

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КУРСОВОГО
ПРОЕКТУ ПО КУРСУ***

“Перехідні процеси в електроенергетиці ”

для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка"

КРОПИВНИЦЬКИЙ
2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КУРСОВОГО
ПРОЕКТУ ПО КУРСУ***

“Перехідні процеси в електроенергетиці ”

для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка"

*Ухвалено на засіданні кафедри
електротехнічних систем та
енергетичного менеджменту
Протокол № 4 від 17.10.2018 р.*

КРОПИВНИЦЬКИЙ
2018

Методичні вказівки до курсового проекту по курсу “Перехідні процеси в електроенергетиці ” для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Укл.: І.О. Переверзєв, А.І. Котиш – Кропивницький: ЦНТУ, 2018 – 127 с.

Укладачі: І.О. Переверзєв– доцент, кандидат технічних наук
А.І. Котиш – доцент, кандидат технічних наук

ВСТУП

Методичні вказівки містять необхідні дані про об'єм, порядок виконання курсового проекту, методів розрахунків коротких замикань (к.з.) при проектуванні елементів станцій, систем електропостачання промислових підприємств і сільського господарства.

Мета курсового проекту-систематизувати і поглибити теоретичні знання за рахунок самостійного рішення інженерно-технічних задач; розвинути практичні навички при виконанні розрахунків.

1. Завдання на курсовий проект .

Завдання на курсовий проект в вигляді вихідних схем і таблиць з даними приведені в додатках 1,2. Додаток 1 служить для виконання пунктів 2-4 змісту курсового проекту. Додаток 2 для виконання пункту 5. Варіант завдання видається викладачем. Він містить два набору цифр. Перший набір цифр містить п'ятизначне число. Перші два знаки визначають номер схеми (додаток 1), третій знак варіант в таблиці вихідних даних (додаток 1), четверта цифра-точка 3^х фазного к.з., п'ята цифра визначає точку несиметричного кл.. Якщо п'ята цифра непарна розраховується однофазне к.з., якщо парна двухфазне к.з. на землю.

Другий набір цифр містить трьохзначне число і служить для виконання пункту 5 змісту курсового проекту. Перша цифра визначає номер схеми (додаток 2), інші дві - варіанти в таблиці вихідних даних (додаток 2).

2. Зміст курсового проекту.

1. Вступ
2. Аналітичний метод розрахунку 3^х фазного к.з. в заданій точці
 - 2.1. Складання схеми заміщення й вибір базисних одиниць.
 - 2.2. Визначення параметрів елементів в відносних базисних одиницях із точним приведенням до базисних умов.
 - 2.3. Визначення еквівалентних значень ЕРС і реактивного опору.
 - 2.4. Складання схем заміщення для активних опорів.
 - 2.5. Визначення еквівалентного активного опору.
 - 2.6. Розрахунок значень надперехідного, аперіодичного, ударного струму 3^х фазного к.з.
3. Розрахунок струмів 3^х фазного к.з. для любого моменту часу перехідного процесу з використанням розрахункових кривих.
 - 3.1. Складання схем заміщення.

- 3.2. Розрахунок параметрів елементів із приближеним приведенням.
- 3.3. Перетворення схем заміщення і визначення розрахункової реактивності.
- 3.5. Визначення періодичної складової струму к.з. для різних моментів часу.
- 3.6. Визначення значення надперехідного струму к.з. в заданій точці.
4. Розрахунок несиметричного к.з. в заданій точці схеми.
- 4.1. Визначення еквівалентних ЕРС і індуктивного опору прямої послідовності
- 4.2. Визначення еквівалентного опору зворотної послідовності.
- 4.3. Визначення еквівалентного опору нульової послідовності.
- 4.4. Розрахунок значення несиметричного струму к.з.
- 4.5. Визначення значення струму і напруги для побудови відповідних векторних діаграм.
5. Розрахунок 3^x фазного і однофазного к.з. в мережі напругою до 1000В.
- 5.1. Аналітичний розрахунок 3^x фазного і однофазного к.з.
- 5.2. Розрахунок 3^x фазного і однофазного к.з. за допомогою програмного пакету.
6. Література.
- Для ілюстрації проектних рішень слугує графічна частина проекту виконаної на кресленні формату А1.
- Креслення містить:
- Вихідні схеми для креслення;
 - Графік повного струму к.з. і його складових (по результатам П.2.6);
 - Графік зміни періодичної складової струму к.з. в часі (по результатам П.3.4);
 - Векторні діаграми струмів і напруг (по результатам П.4.5);
 - Результати розрахунків по пункту 5.1

3. Загальні відомості про електромагнітні перехідні процеси в системах електропостачання

Система електропостачання - це частина електричної системи яка включає в себе живлячі та розподіляючі мережі, трансформатори, компенсуючі пристрої та навантаження. В свою чергу, під електричною системою розуміють сукупність елементів, пов'язаних єдиним процесом виробництва, передачі та споживання електричної енергії. В склад електричної системи входять такі елементи як генератори і трансформатори, лінії електропередачі (ЛЕП), навантаження, елементи управління, регулювання, проти аварійної автоматики і т.д. Сукупність процесів, які протікають в системі певний момент часу, чи на інтервалі часу, називаються режимом системи. Останній характеризується параметрами, визначаючими умови роботи системи. Це значення напруг в різних точках системи, токів та потужностей, частоти, кутів зсуву фаз між е.р.с. генераторів та напругою на шинах приймачів і т.д.

Режим роботи електричної системи може бути встановившимся та перехідним (не встановившимся). Перехідні режими роботи (перехідні процеси) виникають в електричній системі при зміні умов її роботи, які протікають як при нормальній експлуатації (включення та виключення окремих генераторів, навантажень, ЛЕП і т.д), так і в аварійних ситуаціях (коротке замикання, обриви проводів, замкнення фазного проводу на землю і т.д).

Довільний перехідний процес супроводжується порушенням початкового електромагнітного стану елементів системи та швидкості обертання електричних машин, тобто процес характеризується взаємозв'язаними між собою електромагнітними та механічними перетвореннями. Однак, при визначених умовах допустимо розглядати перехідний процес з умовою тільки електромагнітних перетворень. Так, наприклад, при коротких замиканнях в точках, які мають значну електричну віддаленість від генераторів, перехідний процес можна розглядати як електромагнітний. Даний випадок відповідає схемам сільського електропостачання.

Необхідність кількісної оцінки тих чи інших величин під час електромагнітного перехідного процесу і в першу чергу, під час процесу короткого замикання, виникає в зв'язку з вимогами забезпечення надійної роботи окремих елементів та електричної системи цілому. Короткі замикання в електричній системі є найбільш розповсюдженими і в той же час найбільш небезпечними видами ушкоджень, які можуть викликати.

- 1) значне зниження напруги на шинах споживачів і порушення їх нормальної роботи;
- 2) руйнування пошкодженого елемента електричною дугою;
- 3) руйнування обладнання в результаті теплової та

електродинамічної дії струму короткого замикання;

4) порушення синхронної роботи системи.

Коротким замиканням (к.з.) називається будь-яке непередбачене нормальними умовами роботи замикання між фазами, а в системах із заземленими нейтралями (або чотирьохпровідними) – крім того замикання одної або декількох фаз на землю (або на нульовий провід).

В трьохфазних системах із заземленими нейтралями (із напругою 110 кВ і більше) розрізняють наступні основні види:

- 1) трьохфазне к.з., тобто одночасне замикання всіх фаз в одній точці (умовне позначення на схемах $K^{(3)}$);
- 2) двофазне к.з. ($K^{(2)}$);
- 3) однофазне к.з. ($K^{(1)}$);
- 4) двофазне к.з. на землю, тобто замикання між двома фазами з одночасним замиканням тієї ж точки на землю ($K^{(1,1)}$).

Короткі замикання можуть бути металічними глухими і через перехідний опір (наприклад, через опір електричної дуги). Трьохфазне металічне к.з. є симетричним, та як в цьому випадку всі фази знаходяться в однакових умовах, як і в нормальному режимі. Всі останні види к.з. є несиметричними.

В системах з ізолюваними нейтралями або з нейтралями, заземленими через компенсуючі пристрої (системи з напругою 6, 10, 20, 35 кВ) замикання однієї фази на землю називається простим замиканням $K_3^{(1)}$, а замикання на землю різних фаз в двох різних точках мережі називається подвійним замиканням на землю $K_{дв}^{(1,1)}$.

По даних багаторічної аварійної статистики в кількісному відношенні к.з. розподіляються так:

$K^{(3)} \approx 5\%$, $K^{(2)} \approx 10\%$, $K^{(1)}$ і $K_3^{(1)} \approx 65\%$, $K^{(1,1)}$ і $K_{дв}^{(1,1)} \approx 20\%$. В процесі аварії можливі переходи одного виду к.з. в другий вид. Причинами к.з. є порушення ізоляції обладнання внаслідок механічних пошкоджень, старіння, перенапружень та прямих ударів блискавки, перекриття струмоведучих частин птахами і тваринами, неправильних дій експлуатаційного персоналу і т.д.

Враховуючи небезпечні наслідки коротких замикань при проектуванні та експлуатації слід передбачати застережливі заходи. При цьому виникає необхідність у виконанні розрахунків процесу короткого замикання. Практично такі розрахунки зводяться до виявлення величини струму в місті к.з., а іноді також до виявлення струмів і напруг в окремих гілках і точках схеми, їх симетричних складових і розподіл останніх в системі.

Результати розрахунків необхідні для вирішення ряду задач, а

саме таких як:

- 1) порівняння, оцінка і вибір схеми електричних з'єднань станцій підстанцій, системи;
- 2) вибір апаратури електроустановок і перевірка її по умовах роботи при к.з. (перевірка на термічну і динамічну стійкість);
- 3) проектування і налагодження пристроїв релейного захисту і автоматики;
- 4) аналіз аварій і т.д.

Точні розрахунки перехідного процесу к.з. в сучасній електричній системі дуже складні. Тому для спрощення вводять ряд припущень, які не вносять суттєвих похибок в розрахунки. Основні припущення такі:

- 1) збереження симетрії трьохфазної системи (за виключення місця к.з.);
- 2) лінійність усіх елементів схеми;
- 3) нехтування струмами намагнічування трансформаторів;
- 4) нехтування активними опорами елементів схеми (якщо

$\frac{r}{x} \leq \frac{1}{3}$), і врахування їх тільки при оцінці ступеню затухання апериодичних складових струмів к.з.;

- 5) нехтування перехідним опором в місці к.з.;
- 6) нехтування розосередженою ємністю ліній, за виключенням ліній напругою вище 220 кВ;
- 7) приблизний облік навантажень у вигляді постійного індуктивного опору;
- 8) відсутність коливань генераторів.

Для розрахунку перехідних процесів к.з. використовуються аналітичні і графоаналітичні методи, метод розрахункових кривих і метод спрямлених характеристик, спеціальні розрахункові моделі, фізичне моделювання і математичне моделювання з використанням обчислювальних машин.

4. Перехідний електромагнітний процес при симетричному к.з. в трьохфазному колі, під'єднаного до джерела необмеженої потужності

Дане коло являє собою джерело необмеженої потужності (систему С), живлячий через трансформатор (Т) навантаження (Н). Принципові схеми в однолінійному і трьохлінійному зображеннях приведені відповідно на рис. 4.1,а та рис. 4.1,б.

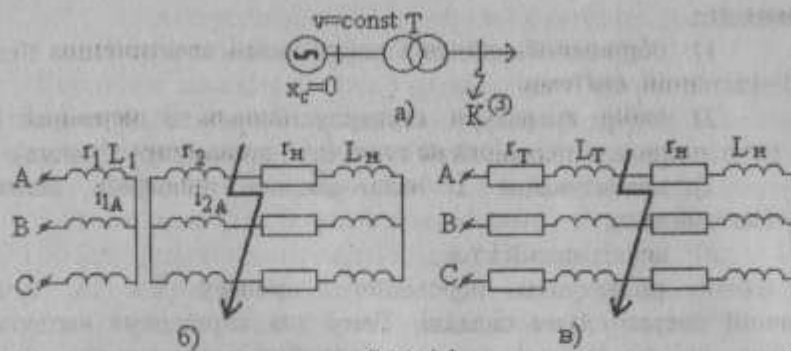


Рис. 4.1

Джерело необмеженої (безкінечної) потужності характеризується тим, що його внутрішній опір за величиною близький до нуля ($Z_{вн} \ll Z_{внеш}$; $X_c = 0$), а напруга незмінна при довільних режимах роботи. В схемі заміщення кола (рис. 4.1, в) опір намагнічування трансформатора приймаємо рівним $X_m = \infty$, що відповідає припущенню про нехтування струмами намагнічування. На схемі рис. 4.1, в.

$r_T = r_1 + r_2$ – активний опір трансформатора;

$L_T = L_1 + L_2 - 2M$ – індуктивність розсіювання трансформатора обумовлена потоками розсіювання обох обмоток. Попередній режиму к.з. напруга і струм в колі дорівнюють:

$$\begin{aligned} U_A &= U_m \sin(\omega t + \alpha); & i_A &= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \\ U_B &= U_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ); & i_B &= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 120^\circ) \\ U_C &= U_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ); & i_C &= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi + 120^\circ) \end{aligned} \quad (4.1)$$

де α – фаза включення, чи кут, визначаючий значення напруги в момент $t=0$;

φ – кут фаз між током та напругою;

Z – результуючий опір схеми $Z = Z_T + Z_H$.

Так як в колі є індуктивності, то перехід від нормального режиму до режиму к.з. не може відбутись миттєво (стрибком) і струми кожної фази в момент порушення режиму будуть рівні попереднім миттєвим значенням струмів в цих фазах.

Ланка кола за точкою к.з. виявляється відключеною (зашунтованою) від джерела живлення та струми в його фазах підтримуються за рахунок запасеної в індуктивностях L_H енергії магнітного поля. Остання витрачається на нагрів активних опорів r_H . Процес як відомо, називається вільним та протікає в такому колі

аперіодично, затухаючи з постійною часу $T_{al} = \frac{L_H}{r_H}$.

На ланці кола, яка виявилася підключеною до джерела крім вільного струму, пов'язаного з зміною енергії магнітного поля індуктивності L_T , буде вимушений періодичний струм нового режиму (режиму к.з.).

Миттєві значення струмів та напруг кожної фази, наприклад фази А, зв'язані диференціальним рівнянням

$$U_A = i_A r_T + L_T \frac{di_A}{dt} \quad (4.2)$$

рішення якого має вигляд (нижче індекс "А" опущений):

$$i_k = i_n + i_a = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a(0)} e^{-t/T_a} \quad (4.3)$$

де

Z_k – опір кола к.з., $Z_k = Z_T$;

φ_k – кут зсуву фаз в колі к.з.;

T_a – постійна часу кола к.з.;

i_n – періодична складова струму к.з.;

$i_{a(0)}$ – початкове значення вільної (аперіодичної) складової струму к.з., яка визначається із умови

$$i(0) = i_n(0) + i_a(0) = i_0 \quad (4.4)$$

Тут $i(0)$ – струм в початковий момент к.з. при $t=0_{(+)}$

i_0 – струм попереднього режиму в кінцевий момент часу перед к.з., тобто при $t=0_{(-)}$.

$$\text{З (4.4) маємо } i_a(0) = i_0 - i_n(0) \quad (4.5)$$

Підставивши в (4.5) значення струму i_0 в фазі А при $t=0$ із (4.1) та $i_n(0)$ із (4.3) отримаємо:

$$i_a(0) = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z_k} \sin(\alpha - \varphi_k) \quad (4.6)$$

тоді вираз струму для довільного моменту часу перехідного процесу запишеться так

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + \left[\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z_k} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] e^{-t/T_a} = \\ &= I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-t/T_a} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Осцилограми струмів в фазі А показані на рис. 4.2.

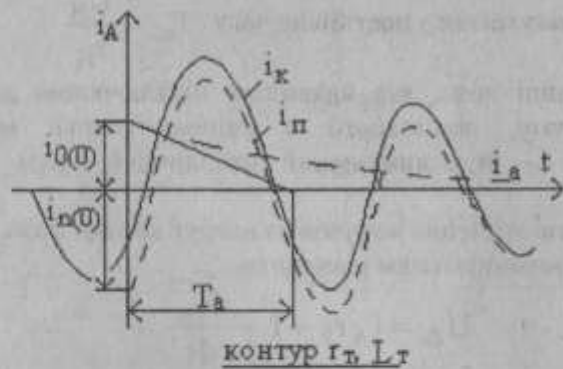


Рис. 4.2.

Таким чином, повний струм короткого замикання в перехідному режимі характеризується двома складовими: вимушеною (періодичною, синусоїдною) та вільною (аперіодичною). Періодична складова струму к.з. при живленні від системи має постійну для довільного моменту часу амплітуду (рис. 4.2), аперіодична складова зменшується зі швидкістю, яка визначається постійною T_a , та викривляє в цей час криву повного струму к.з., зміщуючи її відносно вісі часу. Чим більше початкове значення аперіодичної складової $i_{a(0)}$, тим більше зміщення кривої повного струму і тим більшим будуть миттєві значення повного струму к.з. в перехідному режимі. Як слід з виразів (4.5, 4.6) найбільше початкове значення аперіодичної складової відповідає випадку, коли струм перед моментом к.з. в колі рівний нулю $i_0=0$, а періодична складова струму в момент к.з. проходить через свій додатний або від'ємний максимум $i_{n(0)}=I_{nm}$. Таким чином, умови виникнення найбільшої аперіодичної складової струму к.з. та максимуму миттєвого значення повного струму к.з. записуються наступним чином (для кола з більшою індуктивністю).

$$i_0=0; \quad \varphi_k=\frac{\pi}{2}; \quad \alpha=0; \quad \left(\alpha - \varphi_k = \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.8)$$

Осцилограма струму к.з. для цих умов приведена на рис. 4.3,а. Максимальне значення повного струму к.з. називають ударним струмом. Ударний струм (пік струму) настає приблизно через півперіода, тобто через $t=0,01$ с після моменту к.з. В відповідності з загальним виразом (4.7) та умовами (4.8) для ударного струму к.з. маємо:

$$i_y = I_{nm} + i_{a(0)} e^{-\frac{0,01}{T_a}} = I_{nm} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) = K_y I_{nm} \quad (4.9)$$

де $K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ - ударний коефіцієнт, який показує перевищення ударного струму над періодичною складовою струму к.з.

Якщо живлення кола відбувається від джерела обмеженої потужності (наприклад, від окремого генератора), то під час перехідного процесу змінюються як аперіодична, так і амплітуда періодичної складової струму к.з. В зв'язку з цим більш суворим є наступний вираз для ударного струму

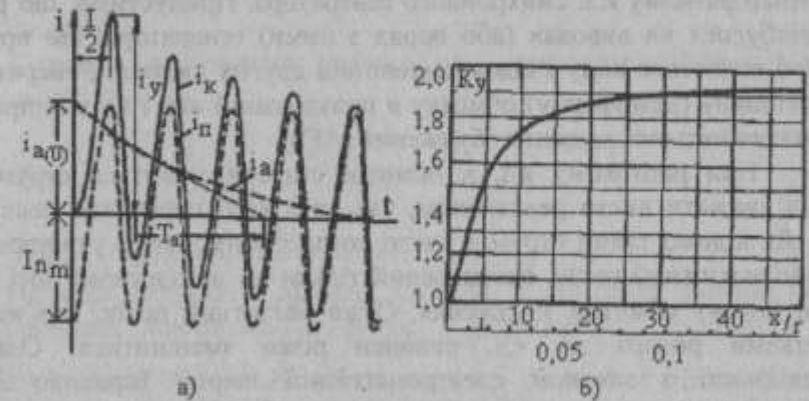


Рис. 4.3

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y I_{\Pi}'' \quad (4.10)$$

де I_{Π}'' - діюче значення періодичної складової струму в початковий момент к.з. (в надперехідному режимі).

З (4.9) виходить, що

$$1 < K_y < 2$$

При $\frac{x_k}{r_k} \rightarrow 0$, $K_y \rightarrow 1$; якщо $\frac{x_k}{r_k} \rightarrow 2$ залежність ударного

коефіцієнта від відношення $\frac{x_k}{r_k}$ та від константи T_a показана на рис. 4.3,б.

При розрахунках струмів к.з. в складних розгалужених схемах ударний коефіцієнт оцінюють за значенням еквівалентної постійної часу

$$T_{a\Sigma} = \frac{x_{k\Sigma}}{\omega r_{k\Sigma}} \quad (4.12)$$

де $x_{k\Sigma}$, $r_{k\Sigma}$ - сумарні індуктивні та активні опори схеми відносно точки к.з. відповідно в чисто реактивній ($r=0$) і в чисто активній ($x=0$) схемах заміщення.

5. Перехідний процес в синхронному генераторі при трьохфазному короткому замиканні.

Процес короткого замикання генератора відмінний від

аналогічного процесу в колі, що живиться джерелом необмеженої потужності деякими особливостями, обумовленими взаємним індуктивним впливом між колом статора та обертаючимися колами ротора.

Нижче розглянемо фізичну сторону ходу перехідного процесу при трьохфазному к.з. синхронного генератора. Припустимо, що раптово к.з. відбулося на виводах (або поряд з ними) генератора, що працює в режимі холостого ходу і відокремлено від других джерел. Генератор має заспокійливу (демпферну) обмотку в повздовжній вісі і не має пристрою автоматичного регулювання збудження (АРЗ).

При раптовому к.з. в обмотці статора з'явиться струм, який можна вважати чисто реактивним, так як в колі переважає реактивний опір. Як відомо такий струм є чисто повздовжнім, тобто утворюючим в машині магнітний потік, направлений тільки по повздовжній вісі ротора проти потоку обмотки збудження. Отже магнітний потік, пов'язаний з обмотками ротора до к.з. повинен різко зменшитися. Однак, у відповідності з законом електромагнітної інерції (правило Ленца), магнітний потік, пов'язаний з якою-небудь обмоткою миттєво змінитися не може і тому в перший момент режиму к.з. потік ротора повинен зберігатися попереднім. Ця постійність потоку ротора забезпечується за рахунок появи в його обмотках (збудження та заспокійливій) намагнічуючих вільних струмів, компенсуючи розмагнічуючу дію струму в обмотках статора. Джерелом вільних струмів є е.р.с., наведена в обмотках ротора за рахунок наявності уже в перший момент к.з. зміни швидкості магнітного потоку в обмотках ротора. Через активні опори обмоток ротора вільні струми в них починають затухати за законами затухання вільних струмів в двох магнітопов'язаних колах. Протягом декількох періодів з постійною часу, так званого, надперехідного режиму T_d'' відбувається перерозподіл вільних струмів в обмотках ротора. Струм в обмотці збудження збільшується в порівнянні з початковим значенням, а в заспокійливій обмотці практично зникає. Далі струми затухають більш повільніше з постійною часу, так званого перехідного режиму T_d' .

У відповідності з описаною зміною струмів в обмотках ротора відбувається зміна періодичного струму статора. В початковий момент, внаслідок протидії вільних струмів ротора, магнітний потік статора не може проникнути в ротор і витісняється в повітряний прошарок, замикаючись шляхами малої магнітної провідності. В зв'язку з цим реактивність генератора, що називається надперехідною, зменшується в порівнянні з реактивністю встановленого режиму. Таким чином, генератор в цей момент характеризується надперехідною повздовжньою реактивністю x_d'' і надперехідною повздовжньою е.р.с. E_q'' , яка пропорційна результуючому потоку обмотки збудження і незмінна в

перший момент перехідного процесу. Е.р.с. надперехідного режиму може бути обчислений за виразом:

$$E_{q(0)}'' = E_{q_0}'' = U_{q_0} + I_{d_0} \cdot x_d'' \quad (5.1)$$

де U_{q_0} , I_{d_0} - складові напруги та струму попереднього режиму роботи генератора.

Струм в початковий момент к.з. виявляється найбільшим і визначається:

$$I_{d(0)}'' = \frac{E_{q(0)}''}{x_d + x_{вн}} \quad (5.2)$$

$x_{вн}$ - опір зовнішнього кола.

По мірі затухання вільних струмів в обмотках ротора потік статора починає проникати в ротор і реактивність генератора по повздовжній вісі збільшується від x_d'' до x_d (значення реактивності у встановившомуся режимі). По закінченні надперехідного періоду затухання вільних струмів (за цей час, як правило, практично затухають вільні струми в заспокійливій обмотці) генератор характеризується перехідною реактивністю x_d' та перехідною е.р.с. E_q' . Ці значення використовують для визначення струму в початковий момент к.з. в генераторах без заспокійливих обмоток:

$$I_{d(0)}' = \frac{E_{q(0)}'}{x_d' + x_{вн}} \quad (5.3)$$

$$E_{q(0)}' = E_{q_0}' = U_{q_0} + I_{d_0}' \cdot x_d' \quad (5.4)$$

Таким чином, по мірі затухання вільних струмів в обмотках ротора розмагнічуюча дія струмів статора збільшується і це призводить до збільшення реактивного опору генератору по повздовжній вісі, до зменшення результуючого потокозчеплення обмотки збудження періодичною складовою струму статора до його значення у встановившомуся режимі к.з. Останнє визначається виразом:

$$I_{d\infty} = \frac{E_{q\infty}}{x_d + x_{вн}} \quad (5.5)$$

Е.р.с. режиму к.з. який встановився

$$E_{q\infty} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 x_d)^2} \quad (5.6)$$

де U_0 , I_0 , $\cos \varphi_0$ - які передують режиму к.з. напруга, струм і кут зсуву фаз між ними.

Швидке зменшення періодичної складової струму к.з. в перші декілька періодів відповідає затуханню намагнічуючих вільних струмів в заспокійливих обмотках ротора, наступне відносно повільне затухання відповідає повільному затуханню вільних струмів в обмотці збудження.

Струм к.з. генератора в перехідному режимі має крім періодичної і аперіодичну складову, затухаючу з постійною часу T_d , яка обумовлена індуктивними і активними опорами статора і зовнішнього кола к.з. Поява цієї складової струму к.з. пояснюється наступним. Магнітні потоки, зчеплені тільки з обмоткою статора (потоки розсіювання) при к.з., супроводжуються раптовим збільшенням струмів статора, не можуть, як відмічалось раніше, миттєво змінитися. Тому в обмотці статора в перший же момент к.з. і виникають вільні аперіодичні струми, які компенсують збільшення періодичного струму статора через к.з. і збільшення магнітного потоку.

Магнітний потік від аперіодичних складових струмів трьох фаз статора практично нерухомий в просторі. Ротор при обертанні пересікає цей потік і в його обмотці збудження виникає струм синхронної частоти. Цей струм створює нерухомий відносно ротора пульсуючий магнітний потік, який обумовлює появу в обмотці статора струму подвійної частоти.

Періодична складова струму ротора і струм подвійної частоти статора затухають одночасно з затуханням аперіодичної складової струму статора.

Криві зміни струмів в генераторі при раптовому к.з. на його виводах приведені на рис. 5.1.



Рис. 5.1

Використовувати вирази (5.1) і (5.2) для визначення початкових струмів к.з. $I'_{d(0)}$ і $I''_{d(0)}$ незручно, тому що при цьому струми і напруги генератора необхідно розкласти на складові по осях d і q . Тому в розрахунках використовують значення е.р.с., знайдені по спрощених виразах:

$$E''_{q(0)} \approx U_0 + I_0 x_d'' \sin \varphi_0 \quad (5.7)$$

$$E'_{q(0)} \approx U_0 + I_0 x_d' \sin \varphi_0 \quad (5.8)$$

Середні значення опорів x_d'' і x_d' , а також е.р.с. $E'_{q(0)}$ і $E''_{q(0)}$

синхронних генераторів, працюючих до к.з. з повним навантаженням, номінальною напругою і $\cos \varphi_0 = 0,8$ можуть бути також взяті з таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Тип генератора	Реактивності відн. од.		Е.Р.С. відн. од.	
	x_d'	x_d''	$E'_{q(0)}$	$E''_{q(0)}$
Турбогенератор потужністю до 100 мВт	0,21	0,125	1,13	1,08
Те саме, потужністю 100-500 мВт	0,21	0,2	1,13	1,12
Гідрогенератор з демпферними обмотками	0,3	0,2	1,18	1,12
Те саме, без демпферних обмоток	0,3	0,27	1,18	1,18

При наявності у генератора пристроїв автоматичного регулювання збудження (АРЗ) їх вплив на перехідний процес короткого замикання зводиться в деякій мірі до сповільнення затухання вільних струмів. Так як з моменту дії АРЗ струм збудження, а, відповідно, і е.р.с. генератора зростають, то струми і напруги при к.з. виявляються завжди більші, а хід кривої струму к.з. набуває різний вигляд. Слід відмітити, що внаслідок інерції регулятора не відбивається на початковому значенні струму к.з.

При наявності у генераторі АРЗ найбільші складності виникають при розрахунках значення струму к.з., що встановилось.

В цьому випадку генератор може працювати або в режимі граничного збудження ($E_q = E_{q \text{ пред}}, U_r < U_{\text{ном}}$), або в режимі нормальної напруги ($E_q < E_{q \text{ пред}}, U_r = U_{\text{ном}}$). Тому розрахунок струмів короткого замикання починають з визначення режиму роботи генератора. З цієї метою визначають критичний опір зовнішнього кола, при короткому замиканні за яким генератор при граничному збудженні забезпечує нормальну напругу на своїх шинах ($U_r = U_{\text{ном}}$)

$$x_{кр.} = x_{d.} \frac{1}{E_{q пред.} - 1} \quad (5.9)$$

а також пов'язаним з ним рівнянням критичного струму.

$$I_{кр.}^{(3)} = \frac{1}{x_{кр.}} \quad (5.10)$$

Отримані значення $x_{кр.}$ порівнюють з опором зовнішнього кола.

Якщо $x_{вн} < x_{кр.}$, то генератор працює в режимі граничного збудження і струм короткого замикання визначають за виразом

$$I_{к.}^{(3)} = \frac{E_{q пред.}}{x_{d.} + x_{вн.}} > I_{кр.}^{(3)} \quad (5.11)$$

тобто генератор вводять в схему заміщення параметрами

$$E_{q пред.} \text{ і } x_{d.}$$

Якщо $x_{вн} > x_{кр.}$ - режим нормальної напруги. Струм визначають за виразом

$$I_{к.}^{(3)} = \frac{1}{x_{вн}} < I_{кр.}^{(3)} \quad (5.12)$$

а генератор вводять в схему заміщення параметрами $E_{q.} = U_{ном.} = 1$ і $x_r = 0$.

Середні значення е.р.с. (при номінальному та граничному струмах збудження) і синхронній реактивності по повздовжній вісі слідує:

- для турбогенераторів
 $E_{q0} = 2,26$; $E_{q пред.} = 4,0$; $x_{d.} = 1,7$.
- для гідрогенераторів
 $E_{q0} = 1,8$; $E_{q пред.} = 3,0$; $x_{d.} = 1,15$.

В складних схемах з декількома генераторами, струм від яких надходить до місця к.з. по спільним для них гілкам, поняття зовнішньої реактивності для генераторів втрачає сенс. Тому в цьому випадку розрахунки, пов'язані з визначенням струму к.з., проводять методом послідовних наближень. Для цього довільно задаються для кожного генератора з АРЗ тим чи іншим режимом роботи і вводять їх в схему заміщення відповідними параметрами ($E_{q пред.}$ і $x_{d.}$ або $U_{ном.} = 1$ і $x_r = 0$).

Після визначення струмів в схемі першого наближення перевіряють правильність вибраних режимів. Якщо для генератора був прийнятий режим граничного збудження, то його струм повинен бути $I \geq I_{кр.}$ для генераторів, які працюють в режимі нормальної напруги $I < I_{кр.}$. Якщо

для деяких генераторів прийнятий режим не співпадає з розрахунковим, то схеми їх заміщення змінюють і весь розрахунок проводять повторно.

6. Вплив та врахування навантаження при коротких замиканнях

До електричних схем підключаються навантаження у вигляді зосереджених груп різних споживачів (узагальнене комплексне навантаження), а також у вигляді окремих потужних синхронних та асинхронних двигунів, синхронних компенсаторів, конденсаторів для компенсації реактивної потужності і т.д.

Навантаження може суттєво вплинути на величину струму к.з., а також на розподіл його в схемі. Визначаючи попередній режим роботи генераторів і, отже, їх е.р.с., навантаження таким чином побічно відображається на величині струму к.з. Крім того, в початковому надперехідному режимі к.з. навантаження можуть самостійно виступати в ролі додаткових джерел живлення короткого замикання.

В практичних розрахунках початкового надперехідного струму к.з. враховують окремо лише потужні двигуни, розташовані близько від точки короткого замикання. Е.Р.С. синхронних та асинхронних двигунів залежать від попереднього режиму роботи (U_0 , I_0 , $\cos \varphi_0$) і визначається за виразом:

$$E_0^* = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 \pm I_0 x_{dv})^2} \quad (6.1)$$

чи приблизно

$$E_0^* \approx U_0 \pm I_0 x_{dv} \sin \varphi_0 \quad (6.2)$$

де “-” для асинхронних двигунів.

Е.Р.С. синхронних компенсаторів визначається також, як і для генераторів. Останнє навантаження враховується як узагальнене з параметрами $E_{н.}'' = 0,85$ і $x_{н.}'' = 0,35$, які наведені в номінальних одиницях при повному робочому навантаженні в мВА навантаженнях і середній номінальній напрузі в кВ тої ступені, де вона під'єднана.

Надперехідна реактивність асинхронних двигунів визначається як:

$$x_{dv}'' = \frac{1}{K_n} = \frac{1}{I_{пуск}} \quad (6.3)$$

де K_n , $I_{пуск.}$ - кратність пуску, відносний пусковий струм двигуна.

Ударний коефіцієнт асинхронного двигуна визначається за кривою $K_y(P_n)$ (рис 6.1).

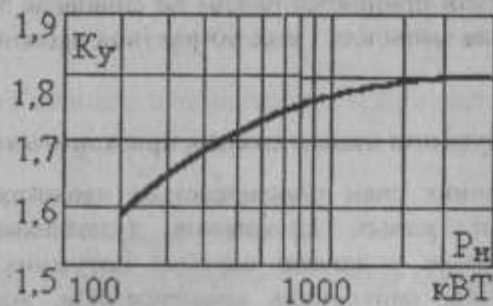


Рис. 6.1

У встановившомуся режимі к.з. навантаження представляється у вигляді гілки, яка шунтує гілку к.з. В зв'язку з цим величина струму к.з. зменшується. Опір узагальненого навантаження приймається рівним $x_{d*} = 1,2$ ($E_{n*} = 0$).

7. Практичні методи розрахунку трифазного струму короткого замикання

7.1. Загальні вказівки

В практичних задачах треба визначити періодичну складову струму, в загальному випадку, для довільного моменту часу перехідного процесу к.з. врахування аперіодичної складової робиться приблизно і приводиться до оцінки міри затухання її і визначенню ударного струму короткого замикання.

Найбільш характерним параметром, визначаючим умови к.з. в кожній точці системи, є величина надперехідного струму к.з. I_k'' чи початкової потужності к.з. S_k^* .

Обчислення періодичної складової струму I_k'' може бути виконана аналітично довільним із методів розрахунку лінійних електричних кіл. Практично частіше використовують метод еквівалентних перетворень, за допомогою якого розрахункову схему заміщення перетворюють до простішого вигляду:

Еквівалентне результуюче джерело – результуючий опір – точка к.з. Струм в такій схемі є струмом в місці короткого замикання. Розгортаючи схему до початкового вигляду можна знайти розподіл струму к.з. в ній.

Для визначення періодичної складової струму в довільний момент часу процесу к.з. використовують спеціальні розрахункові криві.

7.2. Складання схем заміщення. Системи одиниць

Розрахунок періодичної складової струму к.з. починають з складання для початкової розрахункової схеми її еквівалентну схему заміщення. Остання виглядає в однолінійному вигляді (для однієї фази) та вміщає всі елементи розрахункової схеми (генератори, трансформатори, лінії і т.д.), їх зв'язок між собою і точкою к.з. Елементи зводять в схему своїми еквівалентними опорами, а джерела живлення, крім того і е.р.с. (дивись таблицю 7.1). Опори та е.р.с. доцільно позначати номерами та вказувати величини, наприклад, у вигляді дробу, чисельник якої вказує порядковий номер елементу, а знаменник його величину у відносних чи іменних одиницях.

Генератори та навантаження вводять в схему заміщення параметрами, відповідно до моменту часу, для якого розраховується струм к.з. (для $t=0$: $E_q'', x_d'', E_n'', x_n''$; для $t=\infty$: E_q, x_d, x_n).

Параметри елементів розрахункової схеми встановлюються у відповідності з їх паспортними даними. При цьому деякі з них вказуються в іменованих одиницях (Вольт, Ампер, Ом), а інші у відносних одиницях. Наприклад, для повітряних та кабельних ліній електропередач задаються довжина лінії та її питомий опір в Ом/км. Тоді опір лінії в іменованих одиницях знаходиться так

$$\begin{aligned} x_d &= x_0 \ell, \text{ Ом} \\ r_d &= r_0 \ell, \text{ Ом} \end{aligned} \quad (7.1)$$

для генераторів, трансформаторів, струмообмежуючих реакторів, двигунів реакторів, двигунів, узагальненого навантаження опору задаються у відносних одиницях. Як відомо, під відносним значенням якої-небудь величини розуміють її відношення до іншої однойменної фізичної величини, вибраної за одиницю вимірювання. У даному випадку відносні опори вказаних елементів задаються при номінальних умовах, тобто представляють долю від опору, знайденого з виразу:

$$Z = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{U_n^2}{S_n}$$

Тоді опір в однойменних одиницях:

$$x_d'' = x_{d*}'' \frac{U_n^2}{S_n}, \text{ Ом} \quad (7.2)$$

трансформатора

$$x_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \text{ Ом} \quad (7.3)$$

Таблиця 7.1

Найменування	Позначення на схемах	Схема заміщення	Реактивності x елементів		
			Відн. ном. од.	Ом	Відн. баз. од.
Синхронний генератор /двигун, компенсатор/			x_d'', x_d'	$x_d'' \frac{U_H^2}{S_H}$	$x_d \frac{S_6}{S_H}$
Двухобмоточний трансформатор			$\frac{U_k \%}{100}$	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H}$
Трьохобмоточний трансформатор *)			$x_B = 0,5(x_{BH} + x_{BC} - x_{CH})$ $x_C = 0,5(x_{BC} + x_{CH} - x_{BH})$ $x_H = 0,5(x_{BH} + x_{CH} - x_{BC})$	$x_{BH} = \frac{U_{k_{BH}}}{100}$ $x_{CH} = \frac{U_{k_{CH}}}{100}$ $x_{BC} = \frac{U_{k_{BC}}}{100}$	
*) Реактивності в відн. ном. од.					
ЛЕП Повітряна Кабельна			-	$x_0 \cdot \ell$ $x_0, \text{Ом/км}$	$x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U_6^2}$
Струмо-обмежувачий реактор			$x_p \%$	$\frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$	$\frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{I_6}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_6}$
Спирений реактор			$x_1 = k x_p \%$ $x_2 = x_3 = (1+k) x_p \%$ $k \approx 0,5$	$\frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$	$\frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{I_6}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_6}$
Асинхронний двигун			$x_{дв}'' = \frac{1}{k_H} = \frac{1}{I_{пуск*}}$	$\frac{1}{k_H} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$	$\frac{1}{k_H} \cdot \frac{S_6 \eta \cos \varphi}{P_H}$
Узагальнене навантаження			$x_{н.}'' = 0,35$ $E_{н.}'' = 0,85$	$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$0,35 \cdot \frac{S_6}{S_H}$

реактора

$$x_p = \frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}, \text{ Ом} \quad (7.4)$$

асинхронного двигуна

$$x_{дв}'' = \frac{1 \cdot U_H}{K_H \sqrt{3} I_H} = \frac{U_H^2 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{K_H P_H}, \text{ Ом} \quad (7.5)$$

узагальненої (комплексного навантаження)

$$x_H'' = 0,35 \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом} \quad (7.6)$$

де U_H – номінальна напруга елемента (для трансформатора – напруга вищої або нижньої сторони;

K_H – відносний пусковий струм асинхронного двигуна (коефіцієнт кратності струму).

Практично довільна розрахункова схема вміщує трансформатори. Тому при складанні схем заміщення магнітозв'язані ланцюги повинні бути замінені еквівалентним електричним зв'язаним ланцюгом. Складання такої схеми заміщення зводиться до приведення опорів та е.р.с. елементів, які знаходяться на різних ступенях трансформації заданої схеми до якої-небудь однієї ступені, яку приймають за основну.

В загальному випадку, вираз для визначення приведених до основної ступені значень е.р.с. (напруги), струмів та опорів мають вигляд:

$$\dot{E} = (k_1 k_2 \dots k_n) E \quad (7.7)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_n} I \quad (7.8)$$

$$\dot{Z} = (k_1 \cdot k_2 \dots k_n)^2 Z \quad (7.9)$$

де $k_1, k_2, \dots, k_n$ – коефіцієнти трансформації ряду послідовно увімкнених в схемі трансформаторів, які визначаються як відношення їх лінійних напруг в напрямку від вибраної основної ступені напруги до тої ступені, елементи якої підлягають зведенню.

Зведення опорів і е.р.с. до однієї ступені напруги може бути виконано точно з урахуванням дійсних коефіцієнтів трансформації, вказаних в паспортних даних, чи наближено з урахуванням коефіцієнтів трансформації, знайдених як відношення середніх номінальних напруг

$U_{\text{ср.н}}$ відповідних ступіней трансформації. Шкала середніх номінальних напруг слідує: 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.

При наближеному зведенні виразу для розрахунку спрощуються:

$$\dot{E} = \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср}}} E \quad (7.10)$$

$$\dot{I} = \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{ср.осн}}} I \quad (7.11)$$

$$\dot{Z} = \left(\frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср}}} \right)^2 Z \quad (7.12)$$

де $U_{\text{ср}}$ – середня номінальна напруга ступені, з якої відбувається розрахунок;

$U_{\text{ср.осн}}$ – теж саме, вибраної основної ступені.

Е.Р.С. та опори елементів схеми заміщення можуть бути виражені не тільки в іменованих одиницях. Для цього на основній ступені напруги довільно встановлюють, так звані базисні одиниці (чи умови), тобто ті величини, які повинні слугувати відповідним одиницям виміру.

Звичайно задаються базисною потужністю S_6 (яка на всіх ступенях трансформації однакова) та напругою $U_{6\text{осн}}$. Дві інші

$$I_{6\text{осн}} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}; \quad Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{U_6^2}{S_6} \quad (7.13)$$

базисні одиниці вимірювання на інших ступенях напруги пов'язані з базисними одиницями основної ступені через коефіцієнти трансформації

$$\dot{U}_6 = U_{6\text{осн}} \cdot \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \cdots k_n}; \quad \dot{I}_6 = I_{6\text{осн}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdots k_n \quad \text{чи} \quad \dot{I}_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}\dot{U}_6} \quad (7.14)$$

Довільні величини які входять в розрахунок та задані в іменованих одиницях переводяться у відносні базисні одиниці слідує чиним:

$$\begin{aligned} E_{*(6)} &= \frac{E}{U_6}; \quad I_{*(6)} = \frac{I}{I_6}; \quad S_{*(6)} = \frac{S}{S_6}; \\ Z_{*(6)} &= \frac{Z}{Z_6} = Z \frac{\sqrt{3}I_6}{U_6} = Z \frac{S_6}{U_6^2}. \end{aligned} \quad (7.15)$$

де U, I, Z, S – значення величини в іменованих одиницях (кВ, кА, Ом, МВА) на розрахунковій ступені напруги;

U_6, I_6, Z_6, S_6 – базисні одиниці на тій же ступені напруги.

Тут зірочка (*) позначає, що величина виражена у відносних одиницях, а індекс (6) – що ця величина віднесена до базисних одиниць вимірів.

Якщо величини задані у відносних одиницях при номінальних умовах, то їх зведення до базисних умов проходить по слідує чиним співвідношенням:

$$E_{*(6)} = E_{*(н)} \cdot \frac{U_н}{U_6} \quad (7.16)$$

$$Z_{*(6)} = Z_{*(н)} \cdot \frac{I_6}{I_н} \cdot \frac{U_н}{U_6} \quad (7.17)$$

$$\text{чи} \quad Z_{*(6)} = Z_{*(н)} \cdot \frac{S_6}{S_н} \cdot \frac{U_н^2}{U_6^2} \quad (7.18)$$

В наближених розрахунках беруть, що номінальна напруга всіх елементів однієї ступені напруги однакова та рівна середній номінальній напрузі, у відповідності з приведеною шкалою, та приймають $U_6 = U_{\text{ср.н}}$. Тоді розрахункові вирази мають більш простий вигляд:

$$E_{*(6)} = E_{*(н)} \quad (7.19)$$

$$Z_{*(6)} = Z_{*(н)} \frac{S_6}{S_н} \quad (7.20)$$

Має сенс ще раз звернути увагу, що в кожному з приведених вище виразів (7.13-7.18) під U_6, I_6 завжди розуміють базисні напруги та струм тої ступені трансформації, де знаходяться елементи, параметри яких визначаються у відносних базисних одиницях.

Після виконання розрахунків у відносних базисних одиницях, діючі значення напруг, струмів, потужностей в іменованих одиницях знаходять за формулами зворотнього розрахунку:

$$U = U_{*(6)} \cdot U_6 \quad (7.21)$$

$$I = I_{*(6)} \cdot I_6 \quad (7.22)$$

$$S = S_{*(6)} \cdot S_6 \quad (7.23)$$

Точність розрахунків не залежить від того, в якій системі одиниць виражають величини.

7.3 Еквівалентні перетворення схем заміщення

При розрахунках струмів к.з. використовують відомі методи перетворення та спрощення схем. Основними з них є:

а. Визначення результуючого опору послідовно з'єднаних n елементів (наприклад, $x_1, x_2, \dots, x_n$):

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (7.24)$$

б. Визначення результуючого опору при паралельному з'єднанні елементів

$$x_{\Sigma} = \frac{1}{1/x_1 + 1/x_2 + \dots + 1/x_n} \quad (7.25)$$

В окремих випадках має для двох гілок

$$x_{\Sigma} = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} \quad (7.26)$$

для трьох гілок
$$x_{\Sigma} = \frac{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}{x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_1 x_3} \quad (7.27)$$

в. Заміна n генеруючих гілок, які підключені до загального вузлу (т.е. з'єднаних паралельно) одною еквівалентною гілкою:

$$E_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (7.28)$$

В частковому випадку для двох генеруючих гілок маємо

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 x_1 + E_2 x_2}{x_1 + x_2} \quad (7.29)$$

якщо е.р.с. одної гілки рівна нулеві, наприклад, гілка навантаження $E_2=0$, то

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 x_2}{x_1 + x_2} \quad (7.30)$$

г. Перетворення опорів x_1, x_2, x_3 , з'єднаних в зірочку, в еквівалентний трикутник з опорами x_{12}, x_{23}, x_{13} та навпаки

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_3}; \quad x_{23} = x_2 + x_3 + \frac{x_2 x_3}{x_1};$$

$$x_{13} = x_1 + x_3 + \frac{x_1 x_3}{x_2} \quad (7.31)$$

$$x_1 = \frac{x_{12} x_{13}}{x_{12} + x_{23} + x_{13}}; \quad x_2 = \frac{x_{12} x_{23}}{x_{12} + x_{23} + x_{13}}; \quad x_3 = \frac{x_{13} x_{23}}{x_{12} + x_{23} + x_{13}}$$

д. Визначення взаємних опорів, наприклад, між джерелом та точкою короткого замикання при перетворенні схем до радіального (у вигляді променів) вигляду (рис. 7.1).

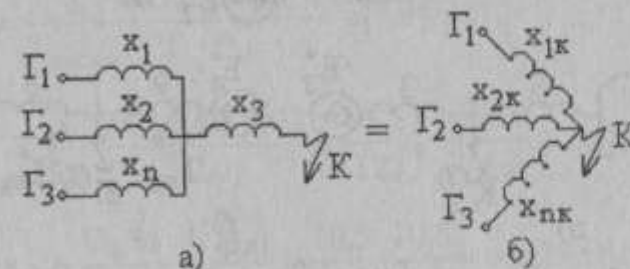


Рис. 7.1

Взаємні опори $x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}$ визначаються, як правило, через коефіцієнти розподілу, які характеризують долю участі кожного джерела в живленні точки к.з.

$$x_{1k} = \frac{x_{\Sigma}}{c_1}; \quad x_{2k} = \frac{x_{\Sigma}}{c_2}; \quad x_{nk} = \frac{x_{\Sigma}}{c_n} \quad (7.32)$$

де $c_1, c_2, \dots, c_n$ – коефіцієнти розподілу

$$c_1 + c_2 + \dots + c_n = 1$$

$$c_1 = \frac{x_{\text{екв}}}{x_1}; \quad c_2 = \frac{x_{\text{екв}}}{x_2}; \quad c_n = \frac{x_{\text{екв}}}{x_n}; \quad (7.33)$$

$$x_{\text{екв}} = x_1 // x_2 // \dots // x_n; \quad x_{\Sigma} = x_{\text{екв}} + x_3 \quad (7.34)$$

е. Спрощення схем за рахунок симетрії.

ж. Розрізання вузлів з металічним к.з. [2, стор 46]

7.4 Аналітичний метод розрахунку початкового та ударного струмів трифазного короткого замикання

Приклад 1. В схемі (рис.7.2) в точці "к" сталося трифазне к.з. Розрахувати початковий надперехідний та ударний струми в генераторі та місці короткого замикання.

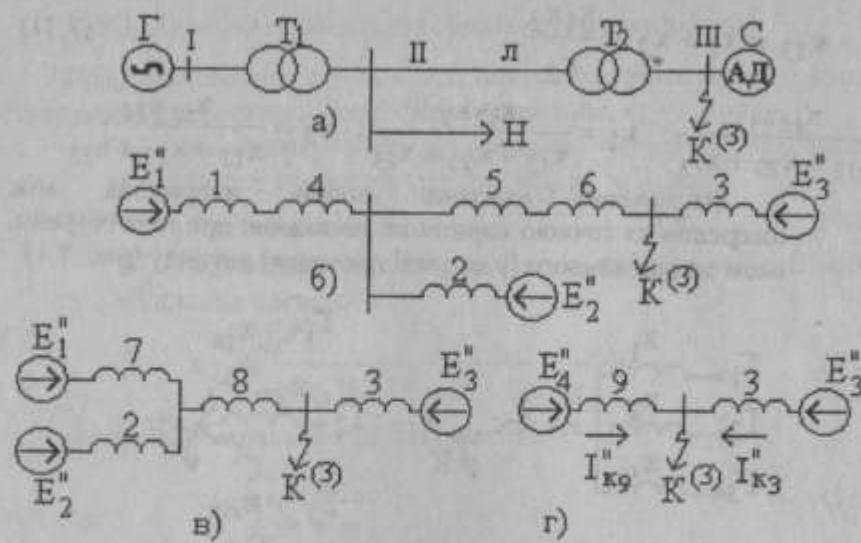


Рис. 7.2

Данні елементи розрахункової схеми слідуючі:

Генератор Г в попередньому режимі робить з повним навантаженням при $\cos \varphi_0 = 0,8$.

$S_H = 38,5$ мВА, $U_H = 10,5$ кВ, $x_d'' = 0,2$.

Трансформатор Т₁ $S_H = 40$ мВА, $10,5/121$ кВ, $U_k = 10,5\%$;

Трансформатор Т₂ $S_H = 6,3$ мВА, $110/6,6$ кВ, $U_k = 10,5\%$;

Лінія Л повітряна довжиною 50 км, $x_0 = 0,4$ Ом/км;

Навантаження Н узагальнена (комплексна) $S_H = 30$ мВА,

$E_H'' = 0,85$, $x_H'' = 0,35$;

Асинхронний двигун АД в попередньому режимі працює з навантаженням 90%, $P_H = 2000$ кВт, $U_H = 6$ кВ, $\cos \varphi = 0,83$, $\eta = 92\%$, $I_{пуск} = 5,2$.

а) Розв'язок в іменованих одиницях, зведення точно з використанням дійсних коефіцієнтів трансформації.

Еквівалентна схема заміщення з постановкою порядкових номерів її елементів приведена на рис 7.2.б. В даній схемі три ступені напруги. Прийемо в якості основної ступені, де знаходиться генератор, тобто $U_{осн} = 10,5$ кВ. Тоді дійсні коефіцієнти трансформації в напрямку від основної ступені будуть:

$$k_1 = \frac{10,5}{121}; \quad k_2 = \frac{110}{6,6}$$

Опори елементів схеми:

$$Г: x_1 = x_{d''} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{10,5^2}{38,5} = 0,57 \text{ Ом};$$

$$Н: x_2 = x_H'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot k_1^2 = 0,35 \cdot \frac{115^2}{30} \left(\frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,16 \text{ Ом};$$

АД:

$$x_3 = \frac{1}{I_{пуск}} \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 =$$

$$= \frac{1}{5,2} \cdot \frac{6^2 \cdot 0,83 \cdot 0,92}{2,0} \cdot \left(\frac{10,5}{121} \right)^2 \cdot \left(\frac{110}{6,6} \right)^2 = 5,6 \text{ Ом};$$

$$Т_1: x_4 = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{H(Н)}^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{40} = 0,29 \text{ Ом}$$

чи

$$x_4 = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{H(Н)}^2}{S_H} \cdot k_1^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{40} \left(\frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,29 \text{ Ом};$$

$$Л: x_5 = x_0 \cdot \ell \cdot k_1^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot \left(\frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,29 \text{ Ом};$$

Т₂:

$$x_6 = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{H(Н)}^2}{S_H} \cdot k_1^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{6,3} \left(\frac{10,5}{121} \right)^2 = 1,52 \text{ Ом}.$$

Надперехідні е.р.с. генератора та навантажень знаходяться за виразом (21) та (28).

$$Г: E_{1*}'' = U_{0*} + I_{0*} x_{d*}'' \cdot \sin \varphi_0 = 1 + 1 \cdot 0,2 \cdot 0,6 = 1,12$$

$$E_1'' = E_{1*}'' \cdot U_H = 1,12 \cdot 10,5 = 11,67 \text{ кВ};$$

$$Н: E_2'' = E_{2*}'' \cdot U_{ср.Н} \cdot k_1 = 0,85 \cdot 115 \cdot \frac{10,5}{121} = 8,48 \text{ кВ};$$

АД:

$$E_{3*}'' = U_{0*} - I_{0*} x_{дв*}'' \cdot \sin \varphi_0 = 1,1 - 0,9 \cdot \frac{1}{5,2} \cdot 0,558 = 1,0$$

$$E_3'' = E_{3*}'' \cdot U_H \cdot k_1 \cdot k_2 = 1 \cdot 6 \cdot \frac{10,5}{121} \cdot \frac{110}{6,6} = 8,68 \text{ кВ.}$$

Перетворимо схему до простішого вигляду. Проміжні схеми на різних етапах перетворення показані на рис. 7,2в та 7,2г.

$$x_7 = x_1 + x_4 = 0,57 + 0,29 = 0,86 \text{ Ом;}$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,15 + 1,52 = 1,67 \text{ Ом;}$$

$$x_9 = \frac{x_7 \cdot x_2}{x_2 + x_7} + x_8 = \frac{1,16 \cdot 0,86}{1,16 + 0,86} + 1,67 = 2,16 \text{ Ом;}$$

$$E_4'' = \frac{E_7'' x_2 + E_2'' x_7}{x_2 + x_7} = \frac{11,76 \cdot 1,16 + 8,48 \cdot 0,86}{1,16 + 0,86} = 10,36 \text{ кВ.}$$

Струм в генераторі при трьохфазному к.з. в точці К

$$I_{\text{кГ}}^{(3)} = \frac{E_4''}{\sqrt{3} x_9} = \frac{10,36}{\sqrt{3} \cdot 2,16} = 2,77 \text{ кА}$$

Повний струм в місці к.з.

$$I_{\text{к}}^{(3)} = I_{\text{кГ}}^{(3)} + I_{\text{к.дв}}^{(3)} = \left(\frac{E_4''}{\sqrt{3} \cdot x_{\text{д}}} + \frac{E_3''}{\sqrt{3} \cdot x_3} \right) \cdot k_1 \cdot k_2 =$$

$$= (2,77 + 0,9) \cdot \frac{10,5}{121} \cdot \frac{110}{6,6} = 4 + 1,3 = 5,3 \text{ кА.}$$

Ударний струм в місці к.з. знаходиться з виразу

$$i_y = i_{y\Gamma} + i_{y\text{дв}} = \sqrt{2} k_{y\Gamma} I_{\text{кГ}}'' + \sqrt{2} k_{y\text{дв}} I_{\text{к.дв}}''$$

Для асинхронного двигуна ударний коефіцієнт $k_{y\text{дв}}$ визначається з кривої $k_y(P_H)$ (рис. 6,1). Ударний коефіцієнт схеми з генератором знайдемо за еквівалентною сталою часу цього кола. Активні опори окремих елементів схеми визначаються слідуочим чином

$$r = \frac{x}{\left(\frac{x}{r} \right)_{\text{ср}}}$$

де $(x/r)_{\text{ср}}$ приведені в таблиці 4.1 чи ([2], стр. 661).

$$\Gamma: r_1 = \frac{x_1}{50} = \frac{0,57}{50} = 0,011 \text{ Ом;}$$

$$H: r_2 = \frac{x_2}{2,5} = \frac{1,16}{2,5} = 0,464 \text{ Ом;}$$

$$T_1: r_4 = \frac{x_4}{15} = \frac{0,29}{15} = 0,019 \text{ Ом;}$$

$$Л: r_5 = \frac{x_5}{6} = \frac{0,15}{6} = 0,025 \text{ Ом;}$$

$$T_2: r_6 = \frac{x_6}{15} = \frac{1,52}{15} = 0,101 \text{ Ом.}$$

Результуючий активний опір схеми відносно точки к.з.

$$r_{\Sigma} = \frac{(r_1 + r_4) r_2}{r_1 + r_2 + r_4} + r_5 + r_6 = 0,154 \text{ Ом.}$$

$$\text{Визначаємо співвідношення } \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{x_{\text{д}}}{r_{\Sigma}} = \frac{2,16}{0,154} = 14 \text{ за яким}$$

з кривої $k_y = f\left(\frac{x}{2}\right)$ знаходимо ударний коефіцієнт $k_{y\Gamma}$ (рис. 3,б)

$$k_{y\Gamma} = 1,8.$$

$$\text{Тоді } i_y = 1,41 \cdot 4 \cdot 1,8 + 1,41 \cdot 1,77 \cdot 1,3 = 13,39 \text{ кА.}$$

6. Розв'язання у відносних базисних одиницях, зведення точне.

Прийmemo в якості основної ступені з напругою $U_{\text{осн}} = 10,5 \text{ кВ}$ та довільно виберемо базисні одиниці вимірювання на цій ступені, наприклад, $S_6 = 100 \text{ мВА}$, $U_{\text{бн}} = 10,5 \text{ кВ}$,

$$I_{\text{б1}} = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{\text{б1}}} = \frac{100}{1,73 \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА.}$$

Тоді базисні одиниці вимірювання на останніх ступенях напруги будуть:

$$U_{6I} = U_{6I} \cdot \frac{1}{K_1} = 10,5 \cdot \frac{121}{10,5} = 121 \text{ кВ};$$

$$I_{6II} = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{6II}} = \frac{100}{1,73 \cdot 121} = 1,48 \text{ кА};$$

$$U_{6III} = U_{6I} \cdot \frac{1}{K_1 \cdot K_2} = 10,5 \cdot \frac{121 \cdot 6,6}{10,5 \cdot 110} = 7,26 \text{ кВ}.$$

Опори елементів схеми в відносних базисних одиницях:

$$\Gamma: x_{1*}(6) = x_{d*}'' \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6I}^2} = 0,2 \cdot \frac{100}{38,5} \cdot \frac{10,5^2}{10,5^2} = 0,52;$$

$$H: x_{2*}(6) = x_{H*}'' \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6II}^2} = 0,35 \cdot \frac{100}{30} \cdot \frac{115^2}{121^2} = 1,05;$$

АД:

$$x_{3*}(6) = \frac{1}{I_{пуск*}} \cdot \frac{S_6 \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6II}^2} = \frac{1}{5,2} \cdot \frac{100 \cdot 0,83 \cdot 0,92}{2} \cdot \frac{6^2}{7,26^2} = 5,0;$$

$$T_1: x_{4*}(6) = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_{H(n)}^2}{U_{6I}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} \cdot \frac{10,5^2}{10,5^2} = 0,26;$$

$$Л: x_{5*}(6) = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{121^2} = 1,37;$$

$$T_2: x_{6*}(6) = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_{H(0)}^2}{U_{6II}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{6,3} \cdot \frac{110^2}{121^2} = 1,377;$$

Е.Р.С. у відносних базисних одиницях:

$$\Gamma: E_{1*}''(6) = E_{1*(H)}'' \cdot \frac{U_H}{U_{6I}} = 1,12 \cdot \frac{10,5}{10,5} = 1,12;$$

$$H: E_{2*}''(6) = E_{2*(H)}'' \cdot \frac{U_{ср.н}}{U_{6II}} = 0,85 \cdot \frac{115}{121} = 0,808;$$

$$\text{АД: } E_{3*}''(6) = E_{3*(H)}'' \cdot \frac{U_H}{U_{6III}} = 1 \cdot \frac{6}{7,26} = 0,826;$$

Після перетворення схеми отримаємо

$$x_{7*}(6) = x_{1*}(6) + x_{4*}(6) = 0,52 + 0,26 = 0,78;$$

$$x_{9*}(6) = \frac{x_{2*}(6) \cdot x_{7*}(6)}{x_{2*}(6) + x_{7*}(6)} + x_{5*} + x_{6*} = \frac{1,05 \cdot 0,78}{1,05 + 0,78} + 0,137 + 1,377 = 1,951;$$

$$E_{4*}''(6) = \frac{E_{1*}(6) \cdot x_{2*}(6) + E_{4*}(6) \cdot x_{7*}(6)}{x_{2*}(6) + x_{7*}(6)} = \frac{1,12 \cdot 1,05 + 0,808 \cdot 0,78}{1,05 + 0,78} = 0,987;$$

Відносні значення струмів:

$$I_{K\Gamma*}^{(3)}(6) = \frac{E_{4*}(6)}{x_{9*}(6)} = \frac{0,987}{1,951} = 0,506;$$

$$I_{KЛВ*}^{(3)}(6) = \frac{E_{3*}(6)}{x_{3*}(6)} = \frac{0,826}{5,0} = 0,165;$$

Струми к.з. в іменованих одиницях:

$$\text{в генераторі } I_{K\Gamma}^{(3)} = I_{K\Gamma*}^{(3)}(6) \cdot I_{6I} = 0,506 \cdot 5,5 = 2,78 \text{ кА};$$

$$\text{в місці к.з. } I_K^{(3)} = \left(I_{K\Gamma*}^{(3)}(6) + I_{KЛВ*}^{(3)}(6) \right) \cdot I_{6III} =$$

$$= 0,506 \cdot 7,95 + 0,165 \cdot 7,95 = 4,02 + 1,31 = 5,33 \text{ кА};$$

Як слід було очікувати, результати розрахунків у відносних базисних одиницях співпадають з результатами розрахунків в іменованих одиницях.

в. Розв'язок у відносних базисних одиницях, зведення наближене.

При наближеному зведенні базисна напруга на основній ступені приймають рівним середній номінальній напрузі, у відповідності з рекомендованою шкалою, та автоматично отримують базисні напруги на інших ступенях напруги. Останні отримуються також рівними середнім номінальним напругам.

В даному випадку маємо: $U_{6I} = 10,5 \text{ кВ}; U_{6II} = 115 \text{ кВ}; U_{6III} = 6,3 \text{ кВ}$ зберігаючи $S_6 = 100 \text{ мВА}$, отримаємо базисні струми

$$I_{6I} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{6I}} = 5,5 \text{ кА}; \quad I_{6II} = 0,5 \text{ кА}; \quad I_{6III} = 9,2 \text{ кА};$$

Опори елементів схеми:

$$Г: x_{1*(6)} = x_{d*}'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{100}{38,5} = 0,519;$$

$$Н: x_{2*(6)} = x_{H*}'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{100}{30} = 1,167;$$

$$АД: x_{3*(6)} = \frac{1}{I_{пуск*}} \cdot \frac{S_6 \eta \cos \varphi}{P_H} = \frac{1}{5,2} \cdot \frac{100 \cdot 0,83 \cdot 0,92}{2} = 7,34;$$

$$Т_1: x_{4*(6)} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$Л: x_{5*(6)} = x_{0\ell}'' \cdot \frac{S_6}{U_{6II}''} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15;$$

$$Т_2: x_{6*(6)} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{6,3} = 1,67;$$

Е.Р.С.:

$$Г: E_{1*(6)}'' = E_{1*(H)}'' = 1,12;$$

$$Н: E_{2*(6)}'' = E_{2*(H)}'' = 0,85;$$

$$АД: E_{3*(6)}'' = E_{3*(H)}'' = 1,0;$$

Параметри перетвореної схеми:

$$x_{7*(6)} = x_{1*(6)} + x_{4*(6)} = 0,519 + 0,26 = 0,78;$$

$$x_{9*(6)} = \frac{x_{2*} \cdot x_{7*}}{x_{2*} + x_{7*}} + x_{5*} + x_{6*} = \frac{1,67 \cdot 0,78}{1,67 + 0,78} + 0,15 + 1,67 = 2,287;$$

$$E_{4*(6)}'' = \frac{E_{1*}'' \cdot x_{2*} + E_{4*}'' \cdot x_{7*}}{x_{2*} + x_{7*}} = \frac{1,12 \cdot 1,167 + 0,85 \cdot 0,78}{1,167 + 0,78} = 0,96;$$

Відносно значень струмів

$$I_{кГ*(6)}^{(3)} = \frac{E_{4*(6)}''}{x_{9*(6)}} = \frac{0,96}{2,287} = 0,42;$$

$$I_{кДВ*(6)}^{(3)} = \frac{E_{3*(6)}''}{x_{3*(6)}} = \frac{1}{7,34} = 0,136;$$

Струми в іменованих одиницях:

$$\text{В генераторі } I_{кГ}^{(3)} = I_{кГ*(6)}^{(3)} \cdot I_{6I} = 0,42 \cdot 5,5 = 2,31 \text{ кА};$$

В місці к.з.

$$I_{к}^{(3)} = \left(I_{кГ*(6)}^{(3)} + I_{кДВ*(6)}^{(3)} \right) \cdot I_{6III} = 0,42 \cdot 9,2 + 0,136 \cdot 9,2 = 5,12 \text{ кА};$$

Таким чином, похибка від застосування наближеного зведення отримується для практичних розрахунків і складає в даному випадку

$$\Delta I\% = \frac{5,33 + 5,12}{5,33} \cdot 100\% = 4\%.$$

В зв'язку з цими розрахунками по визначенню струмів короткого замикання в схемах сільського електропостачання, як правило, виконуються у відносних базисних одиницях з урахуванням наближеного зведення.

7.5 Розрахунок струму трифазного к.з. для довільного моменту часу перехідного процесу з використанням розрахункових кривих

В практичних задачах розрахунку струму в місці короткого замикання широко застосовується метод розрахункових кривих. Метод заснований на застосуванні спеціальних кривих $I_{пкI*}^{(3)} = f(x_{расч*})$, який представляє собою залежності періодичної складової струму в місці трифазного к.з. для довільного моменту часу від розрахункової реактивності схеми відносно точки к.з. Значення $I_{пкI*}$ і $x_{расч*}$ виражені у відносних одиницях при номінальних умовах джерел живлення.

Порядок розрахунку:

1. Для вихідної розрахункової схеми складається схема заміщення в яку генератори вводять надперехідними реактивностями. Навантаження не враховують, крім потужних двигунів та синхронних компенсаторів, розташованих близь точки к.з. та ті які розглядаються як генератори рівновеликої потужності. Е.Р.С. в схему заміщення не

вводять.

2. Визначають опори елементів схеми, наприклад, у відносних одиницях.

3. шляхом послідовних перетворень спрощують схему до

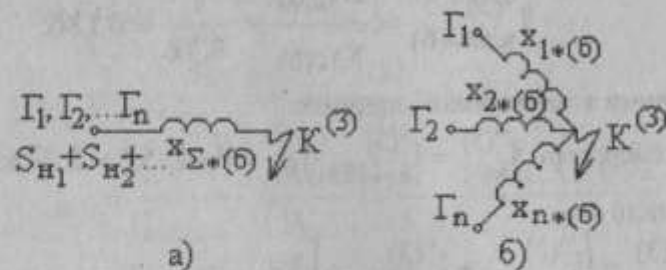


Рис. 7.3

вигляду, зображеному на рис. 7.3, а чи 7.3, б.

Перетворення схеми заміщення до вигляду рис 8, а виконують в тому випадку, коли генератори, які входять в схему можуть бути замінені одним еквівалентним генератором потужністю

$$S_{\Sigma H} = S_{H1} + S_{H2} + \dots + S_{Hn}$$

Розрахунок в цьому випадку, називається розрахунком по загальній зміні струмів.

Така еквівалентна заміна неможлива, якщо генератори, які живлять точку к.з.:

- різного типу (турбогенератори та гідрогенератори);
- одного типу, але ті які мають різну віддаленість від точки к.з.;
- генератори з АРЗ та без АРЗ;
- різної потужності.

В даних випадках вирізняють окремі незалежні гілки які генерують (рис.8,б). Система необмеженої потужності обов'язково виділяється в самостійну гілку яка генерує. Розрахунок називається розрахунком по індивідуальній зміні струмів.

4. Для кожної генеруючої гілки визначають розрахункову реактивність

$$x_{расч.}(n) = x_{*(6)} \cdot \frac{S_{\Sigma H}}{S_6} \quad (7.35)$$

де $S_{\Sigma H}$ - сумарна номінальна потужність генераторів гілки яку розглядають.

5. За відповідними розрахунковими кривими,

використовуючи отримані значення $x_{расч.}(n)$, знаходять періодичну складову струму к.з. $I_{nk, *}$ для визначених моментів часу. Якщо $x_{расч.} > 3$, то величина струму для всіх моментів часу вважається постійною та рівною

$$I_{nk, *} = \frac{I}{x_{расч.}} \quad (7.36)$$

6. Визначають величину струму к.з. в іменованих одиницях

$$I_{nk, *} = I_{nk, *} \cdot \dot{I}_{\Sigma H} \quad (7.37)$$

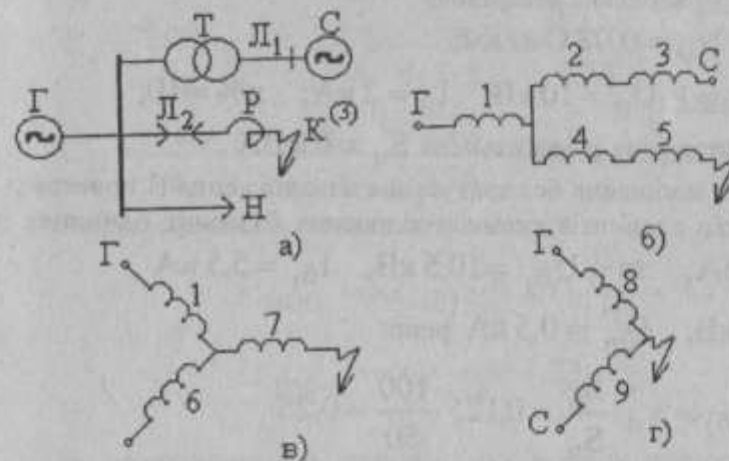


Рис. 7.4

$$\text{де } \dot{I}_{\Sigma H} = \frac{S_{\Sigma H}}{\sqrt{3}U_{ср.к}} - \text{номінальний струм генеруючої гілки,}$$

приведений до середньої напруги тої ступені, де знаходиться точка к.з. Струм к.з. від системи необмеженої потужності, визначається як

$$I_{nk, *} = \frac{I_6}{x_{\Sigma, (6)}} \quad (7.38)$$

де I_6 - базисний струм на ступені напруги, де знаходиться точка к.з.;

$X_{\Sigma*}(6)$ - сумарний опір, через яке система пов'язана з точкою к.з.

Повний струм в місці к.з. визначається як сума струмів від всіх генеруючих гілок.

Приклад 2. Визначити струм трифазного к.з. (рис. 7.4) для моментів часу $t=0$; $t=0,5$; $t=\infty$.

Данні елементів схеми:

Система С необмеженої потужності $x_c \approx 0$;

Генератор Г обладнаний АРЗ

$S_H = 50$ мВА; $x_d'' = 0,125$ $U_H = 10,5$ кВ;

Трансформатор

$S = 40$ мВА; $10,5/121$ кВ; $U_K = 10,5\%$;

Лінія L_1 повітряна довжиною $\ell = 50$ км; $x_0 = 0,4$ Ом/км;

Лінія L_2 кабельна довжиною

$\ell = 0,5$ км; $x_0 = 0,08$ Ом/км;

Реактор Р $U_H = 10$ кВ; $I_H = 2$ кА; $x\% = 10$;

Навантаження Н узагальнена $S_H = 6$ мВА.

Схема заміщення без врахування навантаження Н приведена на рис. 7.4,б. Опір елементів схеми у відносних базисних одиницях при $S_6 = 100$ мВА, та $U_{6I} = 10,5$ кВ, $I_{6I} = 5,5$ кА та

$U_{6II} = 115$ кВ, $I_{6II} = 0,5$ кА рівні:

$$x_{1*}(6) = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,125 \cdot \frac{100}{50} = 0,25$$

$$x_{2*}(6) = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,26$$

$$x_{3*}(6) = x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15$$

$$x_{4*}(6) = x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U_{6I}^2} = 0,08 \cdot 0,5 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,036$$

$$x_{5*}(6) = \frac{x_p}{100} \cdot \frac{I_{6I}}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_{6I}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{5,5}{2} = 0,275.$$

Параметри перетворень схеми (рис. 7.4,в)

$$x_{6*}(6) = x_{4*} + x_{5*} = 0,036 + 0,275 = 0,311$$

$$x_{7*}(6) = x_{2*} + x_{3*} = 0,26 + 0,15 = 0,41$$

Опори радіальної схеми

$$x_{8*}(6) = \frac{x_{екв} + x_7}{C_I} = \frac{0,55}{0,55} = 1,0$$

$$x_{9*}(6) = \frac{x_{екв} + x_7}{C_{II}} = \frac{0,55}{0,45} = 1,23.$$

Де коефіцієнти розподілу

$$C_I = \frac{x_{екв}}{x_1} = \frac{x_1/x_6}{x_1} = \frac{x_6}{x_1 + x_6} = \frac{0,311}{0,56} = 0,55$$

$$C_{II} = \frac{x_{екв}}{x_6} = \frac{x_1}{x_1 + x_6} = \frac{0,25}{0,56} = 0,45$$

Розрахункові опори генеруючих гілок

$$x_{расчI} = x_{8*}(6) \frac{S_H}{S_6} = 1 \cdot \frac{50}{100} = 0,5$$

$$x_{расчII} = x_{9*}(6) = 1,23.$$

За розрахунковими кривими для турбогенератора середньої потужності з АРЗ визначаємо періодичну складову струму к.з. від першої генеруючої гілки. Від системи (друга гілка) струм к.з. визначається за виразом (7.32). результати розрахунків зведені в таблицю 7.2.

Приведений номінальний струм генератора

$$I_{\Sigma H} = \frac{S_{\Sigma H}}{\sqrt{3} U_{ср.к}} = \frac{50}{1,73 \cdot 10,5} = 2,75 \text{ кА.}$$

Таблиця 7.2

Час t, с	I-а гілка (генератор)		II-а гілка (система)		Повний струм $I_K^{(3)}$
	$I_{nk,t*}$	$I_{nk,t*} = I_{nk,t*}$	$I_{nk,t*}$	$I_{nk,t*} = I_{nk,t*}$	
0	2	5,5	0,813	4,47	9,97
0,5	1,66	4,57	0,813	4,47	9,04
∞	1,82	5	0,813	4,47	9,47

8. Розрахунок несиметричних коротких замикань

Дослідження та розрахунки при несиметричних коротких замиканнях проводять з використанням методу симетричних складових, згідно якому довільна несиметрична трифазна система напруг (струмів, потоків) замінюється трьома симетричними трифазними системами, які називаються системами прямої, зворотної та нульової послідовності.

При розрахунках струмів несиметричних к.з. використовують правило еквівалентності прямої послідовності, у відповідності з яким струм прямої послідовності при довільному (n) виді несиметричного к.з. може бути знайдений як струм при трифазному к.з. в точці, яка віддалена від дійсної точки замикання на додатковий опір $\Delta Z^{(n)}$, отже

$$I_{K1}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \Delta Z^{(n)}} \quad (8.1)$$

де $E_{1\Sigma}$, $Z_{1\Sigma}$ - результуюча Е.Р.С. і опір схеми прямої послідовності відносно точки к.з.;

$\Delta Z^{(n)}$ - додатковий опір, який залежить від виду к.з. та результуючих опорів схем зворотної та нульової послідовності відносно точки к.з. (для двофазного к.з. $\Delta Z^{(2)} = Z_{2\Sigma}$, для однофазного $\Delta Z^{(1)} = Z_2 + Z_0$, для двофазного к.з. на землю $\Delta Z^{(1,1)} = Z_2 // Z_0$).

В свою чергу встановлено, що симетричні складові струмів та напруг в місці к.з., а також повні струми та напруги в здорових та пошкоджених фазах для довільного моменту часу пропорційні струму прямої послідовності. Основні розрахункові співвідношення наведені в таблиці 8.1.

Таким чином, для визначення струмів при несиметричних к.з. не вимагається спеціальних методів. Розрахунок зводиться до визначення струму прямої послідовності за виразом (8.1), для чого можна використовувати всі методи розрахунку струмів при трьохфазних к.з. Абсолютне значення (модуль) струму в пошкоджених фазах в місці короткого замкнення знаходять як

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{K1}^{(n)} \quad (8.2)$$

де $m^{(n)}$ - коефіцієнт, який залежить від виду короткого замкнення (для двофазного к.з. $m^{(2)} = \sqrt{3}$, для однофазного $m^{(1)} = 3$, для двофазного на землю $m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$ при $r=0$).

З правила еквівалентності прямої послідовності слідує, що для визначення струму $I_{K1}^{(n)}$ при довільному несиметричному к.з. необхідно скласти комплексну схему заміщення, в якій схеми заміщення окремих послідовностей з'єднані між собою особливим чином (рис. 8.1).

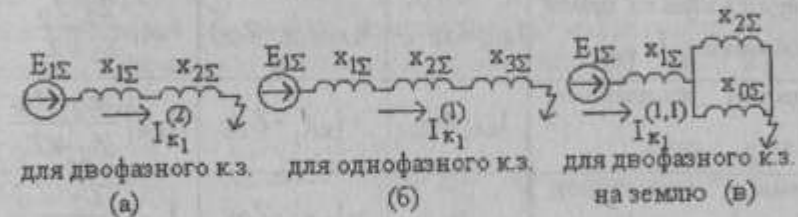


Рис. 8.1

Результуючі опори прямої, зворотної та нульової послідовностей знаходять по схемам відповідних послідовностей.

Схема прямої послідовності

є звичайною схемою для розрахунку струму трифазного к.з. В залежності від застосованого методу розрахунку (аналітичний або по розрахунковим кривим) і моменту часу генератори та навантаження в схему вводять відповідними реактивностями та е.р.с. Початком схеми (H_1 , рис. 8.2,а) є точка нульового потенціалу генераторів та навантажень (вільні кінці генеруючих гілок на схемі), а кінцем (K_1) - точка к.з.

Схема зворотної послідовності (рис. 8.2,б)

складається з тих же елементів і за структурою ідентична схемі прямої послідовності, але е.р.с. генеруючих гілок в ній приймаються рівними нулю.

Таблиця 8.1

Величина яка визначається	Види короткого замикання		
	Двофазне	Однофазне	Двофазне на землю
Струми в місці короткого замикання: зворотної послідовності в особливій фазі I_{KA_2}	$-I_{KA_1}$	I_{KA_1}	$-I_{KA_1} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}}$
Нульової послідовності, I_{KA_0}	0	I_{KA_1}	$-I_{KA_1} \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}}$
Повний струм к.з. в фазі А, I_{KA}	0	$3I_{KA_1}$	0
в фазі В, I_{KB}	$-j\sqrt{3}I_{KA_1}$	0	$I_{KA_1} \left(a^2 - \frac{Z_2 + aZ_0}{Z_2 + Z_0} \right)$
в фазі С, I_{KC}	$j\sqrt{3}I_{KA_1}$	0	$I_{KA_1} \left(a - \frac{Z_2 + aZ_0}{Z_2 + Z_0} \right)$
Напруги в місці к.з. прямої послідовності, U_{KA_1}	$I_{KA_1} Z_{2\Sigma}$	$I_{KA_1} (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$	$I_{KA_1} \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$
Зворотної послідовності, U_{KA_2}	$I_{KA_1} Z_{2\Sigma}$	$-I_{KA_1} \cdot Z_{2\Sigma}$	$I_{KA_1} \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$
Нульової послідовності, U_{KA_0}	0	$-I_{KA_1} \cdot Z_{2\Sigma}$	$I_{KA_1} \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$
Фази А, U_{KA}	$2I_{KA_1} Z_{2\Sigma}$	0	$3I_{KA_1} \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$
Фази В, U_{KB}	$-I_{KA_1} Z_{2\Sigma}$	$[(a^2 - a)Z_2 + (a^2 - 1) \cdot Z_0] I_{KA_1}$	0
Фази В, U_{KC}	$-I_{KA_1} Z_{2\Sigma}$	$[(a^2 - a)Z_2 + (a^2 - 1) \cdot Z_0] I_{KA_1}$	0

Опори зворотної послідовності генераторів та навантажень приймають рівними:

- для синхронних машин без демпферних обмоток $x_2 \approx 1,45x_d'$;
- те ж з демпферними обмотками та для турбогенераторів $x_2 \approx 1,22x_d''$;
- для асинхронних двигунів $x_2 \approx x_{дв}'' = \frac{1}{K_H}$;
- для узагальненого навантаження $x_2 = 0,35$.

Опори останніх елементів відповідають їх величинам в схемі прямої послідовності.

Початки та кінці схем зворотної (H_2, K_2) та прямої (H_1, K_1) послідовностей співпадають.

Схема нульової послідовності суттєво відрізняється від схем прямої та зворотної послідовностей, оскільки і сама система струмів нульової послідовності інша. Струми нульової послідовності, протікаючи від місця к.з. можуть повернутися до місця симетрії тільки через землю та паралельні їй ланцюги (троси ліній, оболонки кабелів, нульові провода).

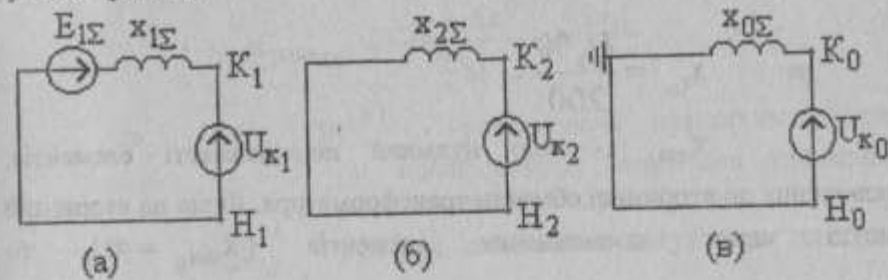
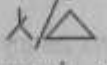


Рис. 8.2

Складання схеми заміщення нульової послідовності починають від точки к.з., вважаючи що в цій точці фази замкнуті між собою і до неї відносно землі прикладена напруга нульової послідовності U_{K_0} (рис. 8.2, в). Під дією напруги U_{K_0} через елементи, з'єднані в зірочку з заземленою нейтраллю та ті які мають електричний зв'язок з точкою к.з., будуть протікати струми к.з., будуть протікати струми нульової послідовності. Тому в схему заміщення включаються лише ті елементи, через які протікають струми нульової послідовності. Початком схеми (H_0) є точка, в якій об'єднані гілки з нульовим потенціалом (земля), кінець точка к.з.

Опори нульової послідовності окремих елементів приймають рівними:

а. Для синхронних машин $x_0 = (0,15 \div 0,6)x_d''$,

б. Для трансформаторів x_0 визначається їх конструкцією та з'єднанням обмоток. Струми нульової послідовності протікають від точки к.з. тільки в сторону к.з. тільки в сторону обмоток, з'єднаних в зірочку з заземленою нейтраллю. Тому для трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток  опір нульової послідовності рівний опорі прямої послідовності, отже $x_0 = x_1$, причому струми нульової послідовності не виходять за трикутник.

Для трансформаторів зі схемою 

$$x_0 = x_{1I} + x_{\mu 0}$$

$$\text{де } x_{1I} = \frac{U_k \%}{200}; \quad x_{\mu 0} = (0,3 \div 1,0).$$

Для трансформаторів зі схемою 

$$x_0 = x_{1I} + \frac{(x_{1II} + x_{вн0}) \cdot x_{\mu 0}}{x_{1II} + x_{вн0} + x_{\mu 0}}$$

$$\text{де } x_{1II} = \frac{U_k \%}{200}.$$

$x_{вн0}$ - опір нульової послідовності елементів, підключених до вторинної обмотки трансформатора. Якщо на вторинній обмотці немає заземлюючих елементів ($x_{вн0} = \infty$), то

$$x_0 = x_{1I} + x_{\mu 0}.$$

Для групи з трьох однофазних трансформаторів і трифазних п'ятистержневих (броньових) $x_0 = \infty$.

Якщо заземлення нейтралі трансформатора виконано через опори, то останнє враховується в схемі заміщення величиною в три рази більшою.

с. Для повітряних ліній опори x_0 в практичних розрахунках приймають:

- одноланцюгова лінія без тросів $x_0 = 3,5x_1$;
- одноланцюгова з сталевими тросами $x_0 = 3,0x_1$;
- дволанцюгова лінія без тросів $x_0 = 5,5x_1$;
- дволанцюгова з сталевими тросами $x_0 = 4,7x_1$;

д. Для кабельних ліній $x_0 \approx (3,5 \div 4,6)x_1$;

е. Для струмообмежуючих реакторів $x_0 = x_1$.

Порядок розрахунку струмів при несиметричних к.з.

1. Складають схеми заміщення окремих послідовностей. Підживлюючий ефект двигунів та навантаження при несиметричному к.з. проявляються слабше, тому враховують лише ті з них, які безпосередньо зв'язані з точкою короткого замикання. Ударний коефіцієнт оцінюють також, як це показано в розділі 4, але з врахуванням добавки $\Delta x^{(n)}$, яка визначається видом к.з.
2. Розраховують параметри елементів схем заміщення і визначають результуючі опори окремих послідовностей відносно точки к.з., а також результуючу е.р.с. із схеми прямої послідовності.
3. У відповідності з комплексною схемою заміщення для конкретного виду к.з. визначають струм прямої послідовності за виразом (8.1), а потім повний струм в пошкоджених фазах в місці к.з. за виразом (8.2).
4. Якщо розрахунок ведеться по розрахунковим кривим з врахуванням індивідуальної зміни струмів окремих генеруючих гілок, то після знаходження результуючих опорів, наприклад, у відносних базисних одиницях, визначають розрахункові опори генеруючих гілок.

$$x_{\text{расч}M} = \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(n)} \cdot S_{\Sigma nM}}{C_M \cdot S_6} \quad (8.3)$$

де $x_{1\Sigma}$, $\Delta x^{(n)}$ - результуюча реактивність прямої послідовності і додаткова реактивність, залежна від виду к.з.;

$S_{\Sigma nM}$ - сумарна номінальна потужність генеруючої гілки М;

C_M - коефіцієнт розподілу для тої ж гілки М, який визначається із схеми заміщення прямої послідовності.

5. Якщо при к.з. вимагається визначити струми та напруги в інших точках схеми, то симетричні складові струмів та напруг розподіляються в схемах заміщення відповідних послідовностей. При цьому необхідно враховувати групи з'єднань обмоток трансформаторів, так як при переході через них симетричні складові змінюються, в загальному випадку, як по величині, так і по фазі.

Приклад 8.1. Визначити для початкового моменту часу

періодичну складову струмів двофазного та однофазного к.з. які відбуваються почергово в точці К (рис. 8.3).

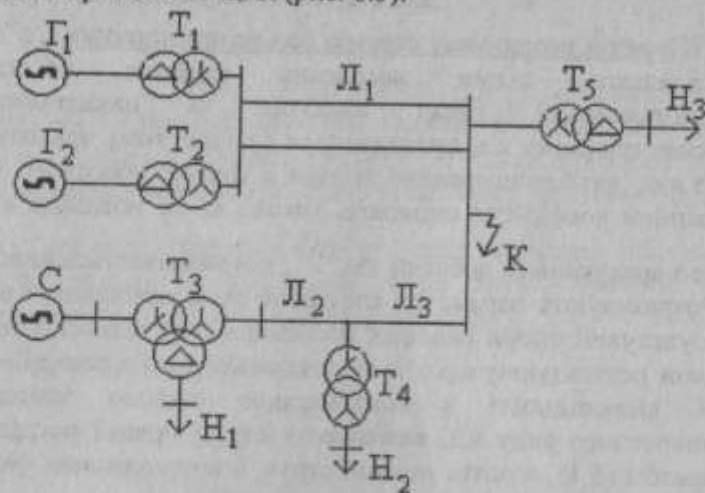


Рис. 8.3

Вихідні дані:

Система С – джерело необмеженої потужності з незмінною напругою 230 кВ,

Генератор Г₁ та Г₂ - $S_H = 30$ мВА, $U_H = 10,5$, $x_d'' = 0,27$.

Трансформатори Т₁ та Т₂ -

$S_H = 40$ мВА, $10,5/121$ кВ, $U_K = 10,5\%$.

Трансформатор Т₃ - $S_H = 63$ мВА, $230/115/10,5$ кВ,

$U_{KВН} = 18\%$, $U_{KВС} = 11\%$, $U_{КСН} = 7\%$.

Трансформатор Т₄ -

$S_H = 40$ мВА, $115/38,5$ кВ, $U_K = 10,5\%$.

Трансформатор Т₅ -

$S_H = 25$ мВА, $110/10,5$ кВ, $U_K = 10,5\%$.

Лінія Л₁ – повітряна дволанцюгова зі стальними тросами

$\ell = 50$ км, $x_{уд} = 0,4$ Ом/км.

Лінія Л₂ – повітряна одноланцюгова зі стальними тросами

$\ell = 30$ км, $x_{уд} = 0,4$ Ом/км.

Лінія Л₃ – повітряна одноланцюгова зі стальними тросами

$\ell = 70$ км, $x_{уд} = 0,4$ Ом/км.

а) Розрахунок струму при двофазному к.з.

Схеми заміщення для прямої та зворотної послідовності показані на рис. 8.4. Так як навантаження віддалені від точки к.з., то для спрощення вони не враховані при складанні схем.

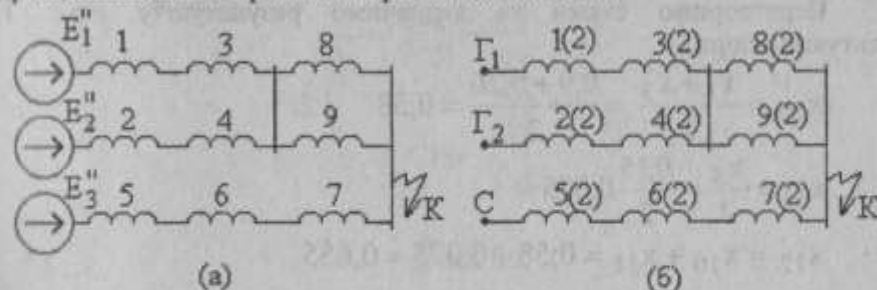


Рис. 8.4

Аналітичний розв'язок у відносних базисних одиницях.

Базисні одиниці:

$S_6 = 100$ мВА, $U_{6I} = 10,5$ кВ, $U_{6II} = 115$ кВ, $I_{6I} = 5,5$ кА,

$I_{6II} = 0,5$ кА.

Параметри елементів схеми заміщення прямої послідовності:

$$G_1, G_2: x_1 = x_2 = x_d'' \frac{S_6}{S_H} = 0,27 \cdot \frac{100}{30} = 0,9$$

$$T_1, T_2: x_3 = x_4 = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,26$$

$$T_3: x_5 = \frac{U_{KВН}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{18}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,286$$

$$L_2: x_6 = x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,09$$

$$L_3: x_7 = x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21$$

$$L_1: x_8 = x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15$$

$$\text{Е.Р.С.: } E_1'' = E_2'' = U_0'' + I_0'' x_d'' \sin \varphi_0 = 1 + 1 \cdot 0,27 \cdot 0,6 = 1,16$$

$$E_3'' = 1$$

Опори зворотної послідовності елементів схеми(крім

генераторів) рівні опорам прямої послідовності. Для генераторів маємо:

$$x_{1(2)} = x_{2(2)} = 1,45 \cdot x_1 = 1,89.$$

Перетворимо схеми та визначимо результуючу е.р.с. і результуючі опори.

$$x_{10} = \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{0,9 + 0,26}{2} = 0,58$$

$$x_{11} = \frac{x_8}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075$$

$$x_{12} = x_{10} + x_{11} = 0,58 + 0,075 = 0,655$$

$$x_{13} = x_5 + x_6 + x_7 = 0,286 + 0,09 + 0,21 = 0,586$$

$$x_{1\Sigma} = \frac{x_{12} \cdot x_{13}}{x_{12} + x_{13}} = \frac{0,655 \cdot 0,586}{0,655 + 0,586} = 0,31$$

$$E_{1\Sigma} = \frac{E_{1\Sigma}'' x_{13} + E_{3\Sigma}'' x_{12}}{x_{12} + x_{13}} = \frac{1,16 \cdot 0,586 + 1 \cdot 0,655}{0,586 + 0,655} = 1,163.$$

Після перетворення схеми зворотної послідовності отримаємо:
 $x_{2\Sigma} = 0,39.$

Струм прямої послідовності в місці к.з.

$$I_{\kappa 1}^{(2)} = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}} = \frac{1,163}{0,31 + 0,39} = 1,66.$$

Повний струм в пошкоджених фазах в місці к.з. в іменованих одиницях:

$$I_{\kappa}^{(2)} = \sqrt{3} I_{\kappa 1}^{(2)} \cdot I_{6\Pi} = 1,73 \cdot 1,66 \cdot 0,5 = 1,44 \text{ кА}.$$

Розв'язок з використанням розрахункових кривих.

В даному випадку обов'язково слід виділити дві гілки які генерують:

1-а – система; 2-а – станція з генераторами Γ_1 і Γ_2 .

Опори прямої та зворотної послідовностей генеруючих гілок із попереднього розрахунку:

$$x_{I(1)} = 0,586; \quad x_{I(2)} = 0,586$$

$$x_{II(1)} = 0,655; \quad x_{II(2)} = 1,15$$

Тоді розрахункові опори генеруючих гілок:

$$C: x_{\text{расч}_1} = x_{I(1)} + x_{I(2)} = 0,586 + 0,586 = 1,17$$

Γ_1, Γ_2 :

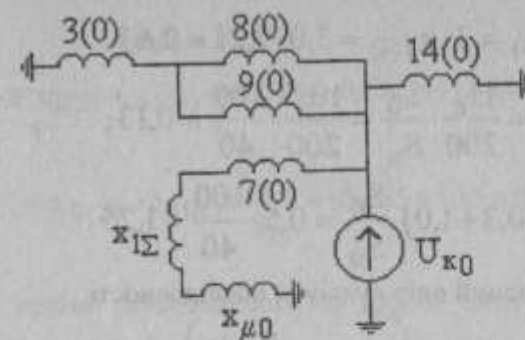


Рис. 8.5

$$x_{\text{расч}_II} = (x_{II(1)} + x_{II(2)}) \frac{S_{\Sigma H}}{S_6} = (0,655 + 1,15) \frac{60}{100} = 1,08.$$

За розрахунковими кривими для гідрогенераторів з АРВ визначаємо періодичну складову струму прямої послідовності від станції: $I_{\text{пк}_1}^{(2)} = 0,95.$

Повний струм в пошкоджених фазах в місці к.з.

$$I_{\kappa}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{пк}_1}^{(2)} \cdot I_{\Sigma H} + \sqrt{3} \frac{I_{6\Pi}}{x_{\text{расч}_I}} =$$

$$= 1,73 \frac{0,5}{1,17} + 1,73 \cdot 0,95 \cdot 0,3 + 1,23 \text{ кА}$$

$$\text{де } I_{\Sigma H} = \frac{S_{\Sigma H}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.к}}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,3 \text{ кА}.$$

б) Розрахунок струму при однофазному к.з.

Для розрахунку однофазного струму к.з. необхідно скласти схеми заміщення прямої, оберненої та нульової послідовностей. Схема нульової послідовності приведена на рис. 8.5.

Опори елементів схеми у відносних базисних одиницях:

$$T_1: x_{3(1)} = x_{3(2)} = 0,26;$$

$$T_5: x_{14(0)} = x_{14(1)} = \frac{U_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,42;$$

$$L_1: x_{8(0)} = x_{9(1)} = 4,7 x_{8(1)} = 4,7 \cdot 0,15 = 0,705;$$

$$L_3: x_{7(0)} = 3 \cdot x_{7(1)} = 3,0 \cdot 0,21 = 0,63;$$

$$T_4: x_{11} = \frac{U_K}{200} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{200} \cdot \frac{100}{40} = 0,13;$$

$$x_{\mu_0} = (0,3 + 1,0) \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,5 \cdot \frac{100}{40} = 1,25.$$

Результуючий опір нульової послідовності:

$$x_{0\Sigma} = x_{14(0)} // \left(x_{3(0)} + \frac{x_{8(0)}}{2} \right) // (x_{7(0)} + x_{11} + x_{\mu(0)}) = \\ = 0,42 // 0,71 // 2,01 = 0,23.$$

Струм прямої послідовності в місці к.з. при аналітичному розрахунку:

$$I_{K1}^{(1)} = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \frac{1,163}{0,31 + 0,39 + 0,23} = 1,25.$$

Повний струм в місці к.з.

$$I_K^{(1)} = 3I_{K1}^{(1)} \cdot I_{6II} = 3 \cdot 1,25 \cdot 0,5 = 1,875 \text{ кА}.$$

Якщо розрахунок проводиться з використанням розрахункових кривих та з врахуванням індивідуальної зміни струмів окремих генеруючих гілок, то необхідно результуючий опір нульової послідовності розосередити по генеруючим гілкам. Для цього знаходять коефіцієнти розподілу генеруючих гілок, які характеризують долю їх участі в живленні к.з. Коефіцієнти визначають їх схеми заміщення прямої послідовності. В даному випадку

$$C_I = \frac{x_{1\Sigma}}{x_{13}} = \frac{0,31}{0,586} = 0,53$$

$$C_{II} = \frac{x_{1\Sigma}}{x_{12}} = \frac{0,31}{0,655} = 0,47$$

Тоді, опори нульової послідовності гілок будуть

$$x_{I(0)} = \frac{x_{0\Sigma}}{C_I} = \frac{0,23}{0,53} = 0,434$$

$$x_{II(0)} = \frac{x_{0\Sigma}}{C_{II}} = \frac{0,23}{0,47} = 0,49.$$

Розрахункові опори гілок

С:

$$x_{расчI} = x_{I(1)} + x_{I(2)} + x_{I(0)} = 0,586 + 0,586 + 0,434 = 1,606;$$

Γ_1, Γ_2 :

$$x_{расчII} = (x_{II(1)} + x_{II(2)} + x_{II(0)}) \frac{S_{\Sigma H}}{S_6} = (0,655 + 1,15 + 0,49) \frac{60}{100} = 1,377$$

Струм прямої послідовності від другої генеруючої гілки (по кривій): $I_{пк1}^{(1)} = 0,74.$

Повний $I_{пк}^{(1)}$ струм в місці к.з. в пошкодженій фазі:

$$I_{пк}^{(1)} = 3 \frac{I_{6II}}{x_{расч}} + 3I_{пк1}^{(1)} \cdot I_{\Sigma H} = \\ = 3 \cdot \frac{0,5}{1,606} + 3 \cdot 0,74 \cdot 0,3 = 1,6 \text{ кА}.$$

Розрахункові опори можуть бут знайдені також за виразом

$$x_{расчI} = \frac{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}{C_I} = \frac{0,91 + 0,39 + 0,23}{0,53} = 1,755$$

$$x_{расчII} = \frac{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}{C_{II}} \cdot \frac{S_{\Sigma H}}{S_6} = \\ = \frac{0,31 + 0,39 + 0,23}{0,47} \cdot \frac{60}{100} = 1,277$$

При цьому по кривим $I_{пк1}^{(1)} = 0,82$, а повний струм к.з. складе:

$$I_K^{(1)} = 3 \frac{I_{6II}}{x_{расчI}} + 3I_{пк1}^{(1)} \cdot I_{\Sigma H} = \\ = 3 \cdot \frac{0,5}{1,755} + 3 \cdot 0,82 \cdot 0,3 = 1,59 \text{ кА}.$$

ДОДАТОК 1

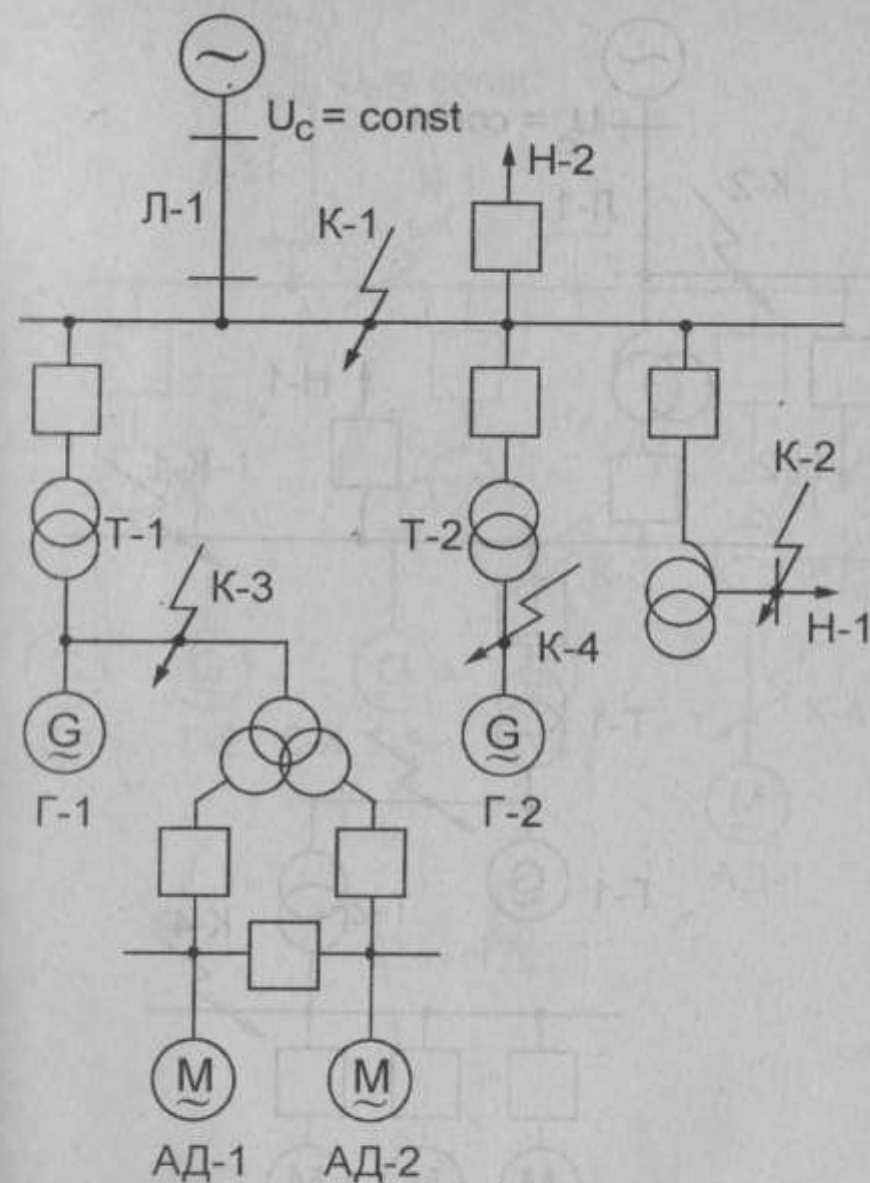


Схема Д.1.1

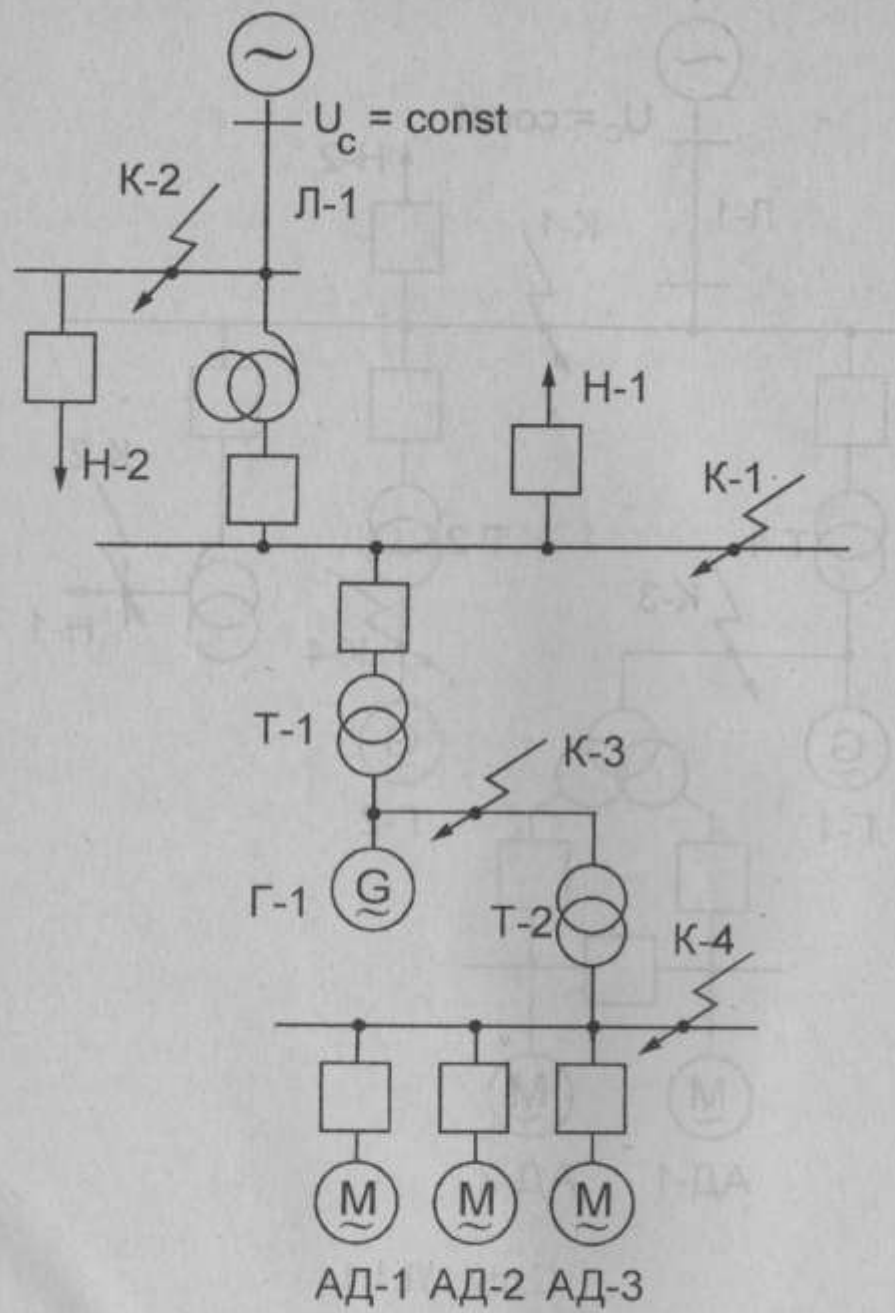


Схема Д.1.2

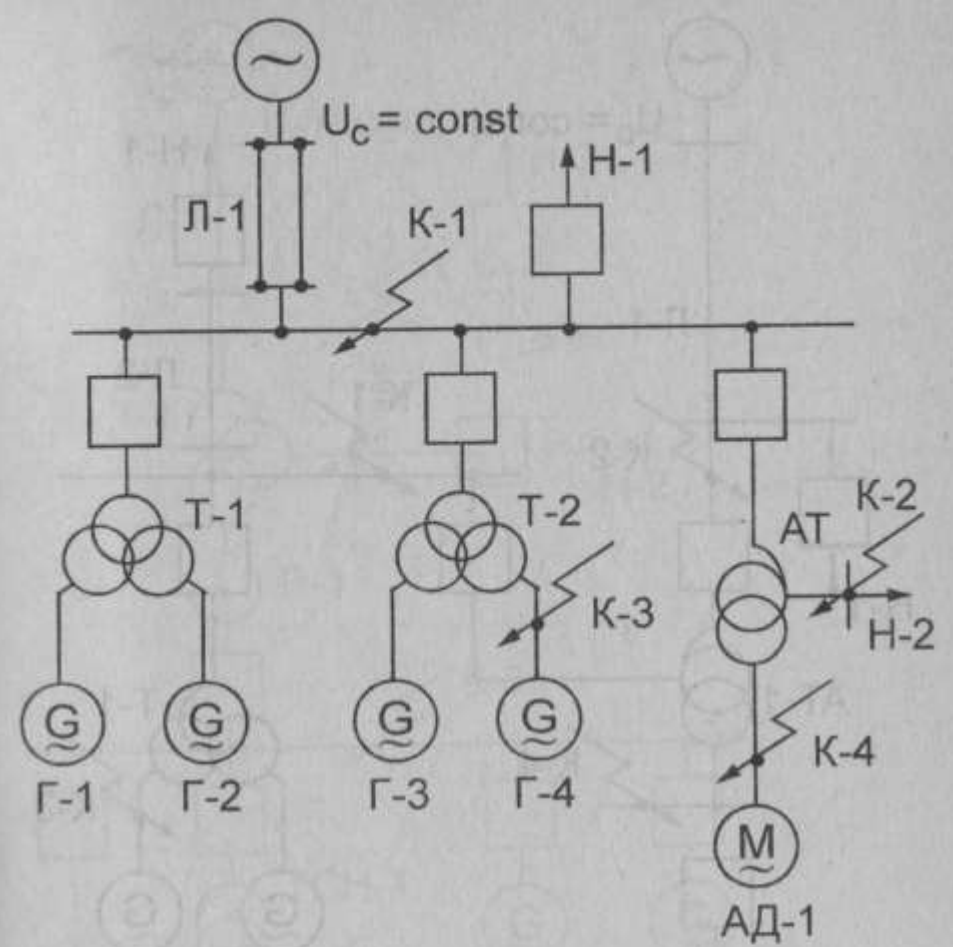


Схема Д.1.3

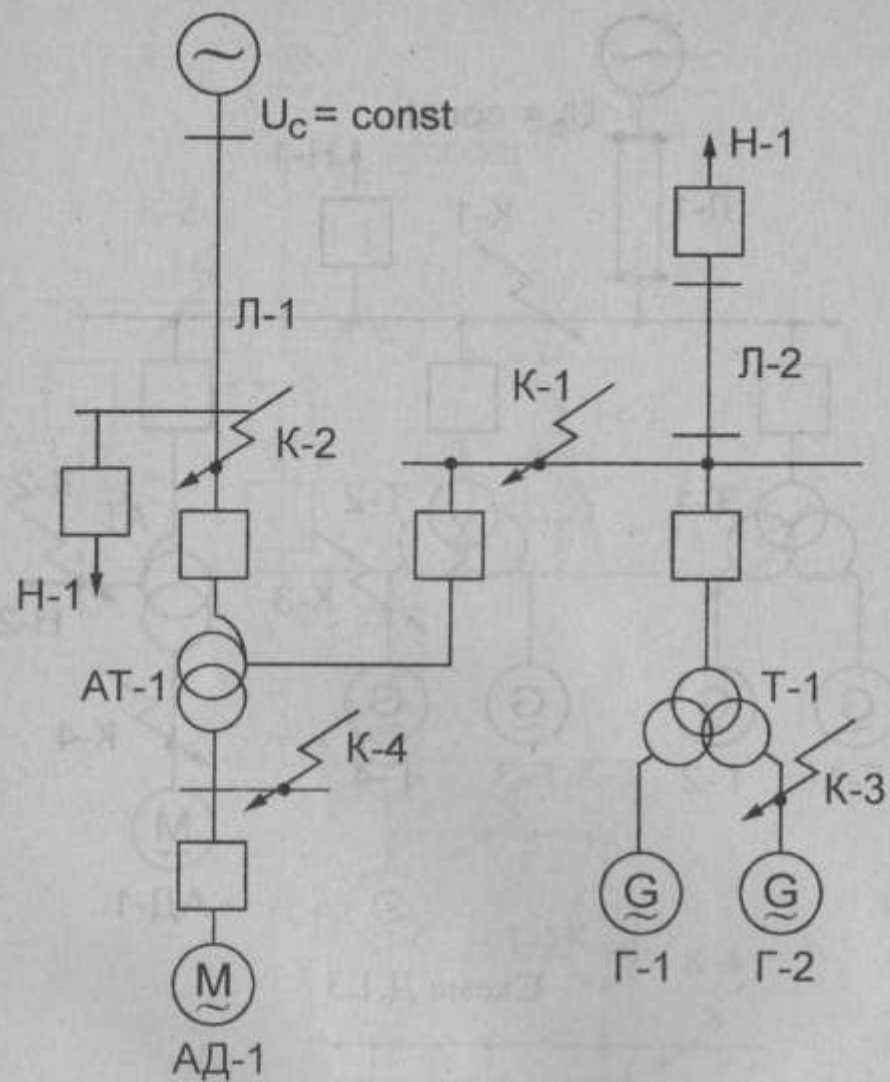


Схема Д.1.4

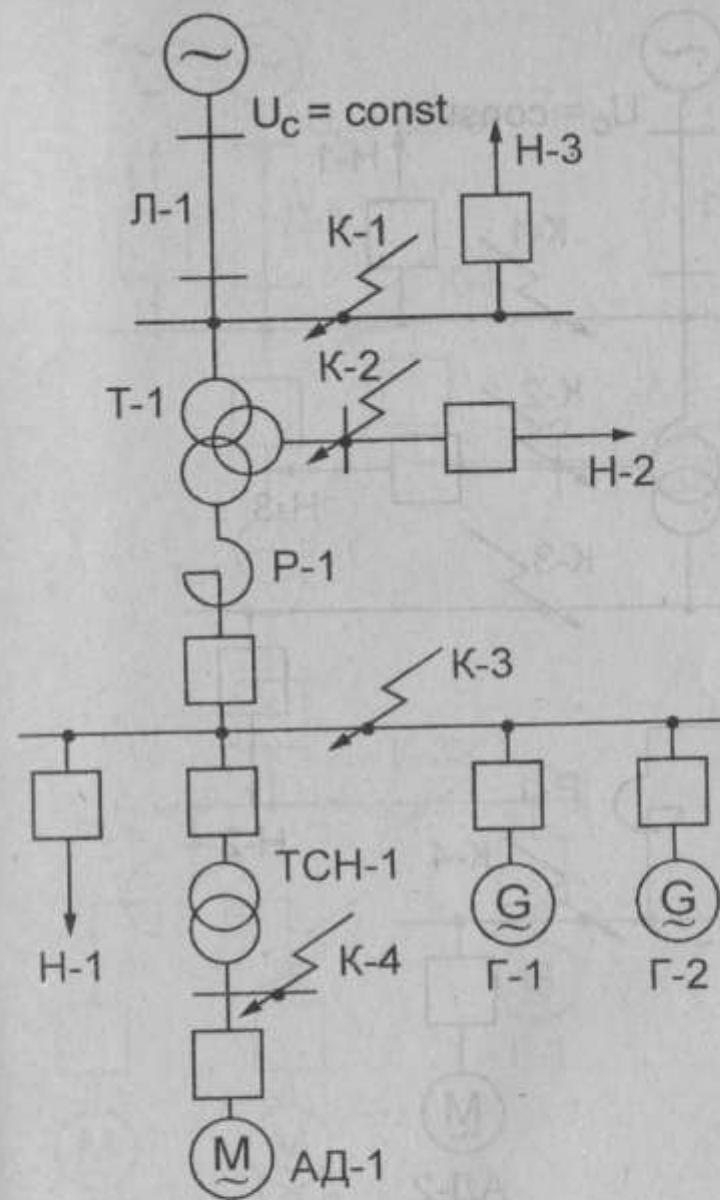


Схема Д.1.5

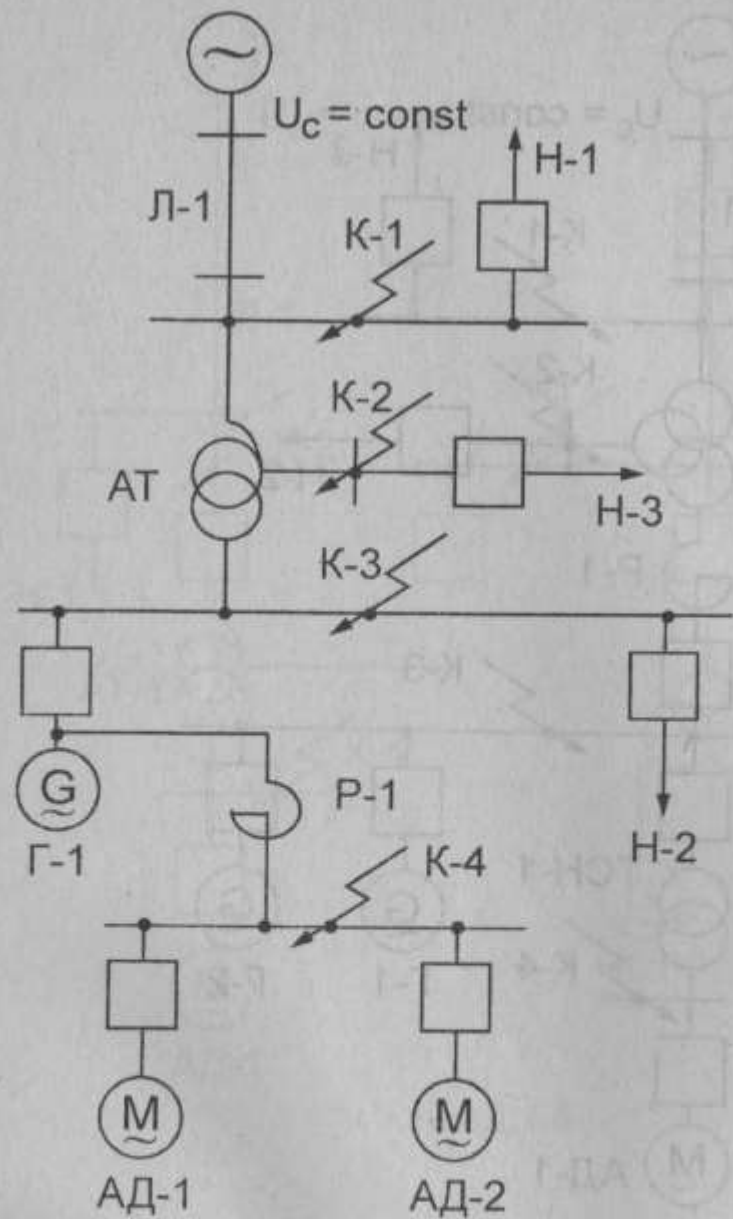


Схема Д.1.6

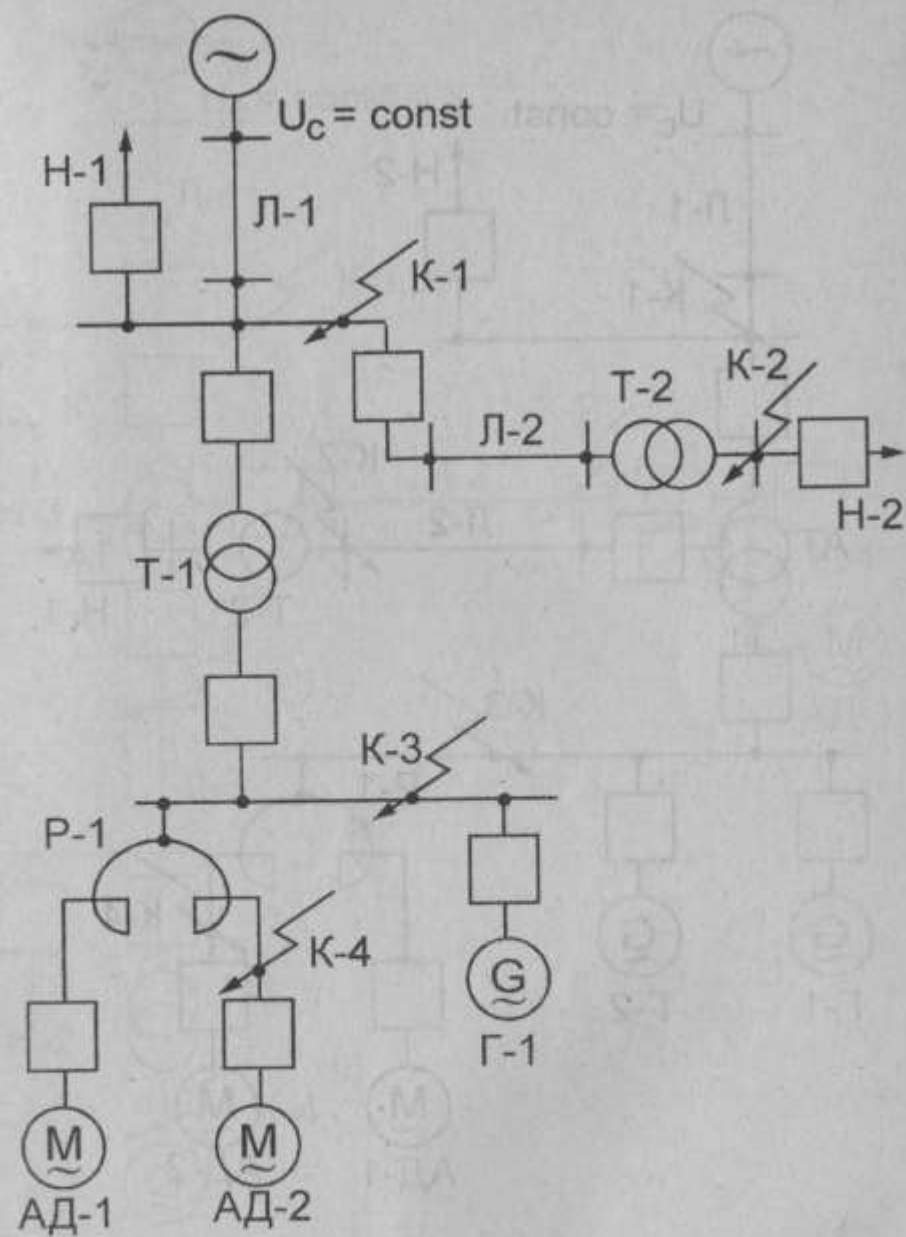


Схема Д.1.7

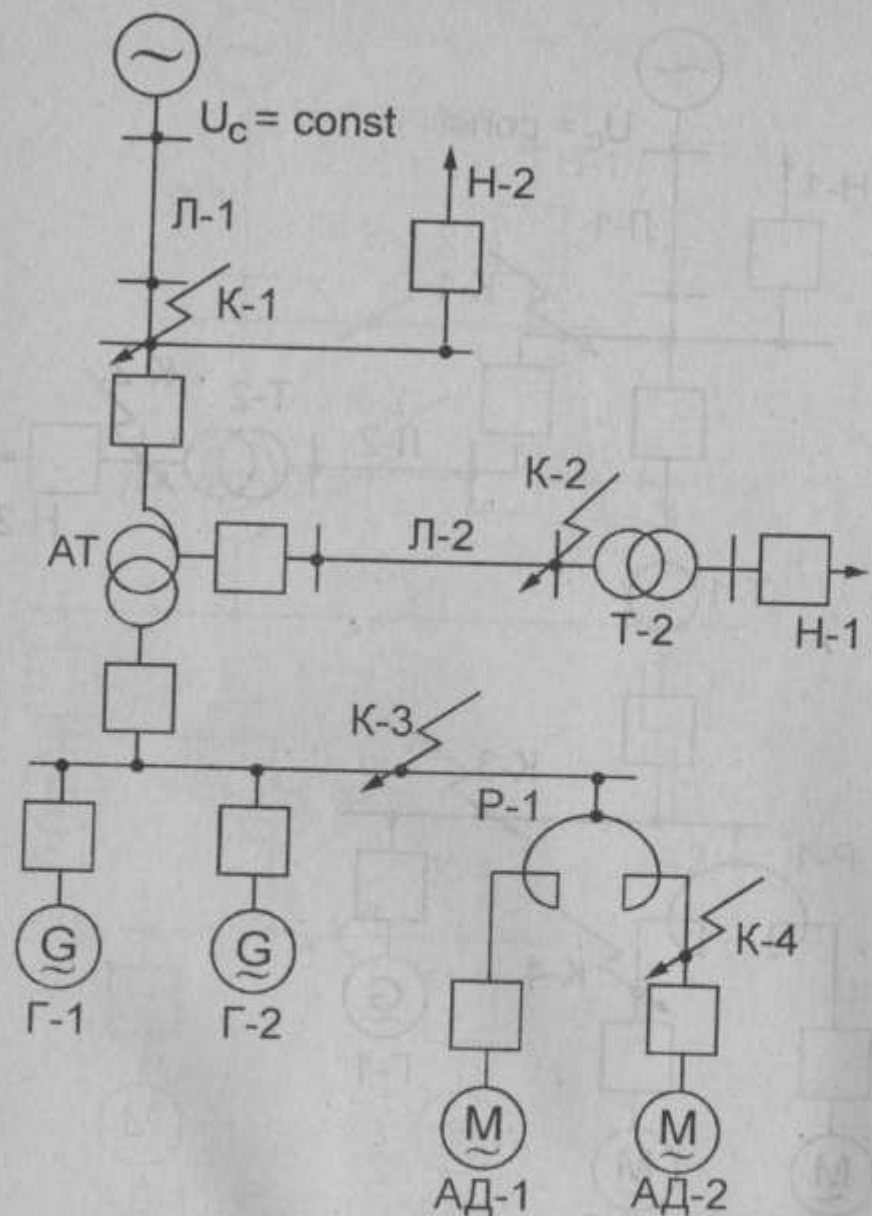


Схема Д.1.8

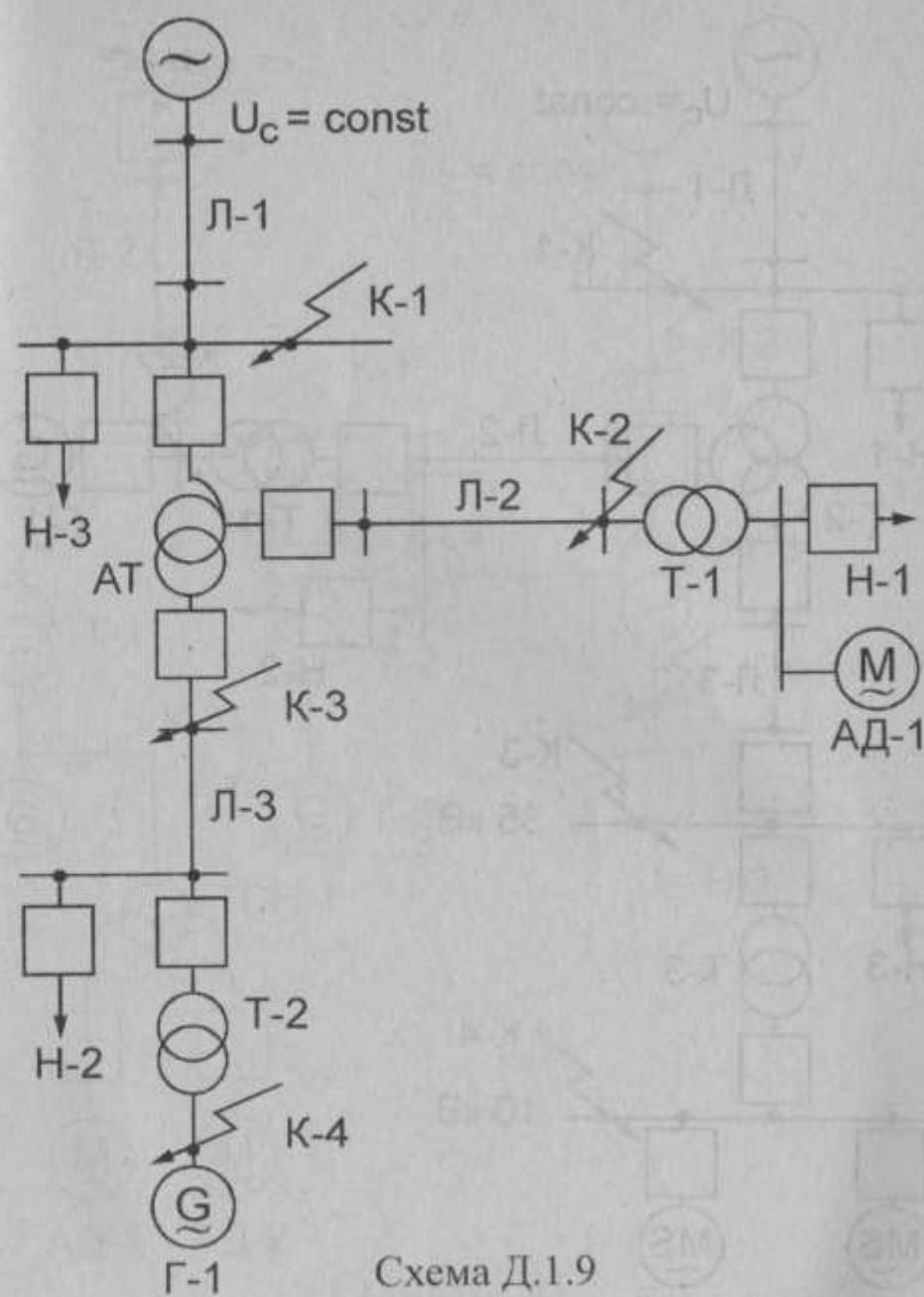
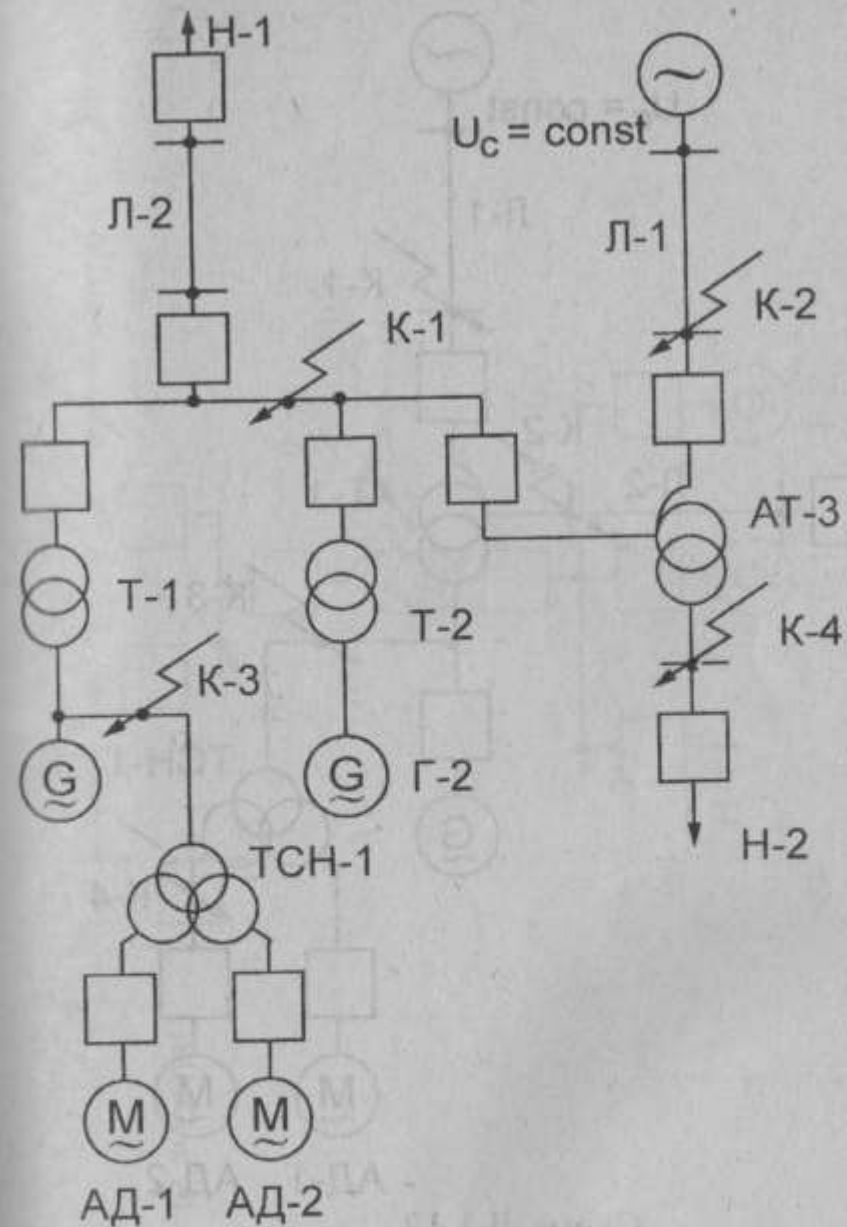
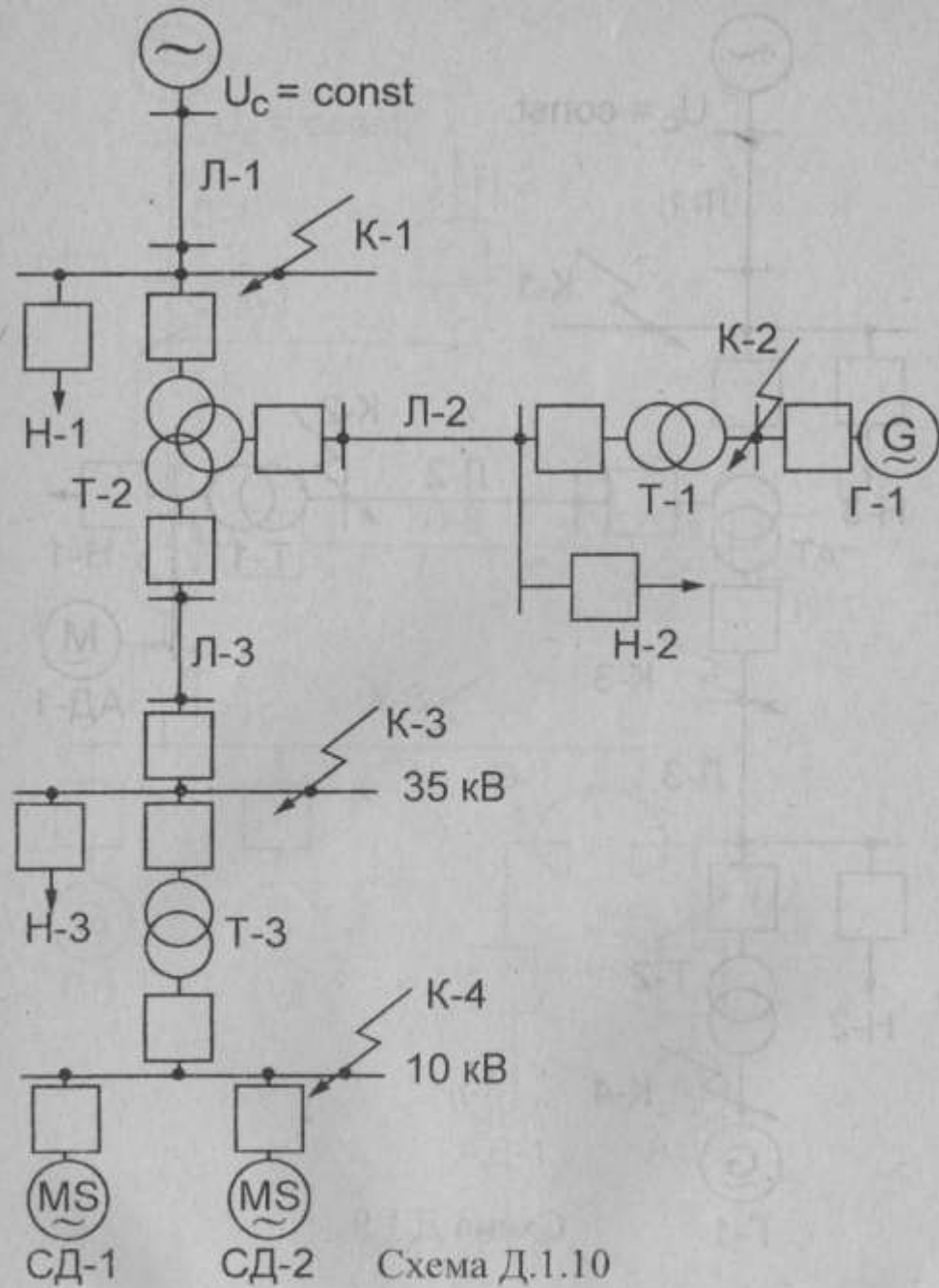


Схема Д.1.9



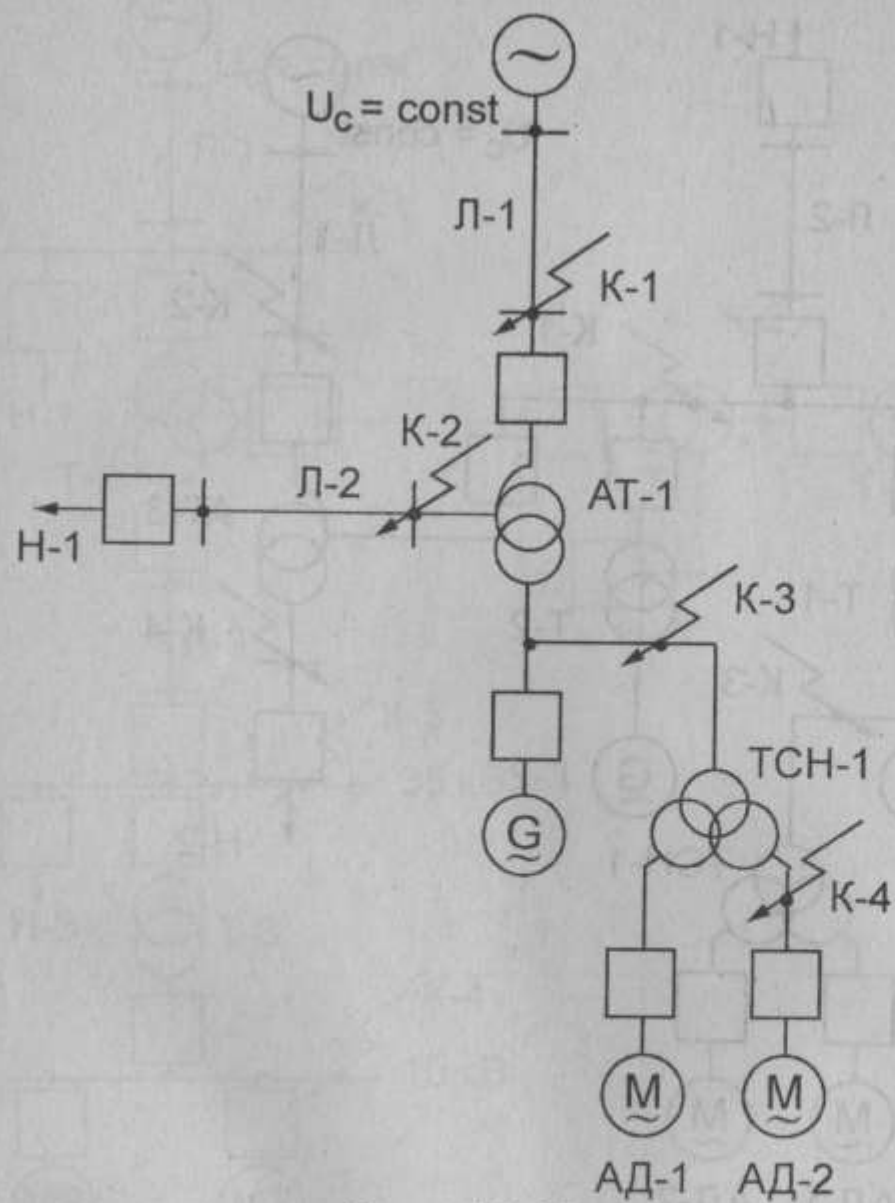


Схема Д.1.12

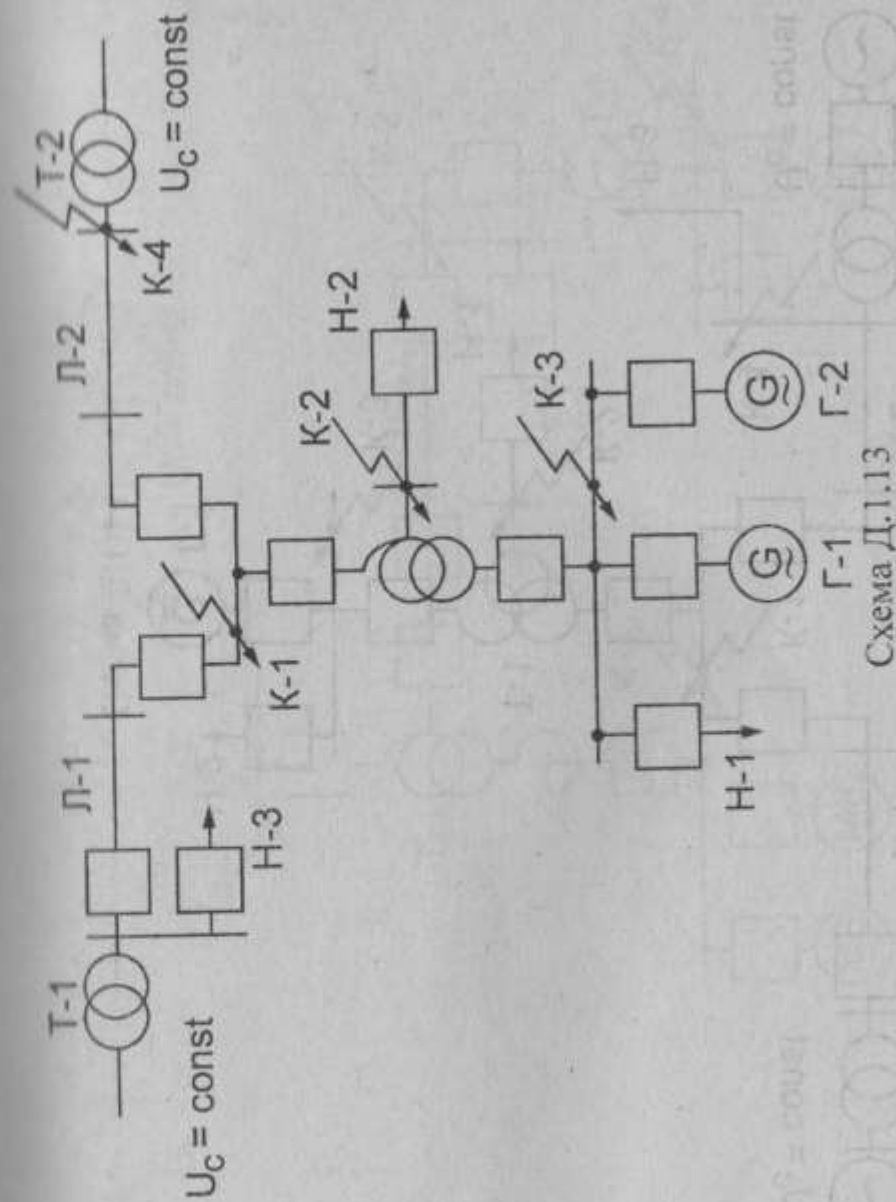
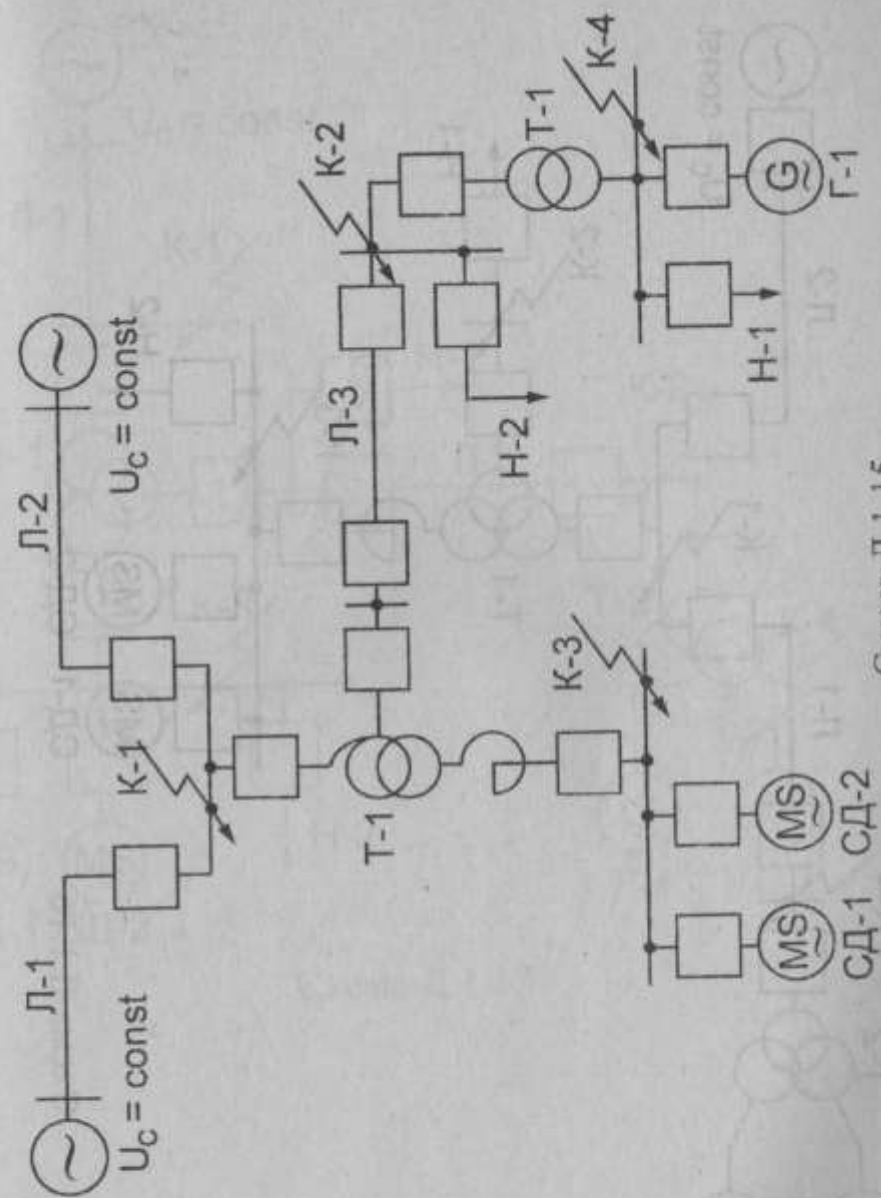
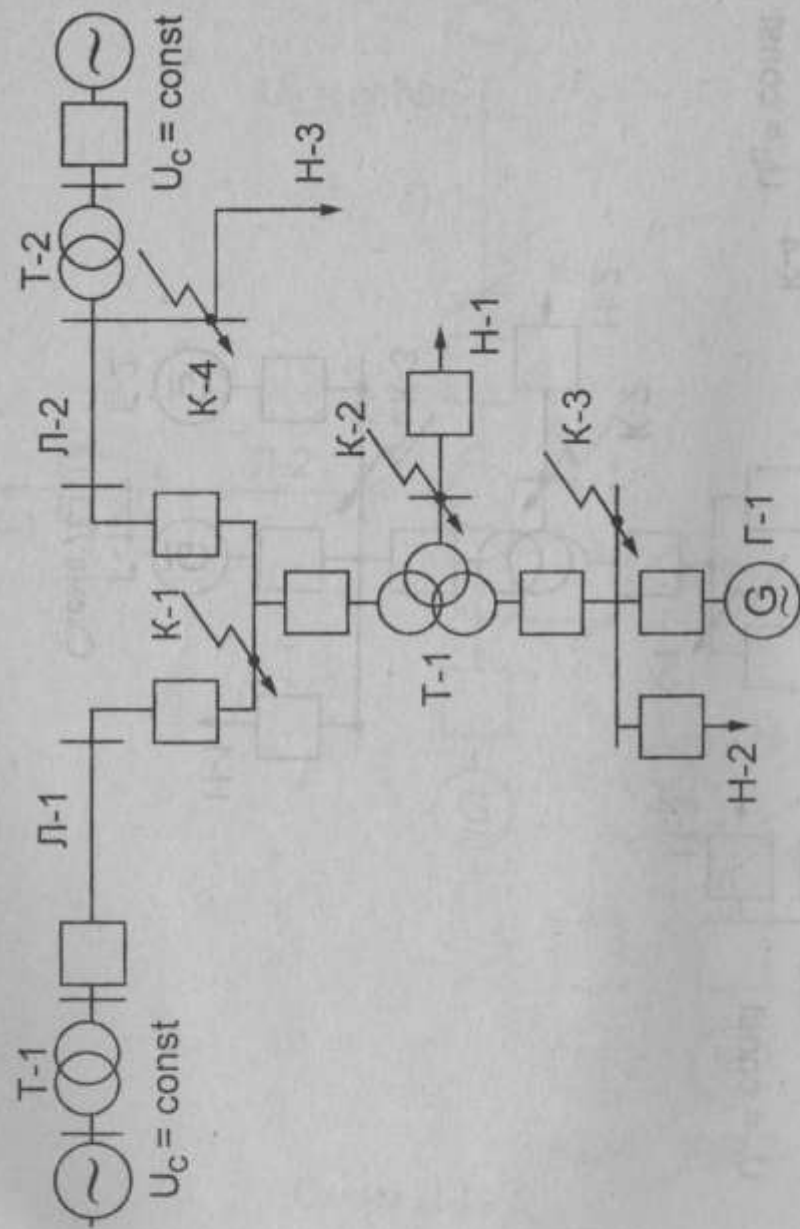
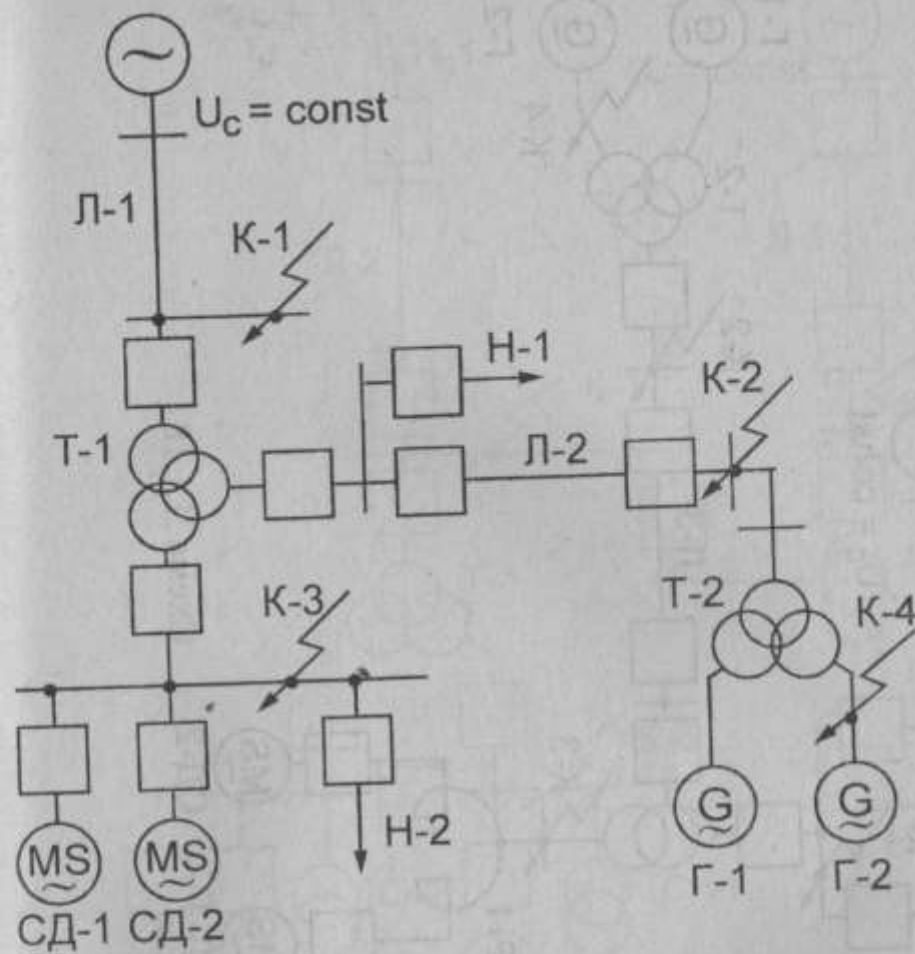
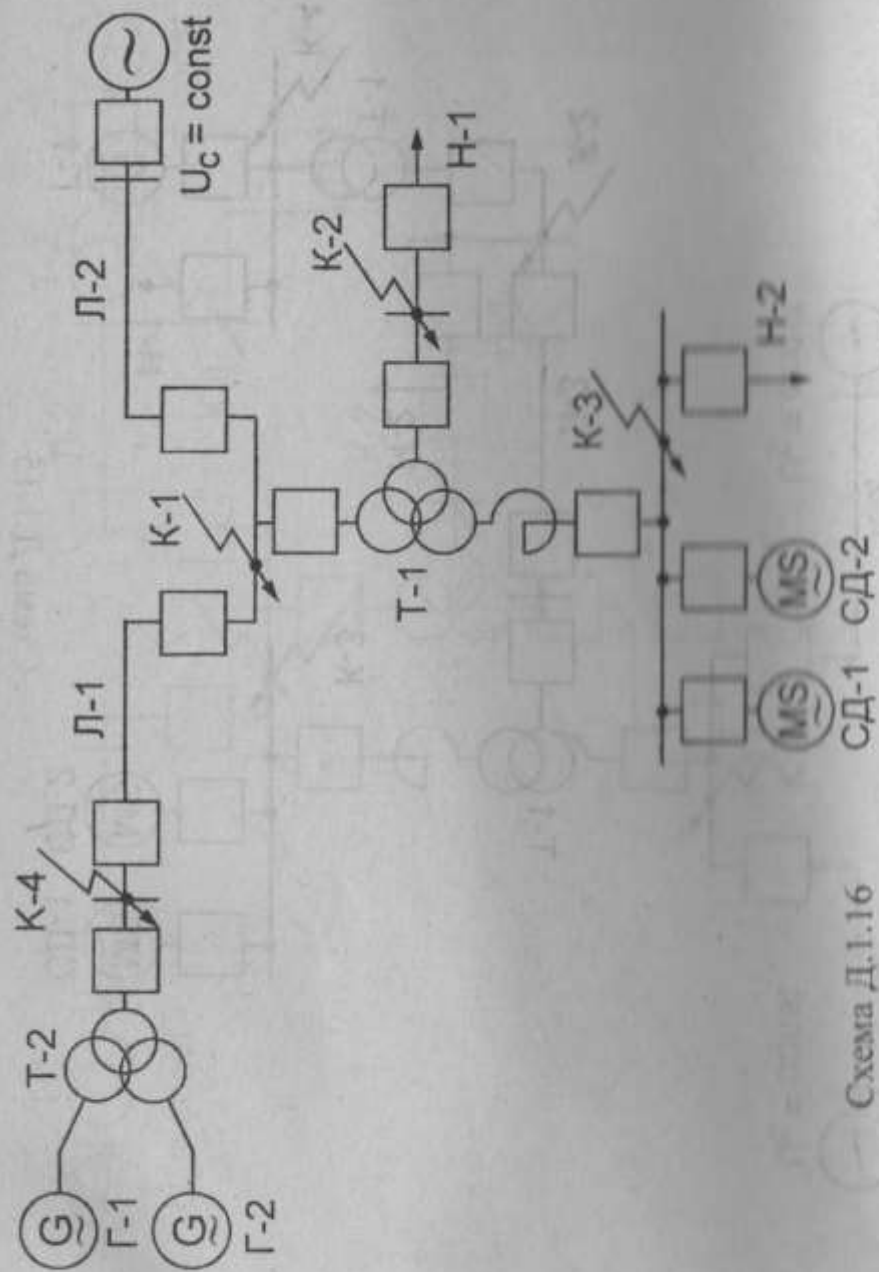
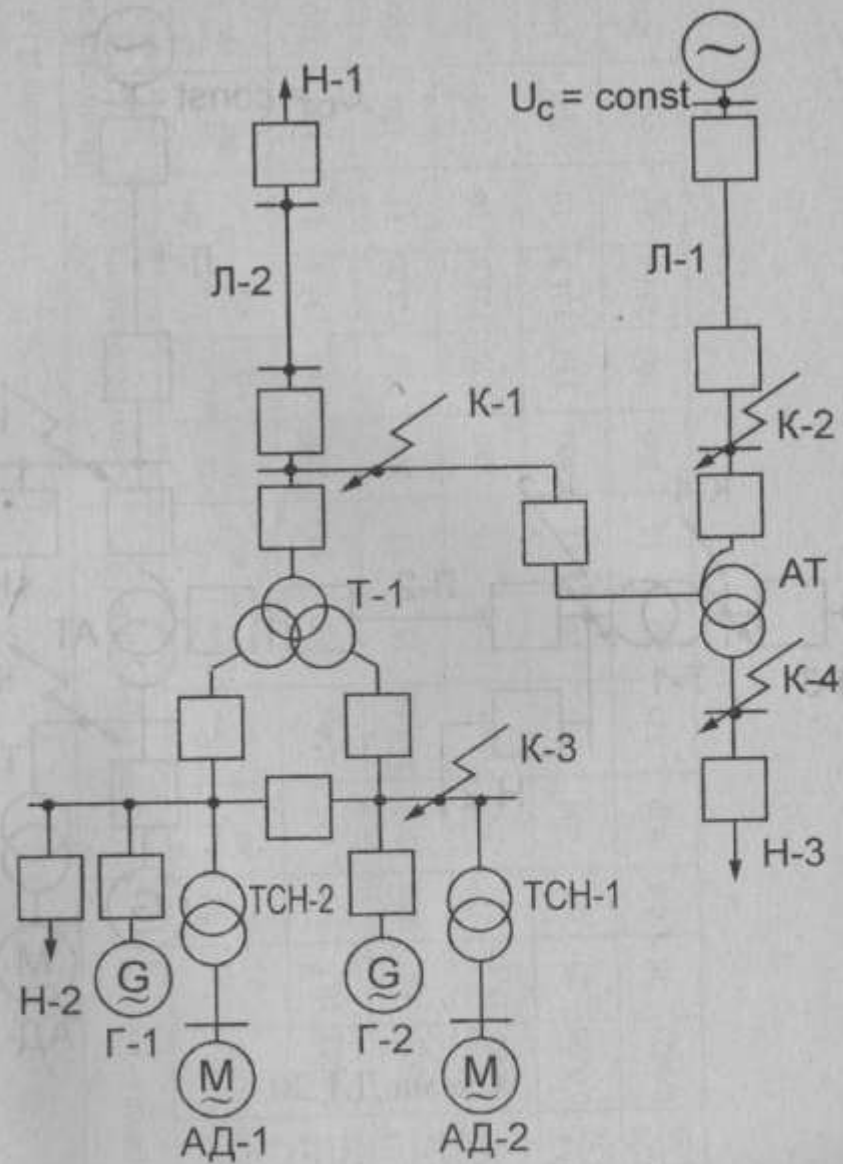
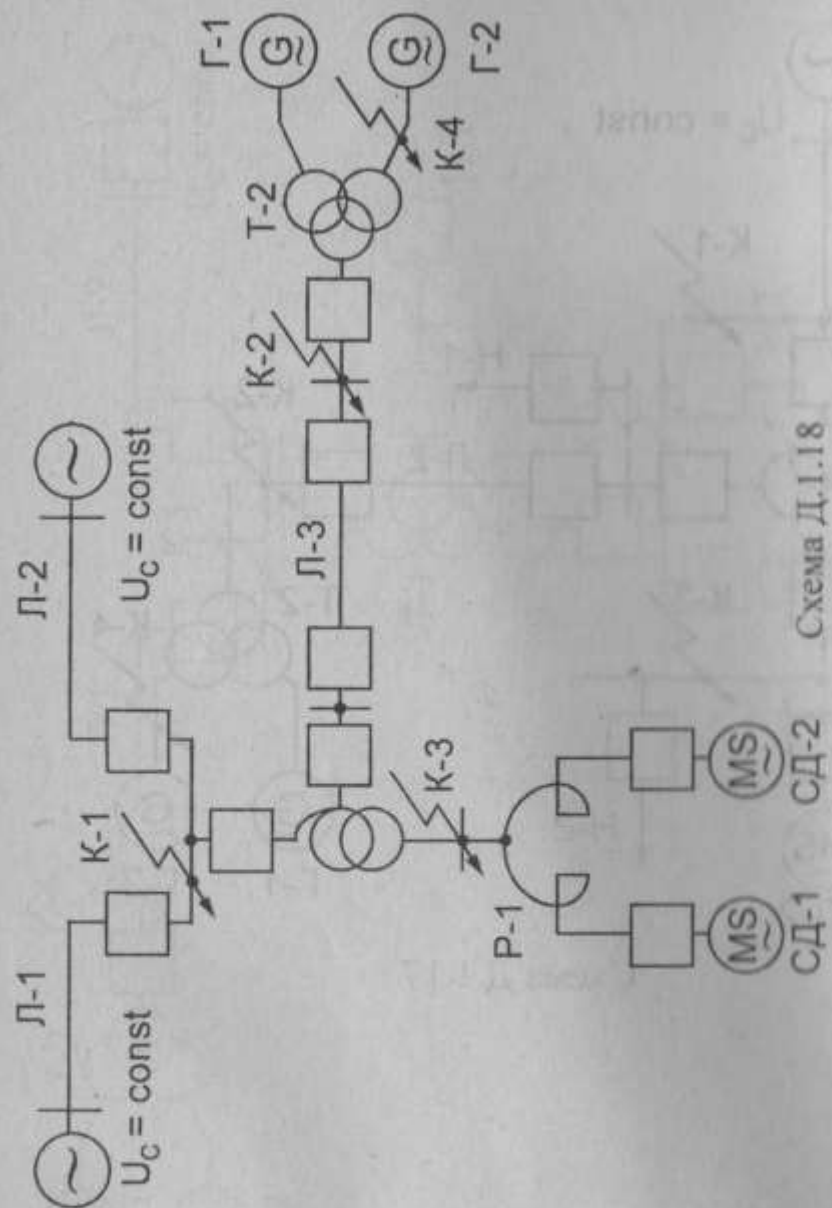


Схема Д.1.13







Продовження таблиці Д.1.1

Номер варіанта	Асинхронний двигун АД-1+2						Лінія Л-1			Трансформатор ТСН			
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{01}}{P_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	ℓ , км	x_{11} , Ом/км	r_1 , Ом/км	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{номВ}$ кВ	$U_{к1}$ %	
1	2,5	0,9	5,6	6	0,8	0,9	120	0,43	0,13	6,3	10,5	13	
2	3,2	0,9	6,4	6	0,9	0,7	150	0,42	0,11	10	18,5	20	
3	5	0,91	5,6	6	1	0,7	220	0,33	0,065	16	15,75	20	
4	8	0,91	5,6	6	0,75	0,7	200	0,33	0,065	25	20	19	
5	8	0,91	5,6	6	0,8	0,8	300	0,29	0,026	32	20	21	

Таблиця Д.1.2

№ варіанта	Генератор Г-1						Трансформатор Т-1				Автотрансформатор АТ				Навантаження	
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi_n$	x_d''/x_2	r , в.о	$U_{ном}$	$\frac{P_{01}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном}$ кВ	$U_{к1}$ %	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном}$ кВ	$U_{к1-2}$ %	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{к1-2}$ %	Н-1	Н-2
1	100	0,85	$\frac{0,18}{0,22}$	0,00212	10,5	0,8	125	127	10,5	10,5	125	135,5	11	11	100	100
2	150	0,85	$\frac{0,21}{0,26}$	0,00202	18	0,85	200	124	18	10,5	200	128,25	11	11	150	200
3	200	0,85	$\frac{0,19}{0,23}$	0,002	15,75	1	250	121	15,75	10,5	250	128,8	10	10	150	200
4	300	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,0026	20	0,7	400	118	20	10,5	400	121,9	10	10	300	300
5	500	0,85	$\frac{0,24}{0,29}$	0,0023	20	0,8	630	242	20	11	500	257,6	9,5	9,5	300	200

№ варіанта	Асинхронний двигун АД-1÷3						Лінія Д-1			Трансформатор Т-2		
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	ℓ , км	X_1 , Ом/км	r_1 , Ом/км	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном}$ кВ	U_{ε} , %
1	2,5	0,9	5,6	6	0,8	0,9	40	0,41	0,17	6,3	10,5	13
2	3,2	0,9	6,4	6	0,9	0,7	50	0,41	0,21	10	18,5	20
3	5	0,91	5,6	6	1	0,7	60	0,4	0,13	16	15,75	20
4	8	0,91	5,6	6	0,75	0,7	80	0,42	0,13	25	20	19
5	8	0,91	5,6	6	0,8	0,8	100	0,43	0,13	32	20	21

Номер варіанта	Генератор Г1÷4							Трансформатор Т-1,2			Автотрансформатор АТ					
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	X''_d	X_2 відн. од.	r , відн. од.	$U_{ном}$, кВ	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном H}$, кВ	$U_{ном B}$, кВ	U_K , %	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном B}$, кВ	$U_{ном C}$, кВ	$U_{ном H}$, кВ	U_{K-C-H} , %
1	30	0,8	0,23	0,29	0,007	10,5	1	100	10,5 10,5	242	12	100	230	135,5	6,3	19
2	40	0,8	0,23	0,29	0,007	10,5	0,8	100	10,5 10,5	236	12	100	230	138,75	6,3	19
3	60	0,9	0,21	0,26	0,006	10,5	0,75	160	10,5 10,5	218	12	160	230	123,4	6,3	19
4	100	0,85	0,21	0,26	0,005	13,8	0,7	250	13,8 13,8	347	11	200	347	106,5	6,3	22
5	120	0,9	0,18	0,22	0,004	11	0,9	250	11 11	347	11	200	347	113,75	6,3	22

Номер варіанта	Навантаження		Лінія Л-1			Асинхронний двигун АД					
	Н-1	Н-2	x_1 , Ом/км	r , Ом/км	ℓ , км	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi_n$	$U_{ном}$ кВ	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$
	$S_{ном}$ МВ·А	$S_{ном}$ МВ·А									
1	20	100	0,43	0,13	80	3,2	0,90	6	6,4	0,7	1,00
2	25	100	0,41	0,08	100	4,0	0,91	6	6,3	0,7	0,85
3	30	120	0,41	0,08	150	5,0	0,91	6	5,6	0,7	0,90
4	40	150	0,41	0,08	200	4,0	0,91	6	6,3	0,7	0,70
5	40	150	0,41	0,08	200	3,2	0,91	6	6,4	0,7	0,50

Таблиця Д.1.4

Номер варіанта	Генератор Г1÷2						Трансформатор Т-1				Автотрансформатор АТ					
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	P_n	X_s відн. од.	r відн. од.	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	U_K %	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$U_{ном С}$ кВ	$U_{ном Н}$ кВ	$U_{КН-С}$ %	$U_{КВН}$ %
1	120	0,9	0,18	0,22	0,004	11	0,9	250	11	10,5	200	347	113,75	6,3	10	34
2	150	0,85	0,17	0,21	0,0042	13,8	0,8	400	13,8	11	250	347	253	6,3	10	34
3	200	0,85	0,205	0,257	0,0032	15,75	0,85	500	15,75	11	400	525	242,5	11	10	29
4	300	0,85	0,22	0,275	0,0032	15,75	0,9	630	15,75	11	500	525	236,25	11	10	29
5	500	0,85	0,3	0,32	0,004	15,75	0,9	1250	15,75	11	630	525	242,5	11	9,5	29
																17,5

Продовження таблиці Д.1.4

Номер варіанта	Навантаження		Лінія Л-1			Асинхронний двигун АД						
	Н-1	Н-2	x_{11} , Ом/км	r_1 , Ом/км	ρ , км	$P_{ном}$, МВт	$\cos \phi_n$	$U_{ном}$, кВ	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	
	$S_{ном}$, МВ·А	$S_{спов}$, МВ·А										
1	40	150	0,4	0,11	100	3,2	0,91	6	6,4	0,7	0,5	
2	100	250	0,42	0,108	150	4,0	0,91	6	5,4	0,7	0,6	
3	100	250	0,42	0,108	120	8	0,91	6	5,4	0,8	0,8	
4	100	250	0,42	0,108	140	8	0,91	6	5,4	0,8	0,9	
5	150	300	0,42	0,108	150	5	0,91	6	5,6	0,7	1	

Таблиця Д.1.5

Номер варіанта	Генератор Г-1.2							Тр-р ТСН-1				Трансформатор Т-1					
	$P_{ном},$ МВт	$U_{ном},$ кВ	$\cos \phi$	X''_d	X_2	$r, \text{ відн. од.}$	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном Н_2},$ кВ	$U_{ном В_1},$ кВ	$\% U_n$	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном Н_1},$ кВ	$U_{ном В_2},$ кВ	$U_{КСН},$ кВ	$U_{КВН},$ %	$U_{КСН},$ %
1	30	10,5	0,8	0,15	0,18	0,0032	1	2,5	10	6,3	5,5	40	230	121	10,5	17	6
2	55	11,5	0,8	0,12	0,15	0,0024	0,8	6,3	10	6,3	6,5	40	230	117,87	10,5	17	6
3	60	10,5	0,8	0,15	0,18	0,0029	0,75	6,3	10	6,3	8	63	340	121	10,5	18	6
4	100	10,5	0,85	0,18	0,22	0,0017	0,85	10	10	6,3	14	100	510	230	10,5	31	19
5	60	11,0	0,85	0,14	0,17	0,004	0,9	10	10	6,3	11	63	340	157	11	11	22

Номер варіанта	Асинхронний двигун АД						Реактор Р-1					Лінія Л-1			Наванта- ження Н1,2,3	S _{ном} МВ·А
	P _{ном} МВт	cos φ _n	U _{ном} кВ	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{R_{ол}}{P_{ном}}$	I _{ном} кА	U _{ном} кВ	X _p , %	ΔP, кВт	ℓ, км	x ₁₀ , Ом/км	r, Ом/км			
1	2	6	0,9	5,5	0,8	0,9	2	10	8	14,3	50	0,4	0,13	60		
2	5	6	0,91	5,6	0,7	1	3	10	12	25,7	40	0,4	0,17	70		
3	5	6	0,91	5,6	0,7	0,75	3	10	12	25,7	60	0,39	0,11	60		
4	8	6	0,91	5,4	0,8	0,8	4	10	12	29,7	80	0,41	0,08	10		
5	8	6	0,85	5,6	0,75	0,9	3,5	10	10	26	90	0,4	0,07	80		

Таблиця Д.1.6

Номер варіанта	Генератор Г-1,2						Автотрансформатор Т-1							
	$P_{ном}, \text{ МВт}$	$U_{ном}, \text{ кВ}$	$\cos \phi$	X''	X'	$r, \text{ відн. ом}$	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	$U_{ном1}, \text{ кВ}$	$U_{ном2}, \text{ кВ}$	$U_{ном3}, \text{ кВ}$	$U_{кв-н}, \%$	$U_{кв-н}, \%$	$U_{кв-н}, \%$
1	30	10,5	0,8	0,15	0,18	0,0032	1	40	230	121	11	10,5	17	6
2	55	11,5	0,8	0,12	0,15	0,0024	0,8	63	230	117,87	10,5	10,5	17	6
3	60	10,5	0,8	0,15	0,18	0,0029	0,75	63	34	121	10,5	10,5	18	6
4	100	10,5	0,85	0,18	0,22	0,0017	0,85	100	510	230	10,5	11	31	19
5	80	11	0,85	0,14	0,17	0,003	0,9	63	340	157	11	11	35	22

Номер варіанта	Асинхронний двигун 1,2							Реактор Р-1,2				Лінія Л-1			Наванта- ження Н-1,2,3
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi_n$	$U_{ном}$ кВ	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$I_{ном}$ кА	$U_{ном}$ кВ	$X_{\phi}, \%$	$\Delta P,$ кВт	$\ell,$ км	X_{12} Ом/км	$r,$ Ом/км	$S_{ном},$ МВ·А	
1	2	6	0,9	5,5	0,8	0,9	2	10	8	14,3	50	0,4	0,13	60	
2	5	6	0,91	5,6	0,7	1	3	10	12	25,7	40	0,4	0,17	70	
3	5	6	0,91	5,6	0,7	0,75	3	10	12	25,7	60	0,39	0,11	60	
4	8	6	0,91	5,4	0,8	0,8	4	10	12	29,7	80	0,41	0,08	10	
5	8	6	0,85	5,6	0,75	0,9	3,5	10	10	26	90	0,4	0,07	80	

Таблиця Д.1.7

Номер варіанта	Генератор Г-1							Тр-р Т-1				Тр-р Т-2			Реактор Р-1				
	$P_{ном}, \text{ МВт}$	$U_{ном}, \text{ кВ}$	$\cos \phi$	X''	X'	$r, \text{ вим. од.}$	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$S_{ном}, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	$U_{ном B}, \text{ кВ}$	$U_{ном H}, \text{ кВ}$	$U_{K_2}, \%$	$S_{ном}, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	$U_{ном B}, \text{ кВ}$	$U_{ном H}, \text{ кВ}$	$U_{K_2}, \%$	$I_{ном}, \text{ кА}$	$U_{ном}, \text{ кВ}$	$X_p, \%$	$\Delta P, \text{ кВт}$
1	12	6,3	0,8	0,13	0,14	0,0018	1	25	237	6,3	10,5	16	230	121	10,5	0,6	6	6	8,6
2	30	6,3	0,8	0,14	0,17	0,032	0,85	32	240	6,3	10,5	25	235	121	10,5	1,5	6	10	20,7
3	50	6,3	0,8	0,13	0,16	0,014	1	40	345	6,3	10,5	32	340	156	14	1,5	6	8	18,4
4	60	6,3	0,8	0,19	0,23	0,024	0,75	63	235,75	6,3	10,5	40	235,75	124	14	1,0	6	10	14,8
5	80	6,3	0,85	0,12	0,16	0,002	0,9	100	340	6,3	10,5	63	340	158	16	1,5	6	12	15

Продовження таблиці Д.1.7

Номер	Лінія Л-1			Асинхронний двигун АД-1,2						Навантаження Н-1,2	
	ℓ , км	$x_{1\ell}$, Ом/км	r , Ом/км	$P_{\text{ном}}$, МВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	$\cos \phi_k$	$\frac{I_n}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_n}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{P_{\text{ол}}}{P_{\text{ном}}}$	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	
1	40	0,41	0,17	2	6	0,9	5,5	0,8	0,8	10	
2	50	0,4	0,13	3,2	6	0,9	6,4	0,7	0,7	20	
3	60	0,39	0,11	4	6	0,91	6,3	0,7	0,85	40	
4	80	0,43	0,13	5	6	0,91	5,6	0,7	1	30	
5	70	0,4	0,11	8	6	0,9	6,4	0,8	0,8	30	

Таблиця Д.1.8

Номер варіанта	Генератор Г-1,2							Тр-р Т-1				Реактор Р-1			
	$P_{\text{ном}}, \text{МВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$\cos \phi$	X''_d	X_2	$r, \text{відн. од.}$	$\frac{P_{\text{ол}}}{P_{\text{ном}}}$	$S_{\text{ном}}, \text{МВ·А}$	$U_{\text{ном B}}, \text{кВ}$	$U_{\text{ном II}}, \text{кВ}$	$U_k, \%$	$I_{\text{ном}}, \text{кА}$	$U_{\text{ном KB}}$	$X_p, \%$	$\Delta P, \text{кВт}$
1	12	0,8	6,3	0,13	0,14	0,0018	1	25	237	6,3	10,5	0,6	6	6	8,6
2	30	0,8	6,3	0,14	0,17	0,032	0,85	32	240	6,3	10,5	1,5	6	10	20,7
3	50	0,8	6,3	0,13	0,16	0,014	1	40	345	6,3	10,5	1,5	6	8	18,4
4	60	0,8	6,3	0,19	0,23	0,024	0,75	63	235,75	6,3	10,5	1,0	6	10	14,8
5	80	0,8	6,3	0,2	0,24	0,002	0,8	16	157	6,3	10,5	1,5	6	11	16,3

Номер варіанта	Лінія Д-1			Асинхронний двигун АД-1,2,3						Навантаж ення Н-1,2		Автомат-ри АГ-1,2					
	ρ , км	X_1 , Ом/км	r , Ом/км	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	$\cos \phi_n$	I_n , $I_{ном}$	M_n , $M_{ном}$	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$, МВ·А	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{номВ}$, кВ	$U_{номС}$, кВ	$U_{номН}$, кВ	$U_{КВ-С}$, %	$U_{КВ-Н}$, %	$U_{КВ-В}$, %
1	40	0,41	0,17	2	6	0,9	5,5	0,8	0,8	10	32	230	135,5	6,6	11	34	21
2	50	0,4	0,13	3,2	6	0,9	6,4	0,7	0,7	20	63	230	128,25	6,6	11	35	22
3	60	0,39	0,11	4	6	0,91	6,3	0,7	0,85	40	100	230	123,41	6,3	11	31	19
4	80	0,43	0,13	5	6	0,91	5,6	0,7	1	30	125	340	230	6,3	11	31	19
5	70	0,4	0,12	6	6	0,9	6,5	0,8	0,9	25	160	340	157	6,3	11	32	20

Номер варіанта	Автомобіль АТ-1								Генератор Г-1						Тр-р 1				Тр-р 2			
	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номВ}, \text{кВ}$	$U_{номС}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{КВ-С}, \%$	$U_{КВ-Н}, \%$	$U_{КВ-В}, \%$	$P_{ном}, \text{МВт}$	$\cos \phi$	$U_{ном}, \text{кВ}$	$x^2 d / x_2$	r , відн. од	$\frac{S_{ном}}{S_{[ол]}}$	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номВ}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{КВ}, \%$	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номВ}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{КВ}, \%$	
1	32	230	135,5	11	11	34	31	10	0,85	6,6	$\frac{0,22}{0,23}$	0,078	0,7	25	120,75	6,6	10,5	16	10,5	6,6	10,5	
2	63	230	128,25	11	11	35	22	15	0,85	6,6	$\frac{0,2}{0,22}$	0,034	0,8	40	117,87	6,6	10,5	25	10,5	6,6	10,5	
3	100	230	123,41	37	11	31	19	30	0,85	10,5	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	0,9	40	115	6,6	10,5	32	37,5	11	9	
4	125	230	125,8	37	11	31	19	30	0,85	10,5	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	1,0	63	109,25	6,6	10,5	40	37,5	11	9	
5	160	230	116,2	37	11	32	20	50	0,85	11	$\frac{0,38}{0,38}$	0,01	0,75	25	112,13	6,6	10,5	63	37,5	10,5	9	

Продовження таблиці Д.1.9

Номер	Лінія Л-1			Асинхронний двигун АД						Навантаження Н-1,2,3	
	ℓ , км	x_1 , Ом/км	r , Ом/км	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	$\cos \phi_n$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$, МВ·А	
1	70	0,43	0,13	8	6	0,91	5,4	0,8	1	6	
2	100	0,43	0,13	5	6	0,91	5,6	0,7	0,8	12	
3	140	0,43	0,13	3,2	6	0,9	6,4	0,7	0,7	18	
4	100	0,42	0,11	2,5	6	0,8	5,6	0,9	1	25	
5	120	0,42	0,11	4	6	0,91	6,3	0,7	0,8	30	

Таблиця Д.1.10

Номер варіанта	Трансформатор Т-2								Генератор Г-1							Тр-р 1				Тр-р 2			
	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номВ}, \text{кВ}$	$U_{номС}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{КВ-С}, \%$	$U_{КВ-Н}, \%$	$U_{КСН}, \%$	$P_{ном}, \text{МВт}$	$\cos \phi$	$U_{ном}, \text{кВ}$	x^*d	r , відн. од	$\frac{S_{ол}}{S_{ном}}$	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номВ}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{К}, \%$	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номВ}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{К}, \%$		
1	200	230	118,6	37	11	32	20	30	0,85	11	$\frac{0,23}{0,23}$	0,0068	0,8	25	115	11	10,5	16	37	11	10		
2	63	330	135,5	37	10	32	21	30	0,85	10,5	$\frac{0,22}{0,22}$	0,04	0,9	40	120,75	11	10,5	32	37	11	10		
3	200	330	128,25	37	10	35	22	10	0,85	11	$\frac{0,22}{0,24}$	0,0068	1,0	25	115	11	13	25	37	11	10		
4	125	500	241,5	37	10,5	24	13	30	0,85	11	$\frac{0,22}{0,24}$	0,0068	0,8	32	230	11	13	40	37,75	11	11		
5	250	500	235,75	37	10,5	24	13	20	0,85	11	$\frac{0,38}{0,38}$	0,01	0,8	32	241,5	11	13	16	37,75	10,5	11		

Продовження таблиці Д.1.10

Продовження таблиці Д.Г.10													
Синхронний двигун СД-1,2													
Номер	Лінія Л-1			Лінія Л-2			Н 1,2,3		Синхронний двигун СД-1,2				
	ℓ , км	$x_{1\sigma}$, Ом/км	r , Ом/км	ℓ , км	$x_{1\sigma}$, Ом/км	r , Ом/км	$S_{ном}$, МВ·А	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	$\cos \phi_n$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	r , відн. од.	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$
1	70	0,43	0,13	60	0,42	0,27	6	6,3	10	0,8	6,4	0,0035	0,5
2	100	0,43	0,13	60	0,43	0,33	12	12	10	-0,85	7,7	0,0028	0,6
3	140	0,43	0,13	40	0,44	0,45	18	5	10	0,8	6,6	0,005	0,8
4	100	0,42	0,11	80	0,41	0,17	25	8	10	0,8	5,9	0,004	0,7
5	120	0,42	0,11	90	0,41	0,13	30	6,3	10	-0,85	6,4	0,0035	0,9

Таблиця Д.1.11

Номер вапiанта	Автоп-р АТ-3							Генератор Г-1,2						Тр-р Т-1,2				Н-1
	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{номB}$, кВ	$U_{номC}$, кВ	$U_{номH}$, кВ	U_{KB-C} , %	U_{KB-H} , %	U_{KC-H} , %	$P_{ном}$, кВт	$\cos \phi$	x^*/p^*	r , відн. од.	$U_{ном}$, кВ	$\frac{P_{ол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{номB}$, кВ	$U_{номH}$, кВ	U_K , %	
1	250	230	135,5	10,5	11	32	20	100	0,85	$\frac{0,18}{0,22}$	0,00212	10,5	0,8	125	127,05	10,5	11	100
2	320	230	128,25	18	11	32	20	150	0,85	$\frac{0,21}{0,26}$	0,00202	18	0,85	200	121	18	11	200
3	400	330	128,25	15,75	10	34	22	200	0,85	$\frac{0,19}{0,23}$	0,002	15,75	1	250	124,02	15,75	11	200
4	630	500	257,8	20	9,5	29	17,5	300	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,0026	20	0,7	40	230	20	11	300
5	400	500	257	10,5	9,5	30	18	250	0,9	$\frac{0,18}{0,24}$	0,002	10,5	0,8	300	240	11	11	250

Продовження таблиці Д.1.11

Номер варіанта	Асинхронний двигун АД-1÷2						Лінія Л-1			Лінія Л-2			Тр-р ТСН-1		
	$P_{ном}$ $MВт$	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	ℓ , км	$x_{1\tau}$ Ом/км	r_1 Ом/км	ℓ , км	$x_{1\tau}$ Ом/км	r_1 Ом/км	$S_{ном}$ $МВ \cdot А$	$U_{номВ}$ кВ	U_{κ} %
1	2,5	0,9	5,6	6	0,8	0,9	120	0,43	0,13	40	0,41	0,17	6,3	10,5	13
2	3,2	0,9	6,4	6	0,9	0,7	150	0,42	0,11	50	0,41	0,21	10	18,5	20
3	5	0,91	5,6	6	1	0,7	220	0,33	0,065	60	0,4	0,13	16	15,75	20
4	8	0,91	5,6	6	0,75	0,7	200	0,33	0,065	80	0,4	0,13	25	20	19
5	8	0,91	5,6	6	0,8	0,8	300	0,29	0,026	100	0,4	0,15	32	20	21

Таблиця Д.1.12

Номер варіанта	Автопр-р АТ-1							Генератор Г-1						Н-1
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{номВ}$ кВ	$U_{номС}$ кВ	$U_{номН}$ кВ	$U_{КВ-С}$ %	$U_{КВ-Н}$ %	$U_{КВ-Н2}$ %	$P_{ном}$ кВт	$\cos \phi$	x^*d/x^*	r_2 відн. од	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	
1	250	230	135,5	10,5	11	32	20	100	0,85	$\frac{0,18}{0,22}$	0,00212	10,5	0,8	100
2	320	230	128,25	18	11	32	20	150	0,85	$\frac{0,21}{0,26}$	0,00202	18	0,85	200
3	400	330	128,25	15,75	10	34	22	200	0,85	$\frac{0,19}{0,23}$	0,002	15,75	1	200
4	630	500	257,8	20	9,5	29	17,5	300	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,0026	20	0,7	300
5	400	500	257	10,5	9,5	29	17,5	250	0,9	$\frac{0,18}{0,24}$	0,002	10,5	0,8	150

Продовження таблиці Д.1.12

Продовження таблиці Д.1.12

Номер варіанта	Асинхронний двигун АД-1-2						Лінія Л-1				Лінія Л-2				Тр-р ТСН-1		
	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	ℓ , км	$x_{1\sigma}$ Ом/км	r_r Ом/км	ℓ , км	$x_{1\sigma}$ Ом/км	r_r Ом/км	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном}$ кВ	$U_{к\%}$ %		
1	2,5	0,9	5,6	6	0,8	0,9	120	0,43	0,13	40	0,41	0,17	6,3	10,5	13		
2	3,2	0,9	6,4	6	0,9	0,7	150	0,42	0,11	50	0,41	0,21	10	18,5	20		
3	5	0,91	5,6	6	1	0,7	220	0,33	0,065	60	0,4	0,13	16	15,75	20		
4	8	0,91	5,6	6	0,75	0,7	200	0,33	0,065	80	0,4	0,13	25	20	19		
5	7	0,9	6,2	6	0,9	0,8	250	0,4	0,07	10	0,4	0,14	16	10,5	18		

Таблиця Д.1.13

Номер варіанта	Генератор Г-1,2						Автотрансформатор АТ							
	$P_{ном}$, МВт	$\cos \phi$	X''	X_2 , відн. од.	r , відн. од.	$U_{ном}$, кВ	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{ном}$, кВ	$U_{ном C}$, кВ	$U_{ном H}$, кВ	$U_{кВ-C}$, %	$U_{кВ-H}$, %	$U_{кС-H}$, %
1	30	0,8	0,23	0,29	0,007	10,5	1	100	230	135,5	10,5	11	31	19
2	40	0,8	0,23	0,29	0,007	10,5	0,8	100	230	138,75	11	11	31	19
3	60	0,9	0,21	0,26	0,006	10,5	0,75	160	230	123,4	11	11	31	19
4	100	0,85	0,21	0,26	0,005	13,8	0,7	200	347	106,5	13,7	10	34	22
5	120	0,9	0,18	0,22	0,004	11	0,9	400	347	113,75	11	10	34	22

Номер варіанта	Тр-р Т-1,2				Лінія Л-1				Лінія Л-2				Навантаження Н-1,2,3	
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$U_{ном Н}$ кВ	$U_K, \%$	ℓ , км	x_1 , Ом/км	r , Ом/км	ℓ , км	ℓ , км	x_1 , Ом/км	r , Ом/км	$S_{ном}$ МВ·А	$S_{ном}$ МВ·А	$S_{ном}$ МВ·А
1	32	230	121	10,5	40	0,41	0,17	15	15	0,44	0,45	0	14	14
2	40	235	121	10,5	50	0,4	0,13	25	25	0,44	0,45	17	22	22
3	63	230	156	14	60	0,39	0,11	15	15	0,43	0,33	26	35	35
4	80	340	124	14	80	0,43	0,13	10	10	0,41	0,45	37	42	42
5	100	340	158	16	70	0,4	0,11	25	25	0,43	0,13	43	55	55

Таблиця Д.1.14

Номер варіанта	Тр-р Т-1								Генератор Г-1					Тр-р 1,2			
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$U_{ном Н}$ кВ	$U_{К В С}, \%$	$U_{К В Н}, \%$	$U_{К С Н}, \%$	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	$U_{ном}$ кВ	$x^* d / x_2$	r , відн. од	$\frac{S_{[a]}}{S_{ном}}$	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$U_{ном Н}$ кВ	$U_K, \%$	
1	32	115	38	11	34	31	10	0,85	10	$\frac{0,22}{0,23}$	0,078	0,7	25	230	121	10,5	
2	63	121	37,75	11	35	22	15	0,85	10	$\frac{0,2}{0,22}$	0,034	0,8	40	330	121	10,5	
3	100	121	37	11	31	19	30	0,85	10	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	0,9	40	235	115	10,5	
4	125	121	37,5	11	31	19	30	0,85	10	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	1,0	63	330	121	10,5	
5	160	230	116,2	11	32	20	50	0,85	10	$\frac{0,38}{0,38}$	0,01	0,75	25	500	240	14	

Продовження таблиці Д.1.14

продовження таблиці Д.1.1.

Номер	Лінія Л-1			Лінія Л-2			Навантаження Н-1	Навантаження Н-2
	ℓ , км	x_1 , Ом/км	r_1 , Ом/км	ℓ , км	x_1 , Ом/км	r_1 , Ом/км	$S_{ном}$, МВ·А	$S_{ном}$, МВ·А
1	70	0,43	0,13	60	0,42	0,27	6	10
2	100	0,43	0,13	60	0,43	0,33	12	20
3	140	0,43	0,13	40	0,44	0,45	18	32
4	100	0,42	0,11	80	0,41	0,17	25	80
5	120	0,42	0,11	90	0,41	0,13	30	70

Таблиця Д.1.15

Номер варіанта	Автотрансформатор Т-1							Генератор Г-1						Двигун СД-1,2				Реактор Р-1			
	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номБ}, \text{кВ}$	$U_{номС}, \text{кВ}$	$U_{номН}, \text{кВ}$	$U_{кВ-С}, \%$	$U_{кВ-Н}, \%$	$U_{кВ-Н}, \%$	$P_{ном}, \text{МВт}$	$\cos \phi$	x^*d/x_2	$r, \text{відн. од}$	$U_{ном}, \text{кВ}$	$\frac{P_{01}}{P_{ном}}$	$S_{ном}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$U_{номБ}, \text{кВ}$	x^*d/x_2	$r, \text{відн. од}$	$I_{ном}, \text{кА}$	$U_{ном}, \text{кВ}$	$X_p, \%$	$\Delta P, \text{кВт}$
1	100	230	128,25	11	11	31	19	20	0,85	$\frac{0,18}{0,22}$	0,003	11	0,85	15	10,5	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	0,4	10	8	6
2	160	230	125,8	11	11	32	20	30	0,85	$\frac{0,16}{0,2}$	0,002	10,5	0,8	25	11	$\frac{0,38}{0,38}$	0,01	0,6	10	10	8,5
3	200	230	118,6	11	11	32	20	40	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,002	11	0,9	35	11	$\frac{0,23}{0,23}$	0,0068	1,0	10	8	7,8
4	63	330	116,2	11	10	32	21	20	0,85	$\frac{0,19}{0,22}$	0,0027	10,5	0,7	20	10,5	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	0,4	10	8	6
5	200	330	135,5	11	10	35	22	50	0,85	$\frac{0,14}{0,18}$	0,002	11	0,85	30	11	$\frac{0,23}{0,23}$	0,0068	1,0	10	8	7,8

Продовження таблиці Д.1.15

Номер варіанта	Трансформатор Т-1				Лінія Л-1			Лінія Л-2,3			Навантаження Н-1,2
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$, кВ	$U_{ном Н}$, кВ	U_K , %	ℓ , км	$x_{1\sigma}$ Ом/км	r_1 Ом/км	ℓ , км	$x_{1\sigma}$ Ом/км	r_1 Ом/км	
1	25	120,75	10,5	10,5	120	0,43	0,13	80	0,43	0,13	6
2	40	117,87	10,5	10,5	140	0,42	0,11	90	0,42	0,11	8
3	63	115	10,5	10,5	150	0,42	0,11	100	0,42	0,11	10
4	25	109,25	10,5	10,5	180	0,33	0,065	80	0,33	0,065	5
5	63	112,13	10,5	10,5	120	0,33	0,065	140	0,33	0,065	12

Таблиця Д.1.16

Номер варіанта	Трансформатор Т-1							Генератор Г-1,2					Двигун СД-1,2				Реактор Р-1			
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$U_{ном Н}$ кВ	$U_{КВ-С}$, %	$U_{КВ-Н}$, %	$U_{КВ-Н}$, %	$P_{ном}$ МВт	$\cos \phi$	$\frac{x_2}{x^* p}$	r , відн. од	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{тол}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$\frac{x_2}{x^* p}$	r , відн. од	$I_{ном}$ кА	$U_{ном}$ кВ	X_p , %	ΔP , кВт
1	100	230	128,25	11	31	19	25	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,003	11	0,8	15	10,5	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	0,4	10	8	6
2	160	230	125,8	11	32	20	30	0,85	$\frac{0,2}{0,26}$	0,0027	10,5	0,9	25	11	$\frac{0,38}{0,38}$	0,01	0,6	10	10	8,5
3	200	230	118,6	11	32	20	40	0,85	$\frac{0,18}{0,22}$	0,0025	11	0,7	35	11	$\frac{0,23}{0,23}$	0,0068	1,0	10	8	7,8
4	63	330	116,2	11	32	21	70	0,85	$\frac{0,16}{0,2}$	0,002	10,5	0,85	20	10,5	$\frac{0,22}{0,24}$	0,04	0,4	10	8	6
5	200	330	135,5	11	35	22	80	0,85	$\frac{0,15}{0,19}$	0,002	11	0,8	40	11	$\frac{0,23}{0,23}$	0,0068	1,0	10	8	7,8

Номер варіанта	Трансформатор Т-2					Лінія Л-1				Лінія Л-2				Навантаження Н-1,2
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном В}$ кВ	$U_{ном Н}$ кВ	U_K , %	ℓ , км	X_{L1} Ом/км	r_1 Ом/км	ℓ , км	X_{L1} Ом/км	r_1 Ом/км	ℓ , км	X_{L1} Ом/км	r_1 Ом/км	$S_{ном}$ МВ·А
1	63	230	10,5	10,5	120	0,43	0,13	80	0,43	0,13	30	0,43	0,13	30
2	80	230	10,5	10,5	140	0,42	0,11	90	0,42	0,11	45	0,42	0,11	45
3	100	230	10,5	10,5	150	0,42	0,11	100	0,42	0,11	70	0,42	0,11	70
4	160	340	10,5	10,5	180	0,33	0,065	80	0,33	0,065	30	0,33	0,065	30
5	200	340	10,5	10,5	120	0,33	0,065	140	0,33	0,065	70	0,33	0,065	70

Таблиця Д.1.17

Номер варіанта	Генератор Г-1,2							Тр-р Т-2				Трансформатор Т-1						
	$P_{ном}, \text{ МВт}$	$U_{ном}, \text{ кВ}$	$\cos \phi$	X''_d	X''_q	$r, \text{ відн. од.}$	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$S_{ном}, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	$U_{ном В}, \text{ кВ}$	$U_{ном Н}, \text{ кВ}$	$U_K, \%$	$S_{ном}, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	$U_{ном В}, \text{ кВ}$	$U_{ном С}, \text{ кВ}$	$U_{ном Н}, \text{ кВ}$	$U_{КВ-С}, \%$	$U_{КВ-Н}, \%$	$U_{КСН}, \%$
1	12	6,3	0,8	0,13	0,14	0,0018	1	25	121	6,3	10,5	40	230	121	10,5	10,5	17	6
2	30	6,3	0,8	0,14	0,17	0,032	0,85	32	115	6,3	10,5	40	230	117,87	10,5	10,5	17	6
3	50	6,3	0,8	0,13	0,16	0,014	1	40	121	6,3	10,5	63	340	121	10,5	10,5	18	6
4	60	6,3	0,8	0,19	0,23	0,024	0,75	100	235,75	6,3	10,5	100	510	230	10,5	11	31	19
5	80	6,3	0,85	0,12	0,16	0,002	0,9	200	157	6,3	10,5	63	340	157	11	11	35	22

Номер варіанта	Синхронний двигун СД-1,2						Лінія Л-1			Лінія Л-2			Навантаження	
							ℓ , км	χ_L , Ом/км	r , Ом/км	ℓ , км	χ_L , Ом/км	r , Ом/км	Н-1	Н-2
	$P_{ном}$ МВт	$U_{ном}$ кВ	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	r , відн. од.	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$							$S_{ном}$ МВ·А	$S_{ном}$ МВ·А
1	4	10	0,8	9,24	0,006	1	40	0,42	0,21	15	0,44	0,45	10	14
2	5	10	0,8	10	0,0053	0,8	50	0,42	0,21	25	0,44	0,45	17	22
3	9	10	0,8	8,9	0,0043	0,85	40	0,41	0,17	15	0,43	0,33	26	35
4	5	10	0,8	10,1	0,0053	1	60	0,41	0,17	10	0,41	0,45	37	42
5	10	10	0,8	7,75	0,004	0,75	70	0,4	0,13	25	0,43	0,13	43	55

Номер варіанта	Автотр-р АТ-1							Генератор Г-1,2						Тр-р Т-2			
	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном B}$ кВ	$U_{ном C}$ кВ	$U_{ном H}$ кВ	U_{KB-C} %	U_{KB-H} %	U_{KC-H} %	$P_{ном}$ кВт	$\cos \phi$	$\frac{x^* d}{x_2}$	r , відн. од.	$U_{ном}$ кВ	$\frac{P_{[0]}}{P_{ном}}$	$S_{ном}$ МВ·А	$U_{ном B}$ кВ	$U_{ном H}$ кВ	U_{KC} %
1	250	230	135,5	10,5	11	32	20	100	0,85	$\frac{0,18}{0,22}$	0,00212	10,5	0,8	125	127,05	10,5	11
2	320	230	128,25	11	11	32	20	150	0,85	$\frac{0,21}{0,26}$	0,00202	18	0,85	200	121	18	11
3	400	330	128,25	11	10	34	22	200	0,85	$\frac{0,19}{0,23}$	0,002	15,75	1	250	124,02	15,75	11
4	630	500	257,8	10,5	9,5	29	17,5	300	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,0026	20	0,7	40	230	20	11
5	400	500	257	10,5	9,5	30	18	250	0,9	$\frac{0,18}{0,24}$	0,002	10,5	0,8	300	240	11	11

Номер варіанта	Синхронний двигун СД-1÷2						Реактор Р-1				Лінія Л-1,2			
	$P_{ном}$ МВт	$U_{ном}$ кВ	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	r , відн. од.	$\frac{P_{col}}{P_{ном}}$	$I_{ном}$, кА	$U_{ном}$ кВ	X_u , %	ΔP , кВт	ℓ , км	x_l , Ом/км	r_l , Ом/км	
1	6,3	10	0,8	6,4	0,0035	0,5	0,6	10	6	8,6	120	0,43	0,13	
2	12	10	-0,85	7,7	0,0028	0,6	1,5	10	10	20,7	150	0,42	0,11	
3	5	10	0,8	6,6	0,005	0,8	1,5	10	8	18,4	220	0,33	0,065	
4	8	10	0,8	5,9	0,004	0,7	1,0	10	10	14,8	200	0,33	0,065	
5	6,3	10	-0,85	6,4	0,0035	0,9	1,5	10	12	15	300	0,29	0,026	

Номер варіанта	Автотрансформатор АТ							Генератор Г-1,2						ТСН Т-1			
	$S_{ном}^{МВ\cdot А}$	$U_{новВ}^{кВ}$	$U_{новС}^{кВ}$	$U_{новН}^{кВ}$	$U_{КВ-С}^{, \%}$	$U_{КВ-Н}^{, \%}$	$U_{КВ-Н}^{, \%}$	$P_{ном}^{, МВт}$	$\cos \phi$	x_2^*d/x_2	r , відн. од.	$U_{ном}^{, кВ}$	$\frac{S_{col}}{S_{ном}}$	$S_{ном}^{МВ\cdot А}$	$U_{новВ}^{кВ}$	$U_{новН}^{кВ}$	$U_K^{, \%}$
1	80	230	135,5	10,5	11	35	22	30	0,8	$\frac{0,18}{0,22}$	0,0032	10,5	0,8	4	10	6,3	7,5
2	80	230	133,1	10,5	11	35	22	60	0,8	$\frac{0,21}{0,26}$	0,0029	10,5	0,85	6,3	10	6,3	7,5
3	125	230	130,7	10,5	11	32	19	60	0,8	$\frac{0,19}{0,23}$	0,0029	10,5	1	6,3	10	6,3	7,5
4	200	230	123,42	18,0	11	32	20	80	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,0017	10,5	0,7	10	10	6,3	14
5	250	230	121	19,0	11	32	20	50	0,8	$\frac{0,18}{0,24}$	0,0015	10,5	0,8	10	10	6,3	9

Номер варіанта	Асинхронний двигун АД-1-4							Лінія Л-1			Лінія Л-2				Тр-р Т-1				Навантаж.	
	$P_{ном}$, кВт	$\cos \phi$	I_n	U_n , кВ	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M[\phi]}{M_{ном}}$	ℓ , км	X_1 , Ом/к М	r , Ом/к М	ℓ , км	X_1 , Ом/км	r , Ом/к М	$S_{ном}$, МВ·А	U_{BH} , кВ	$\frac{U_{CH}}{U_{HH}}$, кВ	U_{ϵ} , %	$S_{ном}$, МВ·А	$S_{ном}$, МВ·А	Н-1,2	Н-3
1	5	0,9	5,6	6	0,7	0,8	70	0,43	0,13	30	0,41	0,21	40	120,75	$\frac{10,5}{10,5}$	10,5	22	60		
2	4	0,91	6,3	6	0,7	0,6	80	0,42	0,11	40	0,41	0,17	63	117,87	$\frac{10,5}{10,5}$	10,5	40	70		
3	5	0,9	5,6	6	0,7	1,0	120	0,4	0,13	25	0,4	0,13	80	115	$\frac{10,5}{10,5}$	10,5	40	80		
4	8	0,91	5,4	6	0,8	0,85	100	0,42	0,11	50	0,41	0,21	100	120,75	$\frac{10,5}{10,5}$	10,5	60	90		
5	6	0,9	6,4	6	0,9	0,7	60	0,41	0,2	45	0,4	0,23	100	121	$\frac{10,5}{10,5}$	10,5	50	50		

Таблиця Д.1.20

Номер варіанта	Автотрансформатор АТ							Генератор Г-1				ТСН Т-1					
	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{номB},$ кВ	$U_{номC},$ кВ	$U_{номH},$ кВ	$U_{KB-C},$ %	$U_{KB-H},$ %	$U_{KC-H},$ %	$P_{ном},$ МВт	$\cos \phi$	x^*d/x_2	$r,$ відп. о.л.	$U_{ном+},$ кВ	$\frac{S[\phi]}{S_{ном}}$	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{номB},$ кВ	$U_{номH},$ кВ	$U_K,$ %
1	80	230	135,5	10,5	11	35	22	30	0,8	$\frac{0,18}{0,22}$	0,0032	10,5	0,8	4	10	6,3	7,5
2	80	230	133,1	10,5	11	35	22	60	0,8	$\frac{0,21}{0,26}$	0,0029	10,5	0,85	6,3	10	6,3	7,5
3	125	230	130,7	10,5	11	32	19	60	0,8	$\frac{0,19}{0,23}$	0,0029	10,5	1	6,3	10	6,3	7,5
4	200	230	123,42	18,0	11	32	20	80	0,85	$\frac{0,2}{0,24}$	0,0017	20	0,7	10	10	6,3	14
5	125	235	121	10,5	11	32	21	50	0,8	$\frac{0,14}{0,18}$	0,0015	10,5	0,8	10	10	6,3	12

Номер варіанта	Асинхронний двигун АД-1						Лінія Л-1			Лінія Л-2			Тр-р Т-1				Навантаж.	
	$P_{ном}$ кВт	$\cos \phi$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$\frac{U_{ли}}{U_{ном}}$ кВ	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_{[0]}}{M_{ном}}$	ℓ , км	X_{Σ} , Ом/к М	r_{Σ} , Ом/к М	ℓ , км	X_{Σ} , Ом/кМ	r_{Σ} , Ом/к М	$S_{ном}$ кВ·А	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	U_{Σ} , %	$S_{ном}$ кВ·А	Н-1,2 Н-3
1	5	0,9	5,6	6	0,7	0,8	70	0,43	0,13	30	0,41	0,21	20	230	120,75	10,5	22	15
2	4	0,91	6,3	6	0,7	0,6	80	0,42	0,11	40	0,41	0,17	40	245	117,87	10,5	40	30
3	5	0,9	5,6	6	0,7	1,0	120	0,4	0,13	25	0,4	0,13	40	343	115	10,5	40	25
4	8	0,91	5,4	6	0,8	0,85	100	0,42	0,11	50	0,41	0,21	63	345	120,75	10,5	60	50
5	10	0,9	6,4	6	0,8	0,7	60	0,4	0,12	60	0,42	0,2	80	341	123	10,5	50	45

ДОДАТОК 2

Таблиця Д.2

Схема	Варіант	Умис. кВ	Кабель або шинопровід і їх довжина, м			Трансформатор			Споживачі		
			L1	L2	L3	Sном, кВА	Схема з'єднання обмоток	Iс°, кА	P1, кВт	P2, кВт	P3, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рис. 1	1	10	ΔВВГ(3*25) 20	ΔВВГ(3*16) 20	ΔВВГ(3*10) 5	630	Δ/Δ	15	30	11	-
	2	10	ΔВВГ(3*16) 25	ΔВВГ(3*16) 10	ΔВВГ(3*16) 10	1000	Δ/Δ	18	11	22	-
	3	6	ΔВВГ(3*35) 15	ΔВВГ(3*16) 15	ΔВВГ(3*16) 10	400	Δ/Δ	12	30	30	-
	4	10	ΔЛШВ(3*35) 25	ΔЛШВ(3*25) 5	ΔЛШВ(3*16) 30	1600	Δ/Δ	20	45	30	-
	5	10	ΔЛШВ(3*25) 18	ΔЛШВ(3*25) 20	ΔЛШВ(3*25) 15	250	Δ/Δ	10	22	37	-
	6	10	ΔЛШВ(3*25) 23	ΔЛШВ(3*25) 15	ΔЛШВ(3*16) 28	160	Δ/Δ	10	20	28	-
	7	6	ΔВВГ(3*25) 10	ΔВВГ(3*35) 40	ΔВВГ(3*16) 15	100	Δ/Δ	9	28	22	-
	8	6	ΔЛШВ(3*50) 45	ΔЛШВ(3*35) 15	ΔЛШВ(3*25) 24	400	Δ/Δ	11	55	30	-
	9	10	ΔЛШВ(3*35) 25	ΔЛШВ(3*35) 18	ΔЛШВ(3*16) 10	630	Δ/Δ	12	45	11	-
	10	10	ΔВВГ(3*50) 15	ΔВВГ(3*35) 35	ΔВВГ(3*16) 8	1600	Δ/Δ	14	55	11	-

Продовження табл. Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рис. 2	1	6	ΔЛШВ(3*50) 20	ΔЛШВ(3*50) 20	ΔЛШВ(3*35) 15	1000	Δ/Δ	18	45	55	-
	2	6	ΔЛШВ(3*35) 10	ΔЛШВ(3*70) 35	ΔЛШВ(3*16) 10	630	Δ/Δ	13	20	14	-
	3	10	ΔВВГ(3*16) 18	ΔВВГ(3*25) 20	ΔВВГ(3*10) 12	250	Δ/Δ	10	11	7	-
	4	6	ΔВВГ(3*25) 25	ΔВВГ(3*35) 30	ΔВВГ(3*16) 10	100	Δ/Δ	10	7	11	-
	5	10	ΔВВГ(3*35) 30	ΔВВГ(3*50) 40	ΔВВГ(3*25) 15	1600	Δ/Δ	20	28	30	-
	6	10	ΔВВГ(3*25) 15	ΔВВГ(3*35) 18	ΔВВГ(3*10) 5	250	Δ/Δ	12	22	7	-
	7	10	ΔВВГ(3*16) 12	ΔВВГ(3*50) 70	ΔВВГ(3*10) 10	160	Δ/Δ	9	7	7	-
	8	6	ΔЛШВ(3*25) 20	ΔЛШВ(3*35) 35	ΔЛШВ(3*16) 15	400	Δ/Δ	9	14	11	-
	9	10	ΔВВГ(3*35) 18	ΔВВГ(3*35) 40	ΔВВГ(3*25) 20	1000	Δ/Δ	15	55	11	-
	10	6	ΔЛШВ(3*50) 25	ΔЛШВ(3*70) 90	ΔЛШВ(3*35) 15	1600	Δ/Δ	21	55	45	-

Продолжения табл. Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	10		$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 15	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 15	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 18	400	Δ/λ	15	11	7	11
2	6		$\Delta BB\Gamma(3*10)$ 20	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 15	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 10	250	Δ/λ	10	7	11	22
3	10		$\Delta A\text{III}B(3*10)$ 15	$\Delta A\text{III}B(3*16)$ 20	$\Delta A\text{III}B(3*16)$ 25	160	Δ/λ	6	5,5	14	11
4	6		$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 30	$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 15	$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 20	1000	Δ/λ	17	55	45	22
5	6		$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 40	$\Delta A\text{III}B(3*50)$ 35	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 25	1600	Δ/λ	19	45	55	55
6	10		$\Delta BB\Gamma(3*25)$ 25	$\Delta BB\Gamma(3*25)$ 30	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 18	630	Δ/λ	13	28	28	11
7	10		$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 13	$\Delta BB\Gamma(3*10)$ 15	$\Delta BB\Gamma(3*10)$ 20	100	λ/λ	8	14	7	7
8	10		$\Delta BB\Gamma(3*25)$ 15	$\Delta BB\Gamma(3*25)$ 40	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 10	250	λ/λ	10	22	14	11
9	6		$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 35	$\Delta A\text{III}B(3*10)$ 15	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 25	400	λ/λ	13	18	7	30
10	10		$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 19	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 30	$\Delta A\text{III}B(3*50)$ 70	1000	Δ/λ	16	30	45	55

Продолжения табл. Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6		$\Delta BB\Gamma(3*50)$ 100	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 10	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 8	630	λ/λ	10	11	11	-
2	6		$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 45	$\Delta A\text{III}B(3*10)$ 15	$\Delta A\text{III}B(3*16)$ 10	250	λ/λ	8	7	14	-
3	10		$\Delta A\text{III}B(3*70)$ 80	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 18	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 25	1600	Δ/λ	15	55	45	-
4	6		$\Delta BB\Gamma(3*50)$ 25	$\Delta BB\Gamma(3*25)$ 30	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 10	1000	Δ/λ	13	30	22	-
5	10		$\Delta BB\Gamma(3*35)$ 15	$\Delta BB\Gamma(3*25)$ 20	$\Delta BB\Gamma(3*10)$ 15	400	λ/λ	10	22	7	-
6	10		$\Delta A\text{III}B(3*50)$ 18	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 25	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 30	630	Δ/λ	12	30	45	-
7	10		$\Delta A\text{III}B(3*70)$ 75	$\Delta A\text{III}B(3*35)$ 20	$\Delta A\text{III}B(3*16)$ 15	1000	λ/λ	18	45	11	-
8	6		$\Delta A\text{III}B(3*50)$ 50	$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 10	$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 18	400	Δ/λ	15	28	22	-
9	10		$\Delta A\text{III}B(3*25)$ 35	$\Delta A\text{III}B(3*16)$ 10	$\Delta A\text{III}B(3*10)$ 5	250	Δ/λ	10	11	7	-
10	6		$\Delta BB\Gamma(3*70)$ 40	$\Delta BB\Gamma(3*16)$ 12	$\Delta BB\Gamma(3*35)$ 15	630	Δ/λ	11	14	55	-

Продолжения табл. Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	10	10	ΔΛШВ(3*70) 50	ΔΛШВ(3*50) 20	ΔΛШВ(3*25) 15	400	Λ/Λ	10	20	-	-
2	10	10	ΔΛШВ(3*50) 40	ΔΛШВ(3*35) 25	ΔΛШВ(3*16) 10	250	Λ/Λ	8	11	-	-
3	10	10	ΔΛШВ(3*70) 90	ΔΛШВ(3*50) 10	ΔΛШВ(3*35) 25	1000	Δ/Λ	15	55	-	-
4	6	6	ΔΛШВ(3*50) 45	ΔΛШВ(3*35) 15	ΔΛШВ(3*25) 18	630	Δ/Λ	12	45	-	-
5	10	10	ΔВВГ(3*70) 25	ΔВВГ(3*35) 30	ΔВВГ(3*16) 10	160	Λ/Λ	7	14	-	-
6	10	10	ΔВВГ(3*70) 100	ΔВВГ(3*50) 30	ΔВВГ(3*25) 5	1600	Δ/Λ	18	30	-	-
7	6	6	ΔВВГ(3*35) 25	ΔВВГ(3*25) 20	ΔВВГ(3*10) 8	100	Λ/Λ	9	7	-	-
8	6	6	ΔΛШВ(3*35) 60	ΔΛШВ(3*35) 5	ΔΛШВ(3*25) 18	250	Δ/Λ	10	22	-	-
9	10	10	ΔВВГ(3*35) 10	ΔВВГ(3*35) 45	ΔВВГ(3*25) 15	630	Λ/Λ	12	28	-	-
10	6	6	ΔΛШВ(3*95) 80	ΔΛШВ(3*70) 10	ΔΛШВ(3*35) 10	1000	Λ/Λ	13	55	-	-

Продолжения табл. Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	10	10	ШМА - 1600 10	ΔВВГ(3*50) 24	ΔВВГ(3*16) 10	1600	Λ/Λ	20	11	-	-
2	6	6	ШМА - 2500 30	ΔВВГ(3*50) 35	ΔВВГ(3*10) 5	630	Δ/Λ	14	7	-	-
3	6	6	ШМА - 2500 70	ΔΛШВ(3*70) 80	ΔΛШВ(3*50) 8	1000	Δ/Λ	18	55	-	-
4	6	6	ШМА - 80*10 15	ΔΛШВ(3*35) 20	ΔΛШВ(3*25) 25	400	Λ/Λ	9	22	-	-
5	10	10	ШМА - 1600 25	ΔВВГ(3*50) 100	ΔВВГ(3*25) 5	400	Δ/Λ	13	28	-	-
6	10	10	ШМА - 60*8 18	ΔΛШВ(3*95) 90	ΔΛШВ(3*35) 8	630	Δ/Λ	8	45	-	-
7	6	6	ШМА - 100*8 35	ΔВВГ(3*25) 15	ΔВВГ(3*16) 15	250	Λ/Λ	11	14	-	-
8	10	10	ШМА - 1600 100	ΔΛШВ(3*50) 30	ΔΛШВ(3*25) 22	1000	Δ/Λ	16	30	-	-
9	10	10	ШМА - 1600 25	ΔВВГ(3*35) 55	ΔВВГ(3*16) 10	1600	Λ/Λ	15	20	-	-
10	10	10	ШМА - 100*10 10	ΔВВГ(3*50) 10	ΔВВГ(3*10) 15	160	Λ/Λ	10	11	-	-

Продовження табл. Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6	ШМА - 1600 30	ΔАШВ(3*16) 40	ΔАШВ(3*50) 15	1000	Λ/Λ	18	14	55	-	-
2	10	ШМА - 2500 18	ΔАШВ(3*25) 120	ΔАШВ(3*35) 10	1600	Δ/Λ	20	28	55	-	-
3	10	ШМА - 2500 100	ΔАШВ(3*10) 30	ΔАШВ(3*25) 20	1000	Δ/Λ	15	11	45	-	-
4	6	ШМА - 100*8 15	ΔВВГ(3*16) 90	ΔВВГ(3*16) 5	630	Λ/Λ	13	14	14	-	-
5	10	ШМА - 1600 75	ΔАШВ(3*25) 35	ΔАШВ(3*10) 15	1600	Λ/Λ	16	45	11	-	-
6	10	ШМА - 80*8 35	ΔАШВ(3*10) 10	ΔАШВ(3*25) 20	400	Δ/Λ	10	7	45	-	-
7	6	ШМА - 60*8 10	ΔВВГ(3*16) 50	ΔВВГ(3*25) 15	250	Λ/Λ	8	28	22	-	-
8	10	ШМА - 60*8 40	ΔВВГ(3*16) 25	ΔВВГ(3*16) 35	160	Δ/Λ	5	7	11	-	-
9	6	ШМА - 1600 35	ΔАШВ(3*16) 25	ΔАШВ(3*35) 18	630	Δ/Λ	9	11	55	-	-
10	10	ШМА - 80*10 25	ΔВВГ(3*25) 35	ΔВВГ(3*25) 15	400	Λ/Λ	10	22	28	-	-

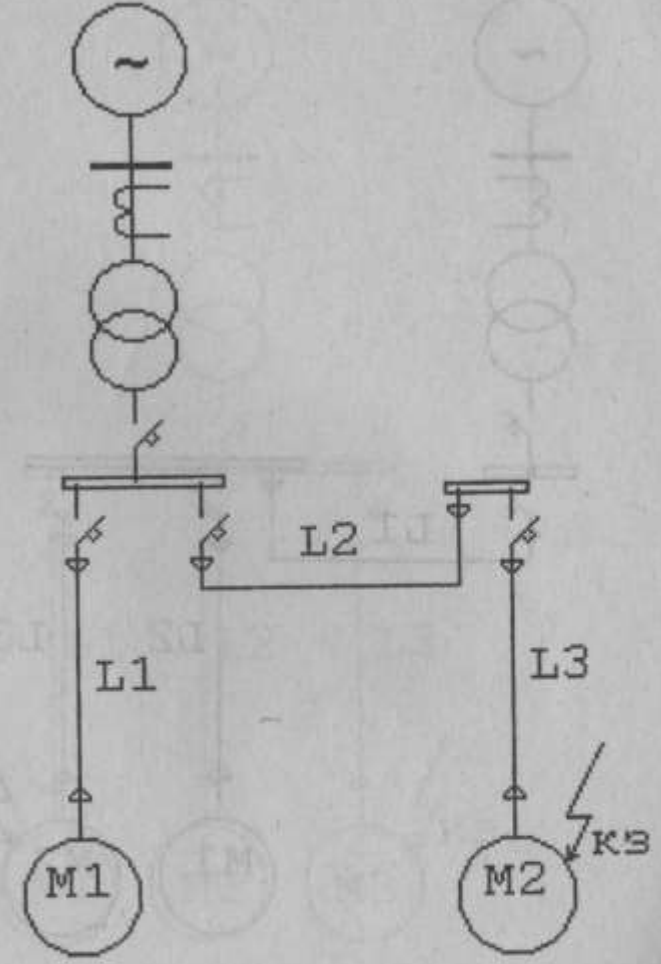


Рисунок 1

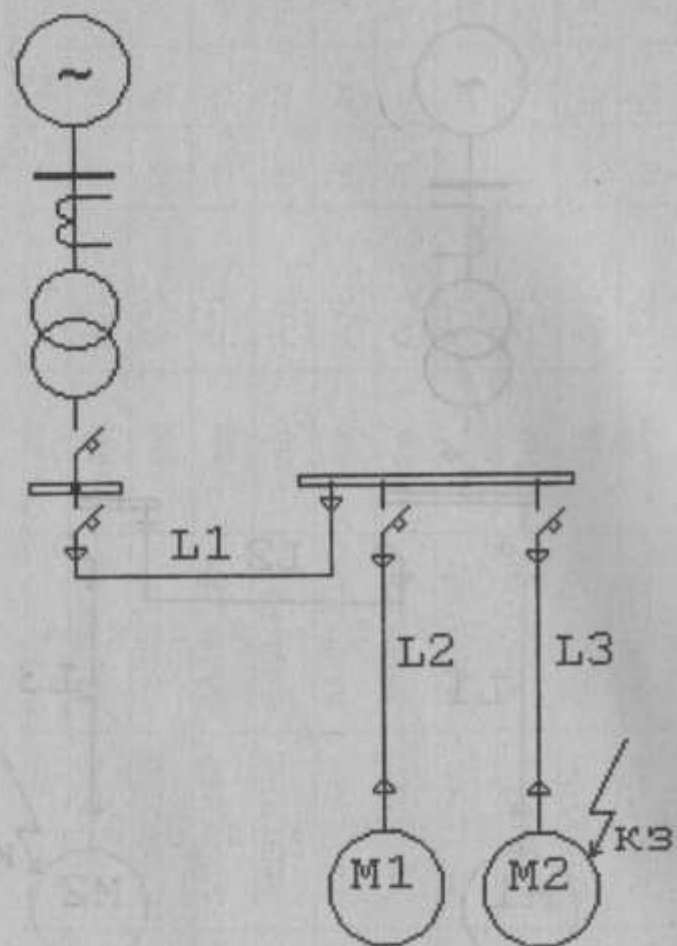


Рисунок 2

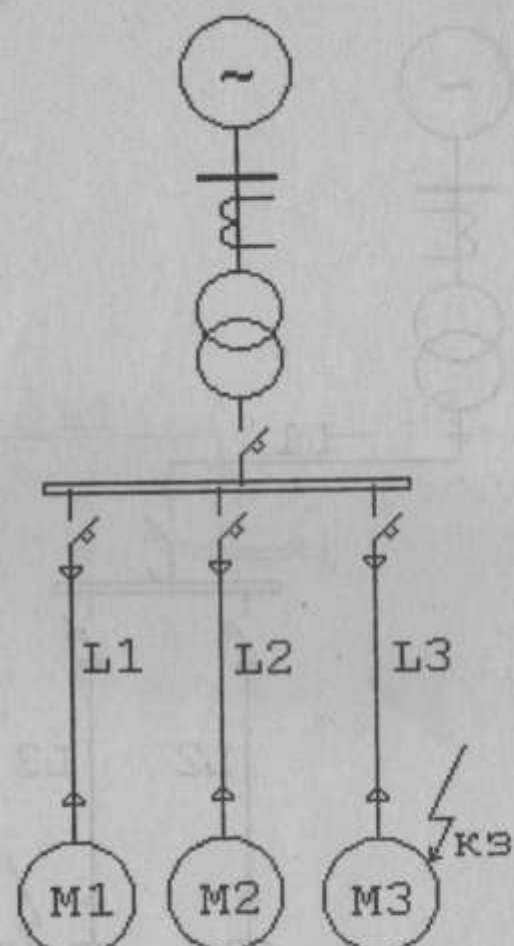


Рисунок 3

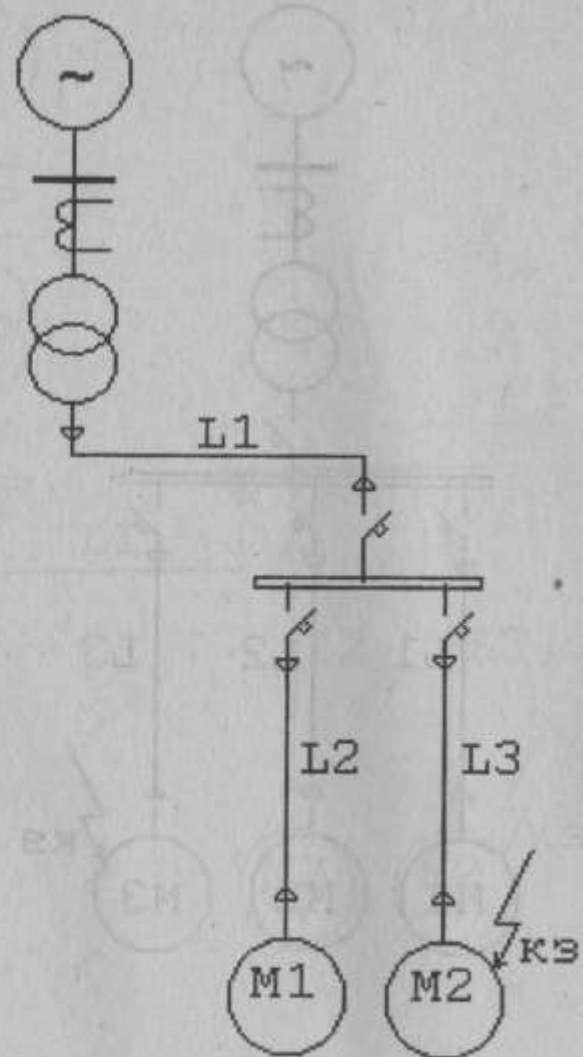


Рисунок 4

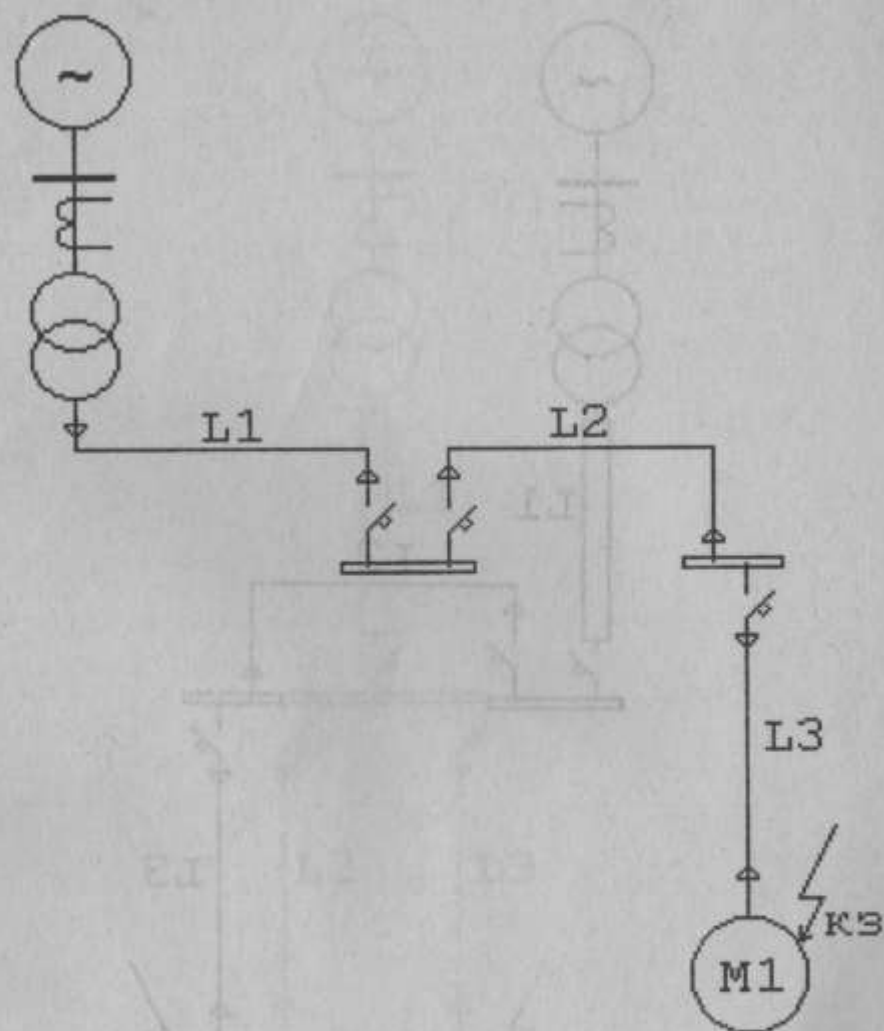


Рисунок 5

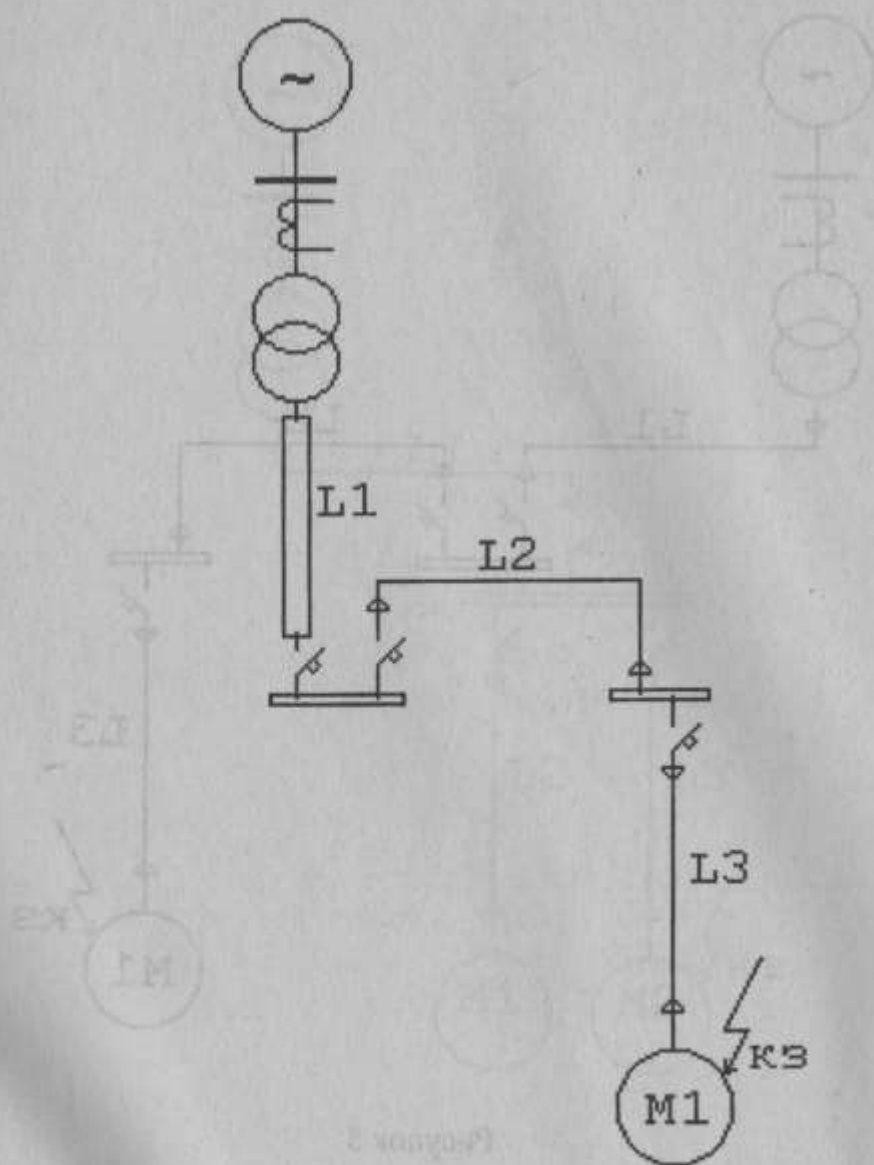


Рисунок 6

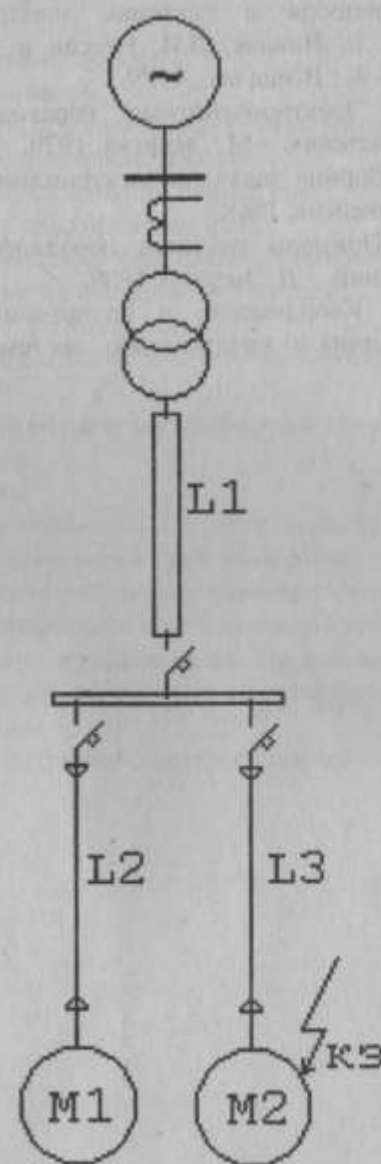


Рисунок 7

ЛІТЕРАТУРА

1. Переходные процессы в системах электроснабжения /В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Нессен и др.; Под ред. В.Н. Винославского. – К.: Выща шк., 1989.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1979.
3. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам. М.: Энергия, 1968.
4. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. – Л.: Энергия, 1980.
5. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. – М.: Энергия, 1978.



ЗМІСТ

Вступ	3
1. Завдання на курсовий проект	3
2. Зміст курсового проекту	3
3. Загальні відомості про електромагнітні перехідні процеси в системах електропостачання	5
4. Перехідний електромагнітний процес при симетричному к.з. в трифазному колі, під'єднаного до джерела необмеженої потужності	7
5. Перехідний процес в синхронному генераторі при трифазному короткому замиканні	11
6. Вплив та врахування навантаження при коротких замиканнях	17
7. Практичні методи розрахунку трифазного струму короткого замикання	18
7.1 Загальні вказівки	18
7.2 Складання схем заміщення. Системи одиниць	19
7.3 Еквівалентні перетворення схем заміщення	24
7.4 Аналітичний метод розрахунку навчального та ударного струмів трифазного короткого замикання	25
7.5 Розрахунок струму трифазного к.з. для довільного моменту часу перехідного процесу з використанням розрахункових кривих	33
8. Розрахунок несиметричних коротких замикань	38
Додаток 1	50
Додаток 2	111
Література	126