МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
_____ Ю.Г. Никитева
«_2_» _11_ 2026 г.

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов всех форм обучения направления подготовки Электроэнергетика и электротехника

Курск 2026

УДК 621.311

Составитель канд. техн. наук, доцент В.Н. Алябьев

Рецензент
Канд.техн.наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники *О.М.Ларин*

Расчет токов коротких замыканий в электроэнергетических системах: методические указания к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. В.Н.Алябьев. Курск, 2026. 52 с.: ил. 21, табл. 7.

Излагаются методические рекомендации по выполнению курсовой работы по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах». Рассчитываются сверхпереходные, ударные, установившиеся токи симметричных и несимметричных коротких замыканий в электроэнергетических системах.

Предназначены для студентов направления подготовки Электроэнергетика и электротехника.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2.11.26. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 3,25 . Уч.-изд.л. 2,55. Тираж 100 экз. Заказ. 455 Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

Расчет токов коротких замыканий (КЗ) ведется, как правило, в относительных единицах. Реальную схему, имеющую трансформаторные связи, замещают эквивалентной электрически связанной схемой, параметры которой приведены к единой ступени напряжения и единой базисной мощности.

За базисную мощность $S_Б$ (МВА) целесообразно принимать число, кратное 10 (10,100,1000 МВА и т.д.), близкое к установленной мощности генераторов в расчетной схеме. За основное базисное напряжение $U_Б$ (кВ) следует принимать номинальное напряжение аварийной ступени.

Приведение схем обычно осуществляют по приближенным коэффициентам трансформации, устанавливая для каждой ступени трансформации средние номинальные напряжения: 0.127; 0.230; 0.400; 0.525; 0.690; 3.15; 6.3; 10.5; 13.8; 15.75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 750 кВ. Тогда формулы для вычисления параметров эквивалентной схемы замещения имеют вид:

для генераторов

$$X_{*d} = X_d \frac{S_Б}{S_H} \ , \qquad X''_{*d} = X''_d \frac{S_Б}{S_H} \ ,$$

где X_d , X_d'' - синхронное сопротивление генератора по продольной оси и его сверхпереходное сопротивление в относительных номинальных единицах;

S_H - номинальная мощность генератора, МВА;

для трансформаторов

$$X_{*T} = \frac{u_{k\%}}{100\%} \frac{S_Б}{S_H} \ ,$$

где $u_{k\%}$ - номинальное напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора (%) либо напряжение короткого за-

мыкания стороны трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, определяемое по формулам

$$u_{kB} = 0{,}5 \cdot (u_{kB-H} + u_{kB-C} - u_{kC-H}),$$

$$u_{kC} = 0{,}5 \cdot (u_{kB-C} + u_{kC-H} - u_{kB-H}),$$

$$u_{kH} = 0{,}5 \cdot (u_{kB-H} + u_{kC-H} - u_{kB-C});$$

S_H - номинальная мощность трансформатора, МВА;

для токоограничивающего реактора

$$X_{*P} = X_P \frac{S_Б}{\sqrt{3} U_H I_H} = X_P \frac{I_{Бk}}{I_H} \ ,$$

где X_P - сопротивление реактора в относительных номинальных единицах;

U_H - среднее номинальное напряжение ступени, где установлен реактор, кВ;

I_H - номинальный ток реактора, кА;

$I_{Бk}$ - базисный ток на расчетной ступени, кА;

для линий электропередачи (воздушных, кабельных)

$$X_{*Л} = X_0 l \frac{S_Б}{U_{БЛ}^2} \ ,$$

где X_0 - удельное сопротивление линии, Ом/км;

1 - длина линии, км;

$U_{БЛ}$ - среднее номинальное напряжение линии, кВ;

для нагрузок

$$Z_{*H} = \frac{1}{S_{*H}} (Cos\varphi_H + jSin\varphi_H),$$

где S_{*H} - мощность нагрузки, выраженная в относительных единицах

$$S_{*H} = \frac{S_H}{S_Б};$$

φ_H - номинальный угол нагрузки.

Если расчетная схема составляется с учетом активных сопротивлений, то в формулах величины X заменяются на Z.

Базисные сопротивление и ток на расчетной ступени опреде-

ляются, исходя из выбранных $S_Б$ и $U_Б$, следующими выражениями:

$$Z_{Бk} = \frac{U_{Бk}^2}{S_{Бk}},$$

$$I_{Бk} = \frac{S_Б}{\sqrt{3}U_{Бk}},$$

где $U_{Бk}$ - базисное напряжение на расчетной ступени (равно среднему номинальному напряжению этой ступени), кВ.

Формулы для обратного пересчета (определение действующих значений токов, напряжений, сопротивлений, мощностей по их величинам в относительных единицах приведенной схемы) имеют вид

$$I = \underset{*}{I} \cdot I_{Бk},\ U = \underset{*}{U} \cdot U_{Бk},\ Z = \underset{*}{Z} \cdot Z_{Бk},\ S = \underset{*}{S} \cdot S_{Бk}.$$

Для определения токов и напряжений в приведенной схеме при КЗ необходимо полученную схему путем последовательных преобразований привести к простейшему виду (рис. 1.1).

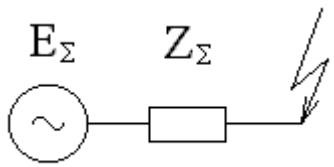


Рис. 1.1. Эквивалентная схема замещения.

Основные приемы преобразования схем приведены в приложении А.

2. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИИ

Для упрощения расчета трехфазного КЗ при составлении схемы замещения принимают следующие допущения:

все элементы схемы считают линейными;

токами намагничивания трансформаторов пренебрегают;

параметры всех фаз считают одинаковыми;

емкостными проводимостями линий пренебрегают или учитывают их в виде емкостей, сосредоточенных по концам линии;

нагрузки учитывают приближенно;

скорости вращения роторов всех машин схемы в течение КЗ считают неизменными;

пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы.

Последнее допущение приемлемо только при расчетах начального и конечного значений переходного процесса в основных звеньях высокого напряжения расчетной схемы; приближенный учет активных сопротивлений находит отражение только при оценке постоянных времени затухания свободных составляющих токов. В тех случаях, когда расчет производится для протяженной кабельной или воздушной линии электропередачи с относительно небольшими сечениями проводников, а также для установок и сетей напряжением до 1000 В, данное допущение неприемлемо.

2.1. Расчет сверхпереходного тока КЗ

Генераторы, крупные синхронные двигатели и компенсаторы, а также обобщенные нагрузки мощных узлов учитываются в схеме замещения своими сверхпереходными ЭДС (E'') и сопротивлениями (X'').

ЭДС генераторов, синхронных двигателей и компенсаторов находят по следующей формуле:

$$E'' = \sqrt{(U_0 \cdot Cos\varphi_0)^2 + (U_0 \cdot Sin\varphi_0 + I_0 X''_d)^2},$$

где U_0, I_0, φ_0 - параметры доаварийного режима на зажимах машины. Допускается использование упрощенной формулы

$$E'' = U_0 + I_0 X''_d \cdot Sin\varphi_0.$$

ЭДС обобщенной нагрузки находят по формуле

$$E'' = \sqrt{(U_0 \cdot Cos\varphi_0)^2 + (U_0 \cdot Sin\varphi_0 - I_0 X''_H)^2},$$

или по упрощенной формуле

$$E'' = U_0 - I_0 X''_H \cdot Sin\varphi_0.$$

где U_0, I_0, φ_0 - параметры доаварийного режима на зажимах нагрузки.

При отсутствии необходимых данных о доаварийном режиме, а также в приближенных расчетах принимают средние значения E'' и

$X^{//}$, приведенные в приложении Б. Эти величины считаются отнесенными к полной номинальной мощности и среднему номинальному напряжению соответствующей ступени.

Если доаварийным режимом является холостой ход, то нагрузки в схеме отсутствуют, а ЭДС всех генераторов и синхронных компенсаторов принимаются равными $E^{//} = 1$.

После построения эквивалентной электрической схемы замещения и определения всех ее параметров приводят схему путем последовательных преобразований к простейшему виду (рис.1.1). Определяют сверхпереходный ток в месте КЗ:

$$I_k^{//} = \frac{E_\Sigma^{//}}{X^{//}}.$$

Последовательно развертывая схему к первоначальному виду, находят токи и напряжения у всех ее элементов.

С помощью формул обратного пересчета вычисляют эти токи и напряжения в именованных единицах.

2.2. Расчет ударного тока короткого замыкания

Ударный ток - это максимальное мгновенное значение тока КЗ при наиболее неблагоприятных расчетных условиях. Его определяют по формуле

$$i_y = k_y I_m^{//},$$

где $I_m^{//}$- амплитуда периодической слагающей тока в первый момент КЗ (амплитуда сверхпереходного тока $I^{//}$)

$$I_m^{//} = \sqrt{2} I^{//};$$

k_y- ударный коэффициент.

$$k_y = 1 + e^{-0.01/T_a},$$

где T_a- постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

Величину k_y можно определить из табл.ПЗ.1 приложения В.

В сложной схеме апериодическую составляющую считают за-

тухающей с эквивалентной постоянной времени

$$T_a \approx T_Э = \frac{X_\Sigma^{//}}{\omega R_\Sigma},$$

где $X_\Sigma^{//}$ - результирующее реактивное сопротивление схемы относительно точки КЗ (при закороченных активных сопротивлениях);

R_Σ - результирующее активное сопротивление схемы относительно точки КЗ (при неучете реактивных сопротивлений).

Если точные значения активных сопротивлений элементов схемы неизвестны, то их определяют по усредненным значениям **X/R** (приложение В, табл.ПЗ.2).

При грубых расчетах эквивалентную постоянную времени не определяют, а ударный коэффициент принимают усредненно (приложение В,табл.ПЗ.1).

Действующее значение ударного тока находят по формуле

$$I_y = I^{//}\sqrt{1+2(k_y-1)^2}.$$

Подробнее об ударном токе можно прочитать в / 7 /.

2.3. Расчет установившегося тока КЗ

Расчет установившегося режима трехфазного КЗ при отсутствии АРВ генераторов отличается от расчета сверхпереходного режима только параметрами схем замещения генераторов и нагрузок. Генератор замещается ЭДС E_d , включенной за синхронным сопротивлением X_d . Если величина E_d заранее неизвестна, ее можно определить по формуле

$$E_d = \sqrt{(U_0 \cdot Cos\varphi_0)^2 + (U_0 \cdot Sin\varphi_0 + I_0 X_d)^2},$$

где U_0, I_0, φ_0 - параметры доаварийного режима на зажимах генератора.

Нагрузки учитываются эквивалентными сопротивлениями. В приближенных расчетах их замещают эквивалентным реактивным сопротивлением $Хнагр$ =1.2, считая его отнесенным к полной мощности-нагрузки (МВА) и среднему номинальному напряжению ступени, к которой она подключена.

Если доаварийным режимом был холостой ход, то нагрузки в схеме замещения отсутствуют, а ЭДС всех ее генераторов E = 1.

После построения эквивалентной схемы замещения и определения всех параметров ее приводят к простейшему виду (рис.1.1.) путем последовательных преобразований, затем определяют ток в точке КЗ и, развертывая схему к первоначальному виду, находят токи и напряжения у всех ее элементов. С помощью формул обратного пересчета вычисляют эти токи и напряжения в именованных единицах.

2.4. Учет АРВ генераторов при расчетах КЗ

Действие АРВ направлено на поддержание неизменным напряжения на выводах генератора независимо от режима его работы. Предельная величина ЭДС, которую АРВ при этом может обеспечить, определяется как

$$E_{пред} = k_ф U_н \quad ,$$

где $k_ф$ - кратность форсировки (обычно k = 3...5).

В первый момент КЗ АРВ не успевает воздействовать на ЭДС генератора. Поэтому сверхпереходный ток в схемах с генераторами, имеющими АРВ, определяется так же, как и при отсутствии АРВ:

$$I_k^{//} = \frac{E_\Sigma}{X^{//}} \quad .$$

При установившемся КЗ генератор может работать в одном из двух режимов: предельного возбуждения или нормального напряжения. Если внешнее сопротивление (сопротивление схемы между зажимами генератора и точкой КЗ) больше критического, то генератор работает в режиме нормального напряжения и схема замещения соответствует рис.2.1. Установившийся ток КЗ

$$I_k = \frac{U_н}{X_{внеш}} \quad < \quad I_{кр} \quad .$$

Если же внешнее сопротивление меньше критического, то генератор работает в режиме предельного возбуждения, и схема за-

мещения соответствует рис.2.2. Ток в схеме

$$I_k = \frac{E_{пред}}{X_\Sigma} = \frac{k_ф U_н}{X_d + X_{внеш}} \quad > \quad I_{кр} \quad .$$

Величину критического сопротивления находят по формуле

$$X_{кр} = \frac{X_d}{k_ф - 1} \quad .$$

Соответственно, критический ток

$$I_{кр} = \frac{U_н}{X_{кр}} \quad .$$

В случае необходимости расчета переходного процесса при КЗ в сложной системе с большим числом генераторов, ток от которых поступает к месту КЗ по общим для этих генераторов ветвям, понятие внешнего реактивного сопротивления теряет смысл. Здесь удобнее пользоваться понятием критического тока, который для каждого генератора, имеющего АРВ, нетрудно найти через его параметры. Расчет ведут методом последовательных приближений, произвольно задаваясь для каждого из генераторов с АРВ той или иной схемой замещения (для генераторов, вблизи которых происходит КЗ, характерно предельное возбуждение, а для отдаленных - нормальное напряжение). Схему сворачивают к простейшему виду (рис.1.1), находят ток в точке КЗ I_k. Затем, разворачивая схему к первоначальному виду, определяют токи всех ее генераторов и делают проверку правильности выбранных для них режимов. Для генераторов с АРВ, замещенных схемой предельного возбуждения, должно выполняться условие $I \geq I_{кр}$, а для генераторов с АРВ, замещенных по схеме нормального напряжения, - $I \leq I_{кр}$. Если для некоторых генераторов это условие оказалось невыполненным, то их схему замещения меняют. Расчет повторяют, выполняя проверку до тех пор, пока режимы всех генераторов с АРВ не станут соответствовать их схемам замещения.

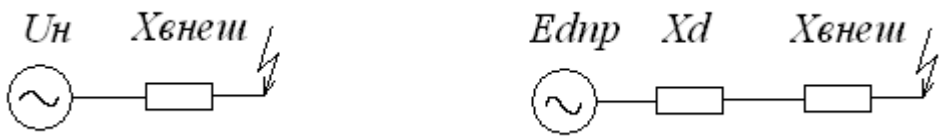


Рис. 2.1. Рис.2.2.

2.5. Применение метода расчетных кривых

Метод основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента процесса КЗ значения периодической слагающей тока в точке КЗ в функции от расчетного реактивного сопротивления $X_{расч}$ для простой схемы (рис.2.3).

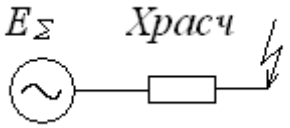


Рис. 2.3.

После преобразования исходной схемы к такому виду можно воспользоваться расчетными кривыми / 1, 3, 4 /.

Порядок расчета:

1. Составляют схему замещения. Генераторы в ней замещаются сверхпереходными сопротивлениями X_d'' и ЭДС $E'' = 1$. Нагрузки из схемы исключаются, кроме крупных синхронных двигателей и компенсаторов (особенно находящихся вблизи точки КЗ), учитывающихся как генераторы соответствующей мощности.

2. Для заданных $S_Б$ и $U_Б$ определяют параметры элементов в схеме замещения.

3. С помощью последовательных преобразований упрощают схему, причем в процессе преобразований не эквивалентируют генераторы разных типов (гидро- и турбогенераторы, машины с АРВ и без АРВ). Систему (при ее наличии) обязательно выделяют в самостоятельную ветвь.

4. Для каждой из результирующих ветвей определяют величину расчетной реактивности

$$X_{расч} = X_\Sigma \frac{S_{H\Sigma}}{S_Б} ,$$

где $S_{H\Sigma}$ - суммарная номинальная мощность генераторов в данной ветви.

5. По соответствующим расчетным кривым / 1, 3, 4 / для полу-

ченных расчетных реактивностей определяют, интерполируя при необходимости, относительные значения токов $I_{\Pi kt}$ в ветвях для интересующих моментов времени.

Если в процессе преобразований не удалось избежать эквивалентирования генераторов различных типов, то используются расчетные кривые для тех генераторов, которые находятся ближе к месту КЗ.

Если $X_{расч} \geq 3$, то величину $I_{\Pi kt}$ для любого момента можно считать постоянной и равной

$$I_{\Pi kt} = \frac{1}{X_{расч}} \quad .$$

Периодическую слагающую тока КЗ от системы также считают незатухающей во времени и определяют как

$$I_{\Pi kt} = \frac{U_C}{X_{\Sigma C}} \quad .$$

6. Найденные значения токов $I_{\Pi kt}$ переводят к прежнему значению базисной мощности $S_Б$, умножая на отношение $S_{H\Sigma} / S_Б$.

7. Разворачивая схему в обратном направлении, находят токи и напряжения во всех ее элементах.

8. Определяют искомые токи и напряжения в именованных единицах, умножая их на базисные для данной ступени.

3. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Правило эквивалентности прямой последовательности

Токи и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в точке КЗ. В свою очередь, ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, определяемое видом КЗ.

Если не учитывать дугу в месте КЗ (металлическое КЗ), то правило эквивалентности прямой последовательности имеет вид

$$I_{ka1}^{(n)} = \frac{E_{a\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)}},$$

где I_{ka1} - ток прямой последовательности в фазе А в точке КЗ;

$E_{a\Sigma}$ - результирующая ЭДС схемы прямой последовательности;

$Z_{1\Sigma}$ - результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки КЗ;

$Z_{\Delta}^{(n)}$ - дополнительное сопротивление, определяемое видом КЗ.

При однофазном КЗ $Z_{\Delta}^{(n)} = Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}$.

При двухфазном КЗ $Z_{\Delta}^{(n)} = Z_{2\Sigma}$.

При двухфазном КЗ на землю $Z_{\Delta}^{(n)} = Z_{2\Sigma} \parallel Z_{0\Sigma}$.

Здесь $Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ - результирующие сопротивления схем замещения обратной и нулевой последовательностей относительно точки КЗ.

Модуль фазного тока в аварийной фазе выражается через ток прямой последовательности:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{ka1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, определяемый видом КЗ.

При неучёте активных сопротивлений в схеме этот коэффициент равен:

при однофазном КЗ $m^{(1)} = 3$;

при двухфазном КЗ $m^{(2)} = \sqrt{3}$;

при двухфазном КЗ на землю $m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})^2}}$,

где $Z_{2\Sigma}$ и $Z_{0\Sigma}$ берутся по модулю.

3.2. Схемы замещения для токов различных последовательностей

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей определяют по схемам замещения соответствующих последовательностей, эквивалентируя их относительно точки КЗ.

Схема прямой последовательности соответствует схеме расчета трехфазного КЗ. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени, генераторы и нагрузки вводятся в схему соответствующими ЭДС и реактивными сопротивлениями; все остальные элементы входят в нее неизменными во времени сопротивлениями.

Началом схемы прямой последовательности является точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности, но ЭДС всех генерирующих элементов в ней приравниваются нулю, а сопротивления обратной последовательности всех элементов считаются неизменными во времени.

Если точные значения сопротивлений обратной последовательности для генераторов, двигателей и обобщенной нагрузки неизвестны, то принимают:

для машин без демпферной обмотки $X_2 \approx 1.45 X_d''$;

для турбогенераторов и машин с демпферной обмоткой $X_2 \approx 1.22 X_d''$;

для обобщенной нагрузки X_2 =0.35 (сети 6...10 кВ) или X_2 = 0.45 (сети 35 кВ), считая эту величину отнесенной к полной мощности нагрузки и среднему напряжению той ступени, где она присоединена.

В практических расчетах для машин с демпферной обмоткой часто принимают $X_2 \approx X_d''$.

Параметры остальных элементов (токоограничивающие реакторы, трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии) соответствуют параметрам схемы прямой последовательности.

Началом схемы обратной последовательности является точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

Схема нулевой последовательности в значительной степени определяется соединением обмоток трансформаторов и автотрансформаторов, так как ток нулевой последовательности является, по существу, однофазным током, разветвленным между тремя фазами

и возвращающимся через землю.

Сопротивления элементов в схеме нулевой последовательности в общем случае существенно отличаются от их сопротивлений в схемах обратной и прямой последовательностей:

1. Синхронные машины обычно имеют X_0 = (0.15...0.16) X''_d. Как правило, схемы соединения обмоток трансформаторов и подключаемых к ним генераторов подбирают такими, чтобы исключить протекание через генераторы токов нулевой последовательности.

2. Для обобщенной нагрузки X_0 определяется сопротивлениями и схемами соединения входящих в нее элементов и питающих обмоток понижающих трансформаторов. Как правило, питающие обмотки понижающих трансформаторов соединяются в Δ ("треугольник"), что исключает проникновение в нагрузку токов нулевой последовательности от внешних (за питающим трансформатором) коротких замыканий.

3. Для трансформаторов величина X_0 определяется их конструкцией и соединением обмоток. Ток нулевой последовательности может подтекать к трансформатору лишь со стороны обмотки, соединенной в "звезду" с заземленной нейтралью (Y-0). Во вторичных обмотках в этом случае наводится ЭДС нулевой последовательности и, в определенных условиях, может протекать трансформированный ток нулевой последовательности (рис. 3.1).

Величина $X_т$ соответствует его величине для прямой (обратной) последовательности.

Величина $X_{μ0}$ определяется конструкцией трансформаторов. Для групп из трех однофазных или для трехфазных пятистержневых трансформаторов $X_{μ0} = \infty$, а для трехфазных трехстержневых трансформаторов $X_{μ0}$ = (0.3...1.0) о.е.

Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов определяются аналогично.

Если в нейтраль обмотки трасформатора, по которой протекает ток нулевой последовательности, включено сопротивление, то оно учитывается последовательным включением в схему замещения сопротивления утроенной величины.

4. Автотрансформаторы с глухим заземлением нейтрали имеют схему замещения нулевой последовательности, аналогичную схеме замещения трансформатора.

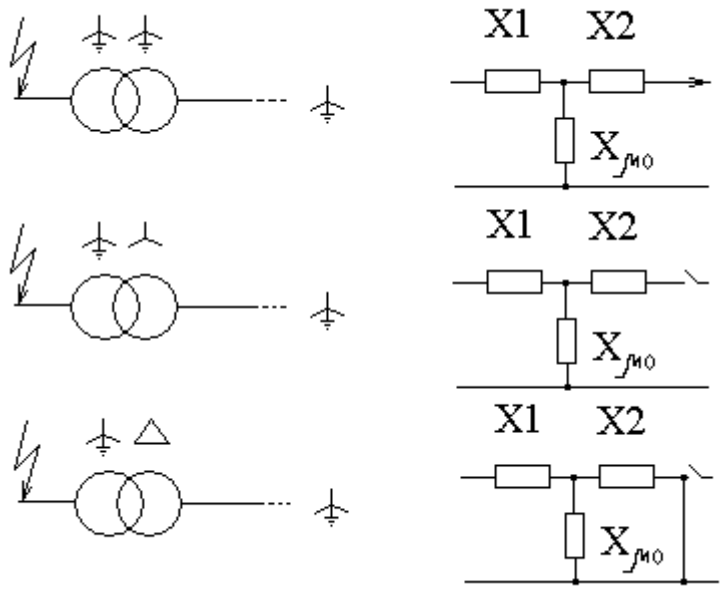


Рис. 3.1

5. Воздушные линии имеют сопротивление X_0, значительно большее, чем их сопротивление токам прямой (обратной) последовательности. В практических расчетах обычно принимают:

для одноцепной линии без тросов $X_0 = 3.5\,X_1$;

то же, со стальными тросами $X_0 = 3.0\,X_1$;

для двухцепной линии без тросов $X_0 = 5.5\,X_1$;

то же, со стальными тросами $X_0 = 4.7\,X_1$.

6. Для кабельной линии в практических расчетах принимают $R_0 \approx 10R_1$, $X_0 = (3.5...4.6)\,X_1$.

7. Для токоограничивающих реакторов $X_1 = X_2 = X_0$.

Схему замещения для токов нулевой последовательности начинают отроить от точки КЗ, последовательно прослеживая пути протекания токов нулевой последовательности. В цепи, электрически связанной с точкой КЗ, токи нулевой последо-

***вательности потекут лишь в сторону элементов, соединенных в* Y-0.**

Протекая через обмотки трансформаторов (автотрансформаторов), соединенные в Y-0, токи нулевой последовательности наводят в остальных обмотках трансформаторов ЭДС нулевой последовательности. Но ток нулевой последовательности потечет в них лишь в том случае, если они соединены в Δ (ток замыкается в треугольнике и не будет протекать в подключенной к нему цепи) или если во вторичной цепи, кроме соединенной в Y-0 обмотки трансформатора, имеются еще заземленные нейтрали.

Началом схемы нулевой последовательности является точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

3.3. Расчет сверхпереходного тока КЗ

Составляются схемы различных последовательностей. Схема прямой последовательности соответствует схеме для расчета сверхпереходного тока при трехфазном КЗ, то есть генераторы, крупные синхронные и асинхронные двигатели, а также обобщенная нагрузка замещаются сверхпереходными параметрами, а остальные элементы - своими постоянными сопротивлениями.

Схема обратной последовательности соответствует схеме прямой последовательности, но все ЭДС в ней принимаются равными нулю.

Схема нулевой последовательности составляется особо, по правилам, изложенным в 3.2.

Схемы свертываются к простейшему виду с определением $E_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности определяются симметричные составляющие сверхпереходного тока в точке КЗ и его полное значение. Развертывая схемы последовательностей к исходному состоянию, определяют симметричные составляющие токов во всех точках схемы. При этом нужно иметь в виду, что, проходя через трансформаторы, токи изменяются не только по модулю, но и по фазе:

для прямой последовательности $k_1 = k \cdot e^{j30N}$;

для обратной последовательности $k_1 = k \cdot e^{-j30N}$,

где N - номер группы соединения обмоток трансформатора.

Геометрическое сложение векторов токов различных последовательностей позволяет определить полные значения токов во всех элементах схемы.

3.4. Расчет ударного тока КЗ

Ударный коэффициент рассчитывается по формуле

$$k_y = 1 + e^{-0.01/T_Э},$$

где $T_Э$ - эквивалентная постоянная времени.

$$T_Э = \frac{X_{1\Sigma} + X_\Delta^{(n)}}{\omega(R_{1\Sigma} + R_\Delta^{(n)})},$$

где $X_\Delta^{(n)}, R_\Delta^{(n)}$ - добавочные сопротивления, определяемые видом КЗ. Для каждой из схем последовательностей определяют R_Δ при неучёте ее реактивных сопротивлений, а X_Δ находят при неучёте активных.

При грубых расчетах берут готовое значение k_y в зависимости от места КЗ в схеме (приложение В).

Ударный ток находят по формуле

$$i_y = \sqrt{2} k_y I^{//},$$

где $I^{//}$ - действующее значение сверхпереходного тока КЗ.

3.5. Расчет установившегося тока КЗ

Расчетные схемы отдельных последовательностей составляются как и при расчете I", но в схеме прямой последовательности генераторы, отдельно учитываемые двигатели и обобщенная нагрузка замещаются установившимися значениями параметров. Затем схема сворачивается к простейшему виду, определяются эквивалентные параметры, рассчитываются симметричные составляющие и полные токи фаз в точке КЗ Развертывая схемы в обратном направлении, находят симметричные составляющие и полные токи во всех точках схемы. .

По мере развертывания схем отдельных последовательностей можно параллельно с токами определить также симметричные составляющие напряжений и их полные значения.

3.6. Учет АРВ генераторов

Расчет токов КЗ с учетом АРВ генераторов аналогичен соответствующему расчету при трехфазном КЗ, но с учетом добавочного сопротивления $X_{\Delta}^{(n)}$, определяемого видом КЗ.

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

В приложении Г приведены 16 вариантов схем электроэнергетических систем (рис.П4.1 – П4.16). В каждой из предложенных схем содержится до шестнадцати точек короткого замыкания.

В приложении Г (табл.П4.1 - П4.4) приводятся два варианта исходных данных для каждой схемы (типы и основные характеристики элементов, длины линий и сечения проводов, мощности и коэффициенты мощности нагрузок).

Номер рисунка, номер варианта, месторасположение точек короткого замыкания, особенности конструкции воздушных линий, а так же оснащенность генераторов устройствами АРВ указываются преподавателем.

5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

На первом этапе выполняется построение схемы замещения и расчет ее параметров в относительных базисных единицах.

Далее для каждой из указанных точек короткого замыкания и для каждого вида короткого замыкания ($к^{(3)}$, $к^{(1)}$, $к^{(2)}$, $к^{(1,1)}$) рассчитываются сверхпереходный, ударный, установившийся токи КЗ, а также ток КЗ спустя некоторый интервал времени Δt, указанный преподавателем.

Строятся векторные диаграммы токов и напряжений для несимметричных режимов.

6. КОНТРОЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ

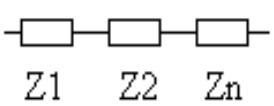
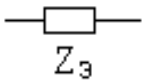
Результаты расчетов могут быть проверены студентами с помощью программы PRK / 4 /, позволяющей рассчитывать токи симметричных и несимметричных коротких замыканий в сложной электрической сети произвольной конфигурации.

Подготовка исходных данных для программы PRK должна осуществляться в соответствии с рекомендациями, изложенными в / 4 /.

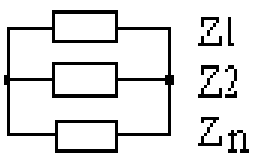
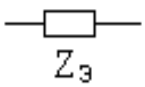
Приложение А

Основные формулы преобразования схем

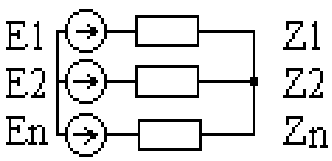
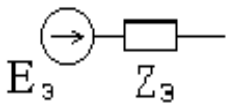
1. Последовательное соединение

До преобразования	После преобразования	Параметры
		$Z_Э = Z_1 + Z_2 + Z_n$

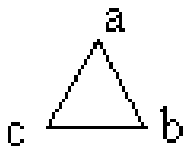
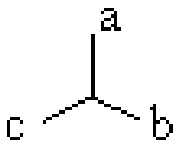
2. Параллельное соединение

До преобразования	После преобразования	Параметры
		$Z_Э=1/Y_Э$ $Y_{Э=}\ Y_1+Y_2+\ldots+Y_n$. При n=2: $Z_Э=Z_1Z_2/(Z_1+Z_2)$

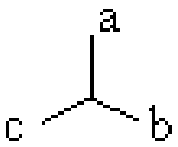
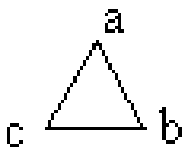
3. Замена нескольких источников эквивалентным

До преобразования	После преобразования	Параметры
		$E_Э=1/Y_Э\sum E_iY_i$, $Y_{Э=}\ Y_1+Y_2+\ldots+Y_n$. При n=2: $E_Э=(E_1Z_2+E_2Z_1)/(Z_1+Z_2)$

4. Преобразование треугольника сопротивлений в звезду

До преобразования	После преобразования	Параметры
		Например, для Z_a: $Z_a = Z_{ab}Z_{ac} / (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc})$

5. Преобразование звезды сопротивлений в треугольник

До преобразования	После преобразования	Параметры
		Например, для Z_{ab}: $Z_{ab} = Z_a + Z_b + \frac{Z_a Z_b}{Z_c}$

Приложение Б

Средние значения E'' и X''
(в относительных единицах при номинальных условиях)

Наименование элемента	X''	E''
Турбогенератор до 100 МВт	0,125	1,08
до 500 МВт	0,200	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,200	1,13
без демпферных обмоток	0,270	1,18
Синхронный двигатель	0,200	1,10
Синхронный компенсатор	0,200	1,20
Асинхронный двигатель	0,200	0,90
Обобщенная нагрузка	0,350	0,85

Приложение В

Таблица П3.1

Средние значения ударного коэффициента при КЗ в различных точках электрической системы

Место короткого замыкания	Ударный коэффициент
На сборных шинах 6...10 кВ станций с генераторами мощностью 30...60 МВт	1,92 – 1,96
За линейным реактором, присоединенным к сборным шинам станции	1,85 – 1,95
На сборных шинах повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью	
100 МВА и выше	1,89 – 1,95
30…100 МВА	1,85 – 1,94
На сборных шинах вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью	
100 МВА и выше	1,85 – 1,92
30…100 МВА	1,85 – 1,89
В точках системы, удаленных от генераторов (сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами 20 МВА и ниже, в распределительных сетях и др.	1,80 и ниже

Таблица П3.2

Средние значения X/R для элементов электрических систем

Наименование элемента	Отношение X/R
Турбогенератор мощностью до 100 МВА	15-85
от 100 до 500 МВА	100-140
Гидрогенератор с демпферными обмотками	40-60
без демпферных обмоток	60-90
Трансформатор мощностью 5... 30 МВА	7-17
60... 500 МВА	20-50
Реакторы 6... 10 кВ с током до 1000 А	15-70
1500 Д и выше	40-80
Воздушные линии	2-8
Кабельные линии 6...10 кВ	0,2-0,8
Обобщенная нагрузка	2,5

Приложение Г

Исходные данные для выполнения курсовой работы

Варианты схем электроэнергетических систем приведены на рис.П4.1 – П4.16.

В таблицах П4.1 – П4.5 приводятся по два варианта исходных данных для каждой схемы.

Таблица П4.1

Генераторы и системы

№ варианта	Г1	Г2	Г3	Г4	С1, МВА	С2, МВА
1	2	3	4	5	6	7
1	ТВФ-110	ТВФ-120	ТВФ-63	ТВФ-110	-	-
1-а	ТВВ-200	ТВВ-200	ТВФ-120	ТВФ-110	-	-
2	ТВФ-63	ТВВ-110	ТВВ-200	-	2400	-
2-а	ТВФ-63	ТВВ-200	ТВВ-200	-	2900	-
3	ТВВ-200	ТВФ-120	ТВФ-110	ТВФ-120	-	-
3-а	ТВФ-110	ТВФ-120	ТВВ-200	ТВВ-200	-	-
4	ТВВ-200	ТВФ-120	ТВВ-160	ТВФ-63	-	-
4-а	ТВВ-320	ТВВ-200	ТВВ-200	ТВС-32	-	-
5	ТВФ-110	ТВФ-120	ТВФ-110	ТВФ-63	-	-
5-а	ТВВ-200	ТВФ-110	ТВФ-110	ТВФ-63	-	-
6	ТВВ-320	ТГВ-200	ТВВ-160	ТВВ-220	-	-
6-а	Т3В-63	ТВФ-110	ТВФ-120	ТВФ-120	-	-
7	ТВВ-320	ТГВ-300	-	-	2300	2700
7-а	ТГВ-200	ТВВ-220	-	-	3300	3400
8	ТВФ-110	ТВФ-110	ТВВ-200	ТВВ-200	-	-
8-а	ТВФ-63	ТВФ-63	ТВФ-120	ТВФ-120	-	-
9	ТВВ-200	ТГВ-300	-	-	3500	3700
9-а	ТВФ-63	ТВФ-120	-	-	1500	1400
10	Т3В-63	ТВФ-120	ТВФ-110	ТВФ-63	-	-
10-а	ТГВ-200	ТВВ-320	ТВВ-200	ТВВ-200	-	-
11	ТВФ-110	ТВВ-200	-	-	2200	2300
11-а	ТВВ-200	ТВВ-200	-	-	3200	3700
12	ТВВ-200	ТВВ-200	-	-	2100	2500

Продолжение таблицы П4.1

1	2	3	4	5	6	7
12-а	ТВФ-120	ТВФ-110	-	-	2900	2800
13	ТВФ-120	ТВФ-110	Т3В-63	ТВФ-63	-	-
13-а	ТВМ-300	ТГВ-200	ТВВ-200	ТВВ-500	-	-
14	ТВВ-200	ТВФ-120	-	-	3150	1800
14-а	ТВФ-110	ТВВ-200	-	-	1950	3400
15	ТВВ-200	ТГВ-200	-	-	1600	1700
15-а	ТГВ-200	ТВВ-320	-	-	3900	3100
16	ТВФ-110	ТВФ-120	ТВВ-500	ТВФ-100	-	-
16-а	ТВФ-63	ТВФ-63	ТВВ-320	ТВФ-110	-	-

Таблица П4.2

Нагрузки

№ варианта	Н1	Н2	Н3	Н4
1	2	3	4	5
1	45 мВт cosφ =0,8	27 мВт cosφ =0,8	63 мВт cosφ =0,85	--
1-а	60 мВт cosφ =0,89	58 мВт cosφ =0,87	55 мВт cosφ =0,86	--
2	12 мВт cosφ =0,88	45 мВт cosφ =0,9	50 мВт cosφ =0,9	--
2-а	9 мВт cosφ =0,8	31 мВт cosφ =0,89	33 мВт cosφ =0,91	--
3	24 мВт cosφ =0,9	25 мВт cosφ =0,9	99 мВт cosφ =0,9	--
3-а	31 мВт cosφ =0,9	21 мВт cosφ =0,9	175 мВт cosφ =0,88	--
4	95 мВт cosφ =0,88	11 мВт cosφ =0,85	88 мВт cosφ =0,8	--
4-а	131 мВт cosφ =0,8	12 мВт cosφ =0,85	65 мВт cosφ =0,9	--
5	12 мВт cosφ =0,9	12 мВт cosφ =0,9	125 мВт cosφ =0,8	--
5-а	11 мВт cosφ =0,85	10 мВт cosφ =0,8	90 мВт cosφ =0,8	--
6	43 мВт cosφ =0,8	56 мВт cosφ =0,85	63 мВт cosφ =0,9	--
6-а	30 мВт cosφ =0,85	26 мВт cosφ =0,8	29 мВт cosφ =0,9	--

1	2	3	4	5
7	88 мВт cosφ =0,8	149 мВт cosφ =0,8	83 мВт cosφ =0,85	--
7-а	115 мВт cosφ =0,8	190 мВт cosφ =0,82	107 мВт cosφ =0,8	--
8	45 мВт cosφ =0,8	40 мВт cosφ =0,85	50 мВт cosφ =0,9	--
8-а	30 мВт cosφ =0,9	25 мВт cosφ =0,85	23 мВт cosφ =0,9	--
9	78 мВт cosφ =0,8	127 мВт cosφ =0,85	171 мВт cosφ =0,88	--
9-а	15 мВт cosφ =0,8	14 мВт cosφ =0,7	63 мВт cosφ =0,85	--
10	23 мВт cosφ =0,81	29 мВт cosφ =0,89	31 мВт cosφ =0,9	--
10-а	48 мВт cosφ =0,8	56 мВт cosφ =0,85	61 мВт cosφ =0,88	--
11	57 мВт cosφ =0,8	45 мВт cosφ =0,9	43 мВт cosφ =0,9	--
11-а	77 мВт cosφ =0,8	88 мВт cosφ =0,85	55 мВт cosφ =0,8	--
12	20 мВт cosφ =0,75	30 мВт cosφ =0,81	80 мВт cosφ =0,78	61 мВт cosφ =0,9
12-а	14 мВт cosφ =0,76	17 мВт cosφ =0,8	58 мВт cosφ =0,87	83 мВт cosφ =0,85
13	23 мВт cosφ =0,75	26 мВт cosφ =0,8	29 мВт cosφ =0,8	--
13-а	62 мВт cosφ =0,87	53 мВт cosφ =0,82	54 мВт cosφ =0,88	--
14	91 мВт cosφ =0,8	89 мВт cosφ =0,8	163 мВт cosφ =0,85	--
14-а	63 мВт cosφ =0,75	129 мВт cosφ =0,76	164 мВт cosφ =0,85	--
15	41 мВт cosφ =0,8	39 мВт cosφ =0,8	62 мВт cosφ =0,82	--
15-а	69 мВт cosφ =0,7	78 мВт cosφ =0,8	145 мВт cosφ =0,8	--
16	60 мВт cosφ =0,85	25 мВт cosφ =0,9	30 мВт cosφ =0,85	--
16-а	49 мВт cosφ =0,9	28 мВт cosφ =0,8	27 мВт cosφ =0,8	--

Таблица П4.3

Автотрансформаторы

№ варианта	АТ1	АТ2
1	2	3
2	АТДЦТН-250000/220	--
2-а	АТДЦТН-200000/330	--
3	АТДЦТН-250000/330	--
3-а	АТДЦТН-200000/220	--
4	АТДЦТН-200000/220	--
4-а	АТДЦТН-250000/220	--
5	АТДЦТН-250000/220	--
5-а	АТДЦТН-250000/220	--
12	АТДЦТН-250000/220	АТДЦТН-250000/220
12-а	АТДЦТН-250000/330	АТДЦТН-250000/220
14	АТДЦТН-250000/220	--
14-а	АТДЦТН-200000/220	--
16	АТДЦТН-250000/220	АТДЦТН-200000/220
16-а	АТДЦТН-200000/220	АТДЦТН-125000/220

Таблица П4.4

Трансформаторы

№ варианта	Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т6	Т7
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-200000/110	ТДН-63000/110	ТДЦ-200000/110	ТДН-4000/110	ТДН-80000/110	ТДЦ-125000/110
1-а	ТЦ-250000/220	ТЦ-200000/220	ЬД-80000/220	ТЦ-160000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220	ТЦ-160000/220
2	ТДН-80000/110	ТДНС-16000/35	ТДТН-63000/110	ТДТН-80000/110	ТДТН-63000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-250000/110
2-а	ТДТН-80000/110	ТДТС-16000/35	ТДТН-40000/110	ТДТН-80000/110	ТДТН-40000/110	ТДЦ-250000/110	ТДЦ-250000/110
3	ТДЦ-250000/330	ТДЦ-200000/330	ТРДНС-63000/35	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-125000/110	--
3-а	ТДЦ-200000/220	ТДЦ-250000/220	ТРДНС-63000/35	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-250000/110	ТДЦ-200000/110	--
4	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-200000/220	ТДН-200000/110	ТДЦ-125000/220	ТДНС-16000/35	ТДН-80000/110	ТДЦ-125000/110
4-а	ТДЦ-400000/220	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-250000/110	ТДЦ-200000/220	ТДНС-16000/35	ТДН-63000/110	ТДН-80000/110
5	ТЦ-160000/220	ТЦ-200000/110	ТДЦ-200000/110	ТДТН-80000/110	ТДНС-16000/35	ТДН-16000/35	ТДЦ-200000/110
5-а	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-200000/110	ТДН-200000/110	ТДН-80000/110	ТДНС-16000/35	ТДНС-16000/35	ТДЦ-125000/110
6	ТДЦ-400000/220	ТДЦ-200000/220	ТДН-200000/220	ТДЦ-400000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220

1	2	3	4	5	6	7	8
6-а	ТДН-80000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-40000/110	ТДЦ-40000/110	ТДЦ-200000/110	ТД-32000/110
7	ТДЦ-125000/110	ТДЦ-400000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-400000/110	ТДН-125000/110	--	--
7-а	ТЦ-160000/220	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-400000/220	ТЦ-160000/220	--	--
8	ТЦ-160000/220	ТЦ-160000/220	ТЦ-250000/220	ТДЦ-250000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220	ТДЦ-80000/220
8-а	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-200000/110	ТД-40000/110	ТД-40000/110	ТД-40000/110
9	ТДЦ-125000/220	ТД-160000/220	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-400000/220	ТДЦ-200000/220	--	--
9-а	ТДН-25000/110	ТДН-25000/110	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-200000/110	ТДН-80000/110	--	--
10	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-40000/110	ТДЦ-40000/110	ТДЦ-40000/110	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-80000/110
10-а	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-400000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-250000/220
11	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-80000/110	ТДН-63000/110	ТДН-63000/110	ТДЦ-250000/110	--	--
11-а	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-125000/220	ТДЦ-125000/220	ТД-80000/220	ТДЦ-250000/220	--	--
12	ТЦ-250000/220	ТДЦ-400000/220	ТДЦ-125000/220	ТД-80000/220	--	--	--
12-а	ТЦ-160000/330	ТДЦ-400000/330	ТДЦ-125000/330	ТД-80000/330	--	--	--

1	2	3	4	5	6	7	8
13	ТДЦ-200000/110	ТДЦ-200000/110	ТД-40000/110	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-80000/110	ТД-40000/110	ТД-40000/110
13-а	ТДЦ-400000/220	ТДЦ-250000/220	ТД-80000/220	ТДЦ-250000/220	ТЦ-630000/220	ТД-80000/220	ТД-80000/220
14	ТДЦ-125000/110	ТДЦ-250000/110	ТДЦ-125000/220	ТДЦ-200000/220	ТДЦ-200000/220	--	--
14-а	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-200000/110	ТДН-200000/220	ТДЦ-250000/220	ТД-200000/220	----	--
15	ТДН-63000/110	ТДН-63000/110	ТДЦ-250000/110	ТДЦ-250000/110	ТДН-80000/110	--	--
15-а	ТДЦ-125000/220	ТДЦ-125000/220	ТДЦ-250000/220	ТДЦ-400000/220	ТДЦ-200000/220	--	--
16	ТЦ-630000/220	ТДЦ-80000/110	ТДЦ-200000/110	ТД-32000/110	ТД-40000/110	--	--
16-а	ТДЦ-40000/220	ТДН-63000/110	ТДЦ-200000/110	ТДН-40000/110	ТД-40000/110	--	--

Таблица П4.5

Воздушные линии

№ вари-анта	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5	Л6	Л7	Л8	Л9	Л10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	25 км АС-150	23 км АС-120	15 км АС-95	19 км АС-95	22 км АС-120	17 км АС-95	14 км АС-120	--	--	--
1-а	32 км АС-240	24 км АС-240	26 км АС-240	19 км АС-240	23 км АС-240	29 км АС-240	15 км АС-240	--	--	--
2	12 км АС-120	13 км АС-120	14 км АС-95	23 км АС-150	11 км АС-95	19 км АС-150	11 км АС-120	--	--	--
2-а	14 км АС-95	15 км АС-95	16 км АС-70	21 км АС-185	22 км АС-70	18 км АС-120	17 км АС-70	--	--	--
3	21 км АС-300	12 км АС-185	15 км АС-240	11 км АС-120	14 км АС-185	11 км АС-120	--	--	--	--
3-а	21 км АС-300	20 км АС-185	25 км АС-240	18 км АС-240	16 км АС-185	15 км АС-150	--	--	--	--
4	28 км АС-300	14 км АС-150	12 км АС-240	11 км АС-95	12 км АС-120	19 км АС-185	--	--	--	--
4-а	25 км АС-300	21 км АС-150	19 км АС-240	13 км АС-95	11 км АС-240	11 км АС-150	--	--	--	--
5	30 км АС-240	25 км АС-185	14 км АС-120	11 км АС-150	12 км АС-95	11 км АС-95	--	--	--	--
5-а	28 км АС-240	22 км АС-150	13 км АС-120	18 км АС-150	11 км АС-120	13 км АС-120	--	--	--	--

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	20 км АС-240	25 км АС-240	20 км АС-240	35 км АС-240	28 км АС-240	24 км АС-240	26 км АС-240	33 км АС-240	--	--
6-а	18 км АС-120	19 км АС-95	12 км АС-95	14 км АС-70	23 км АС-95	17 км АС-120	20 км АС-120	18 км АС-70	--	--
7	19 км АС-150	17 км АС-150	18 км АС-150	19 км АС-150	17 км АС-150	23 км АС-150	22 км АС-120	--	--	--
7-а	21 км АС-240	23 км АС-240	14 км АС-300	21 км АС-300	23 км АС-300	27 км АС-300	25 км АС-240	--	--	--
8	30 км АС-240	20 км АС-240	25 км АС-240	25 км АС-240	20 км АС-240	35 км АС-240	--	--	--	--
8-а	30 км АС-150	20 км АС-95	15 км АС-95	25 км АС-150	10 км АС-95	15 км АС-95	--	--	--	--
9	25 км АС-240	23 км АС-300	24 км АС-300	11 км АС-300	38 км АС-300	31 км АС-300	12 км АС-240	--	--	--
9-а	12 км АС-120	14 км АС-150	16 км АС-150	15 км АС-150	13 км АС-150	11 км АС-150	10 км АС-95	--	--	--
10	13 км АС-150	19 км АС-150	24 км АС-95	22 км АС-95	25 км АС-95	23 км АС-95	24 км АС-95	21 км АС-95	14 км АС-120	18 км АС-150
10-а	41 км АС-300	39 км АС-300	33 км АС-240	29 км АС-240	28 км АС-240	24 км АС-240	31 км АС-240	30 км АС-240	37 км АС-240	36 км АС-240
11	11 км АС-120	12 км АС-120	15 км АС-95	16 км АС-95	14 км АС-70	17 км АС-70	19 км АС-95	20 км АС-95	--	--
11-а	23 км АС-300	25 км АС-300	29 км АС-300	28 км АС-300	31 км АС-240	33 км АС-240	27 км АС-240	29 км АС-240	--	--
12	21 км АС-300	31 км АС-300	28 км АС-240	21 км АС-240	--	--	--	--	--	--

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12-а	28 км АС-240	27 км АС-240	33 км АС-240	32 км АС-240	--	--	--	--	--	--
13	20 км АС-150	29 км АС-70	18 км АС-120	21 км АС-120	11 км АС-120	20 км АС-70	21 км АС-70	--	--	--
13-а	29 км АС-300	30 км АС-240	28 км АС-240	32 км АС-240	13 км АС-300	22 км АС-240	31 км АС-240	--	--	--
14	14 км АС-240	17 км АС-300	15 км АС-240	20 км АС-240	21 км АС-185	10 км АС-120	19 км АС-150	17 км АС-150	18 км АС-120	--
14-а	21 км АС-120	23 км АС-120	22 км АС-120	22 км АС-120	40 км АС-300	32 км АС-240	37 км АС-240	38 км АС-240	18 км АС-240	--
15	14 км АС-150	13 км АС-150	21 км АС-120	25 км АС-120	26 км АС-120	23 км АС-150	15 км АС-150	15 км АС-150	--	--
15-а	21 км АС-300	22 км АС-300	29 км АС-240	19 км АС-300	18 км АС-300	29 км АС-240	23 км АС-300	24 км АС-300	--	--
16	35 км АС-240	30 км АС-120	40 км АС-150	15 км АС-150	19 км АС-95	--	--	--	--	--
16-а	50 км АС-240	22 км АС-150	18 км АС-150	21 км АС-150	19 км АС-95	--	--	--	--	--

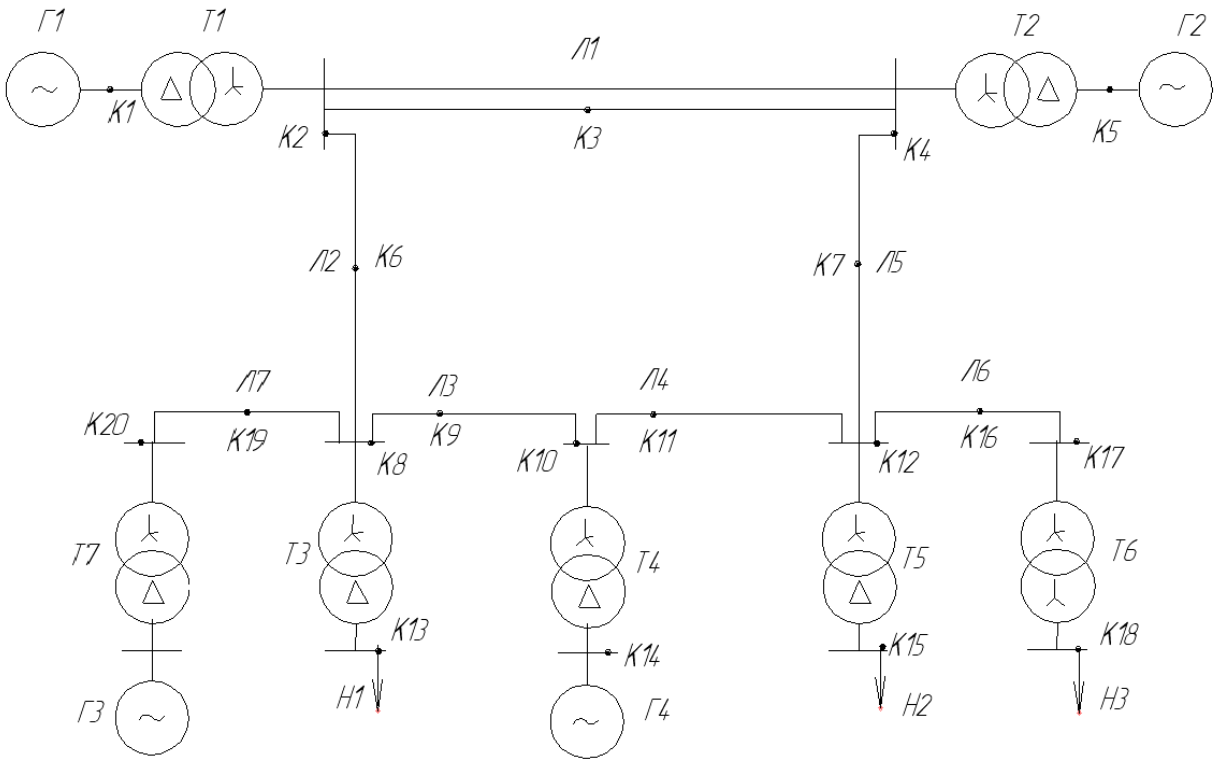

Г1
Т1
Л1
Т2
Г2
К1
К2
К3
К4
К5
Л2
К6
К7
Л5
Л7
Л3
Л4
Л6
К20
К19
К8
К9
К10
К11
К12
К16
К17
Т7
Т3
Т4
Т5
Т6
К13
К14
К15
К18
Г3
Н1
Г4
Н2
Н3

Рис. П4.1

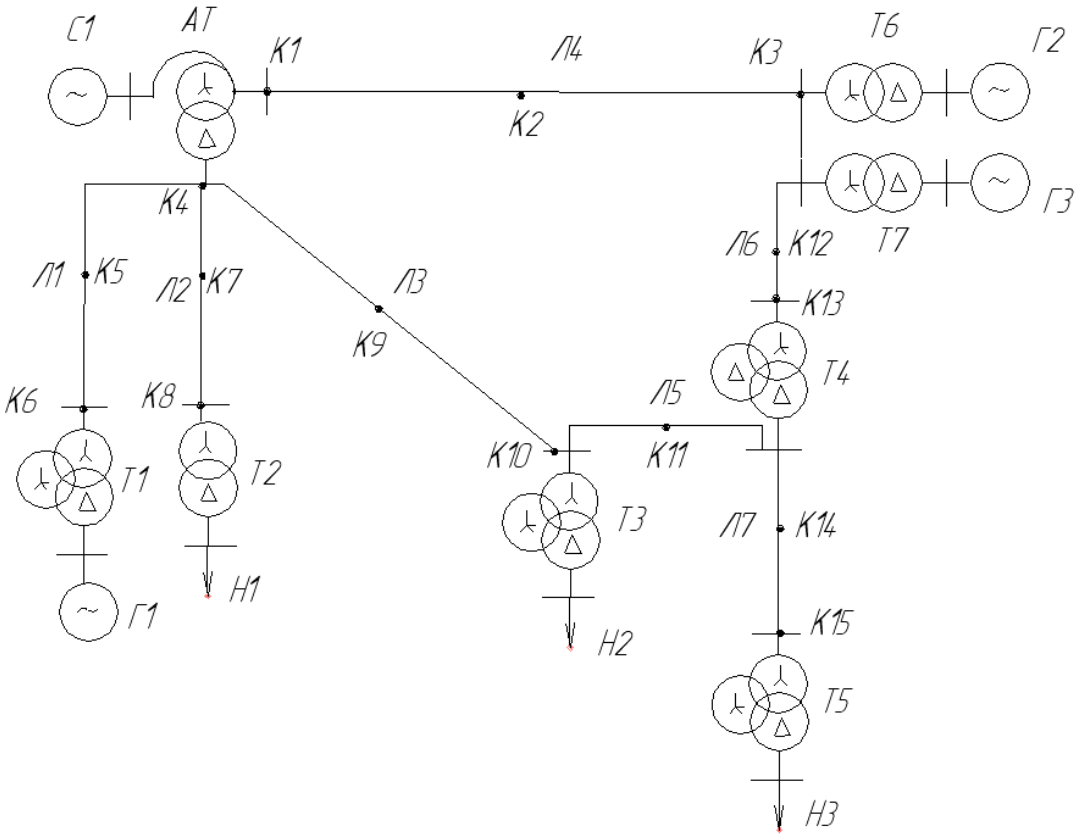

С1
АТ
К1
Л4
К3
Т6
Г2
К2
К4
Г3
Т7
Л6
К12
Л1
К5
Л2
К7
Л3
К13
К9
Т4
К6
К8
Л5
К10
К11
Т1
Т2
Т3
Л7
К14
Н1
Г1
Н2
К15
Т5
Н3

Рис. П4.2

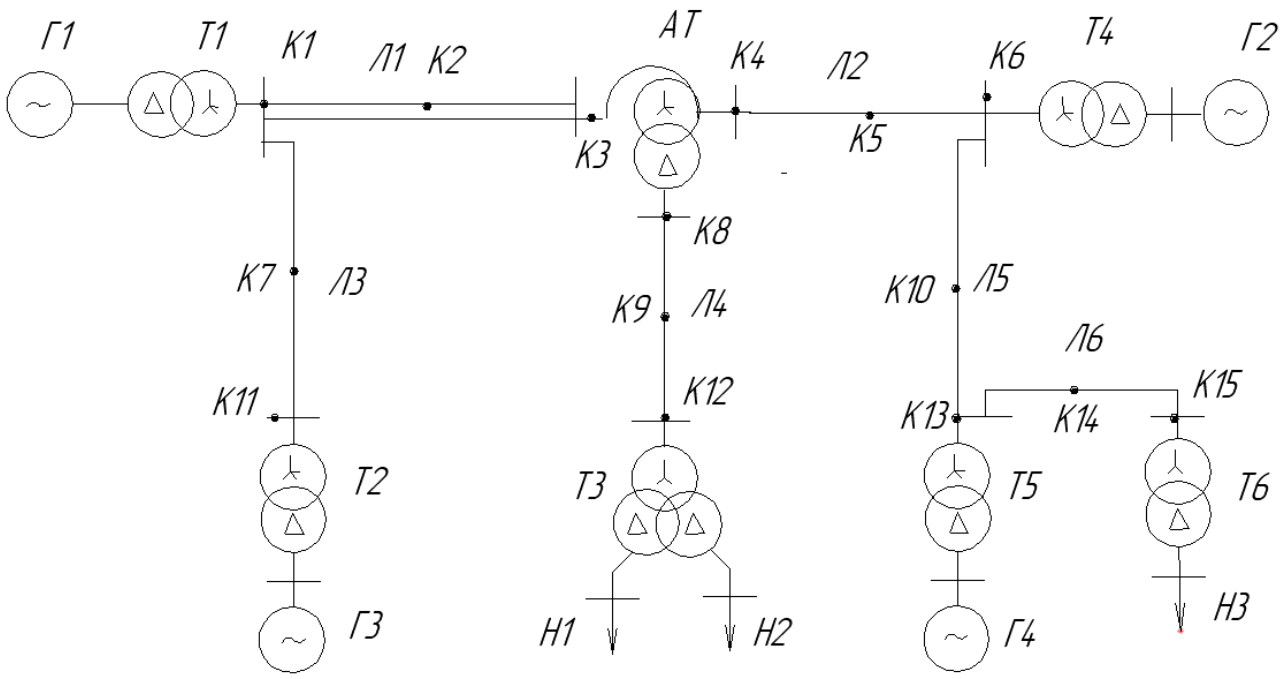

Г1
Т1
К1
Л1
К2
АТ
К4
Л2
К6
Т4
Г2
К3
К5
К8
К7
Л3
К9
Л4
К10
Л5
Л6
К11
К12
К13
К14
К15
Т2
Т3
Т5
Т6
Г3
Н1
Н2
Г4
Н3

Рис. П4.3

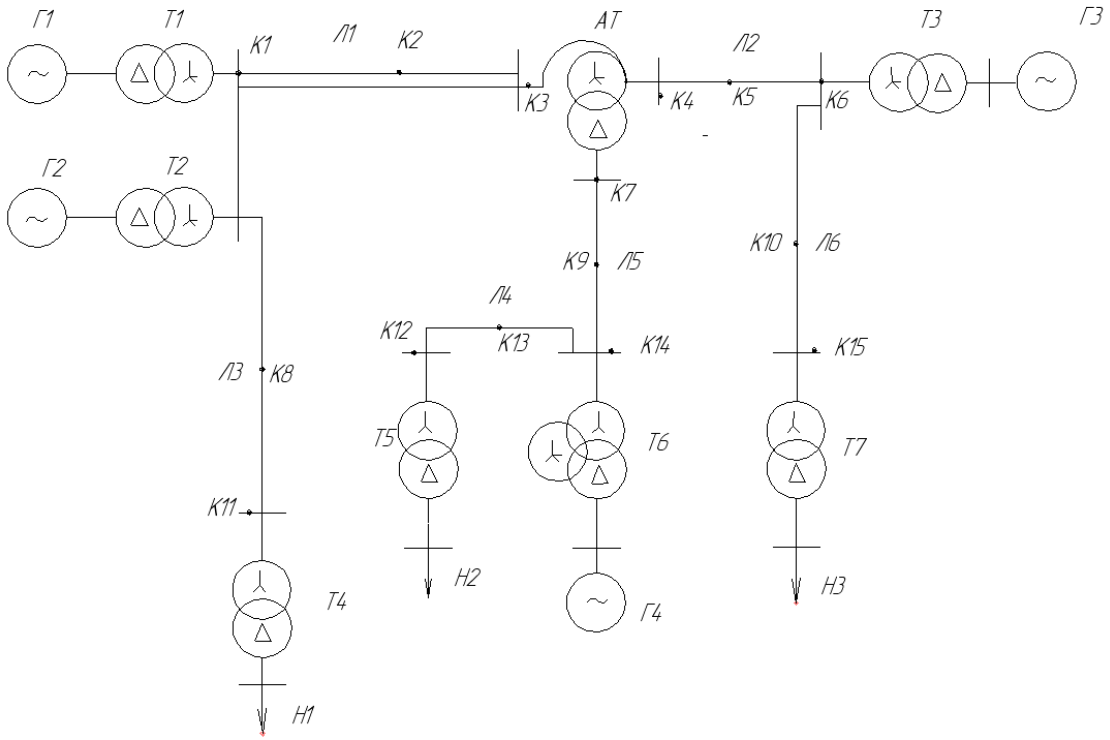

Г1
Т1
К1
Л1
К2
АТ
Л2
Т3
Г3
К3
К4
К5
К6
Г2
Т2
К7
К10
Л6
К9
Л5
Л4
К12
К13
К14
К15
Л3
К8
Т5
Т6
Т7
К11
Т4
Н2
Г4
Н3
Н1

Рис. П4.4

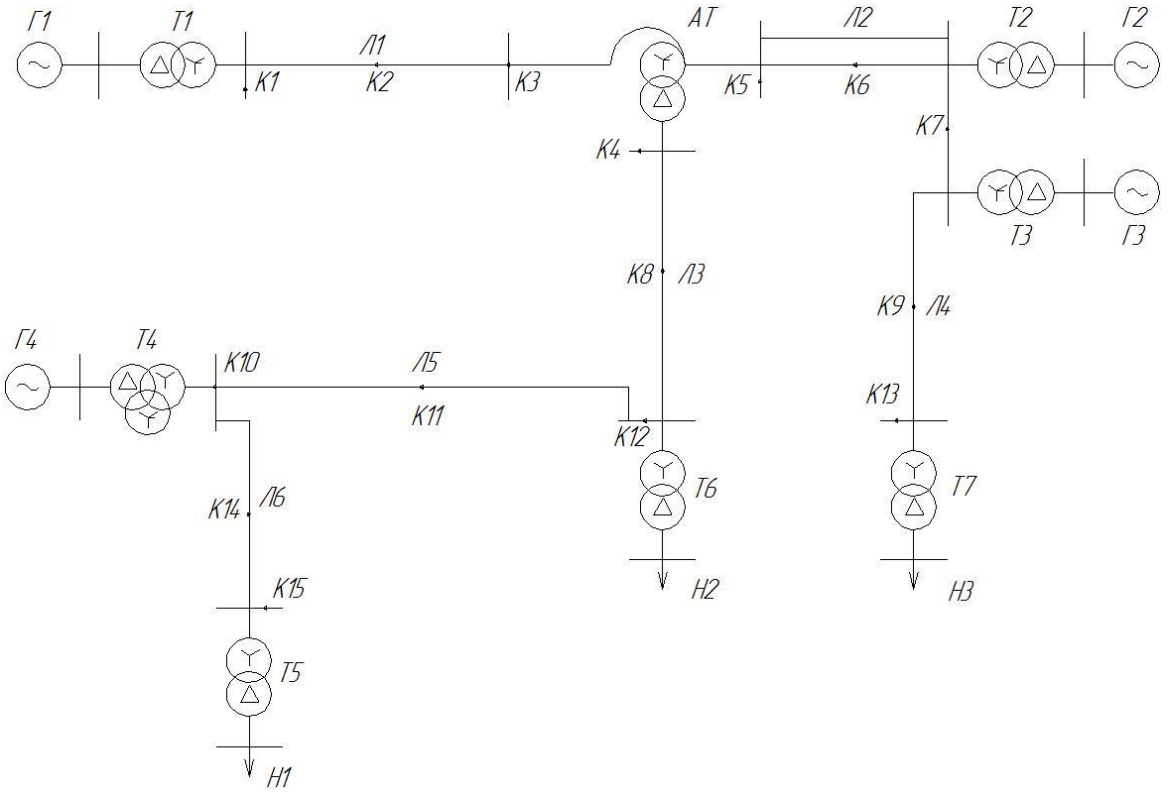

Г1
Т1
К1
Л1
К2
К3
АТ
К4
К5
Л2
К6
Т2
Г2
К7
Т3
Г3
К8
Л3
К9
Л4
Г4
Т4
К10
Л5
К11
К12
К13
Т6
Т7
К14
Л6
К15
Т5
Н1
Н2
Н3

Рис. П4.5

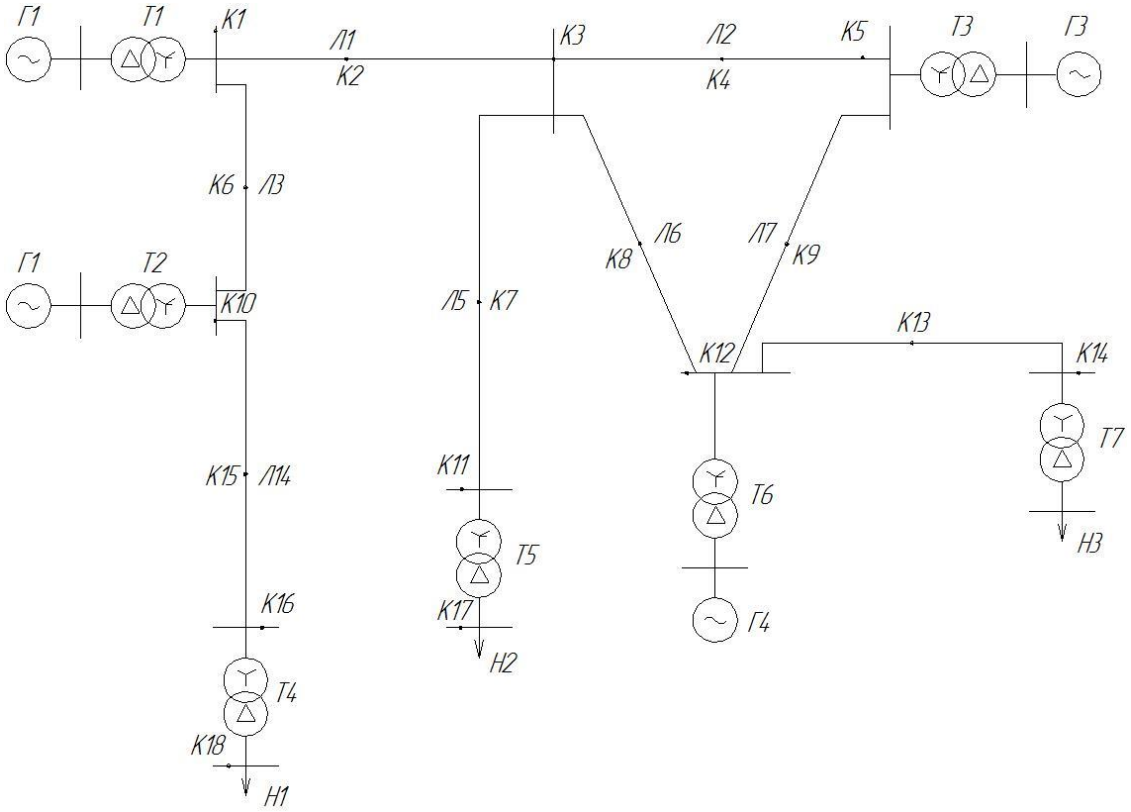

Г1
Т1
К1
Л1
К2
К3
Л2
К4
К5
Т3
Г3
К6
Л3
Г1
Т2
К10
Л6
К8
Л7
К9
Л5
К7
К12
К13
К14
Т7
К11
Т6
Т5
К17
Н2
Г4
Н3
К15
Л14
К16
Т4
К18
Н1

Рис. П4.6

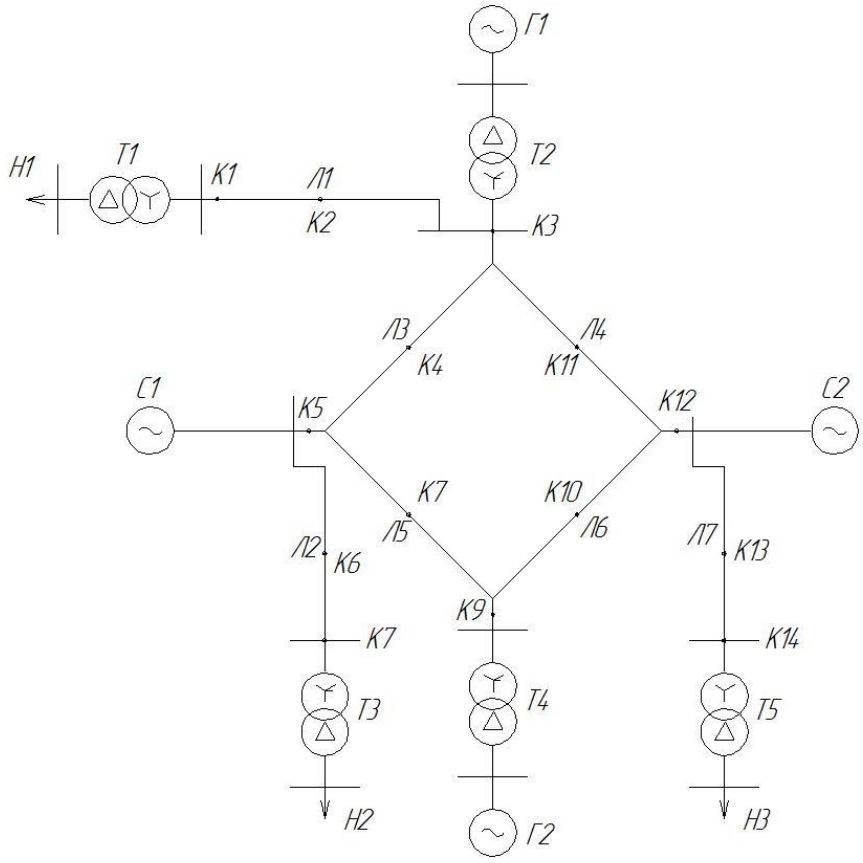

Г1
Т2
К3
Л3
Л4
К4
К11
С1
К5
К12
С2
К7
К10
Л5
Л6
Л2
К6
Л7
К13
К9
К7
К14
Т3
Т4
Т5
Н2
Г2
Н3
Н1
Т1
К1
Л1
К2

Рис. П4.7

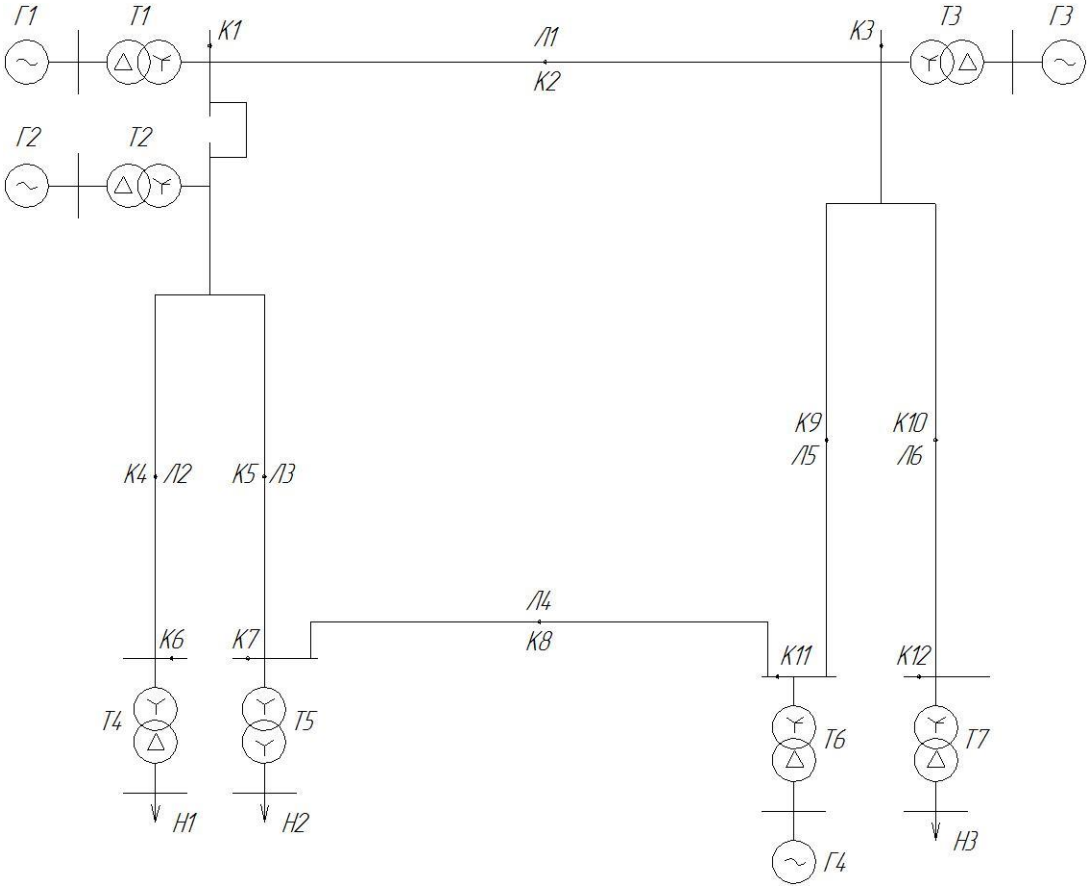

Г1
Т1
К1
Л1
К2
К3
Т3
Г3
Г2
Т2
К4
Л2
К5
Л3
К9
Л5
К10
Л6
Л4
К8
К6
К7
К11
К12
Т4
Т5
Т6
Т7
Н1
Н2
Г4
Н3

Рис. П4.8

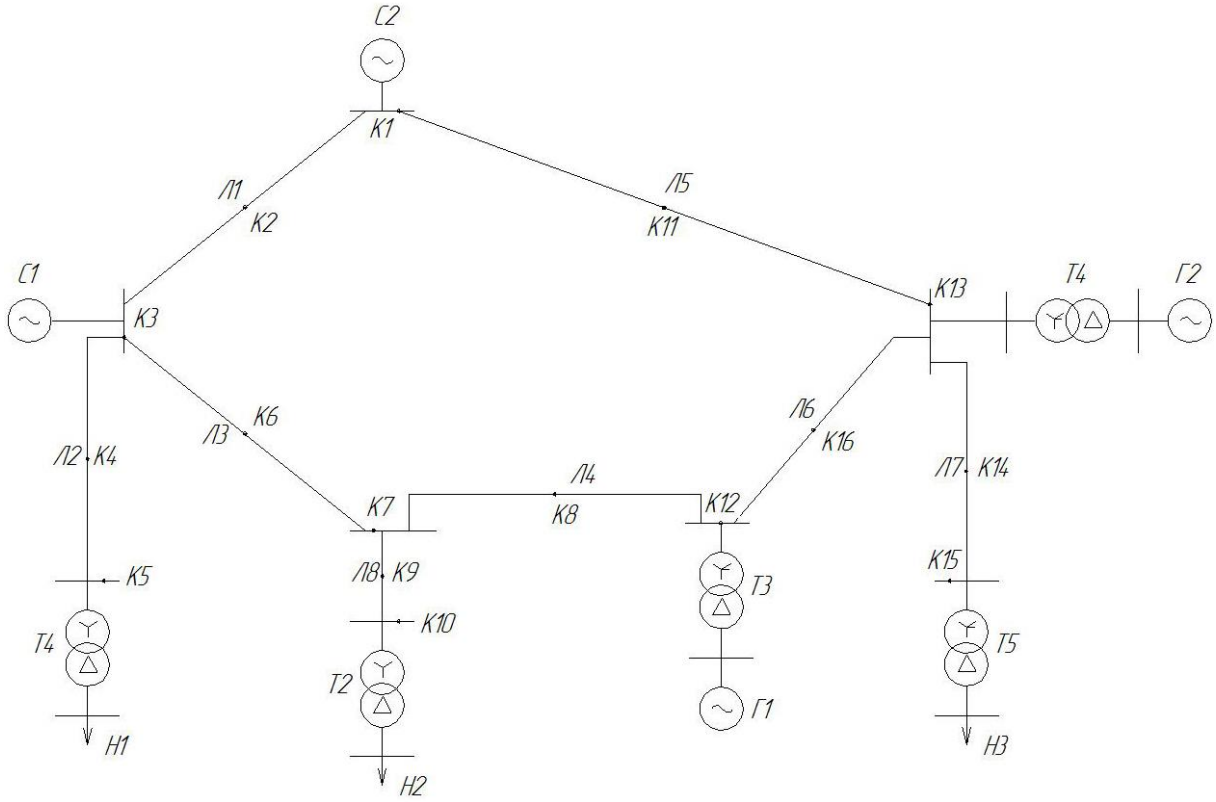

С2
К1
Л1
К2
Л5
К11
С1
К3
К13
Т4
Г2
Л2
К4
Л3
К6
Л6
К16
Л4
К8
Л7
К14
К7
К12
Л8
К9
К15
К5
К10
Т3
Т5
Т4
Т2
Г1
Н1
Н2
Н3

Рис. П4.9

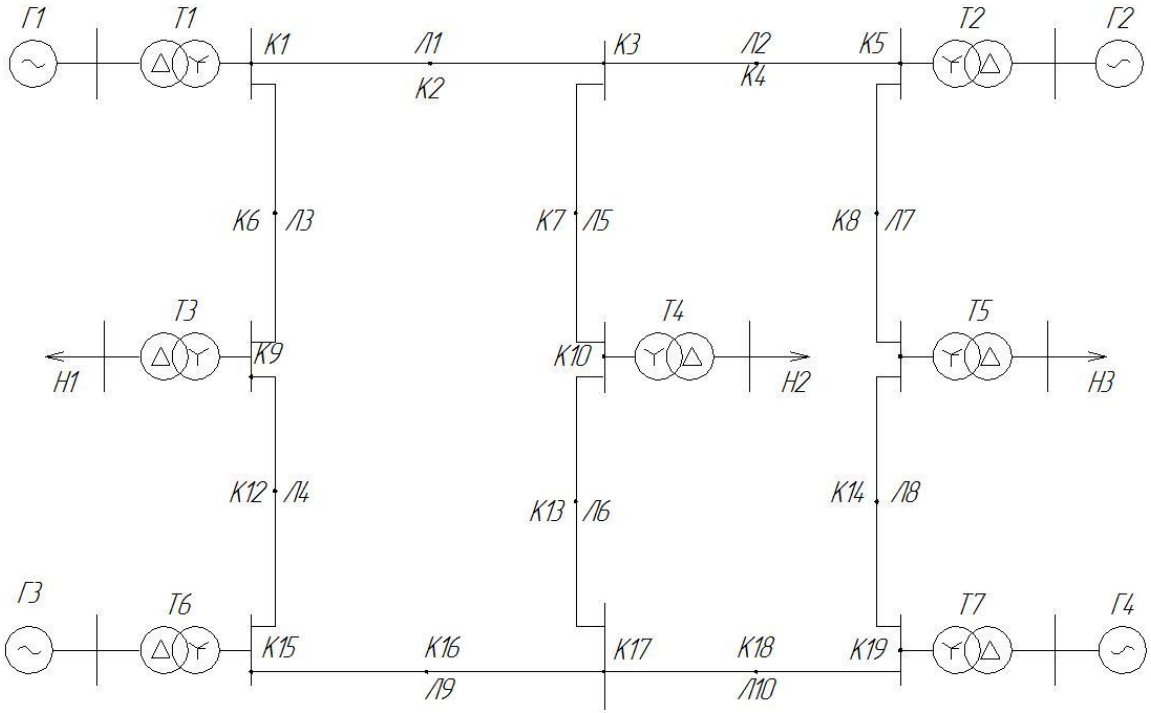

Г1
Т1
К1
Л1
К3
Л2
К5
Т2
Г2
К2
К4
К6
Л3
К7
Л5
К8
Л7
Т3
Т4
Т5
К9
К10
Н1
Н2
Н3
К12
Л4
К13
Л6
К14
Л8
Г3
Т6
Т7
Г4
К15
К16
К17
К18
К19
Л9
Л10

Рис. П4.10

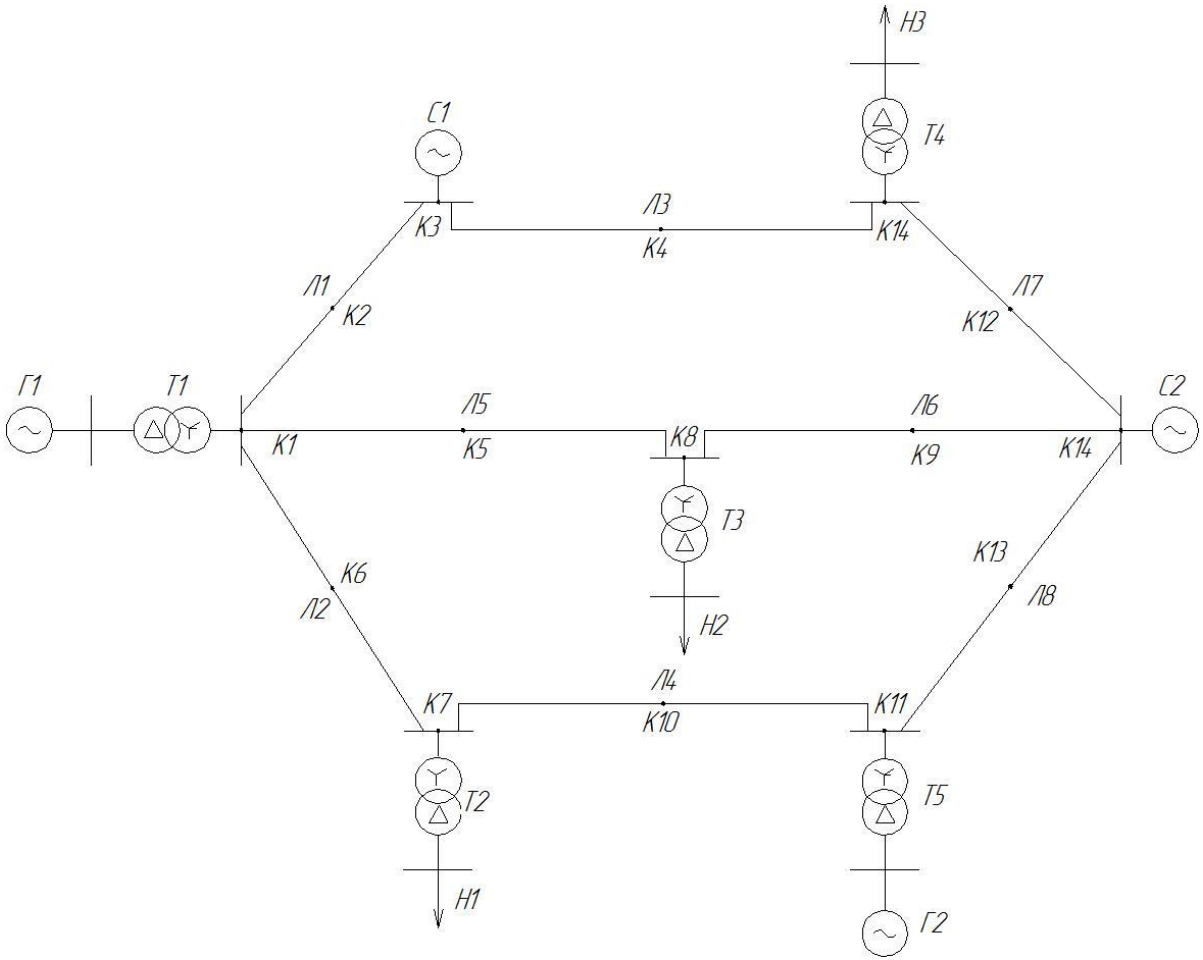

Н3
Т4
С1
Л3
К3
К4
К14
Л1
К2
Л7
К12
Г1
Т1
Л5
Л6
С2
К1
К5
К8
К9
К14
Т3
К6
К13
Л2
Л8
Н2
Л4
К7
К10
К11
Т2
Т5
Н1
Г2

Рис. П4.11

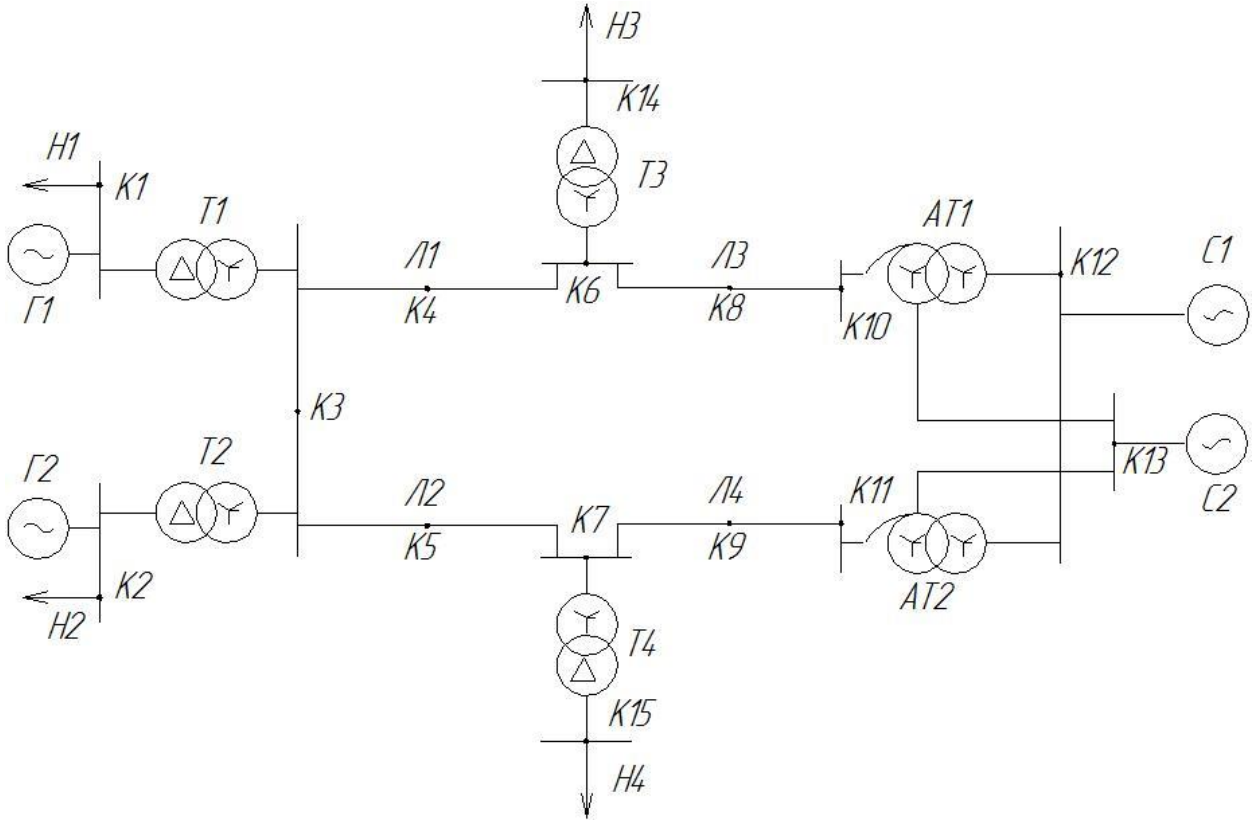

Н3
К14
Т3
Н1
К1
Т1
Л1
Л3
АТ1
К12
С1
Г1
К4
К6
К8
К10
К3
Т2
К13
Г2
Л2
Л4
К11
К7
С2
К5
К9
К2
АТ2
Т4
Н2
К15
Н4

Рис. П4.12

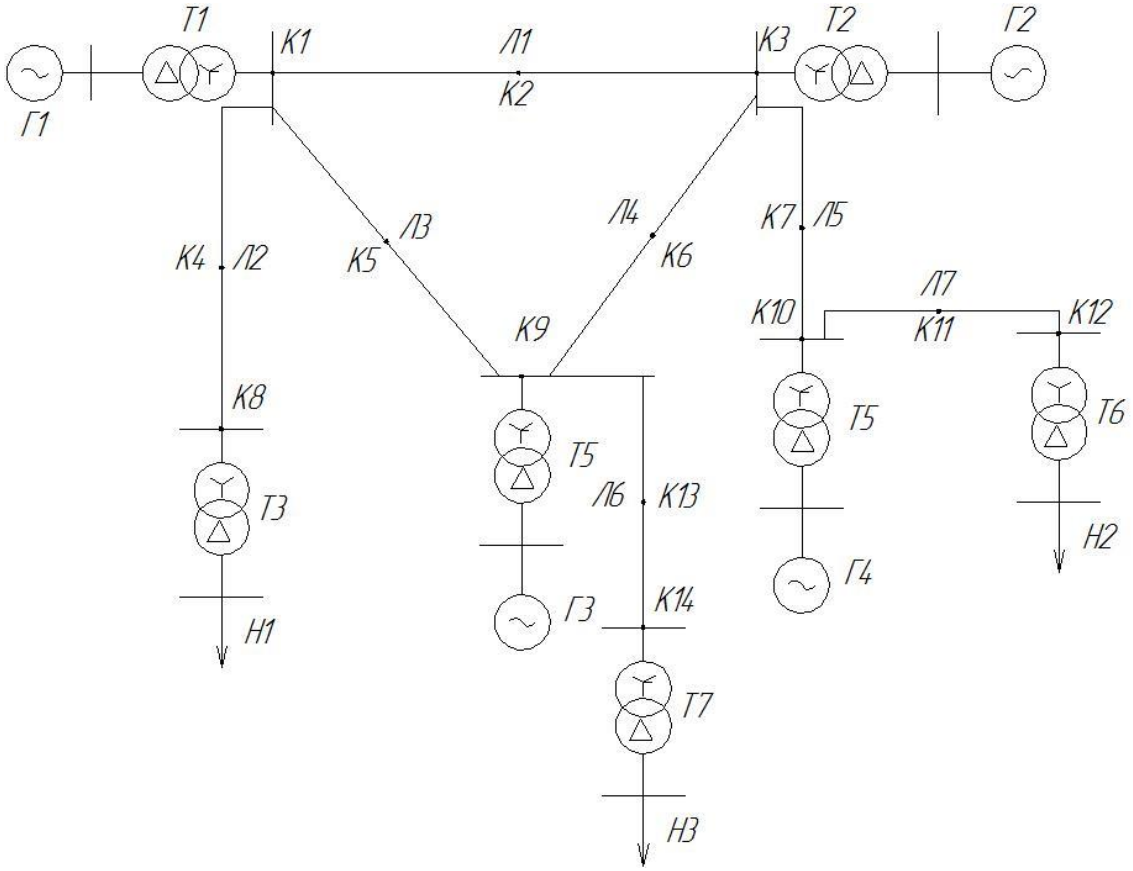

Т1
К1
Л1
К3
Т2
Г2
Г1
К2
К4
Л2
К5
Л3
Л4
К6
К7
Л5
Л7
К10
К11
К12
К9
К8
Т5
Л6
К13
Т5
Т6
Т3
Г3
К14
Г4
Н2
Н1
Т7
Н3

Рис. П4.13

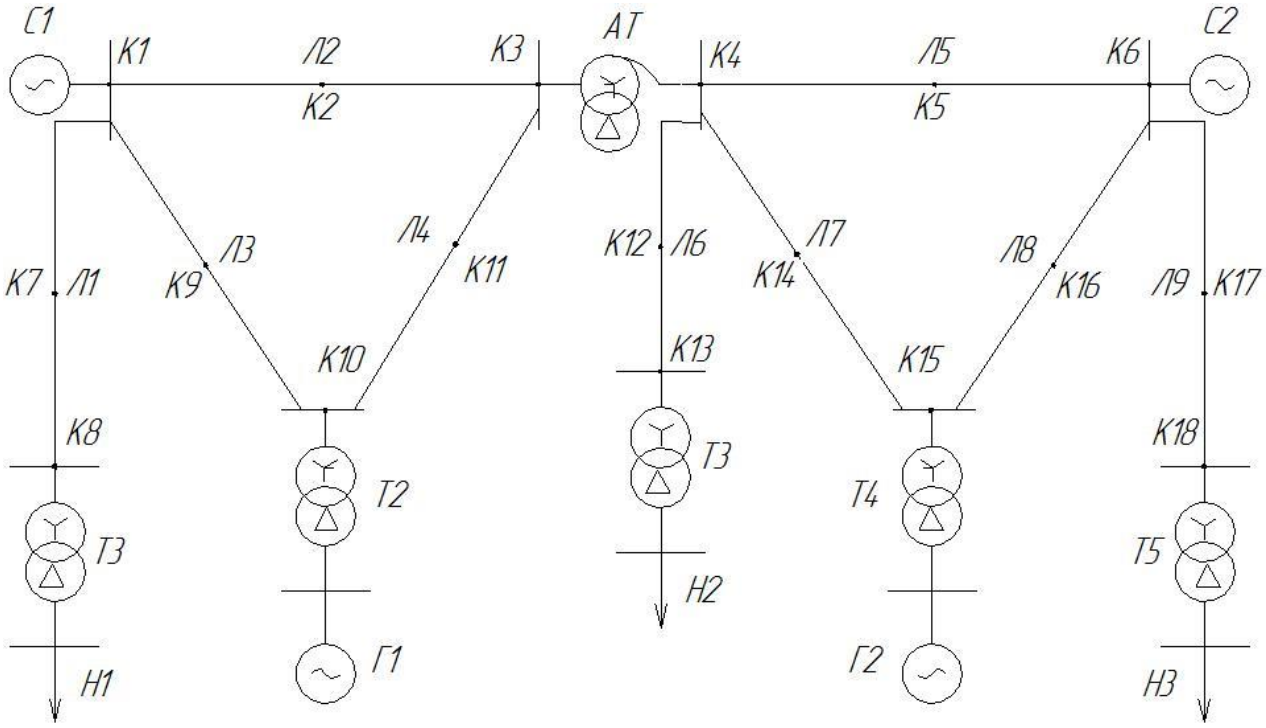

С1
К1
Л2
К2
К3
АТ
К4
Л5
К5
К6
С2
К7
Л1
К8
Т3
Н1
К9
Л3
К10
Т2
Г1
Л4
К11
К12
Л6
К13
Т3
Н2
Л7
К14
К15
Т4
Г2
Л8
К16
Л9
К17
К18
Т5
Н3

Рис. П4.14

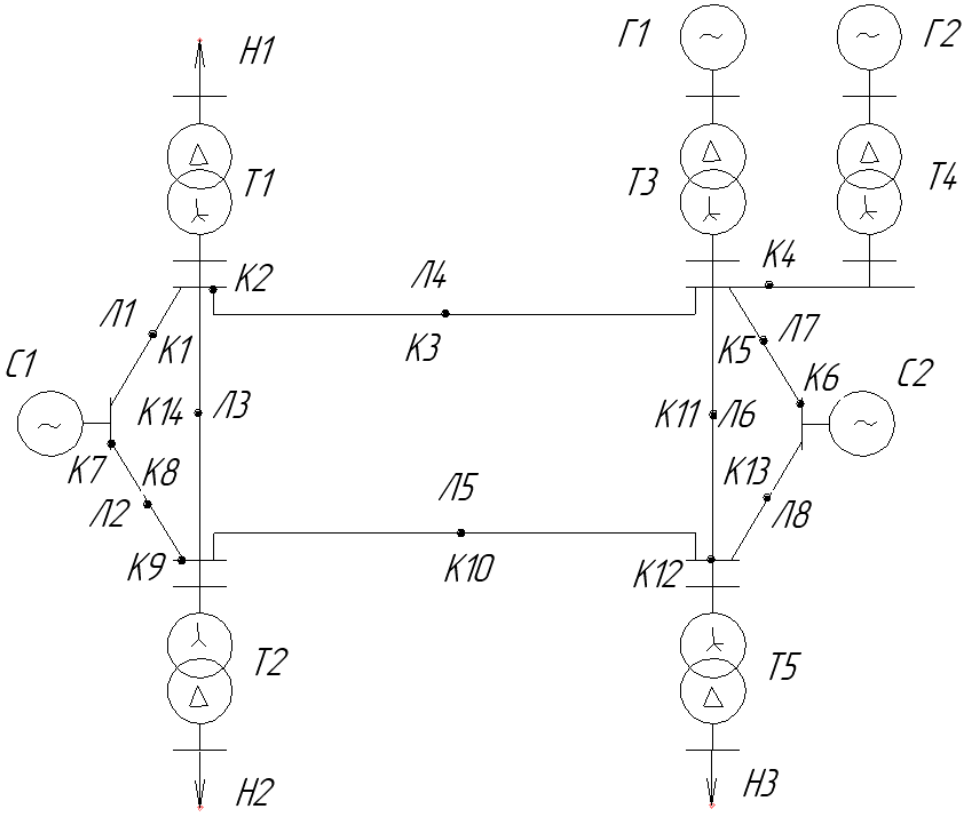

Н1
Г1
Г2
Т1
Т3
Т4
К2
Л4
К4
Л1
К1
К3
Л7
К5
С1
К6
С2
К14
Л3
К11
Л6
К7
К8
К13
Л5
Л2
Л8
К9
К10
К12
Т2
Т5
Н2
Н3

Рис. П4.15

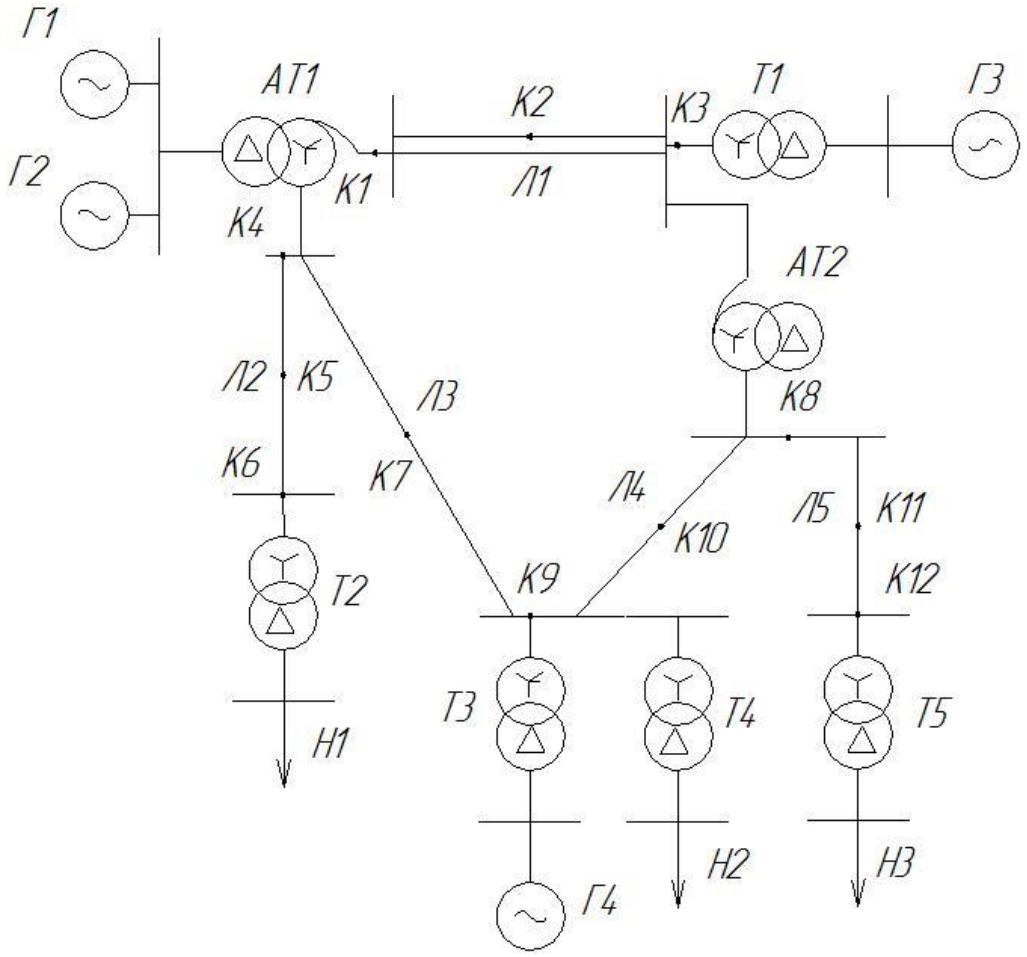

Г1
Г2
АТ1
К1
К2
Л1
К3
Т1
Г3
К4
АТ2
Л2
К5
Л3
К8
К6
К7
Л4
К10
Л5
К11
Т2
К9
К12
Т3
Т4
Т5
Н1
Н2
Н3
Г4

Рис. П4.16

Библиографический список

1. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования [Текст] : учебное пособие / под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. - М. : Академия, 2005. - 416 с. - (Высшее профессиональное образование). - ISBN 5-7695-1998-3
2. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / под ред. И. П. Крючкова. - 2-е изд. стер. - М. : Издательский дом МЭИ, 2009. - 416 с. - Текст: непосредственный.
3. Рожкова Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций : учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. - М. : Академия, 2004. - 448 с. - (Среднее профессиональное образование). - ISBN 5-7695-1329-2
4. Электромагнитные переходные процессы. Расчет токов коротких замыканий с использованием ПЭВМ. Методические указания к лабораторным работам/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост. В.Н.Алябьев. Курск, 2025. 21 с.