

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

2.1. Общие сведения о схеме замещения прямой последовательности

Нормальному режиму энергосистемы, как и режиму трехфазного короткого замыкания соответствует схема замещения прямой последовательности. Схема замещения прямой последовательности для расчета трехфазного замыкания по конфигурации практически повторяет исходную принципиальную схему энергосистемы (энергорайона), в которой силовые элементы представлены своими схемами замещения. Электрическая схема может содержать мощные синхронные (СД) и асинхронные (АД) двигатели. Эти элементы, расположенные в непосредственной близости к точке короткого замыкания, в начальный момент КЗ переходят в генераторный режим и являются дополнительными источниками подпитки места короткого замыкания, что требует своего учета. Однако следует отметить, что это влияние, как правило, носит локальный характер и существенно зависит от типа двигателя, его мощности, электрической удаленности до места короткого замыкания. *Практическому учету при КЗ в распределительных устройствах 6; 10 кВ подлежат двигатели мощностью 1000 кВт и более, которые связаны с местом короткого замыкания непосредственно или через кабельную линию, тоководы или линейные реакторы.*

Источники питания конечной мощности {синхронные генераторы (СГ), синхронные компенсаторы (СК), мощные синхронные (СД), и асинхронные (АД), двигатели}, подлежащие учету, вводят в схему замещения своими сверхпереходными сопротивлениями (x''_d , x'') и сверхпереходными ЭДС (E''). Сверхпереходные сопротивления (x''_d) для СГ, СК, СД и АД являются величинами паспортными; сверхпереходные ЭДС (E'') являются расчетным параметром. Сверхпереходные ЭДС рассчитываются по параметрам режима (ток, напряжение), который непосредственно предшествовал КЗ; при их отсутствии в качестве расчетного принимается режим номинальной загрузки, т. е. по номинальному току и напряжению. Расчетные выражения для указанных источников питания приведены в табл. 2.2; 2.3.

В качестве одного из источников подпитки места КЗ электрической схемы может выступать энергосистема («Система»), которая является эквивалентом мощного энергорайона. Она характеризуется эквивалентной реактивностью x_c , за которой приложена неизменная ЭДС (E_c). Для «Системы», как правило, задается ЭДС E_c и мощность трехфазного короткого замыкания ($S_{КЗ}^{(3)}$), обусловленная «Системой» в узле ее подключения см. табл. 2.1.

У воздушных линий, трансформаторов, токоограничивающих реакторов активное сопротивление существенно меньше реактивного. Это позволяет ак-

тивным сопротивлением пренебречь, не внося существенной погрешности в результаты расчетов, и значительно облегчить вычислительные действия. Таким образом, указанные элементы учитываются только индуктивной составляющей общего сопротивления. Емкостной проводимостью ЛЭП 6 – 220 кВ следует пренебречь.

2.2. Расчет параметров схемы замещения

Расчеты переходного режима электрической системы предполагают составление расчетной схемы замещения, в которой параметры ее элементов (ЭДС, сопротивления) представляются в *именованных* или *относительных* единицах. При наличии в расчетной схеме трансформаторов целесообразно имеющиеся *магнитно-связанные* цепи представить *эквивалентной электрически связанной цепью*. Электрическая схема замещения позволяет осуществлять ее преобразование. Переход от трансформаторных связей к электрическим основан на приведении параметров элементов к одной из имеющихся в схеме ступеней трансформации. Студент вправе сам выбирать систему исчисления: либо именованную или относительную. *Студент дневного обучения должен согласовать выбранную систему исчисления с преподавателем.*

Расчет параметров схемы замещения рекомендуется выполнить при *приближенном учете* коэффициентов трансформации, используя рекомендуемые *средние номинальные напряжения ступеней трансформации* $U_{\text{ср.ном } i} \approx 1.05U_{\text{ном } i}$:

$$6.3; 10.5; 13.8; 15.75; 37.0; 115; 230; 515 \text{ (кВ)}. \quad (2.1)$$

При этом дополнительно считают номинальные напряжения всех элементов, находящихся на одной ступени трансформации, одинаковыми и равными $U_{\text{ср.ном}}$ этой ступени.

**При использовании система именованных единиц
рекомендуется:**

1. Пронумеровать ступени трансформации. В качестве *основной ступени трансформации*, к которой приводятся параметры всех элементов схемы для создания электрической схемы замещения, *можно принять любую*; рекомендуется за основную принимать ступень, на которой указано КЗ или продольная несимметрия.

2. При проведении вычислительных действий с x , U , I в качестве контроля правильности следует руководством следующим правилом: при приведении (пересчете) сопротивления (x) со ступени низкого напряжения на ступень высокого напряжения оно увеличивается в k_T^2 раз, напряжение (U) уве-

личивается в k_T раз, а ток (I) уменьшается в k_T раз, где коэффициент трансформации $k_T = U_B / U_H > 1$. И наоборот при пересчете параметров с высокой на низкую ступень.

При использовании система относительных единиц рекомендуется:


1. Пронумеровать ступени трансформации.
2. Принять базисную мощность S_{σ} . Базисная мощность едина для всей схемы, выбирается величиной произвольной из условий упрощения вычислительных действий; рекомендуется принимать $S_{\sigma}=100$ или $S_{\sigma}=1000$ МВА.
3. Базисные напряжения ступеней ($U_{\sigma i} = U_{\text{ср.ном } i}$) принять согласно стандартного ряда (2.1); базисные токи для ступеней трансформации i рассчитать по формуле $I_{\sigma i} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} U_{\sigma i}}$.


2.3 Расчетные выражения для приведения параметров электрической схемы замещения в именованных и относительных единицах

Примечание:

В записи параметров, например, $E_{*c(\sigma)}$ индекс звездочка (*) означает, что параметр представлен в относительных единицах; (σ) – при принятых базисных условиях; (ном) или (н) – в качестве базисных приняты номинальные параметры элемента.

Таблица 2.1

<p>1.</p> 	<p>Параметры электроэнергетической системы (ЭЭС) E_c – ЭДС электроэнергетической системы в узле подключения к энергорайону, кВ; $S_{КЗ}^{(3)}$ – мощность системы при трехфазном КЗ в узле подключения, МВА</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> <p>$x_c = \frac{E_c^2}{S_{КЗ}^{(3)}}$ – реактивное сопротивление системы на ступени E_c, Ом; E_c – ЭДС системы, кВ;</p> <p>$x_{c(осн.)} = \frac{E_c^2}{S_{КЗ}^{(3)}} \left(\frac{U_{ср(осн.)}}{U_{ср(с)}} \right)^2$ – сопротивление, приведенное к основной ступени $U_{ср(осн.)}$, Ом;</p> <p>$E_{c(осн.)} = E_c \left(U_{ср(осн.)} / U_{ср(с)} \right)$ – ЭДС системы, приведенная к основной ступени $U_{ср(осн.)}$, кВ;</p> <p>где $U_{ср(с)}$ – среднее номинальное напряжение ступени системы, кВ; $U_{ср(осн.)}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах</p> <p>$x^*_{c(б)} = \frac{E_c^2}{S_{КЗ}^{(3)}} \frac{S_б}{U_б^2}$ – реактивное сопротивление системы, от. ед.;</p> <p>$E^*_{c(б)} = E_c / U_б$ – ЭДС системы, от. ед.;</p> <p>где $U_б = U_{ср(с)}$ – базисное, т.е. среднее номинальное напряжение ступени системы, кВ.</p>	

<p>2.</p> 	<p>Параметры генератора (СГ)</p> <p>$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность, МВт;</p> <p>$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ;</p> <p>$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, кА;</p> <p>$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности, от. ед.;</p> <p>x''_d – сверхпереходное сопротивление в от. номинальных ед.</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> <p>$S_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – полная номинальная мощность, МВА;</p> <p>$x_{\Gamma} = x''_d \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ – сверхпереходное сопротивление, приведенное к ступени напряжения СГ, Ом;</p> <p>$E'' = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + x''_d)^2} \right) \cdot U_{\text{НОМ}}$ – сверхпереходная ЭДС на ступени напряжения СГ, кВ;</p> <p>$x_{\Gamma(\text{осн.})} = x''_d \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{ср(осн.)}}}{U_{\text{ср(Г)}}} \right)^2$ – сверхпереходное сопротивление, приведенное к основной ступени напряжения ($U_{\text{ср(осн.)}}$), Ом;</p> <p>$E'' = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + x''_d)^2} \right) \frac{U_{\text{НОМ}} U_{\text{ср(осн.)}}}{U_{\text{ср(Г)}}}$ – сверхпереходная ЭДС, приведенная к основной ступени напряжения ($U_{\text{ср(осн.)}}$), кВ;</p> <p>$I_{\Gamma(\text{осн.})} = I_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{ср(Г)}}}{U_{\text{ср(осн.)}}}$ – номинальный ток генератора, приведенный к основной ступени напряжения ($U_{\text{ср(осн.)}}$), кА,</p> <p>где $U_{\text{ср(Г)}}$ – среднее номинальное напряжение ступени СГ, кВ;</p> <p>$U_{\text{ср(осн.)}}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах</p> <p>$S_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – полная номинальная мощность, МВА;</p> <p>$x_{*\Gamma(\delta)} = x''_d \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}$ – сверхпереходное сопротивление СГ в относительных базисных единицах;</p>	

$$E''_{(\delta)} = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + x''_d)^2} \right) \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{ср}(\Gamma)}} - \text{сверхпереходная ЭДС}$$

в относительных базисных единицах;

$$I^*_{(\delta)} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{I_{\delta}} - \text{номинальный ток генератора в относительных базисных}$$


единицах,

где S_{δ} – базисная мощность, МВА;

$$I_{\delta} = S_{\delta} / \sqrt{3} U_{\text{ср}(\Gamma)} - \text{базисная ток на генераторной ступени кА};$$

$U_{\delta} = U_{\text{ср}(\Gamma)}$ – базисное, т.е. среднее номинальное напряжение ступени СГ, кВ.

Таблица 2.3

<p>3.</p> 	<p>Параметры синхронного (СД) и асинхронного (АД) двигателей</p> <p>$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность, МВт;</p> <p>$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ;</p> <p>$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, кА;</p> <p>$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности, от. ед.;</p> <p>$I^*_{\text{ПСК}}$ – кратность пускового тока, от. ед.</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> <p>$S_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – полная номинальная мощность, МВА;</p> <p>$x''_{\text{НОМ}} = 1 / I^*_{\text{ПСК}}$ – сверхпереходное сопротивление в от. номинальных ед.;</p> <p>$x''_{\text{СД}} = \frac{1}{I^*_{\text{ПСК}}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = x''_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ – сверхпереходное сопротивление, приведенное к ступени напряжения СД (АД), Ом;</p> <p>$E'' = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} \pm x''_{\text{НОМ}})^2} \right) \cdot U_{\text{НОМ}}$ – сверхпереходная ЭДС на ступени напряжения СД (АД), кВ; (знак «+» соответствует СД в режиме перевозбуждения; знак «-» соответствует АД, а также СД в режиме недо возбуждения);</p> <p>$x''_{\text{СД(осн.)}} = \frac{1}{I^*_{\text{ПСК}}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{ср(осн.)}}}{U_{\text{ср(дв)}}} \right)^2$ – сверхпереходное сопротивление, приведенное к основной ступени напряжения ($U_{\text{ср(осн.)}}$), Ом;</p>	

$$E'' = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} \pm x''_{\text{НОМ}})^2} \right) \frac{U_{\text{НОМ}} U_{\text{СР (ОСН.)}}}{U_{\text{СР (ДВ)}}} - \text{сверхпереходная}$$

ЭДС, приведенная к основной ступени напряжения ($U_{\text{СР (ОСН.)}}$), кВ;

$$I_{\text{СД (ОСН.)}} = I_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{СР (ДВ)}}}{U_{\text{СР (ОСН.)}}} - \text{номинальный ток СД (АД), приведенный}$$

к основной ступени напряжения ($U_{\text{СР (ОСН.)}}$), кА,

где $U_{\text{СР (ДВ)}}$ – среднее номинальное напряжение ступени СД (АД), кВ;

$U_{\text{СР (ОСН.)}}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$S_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – полная номинальная мощность, МВА;

$x''_{\text{НОМ}} = 1 / I_{*\text{ПСК}}$ – сверхпереходное сопротивление в от. номинальных ед.;

$$x''_{\text{СД(б)}} = \frac{1}{I_{*\text{ПСК}}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = x''_{\text{НОМ}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} - \text{сверхпереходное сопротивление СД}$$

(АД), в относительных базисных единицах;

$$E_{*(\text{б})} = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} \pm x''_{\text{НОМ}})^2} \right) \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{СР (ДВ)}}} - \text{сверхпереходная}$$

ЭДС в относительных базисных единицах;

$$I_{*(\text{б})} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{б}}} - \text{номинальный ток синхронного двигателя (АД) в относи-}$$

тельных базисных единицах,

где $S_{\text{б}}$ – базисная мощность, МВА;

$$I_{\text{б}} = S_{\text{б}} / \sqrt{3} U_{\text{б}} - \text{базисный ток на ступени СД (АД), кА;}$$

$U_{\text{б}} = U_{\text{СР (ДВ)}}$ – базисное, т.е. среднее номинальное напряжение ступени СД (АД), кВ.

Таблица 2.4

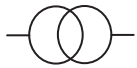
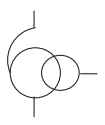
<p>4. </p>	<p>Параметры двухобмоточного трансформатора $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, МВА; $U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}}$ – соответственно номинальное напряжение обмоток высокого и низкого напряжения трансформатора, кВ; u_k – напряжение короткого замыкания, %; ΔP_k – потери короткого замыкания, МВт</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> <p>$x_{T(\text{осн.})} \approx Z_{T(\text{осн.})} = \frac{u_k U_{\text{ср(осн.)}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$ – реактивное сопротивление трансформатора приближенно приравненное к полному сопроотвлению, приведенное к основной ступени ($U_{\text{ср(осн.)}}$), Ом;</p> <p>(для трансформаторов с $U_{\text{ВН}} = 110$ кВ и выше активное сопротивление по сравнению с реактивным мало, поэтому им можно пренебречь. Тогда реактивное сопротивление приравнивают к полному, т.е. $x_T \approx Z_T$), где $U_{\text{ср(осн.)}}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах</p> <p>$x_{*T(\text{б})} \approx Z_{*T(\text{б})} = \frac{u_k S_{\text{б}}}{100 S_{\text{НОМ}}}$ – полное (реактивное) сопротивление трансформатора в относительных базисных единицах.</p>	

Таблица 2.5

<p>5. </p>	<p>Параметры трехобмоточных трансформаторов или автотрансформаторов $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, МВА; $U_{\text{ВН}} / U_{\text{СН}} / U_{\text{НН}}$ – соответственно номинальные напряжения обмоток высокого, среднего и низкого напряжения трансформатора, кВ; $U_{K(\text{В-С})}$, $U_{K(\text{В-Н})}$, $U_{K(\text{С-Н})}$ – соответственно напряжения короткого замыкания между обмотками: (В–С) – высокого и среднего, (В–Н) – высокого и низкого, (С–Н) – среднего и низкого напряжения трансформатора, %</p>
---	--

1. Расчетные параметры в именованных единицах

$U_{K(B)} = 0,5[U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} - U_{K(C-H)}]$ – напряжение короткого замыкания обмотки высокого напряжения, %;

$U_{K(C)} = 0,5[U_{K(B-C)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-H)}]$ – напряжение короткого замыкания обмотки среднего напряжения, %;

$U_{K(H)} = 0,5[U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-C)}]$ – напряжение короткого замыкания обмотки низкого напряжения, %;

$x_{B(осн.)} = \frac{U_{K(B)} U_{ср(осн.)}^2}{100 S_{НОМ}}$ – реактивное сопротивление обмотки высокого

напряжения, приведенное к основной ступени ($U_{ср(осн.)}$), Ом;

$x_{C(осн.)} = \frac{U_{K(C)} U_{ср(осн.)}^2}{100 S_{НОМ}}$ – реактивное сопротивление обмотки среднего

напряжения, приведенное к основной ступени ($U_{ср(осн.)}$), Ом;

$x_{H(осн.)} = \frac{U_{K(H)} U_{ср(осн.)}^2}{100 S_{НОМ}}$ – реактивное сопротивление обмотки низкого

напряжения, приведенное к основной ступени ($U_{ср(осн.)}$), Ом,

где $U_{ср(осн.)}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

Примечание: расчет напряжений короткого замыкания обмоток $U_{K(B)}$,

$U_{K(C)}$, $U_{K(H)}$ приведен выше в п.1.

$x_{*B(б)} = \frac{U_{K(B)} S_{б}}{100 S_{НОМ}}$ – реактивное сопротивление обмотки высокого напря-

жения в относительных базисных единицах;


$x_{*C(б)} = \frac{U_{K(C)} S_{б}}{100 S_{НОМ}}$ – реактивное сопротивление обмотки среднего напряже-

ния в относительных базисных единицах;

$x_{*H(б)} = \frac{U_{K(H)} S_{б}}{100 S_{НОМ}}$ – реактивное сопротивление обмотки низкого напряже-

ния в относительных базисных единицах,

где $S_{б}$ – базисная мощность, МВА.

<p>6.</p> 	<p>Параметры трансформатора с расщепленной обмоткой $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, МВА; $U_{\text{ВН}}$ – номинальное напряжение обмотки высокого напряжения трансформатора, кВ; $U_{\text{НН1}} = U_{\text{НН2}}$ – номинальное напряжение расщепленных обмоток (обмоток низкого напряжения) трансформатора, кВ; $U_{K(\text{В-Н})}$ – напряжение короткого замыкания между обмоткой высокого напряжения и объединенными обмотками низкого напряжения трансформатора, %</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> $x_{\text{В(осн.)}} = \frac{U_{K(\text{В-Н})}}{100} \left(1 - \frac{K_p}{4} \right) \frac{U_{\text{ср(осн.)}}^2}{S_{\text{НОМ}}} - \text{реактивное сопротивление обмотки высокого напряжения, приведенное к основной ступени } (U_{\text{ср(осн.)}}, \text{ Ом};$ $x_{\text{Н1(осн.)}} = x_{\text{Н2(осн.)}} = \frac{U_{K(\text{В-Н})} K_p}{100} \frac{U_{\text{ср(осн.)}}^2}{2 S_{\text{НОМ}}} - \text{реактивное сопротивление расщепленных обмоток, приведенные к основной ступени } (U_{\text{ср(осн.)}}, \text{ Ом},$ <p>где $K_p = 3,5$ – коэффициент расщепления; $U_{\text{ср(осн.)}}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах</p> $x_{*\text{В}(\bar{\text{б}})} = \frac{U_{K(\text{В-Н})}}{100} \left(1 - \frac{K_p}{4} \right) \frac{S_{\bar{\text{б}}}}{S_{\text{НОМ}}} - \text{реактивное сопротивление обмотки высокого напряжения в относительных базисных единицах};$ $x_{*\text{Н1}(\bar{\text{б}})} = x_{*\text{Н2}(\bar{\text{б}})} = \frac{U_{K(\text{В-Н})} \% K_p}{100} \frac{S_{\bar{\text{б}}}}{2 S_{\text{НОМ}}} - \text{реактивное сопротивление расщепленных обмоток в относительных базисных единицах},$ <p>где $K_p = 3,5$ – коэффициент расщепления; $S_{\bar{\text{б}}}$ – базисная мощность, МВА.</p>	

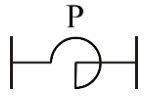
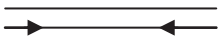
<p>7.</p> 	<p>Параметры токоограничивающего реактора</p> <p>$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, МВА; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение реактора, кВ; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, кА; x_p – реактивное сопротивление реактора, Ом (иногда в справочнике приводят x_p в %)</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> $x_p = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} - \text{реактивное сопротивление, приведенное к ступени напряжения реактора } (U_{\text{НОМ}}), \text{ Ом};$ $x_{p(\text{осн.})} = x_p \left(\frac{U_{\text{ср(осн.)}}}{U_{\text{ср(p)}}} \right)^2 - \text{реактивное сопротивление, приведенное к основной ступени } (U_{\text{ср(осн.)}}), \text{ Ом};$ <p>где $U_{\text{ср(p)}}$ – среднее номинальное напряжение ступени реактора, кВ; $U_{\text{ср(осн.)}}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах</p> $x_{*p(\text{б})} = \frac{x_p \% I_{\text{б}}}{100 I_{\text{НОМ}}} = \frac{x_p \% S_{\text{б}}}{100 S_{\text{НОМ}}} - \text{реактивное сопротивление (для } x_p \text{ реактора, заданного в \%), в относительных базисных единицах};$ $x_{*p(\text{б})} = \frac{x_p \sqrt{3} I_{\text{б}}}{U_{\text{б}}} = \frac{x_p S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} - \text{реактивное сопротивление (для } x_p \text{ реактора, заданного в Ом), в относительных базисных единицах};$ <p>где $I_{\text{б}} = S_{\text{б}} / \sqrt{3} U_{\text{б}}$ – базисный ток на ступени реактора, (кА); $U_{\text{б}} = U_{\text{ср(p)}}$ – базисное, т.е. среднее номинальное напряжение ступени реактора.</p>	

Таблица 2.8

<p>8.</p> 	<p>Параметры воздушной (ВЛ) и кабельной (КЛ) линии $r_{Л(0)}$, $x_{Л(0)}$ – погонные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности одной цепи линии, Ом/км; L – протяженность ВЛ или КЛ линии, км; n – число параллельных линий; $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение линии, кВ</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах</p> <p>$r_{Л} = r_{Л(0)} \frac{L}{n}$, $x_{Л} = x_{Л(0)} \frac{L}{n}$ – эквивалентное активное и индуктивное сопротивления n параллельных линий на ступени $U_{НОМ}$, (Ом);</p> <p>$r_{Л(осн.)} = r_{Л} \left(\frac{U_{ср(осн.)}}{U_{ср(л)}} \right)^2$, $x_{Л(осн.)} = x_{Л} \left(\frac{U_{ср(осн.)}}{U_{ср(л)}} \right)^2$; – активное и индук- тивное сопротивления, приведенные к основной ступени ($U_{ср(осн.)}$), Ом; где $U_{ср(л)}$ – среднее номинальное напряжение ступени ВЛ (КЛ), кВ; $U_{ср(осн.)}$ – среднее номинальное напряжение основной ступени, к которой осуществляется приведение параметров, кВ.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах</p> <p>$r_{*Л(б)} = r_{Л(0)} \frac{L S_{б}}{n U_{б}^2}$, $x_{*Л(б)} = x_{Л(0)} \frac{L S_{б}}{n U_{б}^2}$; – активное и реактивное сопро- тивления ВЛ (КЛ) в относительных базисных единицах, где $U_{б} = U_{ср(л)}$ – базисное, т.е. среднее номинальное напряжение ступени ВЛ (КЛ).</p>	

2.4 ПРИМЕР № 1

Для принципиальной схемы электроэнергетической системы, представленной на рис. 2.1, рассчитать параметры схемы замещения в именованных и относительных единицах.

Римскими цифрами на схеме пронумерованы ступени напряжения (ступени трансформации); под номером ступени указаны средние номинальные напряжения 10,5; 115; 230 кВ. Исходные данные для силового оборудования позаимствованы из табл. П2.1–П2.12 и представлены в табл. 2.9–2.14.

Таблица 2.9

Параметры турбогенераторов Г1, Г2

<i>Турбогенераторы Г1, Г2 – 10,5 кВ;</i>							
Тип	$S_{\text{НОМ}}$, МВА	$P_{\text{НОМ}}$, МВт	$U_{\text{НОМ}}$ кВ	x''_d , о.е.	x_d , о.е.	$I_{\text{НОМ}}$, кА	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$
ТВ-60	70,6	60	10,5	0,153	1,8	3,89	0,85

Таблица 2.10

Параметры синхронного двигателя СД 1

<i>Синхронный двигатель СД 1 – 10 кВ; Режим до возникновения переходного процесса – «перевозбуждение»</i>						
Тип	$S_{\text{НОМ}}$, МВА	$P_{\text{НОМ}}$, МВт	$U_{\text{НОМ}}$ кВ	$I_{\text{пуск}}$, о.е.	$I_{\text{НОМ}}$, кА	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$
СДН-18-84-10	20,7	18	10	8,5	1,19	0,87

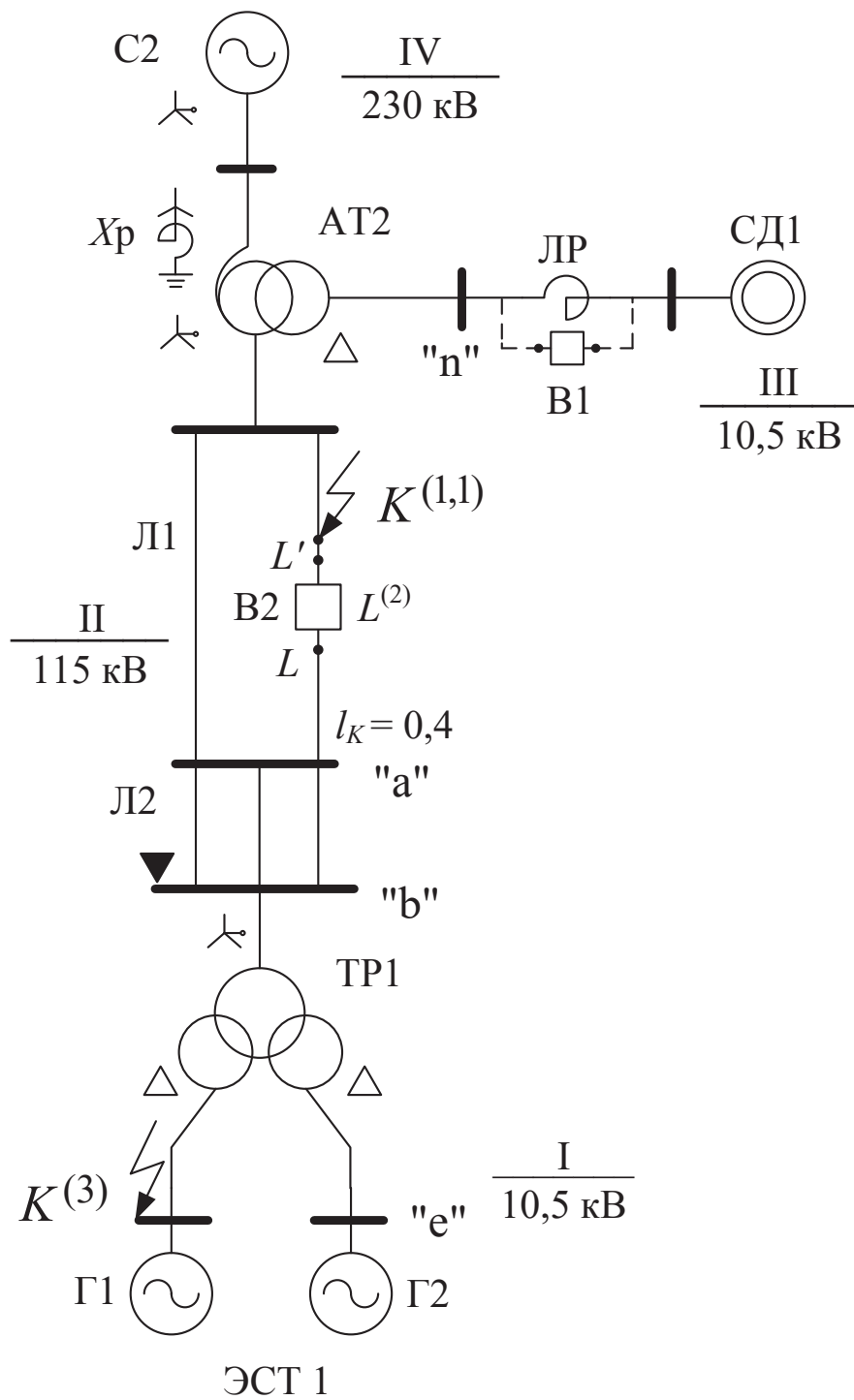


Рис. 2.1. Принципиальная схемы ЭЭС к примеру № 1

Таблица 2.11
 Параметры энергосистемы С2

Система С ₂ Реактивности системы: $x_{1C} = x_{2C}$, $x_{0C} = 2 x_{1C}$	
E_c , кВ	$S_{кз}^{(3)}$, МВА
240	9000

Таблица 2.12
 Параметры воздушных ЛЭП Л1, Л2

ЛЭП-110 кВ (АС-120); $x_1 = 0,425$ Ом/км 1. Взаимная реактивность нулевой последовательности между цепями $x_{0I-II} = 2x_1$; 2. ЛЭП имеют грозозащитный трос	
Л1	50, км
Л2	75, км

Таблица 2.13

Параметры автотрансформатора АТ2

Автотрансформатор АТ2 – 230/121/11 кВ; в нейтрали 230 кВ автотрансформатора АТ2 установлен реактор сопро- тивление которого составляет $x_p = 7,0$ Ом							
Тип	$S_{ном}$, МВА	$U_{ном}$, кВ			U_K , %		
		ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н
АТДЦТН-160000/230	160	230	121	11	10	30	20

Таблица 2.14

Параметры трансформатора с расщепленной обмоткой ТР1

Трансформатор с расщепленной обмоткой ТР1 – 115/10,5-10,5 кВ;				
$U_{кв} \% = \frac{U_{В-Н} \%}{100} \left(1 - \frac{K_p}{4} \right); \quad U_{кн1} \% = U_{кн2} \% = \frac{U_{В-Н} \% K_p}{100 \cdot 2}$				
Тип	$S_{ном}$, МВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН1-НН2}$, кВ	$U_{K(В-Н)}$, %
ТРДН-120000/115	160	115	10,5-10,5	10,5

ПРИМЕР № 1

2.4.1. Расчет параметров схемы замещения в именованных единицах

На схеме замещения *прямой последовательности* рис. 2.2, а сопротивления и ЭДС всех элементов пронумерованы арабскими цифрами, которые располагаются над горизонтальной чертой, под чертой – расчетные значения ЭДС и сопротивления всех элементов в именованных единицах, приведенные к ступени II – 115 кВ.

Расчет параметров проведем при приближенном учете коэффициентов трансформации, используя средние номинальные напряжения (2.1). Имеем четыре ступени напряжения I–10,5; II–115; III–10,5; IV–230 кВ. В качестве основной примем ступень II – 115 кВ; расчетные выражения заимствуем из табл. 2.1–2.8.

1. Коэффициенты трансформации:

$$k_{II-I} = \frac{U_{\text{ср. II}}}{U_{\text{ср. I}}} = \frac{115}{10,5} = \mathbf{10,9523} ; k_{IV-II} = \frac{U_{\text{ср. IV}}}{U_{\text{ср. II}}} = \frac{230}{115} = \mathbf{2,0} .$$

2. Синхронные генераторы Г1, Г2:

$$\begin{aligned} E_1'' = E_2'' &= \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + x_d'')^2} \right) \frac{U_{\text{НОМ}} U_{\text{ср (осн.)}}}{U_{\text{ср (Г)}}} = \\ &= \left(\sqrt{(0,85)^2 + (0,527 + 0,153)^2} \right) 10,5 \frac{115}{10,5} = \mathbf{125,2} \text{ кВ}; \\ x_1 = x_2 = x_d'' &= \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{ср (осн.)}}}{U_{\text{ср (Г)}}} \right)^2 = 0,153 \frac{10,5^2}{70,6} \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = \mathbf{28,7} \text{ Ом}; \\ x_d &= \mathbf{337,2} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

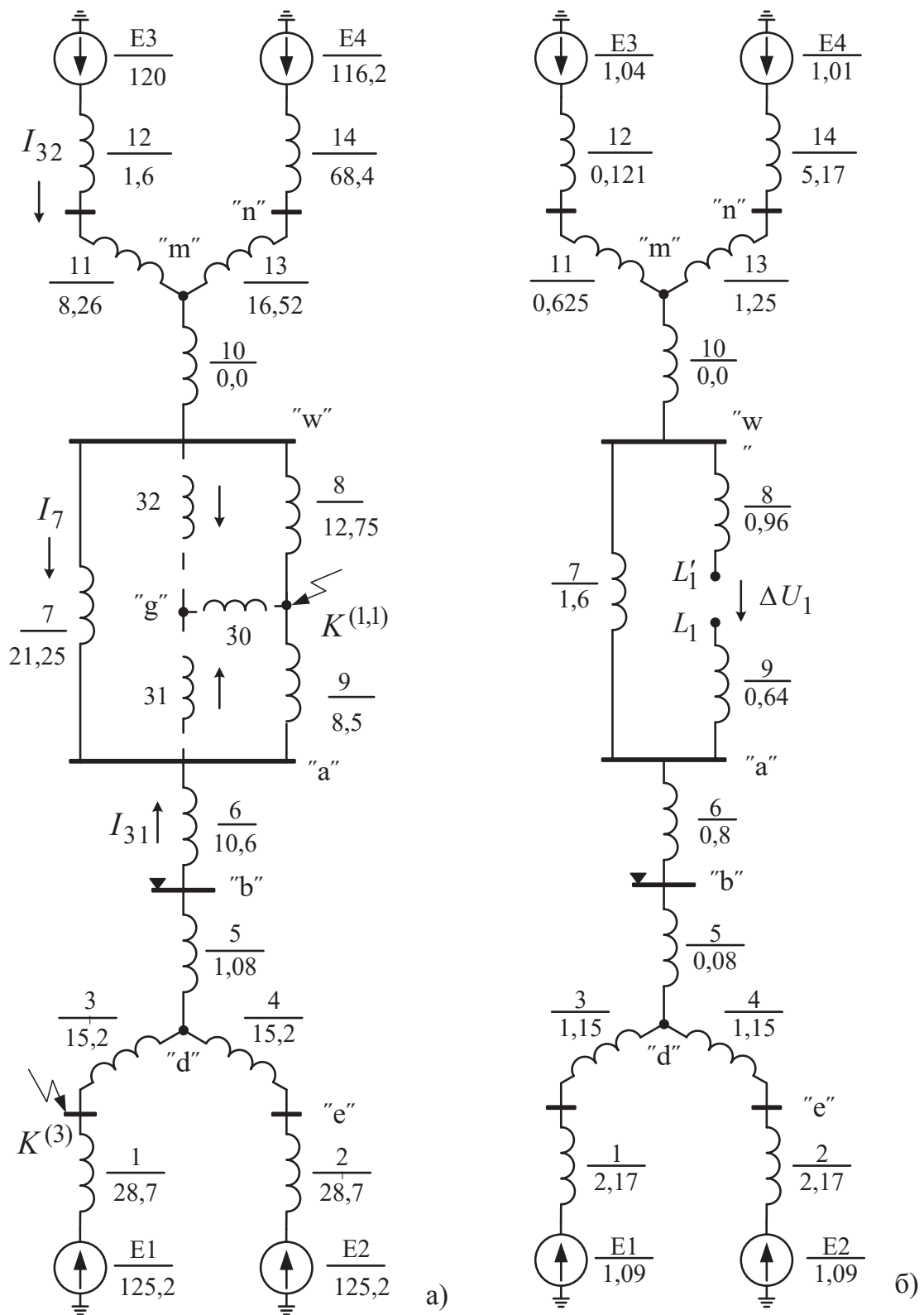


Рис. 2.2. Схема замещения прямой последовательности для принципиальной схемы рис.2.1.: а – параметры представлены в именованных ед.; б – в от. ед.

3. Трансформатор с расщепленной обмоткой ТР1:

$$x_3 = x_4 = \frac{U_{K(B-H)} K_p U_{cp(осн.)}^2}{100 \cdot 2 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,5 \cdot 3,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 2 \cdot 160} = \mathbf{15,2 \text{ Ом}};$$

$$x_5 = \frac{U_{K(B-H)}}{100} \left(1 - \frac{K_p}{4}\right) \frac{U_{cp(осн.)}^2}{S_{НОМ}} = \frac{10,5}{100} \left(1 - \frac{3,5}{4}\right) \frac{115^2}{160} = \mathbf{1,08 \text{ Ом}}.$$

4. Воздушные линии Л1, Л2:

$$x_6 = x_{Л2} = x_{Л2(0)} \frac{L}{n} = 0,425 \frac{75}{3} = \mathbf{10,6 \text{ Ом}};$$

$$x_7 = 0,425 \cdot 50 = \mathbf{21,25 \text{ Ом}}; \quad x_8 = \mathbf{12,75 \text{ Ом}}; \quad x_9 = \mathbf{8,5 \text{ Ом}}.$$

5. Автотрансформатор АТ2:

$$U_{K(B)} = 0,5[U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} - U_{K(C-H)}] = 0,5[10 + 30 - 20] = \mathbf{10 \%};$$

$$U_{K(C)} = 0 \%; \quad U_{K(H)} = 20 \%;$$

$$x_{11} = x_B = \frac{U_{K(B)} U_{cp(осн.)}^2}{100 S_{НОМ}} = \frac{10 \cdot 115^2}{100 \cdot 160} = \mathbf{8,26 \text{ Ом}}; \quad x_{10} = \mathbf{0}; \quad x_{13} = \mathbf{16,52 \text{ Ом}}.$$

6. Электроэнергетическая система С2:

$$E_3 = E_c \left(U_{cp(осн.)} / U_{cp(c)} \right) = 240(115/230) = \mathbf{120 \text{ кВ}};$$

$$x_{12} = \frac{E_c^2}{S_{кз}^{(3)}} \left(\frac{U_{cp(осн.)}}{U_{cp(c)}} \right)^2 = \frac{240^2}{9000} \left(\frac{115}{230} \right)^2 = \mathbf{1,6 \text{ Ом}}.$$

7. Синхронный двигатель СД1:

$$E_4'' = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{НОМ})^2 + (\sin\varphi_{НОМ} + x_*'')^2} \right) \frac{U_{НОМ} U_{cp(осн.)}}{U_{cp(ДВ)}} =$$

$$= \left(\sqrt{(0,87)^2 + (0,49 + 0,118)^2} \right) 10 \frac{115}{10,5} = \mathbf{116,2 \text{ кВ}};$$

$$x_{14} = x_*'' \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{cp(осн.)}}{U_{cp(ДВ)}} \right)^2 = 0,118 \frac{10^2}{20,7} \left(\frac{115}{10,5} \right)^2 = \mathbf{68,4 \text{ Ом}}.$$

ПРИМЕР № 1

2.4.2. Расчет параметров схемы замещения в относительных единицах

На схеме замещения *прямой последовательности* рис. 2.2, б сопротивления и ЭДС всех элементов пронумерованы арабскими цифрами, которые располагаются над горизонтальной чертой, под чертой – расчетные значения ЭДС и сопротивлений элементов в относительных единицах.

Расчет параметров проведем приближенным приведением, используя средние номинальные напряжения (2.1). Имеем четыре ступени напряжения I–10,5; II–115; III–10,5; IV–230 кВ. Расчетные выражения заимствуем из табл. 2.1–2.8.

Принимаем базисную мощность $S_{\text{б}} = 1000$ МВА (единую для всей схемы) и базисные напряжения:

$$U_{\text{бI}} = 10,5; \quad U_{\text{бII}} = 115; \quad U_{\text{бIII}} = 10,5; \quad U_{\text{бIV}} = 230 \text{ кВ};$$

рассчитываем базисные токи:

$$I_{\text{бI}} = I_{\text{бIII}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{бI}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55; \quad I_{\text{бII}} = 5; \quad I_{\text{бIV}} = 2,5 \text{ кА}.$$

Примечание: С целью сокращения записи у математических символов будем опускать индекс (б), индекс (*) – оставим.

1. Синхронные генераторы Г1, Г2:

$$\begin{aligned} E''_1 = E''_2 &= \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + x''_d)^2} \right) \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{бI}}} = \\ &= \left(\sqrt{(0,85)^2 + (0,527 + 0,153)^2} \right) \frac{10,5}{10,5} = \mathbf{1,09}; \end{aligned}$$

$$x_{*1} = x_{*1} = x''_d \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,153 \frac{1000}{70,6} = \mathbf{2,17}.$$

2. Трансформатор с расщепленной обмоткой ТР1:

$$x_{*3} = x_{*4} = \frac{U_{K(B-H)}}{100} \frac{K_p}{2} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \frac{3,5}{2} \frac{1000}{160} = \mathbf{1,15};$$

$$x_{*5} = \frac{U_{K(B-H)}}{100} \left(1 - \frac{K_p}{4} \right) \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \left(1 - \frac{3,5}{4} \right) \frac{1000}{160} = \mathbf{0,08}.$$

3. Воздушные линии Л1, Л2:

$$x_{*6} = x_{*Л2} = x_{Л2(0)} \frac{L}{n} \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}II}^2} = 0,425 \frac{75}{3} \cdot \frac{1000}{115^2} = \mathbf{0,8};$$

$$x_{*7} = x_{*Л1} = x_{Л1(0)} \frac{L}{n} \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}II}^2} = 0,425 \frac{50}{1} \cdot \frac{1000}{115^2} = \mathbf{1,6};$$

$$x_{*8} = 0,6x_{*7} = 0,6 \cdot 1,6 = \mathbf{0,96}; \quad x_{*9} = 0,4x_{*7} = 0,4 \cdot 1,6 = \mathbf{0,64}.$$

4. Автотрансформатор АТ2:

$$U_{K(B)} = 0,5[U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} - U_{K(C-H)}] = 0,5[10 + 30 - 20] = 10 \%;$$

$$U_{K(C)} = 0 \%; \quad U_{K(H)} = 20 \%;$$

$$x_{*11} = x_{*B} = \frac{U_{K(B)} S_{\bar{6}}}{100 S_{\text{НОМ}}} = \frac{10 \cdot 1000}{100 \cdot 160} = \mathbf{0,625};$$

$$x_{*10} = x_{*C} = \mathbf{0}; \quad x_{*13} = x_{*H} = \mathbf{1,25}.$$

5. Электроэнергетическая система С2:

$$E_{*3} = E_c / U_{\bar{6}IV} = 240 / 230 = \mathbf{1,04};$$

$$x_{*12} = \frac{E_c^2}{S_{K3}^{(3)}} \left(\frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}IV}^2} \right) = \frac{240^2}{9000} \left(\frac{1000}{230^2} \right) = \mathbf{0,121}.$$

6. Синхронный двигатель СД1:

$$E_{*4}'' = E_{*СД1}'' = \left(\sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + x_{*4}'')^2} \right) \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\bar{6}III}} =$$

$$= \left(\sqrt{(0,87)^2 + (0,49 + 0,118)^2} \right) \frac{10}{10,5} = \mathbf{1,01};$$

$$x_{*14}'' = \frac{1}{I_{*ПСК}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}III}^2} = \frac{1}{8,5} \left(\frac{1000}{20,7} \right) \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = \mathbf{5,172}.$$

Таблица 4.1

Значения $k_{уд}$ и T_a для наиболее часто встречающихся элементов ЭЭС

Место короткого замыкания и характеристика сети	T_a , с	$k_{уд}$
1. Сборные шины 6-10 кВ станций с генераторами мощностью 30-60 МВт	0.127-0.254	1.92-1.96
2. За линейным реактором до 1000 А, присоединенным к сборным шинам по п. 1	0.0634-0.191	1.85-1.95
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	0.0955-0.191	1.89-1.95
4. То же с трансформаторами 30-100 МВА	0.0634-0.159	1.85-1.94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше; сопротивление трансформаторов составляет 90% и выше результирующего сопротивления до места КЗ	0.0634-0.127	1.85-1.92
6. То же с трансформаторами 30-100 МВА	0.048-0.0955	1.81-1.89
7. Распределительные сети 6-10 кВ	0.01	1.869
8. Ветви, защищаемые реактором с номинальным током 630 А и ниже	0.1	1.904
9. Турбогенераторы мощностью: 100-1000 МВт; 12-60 МВт	0.4-0.54; 0.16-0.25	1.975-1.98; 1.94-1.955
10. Блоки, состоящие из турбогенератора и повышающего трансформатора, при мощности генератора: 100-200 МВт; 300 МВт; 500 МВт; 800 МВт	0.26; 0.32; 0.35; 0.30	1.965; 1.977; 1.983; 1.967
11. Система, связанная с шинами, где рассматривается КЗ, воздушными линиями, напряжением: 35 кВ; 110-150 кВ; 220-330 кВ; 500-750 кВ	0.02; 0.02-0.03; 0.03-0.04; 0.06-0.08	1.608; 1.608-1.717; 1.717-1.78; 1.85-1.895

4.5 ПРИМЕР № 2

Для электрической системы, представленной в **примере №1** на рис. 2.1 (схема замещения рис. 2.2,а) , выполнить расчет и анализ переходного процесса для режимов трехфазного КЗ ($K^{(3)}$). Расчеты провести в именованных и относительных единицах.

В заданной точке $K^{(3)}$ для $t = 0$ рассчитать:

- I_{n0} – действующие значения периодической слагаемой тока короткого замыкания;
- i_y, S_K – ударный ток и мощность КЗ;
- $U_{ост}$ – остаточное напряжение на высокой стороне трансформатора ТР1 (узел ∇);
- $I_{n0}^{(2)}$ – действующие значения тока двухфазного короткого замыкания;
- определить режим работы генератора Г2 в установившемся режиме КЗ для $t = \infty$ принимая $I_{*fпр} = E_{*пр} = 3,8$.

ПРИМЕР № 2

4.5.1. Расчет режимов трехфазного КЗ ($K^{(3)}$) в именованных единицах

Преобразуем схему рис. 2.2, а относительно узла $K^{(3)}$; влиянием синхронного двигателя СД1 в силу значительной удаленности от места КЗ пренебрежем. Этапы упрощения схемы представлены на рис. 4.4, а, б, в (численные значения ЭДС и сопротивлений заимствуем из примера №1):

$$x_{15} = x_5 + x_6 + [x_7 / (x_8 + x_9)] + x_{10} + x_{11} + x_{12} = \mathbf{32,16} \text{ Ом};$$

$$x_{16} = x_2 + x_4 = \mathbf{43,9} \text{ Ом}; \quad x_{17} = x_3 + x_{15} / x_{16} = 15,2 + 18,56 = \mathbf{33,76} \text{ Ом};$$

$$E_5 = E_3 // E_2 = \frac{E_3 x_{16} + E_2 x_{15}}{x_{15} + x_{16}} = \frac{120 \cdot 43,9 + 125,2 \cdot 32,16}{32,16 + 43,9} = \mathbf{122,2} \text{ кВ.}$$

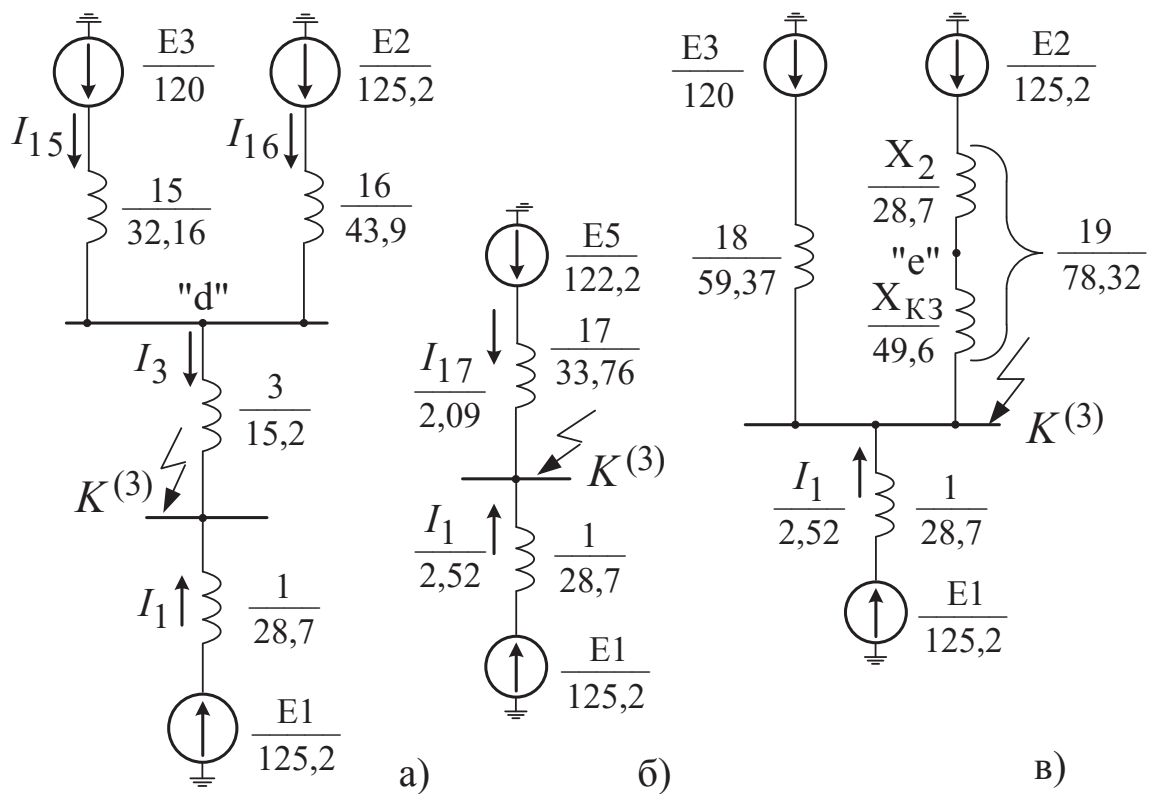


Рис. 4.4 Этапы преобразования схемы, представленной на рис.2.2,а
Находим токи в двухлучевой схеме рис. 4.4, б по выражениям (4.3):

$$I_{17} = E_5 / \sqrt{3} \cdot x_{17} = 122,2 / \sqrt{3} \cdot 33,76 = \mathbf{2,09} \text{ кА};$$

$$I_1 = E_1 / \sqrt{3} \cdot x_1 = 125,2 / \sqrt{3} \cdot 28,7 = \mathbf{2,52} \text{ кА}.$$

1. Действующие значения периодической слагаемой тока короткого замыкания, приведенное к $U_{\text{ср.л}} = 10,5 \text{ кВ}$

$$I_{k\Sigma(0)}^{(3)} = (I_1 + I_{17}) k_{\text{II-I}} = (2,52 + 2,09) \cdot 10,9523 = \mathbf{50,5} \text{ кА}.$$

2. Ударный ток короткого замыкания рассчитываем по (4.1), используя единый ударный коэффициент $k_{\text{уд}} = \mathbf{1,92}$ согласно данных табл. 4.1 п. 1

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} I_{k\Sigma(0)}^{(3)} k_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 50,5 \cdot 1,92 = \mathbf{137,1} \text{ кА}.$$

3. Мощность короткого замыкания находим по выражению (4.5)

$$S_K = \sqrt{3} I_{k\Sigma(0)}^{(3)} U_{\text{ср.л}} = \sqrt{3} \cdot 50,5 \cdot 10,5 = \mathbf{917,3} \text{ МВА}.$$

4. Ток двухфазного КЗ $I_{k\Sigma(0)}^{(2)}$ определяем по приближенному соотношению

$$I_{k\Sigma(0)}^{(2)} = 0,87 I_{k\Sigma(0)}^{(3)} = 0,87 \cdot 50,5 = \mathbf{43,9} \text{ кА}.$$

5. Остаточное напряжение на высокой стороне трансформатора ТР1 (узел ∇) рассчитываем на базе рис. 2.2, а по формуле (4.10)

$$U_{\text{ост}(\Delta)} = \sqrt{3}(I_3 x_3 + I_5 x_5) = \sqrt{3}(2,09 \cdot 15,2 + 1,167 \cdot 1,08) = \mathbf{57,14 \text{ кВ}};$$

$$U_{\text{ост}(\Delta)} \% = 57,14 / 115 = \mathbf{49,7 \%},$$

где $I_3 = I_{17} = 2,09$ кА; $I_5 = I_{15} = 1,167$ кА; распределение тока по ветвям 15, 16 схемы рис.4.4, а находим по формулам (3.5), (3.6)

$$I_{15} = \frac{I_3 x_{16} + (E_3 - E_2) / \sqrt{3}}{x_{15} + x_{16}} = \frac{2,09 \cdot 43,9 + (120 - 125,2) / \sqrt{3}}{32,16 + 43,9} = \mathbf{1,167 \text{ кА}};$$

$$I_{16} = I_3 - I_{15} = 2,09 - 1,167 = \mathbf{0,923 \text{ кА}}.$$

6. Режим работы генератора Г2 в установившемся режиме КЗ для $t = \infty$ (все используемые ниже параметры x, E, I приведены к основной ступени II –115 кВ):

– находим сопротивление связи генератора Г2 и энергосистемы С2 непосредственно с узлом КЗ путем замены «звезды» сопротивлений x_3, x_{15}, x_{16} (рис. 4.4, а) двухлучевой (рис. 4.4, в), используя формулу (3.15),

$$x_{18} = x_{3\text{К}} = \frac{E_3 I_{17} x_{17}}{E_5 I_{15}} = \mathbf{59,37 \text{ Ом}}; \quad x_{19} = x_{2\text{К}} = \frac{E_2 I_{17} x_{17}}{E_5 I_{16}} = \mathbf{78,32 \text{ Ом}};$$

$$(\text{проверка } x_{17} = x_{18} // x_{19} = \frac{59,37 \cdot 78,32}{59,37 + 78,32} = \mathbf{33,76} - \text{ верно});$$

– ветвь x_{19} состоит из двух реактансов $x_{19} = x_{\text{КЗ}} + x_2$, где $x_{\text{КЗ}}$ соответствует удалению шин генератора Г2 от узла КЗ, т. е.

$$x_{\text{КЗ}} = x_{19} - x_2 = \mathbf{49,6 \text{ Ом}};$$

– рассчитываем критическое сопротивление для Г2 по (4.14)

$$x_{\text{кр}} = \frac{x_d}{(E_{*\text{пр}} - 1)} = \frac{337,2}{(3,8 - 1)} = \mathbf{120,4 \text{ Ом}}$$
 и убеждаемся в том, что

$x_{\text{КЗ}} < x_{\text{кр}}$, т. е. $\mathbf{49,6 < 120,4}$ и, следовательно, в установившемся режиме генератор Г2 работает в режиме *предельного возбуждения*.

ПРИМЕР № 2

4.5.2. Расчет режимов трехфазного КЗ ($K^{(3)}$) в относительных единицах

Преобразуем схему рис. 2.2, б относительно узла $K^{(3)}$; влиянием синхронного двигателя СД1 в силу значительной удаленности от места КЗ пренебрежем. Этапы упрощения схемы представлены на рис. 4.5, а, б, в (численные значения ЭДС и сопротивлений заимствуем из примера №1):

$$x_{*15} = x_{*5} + x_{*6} + \left[x_{*7} / (x_{*8} + x_{*9}) \right] + x_{*10} + x_{*11} + x_{*12} = \mathbf{2,43};$$

$$x_{*16} = x_{*2} + x_{*4} = \mathbf{3,32}; \quad x_{*17} = x_{*3} + x_{*15} / x_{*16} = 1,15 + 1,4 = \mathbf{2,55};$$

$$E_{*5} = E_{*3} // E_{*2} = \frac{E_{*3}x_{*16} + E_{*2}x_{*15}}{x_{*15} + x_{*16}} = \frac{1,04 \cdot 3,32 + 1,09 \cdot 2,43}{3,32 + 2,43} = \mathbf{1,06}.$$

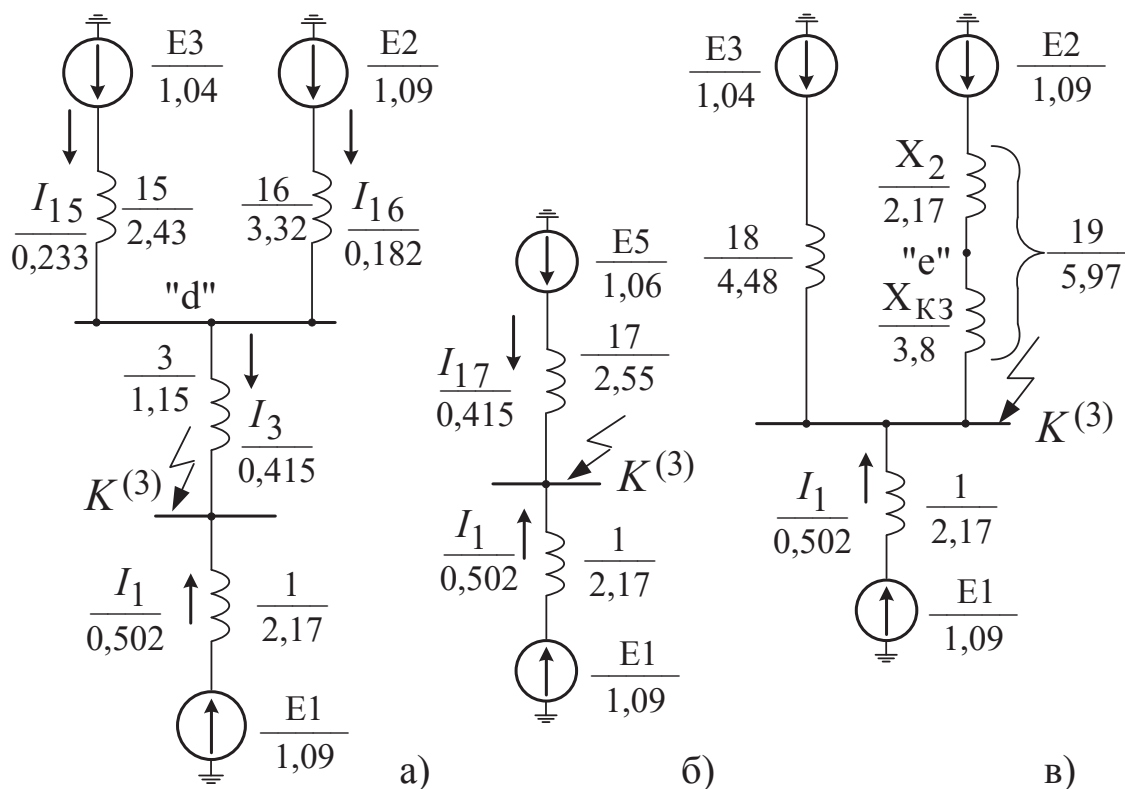


Рис. 4.5 Этапы преобразования схемы, представленной на рис.2.2, б
Находим токи в двухлучевой схеме рис. 4.5, б по выражениям (4.4):

$$I_{*17} = E_{*5} / x_{*17} = 1,06 / 2,55 = \mathbf{0,415};$$

$$I_{*1} = E_{*1} / x_{*1} = 1,09 / 2,17 = \mathbf{0,502}.$$

1. Действующие значения периодической слагаемой тока короткого замыкания, приведенное к $U_{\text{ср. I}} = 10,5$ кВ

$$I_{k\Sigma(0)}^{(3)} = (I_{*1} + I_{*17}) I_{\text{б I}} = (0,502 + 0,415) \cdot 55 = \mathbf{50,5} \text{ кА.}$$

2. Ударный ток короткого замыкания рассчитываем по (4.1), используя единый ударный коэффициент $k_{\text{уд}} = \mathbf{1,92}$ согласно данных табл. 4.1 п. 1

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} I_{k\Sigma(0)}^{(3)} k_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 50,5 \cdot 1,92 = \mathbf{137,1} \text{ кА.}$$

3. Мощность короткого замыкания находим по выражению (4.5)

$$S_K = \sqrt{3} I_{k\Sigma(0)}^{(3)} U_{\text{ср. I}} = \sqrt{3} \cdot 50,5 \cdot 10,5 = \mathbf{917,3} \text{ МВА.}$$

4. Ток двухфазного КЗ $I_{k\Sigma(0)}^{(2)}$ определяем по приближенному соотношению

$$I_{k\Sigma(0)}^{(2)} = 0,87 I_{k\Sigma(0)}^{(3)} = 0,87 \cdot 50,5 = \mathbf{43,9} \text{ кА.}$$

5. Остаточное напряжение на высокой стороне трансформатора ТР1 (узел ∇) рассчитываем на базе рис. 2.2, б по формуле (4.11)

$$\begin{aligned} U_{\text{ост}(\Delta)} &= (I_{*3} x_{*3} + I_{*5} x_{*5}) U_{\text{б II}} = \\ &= (0,415 \cdot 1,15 + 0,233 \cdot 0,08) \cdot 115 = \mathbf{57,14} \text{ кВ;} \end{aligned}$$

$$U_{\text{ост}(\Delta)} \% = 57,14 / 115 = \mathbf{49,7} \% ,$$

где $I_{*3} = I_{*17} = 0,415$; $I_{*5} = I_{*15} = 0,233$; распределение тока по ветвям 15, 16 схемы рис.4.5, а находим по формулам (3.5), (3.6)

$$I_{*15} = \frac{I_{*3} x_{*16} + (E_{*3} - E_{*2})}{x_{*15} + x_{*16}} = \frac{0,415 \cdot 3,32 + (1,04 - 1,09)}{2,43 + 3,32} = \mathbf{0,233} ;$$

$$I_{*16} = I_{*3} - I_{*15} = 0,415 - 0,233 = \mathbf{0,182} .$$

6. Режим работы генератора Г2 в установившемся режиме КЗ для $t = \infty$:
– находим сопротивление связи генератора Г2 и энергосистемы С2 непосредственно с узлом КЗ путем замены «звезды» сопротивлений x_3 , x_{15} , x_{16} (рис. 4.5,а) двухлучевой (рис. 4.5,в), используя формулу (3.15),

$$x_{*18} = x_{*3\text{К}} = \frac{E_{*3} I_{*17} x_{*17}}{E_{*5} I_{*15}} = \mathbf{4,48} , \quad x_{*19} = x_{*2\text{К}} = \frac{E_{*2} I_{*17} x_{*17}}{E_{*5} I_{*16}} = \mathbf{5,97} ;$$

$$(\text{проверка } x_{*17} = x_{*18} // x_{*19} = \frac{4,48 \cdot 5,97}{4,48 + 5,97} = \mathbf{2,55} - \text{ верно});$$

– ветвь x_{19} состоит из двух реактансов $x_{*19} = x_{*КЗ} + x_{*2}$, где $x_{*КЗ}$ соответствует удалению шин генератора Г2 от узла КЗ, т. е.

$$x_{*КЗ} = x_{*19} - x_{*2} = 5,97 - 2,17 = \mathbf{3,8};$$

– рассчитываем критическое сопротивление для Г2 по (4.14)

$$x_{*кр} = \frac{x_{*d}}{(E_{*пр} - 1)} = \frac{25,5}{(3,8 - 1)} = \mathbf{9,1},$$

где $E_{*пр} = E_{*пр(н)} U_{ном} / U_{б1} = 3,8 \cdot 10,5 / 10,5 = \mathbf{3,8}$ – предельная ЭДС

и $x_{*d} = x_{*d(н)} \frac{S_{б}}{S_{ном}} = 1,8 \frac{1000}{70,6} = \mathbf{25,5}$ – синхронное сопротивление в относительных базисных единицах.

Убеждаемся в том, что $x_{*КЗ} < x_{*кр}$, т. е. $\mathbf{3,8} < \mathbf{9,1}$ и, следовательно, в установившемся режиме генератор Г2 работает в режиме *предельного возбуждения*, а его ток определяется выражением (4.16) и на ступени $U_{ср.I} = 10,5$ кВ равен

$$\begin{aligned} I_{Г2(\infty)} &= \left[E_{*пр} / (x_{*d} + x_{*КЗ}) \right] I_{б1} = \\ &= \left[3,8 / (25,5 + 3,8) \right] \cdot 55 = 0,13 \cdot 55 = \mathbf{7,15} \text{ кА.} \end{aligned}$$

4.6 ПРИМЕР № 3

Для электрической системы, представленной в **примере №1** на рис. 2.1 (схемы замещения приведены на рис. 2.2, а и рис. 2.2, б):

- определить реактивность пускового реактора x_p (Ом и %) из условия, что бы при реакторном пуске синхронного двигателя СД1 пусковой ток $I_{пуск(с реактором)}$ должен снизиться до уровня $I_{пуск(с реактором)} = 0,5 I_{пуск(без реактора)}$; в расчетах принять: мощность реактора $S_p = S_{(СД1)}$ и $U_{ном(p)} = U_{ном(СД1)}$;

Для приближенного расчета считать напряжение на шинах низкого напряжения АТ2 $U''_n = U_{ном(СД1)} = \text{const}$; расчет провести в именованных единицах.

Расчет параметров пускового реактора. В приближенных расчетах считают, что внешние источники питания в момент пуска синхронного двигателя практически обеспечивают постоянство номинального напряжения на

его шинах. В начальный момент пуска сверхпереходная ЭДС синхронного двигателя равна нулю, что соответствует $K^{(3)}$ за $x''_{(CD1)}$; к шинам двигателя при этом приложено напряжение $U_{ном(CD1)}$. Иными словами пусковой ток представляет ток короткого замыкания.

Сопротивление пускового реактора для обеспечения $I_{пуск(с реакт.)}$ определяется выражением:

$$x_p = \frac{U_{ном(CD1)}}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{I_{пуск(с реакт.)}} - \frac{1}{I_{пуск(ном)}} \right) =$$

$$= \frac{10}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{0,5 \cdot 10,115} - \frac{1}{10,115} \right) = 0,57 \text{ Ом}$$

и в процентах от его номинального сопротивления

$$x_p \% = \left(x_p / x_{p(ном)} \right) 100 = (0,57 / 4,83) 100 = 11,8 \%,$$

где $I_{пуск(ном)} = I_{*п(н)} I_{ном(CD1)} = 8,5 \cdot 1,19 = 10,115 \text{ кА}$ – пусковой ток;

$$x_{p(ном)} = \frac{U_{p(ном)}^2}{S_{p(ном)}} = \frac{10^2}{20,7} = 4,83 \text{ Ом} \text{ – номинальное сопротивление.}$$

5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

5.3 ПРИМЕР № 4

Для электрической системы, представленной в **примере №1** (рис. 2.1) составить *схему замещения нулевой последовательности* и рассчитать реактивности элементов в именованных единицах. За основу берем исходные данные и результаты расчета примера №1.

ПРИМЕР № 4

5.3.1. Расчет параметров схемы в именованных единицах

Схема нулевой последовательности представлена на рис.5.3, на котором сопротивления в именованных единицах приведены к ступени II –115 кВ.

1. Трансформатор ТР1 сохраняет свои реактансы из прямой последовательности: $x_3 = x_4 = 15,2$ Ом; $x_5 = 1,8$ Ом.

2. Воздушные линии электропередач:

– в расчете эквивалентного сопротивления для Л2 ориентируемся на схему рис.5.2,б, выражение (5.3) и данные табл. 5.1 для коэффициента $k_{(0-1)} = 3$; при этом учитываем наличие трех параллельных цепей:

$$x_{20} = (k_{(0-1)}x_{Л2(0)} + 2x_{(0)I-II})L/3 = \\ = [3 \cdot 0,425 + 2 \cdot (2 \cdot 0,425)] \cdot 75/3 = 74,4 \text{ Ом, где } x_{(0)I-II} = 2x_{Л2(0)};$$

– для Л1 заимствуем схему замещения рис.5.2,в и расчетные выражения (5.4):

$$x_{21} = x_{I-II}^{(1)} = 2x_9 = 2 \cdot 8,5 = 17,0 \text{ Ом; } x_{25} = x_{I-II}^{(2)} = 2x_8 = 25,5 \text{ Ом;}$$

$$x_{22} = k_{(0-1)}x_1^{(1)} - x_{I-II}^{(1)} = 3x_9 - x_{21} = 3 \cdot 8,5 - 17 = 8,5 \text{ Ом;}$$

$$x_{23} = k_{(0-1)}x_1^{(2)} - x_{I-II}^{(2)} = 12,75 \text{ Ом; } x_{24} = x_{22} + x_{23} = 21,25 \text{ Ом;}$$

3. Автотрансформатор АТ2 имеет схему замещения, построенную на базе рис.5.1,б; сопротивления схемы рассчитываем по формулам (5.1), в которых x_I , x_{II} и x_{III} являются реактивностями прямой последовательности x_{11} , x_{10} , x_{13} , представленные на рис.2.2,а. Сопротивление реактора $x_N = 7,0$ Ом относится к ступени $U_{IV} = 230$ кВ и в расчетах приводится к ступени $U_{II} = 115$ кВ посредством коэффициента трансформации $k_{IV-II} = U_{ср.IV} / U_{ср.II} = 230 / 115 = 2,0$.

Имеем:

$$x_{26} = x_{10} + \left\{ 3x_N \frac{(U_{IV} - U_{II})U_{IV}}{U_{II}^2} \right\} / k_{IV-II}^2 = \\ = 0 + \left\{ 3 \cdot 7,0 \frac{(230 - 115)230}{115^2} \right\} / 4,0 = 10,5 \text{ Ом;}$$

$$x_{27} = x_{13} + \left(3x_N \frac{U_{IV}}{U_{II}} \right) / k_{IV-II}^2 = 16,52 + \left(3 \cdot 7,0 \frac{230}{115} \right) / 4 = 27,02 \text{ Ом;}$$

$$\begin{aligned}
 x_{28} &= x_{11} + \left\{ 3x_N \left(1 - \frac{U_{IV}}{U_{II}} \right) \right\} / k_{IV-II}^2 = \\
 &= 8,26 + \left\{ 3 \cdot 7,0 \left(1 - \frac{230}{115} \right) \right\} / 4,0 = \mathbf{3,01} \text{ Ом.}
 \end{aligned}$$

4. Энергосистема С2 имеет $x_{29} = x_{0C} = 2x_{12} = \mathbf{3,2}$ Ом.

На рис. 5.3,б параметры схемы нулевой последовательности выражены в относительных единицах.