним джерелом; перетворення трикутника на еквівалентну зірку, зірки – на еквівалентний трикутник і багатопроменевої зірки – на багатокутник з діагоналями. В додатку Г наведено таблицю з методи перетворення.

В розрахунковій роботі необхідно привести всі етапи еквівалентування схеми заміщення. Визначити струм короткого замикання.

3.4 Розподіл струму в елементах розрахункової схеми і визначення залишкових напруг в її вузлах для К1⁽³⁾

Щоб отримати розподіл надперехідного струму КЗ в гілках розрахункової схеми спочатку розподілимо його по гілках схем заміщення, які отримували поетапно при еквівалентуванні, в напрямі, зворотному процесу еквівалентування. Для кожної СЗ, отриманої на певному етапі

еквівалентування, знайдемо струми в гілках і залишкові напруги. у вузлах СЗ, використовуючи I і II закони Кірхгофа [4].

Визначення залишкових напруг у вузлах схеми.

Після визначення струмів в гілках і залишкових напруг у вузлах СЗ в іменованих одиницях переведемо їх значення на розрахункову схему, тобто визначимо дійсні значення струмів в елементах РС і дійсні значення залишкових напруг у вузлах. Цей перехід виконаємо за формулами зведення для струмів і напруг.

3.5 Визначення характеристик трифазного КЗ з використанням методу типових кривих (ТК) для К1⁽³⁾

Визначимо наступні характеристики:

- Діюче значення сумарного періодичного струму $I_{KЗ\Sigma}$ при $t=0,2$;
 $t=\infty$,
- Сумарну потужність S_{Σ} для $t=0,5$;
- Найбільше діюче значення повного струму I_y ;
- Ударний струм i_y КЗ.

Для визначення струму КЗ в довільний момент часу I_{ki} застосуємо практичні методи розрахунку, а саме типові та розрахункові криві.

Для того, щоб використати типові криві (ТК) (рис 3.2) необхідно знати надперехідні струми в генераторних гілках за умови КЗ в заданій точці. Ці струми отримаємо шляхом розподілу сумарного над перехідного струму КЗ поетапно в напрямку від еквівалентної схеми заміщення до самої першої вихідної схеми заміщення, з використанням першого та другого законів Кірхгофа.

Побудова чистопроменевої схеми та визначення розподілу над перехідного струму по окремих гілках

Накреслимо чистопрореневу схему заміщення маючи струми в гілці генератора. Чистопроренева схема заміщення – це схема, на якій всі джерела живлення зв’язані з точкою КЗ через один опір.

1) Для системи:

$$I_{ct=0} = I_{ct=0,2} = I_{ct=0,5} = I_{ct=\infty}$$

2) Для генераторів:

$$I_{HG1} = \frac{S_{HG1}}{\sqrt{3} * U_H}, \text{кВ}$$

Відношення початкового струму КЗ у ланці до номінального струму генератора:

$$\frac{I''_{Г1}}{I_{HG1}}$$

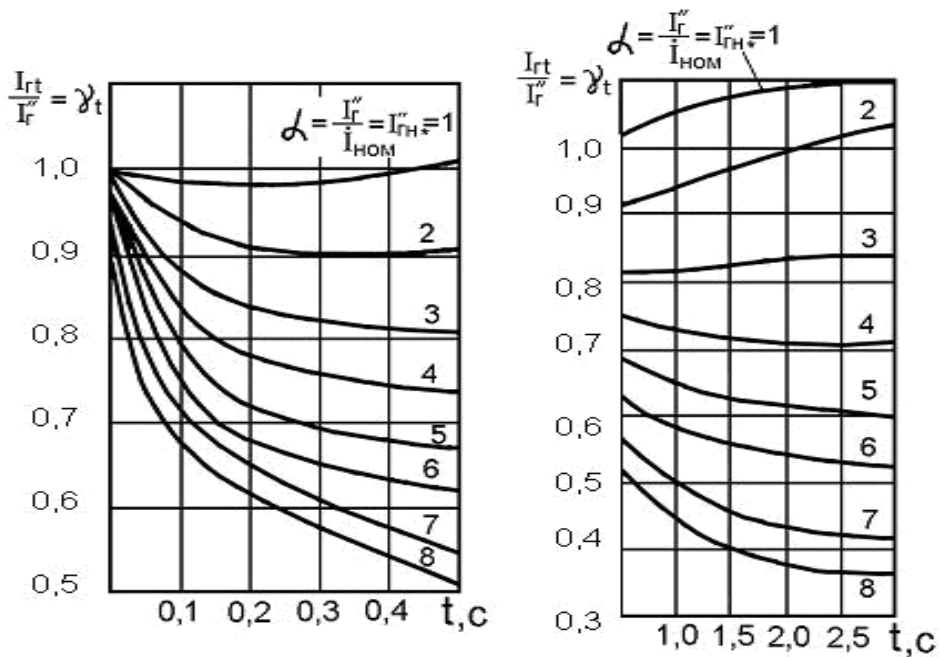


Рисунок 3.2 – Типові криві для потужних синхронних машин

Розраховані струми необхідно занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Надперехідні струми у гілках схеми

Промінь	I (t=0)	γ (t=0,2)	I (t=0,2)	γ (t=0,5)	I (t=0,5)	γ (t= ∞)	I (t= ∞)
$I''_{\Sigma k}$							

4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ

У тексті розрахункової стисло викладається методика розрахунків, подається обґрунтування прийнятих рішень, наводяться необхідні для розрахунків формули та схеми.

Зміст розташовується безпосередньо після титульного аркуша.

Кожну структурну частину роботи треба починати з нової сторінки.

Заголовки підрозділів, пунктів і підпунктів роботи слід починати з абзацного відступу та друкувати маленькими літерами, крім першої великої, не підкреслюючи, без крапки у кінці. Якщо заголовок складається з двох і більше речень, їх розділяють крапкою. Перенесення слів у заголовку розділу не допускається.

Відстань між основами рядків заголовку, а також між двома заголовками приймають такою, як у тексті.

Не допускається розміщувати назву підрозділу, а також пункту й підпункту, у нижній частині сторінки, якщо після неї розміщено тільки один рядок тексту.

Нумерацію сторінок починають рахувати з титульного аркуша, але на всіх аркушах, що передують структурному елементу «ЗМІСТ», номери сторінок не проставляються.

Сторінки роботи слід нумерувати арабськими цифрами, дотримуючись наскрізної нумерації впродовж усього тексту.

Ілюстрації та таблиці, які розміщені на окремих сторінках, включають до загальної нумерації роботи.

Розділи, підрозділи, пункти, підпункти розрахункової роботи нумеруються арабськими цифрами.

Розділи роботи повинні мати порядкову нумерацію у межах викладення її суті та позначатися арабськими цифрами без крапки, наприклад: 1, 2, 3, 4 і т.д.

Підрозділи повинні мати порядкову нумерацію у межах кожного

розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу та порядкового номера підрозділу, відокремленого крапкою. Після номера підрозділу крапку не ставлять, наприклад: 1.1 (перший підпункт першого розділу), 1.2, 1.3 і т.д.

Пункти повинні мати порядкову нумерацію у межах кожного розділу або підрозділу. Номер пункту складається з номера розділу, порядкового номера підрозділу та порядкового номера пункту, відокремленого крапками. Після номера пункту крапку не ставлять, наприклад: 1.1.1, 1.1.2 і т.д.

Номер підпункту складається з номера розділу, порядкового номера підрозділу, порядкового номера пункту і порядкового номера підпункту, відокремлених крапками, наприклад: 1.1.1.1, 1.1.1.2 і т.д.

Формули та рівняння розташовують безпосередньо після тексту, в якому вони згадуються, посередині рядка. Вище і нижче кожної формули або рівняння повинно бути залишено не менше одного вільного рядка.

Формули та рівняння у слід нумерувати порядковою нумерацією у межах розділу. Номер формули або рівняння складається з номера розділу та порядкового номера формули або рівняння, відокремлених крапкою, наприклад, формула (1.3) – третя формула першого розділу. Нумерувати слід лише ті формули, на які є посилання у наступному тексті. Інші нумерувати не рекомендується.

Номер формули або рівняння зазначають на рівні формули або рівняння у дужках у крайньому правому положенні на рядку. У разі, якщо номер формули не вміщується у рядку з формулою, його переносять у наступний рядок.

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів, що входять до формули чи рівняння, слід наводити безпосередньо під формулою у тій послідовності, в якій вони наведені у формулі чи рівнянні. Перший рядок починають з нового рядка словом «де» з абзацного відступу без двокрапки, наприклад:

Ілюстрація позначається словом «Рисунок – __», яке разом з назвою ілюстрації розміщують після пояснювальних даних, наприклад: «Рисунок 3.1 – Схема розміщення».

Ілюстрації слід нумерувати арабськими цифрами порядковою нумерацією у межах розділу.

5. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Розрахункова робота виконується на підставі наступних нормативних документів і літератури, посилання на відповідні пункти цих документів є обов'язковими:

1. Перехідні процеси в системах електропостачання : Підручник для вузів / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен ; За ред. Г.Г. Півняка. - Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2002. - 597 с.

2. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник / М. М. Черемісін [та ін.]. - Харків : В справі, 2016. - 259 с. : рис., табл.

3. Букович Н.В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем. Вища школа. 1988. — 247 с.

4. 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.

5. Гай, Олександр Валентинович. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах : навчальний посібник для підготовки фахівців «Галузь знань 14 – Електрична інженерія Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О.В. Гай, В.М. Бодунов. - К. : ЦП "КОМПРИНТ", 2020. - 327 с.

6. Гоголюк, Петро Федорович. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин ; Мін-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т "Львівська політехніка". - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. - 279 с. : іл., схеми.

7. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур ; за редакцією М.С. Сегеди ; Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Національний університет "Львівська політехніка". - Львів : Видавництво

Львівської політехніки, 2013. - 606 с. : іл.

8. Хілов, Віктор Сергійович, Теоретичні основи електротехніки : підручник / В.С. Хілов ; з передмовою Г.Г. Півняка ; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет Дніпровська політехніка 1899. - Київ : Видавництво "Каравелла", 2021. - 468 сторінок : рисунки.

9. Карпов, Юхим Овдійович. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник / Ю.О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев; за редакцією Ю. О. Карпова ; Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет. - Херсон : Олді-Плюс, 2017. - 456 сторінок : рисунки, таблиці

10. ДСТУ ІЕС TR 60909-4:2008 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4: Приклади розрахунку струму короткого замикання

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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.

2. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. В. М. Винославский, Л. І. Несен.- Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. - 597с.

3. ДСТУ ІЕС TR 60909-4:2008 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4: Приклади розрахунку струму короткого замикання

4. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання

ДОДАТОК А

Початкові дані до виконання розрахункової роботи згідно варіантів

Таблиця А.1 – Параметри живлячої системи С. Для парних варіантів I, для непарних варіантів II

Спосіб завдання системи		Номер варіанту даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
I	Снсист	550	700	650	500	300	530	630	320
	Хс	0.15	0.2	0.25	0.18	0.3	0.22	0.27	0.25
II	Скзсист	1500	1100	1300	1400	950	1500	1200	900
	Хс	0.25	0.2	0.27	0.14	0.3	0.15	0.27	0.25
III	Sc=∞	Система задана як джерело нескінченної потужності							

Примітки. 1. Реактивний опір системи заданий в відносних одиницях і зведений до номінальних параметрів системи.

При завданні системи I і II способами за базисну потужність прийняти номінальну потужність системи.

Таблиця А.2 – Параметри генераторів

Генератори		Номер варіанту даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Г1, Г2	P_n МВт	2.4	6.0	12.0	4.5	6.0	32	6.0	5
	U_n кВ	6.3	10.5	6.3	6.3	10.5	6.3	10.5	10.5
	$\cos\varphi_n$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	X_d''	20.0	11.9	11.4	17.0	11.9	14.3	11.9	25.0
	Тип	ГГ	ТГ	ТГ	ГГ	ТГ	ТГ	ТГ	ГГ

Примітки. 1. Опори генераторів дані у відсотках від номінального опору. Генератори забезпечені автоматичним регулюванням збудження (АРЗ).

Таблиця А.3 – Параметри синхронних двигунів

Синхронні двигуни		Номер варіанту даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
СД1	P_n , МВт	0,4	2	0,63	0,315	4	1	2	1,6
	U_n , МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
СД2	P_n , МВт	0,4	2	0,63	0,4	4	1	2	1,6
	U_n , МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
СД3	P_n , МВт	1	3,15	1,6	0,315	1,6	1,25	3,15	1
	U_n , МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
СД4	P_n , МВт	1	3,15	1,6	0,315	1,6	1,6	3,15	1,25

Синхронні двигуни		Номер варіанту даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
СД5	U _H ,МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	P _H ,МВт	2	4	2,5	0,4	2	1,25	4	1,6
СД6	U _H ,МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	P _H ,МВт	0,31 5	1,6	1,6	1,6	0,63	1,6	3,15	1,25
СД7	U _H ,МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	P _H ,МВт	0,5	1,6	1,6	1,6	0,63	1	4	1
СД8	U _H ,МВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	P _H ,МВт	0,5	4	2	0,8	0,63	1,6	2	1

Примітки: 1. Синхронні двигуни СД1-СД5 забезпечені АРЗ

Вважати, що всі СД до КЗ працювали з повним номінальним навантаженням при коефіцієнті потужності і напрузі на зажимах.

Таблиця А.4 – Параметри трансформаторів

Трансформатори			Номер варіанту даних							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Т1	S _H , МВ · А		63	80	80	40	40	63	80	63
	U _H ,кВ	ВН	115	115	115	115	115	158	115	158
		СН	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
		НН	6,6	11	11	6,6	11	6,6	11	6,6
Т2	S _H , МВ · А		63	80	80	40	40	63	80	63
	U _H ,кВ	ВН	115	115	115	115	115	158	115	158
		СН	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
		НН	6,6	11	11	6,6	11	6,6	11	6,6
Т3	S _H , МВ · А		25	16	40	25	10	25	40	25
	U _H ,кВ	ВН	36,75	36,75	36,75	6,75	36,75	36,75	36,75	36,75
		СН	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	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 , МВ · А		25	16	40	25	10	25	40	25
	U _H ,кВ	ВН	36,75	36,75	36,75	6,75	36,75	36,75	36,75	36,75
		СН	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	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 , МВ · А		10	10	16	10	16	16	10	10
	U _H ,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 , МВ · А		10	10	16	10	16	16	10	10
	U _H ,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

Таблиця А.5 – Потужність навантаження

Навантаження МВА	Номер варіанту даних							
	1	2	3	4	5	6	7	8
S1 (АД1)	1	5	1,3	0,5	1	1,8	5,1	1,3
S2 (АД2)	2,1	7,2	2,7	1,2	2,1	2,7	7,1	1,7
S3 (АД3)	0,72	4	1,1	0,8	0,72	1,25	4,2	0,25
S4 (АД4)	3	5	2,5	0,4	3	0,82	4,8	0,32
S5	0,3	1,4	3,8	0,9	0,25	0,86	1,3	0,26
S6	0,25	2,3	1,7	1,7	0,8	0,7	3,7	0,7
S7	0,82	1,2	3,1	0,8	0,26	0,8	4,5	0,5
S8	0,63	2,3	1,2	1,5	0,45	1,4	4,2	1,2
S9	0,35	5	3,6	1,1	0,72	1,8	2,5	1,4
S10	0,74	3,6	2,5	1,9	0,84	1,57	2	0,57
S11	0,84	2,9	2,1	0,3	0,3	1,84	2,4	0,84
S12	0,4	1,6	1,8	0,46	0,84	1,78	2,9	0,78
S13	0,3	2,4	1,6	0,52	0,35	0,52	5	0,52
S14	0,62	4,7	2,3	0,78	0,82	0,86	2,5	1,4
S15	0,84	2	3,5	0,84	0,53	0,8	1,8	0,3
S16	0,5	3,3	3,7	0,57	0,25	1,9	2,8	1,9
S17	1	5	1,3	0,5	1	1,8	5,1	1,3
S18	2,1	7,2	2,7	1,2	2,1	2,7	7,1	1,7
S19	0,72	4	1,1	0,8	0,72	1,25	4,2	0,25
S20	3	5	2,5	0,4	3	0,82	4,8	0,32
S21	0,3	1,4	3,8	0,9	0,25	0,86	1,3	0,26
S22	0,25	2,3	1,7	1,7	0,8	0,7	3,7	0,7
S23	0,82	1,2	3,1	0,8	0,26	0,8	4,5	0,5
S24	0,63	2,3	1,2	1,5	0,45	1,4	4,2	1,2
S25	0,35	5	3,6	1,1	0,72	1,8	2,5	1,4

Навантаження S представляє собою узагальнене навантаження, що підключене безпосередньо до шин вузла.

Таблиця А.6 – Параметри ліній

Лінія	Номер варіанту даних							
	1	2	3	4	5	6	7	8
П1,П1' (ПЛ)	60	30	65	20	36	47	41	80
Г2,Г2' (ПЛ)	2,8	4	3	1,6	3,4	3,1	3,8	1,7
КЛ 1	0,7	0,4	0,65	0,8	0,65	0,62	0,45	0,5
КЛ 2	0,55	0,67	0,5	0,7	0,73	0,4	0,35	0,63
КЛ 3	0,58	0,74	0,68	0,86	0,46	0,59	0,8	0,55
КЛ 4	0,82	0,58	0,53	0,44	0,9	1,1	1,2	1,25
КЛ 5	0,59	0,53	0,63	0,83	1,2	1,45	0,74	0,35
КЛ 6	0,9	0,44	0,6	1,1	1,34	0,58	0,82	1,3
КЛ 7	1,25	1,1	0,6	0,8	0,9	0,6	0,95	1,65
КЛ 8	1,5	1,35	0,95	1	1,1	0,53	0,35	0,45
КЛ 9	1,3	0,82	0,58	1,34	1,1	0,6	0,44	0,9
КЛ 10	0,35	0,74	1,45	1,2	0,83	0,63	0,53	0,59
КЛ 11	0,55	0,67	0,5	0,7	0,73	0,4	0,35	0,63
КЛ 12	1,25	1,2	1,1	0,9	0,44	0,53	0,58	0,82
КЛ 13	0,45	0,35	0,53	1,1	1	0,95	1,35	1,5
КЛ 14	0,9	0,82	0,58	0,53	0,44	0,9	1,1	1,2
КЛ 15	1,1	0,95	0,35	0,74	1,45	1,7	0,83	0,63
КЛ 16	0,65	0,7	0,46	0,9	1,2	1,34	0,9	1,1
КЛ 17	1,1	0,83	0,73	0,44	1	0,44	1,45	1,2
КЛ 18	0,4	0,59	1,1	1,45	0,58	0,6	0,53	0,6
КЛ 19	0,63	0,4	0,53	0,95	0,9	1,7	1,34	0,44
КЛ 20	0,4	0,67	0,74	0,58	0,53	0,44	1,1	1,35
КЛ 21	0,82	0,74	0,67	1,2	0,35	0,82	0,95	0,73
КЛ 22	0,65	0,5	0,68	0,53	0,63	0,6	0,6	0,95
КЛ 23	0,58	1,45	0,5	1,1	0,53	0,58	0,35	0,46
КЛ 24	0,73	1,1	0,53	0,74	0,67	1,2	0,7	0,9
КЛ 25	0,53	0,6	0,63	0,4	0,95	0,9	1,7	1,34
КЛ 26	2,8	4	3	1,6	3,4	3,1	3,8	1,7
КЛ 27	2,7	3,8	2,6	1,5	3,2	3	4	1,5

Примітки. 1. Лінії l_1 , l_1' та l_2 , l_2' - повітряні, інші – кабельні.

Довжина ліній задана в кілометрах.

Опори на 1 км лінії для різних типів ліній:

КЛ напругою до 1 кВ	0.06;
те ж, 6–10 кВ	0.08;
те ж, 20 кВ	0.11;
те ж, 35 кВ	0.125;
ізолювані проводи внутрішньої проводки	0.22;
ПЛ напругою до 1 кВ	0.31;
те ж, 6–10 кВ	0.38;
те ж, 20–35–110 кВ	0.40;
те ж, 220 кВ	0.41;
те ж, 330 кВ (два проводи у фазі)	0.32;
те ж, 500 кВ (три проводи у фазі)	0.29;
те ж, 750 кВ (чотири проводи у фазі)	0.28;
те ж, 1150 кВ (вісім проводів у фазі)	0.255.

Таблиця А.7 – Параметри реакторів

Реактори		Номер варіанту даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
P1	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,4	2	2	1	0,4	1	2	0,4
	X _p , Ом	0,35	0,35	0,35	0,45	0,35	0,45	0,35	0,35
P2	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,4	2	2	1	0,4	1	2	0,4
	X _p , Ом	0,45	0,35	0,35	0,56	0,5	0,56	0,35	0,45
P3	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,4	2,5	2	1	0,4	1,6	1,6	0,4
	X _p , Ом	0,45	0,2	0,35	1	0,45	0,35	0,35	0,45
P4	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,4	1	1,6	0,63	0,4	0,63	1,6	0,4
	X _p , Ом	0,35	0,7	0,25	0,4	0,5	0,4	0,25	0,35
P5	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,4	1	0,63	0,63	0,4	0,63	1,6	0,4
	X _p , Ом	0,35	1	0,4	0,4	0,45	0,56	0,56	0,35
P6	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,63	1	2,5	1,6	0,4	0,63	1	0,4
	X _p , Ом	0,4	0,56	0,25	0,56	0,35	0,7	0,35	0,35
P7	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	0,63	3,2	3,2	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	X _p , Ом	0,56	0,18	0,18	0,7	0,56	1	1	0,7
P8	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	1	1	3,75	0,63	0,63	1	0,63	0,63
	X _p , Ом	0,45	0,45	0,105	2	0,7	0,56	0,35	0,56
P9	U _н , кВ	6	10	6	6	10	6	10	6
	I _н , кА	2x0,63	2x2,5	2x2,5	2x2,5	2x0,63	2x2,5	2x2,1	2x0,63
	X _p , Ом	0,25	0,35	0,25	0,25	0,4	0,25	0,14	0,4
	X _{p0,5} , Ом	0,135	0,109	0,109	0,109	0,2	0,109	0,067	0,2
P10	U _н , кВ	6	10	6	6	6	6	10	6
	I _н , кА	2x0,63	2x2,5	2x2,5	2x2,5	2x0,63	2x2,5	2x2,1	2x0,63
	X _p , Ом	0,25	0,35	0,25	0,25	0,4	0,25	0,14	0,4
	X _{p0,5} , Ом	0,135	0,109	0,109	0,109	0,2	0,109	0,067	0,2

ДОДАТОК Б

Схеми за варіантами

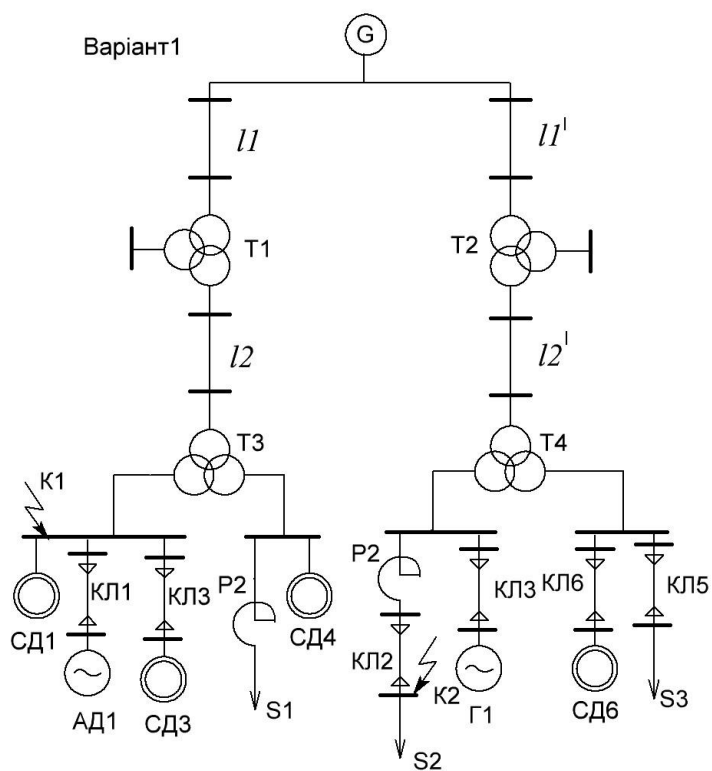


Рисунок Б.1 – Варіант 1

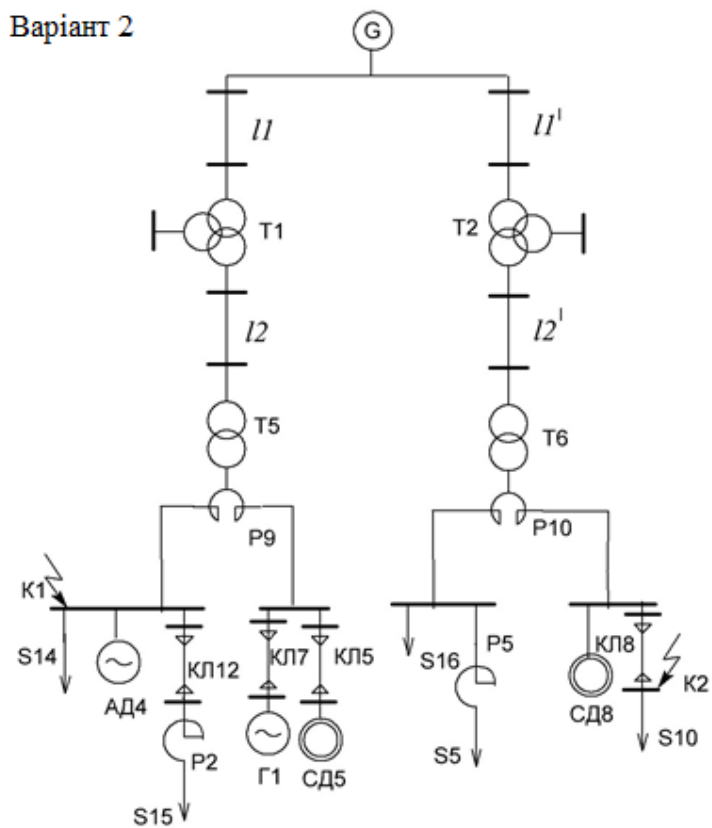


Рисунок Б.2 – Варіант 2

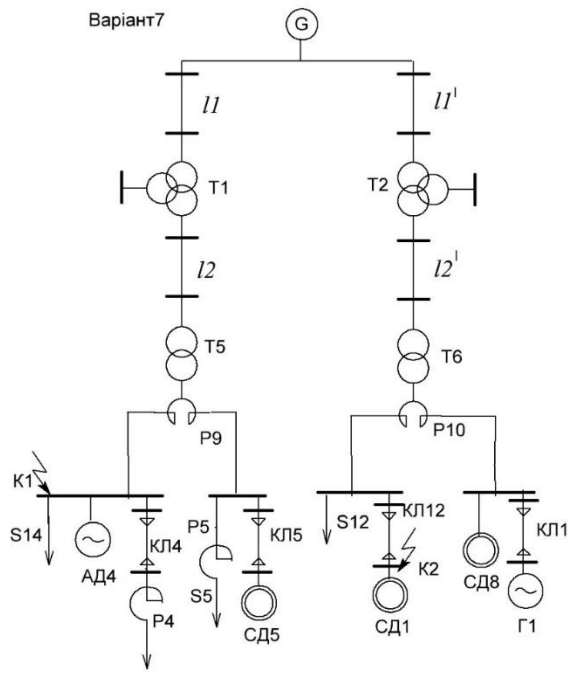


Рисунок Б.7 – Варіант 7

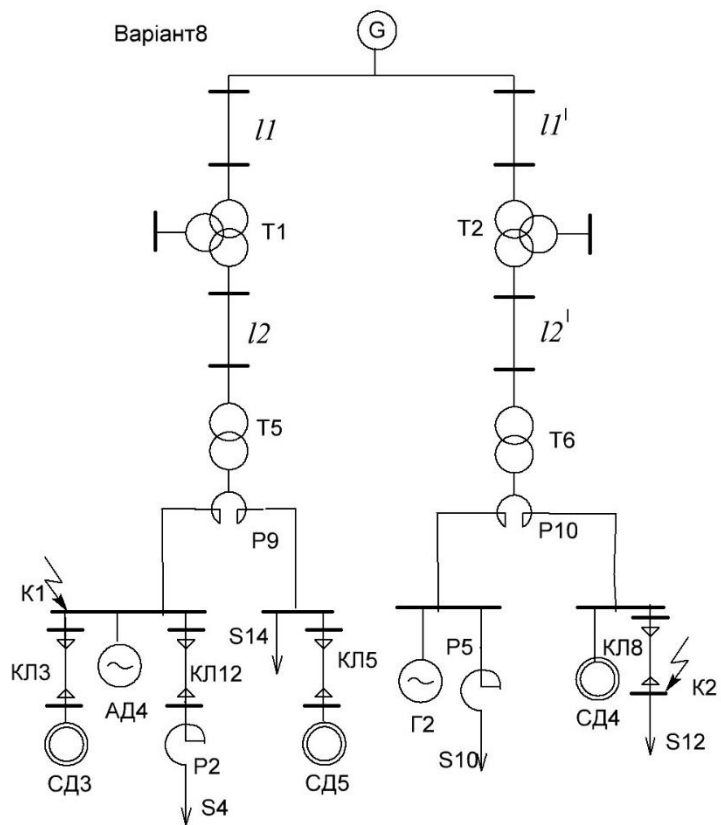


Рисунок Б.8 – Варіант 8

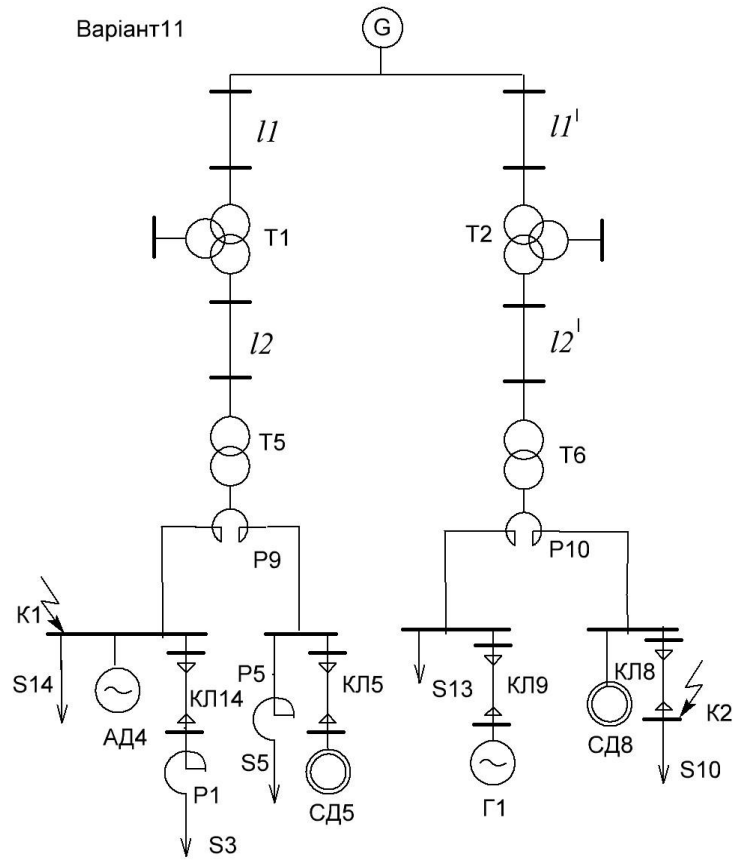


Рисунок Б.11 – Варіант 11

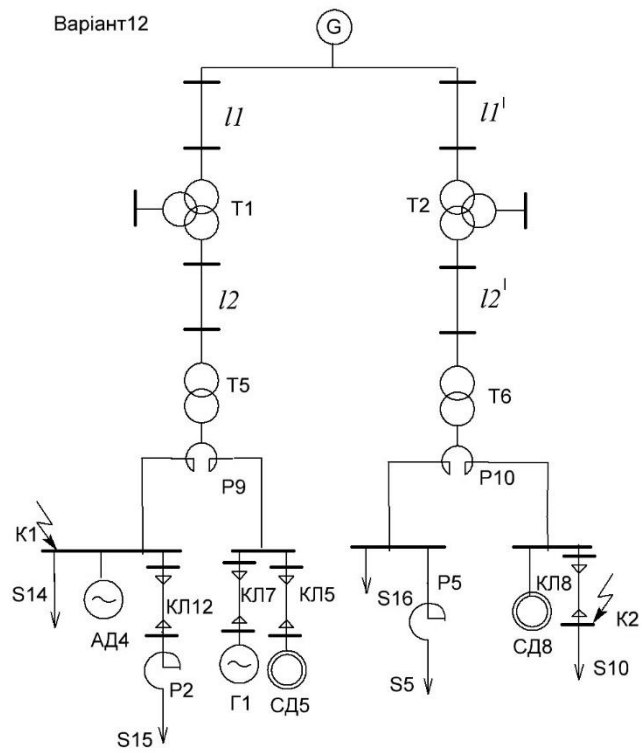


Рисунок Б.12 – Варіант 12

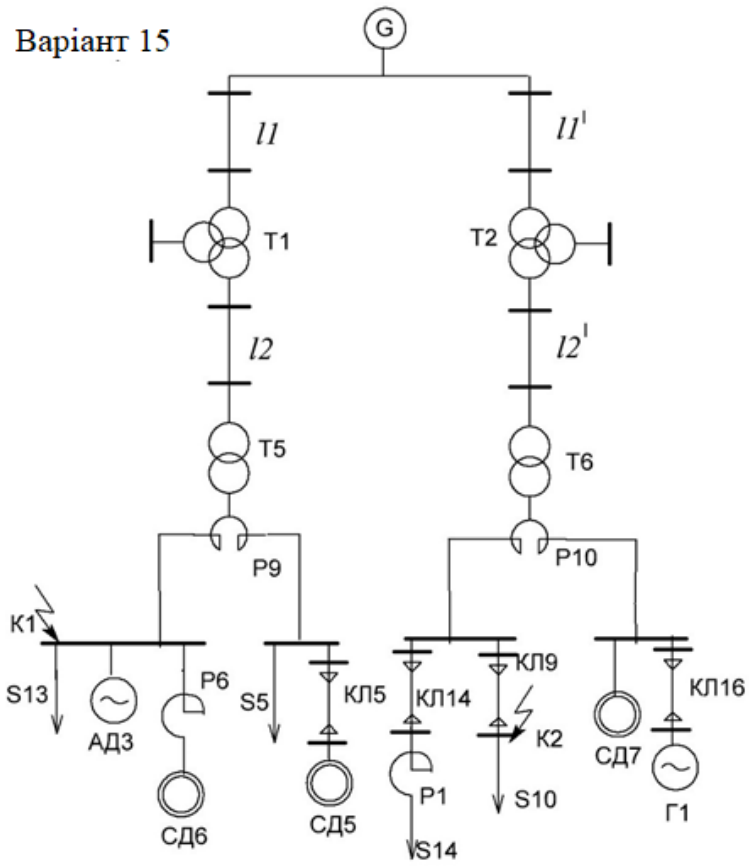


Рисунок Б.15 – Варіант 15

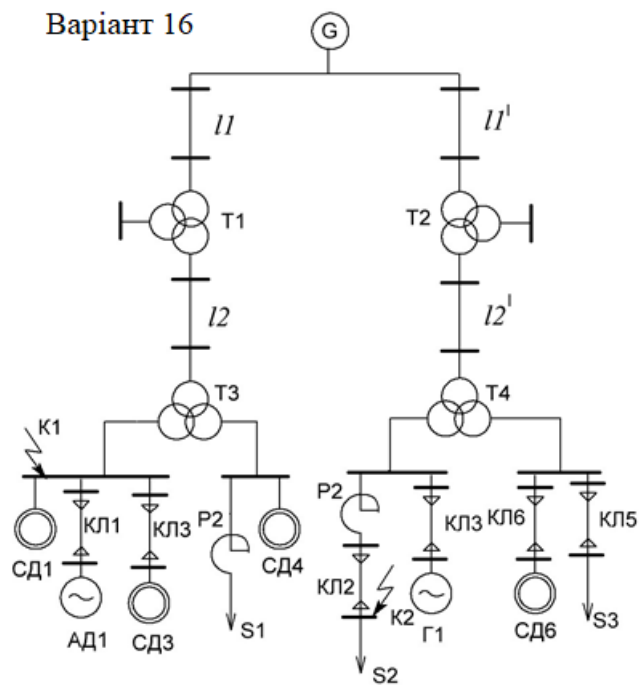

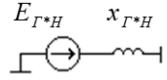
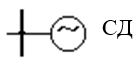
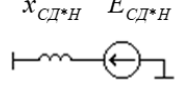
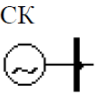
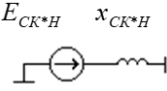

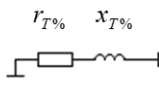

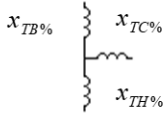

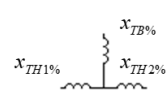


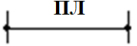

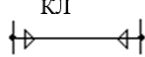
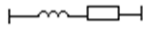
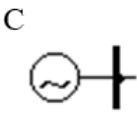
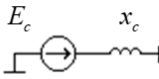
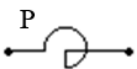
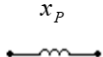
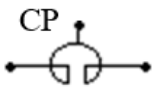
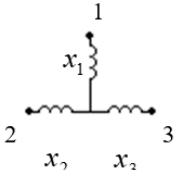

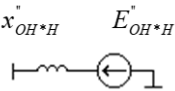
Рисунок Б.16 – Варіант 16

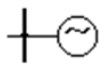
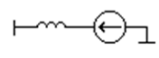
ДОДАТОК В

Розрахунок параметрів схем заміщення

Таблиця В.1 – Розрахункові схеми (РС) елементів СЕП СЭС та їх схеми заміщення (СЗ)

РС	Параметри РС	СЗ	Параметри СЗ
Синхронний генератор			
	$S_H; U_H; x_d'';$ $\cos \varphi_H$		$E_{*H}'' = \sqrt{(1 + x_d'' \sin \varphi_H)^2 + (x_d'' \cos \varphi_H)^2};$ $E_{Г*H} = E_{*H}''; x_{Г*H} = x_d''$
Синхронний двигун			
	$S_H; U_H; \cos \varphi_H;$ $I_{n*H}; M_{n*H}$		$x_{сд*H} = \frac{1}{I_{n*H}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{n*H}}{I_{n*H}}\right)^2};$ $E_{сд*H} = \sqrt{(1 \pm x_{сд*H} \sin \varphi_n)^2 + (x_{сд*H} \cos \varphi_H)^2}$
Синхронний компенсатор			
	$S_H; U_H; x_d''$		$x_{ск*H} = x_d'';$ $E_{ск*H} = 1 \pm x_d''$
Двообмотковий трансформатор			
	$S_H; U_{HB}; U_{HH};$ $\Delta P_K; u_{K\%}$		$z_{T\%} = u_{K\%};$ $r_{T\%} = \Delta P_K;$ $x_{T\%} = \sqrt{z_{T\%}^2 - r_{T\%}^2}$
Триобмотковий трансформатор (автотрансформатор)			
	$S_H; U_{HB}; U_{HH}; U_{HC};$ $\Delta P_K; u_{кВ-Н\%},$ $u_{кС-Н\%}, u_{кВ-С\%}$		$x_{ТВ\%} = 0.5(u_{кВ-Н\%} + u_{кВ-С\%} - u_{кС-Н\%});$ $x_{ТС\%} = 0.5(u_{кВ-С\%} + u_{кС-Н\%} - u_{кВ-Н\%});$ $x_{ТН\%} = 0.5(u_{кВ-Н\%} + u_{кС-Н\%} - u_{кВ-С\%})$
Триобмотковий трансформатор, розчеплений на дві частини ($k_p = 3,5$)			
	$S_H; U_{HB}; U_{HH};$ $\Delta P_K; u_{кВ-Н\%}$		$x_{ТВ\%} = 0.125u_{кВ-Н\%}$ $x_{ТН1\%} = x_{ТН2\%} = 1.75u_{кВ-Н\%}$

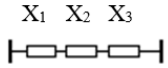
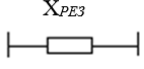
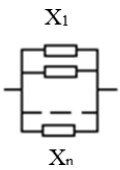
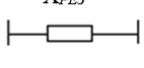
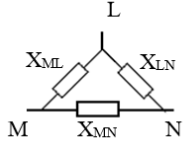
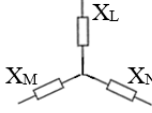
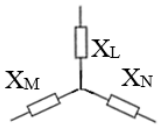
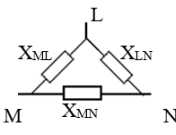
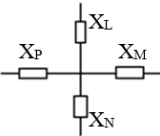
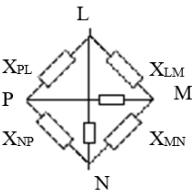
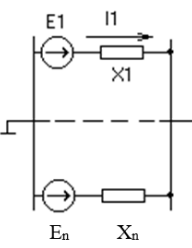
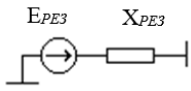
РС	Параметри РС	СЗ	Параметри СЗ
Повітряна лінія			
	$l_{ПЛ}; x_0$		$x_{ПЛ} = x_0 l_{ПЛ}$
Кабельна лінія			
	$l_{КЛ}; x_0; r_0$		$r_{КЛ} = r_0 l_{КЛ};$ $x_{КЛ} = x_0 l_{КЛ}$
Система як джерело			
	<ol style="list-style-type: none"> $S_{Hc}; x_{c*H}; U_c$ $S_{Kc}; x_{c*H}; U_c$ $I_{Kc}; U_c$ $S_{відк} (I_{відк}); U_c$ 		$E_c = \frac{U_c}{\sqrt{3}};$ <ol style="list-style-type: none"> $x_c = x_{c*H} U_c^2 / S_{Hc}$ $x_c = U_c^2 / S_{Kc}$ $x_c = U_c / \sqrt{3} I_{Kc}$ $x_c = U_c^2 / S_{отк}$ $(x_c = U_c / \sqrt{3} I_{отк})$
Реактор			
	$U_H; I_H; x_{P\%}$		$x_P = \frac{x_{P\%}}{100} \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$
Подвоєний реактор			
	$U_H; 2 \times I_H;$ $x_P; m$		$x_1 = -m x_P;$ $x_2 = x_3 = (1 + m) x_P$
Узагальнене навантаження			
	$S_H U_H;$		$E_{OH*H}'' = 0.85;$ $x_{OH*H}'' = 0.35$

РС	Параметри РС	СЗ	Параметри СЗ
Асинхронный двигатель			
АД 	$P_H; \cos \varphi_H;$ $\eta_H; U_H;$ I_{n^*H}	$x''_{AD^*H} \quad E''_{AD^*H}$ 	$x''_{AD^*H} = \frac{1}{I_{n^*H}};$ $E''_{AD^*H} = \sqrt{(1 - x_{AD^*H} \sin \varphi_H)^2 + (x_{AD^*H} \cos \varphi_H)^2}$

ДОДАТОК Г

Формули для перетворення схем та визначення струморозподілу

Таблиця Г.1 – Основні формули для перетворення схем та визначення струморозподілу

Перетворення	Схема до перетворення	Схема після перетворення	Формули для визначення параметрів схеми після перетворення
Послідовне з'єднання			$x_{PE3} = x_1 + x_2 + \dots + x_n$
Паралельне з'єднання			$x_{PE3} = \frac{1}{y_{PE3}} = \frac{1}{y_1 + y_2 + \dots + y_n} =$ $= \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$
Перетворення трикутника в зірку			$x_L = \frac{x_{LN} x_{ML}}{x_{LN} + x_{MN} + x_{ML}}$ $x_N = \frac{x_{LN} x_{MN}}{x_{LN} + x_{MN} + x_{ML}}$ $x_M = \frac{x_{ML} x_{MN}}{x_{LN} + x_{MN} + x_{ML}}$
Перетворення зірки в трикутник			$x_{LN} = x_L + x_N + \frac{x_L x_N}{x_M}$ $x_{MN} = x_N + x_M + \frac{x_N x_M}{x_L}$ $x_{ML} = x_M + x_L + \frac{x_L x_M}{x_N}$
Перетворення багатопроменевої зірки			$x_{LM} = x_L x_M \sum y$ $x_{MN} = x_M x_N \sum y$ $\sum y = \frac{1}{x_L} + \frac{1}{x_M} + \frac{1}{x_N} + \frac{1}{x_p}$
Заміна декількох джерел еквівалентними			$E_{PE3} = \frac{1}{y_{PE3}} \sum_{k=1}^n Y_k E_k$ $E_{PE3} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2}$