



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра «Электроснабжение сельского хозяйства»

Утверждаю.
Проректор по УР
А.А. Патрушев

Белов А.В., Коровин Ю.В., Пахомов Е.И.

**РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В**

Часть 1

Расчёт тока трёхфазного короткого замыкания

Учебное пособие к курсовой работе

Челябинск
2009

УДК

Белов А.В., Коровин Ю.В., Пахомов Е.И. Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах напряжением выше 1000 В. Часть 1: Расчёт тока трёхфазного короткого замыкания: учебное пособие к курсовой работе. Челябинск, 2009.

Рассмотрены практические методы расчёта тока трёхфазного короткого замыкания в электрических системах напряжением выше 1000 В. Приведены основные допущения, изложены основы и порядок расчета в системе относительных единиц, принципы определения параметров элементов, составление и преобразование схем замещения. Пособие содержит примеры расчёта, варианты задания и необходимый справочный материал. Учтены изменения и уточнения в методах расчёта токов короткого замыкания, отраженные в Национальном стандарте ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта ...». В пособии использованы учебные и методические наработки кафедры «Электрические станции, сети и системы» ЮУрГУ.

Пособие предназначено для студентов IV курса факультета электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства ЧГАУ, обучающихся по направлению подготовки 140200 – «Электроэнергетика». Может быть полезно студентам других ВУЗов, получающим образование по этому направлению.

Рецензенты

Пястолов В.В. – канд. техн. наук, доцент (ЮУрГУ)

ВВЕДЕНИЕ

Коротким замыканием (КЗ) называют всякое, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки между собой или с землей, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима [1].

В трехфазных электроустановках возникают следующие простейшие виды коротких замыканий: трехфазное – $K^{(3)}$; двухфазное – $K^{(2)}$; двухфазное на землю – $K^{(1,1)}$; однофазное – $K^{(1)}$, токи которых могут в несколько раз превышать номинальные токи электрооборудования.

В сетях с заземлённой нейтралью (110 кВ и выше) наиболее частым является однофазное КЗ, относительная вероятность возникновения которого составляет 61...95% [2-4], увеличиваясь с ростом напряжения.

При трехфазном КЗ все фазы электрической цепи оказываются в одинаковых условиях, и оно является **симметричным**. Остальные короткие замыкания называют **несимметричными**. Хотя доля трехфазного КЗ составляет менее 10%, оно очень часто является самым тяжелым режимом для из всех видов КЗ и, поэтому, во многом определяющим для оценки допустимых условий работы элементов электрической системы.

Резко возрастающие при КЗ токовые нагрузки, во-первых, вызывают значительное увеличение сил электродинамического взаимодействия между проводниками и токоведущими частями электроустановок, что может привести к механическому повреждению электрооборудования. Во-вторых, они сопровождаются увеличением потерь в проводниках и контактах, приводящих к повышенному нагреву. Это может вызвать термическое повреждение как самих токоведущих частей, так и изоляции, оплавление и выгорание контактов.

Кроме того, при коротких замыканиях происходит понижение напряжения в электрической системе вблизи места повреждения. В результате возможно лавинообразное развитие системной аварии, остановка двигателей нагрузки, их нагрев и выход из строя.

Таким образом, режим короткого замыкания является аварийным. Необходимо уметь рассчитывать эти режимы, в частности, определять величины токов КЗ в любой точке электрической системы в любой момент времени.

Результаты расчета используются при выборе и проверке проводников и электрических аппаратов по электродинамической и термической стойкости, а выключателей и предохранителей – ещё и по отключающей способности; определении рациональных схем и режимов выдачи, передачи и распределения мощности в электрической системе; выборе необходимых средств ограничения токов КЗ; оценки условий работы и настройки релейной защиты и автоматики; для анализа аварий в электроустановках и т.д.

Целью курсовой работы является приобретение навыков расчета токов симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрических системах.

Задание на проектирование представлено в **Приложении 8**.

Глава1. Расчет тока при трехфазном коротком замыкании

1.1. Общее представление о характере тока короткого замыкания

Рассмотрим простейшую электрическую систему, однолинейная (т. е. для одной фазы) схема замещения которой представлена на рис. 1.1.1, а. Здесь r_{Σ} и x_{Σ} – результирующие активное и индуктивное сопротивления контура КЗ, r_H и x_H – результирующие активное и индуктивное сопротивления нагрузки; K – ключ, имитирующий наступление КЗ в цепи; K_H – ключ в цепи нагрузки; i_0 – ток цепи в режиме, предшествующем КЗ; i – ток в режиме КЗ. Результирующая эквивалентная мгновенная ЭДС источников может быть задана выражением

$$e_{\Sigma}(t) = \sqrt{2}E_{\Sigma(t)} \sin(\omega t + \alpha),$$

где: $E_{\Sigma(t)}$ – действующее значение эквивалентной результирующей ЭДС в момент времени t ; α – фаза (момент) возникновения КЗ.

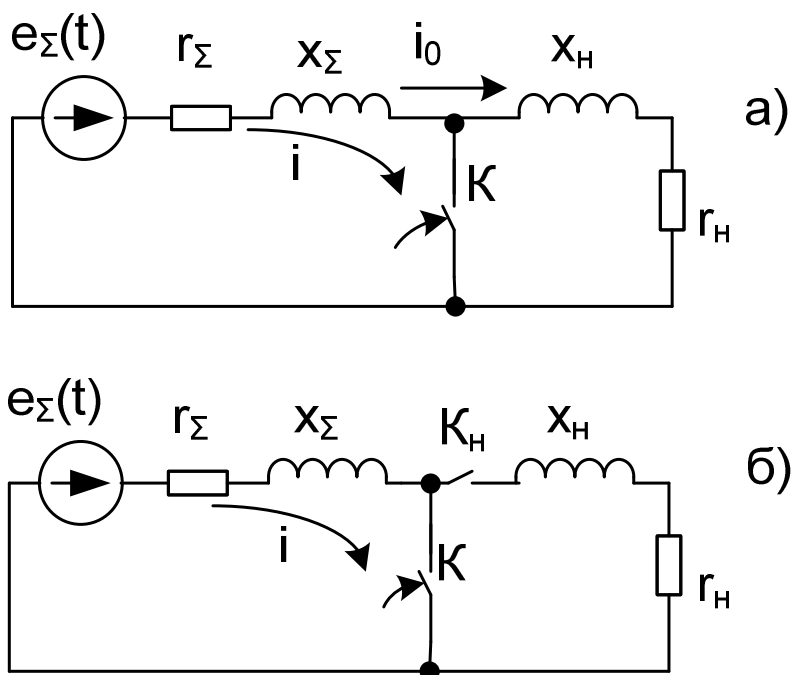


Рис. 1.1.1. Эквивалентные однолинейные схемы замещения для расчета тока КЗ в предварительно нагруженной сети (а) и в разомкнутой сети (б)

В практических расчетах ток короткого замыкания принято представлять в виде суммы периодической $i_H(t)$ и аperiodической $i_a(t)$ составляющих:

$$i(t) = i_H(t) + i_a(t). \quad (1.1.1)$$

В сетях напряжением выше 1000 В величина активного сопротивления контура КЗ r_{Σ} обычно незначительна, следовательно, полное сопротивление

контура $z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} \approx x_{\Sigma}$, а угол сдвига фазы тока относительно ЭДС $\varphi_K = \operatorname{arctg} \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} \approx \frac{\pi}{2}$.

Поэтому периодическую составляющую тока КЗ, отстающую от ЭДС на угол φ_K , можно задать выражением

$$i_{\Pi}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(t)} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K), \quad (1.1.2)$$

где $I_{\Pi(t)}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ, в общем случае изменяющееся с течением времени; $\omega = 2\pi f = 314 \text{ 1/c}$ – угловая промышленная частота сети; α – фаза (момент) возникновения КЗ.

Для начального момента времени действующее значение периодической составляющей тока КЗ может быть найдено как

$$I_{\Pi(0)} = \frac{E_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma}}, \quad (1.1.3)$$

где $E_{\Sigma(0)}$ – действующее значение результирующей эквивалентной ЭДС источников в начальный момент времени.

Тогда по формуле (1.1.2) при $\varphi_K = \pi/2$ и с учетом (1.1.3) начальное значение периодической составляющей тока (т. е. в момент КЗ, соответствующий $t = 0$) определяется как

$$i_{\Pi}(0) = -\sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)} \cdot \cos \alpha, \quad (1.1.4)$$

т. е. зависит от фазы α в момент появления КЗ.

Апериодическая составляющая тока КЗ в индуктивно-активном контуре изменяется по экспоненциальному закону:

$$i_a(t) = i_{a(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (1.1.5)$$

где $i_{a(0)}$ – начальное значение апериодической составляющей тока КЗ;

$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega \cdot r_{\Sigma}} = \frac{L_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ (постоянная времени контура КЗ).

Причину появления в момент КЗ апериодической составляющей тока можно объяснить следующим образом. Перед КЗ в сети протекали токи, и в индуктивных элементах существовал некий запас энергии. В момент КЗ происходит резкое уменьшение сопротивления на пути тока, задаваемого источником. Это вызывает скачкообразное увеличение периодической составляющей тока i_{Π} по сравнению с током предшествующего режима i_0 , который был также периодическим. Однако полный ток в цепи с индуктивностью измениться мгновенно, скачком не может (имеет место закон коммутации), т.к. не может мгновенно измениться запасенная в индуктивности энергия. Поэтому скачкообразное изменение периодического тока должно быть скомпенсировано появлением аналогичной по величине, но противоположной по знаку свободной

составляющей тока, не зависящей от характера ЭДС источника. Поскольку появление свободного тока возможно только при возмущении (в данном случае – при КЗ), которое не повторяется периодически с частотой сети, то свободный ток имеет аperiodический характер, описываемый выражением (1.1.5). Эта составляющая постепенно затухает, что связано с наличием активного сопротивления (зачастую весьма незначительного), в котором рассеивается энергия. Чем больше индуктивность контура КЗ и чем меньше его активное сопротивление, тем медленнее затухает аperiodическая составляющая тока и дольше длится переходный процесс. После полного завершения переходного процесса в сети возникает установившийся режим КЗ, в котором имеет место только периодический ток.

Продолжительность переходного процесса составляет $(3...4)T_a$, что занимает не менее нескольких периодов промышленной частоты. Когда во время переходного процесса периодическая составляющая тока первый раз проходит через свой максимум (амплитуду) того же знака, что имеет аperiodическая составляющая, у полного тока наблюдается пик. **Наибольшее возможное мгновенное значение тока короткого замыкания принято называть ударным током** [5].

Ударный ток в индуктивно-активной цепи с незначительным активным сопротивлением (т.е. при $\varphi_k = \pi/2$) определяют при следующих расчетных допущениях [1, 3, 5]:

- до короткого замыкания ток в элементах контура отсутствовал, т. е. в предшествующем режиме был холостой ход (см. рис. 1.1.1, б);
- периодическая составляющая тока в момент КЗ проходит через свой максимум (т.е. имеет амплитудное значение), что соответствует переходу ЭДС через ноль в чисто индуктивной цепи;
- до наступления ударного тока амплитуда периодической составляющей остается неизменной и равной своему начальному значению.

Выражение (1.1.1) в условиях первого допущения для начального момента времени $t = 0$, совпадающего с моментом возникновения КЗ, принимает вид:

$$i_a(0) = -i_{\Pi}(0). \quad (1.1.6)$$

Второе допущение означает, что при $\varphi_k = \pi/2$ моменту возникновения КЗ $t = 0$ соответствует условие $\alpha = 0$, т.к. в этом случае периодическая составляющая в момент КЗ имеет амплитудное значение, определяемое из выражений (1.1.2) и (1.1.3) подстановкой указанных значений φ_k, t, α :

$$i_{\Pi}(0) = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)} \cdot \sin(\omega \cdot 0 + 0 - \pi / 2),$$

или

$$i_{\Pi}(t) = -\sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)}. \quad (1.1.7)$$

При $\alpha = 0$ и $\varphi_k = \pi/2$ выражение (1.1.2) для произвольного момента времени преобразуется к виду

$$i_{\Pi}(t) = -\sqrt{2} \cdot I_{\Pi(t)} \cdot \cos \omega t. \quad (1.1.8)$$

Начальное значение аperiodической составляющей с учетом выражений (1.1.6) и (1.1.7) находится как

$$i_a(0) = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)},$$

а выражение (1.1.5) для определения этой составляющей тока КЗ в произвольный момент времени примет вид

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (1.1.9)$$

Таким образом, для расчетной схемы (см. рис. 1.1.1, б) в соответствии с выражениями (1.1.8) и (1.1.9) можно построить графики зависимостей от времени периодической $i_{п}$ и аperiodической i_a составляющих тока КЗ, а с учетом выражения (1.1.1) получить график полного тока КЗ i (рис. 1.1.2) и графически найти ударный ток i_y .

Третье допущение позволяет упростить определение ударного тока. Для наглядности воспользуемся рис. 1.1.2, где видно, что ударный ток i_y наступает в момент времени t_m , когда периодическая составляющая первый раз проходит через амплитудное значение того же знака, что имеет аperiodическая составляющая. При этом $I_{п(t_m)} \approx I_{п(0)}$. Поэтому величина ударного тока определяется как

$$i_y = i_{п}(t_m) + i_a(t_m) = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)} \cdot e^{-\frac{t_m}{T_a}}.$$

Поскольку $t_m \approx T/2 = 0,01$ с (здесь T – период промышленной частоты), то

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)} \cdot e^{-\frac{0,01}{T_a}},$$

или

$$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{п(0)}, \quad (1.1.10)$$

где $I_{п(0)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ; K_y – ударный коэффициент, определяемый при условии $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} \geq 5$ [1] (т. е. $T_a \geq 0,016$ с) по общепринятому выражению

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}. \quad (1.1.11)$$

При $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} < 5$ рекомендуется K_y определять по любой из формул [1, 3]:

$$K_y = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{\omega T_a}}; \quad (1.1.12)$$

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot (0,5 + \frac{\Phi_K}{\pi})}{T_a}}. \quad (1.1.13)$$

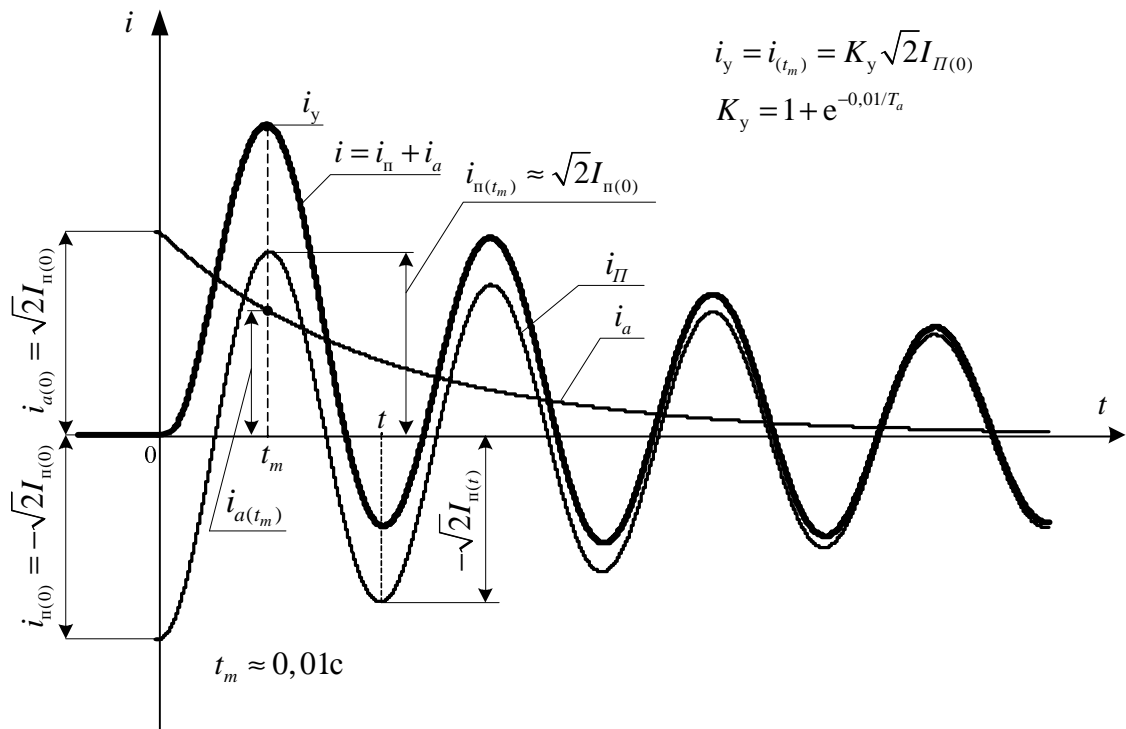


Рис. 1.1.2. Графики зависимостей периодической i_{π} и аperiodической i_a составляющих тока короткого замыкания i от времени

Все короткие замыкания подразделяются на *удаленные* и *близкие* [1]. При приближенных расчетах короткое замыкание допустимо считать удаленным, если точка КЗ находится по отношению к синхронной машине за двумя или более трансформаторами или за реактором (кабельной линией), сопротивление которого превышает сверхпереходное сопротивление синхронного генератора или компенсатора более чем в 2 раза [4]. Если короткое замыкание удаленное, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ считается неизменным и равным начальному, т. е. $I_{\pi(t)} = I_{\pi(0)} = \text{const}$.

При близком КЗ $I_{\pi(t)}$ уменьшается с течением времени до некоторого установившегося значения (см. рис. 1.12). Это можно объяснить переходными процессами, протекающими в синхронных машинах при коротких замыканиях [2-4, 6, 7].

Для целей проектирования необходимо владеть практическими методами расчета и уметь определять следующие величины, характеризующие ток короткого замыкания: начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\pi(0)}$; действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени $I_{\pi(t)}$; аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени $i_a(t)$ (или $i_{a(t)}$, как это принято в дальнейшем изложении); ударный ток КЗ i_y .

1.2. Основные допущения и порядок расчета

При проектировании и эксплуатации электроустановок обычно используют приближенные методы расчета токов короткого замыкания, основанные на допущениях, которые упрощают расчеты и приводят к определению токов короткого замыкания с запасом в 5...10 %. Такая погрешность допустима для инженерных расчётов.

При выполнении данной курсовой работы используются следующие общепринятые допущения [1].

1. При расчете действующего значения периодической составляющей тока КЗ в установках напряжением свыше 1000 В, как правило, не учитывают активные сопротивления элементов электрической системы, если результирующее эквивалентное активное сопротивление относительно точки КЗ не превышает 30% результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления этой же цепи

$$r_{\Sigma} \leq 0,3 \cdot x_{\Sigma}. \quad (1.2.1)$$

Такое соотношение выдерживается в подавляющем большинстве случаев.

Активное сопротивление элементов сети необходимо знать при определении постоянной времени апериодической составляющей тока КЗ. Но и в этом случае, как будет показано ниже, часто обходятся без точных расчетов.

2. Не учитывают насыщение магнитных систем, что позволяет считать постоянными все индуктивные сопротивления сети.

3. Пренебрегают намагничивающими токами силовых трансформаторов.

4. Не учитывают поперечные емкости воздушных линий напряжением до 35 кВ, воздушных линий напряжением 110 – 220 кВ при длине их не более 200 км и напряжением 330 – 500 кВ при длине до 150 км.

5. Не учитывают токи нагрузки.

6. Считают, что трехфазная система является симметричной.

7. Принимают, что в течение всего процесса короткого замыкания ЭДС всех источников системы совпадают по фазе.

8. Учитывают подпитку места КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами.

Кроме того, короткое замыкание считается металлическим, то есть переходное сопротивление электрической дуги в месте КЗ принято равным нулю.

Порядок вычисления тока трехфазного короткого замыкания сводится к следующему.

1. Составляется расчетная схема электрической сети.

2. Составляется схема замещения для заданной точки короткого замыкания, и определяются параметры элементов схемы.

3. Путем преобразований приводят схему замещения к простейшему виду, когда вся схема состоит из одной или нескольких ветвей, каждая из которых включает результирующую эквивалентную ЭДС и результирующее эквивалентное сопротивление. По закону Ома определяют начальные действующие значения периодических составляющих токов КЗ в этих ветвях и находят их сумму.

4. Определяют апериодическую составляющую тока КЗ и ударный ток.

5. При необходимости, находят распределение начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ по ветвям исходной схемы замещения и, с помощью метода типовых кривых, определяют действующие значения периодической составляющей тока КЗ в интересующий момент времени.

Расчет может производиться в именованных или в относительных единицах. В настоящей работе расчет производится в системе относительных единиц.

1.3. Приведение сопротивлений к основной ступени напряжения

Первоначально определяется *расчётная схема сети*, в которой наиболее удалённая часть энергосистемы может быть представлена эквивалентным источником (системой). По расчетной схеме составляется *схема замещения* для расчёта токов КЗ. В схему замещения источники питания входят своими ЭДС и сопротивлениями, а остальные элементы – только сопротивлениями. При этом производится замена магнитосвязанных цепей одной электрической цепью, что существенно упрощает расчет. Схему замещения, включающую эквивалентные сопротивления элементов, называют эквивалентной схемой замещения (слово «эквивалентная» обычно опускается).

Каждый элемент электрической системы имеет свою собственную схему замещения, которая может содержать одно или несколько сопротивлений. Схемы замещения отдельных элементов входят в общую схему замещения в том же порядке, в котором элементы представлены в расчетной схеме. Общепринятые схемы замещения элементов электрических систем представлены в **Приложении 2**, а выражения для расчета именованных значений сопротивлений этих элементов по их каталожным (справочным) значениям – в **Приложении 3**.

Для составления эквивалентной схемы замещения выбирается *основная* (или *базисная*) ступень напряжения, и все электрические величины остальных ступеней приводятся к напряжению этой ступени.

Пусть ступень напряжения U_1 отделена от основной ступени с напряжением U_6 каскадом трансформаторов и автотрансформаторов с коэффициентами трансформации K_1, K_2, \dots, K_n . Тогда для приведения к основной ступени ЭДС E и сопротивления x , заданных в именованных значениях на ступени напряжения U_1 , необходимо воспользоваться соотношениями:

$$\overset{\circ}{E} = E \cdot K ; \quad (1.3.1)$$

$$\overset{\circ}{x} = x \cdot K^2 ; \quad (1.3.2)$$

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n . \quad (1.3.3)$$

В общем случае

$$K_i = \frac{U_i}{U_{i-1}} ,$$

где U_i – напряжение холостого хода обмотки трансформатора, обращенной в сторону основной ступени; U_{i-1} – напряжение холостого хода обмотки трансформатора, обращенной в сторону ступени, с которой осуществляется приведение.

Таким образом, в выражениях (1.3.1) – (1.3.3) **коэффициенты трансформации определяют в направлении от основной ступени к ступени, подлежащей приведению.**

Для примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 1.3.1.

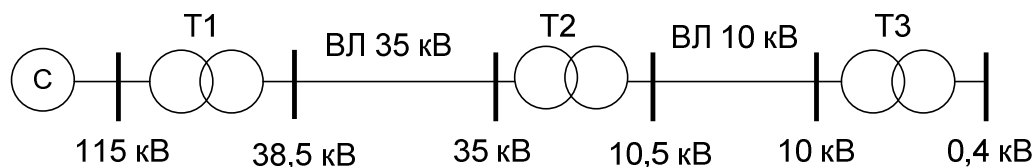


Рис. 1.3.1. Схема сети с каскадом трансформаторов

Схема замещения двухобмоточного трансформатора T1 (тип ТДН-25000/110, $S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ}$, $U_{\text{НННОМ}} = 38,5 \text{ кВ}$, $u_k = 10,5\%$) состоит из одного сопротивления. Его величину найдем по соответствующему выражению из **Приложения 3**:

$$x_{\text{T1(ВН)}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВННОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{25} = 55,545 \text{ Ом} \cdot$$

Это сопротивление трансформатора T1, приведённое к стороне высшего напряжения $U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ}$. Сопротивление этого же трансформатора, но приведённое к стороне низшего напряжения $U_{\text{НННОМ}} = 38,5 \text{ кВ}$, будет равно:

$$x_{\text{T1(НН)}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{НННОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{38,5^2}{25} = 6,225 \text{ Ом} \cdot$$

Отношение сопротивлений $x_{\text{T(ВН)}} / x_{\text{T(НН)}} = 8,922$, то есть равняется квадрату коэффициента трансформации $K_T = \frac{U_{\text{ВННОМ}}}{U_{\text{НННОМ}}} = \frac{115}{38,5} = 2,987$, что соответствует выражению (1.3.2). Таким образом, величины сопротивления трансформатора, приведённые к разным его ступеням напряжения, отличаются в K_T^2 раз.

Пусть задано сопротивление трансформатора T3 ($x_{\text{T3}} = x$), подсчитанное для ступени $U_1 = 0,4 \text{ кВ}$. За базисное принято напряжение $U_6 = 115 \text{ кВ}$ на шинах системы. Необходимо определить сопротивление трансформатора T3, приведенное к базисной ступени напряжения.

Коэффициенты трансформации трансформаторов T1, T2 и T3, соответственно, равны:

$$K_1 = \frac{115}{38,5}; \quad K_2 = \frac{35}{10,5}; \quad K_3 = \frac{10}{0,4}.$$

Отсюда на основании (1.3.2) получим сопротивление трансформатора ТЗ, приведенное к ступени напряжения $U_6 = 115$ кВ:

$$x_{ТЗ} = x \cdot \left(\frac{115}{38,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{35}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{10}{0,4}\right)^2 = x \cdot 61960.$$

Точный расчет необходимо производить с учетом фактического значения коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, а также значений напряжений в узлах схемы. Однако не всегда есть возможность иметь эту информацию. Так, если регулятор на трансформаторе с номинальным напряжением 35 кВ позволяет производить регулировку в пределах $\pm 16\%$, то на выходе мы можем получить и 30 кВ, и 40 кВ. Для приближенных расчетов используют *шкалу средних номинальных напряжений*: 0,4; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 20; 24; 37; 115; 230; 340; 400; 515; 750; 1150 кВ. Например, если номинальное напряжение 35 кВ, то среднее номинальное напряжение будет равно 37 кВ.

При этом **напряжения во всех точках электрической системы одной ступени трансформации принимаются одинаковыми и равными среднему номинальному $U_{\text{ср}}$ данной ступени**. В результате определение коэффициента трансформации по выражению (1.3.3) существенно упрощается, поскольку напряжения на промежуточных ступенях трансформации взаимно сокращаются:

$$K = \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.ст}}}, \quad (1.3.4)$$

где $U_{\text{ср.осн}} = U_6$ и $U_{\text{ср.ст}}$ – средние номинальные напряжения основной ступени (базисное напряжение) и ступени, с которой осуществляется приведение.

Для примера, в схеме на рис. 1.3.1 мы заменим фактические напряжения средними номинальными и снова рассчитаем сопротивление трансформатора ТЗ, приведённое со ступени 0,4 кВ к основной:

$$K_{1\text{ср}} = \frac{115}{35}; \quad K_{2\text{ср}} = \frac{35}{10,5}; \quad K_{3\text{ср}} = \frac{10,5}{0,4};$$

$$K_{\text{ср}} = K_{1\text{ср}} \cdot K_{2\text{ср}} \cdot K_{3\text{ср}}; \quad K_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.ст}}} = \frac{115}{0,4};$$

$$x_{ТЗ} = x \cdot K_{\text{ср}}^2 = x \cdot \left(\frac{115}{0,4}\right)^2 = x \cdot 82656.$$

Упрощение в расчетах при применении средних номинальных напряжений и, соответственно, средних коэффициентов трансформации, заставляет мириться с получаемой погрешностью. Но такое допущение не всегда приемлемо, и в случаях, когда погрешность превышает допустимое значение (5...10%), необходимо применять точное приведение.

1.4. Система относительных единиц

Возьмем какой-либо элемент трехфазной электрической цепи со следующими номинальными параметрами: $U_{\text{НОМ}}$ (кВ), $I_{\text{НОМ}}$ (кА), $S_{\text{НОМ}}$ (МВА) и $x_{\text{НОМ}}$ (Ом) (полагаем $r_{\text{НОМ}} = 0$), которые связаны между собой выражениями:

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}; \quad (1.4.1)$$

$$x_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}. \quad (1.4.2)$$

Любой другой режим того же элемента цепи характеризуется некоторыми значениями напряжения U , тока I , мощности $S = \sqrt{3}UI$ и сопротивлением $x = U / (\sqrt{3}I)$, которые можно выразить в долях соответствующих номинальных величин данного элемента:

$$U_{* (\text{НОМ})} = \frac{U}{U_{\text{НОМ}}}; \quad I_{* (\text{НОМ})} = \frac{I}{I_{\text{НОМ}}}; \quad S_{* (\text{НОМ})} = \frac{S}{S_{\text{НОМ}}};$$

$$x_{* (\text{НОМ})} = \frac{x}{x_{\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot x}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{x \cdot S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2}. \quad (1.4.3)$$

Полученные таким образом величины являются **относительными номинальными величинами**, характеризующими элемент цепи при заданных условиях его работы. Индекс «*» указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс «(НОМ)» – что она отнесена к номинальным параметрам данного элемента цепи.

В каталогах приводятся относительные значения параметров, приведенные к номинальной мощности и номинальному напряжению элемента. В некоторых случаях относительные номинальные величины выражают в %:

$$x_{\%} = x_{* (\text{НОМ})} \cdot 100. \quad (1.4.4)$$

Так, относительное номинальное значение сопротивления трансформатора ТДН-25000/110 (см. рис. 1.3.1) можно определить по его напряжению короткого замыкания u_k , обычно приводимого в %:

$$x_{* (\text{НОМ})} = \frac{u_k}{100} = \frac{10,5}{100} = 0,105.$$

Относительные значения всех параметров можно определять не только по отношению к номинальным параметрам данного элемента, но и по отношению к любой другой базисной системе величин.

В базисную систему величин входят базисная мощность $S_{\text{б}}$, базисное напряжение $U_{\text{б}}$ и базисный ток $I_{\text{б}}$, связанные уравнением мощности трехфазной системы $S_{\text{б}} = \sqrt{3}U_{\text{б}}I_{\text{б}}$, а также базисное сопротивление $x_{\text{б}}$. Произвольно можно

выбирать только две базисные величины, а две другие рассчитываются. Обычно задаются базисными значениями мощности $S_{\bar{6}}$ и напряжения $U_{\bar{6}}$, а базисный ток и сопротивление вычисляют:

$$I_{\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{6}}}; \quad (1.4.5)$$

$$x_{\bar{6}} = \frac{U_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{6}}} = \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{\bar{6}}}. \quad (1.4.6)$$

При известных $S_{\bar{6}}$, $U_{\bar{6}}$, $I_{\bar{6}}$, $x_{\bar{6}}$ относительные базисные значения определяют по следующим формулам:

$$U_* = \frac{U}{U_{\bar{6}}}; \quad I_* = \frac{I}{I_{\bar{6}}}; \quad S_* = \frac{S}{S_{\bar{6}}}; \quad (1.4.7)$$

$$x_* = \frac{x}{x_{\bar{6}}} = x \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}} = x \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2}. \quad (1.4.8)$$

Если задано сопротивление элемента в относительных единицах при номинальных условиях, то его можно привести к выбранным базисным условиям:

$$x_* = x_{*(\text{НОМ})} \cdot x_{\text{НОМ}} / x_{\bar{6}} = x_{*(\text{НОМ})} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{I_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}} = x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_{\bar{6}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}} \cdot U_{\bar{6}}^2}. \quad (1.4.9)$$

Вернемся к трансформатору ТДН-25000/110 (Т1 на рис. 1.3.1). Мы знаем его сопротивление $x = 55,545 \text{ Ом}$, приведённое к стороне высшего напряжения, а также его относительное номинальное сопротивление $x_{*(\text{НОМ})} = 0,105$. Сначала рассчитаем его сопротивление в относительных единицах при базисных условиях $S_{\bar{6}} = 100 \text{ МВА}$ и $U_{\bar{6}} = 115 \text{ кВ}$ по выражению (1.4.8):

$$x_* = x \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} = 55,545 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,42.$$

Повторим расчет по формуле (1.4.9), которая при равенстве $U_{\text{НОМ}} = U_{\bar{6}}$ приобретает вид:

$$x_* = x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}; \quad (1.4.10)$$

$$x_* = 0,105 \cdot \frac{100}{25} = 0,42.$$

Выражение (1.4.10) обычно используется для определения сопротивлений двухобмоточных трансформаторов в схеме замещения при расчете тока КЗ в системе относительных базисных единиц.

Выражения для приведения параметров других элементов электрической системы к базисным условиям рассмотрены в п. 1.5.

При использовании системы относительных величин имеет место численное равенство относительных значений междуфазного (линейного) и фазного напряжений (или ЭДС):

$$U_{* \text{ лин}} = \frac{U_{\text{лин}}}{U_{\text{б.лин}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{\sqrt{3}U_{\text{б.ф}}} = \frac{U_{\phi}}{U_{\text{б.ф}}} = U_{* \phi} \quad (1.4.11)$$

Для удобства расчета величину базисной мощности $S_{\text{б}}$ принимают равной 100 или 1000 МВ·А, или мощности одного из элементов, а базисное напряжение обычно принимают равным среднему номинальному напряжению ступени, на которой расположена точка короткого замыкания, то есть $U_{\text{б}} = U_{\text{ср.осн}}$.

Заметим, что индекс «*», как и многие другие, можно опускать, если это не вызывает разночтения.

1.5. Выражения для определения ЭДС и сопротивлений элементов расчетной схемы и приведения их к базисным условиям

Для курсового проектирования приведение параметров элементов расчетной схемы производится приближенно, в относительных единицах по средним коэффициентам трансформации. Основные соотношения для такого приведения представлены в **Приложении 4**. Ниже рассмотрены расчетные формулы из работ [1, 3, 5], на основе которых составлены выражения Приложения 4, а также даны некоторые пояснения к ним.

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ синхронные и асинхронные машины в схему замещения должны быть введены сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Последние, как известно, в момент КЗ сохраняют свои значения, имевшие место в предшествующем режиме.

ЭДС генераторов и двигателей

Для синхронных генераторов и электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, начальное фазное значение сверхпереходной ЭДС следует определять с учетом предшествующего режима по формуле

$$E''_{\phi} \approx E''_0 = \sqrt{(U_{\phi 0} + I_0 x''_d \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_0)^2}, \quad (1.5.1)$$

где $U_{\phi 0}$ – фазное напряжение на выводах машины в момент, предшествующий КЗ, кВ; I_0 – ток статора в момент, предшествующий КЗ, кА; x''_d – сверхпереходное индуктивное сопротивление синхронной машины по продольной оси, Ом; φ_0 – угол сдвига фаз напряжения и тока в момент, предшествующий КЗ, град. эл.

Для синхронных генераторов и электродвигателей, работавших до КЗ с недовозбуждением, сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле

$$E''_{\Phi} = \sqrt{(U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x''_d \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_0)^2}. \quad (1.5.2)$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с перевозбуждением:

$$E''_{\Phi} = U_{\Phi 0} + I_0 \cdot x''_d, \quad (1.5.3)$$

а для работавших с недовозбуждением:

$$E''_{\Phi} = U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x''_d. \quad (1.5.4)$$

Для эквивалентного источника (системы) ЭДС принимается неизменной и равной среднему номинальному напряжению сети:

$$E_{C.\Phi} = U_{cp.\Phi}. \quad (1.5.5)$$

Тогда при $U_6 = U_{cp}$ (или $U_{6.\Phi} = U_{cp.\Phi}$, что то же самое с учётом формулы (1.4.11)) в относительных базисных единицах имеем

$$E_{*C} = 1. \quad (1.5.6)$$

Если параметры предшествующего режима не заданы, то принимают, что до КЗ электрические машины работали в номинальном режиме. Поэтому в системе относительных единиц справедливы соотношения:

$$U_{*0} = 1; I_{*0} = 1. \quad (1.5.7)$$

Тогда формула (1.5.1) для синхронных генераторов и двигателей примет вид:

$$E''_{*} = E''_{*(ном)} = \sqrt{\left(1 + x''_{*d(ном)} \cdot \sin \varphi_{ном}\right)^2 + \left(x''_{*d(ном)} \cdot \cos \varphi_{ном}\right)^2}, \quad (1.5.8)$$

где $x''_{*d(ном)}$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси генератора в относительных номинальных единицах.

При отсутствии значений $x''_{*d(ном)}$ можно пользоваться таблицей 1.5.1 [2].

Таблица 1.5.1

**Средние значения сверхпереходных величин
в относительных единицах при номинальных условиях**

Наименование элемента	$x''_{*(ном)}$	$E''_{*(ном)}$
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
То же мощностью 100 – 500 МВт	0,20	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,20	1,13
Гидрогенератор без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронный двигатель	0,20	1,10
Синхронный компенсатор	0,20	1,20
Асинхронный двигатель	0,20	0,90
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Ниже приводятся формулы для определения сопротивлений отдельных элементов в относительных базисных единицах, приведенные к основной ступени напряжения – $U_{\text{осн}} = U_{\text{б}}$.

Сопротивление синхронной машины

Сопротивление генератора в схеме замещения в относительных базисных единицах при базисной мощности $S_{\text{б}}$ равно:

$$x_{*}'' = x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_{\text{б}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}}, \quad (1.5.9)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ и $P_{\text{НОМ}}$ – соответственно, полная (МВ·А) и активная (МВт) номинальная мощность генератора; $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности.

Сопротивления трансформаторов

Индуктивное сопротивление **двухобмоточного** трансформатора и автотрансформатора без обмотки низшего определяем по формуле (1.4.10).

Если возникнет необходимость рассчитать активное сопротивление трансформатора, его определяют по выражению:

$$r_{*} = \frac{\Delta p_{\text{К}} \cdot S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3}, \quad (1.5.10)$$

где $\Delta p_{\text{К}}$ – потери короткого замыкания трансформатора, кВт; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Для **трехобмоточного** трансформатора и **трехфазного автотрансформатора** с обмоткой низшего напряжения индуктивные сопротивления ветвей трехлучевой схемы замещения определяем по формулам:

$$\begin{aligned} x_{* \text{ВН}} &= \frac{0,5(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}; \\ x_{* \text{СН}} &= \frac{0,5(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}; \\ x_{* \text{НН}} &= \frac{0,5(u_{\text{КВ-Н}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-С}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}; \end{aligned} \quad (1.5.11)$$

где $u_{\text{КВ-С}}$, $u_{\text{КВ-Н}}$ и $u_{\text{КС-Н}}$ – напряжения короткого замыкания между выводами соответствующих обмоток, %.

Для однофазных автотрансформаторов также используются формулы (1.4.10) или (1.5.11), только $S_{\text{НОМ}} = 3 \cdot S_{\text{НОМ.одн}}$ (здесь $S_{\text{НОМ.одн}}$ – номинальная мощность однофазного трансформатора).

Сопротивления реактора

В каталогах приводятся индуктивные сопротивления реакторов $x_{\text{р}}$ в именованных единицах при номинальных условиях. Используя его, можно определить индуктивное сопротивление в относительных базисных единицах:

$$x_* = x_p \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2} \quad (1.5.12)$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее номинальное напряжение в месте установки реактора, кВ. Если известно относительное номинальное сопротивление реактора в процентах $x_{\text{р, \%}}$, то применяют выражение

$$x_* = \frac{x_{\text{р, \%}}}{100} \cdot \frac{I_{\text{б}} \cdot U_{\text{б}}}{I_{\text{НОМ}} \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (1.5.13)$$

где $I_{\text{б}}$ и $U_{\text{б}}$ – базисные значения тока (кА) и напряжения (кВ); $I_{\text{НОМ}}$ и $U_{\text{НОМ}}$ – номинальные значения тока (кА) и напряжения (кВ) реактора.

Сопротивление линии электропередачи

В каталогах приводятся погонные (удельные) сопротивления ЛЭП на единицу длины (активные $r_{\text{ног}}$ и индуктивные $x_{\text{ног}}$). Зная их, можно определить индуктивное и активное сопротивления ЛЭП длиной l в относительных единицах:

$$x_* = x_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2 \cdot n} \quad (1.5.14)$$

$$r_* = r_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2 \cdot n} \quad (1.5.15)$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее номинальное напряжение ЛЭП, кВ; n – количество параллельных цепей в линии.

При отсутствии данных по сечению и типу проводов для курсового проектирования допустимо принимать $x_{\text{пог}} = 0,4$ Ом/км у воздушных линий напряжением 35 – 220 кВ.

Сопротивление электрической системы

Когда в расчетной схеме задействована небольшая часть мощной системы, то остальную её часть можно представить в виде эквивалентного источника (системы). Реактивное сопротивление эквивалентной системы определяется через мощность короткого замыкания $S_{\text{к}}$ в точке подключения системы:

$$x_{\text{с}}_* = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{к}}}, \quad (1.5.16)$$

где $S_{\text{к}} = \sqrt{3}U_{\text{ср}}I_{\text{к}}$, МВ·А; $I_{\text{к}}$ – ток КЗ на шинах эквивалентной системы, найденный без учета выделенного (расчетного) участка электрической системы, кА; $U_{\text{ср}}$ – среднее номинальное напряжение на шинах эквивалентной системы, кВ.

Если заданы сопротивление системы в относительных единицах $x_{\text{с(НОМ)}}_*$ и её номинальная мощность $S_{\text{сНОМ}}$, то приведенное сопротивление системы в относительных базисных единицах будет равно:

$$x_{*C} = x_{*C(\text{НОМ})} \frac{S_{\delta}}{S_{C\text{НОМ}}} \quad (1.5.17)$$

Расчетные выражения для определения сопротивлений и ЭДС асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки рассмотрены в п. 1.13.

1.6. Расчетная схема и параметры её элементов

Перед началом расчета необходимо записать исходные данные к курсовой работе и проанализировать расчётную схему электрической системы.

В **Приложении 8** приведены задание и варианты на курсовую работу. В соответствии с заданным вариантом выбирается определённая расчетной схема, для которой по соответствующей таблице находятся названия и типы элементов. В варианте задания также указаны номера точек, в которых требуется расчёт токов КЗ.

По заданным типам элементов необходимо определить вид представленные на расчётной схеме трансформаторов: двухобмоточные, трёхобмоточные или с расщеплённой обмоткой низшего напряжения. Также по расчётной схеме следует выяснить номинальное напряжение и количество цепей для каждой ЛЭП.

Заметим, что при расчете однофазного и двухфазного на землю токов КЗ необходимо учитывать наличие грозозащитных тросов на линиях электропередач, а также схемы соединения обмоток и рабочий режим нейтрали у трансформаторов.

Допустим, что задана схема, изображенная на рис. 1.6.1. При этом необходимо рассчитать токи короткого замыкания в точках К4 и К8.

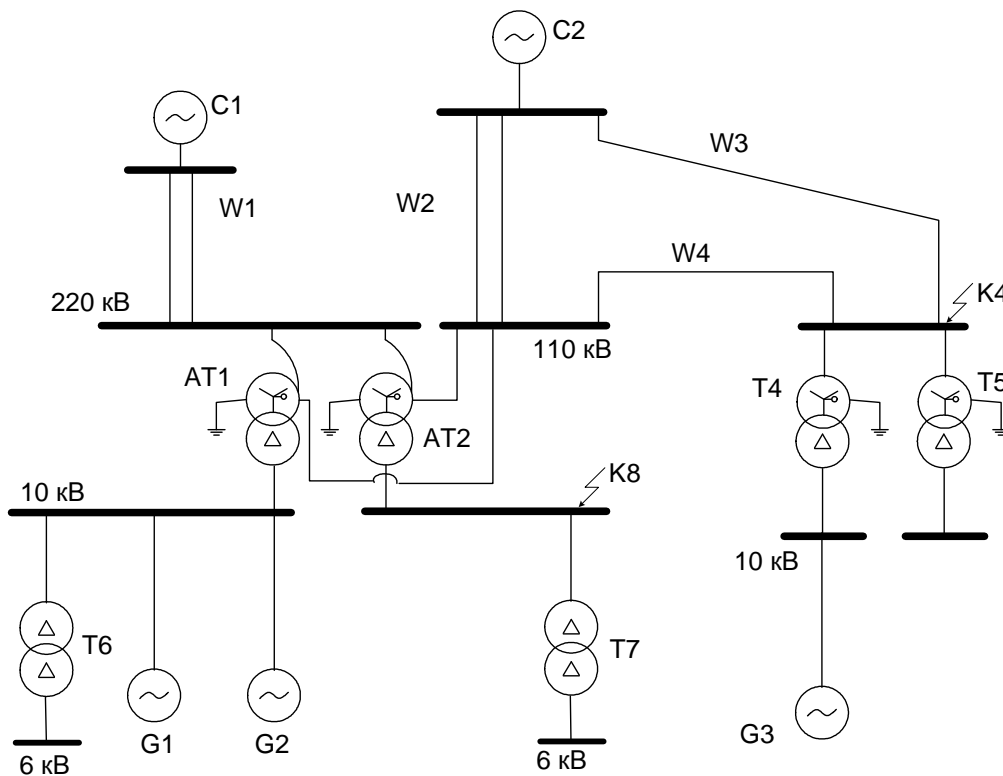


Рис. 1.6.1. Расчётная схема электрической системы

Анализ схемы показывает, что на токи трехфазного КЗ в точках К4 и К8 при принятых нами допущениях не оказывают существенного влияния трансформаторы Т6, Т7 и Т5. Эти элементы схемы на данном этапе можно исключить из расчетной схемы (в дальнейшем мы увидим, что трансформатор Т5 необходимо учитывать при расчете однофазного КЗ в точке К4).

Типы элементов и их параметры представлены в таблице 1.6.1. При её заполнении используются данные из источников [8, 12] или иных каталогов и справочников. Можно использовать данные из **Приложения 1**.

Таблица 1.6.1

Элементы расчётной схемы и их параметры

Элемент	Тип (марка)	Параметры
Генераторы G1, G2, G3	ТВФ-100-2	$P_{\text{НОМ}} = 100 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}; x_d'' = 0,192$
Автотрансформаторы АТ-1, АТ-2	АТДЦТН-125000/220	$S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 11 \text{ кВ};$ $u_{\text{КВ-С}} = 11\%; u_{\text{КВ-Н}} = 45\%$ $u_{\text{КС-Н}} = 28\%$
Трансформатор Т4	ТДЦ-80000/110	$S_{\text{НОМ}} = 80 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 10,5 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 11\%$
Трансформатор Т5	ТДН-25000/110	$S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 11 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%$
Трансформаторы Т6, Т7	ТМ-4000/10	$S_{\text{НОМ}} = 4 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 10 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,3 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 7,5\%$
Линия W1	Двухцепная	$l = 100 \text{ км}; x_{\text{ПОГ}} = 0,4 \text{ Ом/км}$
Линия W2	Двухцепная	$l = 200 \text{ км}; x_{\text{ПОГ}} = 0,4 \text{ Ом/км}$
Линия W3	Одноцепная	$l = 40 \text{ км}; x_{\text{ПОГ}} = 0,4 \text{ Ом/км}$
Линия W4	Одноцепная	$l = 40 \text{ км}; x_{\text{ПОГ}} = 0,4 \text{ Ом/км}$
Система С1	Эквивалентная система	Мощность короткого замыкания $S_{\text{КС1}} = 5000 \text{ МВА}$ Среднее номинальное напряжение на шинах системы $U_{\text{ср.С1}} = 230 \text{ кВ}$
Система С2	Эквивалентная система	Мощность короткого замыкания $S_{\text{КС1}} = 4500 \text{ МВА};$ Среднее номинальное напряжение на шинах системы $U_{\text{ср.С2}} = 115 \text{ кВ}$

1.7. Расчет параметров схемы замещения

Исходная схема замещения, составленная на основе расчётной схемы (см. рис. 1.6.1), представлена на рис. 1.7.1.

Найдём параметры схемы замещения при $S_0 = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, применив расчетные выражения для определения приведенных значений сопротивлений элементов системы, рассмотренные в п. 1.5 и представленные в **Приложении 4**.

Используя заданные значения мощностей короткого замыкания на шинах эквивалентных систем $S_{кC1} = 5000 \text{ МВА}$ и $S_{кC2} = 4500 \text{ МВА}$, найдём по формуле (1.5.16) сопротивления этих систем:

$$x_1 = x_{C1} = \frac{1000}{5000} = 0,2;$$

$$x_2 = x_{C2} = \frac{1000}{4500} = 0,222.$$

Согласно соотношению (1.5.6) ЭДС систем C1 и C2

$$E_{C1} = E_{C2} = 1.$$

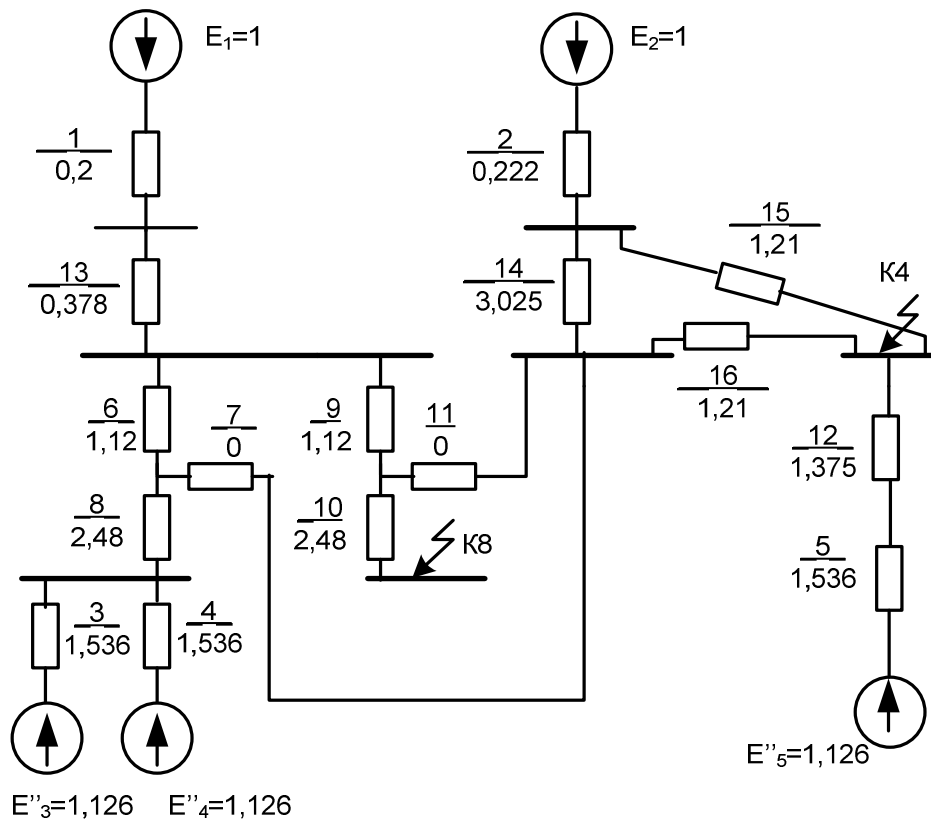


Рис. 1.7.1. Исходная схема замещения

Рассмотрим генераторы G1, G2 и G3, у которых $x_d'' = 0,192$, $P_{\text{НОМ}} = 100 \text{ МВт}$, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ (см. табл. 1.6.1). Сверхпереходную ЭДС E_G'' для каждого генератора определим по формуле (1.5.8). Примем, что предшествующим перед коротким замыканием был номинальный режим работы генераторов, т.е. $U_* = 1$ и $I_* = 1$. При этом $\cos \varphi_0 = \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$, откуда находим $\varphi_0 = 36,87^\circ$ и $\sin \varphi_0 = 0,6$. Подставляя эти значения в (1.5.8), получим:

$$E_G'' = \sqrt{(1 \cdot 0,192 \cdot 0,8)^2 + (1 + 1 \cdot 0,192 \cdot 0,6)^2} = 1,126.$$

Так как все три генератора одинаковые, то

$$E_3'' = E_4'' = E_5'' = E_G'' = 1,126.$$

Сопротивление генератора в схеме замещения определяется по формуле (1.5.9):

$$x_G = x_{d(\text{НОМ})}'' \frac{S_\delta \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} = 0,192 \frac{1000 \cdot 0,8}{100} = 1,536.$$

Поскольку все генераторы одинаковые, то

$$x_3 = x_4 = x_5 = x_G = 1,536.$$

Рассчитаем сопротивления лучей схемы замещения автотрансформаторов АТ1 и АТ2 (тип АТДЦТН 125000/220/110, параметры представлены в табл. 1.6.1) по выражениям (1.5.11):

$$x_6 = x_9 = x_{\text{ВН}} = \frac{0,5(11 + 45 - 28)}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 1,12;$$

$$x_7 = x_{11} = x_{\text{СН}} = \frac{0,5(11 + 28 - 45)}{100} \cdot \frac{1000}{125} \approx 0;$$

$$x_8 = x_{10} = x_{\text{НН}} = \frac{0,5(28 + 45 - 11)}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 2,48.$$

Перейдём к трансформатору Т4 (ТДЦ 80000/110). Согласно заданному типу он двухобмоточный, поэтому его сопротивление определим по формуле (1.4.10), подставляя параметры из таблицы 1.6.1:

$$x_{12} = x_T = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,375.$$

Рассмотрим линии электропередачи W1, W2, W3 и W4. Они имеют длины, соответственно, 100, 200, 40 и 40 км, а их погонные индуктивные сопротивления одинаковы и равны $x_{\text{пог}} = 0,4 \text{ Ом/км}$. Согласно расчётной схеме линии W1 и W2 являются двухцепными, а линии W3 и W4 – одноцепными.

Сопротивление каждой линии определяется по формуле (1.5.14). При этом учитываем, что средними номинальными напряжениями являются:

– для линии W1 – $U_{\text{ср}} = 230 \text{ кВ}$;

– для линий W2, W3 и W4 – $U_{\text{ср}} = 115 \text{ кВ}$.

Подставляя значения в (1.5.14), получим:

– сопротивление линии W1

$$x_{13} = x_{W1} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{230^2 \cdot 2} = 0,378;$$

– сопротивление линии W2

$$x_{14} = x_{W2} = 0,4 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{115^2 \cdot 2} = 3,025;$$

– сопротивление линии W3

$$x_{15} = x_{W3} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,21;$$

– сопротивление линии W4:

$$x_{16} = x_{W4} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,21.$$

На этом расчет параметров схемы замещения закончен, поскольку, как было отмечено ранее, при трёхфазных коротких замыканиях в точках К4 и К8 через трансформаторы Т5, Т6 и Т7 токи КЗ не проходят.

1.8. Преобразование схемы замещения

Целью преобразования схемы замещения является **приведение её к радиальному виду**, когда схема состоит из одной или нескольких ветвей, сходящихся в точке короткого замыкания. Такой вид наиболее удобен для расчета токов КЗ.

С помощью известных из курса ТОЭ эквивалентных преобразований (а именно: замены группы, состоящей из последовательно или параллельно соединённых сопротивлений, одним сопротивлением; замены нескольких источников питания, подсоединённых к общей точке, одним источником; преобразования треугольника в эквивалентную звезду и наоборот) схема замещения в общем случае приводится к схеме многолучевой звезды, в центре которой располагается точка короткого замыкания, а по концам лучей – источники питания.

Основные формулы для эквивалентных преобразований схем замещения представлены в **Приложении 5**.

В нашем случае необходимо произвести преобразование таким образом, чтобы в центре схемы в одном случае была бы точка К4, а в другом – точка К8. Первый этап преобразования можно сделать общим для обеих точек. В дальнейшем придется делать отдельные схемы.

Схема замещения электрической сети после первого этапа преобразования представлена на рис. 1.8.1. Определим параметры этой схемы.

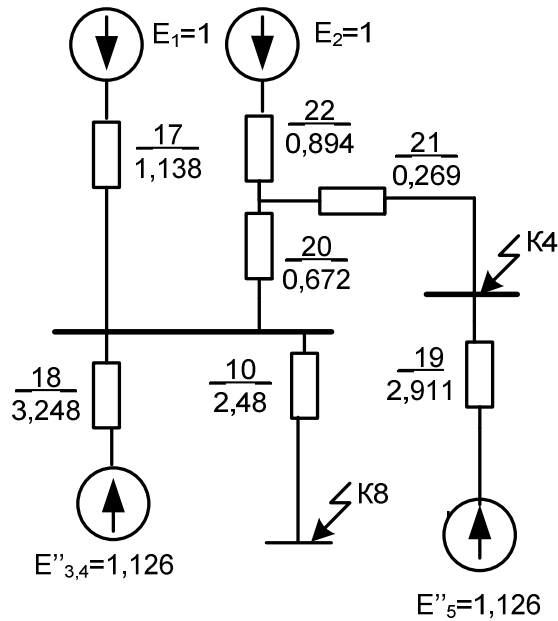


Рис. 1.8.1. Схема замещения после первого этапа преобразования

Поскольку сопротивления x_7 и x_{11} по величине близки к нулю, то считаем, что сопротивления x_6 и x_9 соединены параллельно (см. рис. 1.7.1), следовательно:

$$x_{17} = x_1 + x_{13} + \frac{x_6 \cdot x_9}{x_6 + x_9} = 0,2 + 0,378 + \frac{1,12}{2} = 1,138.$$

Генераторы G3 и G4 одинаковы, что позволяет их представить одним эквивалентным с ЭДС $E''_{3,4} = E''_3 = E''_4 = 1,126$ и сопротивлением $x_3/2$, тогда

$$x_{18} = x_8 + \frac{x_3}{2} = 2,48 + \frac{1,536}{2} = 3,248.$$

Последовательно включенные сопротивления x_{12} и x_5 заменяем одним сопротивлением

$$x_{19} = x_{12} + x_5 = 1,375 + 1,536 = 2,911.$$

По формулам из **Приложения 5** треугольник, образованный сопротивлениями x_{14} , x_{15} , x_{16} , преобразуем в звезду с сопротивлениями лучей:

$$x_{20} = x_{14,16} = \frac{x_{14} \cdot x_{16}}{x_{14} + x_{15} + x_{16}} = \frac{3,025 \cdot 1,21}{3,025 + 1,21 + 1,21} = 0,672 ;$$

$$x_{21} = x_{15,16} = \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{14} + x_{15} + x_{16}} = \frac{1,21 \cdot 1,21}{3,025 + 1,21 + 1,21} = 0,269 ;$$

$$x_{22} = x_{14,15} + x_2 = \frac{x_{14} \cdot x_{15}}{x_{14} + x_{15} + x_{16}} + x_2 = \frac{3,025 \cdot 1,21}{3,025 + 1,21 + 1,21} + 0,222 = 0,894.$$

На этом первый этап преобразований схемы замещения завершён.

1.9. Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К4

После первого этапа преобразования дальнейший расчет токов КЗ в точках К4 и К8 выполняется независимо. Начнем с точки К4.

Преобразование схемы замещения относительно точки К4

Для дальнейшего преобразования схемы замещения относительно точки К4 за основу принимаем схему на рис. 1.8.1, но учитываем, что в данном случае ток короткого замыкания через сопротивление x_{10} не протекает. Поэтому сопротивление x_{10} из схемы исключается (рис. 1.9.1).

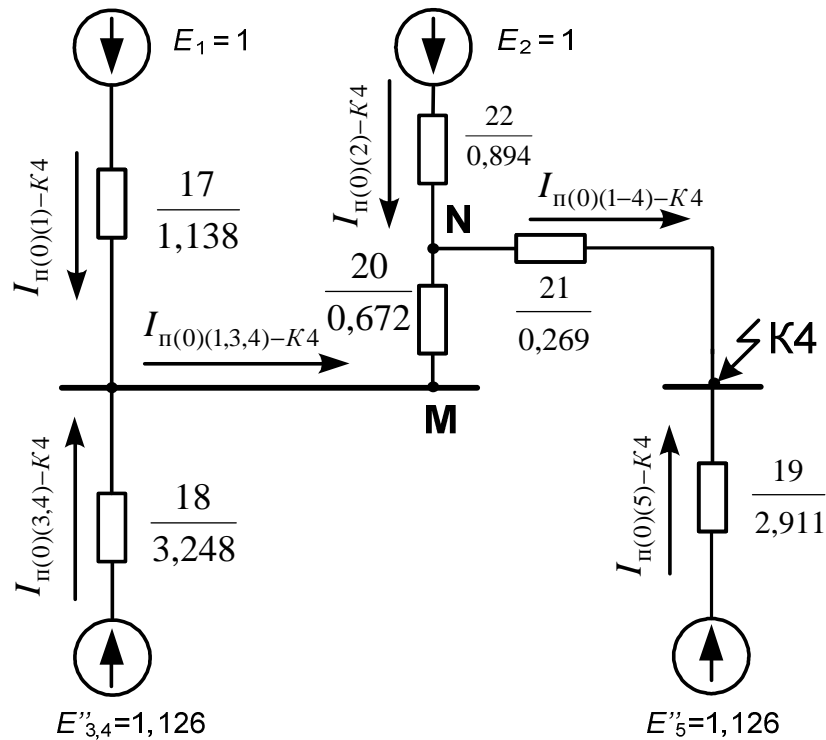


Рис. 1.9.1. Схема замещения при КЗ в точке К4 после первого этапа преобразований

Ветви с ЭДС E_1 и ЭДС $E''_{3,4}$ являются параллельными. Поэтому по выражениям из **Приложения 5** находим для них эквивалентные ЭДС и сопротивление:

$$E_{1,3,4} = \frac{\frac{E_1}{x_{17}} + \frac{E''_{3,4}}{x_{18}}}{\frac{1}{x_{17}} + \frac{1}{x_{18}}} = \frac{\frac{1}{1,138} + \frac{1,126}{3,248}}{\frac{1}{1,138} + \frac{1}{3,248}} = 1,032;$$

$$x_{23} = x_{20} + \frac{x_{17} \cdot x_{18}}{x_{17} + x_{18}} = 0,672 + \frac{1,138 \cdot 3,248}{1,138 + 3,248} = 1,515.$$

Полученные значения покажем на схеме, представленной на рис. 1.9.2.

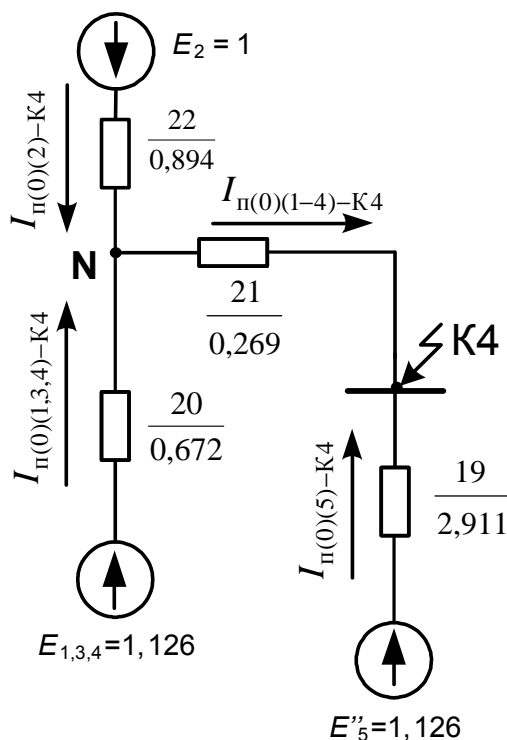


Рис. 1.9.2. Схема замещения при КЗ в точке К4 после второго этапа преобразований

Теперь уже ветви с ЭДС E_2 и $E_{1,3,4}$ оказываются параллельными, что позволяет заменить их одной эквивалентной с ЭДС и сопротивлением:

$$E''_{1-4} = \frac{\frac{E_2}{x_{22}} + \frac{E_{1,3,4}}{x_{23}}}{\frac{1}{x_{22}} + \frac{1}{x_{23}}} = \frac{\frac{1}{0,894} + \frac{1,032}{1,515}}{\frac{1}{0,894} + \frac{1}{1,515}} = 1,012;$$

$$x_{24} = x_{21} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{22} + x_{23}} = 0,269 + \frac{0,894 \cdot 1,515}{0,894 + 1,515} = 0,831.$$

Полученные значения указываем в схеме на рис. 1.9.3.

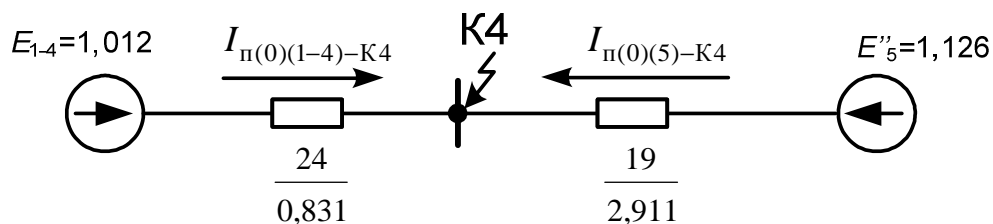


Рис.1.9.3. Схема замещения относительно точки К4 после третьего этапа преобразований

Рассчитаем эквивалентные результирующие ЭДС и сопротивление:

$$E_{\Sigma} = \frac{\frac{E_{1-4}}{x_{24}} + \frac{E_5''}{x_{19}}}{\frac{1}{x_{24}} + \frac{1}{x_{19}}} = \frac{\frac{1,012}{0,831} + \frac{1,125}{2,911}}{\frac{1}{0,831} + \frac{1}{2,911}} = 1,037;$$

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{24} \cdot x_{19}}{x_{24} + x_{19}} = \frac{0,831 \cdot 2,911}{0,831 + 2,911} = 0,646.$$

Итоговая схема замещения приведена на рис. 1.9.4.

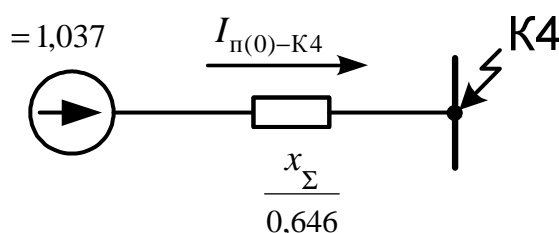


Рис. 1.9.4. Итоговая схема замещения при КЗ в точке К4

Расчет начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К4 и распределение тока по ветвям схемы

Определим токи в ветвях схемы замещения, представленной на рис. 1.9.3:

$$I_{п(0)(1-4)-К4} = \frac{E_{1-4}}{x_{24}} = \frac{1,012}{0,831} = 1,218;$$

$$I_{п(0)(5)-К4} = \frac{E_5''}{x_{19}} = \frac{1,126}{2,911} = 0,387,$$

где $I_{п(0)(1-4)-К4}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке К4 от источника ЭДС E_{1-4} (системы С1 и С2, генераторы G1 и G2), $I_{п(0)(5)-К4}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке К4 от источника ЭДС E_5'' (от генератора G3).

Сумма токов $I_{п(0)(1-4)-К4}$ и $I_{п(0)(5)-К4}$ составит начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке К4, выраженное в относительных единицах при базисных условиях:

$$I_{*п(0)-К4} = I_{п(0)(1-4)-К4} + I_{п(0)(5)-К4} = 1,218 + 0,387 = 1,605.$$

Очевидно, что эту величину тока можно найти, выполнив расчет итоговой схемы замещения (см. рис. 1.9.4):

$$I_{*п(0)-К4} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}} = \frac{1,037}{0,646} = 1,605.$$

Определим долю участия каждого источника в формировании тока короткого замыкания в точке К4. Для этого необходимо вернуться к схеме на рис. 1.9.2 и найти потенциал Φ_N в точке N:

$$\Phi_N = I_{п(0)(1-4)-К4} \cdot x_{21} = 1,218 \cdot 0,269 = 0,327.$$

Тогда ток от источника E_2'' (система С2)

$$I_{п(0)(2)-К4} = \frac{E_2'' - \Phi_N}{x_{22}} = \frac{1 - 0,327}{0,894} = 0,753,$$

а ток от источников с ЭДС $E_{1,3,4}$ (система С1 и генераторы G1 и G2)

$$I_{п(0)(1,3,4)-К4} = \frac{E_{1,3,4}'' - \Phi_N}{x_{23}} = \frac{1,032 - 0,327}{1,515} = 0,465.$$

Для проверки, сложив токи $I_{п(0)(2)-К4}$ и $I_{п(0)(1,3,4)-К4}$, получим $I_{п(0)(1-4)-К4} = 0,753 + 0,465 = 1,218$, что подтверждает правильность расчетов.

Для определения токов от остальных источников обратимся к схеме на рис. 1.9.1 и найдем потенциал Φ_M в точке M:

$$\Phi_M = \Phi_N + I_{п(0)(1,3,4)-К4} \cdot x_{20} = 0,327 + 0,465 \cdot 0,672 = 0,639.$$

Тогда ток от источника с ЭДС E_1 (система С1)

$$I_{п(0)(1)-К4} = \frac{E_1 - \Phi_M}{x_{17}} = \frac{1 - 0,639}{1,138} = 0,316,$$

а ток от источников с ЭДС $E_{3,4}''$ (генераторы G1 и G2)

$$I_{п(0)(3,4)-К4} = \frac{E_{3,4}'' - \Phi_M}{x_{18}} = \frac{1,125 - 0,639}{3,248} = 0,149.$$

Последний включает токи двух одинаковых генераторов G1 и G2, следовательно, ток от каждого из них составит:

$$I_{п(0)(3)-К4} = I_{п(0)(4)-К4} = \frac{I_{п(0)(3,4)-К4}}{2} = \frac{0,149}{2} = 0,0745.$$

Сложив токи от каждого источника, найдем ток КЗ:

$$\begin{aligned} I_{*п(0)-К4} &= I_{п(0)(1)-К4} + I_{п(0)(2)-К4} + I_{п(0)(3)-К4} + I_{п(0)(4)-К4} + I_{п(0)(5)-К4} = \\ &= 0,316 + 0,753 + 0,0745 + 0,0745 + 0,387 = 1,605. \end{aligned}$$

Полученная таким образом величина совпадает с ранее найденным значением, что подтверждает правильность выполненного распределения тока по ветвям схемы замещения, представленной на рис 1.9.1.

Рассчитаем базисный ток в точке К4 по выражению (1.4.5), приняв за базисное напряжение среднее номинальное напряжение в точке К3, то есть $U_6 = U_{\text{ср.К4}} = 115 \text{ кВ}$:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}$$

и определим начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К4 в именованных единицах:

$$I_{\text{п(0)-К4}} = I_{*\text{п(0)-К4}} \cdot I_6 = 1,605 \cdot 5,02 = 8,06 \text{ кА.}$$

Проверка правильности расчета при помощи программы «ENERGO»

Программа расчета токов короткого замыкания «**ENERGO**» разработана на кафедре «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского Государственного Университета [13]. Программа, прежде всего в учебных целях, обеспечивает расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в любой точке заданной схемы для простейших видов КЗ (трехфазного, двухфазного, однофазного и двухфазного на землю). Для этого необходимо из представленных в меню программы условных обозначений собрать на экране компьютера расчётную электрическую схему и задать каталожные параметры её элементов. Программа имеет встроенные **помощь** и наращиваемую **базу данных** по элементам электроэнергетической системы. Для установки программы «**ENERGO**» требуется лишь распаковать архив **APXenergo.exe** в выбранную папку.

После запуска исполняемого файла **Energo.exe** на экране появляется рабочее окно программы, в котором с помощью имеющегося набора элементов необходимо собрать расчётную схему сети. Для задания параметров следует привести указатель мыши на нужный элемент и щёлкнуть правой кнопкой. В отрывшемся окне «**параметры...**» выполняется их ввод. Для этого советуем воспользоваться встроенной базой данных. При задании новых типов элементов они автоматически заносятся туда. Обращаем внимание, что у **двухцепных ЛЭП обязательно указывается на схеме каждая цепь и задаются параметры каждой цепи.**

Затем следует указать точку КЗ двойным щелчком левой кнопки мыши на нужном узле схемы. После задания вида КЗ программа выполнит расчёт.

После завершения расчёта программа позволяет проследить распределение найденного тока по элементам схемы. Для этого необходимо закрыть окно «**Результат расчёта**» и привести указатель мыши на интересующий элемент. При этом в окне «**просмотр элементов**» появится ток выбранного элемента.

Хотя программа имеет дружелюбный, интуитивно понятный интерфейс, при затруднениях можно воспользоваться кнопкой «**Помощь**». В программе также предусмотрена возможность сохранения набранной схемы для последующих расчётов.

Нам необходимо проверить правильность расчета начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К4. Собранный схема и результат расчёта представлены на рис. 1.9.5.

В рассматриваемой схеме при расчёте трёхфазного КЗ программа выдала результат: $I_{п(0)енерго-К4} = 8,055 \text{ кА}$. По нашим расчетам получилось $I_{п(0)-К4} = 8,05 \text{ кА}$. Оценим расхождение результатов:

$$\Delta = \frac{I_{п(0)-К4} - I_{п(0)енерго-К4}}{I_{п(0)-К4}} \cdot 100\% = \frac{8,05 - 8,055}{8,05} \cdot 100\% = -0,062\%$$

Различие не превышает 1%, следовательно, расчет произведен правильно.

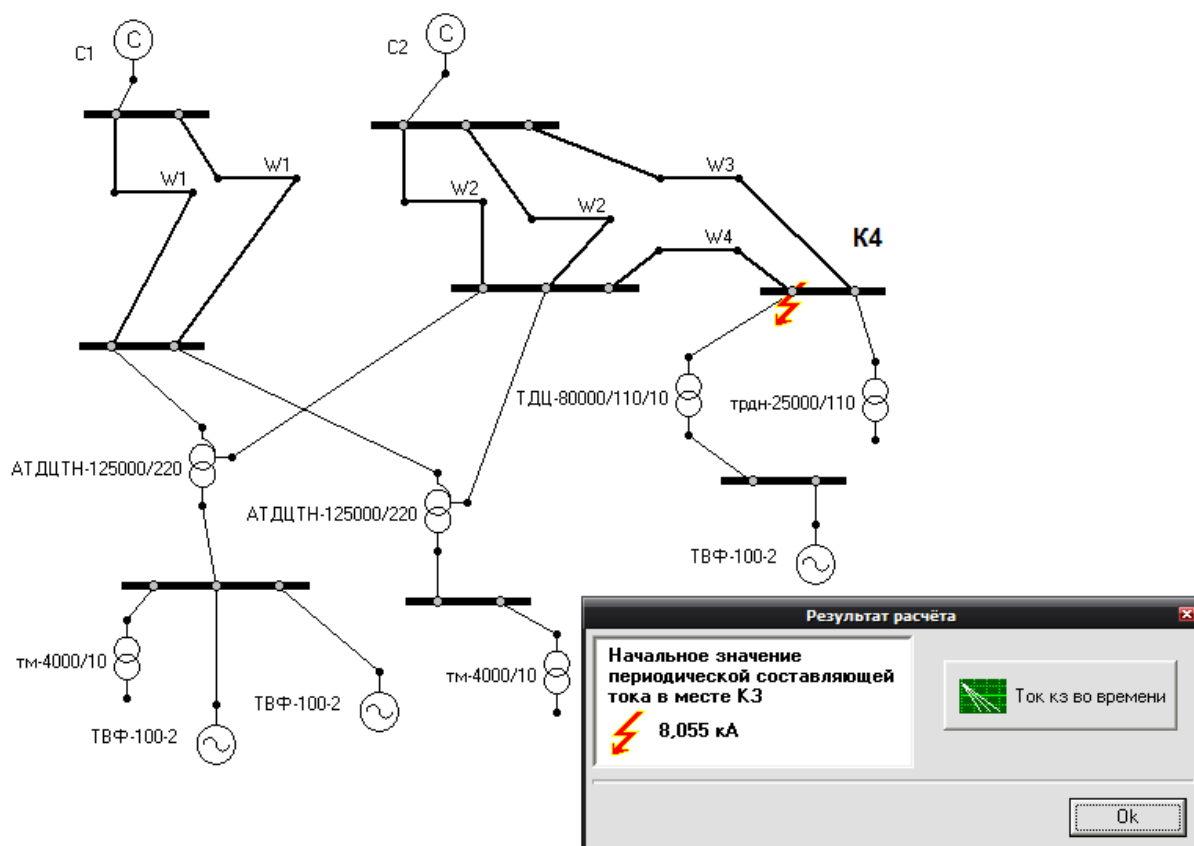


Рис.1.9.5. Введённая схема и результат расчета по программе «ENERGO»

1.10. Расчёт аperiodической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени и ударного тока

Общее представление об аperiodической составляющей тока короткого замыкания и ударном токе было дано в п. 1.1.

В самом простейшем случае, когда расчётная схема имеет **только одну ветвь с последовательно включенными элементами**, аperiodическая составляющая тока КЗ $i_{a(t)}$ (или $i_a(t)$) может быть найдена по формуле (1.1.9), а ударный ток i_y –

по формуле (1.1.10) с учётом (1.1.11) – (1.1.13). В этих формулах присутствует постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ (по другому – постоянная времени цепи)

$$T_a = \frac{x_\Sigma}{\omega \cdot r_\Sigma} = \frac{x_\Sigma}{2\pi f \cdot r_\Sigma}, \quad (1.10.1)$$

где x_Σ и r_Σ – результирующие эквивалентные индуктивное и активное сопротивления в цепи схемы замещения; ω – угловая промышленная частота; $f = 50$ Гц.

Если исходная или преобразованная схема замещения относительно точки КЗ **содержит только независимые ветви (контура), т. е. имеет радиальный вид**, то при приближённых расчётах апериодическая составляющая тока КЗ может быть найдена как сумма апериодических составляющих токов отдельных её ветвей [1, 5]:

$$i_{a(t)} = \sum_{i=1}^m (\sqrt{2} I_{п(0)i} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ai}}}), \quad (1.10.2)$$

где m – число независимых ветвей в схеме замещения; $I_{п(0)i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви схемы замещения, примыкающей к точке КЗ; T_{ai} – эквивалентная постоянная времени i -й ветви схемы замещения;

а ударный ток определяется как

$$i_y = \sum_{i=1}^m (K_{yi} \cdot \sqrt{2} I_{п(0)i}), \quad (1.10.3)$$

где K_{yi} – ударный коэффициент i -й ветви схемы замещения.

Для определения постоянных времени независимых ветвей необходимо составить схему замещения, в которой все элементы исходной расчетной схемы учитывались бы как индуктивными, так и активными сопротивлениями. При этом синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности (для синхронных машин $x_2 \approx 1,22x_d''$ (или, менее точно, $x_2 \approx x_d''$), для асинхронных электродвигателей $x_2 \approx x''$) и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки [1].

Далее для каждой независимой ветви с номером $i = 1, \dots, m$ следует рассчитать постоянные времени T_{ai} по выражению (1.10.1) и ударные коэффициенты K_{yi} по одному из выражений: (1.1.11) (рекомендуется использовать при условии $x_\Sigma/r_\Sigma > 5$), (1.1.12) или (1.1.13).

Если исходная схема замещения **является многоконтурной, причём все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением**, то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока КЗ допускается считать, что эта составляющая затухает по экспоненциальному закону с некоторой эквивалентной постоянной времени $T_{a.эк}$. Для её нахождения

определяют индуктивную и активную составляющие комплексного результирующего эквивалентного сопротивления относительно расчетной точки КЗ, получая их, например, посредством поочередного исключения из схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений [1, 5]:

$$T_{a.эк} = \frac{x_{эк(r=0)}}{2\pi f \cdot r_{эк(x=0)}}, \quad (1.10.4)$$

где $x_{эк(r=0)}$ и $r_{эк(x=0)}$ – результирующие эквивалентные индуктивное и активное сопротивления относительно точки КЗ, определяемые из схем замещения, в которых все элементы учтены, соответственно, только индуктивными или только активными сопротивлениями.

Затем находят эквивалентный ударный ток по одному из выражений (1.1.11) – (1.1.13) с заменой T_a на $T_{a.эк}$. Следует отметить, что применение формулы (1.10.4) может приводить к завышению расчётного ударного тока на (20...30)% по сравнению с действительным [3].

В сетях напряжением выше 1000 В в большинстве случаев выполняется соотношение $r_{\Sigma}/x_{\Sigma} \leq 0,3$, что позволяет **рассчитывать ток КЗ без учёта активных сопротивлений** элементов электроэнергетических систем. Это, с одной стороны, существенно упрощает расчёт, а с другой стороны, предопределяет **использовать лишь приближённые или усреднённые значения T_a** .

Поскольку индуктивные сопротивления всех элементов нам известны, можно приближенно определить соответствующие им активные сопротивления, зная для каждого элемента схемы характерные соотношения между индуктивной и активной составляющей сопротивления (см. таблицу 1.10.1), как это предложено в работе [9].

Наконец, при отсутствии данных для определения активных сопротивлений элементов схемы, а также для упрощения расчетов, при учебном проектировании допускается использовать средние значения постоянной времени T_a и ударного коэффициента K_y , определяя их для характерных ветвей или места КЗ в электрической системе. Необходимая для этого информация приводится, например, в работах [1, 10-12] (см. **Приложение 7**, где представлены средние значения отношения x/r , постоянной времени T_a и ударного коэффициента K_y для характерных ветвей, примыкающих к точке КЗ).

При использовании данных из таблиц **Приложения 7** сначала определяют апериодические составляющие токов и ударные токи отдельно для каждой независимой ветви исходной или преобразованной схемы замещения, примыкающей к точке КЗ, а затем находят их суммы, согласно формулам (1.10.2) и (1.10.3). В случаях, если все источники отделены от точки КЗ общим сопротивлением, следует определять $i_{a(t)}$ и i_v как для одной ветви, исходя из характерного места расположения точки КЗ в расчётной схеме.

Характерные соотношения x/r для элементов электрической системы [7, 9]

№ п/п	Наименование элемента системы	Соотношение x/r
1	Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	15–85
2	Турбогенераторы мощностью до 100–500 МВт	100–140
3	Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40–60
4	Гидрогенераторы без демпферных обмоток	60–90
5	Трансформаторы мощностью 5 – 30 МВА	7–17
6	Трансформаторы мощностью 60 – 500 МВА	20–50
7	Реакторы 6–10 кВ с номинальным током до 1000 А	15–70
8	Реакторы 6–10 кВ с номинальным током до 1500 А и выше	40–80
9	Воздушные линии	2–8
10	Трёхжильные кабели 6–10 кВ с медными и алюминиевыми жилами сечением 3×95 – 3×185 мм ²	0,2–0,8

Расчет апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени и ударного тока в точке К4

Для расчёта воспользуемся схемой замещения на рис. 1.9.3, полученной из исходной (см. рис. 1.7.1) с помощью проведённых преобразований. В этой схеме имеется две независимые ветви, непосредственно примыкающие к расчётной точке короткого замыкания К4. Одна из ветвей (с ЭДС E_5 и сопротивлением x_{19}) включает только один источник – генератор G3. В другой ветви с эквивалентными ЭДС E_{1-4} и сопротивлением x_{24} объединены ветви с генераторами G1 и G2, а также системами C1 и C2, поскольку они все были ранее связаны с точкой К4 общим сопротивлением x_{21} (см рис. 1.9.1). Последнее обстоятельство при приближённых расчётах позволяет полагать, что апериодические составляющие токов от источников G1, G2, C1 и C2 затухают примерно с одинаковой постоянной времени T_a и имеют одинаковый ударный коэффициент K_y .

Для нахождения постоянных времени и ударных коэффициентов для каждой из ветвей схемы замещения (см. рис. 1.9.3) воспользуемся расчетной схемой электрической системы (см. рис. 1.5.1) и таблицей **П7.2 Приложения 7**:

– для эквивалентной ветви генераторов G1 и G2, а также систем C1 и C2, в расчётной схеме **связанных с точкой КЗ линиями 110 кВ**:

$$T_{a(1-4)} = 0,02 \text{ с} ; \quad K_{y(1-4)} = 1,61 ;$$

– для ветви генератора G3 (в расчётной схеме это **блок турбогенератор – повышающий трансформатор при мощности 100-200 МВА**):

$$T_{a(5)} = 0,26 \text{ с}; \quad K_{y(5)} = 1,935.$$

Рассчитаем ударный ток по формуле (1.10.3):

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_6 \cdot (K_{y(1-4)} I_{\Pi(0)(1-4)-K4} + K_{y(5)} I_{\Pi(0)(5)-K4}) = \sqrt{2} \cdot 5,02 \cdot (1,61 \cdot 1,218 + 1,935 \cdot 0,387) = 19,24 \text{ кА}.$$

Мгновенное значение апериодической составляющей тока короткого замыкания для произвольного момента времени по формуле (1.10.2) определяются как

$$i_{a(t)} = \sqrt{2} \cdot I_6 \cdot (I_{\Pi(0)(1-4)-K4} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a(1-4)}}} + I_{\Pi(0)(5)-K4} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a(5)}}}) = \\ = \sqrt{2} \cdot 5,02 \cdot (1,216 \cdot e^{-\frac{t}{0,02}} + 0,387 \cdot e^{-\frac{t}{0,26}}), \text{ кА}.$$

График зависимости апериодической составляющей тока КЗ от времени, построенный с использованием программы «Mathcad», представлен на рис. 1.10.1.

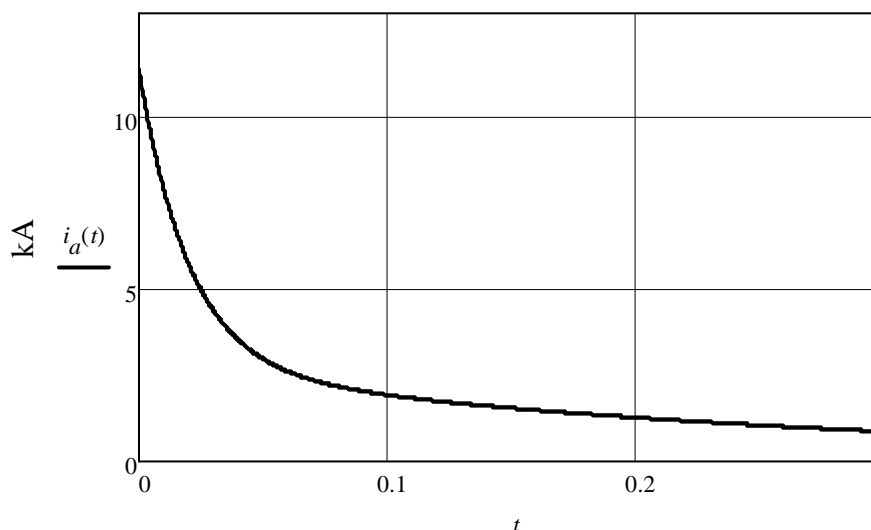


Рис. 1.10.1. Зависимость апериодической составляющей тока КЗ от времени

Попутно отметим, что значения $i_{a(t)}$ для моментов времени $t=0$ и $t=0,3$ с, соответственно, равны: $i_{a(0)} = 11,394$ кА, $i_{a(0,3)} = 0,867$ кА.

1.11. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени

Первоначально рассчитывается начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\Pi(0)}$ и находится распределение этого тока по ветвям исходной схемы замещения, прежде всего в ветвях с источниками энергии, т.е. определяются токи $I_{\Pi(0)i}$ (здесь i – номер ветви с источником, $i=1, \dots, n$). Используя эту информацию, далее можно определить действующее

значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени $I_{п(t)}$. Для этой цели в приближенных практических расчетах применяется метод **типовых кривых** [1, 5].

Метод основан на использовании **кривых изменения во времени отношения действующих значений периодической составляющей тока КЗ турбогенераторов (синхронных компенсаторов) в произвольный и начальный моменты времени**, то есть $\gamma(t) = I_{п(t)} / I_{п(0)}$, построенных для различной удаленности точки КЗ.

Электрическую удаленность точки КЗ от синхронной машины принято характеризовать коэффициентом удаленности:

$$\beta = I_{*п(0)(ном)} = \frac{I_{п(0)}}{I_{ном}} = I_{*п(0)} \frac{S_{\delta}}{S_{ном}},$$

где $I_{п(0)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины, приведённое к её номинальному напряжению, кА; $I_{ном}$ – номинальный ток синхронной машины, кА; $I_{*п(0)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в относительных базисных единицах; $S_{ном}$ – номинальная мощность синхронной машины, МВ·А; S_{δ} – базисная мощность, МВ·А.

В настоящее время принято [1], что если $\beta < 2$, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ от данного синхронного турбогенератора (компенсатора) не меняется во времени, т.е. $I_{п(t)} = I_{п(0)}$. Такое КЗ считается **удаленным** от этой синхронной машины.

Для эквивалентной системы действующее значение периодической составляющей тока КЗ не меняется во времени, т.е. $I_{п(t)C} = I_{п(0)C} = const$.

Для гидрогенераторов допустимо использовать типовые кривые только при небольшой удаленности, когда $\beta > 3$ [1]. В противном случае (при $\beta \leq 3$) $I_{п(t)} = I_{п(0)}$.

Типовые кривые, построенные для турбогенераторов различной мощности и с разными типами систем возбуждения, можно найти, например, в работах [1, 5], часть из которых представлены в **Приложении 6**.

Если в схеме замещения имеется n источников электрической энергии, то для каждого из них определяется коэффициент удаленности:

$$\beta_i = I_{*п(0)i} \frac{S_{\delta}}{S_{ном.i}}, \quad (1.11.1)$$

где i – номер (или условное обозначение) источника; $I_{*п(0)i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от i -го источника, выраженное в относительных базисных единицах; $S_{ном.i}$ – номинальная мощность источника с номером i , МВ·А; S_{δ} – базисная мощность, МВ·А.

По найденным значениям β_i с помощью типовых кривых (см., например, Приложение 6) для каждого источника в заданный момент времени t определяются коэффициенты $\gamma_{(t)i}$ ($i=1, \dots, n$).

Затем, на основании метода наложения, находят искомое действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени t :

$$I_{п(t)} = I_{\bar{6}} \cdot \sum_{i=1}^n (\gamma_{(t)i} \cdot I_{*п(0)i}), \quad (1.11.2)$$

где $I_{\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3}U_{\bar{6}}}$ – базисный ток, кА.

Для источников, у которых действующее значение периодической составляющей тока КЗ не меняется (т.е. $I_{п(t)i} = I_{п(0)i} = \text{const}$), следует принимать $\gamma_{(t)i} = 1$.

1.12. Расчет тока короткого замыкания в точке К8

Преобразование схемы замещения относительно точки К8

На основании расчетной схемы (см. рис. 1.6.1) ранее была составлена исходная схема замещения (см. рис. 1.7.1), определены её параметры и выполнен первый этап преобразований (см. пп. 1.7 – 1.8).

Для удобства дальнейшего изложения хода преобразований и расчета тока КЗ в точке К8 полученная в п. 1.8 схема замещения с указанной точкой короткого замыкания приведена на рис. 1.12.1. Проведём дальнейшее упрощение схемы.

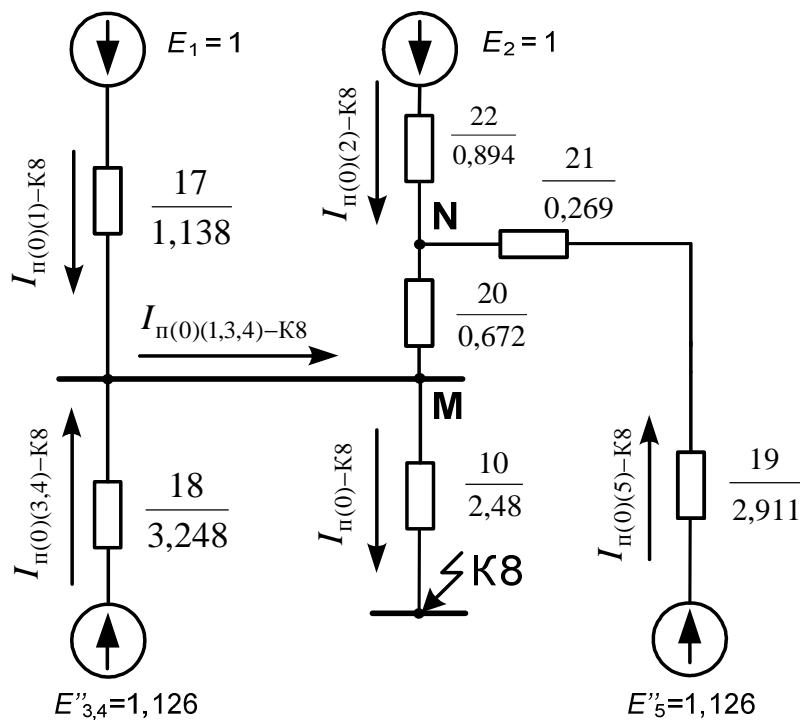


Рис. 1.12.1. Схема замещения для расчета тока трехфазного КЗ

в точке К8 после первого этапа преобразований

Объединим ветви с ЭДС E_1 и $E''_{3,4}$, определив их эквивалентные ЭДС и сопротивление:

$$E_{1,3,4} = \frac{\frac{E_1}{x_{17}} + \frac{E''_{3,4}}{x_{18}}}{\frac{1}{x_{17}} + \frac{1}{x_{18}}} = \frac{\frac{1}{1,138} + \frac{1,126}{3,248}}{\frac{1}{1,138} + \frac{1}{3,248}} = 1,032;$$

$$x_{23} = \frac{x_{17} \cdot x_{18}}{x_{17} + x_{18}} = \frac{1,138 \cdot 3,248}{1,138 + 3,248} = 0,842.$$

Сложим последовательно соединенные сопротивления x_{19} и x_{21} :

$$x_{24} = x_{19} + x_{21} = 2,911 + 0,269 = 3,18.$$

Теперь объединим ветви с ЭДС E_2 и E''_5 , заменим их ветвью с эквивалентными ЭДС и сопротивлением:

$$E_{2,5} = \frac{\frac{E_2}{x_{22}} + \frac{E''_5}{x_{24}}}{\frac{1}{x_{22}} + \frac{1}{x_{24}}} = \frac{\frac{0,894}{1} + \frac{1,125}{3,18}}{\frac{1}{0,894} + \frac{1}{3,18}} = 1,027;$$

$$x_{25} = \frac{x_{22} \cdot x_{24}}{x_{22} + x_{24}} = \frac{0,894 \cdot 3,18}{0,894 + 3,18} = 0,697,$$

а затем найдем суммарное сопротивление для ветви с ЭДС $E_{2,5}$:

$$x_{26} = x_{24} + x_{20} = 0,697 + 0,672 = 1,369.$$

По полученным данным составим схему замещения (рис. 1.12.2, а) и по ней рассчитаем результирующие эквивалентные ЭДС и сопротивление:

$$E_{\Sigma} = \frac{\frac{E_{1,3,4}}{x_{23}} + \frac{E_{2,5}}{x_{26}}}{\frac{1}{x_{23}} + \frac{1}{x_{26}}} = \frac{\frac{1,032}{0,842} + \frac{1,027}{1,369}}{\frac{1}{0,842} + \frac{1}{1,369}} = 1,03;$$

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{23} \cdot x_{26}}{x_{23} + x_{26}} + x_{10} = \frac{0,842 \cdot 1,37}{0,842 + 1,37} + 2,48 = 3,001.$$

Итоговая схема замещения представлена на рис. 1.12.2, б.

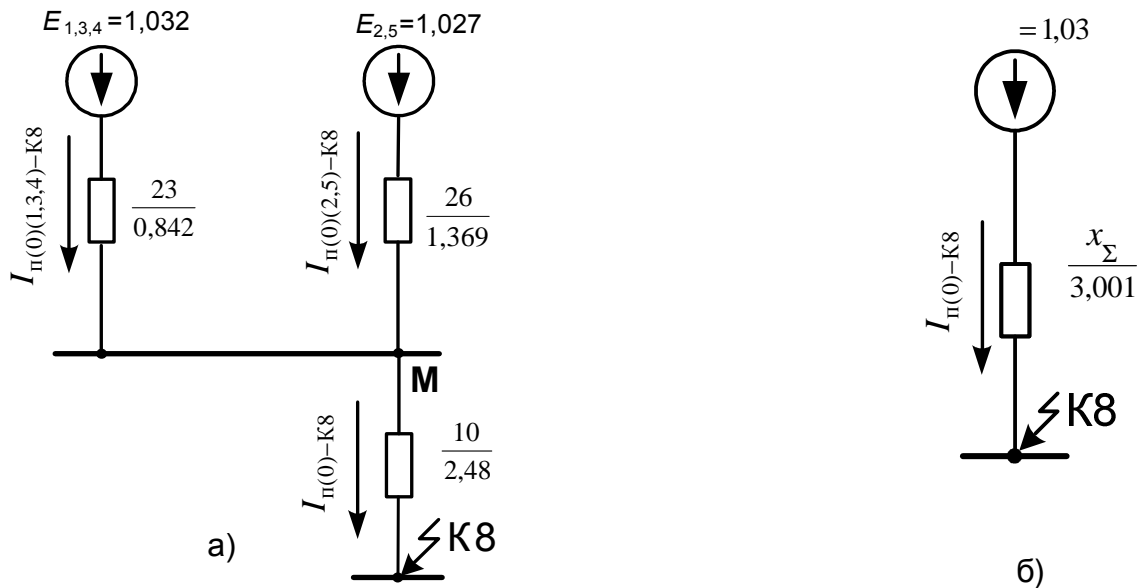


Рис. 1.12.2. Схемы замещения для расчета тока КЗ в точке К8 после второго этапа преобразований (а) и итоговая (б)

Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К8

По полученным данным находим начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в точке К8, выраженное в относительных единицах (см. рис. 1.12.2, б):

$$I_{* \text{п}(0)\text{-К}8} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}} = \frac{1,03}{3,001} = 0,343.$$

Определим базисный ток для ступени напряжения в точке К8, приняв $U_{\text{б}} = U_{\text{ср.К}8} = 10,5$ кВ:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,98 \text{ кА}.$$

Тогда начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К8 в именованных единицах

$$I_{\text{п}(0)\text{-К}8} = I_{* \text{п}(0)\text{-К}8} \cdot I_{\text{б}} = 0,343 \cdot 54,98 = 18,85 \text{ кА}.$$

Далее найдем распределение начального действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания, выраженное в относительных базисных единицах, по ветвям источников. Сначала определим потенциал в точке М схемы замещения (см. рис. 1.12.2, а):

$$\Phi_{\text{М}} = I_{* \text{п}(0)\text{-К}8} \cdot x_{10} = 0,343 \cdot 2,48 = 0,85'$$

а затем найдем ток в ветви источника с эквивалентной ЭДС $E_{1,3,4}$:

$$I_{\text{п}(0)(1,3,4)\text{-К}8} = \frac{E_{1,3,4} - \Phi_{\text{М}}}{x_{23}} = \frac{1,032 - 0,85}{0,842} = 0,216,$$

а также ток в ветви источника с эквивалентной ЭДС $E_{2,5}$:

$$I_{\text{п}(0)(2,5)\text{-К8}} = \frac{E_{2,5} - \Phi_M}{x_{26}} = \frac{1,027 - 0,85}{1,369} = 0,129.$$

Далее определим потенциал в точке N схемы на рис. 1.12.1:

$$\Phi_N = \Phi_M + I_{\text{п}(0)(2,5)\text{-К8}} \cdot x_{20} = 0,85 + 0,129 \cdot 0,672 = 0,937,$$

найдем ток в ветви источника с ЭДС E_2 (система С2):

$$I_{\text{п}(0)(2)\text{-К8}} = \frac{E_2 - \Phi_N}{x_{22}} = \frac{1,0 - 0,937}{0,894} = 0,07,$$

ток в ветви источника с ЭДС E_5'' (генератор G3):

$$I_{\text{п}(0)(5)\text{-К8}} = \frac{E_5'' - \Phi_N}{x_{21} + x_{19}} = \frac{1,126 - 0,937}{0,269 + 2,911} = 0,059,$$

ток в ветви источника с ЭДС E_1 (система С1):

$$I_{\text{п}(0)(1)\text{-К8}} = \frac{E_1 - \Phi_M}{x_{17}} = \frac{1,0 - 0,85}{1,138} = 0,132,$$

а также ток в ветви источника с эквивалентной ЭДС $E_{3,4}''$ (генераторы G1, G2):

$$I_{\text{п}(0)(3,4)\text{-К8}} = \frac{E_{3,4}'' - \Phi_M}{x_{18}} = \frac{1,126 - 0,85}{3,248} = 0,084.$$

Поскольку генераторы G1 и G2 одинаковые, то ток от каждого из них будет равен половине тока $I_{\text{п}(0)(3,4)\text{-К8}}$:

$$I_{\text{п}(0)(3)\text{-К8}} = I_{\text{п}(0)(4)\text{-К8}} = I_{\text{п}(0)(3,4)\text{-К8}} / 2 = 0,042.$$

С целью проверки найдем сумму токов в ветвях всех источников:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 I_{\text{п}(0)(i)\text{-К8}} &= I_{\text{п}(0)(1)\text{-К8}} + I_{\text{п}(0)(2)\text{-К8}} + I_{\text{п}(0)(3)\text{-К8}} + I_{\text{п}(0)(4)\text{-К8}} + I_{\text{п}(0)(5)\text{-К8}} = \\ &= 0,132 + 0,07 + 0,042 + 0,042 + 0,059 = 0,345. \end{aligned}$$

Эта сумма практически совпадает с найденным ранее начальным действующим значением периодической составляющей тока КЗ $I_{\text{п}(0)\text{-К8}} = 0,343$, что подтверждает правильность выполненного распределения токов.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К8 в произвольный момент времени

Определим для каждого i -го источника электроэнергии коэффициенты удалённости β_i , характеризующие электрическую удаленность точки короткого замыкания К4 от данного источника электроэнергии по формуле (1.11.1).

Так, для генераторов G1 и G2 имеем:

$$\beta_{G1} = \beta_{G2} = I_{п(0)(3)-K8} \frac{S_{\delta}}{S_{ном.G1}} = 0,042 \cdot \frac{1000}{125} = 0,336 ,$$

а для генератора G3

$$\beta_{G3} = I_{п(0)(5)-K8} \frac{S_{\delta}}{S_{ном.G3}} = 0,059 \cdot \frac{1000}{125} = 0,472 .$$

У всех генераторов коэффициенты удаленности β_i оказались меньше 2. Это означает, что короткое замыкание в точке K8 по отношению ко всем источникам энергии (генераторам G1, G2 и G3, а также эквивалентным системам C1 и C2) является **удалённым**. Поэтому действующее значение периодической составляющей тока КЗ не меняется от времени, оставаясь равным начальному значению:

$$I_{п(t)-K8} = I_{п(0)-K8} = 18,85 \text{ кА} .$$

Расчет аperiodической составляющей и ударного тока короткого замыкания для точки K8

Определим постоянные времени элементов системы и ударные токи, для чего воспользуемся таблицей П7.2 **Приложения 7**. При этом учтём, что точка короткого замыкания K8 отделена от всех источников электроэнергии обмоткой низшего напряжения автотрансформатором АТ2 типа АТДЦТН-125000/220 (см. рис. 1.6.1), а в схеме замещения (см. рис. 1.12.2) находится за общим сопротивлением x_{10} . Поэтому можно принять следующие усреднённые параметры для эквивалентной ветви всех источников (как для **системы, связанной со сборными шинами 6-10 кВ через трансформаторы мощностью 80 МВ·А и выше**):

$$T_a = 0,06 \text{ с и } K_y = 1,85 ,$$

которые позволяют рассчитать ударный ток:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{\delta} \cdot K_y \cdot I_{п(0)-K8} = \sqrt{2} \cdot 54,98 \cdot 1,85 \cdot 0,343 = 49,34 \text{ кА} ,$$

а также находить мгновенное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания для произвольного момента времени:

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\delta} \cdot I_{п(0)-K8} \cdot e^{-\frac{t}{T_a c}} = \sqrt{2} \cdot 54,98 \cdot 0,343 \cdot e^{-\frac{t}{0,06}} = 26,67 \cdot e^{-\frac{t}{0,06}} , \text{ кА} .$$

Зависимость аperiodической составляющей тока короткого замыкания от времени, рассчитанная с использованием программы «*Mathcad*» представлена на рис. 1.12.3.

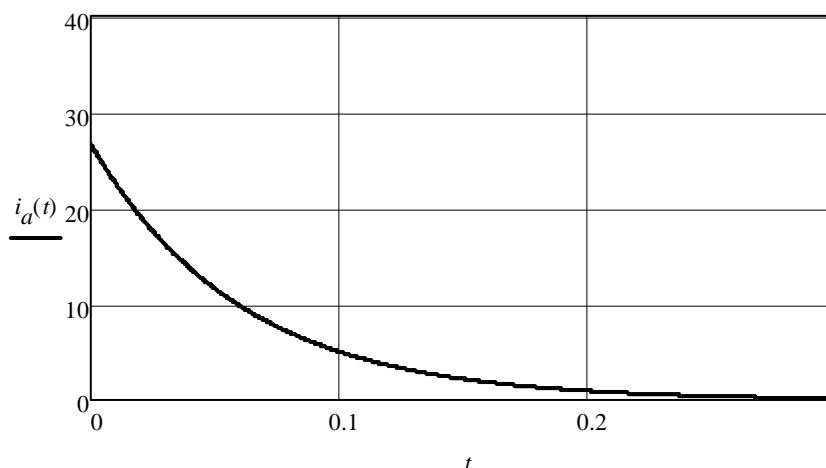


Рис. 1.12.3. Зависимость аperiodической составляющей тока короткого замыкания от времени

Попутно отметим, что для моментов времени $t = 0$ и $t = 0,2$ с ток i_a имеет следующие значения:

$$i_{a(0)} = 26,67 \text{ кА}, \quad i_{a(0,2)} = 0,952 \text{ кА}.$$

Проверка правильности расчета при помощи программы «ENERGO»

На экране компьютера соберем схему, соответствующую заданию. Введем все параметры элементов схемы.

Укажем место короткое замыкание в точке К8 **двойным щелчком левой кнопки мыши**. **Зададим** вид короткого замыкания (трёхфазное КЗ) **нажатием кнопки «К³» на Панели инструментов**, после чего программа выполнит расчёт. Результат представлен на рис. 1.12.4.

Оценим расхождение между полученным ранее начальным значением периодической составляющей тока короткого замыкания $I_{п(0)-К8} = 18,85 \text{ кА}$ и значением тока $I_{п(0)energo-К8} = 18,667 \text{ кА}$, рассчитанным по программе «ENERGO»:

$$\Delta = \frac{I_{п(0)-К8} - I_{п(0)energo-К8}}{I_{п(0)-К8}} \cdot 100\% = \frac{18,85 - 18,677}{18,85} \cdot 100\% = 0,91\% .$$

Расхождение не превышает 1%, следовательно, расчет произведен правильно.

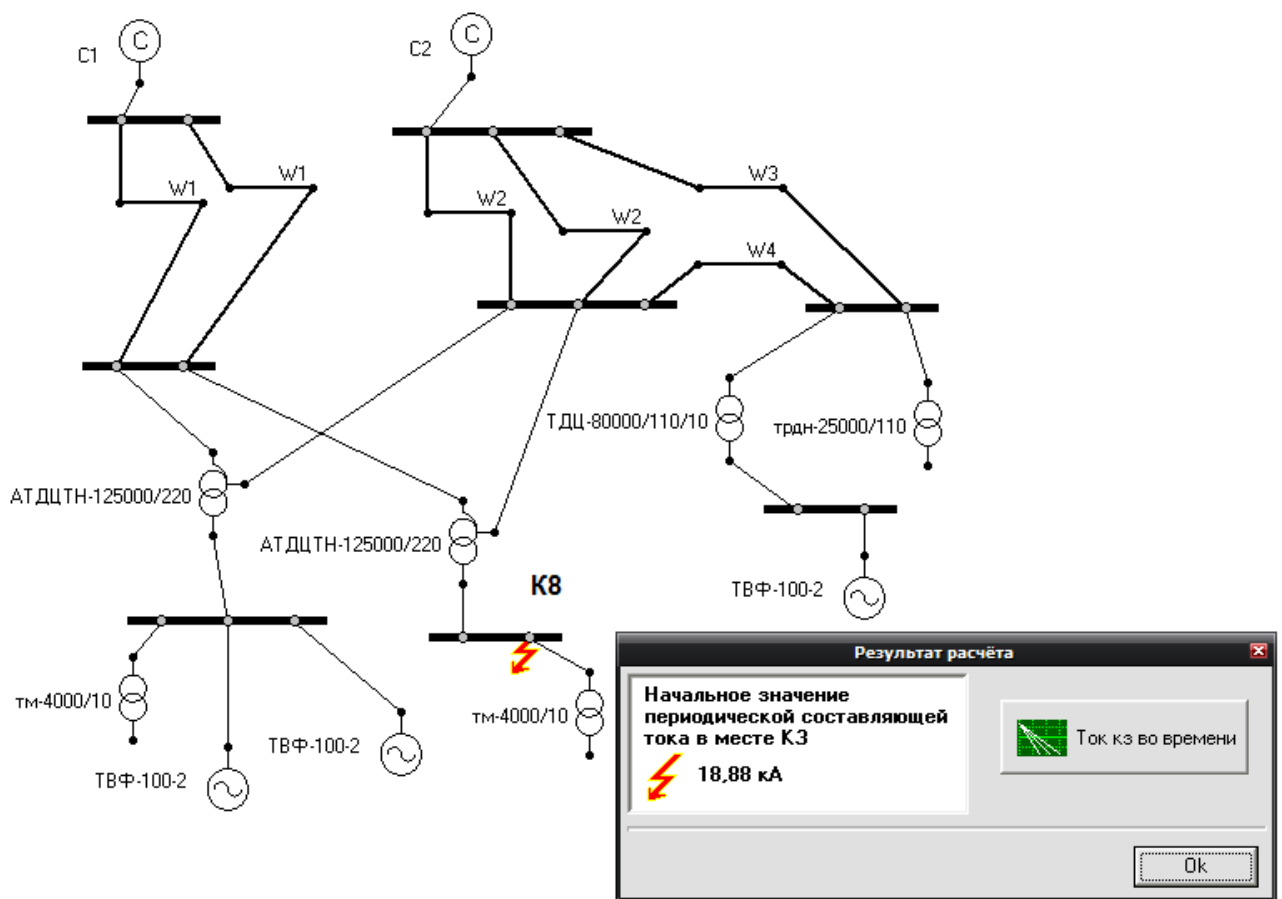


Рис.1.12.4. Введённая схема и результат расчета по программе «ENERGO»

Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени в точке К4

Ранее (см. п. 1.9) было рассчитано начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке К4 в относительных базисных единицах $I_{п(0)-К4} = 1,605$ и найдены составляющие этого тока в ветвях с источниками:

- для ветви генератора G1 ($P_{ном} = 100 \text{ МВт}, \cos \varphi_{ном} = 0,8$)
 $I_{п(0)(3)-К4} = 0,0754$;
- для ветви генератора G2 ($P_{ном} = 100 \text{ МВт}, \cos \varphi_{ном} = 0,8$)
 $I_{п(0)(4)-К4} = 0,0754$;
- для ветви генератора G3 ($P_{ном} = 100 \text{ МВт}, \cos \varphi_{ном} = 0,8$)
 $I_{п(0)(5)-К4} = 0,378$;
- для ветви системы C1 $I_{п(0)(1)-К4} = 0,316$;
- для ветви системы C2 $I_{п(0)(2)-К4} = 0,753$.

Используя величины этих токов, определим коэффициент удаленности от точки КЗ для каждого из генераторов по выражению (1.11.1):

– для генераторов G1 и G2

$$\beta_{G1} = \beta_{G2} = I_{п(0)(3)-К4} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} = I_{п(0)(3)-К4} \frac{S_{\delta} \cdot \cos \varphi_{НОМ}}{P_{НОМ}} =$$

$$= 0,0745 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{100} = 0,6;$$

– для генератора G3

$$\beta_{G3} = I_{п(0)(5)-К4} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} = I_{п(0)(5)-К4} \frac{S_{\delta} \cdot \cos \varphi_{НОМ}}{P_{НОМ}} =$$

$$= 0,387 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{100} = 3,1.$$

У генераторов G1 и G2 коэффициенты удаленности $\beta_{G1} = \beta_{G2} = 0,6 < 2$, поэтому действующие значения периодических составляющих токов КЗ от этих источников с течением времени не меняются, т. е.

$$I_{п(t)(3)-К4} = I_{п(t)(4)-К4} = I_{п(0)(3)-К4} = 0,0754.$$

У генератора G3 коэффициент удаленности $\beta_{G3} = 3,1$. По его величине с помощью типовых кривых для заданного типа генератора ТВФ-100 (см. **Приложении 6**, рис. Пб.1) в требуемый момент времени $t = 0,2$ с определим значение коэффициента $\gamma_{(0,2)G3} \approx 0,729$.

Наконец, найдём искомое действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке К4 для момента времени $t = 0,2$ с по формуле (1.11.2):

$$I_{п(0,2)-К4} = I_{\delta} \cdot (2 \cdot I_{п(0)(3)-К4} + \gamma_{(0,2)G3} \cdot I_{п(0)(5)-К4} + I_{п(0)(1)-К4} + I_{п(0)(2)-К4}) =$$

$$= 5,02 \cdot (0,0754 + 0,0754 + 0,729 \cdot 0,387 + 0,316 + 0,753) = 7,54 \text{ кА}.$$

В заключении отметим, что величина действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания, рассчитанная в заданный момент времени, используется, например, для настройки устройств релейной защиты и выбора выключателя по отключающей способности. Поэтому её определение является одной из целей расчёта тока короткого замыкания.

1.13. Учет влияния электродвигателей при расчете тока трехфазного короткого замыкания

При близких коротких замыканиях напряжение на выводах электродвигателей резко падает и может оказаться меньше их ЭДС. Поскольку двигатели по инерции продолжают вращаться, то они на короткое время переходят в режим генератора и осуществляют подпитку током места повреждения.

При расчете максимального начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ необходимо учитывать подпитку от синхронных и асинхронных двигателей мощностью 100 кВт и более, если эти электродвигатели не отделены от точки КЗ силовыми трансформаторами или токоограничивающими реакторами [1, 5].

Синхронные и асинхронные двигатели должны быть введены в схему замещения своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями (см. Приложение 2).

Синхронные двигатели.

Если в предшествующем короткому замыканию режиме электродвигатели работали с перевозбуждением, то сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле (1.5.1), а если с недо возбуждением – то по формуле (1.5.2) (см. также Приложение 3).

При отсутствии точных сведений о параметрах предшествующего режима можно принимать, что до КЗ электродвигатели работали в номинальном режиме. Тогда для расчета сверхпереходной ЭДС в относительных единицах удобно воспользоваться формулой (1.5.8).

Величину сверхпереходного сопротивления по продольной оси $x''_{*d(ном)}$, выраженную в относительных номинальных единицах, по известному типу двигателя можно найти в справочниках [8, 12], каталогах или паспорте.

Асинхронные двигатели.

Для асинхронных двигателей фазное значение сверхпереходной ЭДС следует определять через параметры предшествующего режима $U_{\Phi 0}$ (кВ), I_0 (кА), $\cos \varphi_0$ по формуле:

$$E''_{\Phi} = \sqrt{(U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x'' \cdot \cos \varphi_0)^2}, \quad (1.13.1)$$

причем сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя x'' (Ом) допустимо находить по выражению:

$$x'' = \frac{1}{K_{\Pi}} \cdot \frac{U_{ном}^2 \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta / 100}{P_{ном}}, \quad (1.13.2)$$

где K_{Π} – кратность пускового тока асинхронного двигателя; $U_{ном}$ – номинальное напряжение, кВ; $\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности

электродвигателя; η – КПД электродвигателя, %; $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная (механическая на валу) мощность электродвигателя, МВт.

При использовании системы относительных единиц сверхпереходные ЭДС и сопротивления асинхронных двигателей, приведённые к номинальным условиям, удобно определять по следующим формулам:

$$E_*'' = E_{*(\text{НОМ})}'' = \sqrt{\left(1 - x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}}\right)^2 + \left(x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}\right)^2}, \quad (1.13.3)$$

$$x_{*(\text{НОМ})}'' = \frac{1}{K_{\Pi}}. \quad (1.13.4)$$

При отсутствии точных данных о типе и параметрах электродвигателей для приближенного определения их сверхпереходных ЭДС и сопротивлений можно воспользоваться таблицей 1.5.1.

Комплексная (обобщенная) нагрузка.

При наличии комплексной нагрузки следует учитывать её влияние, если ток в месте КЗ от этой нагрузки составляет не менее 5% от тока КЗ, определенного без учёта нагрузки [1]. Подробное изложение методики учёта комплексной нагрузки можно найти в работе [5].

В приближенных расчетах, при необходимости, нагрузку можно учесть обобщенным источником с параметрами:

$$E_* = E_{*(\text{НОМ})} = 0,85; \quad x_{*(\text{НОМ})} = 0,35.$$

Если **сверхпереходные ЭДС и сопротивления электродвигателей определялись в именованных единицах** по формулам (1.5.1), (1.5.2), (1.13.1) и (1.13.2), то для использования в схеме замещения **найденные значения должны быть приведены к основной (базисной) ступени напряжения** (см. п. 1.3).

В том случае, если **расчет ведется в относительных базисных единицах при средних коэффициентах трансформации** (рекомендуется для выполнения курсовой работы), то **приведенные к базисным условиям сопротивления находят по формуле** (см. также Приложение 4):

$$x_*'' = x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (1.13.5)$$

где $x_{*(\text{НОМ})}''$ – сверхпереходное сопротивление, найденное в относительных номинальных единицах; $S_{\text{б}}$ – базисная мощность, МВ·А; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная (электрическая) мощность электродвигателя (или нагрузки), МВ·А.

Для асинхронного двигателя его полная номинальная мощность

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta / 100}.$$

После того, как электродвигатели вместе с питающими кабелями внесены в схему замещения, производится расчет начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ и находится распределение этого тока по

ветвям исходной схемы замещения, в том числе и по ветвям с электродвигателями.

Замети, что кабель в схеме замещения можно не учитывать, если его полное сопротивление не превышает 10...20% от сопротивления двигателя [6].

В **радиальных схемах** достаточно просто учесть влияние электродвигателей на действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени. Для этой цели необходимо использовать специальные типовые кривые, построенные для синхронных и асинхронных двигателей (см. **Приложение 6**, рис. П6.3 и П6.4).

По найденным ранее действующим значениям периодических составляющих токов КЗ для начального момента времени от синхронного $I_{п(0)СД}$ (кА) и асинхронного $I_{п(0)АД}$ (кА) двигателей, а также используя значения номинальных токов этих двигателей $I_{ном.СД}$ (кА) и $I_{ном.АД}$ (кА), определяют коэффициенты удаленности электродвигателей от точки КЗ:

– для синхронного двигателя

$$\beta_{СД} = \frac{I_{п(0)СД}}{I_{ном.СД}}; \quad (1.13.6)$$

– для асинхронного двигателя

$$\beta_{АД} = \frac{I_{п(0)АД}}{I_{ном.АД}}. \quad (1.13.7)$$

Заметим, что если $\beta < 2$, то для такого электродвигателя КЗ считается **удаленным**, а ток двигателя в подпитке места повреждения не учитывается.

Далее, для заданного момента времени t с помощью типовых кривых, соответствующих виду двигателей, определяются коэффициенты для синхронного двигателя $\gamma_{(t)СД}$ и асинхронного двигателя $\gamma_{(t)АД}$.

Затем находятся действующие значения периодических составляющих тока КЗ от двигателей в момент времени t :

– для синхронного двигателя

$$I_{п(t)СД} = \gamma_{(t)СД} \cdot I_{п(0)СД}; \quad (1.13.8)$$

– для асинхронного двигателя

$$I_{п(t)АД} = \gamma_{(t)АД} \cdot I_{п(0)АД}. \quad (1.13.9)$$

Найденные таким образом токи $I_{п(t)СД}$ и $I_{п(t)АД}$ необходимо учесть при определении действующего значения периодической составляющей тока КЗ, добавив их к токам от других источников.

Расчет апериодических составляющих тока КЗ и ударного тока от электродвигателей производится обычным образом в соответствии с порядком, изложенным в п. 1.10. При отсутствии достоверных данных о величинах постоянных времени спада апериодических составляющих тока КЗ в цепях с электродвигателями и ударных коэффициентах можно пользоваться информацией из работы [12], часть которой представлена в таблице 1.13.1.

Средние значения отношения x/r , постоянной T_a времени и ударного коэффициента K_y для высоковольтных электродвигателей

Электродвигатель	x / r	T_a, c	K_y
Асинхронный двигатель 6/10 кВ	13	0,04	1,6
Синхронный двигатель 6/10 кВ мощностью:			
до 1,6 МВт	16	0,05	1,8
2 – 4 МВт	22	0,07	1,9
выше 4 МВт	32	0,1	1,9

Пример расчета тока короткого замыкания с учетом подпитки от электродвигателей

Рассчитаем ток короткого замыкания на шинах понизительной подстанции, подключенной к эквивалентной системе С (рис. 1.13.1).

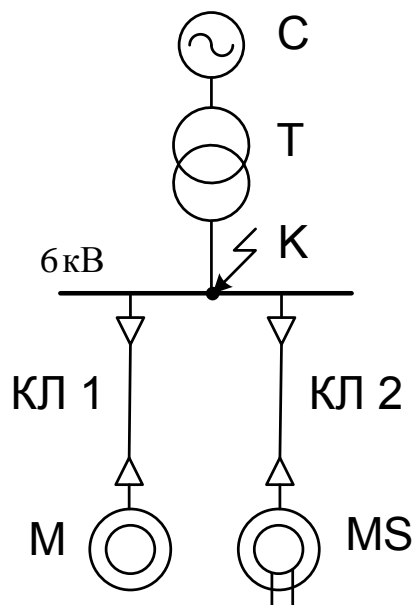


Рис. 1.13.1. Расчетная схема

В качестве исходной информации будем использовать следующие данные. Эквивалентная система С бесконечной мощности. Трансформатор Т типа ТДН-16000/110/6 ($S_{\text{НОМ}} = 16 \text{ МВА}$; $U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ}$; $U_{\text{НННОМ}} = 6,6 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5\%$). Асинхронный двигатель М типа А-13-59-6 ($P_{\text{НОМ}} = 800 \text{ кВт}$; $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$; $K_{\text{П}} = 5,3$; $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$; $\eta = 93\%$). Синхронный двигатель MS типа СДН-2-17-54-10 ($P_{\text{НОМ}} = 2000 \text{ кВт}$; $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$; $x''_{d(\text{НОМ})} = 0,207$;

$\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$). Кабельные линии КЛ1 ($l = 200$ м; $r_{\text{пог}} = 0,326$ Ом/км; $x_{\text{пог}} = 0,078$ Ом/км) и КЛ2 ($l = 350$ м; $r_{\text{пог}} = 0,206$ Ом/км; $x_{\text{пог}} = 0,074$ Ом/км).

Выполним расчет в относительных единицах при $S_{\text{б}} = 100$ МВА, $U_{\text{б}} = U_{\text{ср.К}} = 6,3$ кВ и базисном токе

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}.$$

Составим исходную схему замещения (рис. 1.13.2, а) и определим её параметры.

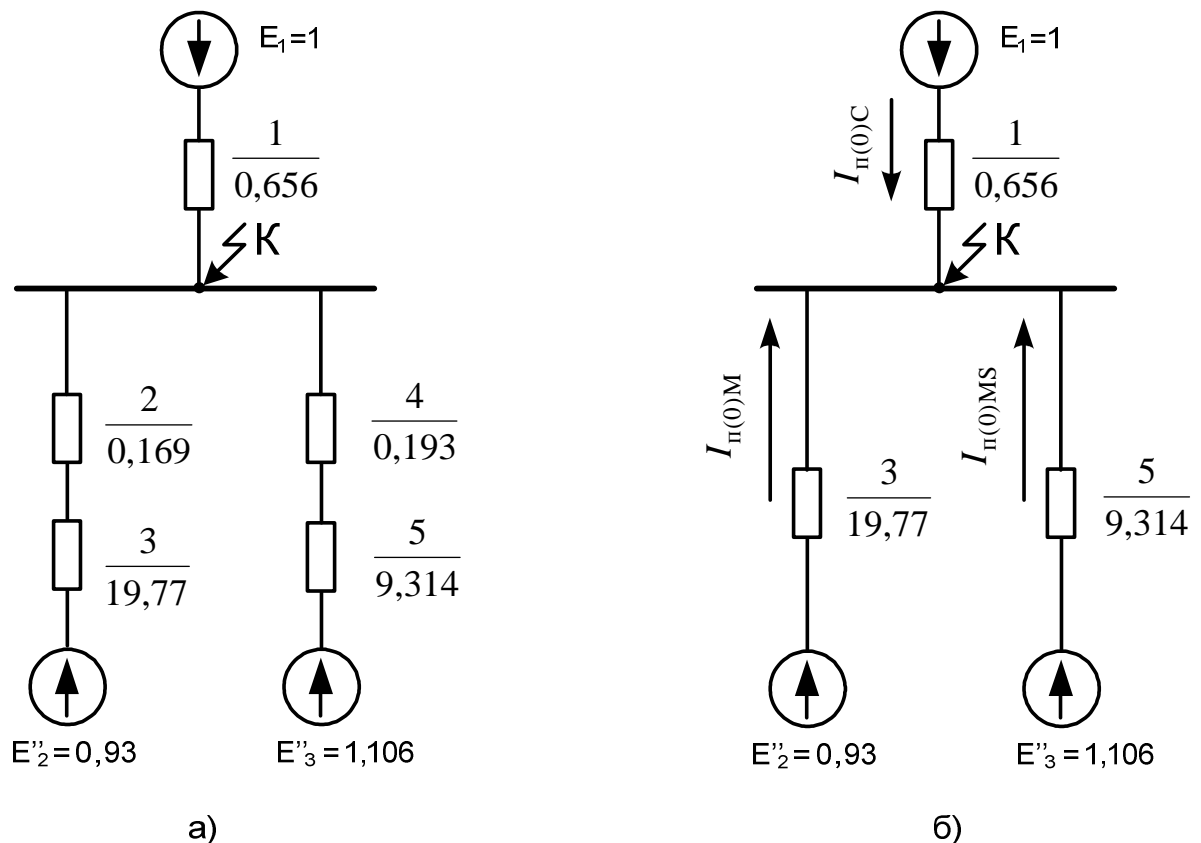


Рис. 1.13.2. Схемы замещения: исходная (а) и упрощенная (б)

Эквивалентная система С бесконечно мощная, поэтому её сопротивление $x_{\text{С}} = 0$. Согласно формуле (1.6.6) $E_1 = E_{\text{С}} = 1$.

Для двухобмоточного трансформатора Т сопротивление найдем по формуле (1.4.10):

$$x_1 = x_{\text{Т}} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656.$$

Для кабельных линий находим индуктивные и активные сопротивления по формулам (1.6.14) и (1.6.15), а также полные сопротивления:

$$x_2 = x_{\text{КЛ1}} = x_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2} = 0,078 \cdot 0,2 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,039;$$

$$r_2 = r_{\text{КЛ1}} = r_{\text{пор}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,326 \cdot 0,2 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,164;$$

$$z_2 = \sqrt{x_2^2 + r_2^2} = \sqrt{0,039^2 + 0,164^2} = 0,169;$$

$$x_3 = x_{\text{КЛ2}} = 0,074 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,065;$$

$$r_3 = r_{\text{КЛ2}} = 0,206 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,182;$$

$$z_3 = \sqrt{x_3^2 + r_3^2} = \sqrt{0,065^2 + 0,182^2} = 0,193.$$

Для асинхронного двигателя М найдем приведенное к базисным условиям сверхпереходное сопротивление с использованием формул (1.13.4) и (1.13.5):

$$x_{* (\text{НОМ})}'' = \frac{1}{K_{\Pi}} = \frac{1}{5,3} = 0,189;$$

$$x_3 = x_{\text{М}}'' = x_{* (\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}} / (\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta / 100)} =$$

$$= 0,189 \cdot \frac{100}{0,8 / (0,9 \cdot 93 / 100)} = 19,77;$$

и определим сверхпереходную ЭДС по формуле (1.13.3):

$$E_2'' = E_{\text{М}}'' = \sqrt{(1 - x_{* (\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (x_{* (\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2} =$$

$$= \sqrt{(1 - 0,189 \cdot 0,436)^2 + (0,189 \cdot 0,9)^2} = 0,93$$

(здесь $\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos 0,9 = 25,84^\circ$ и $\sin \varphi_{\text{НОМ}} = \sin 25,84^\circ = 0,436$).

Для синхронного двигателя MS найдем приведенное к базисным условиям сверхпереходное сопротивление по формуле (1.5.9):

$$x_5 = x_{\text{MS}}'' = x_{* d (\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = 0,207 \cdot \frac{100}{2 / 0,9} = 9,315;$$

и определим сверхпереходную ЭДС по формуле (1.5.8):

$$E_3'' = E_{\text{MS}}'' = \sqrt{(1 + x_{* d (\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (x_{* d (\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2} =$$

$$= \sqrt{(1 + 0,207 \cdot 0,436)^2 + (0,207 \cdot 0,9)^2} = 1,106.$$

Поскольку $z_2 / x_3 = 0,169 / 19,77 = 0,008 < 0,1$ и $z_3 / x_5 = 0,193 / 9,315 = 0,021 < 0,1$, то при незначительной погрешности можно не учитывать

сопротивление кабелей. Поэтому упрощенная схема замещения примет вид, представленный на рис. 1.13.2, б.

Определим начальное действующее значение периодических составляющих тока КЗ от каждого из источников:

$$I_{п(0)C} = I_6 \frac{E_1}{x_1} = 9,16 \cdot \frac{1}{0,656} = 13,96 \text{ кА};$$

$$I_{п(0)M} = I_6 \frac{E_2}{x_3} = 9,16 \cdot \frac{0,93}{19,77} = 0,43 \text{ кА};$$

$$I_{п(0)MS} = I_6 \frac{E_3}{x_5} = 9,16 \cdot \frac{1,106}{9,315} = 1,09 \text{ кА};$$

найдем суммарное значение этих токов

$$I_{п(0)} = I_{п(0)C} + I_{п(0)M} + I_{п(0)MS} = 13,96 + 0,43 + 1,09 = 15,48 \text{ кА};$$

и оценим долю тока от электродвигателей:

$$\frac{I_{п(0)M} + I_{п(0)MS}}{I_{п(0)}} \cdot 100 = \frac{0,43 + 1,09}{15,48} \cdot 100 = 9,82 \text{ \%}.$$

Рассчитаем коэффициенты удаленности для электродвигателей по формулам (1.13.7) и (1.13.6), соответственно:

$$\beta_M = \frac{I_{п(0)M}}{I_{НОМ.M}} = \frac{I_{п(0)M}}{P_{НОМ} / (\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta)} = \frac{0,43}{0,8 / (\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 6 \cdot 0,93)} \approx 4,7;$$

$$\beta_{MS} = \frac{I_{п(0)MS}}{I_{НОМ.MS}} = \frac{I_{п(0)MS}}{P_{НОМ} / (\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot U_{НОМ})} = \frac{1,09}{2 / (3 \cdot 0,9 \cdot 6)} \approx 5,1.$$

Используя эти коэффициенты, по типовым кривым для электродвигателей (см. **Приложение 6**, рис. П6.2 и П6.3) найдем при $t = 0,05$ с коэффициенты

$$\gamma_{(0,05)M} = 0,44 \text{ и } \gamma_{(0,05)MS} = 0,68$$

и определим действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени $t = 0,05$ с :

$$\begin{aligned} I_{п(0,05)} &= I_{п(0)C} + \gamma_{(0,05)M} \cdot I_{п(0)M} + \gamma_{(0,05)MS} \cdot I_{п(0)MS} = \\ &= 13,96 + 0,044 \cdot 0,43 + 0,68 \cdot 1,09 = 14,89 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Примем следующие параметры для ветвей источников электроэнергии :

– для системы $T_{aC} = 0,06$ с , $K_{yC} = 1,85$ (**Приложение 7**, табл. П7.1, случай **КЗ на присоединении вторичного напряжения подстанции**);

– для асинхронного двигателя $T_{aM} = 0,04$ с , $K_{yM} = 1,6$ (см. табл. 1.13.1);

– для синхронного двигателя $T_{aMS} = 0,07$ с , $K_{yMS} = 1,9$ (см. табл. 1.13.1).

Тогда выражение для аperiodической составляющей тока в точке КЗ для произвольного момента времени примет вид:

$$i_{a(t)} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)C} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ac}}} + \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)M} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aM}}} + \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)MS} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aMS}}} =$$

$$= \sqrt{2} \cdot (13,96 \cdot e^{-\frac{t}{0,06}} + 0,43 \cdot e^{-\frac{t}{0,04}} + 1,09 \cdot e^{-\frac{t}{0,01}}),$$

а ударный ток в месте КЗ будет равен:

$$i_y = K_{yC} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)C} + K_{yM} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)M} + K_{yMS} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)MS} =$$

$$= \sqrt{2} \cdot (1,85 \cdot 13,96 + 1,6 \cdot 0,43 + 1,9 \cdot 1,09) = 40,43 \text{ кА.}$$

Мы завершили расчет тока КЗ на шинах 6 кВ понизительной подстанции с учетом подпитки от электродвигателей. При этом доля тока от двигателей составила около 10%.

1.14. Особенности расчета токов короткого замыкания в системах собственных нужд электростанций

Особым способом учитывают подпитку места короткого замыкания от двигателей в системах собственных нужд электростанций, где к шинам питания оказывается подключенным достаточно большое количество электродвигателей разных типов и мощностей. При оценке их результирующего влияния на ток КЗ целесообразно применять групповой учёт двигателей [6, 10].

Для этого все двигатели, участвующие в подпитке точки КЗ, заменяют эквивалентным двигателем с суммарной номинальной мощностью

$$P_{\Sigma} = \sum P_{\text{ном.}i},$$

где $P_{\text{ном.}i}$ – номинальная мощность двигателя с номером i , подключенного к секции собственных нужд, на которых рассчитывается КЗ, МВт.

Такой эквивалентный двигатель имеет следующие параметры:

КПД η_D	0,94;
Коэффициент мощности $\cos \varphi_D$	0,87;
Кратность пускового тока $K_{п.д}$	5,6;
Постоянная времени затухания периодической составляющей тока $T'_D, \text{ с}$	0,07;
Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока T_{aD}	0,04;
Ударный коэффициент $K_{y,д}$	1,65.

При определении P_{Σ} учитывают двигатели, которые **электрически соединены** с местом КЗ. Так, если питание секции осуществляется через рабочий трансформатор, должны быть учтены только те двигатели, которые непосредственно подключены к данной секции. При питании от резервного трансформатора необходимо учитывать двигатели, подключенные к шинам данной секции, а также к другим секциям, связанным с данной по магистрали резервного питания.

Если точный состав электродвигателей собственных нужд неизвестен (например, на начальной стадии проектирования), то для приближенной оценки можно принимать при питании от рабочего трансформатора

$$P_{\Sigma} \approx S_{\text{ТСН}};$$

при питании от резервного трансформатора

$$P_{\Sigma} \approx 1,25S_{\text{РТСН}},$$

где $S_{\text{ТСН}}$ – мощность рабочего трансформатора собственных нужд, МВ·А; $S_{\text{РТСН}}$ – мощность резервного трансформатора собственных нужд, МВ·А; (если трансформаторы собственных нужд имеют расщепленные обмотки, то значения $S_{\text{ТСН}}$ и $S_{\text{РТСН}}$ следует уменьшить в 2 раза).

Рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Обычным образом составляется схема замещения для определения тока от внешних источников (системы); сворачивается относительно шин секции собственных нужд, на которой рассчитывается КЗ; определяются результирующие эквивалентные ЭДС $E_{\Sigma C}$ и сопротивление $x_{\Sigma C}$, а также начальное значение периодической составляющей тока КЗ от системы $I_{\text{п(0)C}}$, кА.

Заметим, что определяющим в величине сопротивления $x_{\Sigma C}$ является сопротивление питающего секцию трансформатора собственных нужд из-за его относительно небольшой мощности по сравнению с другими элементами расчетной схемы. Поэтому, с целью упрощения, все элементы электроэнергетической системы до трансформатора собственных нужд можно замещать эквивалентной системой с нулевым сопротивлением.

2. Определяется суммарная мощность всех непосредственно связанных с точкой КЗ электродвигателей P_{Σ} (МВт) с учетом рассмотренных выше рекомендаций и начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от электродвигателей, кА:

$$I_{\text{п(0)Д}} = K_{\text{ПД}} \cdot \frac{P_{\Sigma}}{\eta_{\text{Д}} \cdot \cos \varphi_{\text{Д}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 4,0 \cdot \frac{P_{\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}},$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение двигателей, кВ.

3. Находим начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, кА:

$$I_{\text{п(0)}} = I_{\text{п(0)C}} + I_{\text{п(0)Д}}.$$

4. Для заданного момента времени t вычисляется действующее значение периодической составляющей тока КЗ, кА:

$$I_{п(t)} = I_{п(0)C} + I_{п(0)D} \cdot e^{-\frac{t}{T'_D}}.$$

6. Определяется апериодическая составляющая тока КЗ, кА:

$$i_{a(t)} = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)C} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aC}}} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)D} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aD}}};$$

и ударный ток, кА:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)C} \cdot K_{yC} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)D} \cdot K_{yD}.$$

Средние значения T_{aC} и K_{yC} можно найти с помощью таблицы 1.14.1, которая составлена на основании информации из работы [10].

Таблица 1.14.1

$S_{обм},$ МВ·А	5	10	15	20	25	30	40	60	80
$T_{aC},$ с	0,043	0,048	0,052	0,056	0,059	0,063	0,068	0,076	0,082
K_{yC}	1,81	1,82	1,83	1,84	1,845	1,85	1,86	1,88	1,895

Примечание. $S_{обм}$ – мощность обмотки трансформатора, от которой запитана секция собственных нужд, где рассчитывается ток короткого замыкания.

Глава 2. Применение узловых потенциалов для расчета токов трехфазного короткого замыкания

На практике не всегда удастся с помощью простейших преобразований привести исходную схему замещения к радиальному виду, удобному для расчета тока короткого замыкания.

Чаще всего «камнем преткновения» оказывается четырехугольник или многоугольник из сопротивлений, который с помощью формул, представленных в **Приложении 5**, не преобразуется в звезду или в какую-либо другую, более удобную для расчета схему.

2.1. Расчётная схема и её схема замещения

В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.1

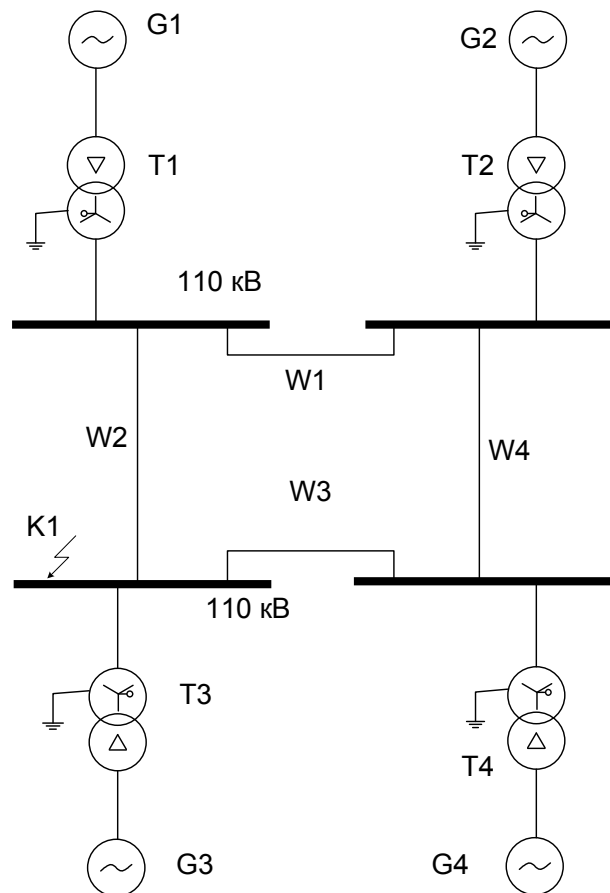


Рис. 2.1. Расчетная схема электрической системы

Расчетная схема имеет следующие элементы: генераторы G1 – G4 типа ТФ-60-2 ($P_{\text{ном}} = 60 \text{ МВт}$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x''_{d(\text{ном})} = 0,195$; $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$), трансформаторы T1 – T4 типа ТДЦ-80000/110/10 ($S_{\text{ном}} = 80 \text{ МВА}$; $u_k = 10,5\%$;

$U_{ВННОМ} = 121 \text{ кВ}$, $U_{НННОМ} = 10,5 \text{ кВ}$), линии электропередачи W1 – W4 ($L_{W1} = 50 \text{ км}$, $L_{W2} = 100 \text{ км}$, $L_{W3} = 150 \text{ км}$, $L_{W4} = 200 \text{ км}$; $x_{\text{ПОГ}} = 0,4 \text{ Ом/км}$).

Расчетной схеме соответствует схема замещения, представленная на рис. 2.2. На этой схеме кроме ЭДС, сопротивлений и точки КЗ указаны точки с номерами от 1 до 8, для которых в дальнейшем будут определяться узловые потенциалы.

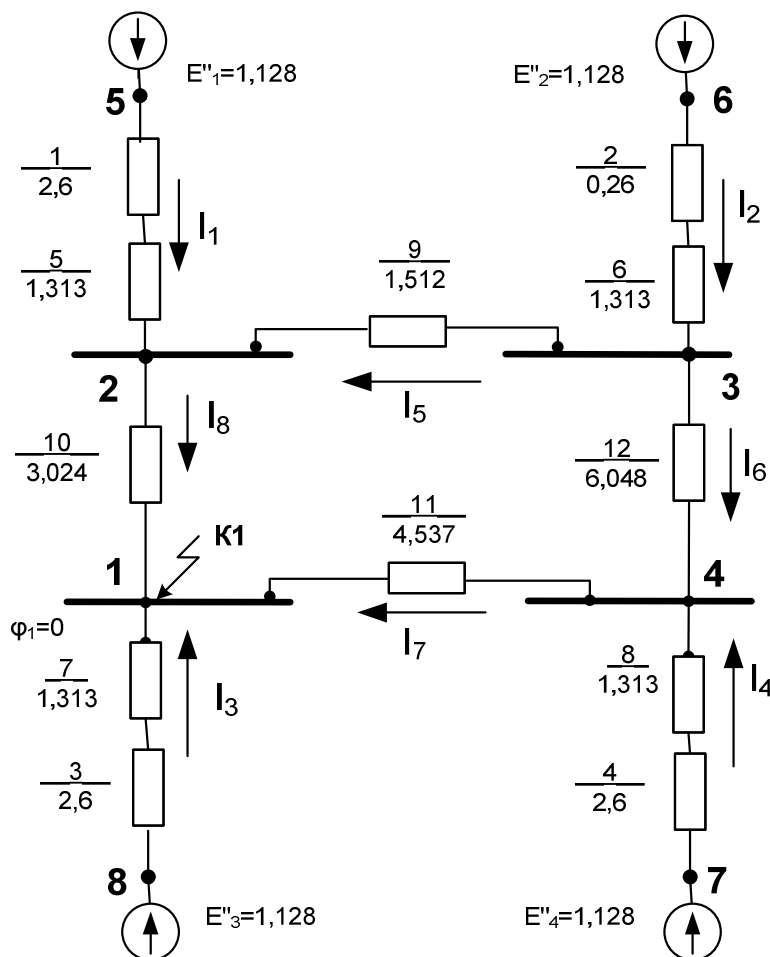


Рис. 2.2. Исходная схема замещения электрической системы

В качестве базисных величин примем мощность $S_6 = 1000 \text{ МВА}$ и напряжение в точке КЗ (точка 1) $U_6 = 115 \text{ кВ}$, и рассчитаем в относительных базисных единицах ЭДС и сопротивления элементов схемы.

Последовательно находим сверхпереходные ЭДС генераторов G1 – G4 (при предшествующем номинальном режиме):

$$E_1'' = E_2'' = E_3'' = E_4'' = E_G'' = \sqrt{\left(1 + x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}}\right)^2 + \left(x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(1 + 0,195 \cdot 0,6)^2 + (0,195 \cdot 0,8)^2} = 1,128;$$

сопротивления генераторов G1 – G4:

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_{*d(\text{НОМ})}'' \frac{S_6 \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} = 0,195 \frac{1000 \cdot 0,8}{60} = 2,6;$$

сопротивления трансформаторов Т1 – Т4:

$$x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 80} = 1,313;$$

сопротивление линии электропередач W₁:

$$x_9 = x_{\text{пог}} \cdot L_{W1} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,512;$$

сопротивления линий W₂ – W₄, найденные аналогично, имеют значения:

$$x_{10} = 3,024; \quad x_{11} = 4,536; \quad x_{12} = 6,048.$$

Очевидно, что конфигурация схемы замещения (четырёхугольник) не позволяет привести ее к виду многолучевой звезды с помощью формул преобразования из **Приложении 5**. Следовательно, сопротивления схемы простым способом не преобразуются в результирующее эквивалентное сопротивление x_{Σ} . Поэтому для определения начального действующего значение периодической составляющей тока короткого замыкания невозможно воспользоваться формулой

$$I_{\text{п(0)-К1}} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}}.$$

В связи с этим выполним расчет тока короткого замыкания, используя узловые потенциалы (см., например, [14]).

2.2. Расчет тока трехфазного короткого замыкания с помощью узловых потенциалов

Преобразуем исходную схему замещения (см. рис. 2.2) к виду, представленному на рис. 2.3.

Для этого объединим включенные последовательно сопротивления в ветвях, содержащих ЭДС источников (см. рис. 2.2). Учитывая равенство сопротивлений во всех четырёх ветвях, имеем:

$$x_{13} = x_{14} = x_{15} = x_{16} = x_1 + x_5 = 2,6 + 1,313 = 3,913.$$

Зададим положительные направления токов в ветвях. В данном случае токи направлены от источников электроэнергии к точке короткого замыкания, хотя, в общем случае, направления токов могут быть выбраны произвольно.

Потенциалы в точках схемы с номерами 5, 6, 7 и 8 примем равными сверхпереходным ЭДС генераторов, соответственно, G1, G2, G3 и G4 (см. рис. 2.3):

$$\varphi_5 = \varphi_6 = \varphi_7 = \varphi_8 = 1,128.$$

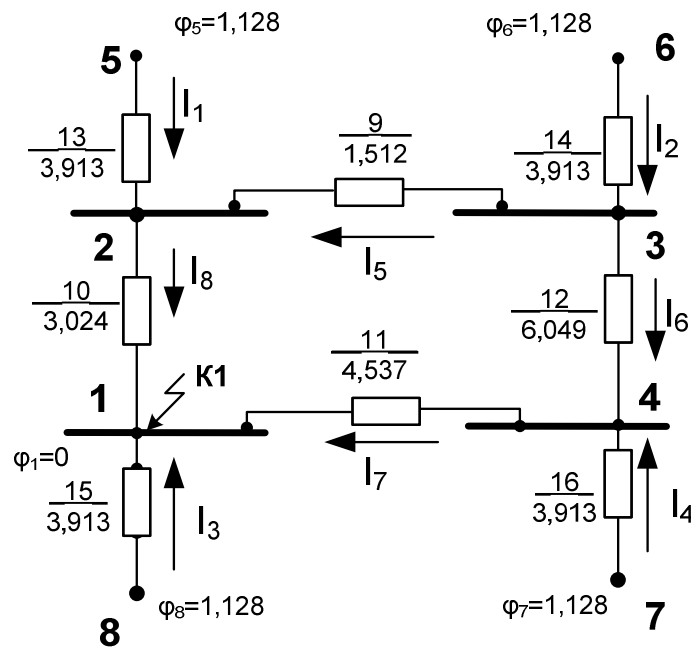


Рис. 2.3. Схема замещения для определения узловых потенциалов

Потенциал точки короткого замыкания (точка 1 на рис. 2.3) примем равным нулю: $\varphi_1 = 0$. Далее определим потенциалы в точках (узлах) 2, 3 и 4.

Для узла 2 составим уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$I_8 - I_1 - I_5 = 0, \quad (2.1)$$

а каждый из токов найдем с помощью закона Ома для участка цепи:

$$I_1 = \frac{\varphi_5 - \varphi_2}{x_{13}} = \frac{1,128 - \varphi_2}{3,913} = 0,2883 - \varphi_2 \cdot 0,2556;$$

$$I_5 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{x_9} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{1,512} = \varphi_3 \cdot 0,6614 - \varphi_2 \cdot 0,6614;$$

$$I_8 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{x_{10}} = \frac{\varphi_2 - 0}{3,024} = \varphi_2 \cdot 0,3307.$$

Три последних выражения для токов I_1 , I_5 и I_8 подставим в (2.1) и получим:

$$\varphi_2 \cdot 0,3307 - 0,2883 + \varphi_2 \cdot 0,2556 - \varphi_3 \cdot 0,6614 + \varphi_2 \cdot 0,6614 = 0,$$

или

$$\varphi_2 \cdot 1,2477 - \varphi_3 \cdot 0,6614 = 0,2883. \quad (2.2)$$

Аналогичным образом выполним операции для узла 3:

$$I_6 - I_2 + I_5 = 0; \quad (2.3)$$

$$I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{x_{12}} = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{6,049} = \varphi_3 \cdot 0,1653 - \varphi_4 \cdot 0,1653;$$

$$I_2 = \frac{\varphi_6 - \varphi_3}{x_{14}} = \frac{1,128 - \varphi_3}{3,913} = 0,2883 - \varphi_3 \cdot 0,2556 ;$$

$$I_5 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{x_9} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{1,512} = \varphi_3 \cdot 0,6614 - \varphi_2 \cdot 0,6614 ;$$

подставим выражения для токов I_6 , I_2 и I_5 в (2.3):

$$\varphi_3 \cdot 0,1653 - \varphi_4 \cdot 0,1653 - 0,2883 + \varphi_3 \cdot 0,2556 + \varphi_3 \cdot 0,6614 - \varphi_2 \cdot 0,6614 = 0$$

или

$$-\varphi_2 \cdot 0,6614 + \varphi_3 \cdot 1,0823 - \varphi_4 \cdot 0,1653 = 0,2883 . \quad (2.4)$$

Повторим операции для узла 4:

$$I_7 - I_6 - I_4 = 0; \quad (2.5)$$

$$I_7 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1}{x_{11}} = \frac{\varphi_4 - 0}{4,537} = \varphi_4 \cdot 0,2204 ;$$

$$I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{x_{12}} = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{6,049} = \varphi_3 \cdot 0,1653 - \varphi_4 \cdot 0,1653 ;$$

$$I_4 = \frac{\varphi_7 - \varphi_4}{x_{16}} = \frac{1,128 - \varphi_4}{3,913} = 0,2883 - \varphi_4 \cdot 0,2556 ;$$

подставим выражения для токов I_7 , I_6 и I_4 в (2.5):

$$\varphi_4 \cdot 0,2204 - \varphi_3 \cdot 0,1653 + \varphi_4 \cdot 0,1653 - 0,2883 + \varphi_4 \cdot 0,2556 = 0$$

или

$$-\varphi_3 \cdot 0,1653 + \varphi_4 \cdot 0,6413 = 0,2883 . \quad (2.6)$$

Итак, мы получили для трех узлов (1, 3 и 4) три уравнения (2.2), (2.4) и (2.6) с тремя неизвестными. Для их решения сначала из уравнения (2.2) выразим потенциал φ_2 :

$$\varphi_2 = \frac{0,2883 + \varphi_3 \cdot 0,6614}{1,2477} = 0,2311 + \varphi_3 \cdot 0,5301$$

и правую часть этого выражения подставим в уравнение (2.4) вместо φ_2 :

$$\varphi_3 \cdot 0,7317 - \varphi_4 \cdot 0,1653 = 0,4411 . \quad 1 \quad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) выразим потенциал узла 3:

$$\varphi_3 = \frac{0,4411 + \varphi_4 \cdot 0,1653}{0,7317} = 0,6028 + \varphi_4 \cdot 0,2259$$

и правую часть полученного выражения подставим в (2.6) вместо φ_3 :

$$-(\varphi_4 \cdot 0,2259 + 0,6028) \cdot 0,1653 + \varphi_4 \cdot 0,6413 = 0,2883 ,$$

откуда находим величину потенциала узла 4

$$\varphi_4 = 0,6423.$$

Подставив значение φ_4 в (2.7), получим уравнение:

$$\varphi_3 \cdot 0,7317 - 0,6423 \cdot 0,1653 = 0,4411,$$

откуда $\varphi_3 = 0,7479$.

Подставив значение φ_3 в (2.2), получим уравнение:

$$\varphi_2 \cdot 1,2477 - 0,7479 \cdot 0,6614 = 0,2883,$$

откуда $\varphi_2 = 0,6275$.

Теперь, когда нам известны потенциалы всех узлов схемы, мы можем определить токи во всех её ветвях:

$$I_1 = \frac{\varphi_5 - \varphi_2}{x_{13}} = \frac{1,128 - 0,6275}{3,913} = 0,1279;$$

$$I_2 = \frac{\varphi_6 - \varphi_3}{x_{14}} = \frac{1,128 - 0,7479}{3,913} = 0,0971;$$

$$I_3 = \frac{\varphi_8}{x_{15}} = \frac{1,128}{3,913} = 0,2883;$$

$$I_4 = \frac{\varphi_7 - \varphi_4}{x_{16}} = \frac{1,128 - 0,6423}{3,913} = 0,1241;$$

$$I_5 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{x_9} = \frac{0,7479 - 0,6275}{1,512} = 0,0796;$$

$$I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{x_{12}} = \frac{0,7479 - 0,6423}{6,049} = 0,0175;$$

$$I_7 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1}{x_{11}} = \frac{0,6423 - 0}{4,537} = 0,1416;$$

$$I_8 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{x_{10}} = \frac{0,6275 - 0}{3,024} = 0,2075.$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ в точке 1, выраженное в относительных базисных единицах, находится согласно первому закону Кирхгофа (см. рис. 2.3):

$$I_{* \text{п(0)-К1}}^{(3)} = I_3 + I_8 + I_7 \quad ;$$

$$I_{* \text{п(0)-К1}}^{(3)} = 0,2883 + 0,2075 + 0,1416 = 0,6375.$$

При базисном токе

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}$$

эта же величина, но выраженная в кА, равняется:

$$I_{п(0)-K1}^{(3)} = I_{*п(0)-K1}^{(3)} \cdot I_6 = 0,6375 \cdot 5,02 = 3,2 \text{ кА.}$$

Таким образом, мы рассчитали начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания, а заодно и её распределение по ветвям схемы, не прибегая к определению результирующего сопротивления и результирующей ЭДС. Однако, эти две величины необходимо знать, если в дальнейшем предстоит произвести расчет несимметричного короткого замыкания.

Заметим, что найти токи I_1 – I_8 в ветвях схемы на рис. 2.3 можно по-другому. Например, составить систему узловых уравнений (как это делалось в курсе ТОЭ), а решение её найти при помощи программы «Mathcad». Предлагаем это проделать самостоятельно.

Для определения результирующих эквивалентных ЭДС E_Σ и сопротивления x_Σ (которые, как известно, совпадают с результирующими эквивалентными величинами прямой последовательности, т.е. $E_{1\Sigma} = E_\Sigma$ и $x_{1\Sigma} = x_\Sigma$) удобно воспользоваться схемой замещения, показанной на рис. 2.4.

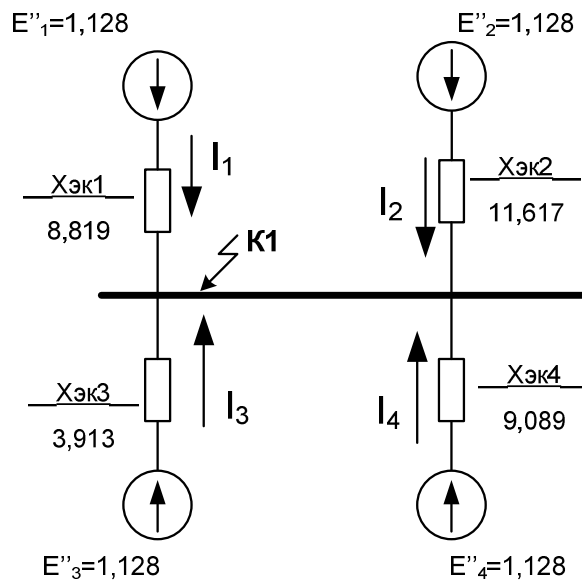


Рис. 2.4. Схема замещения для определения $E_{1\Sigma} = E_\Sigma$ и $x_{1\Sigma} = x_\Sigma$

Эта схема имеет вид четырехлучевой звезды, в которой каждый из источников соединён с точкой короткого замыкания через собственное эквивалентное сопротивление. Зная сверхпереходные ЭДС и найденные выше токи, исходящие от источников, можно рассчитать эти сопротивления:

$$x_{эк1} = \frac{E_1''}{I_1} = \frac{1,128}{0,1279} = 8,819; \quad x_{эк2} = \frac{E_2''}{I_2} = \frac{1,128}{0,0971} = 11,617;$$

$$x_{\text{эк3}} = \frac{E_3''}{I_3} = \frac{1,128}{0,2883} = 3,913; \quad x_{\text{эк4}} = \frac{E_4''}{I_4} = \frac{1,128}{0,1241} = 9,089.$$

Результирующую эквивалентную ЭДС прямой последовательности рассчитаем по известной формуле (см. **Приложение 5**):

$$\begin{aligned} E_{1\Sigma} = E_{\Sigma} &= \frac{\frac{E_1''}{x_{\text{эк1}}} + \frac{E_2''}{x_{\text{эк2}}} + \frac{E_3''}{x_{\text{эк3}}} + \frac{E_4''}{x_{\text{эк4}}}}{\frac{1}{x_{\text{эк1}}} + \frac{1}{x_{\text{эк2}}} + \frac{1}{x_{\text{эк3}}} + \frac{1}{x_{\text{эк4}}}} = \frac{\frac{1,128}{8,819} + \frac{1,128}{11,617} + \frac{1,128}{3,913} + \frac{1,128}{9,089}}{\frac{1}{8,819} + \frac{1}{11,617} + \frac{1}{3,913} + \frac{1}{9,089}} = \\ &= \frac{1,996}{1,769} = 1,128. \end{aligned}$$

И, наконец, определим результирующее сопротивление прямой последовательности:

$$x_{1\Sigma} = x_{\Sigma} = \frac{E_{1\Sigma}}{I_{* \text{п(0)-К1}}^{(3)}} = \frac{1,128}{0,6375} = 1,769.$$

Используя уже известные значения токов в схеме замещения на рис. 2.4 (которые являются действующими значениями периодических составляющих тока трёхфазного короткого замыкания в начальный момент времени), можно с помощью метода типовых кривых рассчитать действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени (см. п. 1.11); определить апериодическую составляющую тока КЗ и ударный ток (см. п. 1.10).

Библиографический список

1. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 59735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Стандартинформ, 2007. – 36 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. – М.: «Энергия», 1970. – 530 с.
3. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.
4. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 283 с.
5. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527-98 / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
6. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник / В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др.; Под ред. В.Н. Винославского. – Ваща шк. Головное издание, 1989. – 422 с.
7. Столбов Ю. А. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: Учебное пособие с примерами и иллюстрациями. – Челябинск, Изд. ЮУрГУ, 2000. – 251 с
8. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
9. Беляева Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983, – 136 с.
10. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергия, 1980. – 648 с
11. Сенигов П. Н. Расчет токов короткого замыкания в электрических системах: Учебное пособие к курсовой работе. – Челябинск: ЧПИ, 1987. – 56 с.
12. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 575 с.
13. Программа расчёта токов коротких замыканий «ENERGO» / Коровин Ю.В., Саломатин Р.Г. // Энергосистема: управление, качество, безопасность: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Екатеринбург.: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 303.
14. Горбунов А.Н., Кабанов И.Л., Кравцов А.В., Редько И.Я. Теоретические основы электротехники: /М.: 1998. – 491 с.
15. Звонарева Л.М., Торбеев И.Т., Оленевич О.К. Стандарт предприятия «Работы курсовые и дипломные. Общие требования к оформлению». ТП ЧГАУ 2-2003. – Челябинск.: РИО ЧГАУ, 2003. - 77.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Элементы электрических систем, используемые в курсовой работе

Таблица П1.1

Элемент	Тип (марка)	Параметры
1	2	3
Генератор	ТВС-32-У3	$S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 32 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,153$
Генератор	ТВФ-63-2ЕУ3	$S_{\text{НОМ}} = 78,75 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,1361$
Генератор	ТВФ-63-2У3	$S_{\text{НОМ}} = 78,75 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,203$
Генератор	ТВФ-100-2У3 или ТВФ-120-2У3	$S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 100 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,192$
Генератор	ТВФ-110-2ЕУ3	$S_{\text{НОМ}} = 137,5 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 110 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,189$
Генератор	ТВВ-160-2ЕУ3	$S_{\text{НОМ}} = 188 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 160 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85;$ $U_{\text{НОМ}} = 18 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,213$
Генератор	ТВВ-200-2У3	$S_{\text{НОМ}} = 235 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8;$ $U_{\text{НОМ}} = 15,75 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,1805$
Генератор	ТВВ-220-2АУ3	$S_{\text{НОМ}} = 258,3 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 220 \text{ МВт};$ $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85; U_{\text{НОМ}} = 15,75 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,1906$
Генератор	ТГВ-300-2У3	$S_{\text{НОМ}} = 353 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 300 \text{ МВт};$ $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85; U_{\text{НОМ}} = 20 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,195$
Генератор	ТВВ-320-2ЕУ3	$S_{\text{НОМ}} = 376,5 \text{ МВА}; P_{\text{НОМ}} = 320 \text{ МВт};$ $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85; U_{\text{НОМ}} = 20 \text{ кВ}; x''_{*d(\text{НОМ})} = 0,173$

Продолжение таблицы П1.1

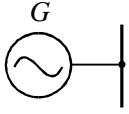
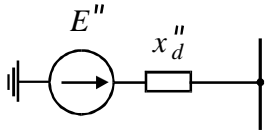
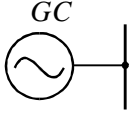
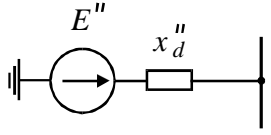
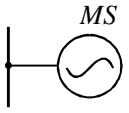
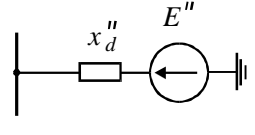
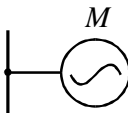
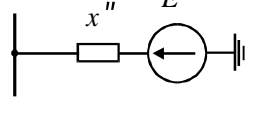
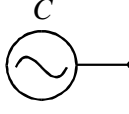
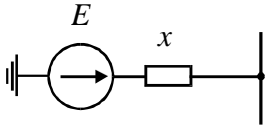
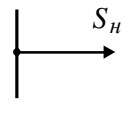
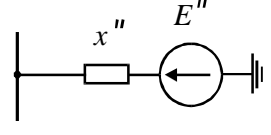
1	2	3
Трансформатор	ТМ-4000/10	$S_{\text{НОМ}} = 4 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 10,0 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 3,15; 6,3 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 7,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 33,5 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТМНС-6300/10	$S_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 10,5 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,3 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 8,0\%; \Delta p_{\text{к}} = 46,5 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДНС-10000/35	$S_{\text{НОМ}} = 10 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 10,5 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 10 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%; \Delta p_{\text{к}} = 60 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДН-10000/110	$S_{\text{НОМ}} = 10 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,6; 11; 16,5; 22; 34,5 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 58 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДН-16000/110	$S_{\text{НОМ}} = 16 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,6; 11; 16,5; 22; 34,5 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 85 \text{ кВт}$
Трансформатор с расщепленной обмоткой	ТРДН-25000/110	$S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{НН1НОМ}} = U_{\text{НН2НОМ}} = 6,3; 10,5 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-Н}} = 10,5\%; \Delta p_{\text{к}} = 120 \text{ кВт}$
Трансформатор трехобмоточный	ТДТН-25000/110	$S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 11; 22; 34,5; 38,5 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,6; 11 \text{ кВ}; u_{\text{кВ-С}} = 10,5\%;$ $u_{\text{кВ-Н}} = 17,5\%; u_{\text{кС-Н}} = 6,5\%; \Delta p_{\text{к}} = 140 \text{ кВт}$
Трансформатор трехобмоточный	ТДТН-40000/110	$S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 38,5 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 6,6; 11 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 10,5\%; u_{\text{кВ-Н}} = 17,5\%; u_{\text{кС-Н}} = 6,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 220 \text{ кВт}$
Трансформатор с расщепленной обмоткой	ТРДН-40000/110	$S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 115 \text{ кВ};$ $U_{\text{НН1НОМ}} = U_{\text{НН2НОМ}} = 6,3; 10,5 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-Н}} = 10,5\%; \Delta p_{\text{к}} = 170 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТД-80000/110	$S_{\text{НОМ}} = 80 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 121 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 10,5; 13,8 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 11\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 310 \text{ кВт};$
Трансформатор	ТДЦ-125000/110	$S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 121 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 10,5; 13,8 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 400 \text{ кВт}$

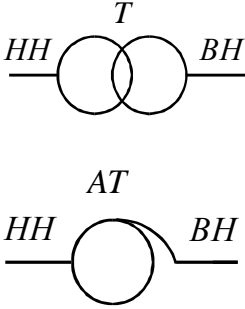
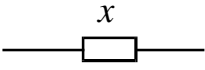
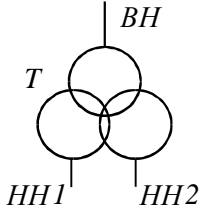
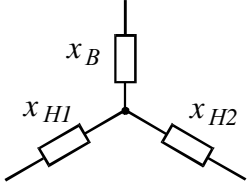
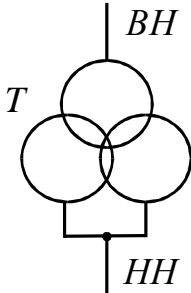
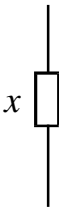
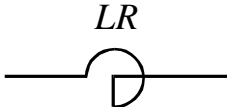
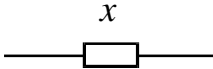
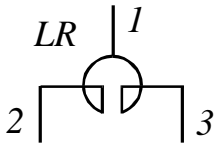
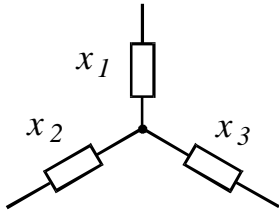
1	2	3
Трансформатор	ТДЦ-200000/110	$S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 121 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 10,5; 15,75 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 550 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДЦ-250000/110	$S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 121 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 15,75 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 640 \text{ кВт};$
Трансформатор	ТДЦ-400000/110	$S_{\text{НОМ}} = 400 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 121 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 20,0 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 900 \text{ кВт}$
Трансформатор трехобмоточный	ТДТН-25000/220	$S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 38,5 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 6,6; 11 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 10,5\%; u_{\text{кВ-Н}} = 17,5\%; u_{\text{кС-Н}} = 6,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 140 \text{ кВт}$
Трансформатор трехобмоточный	ТДТН-40000/220	$S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 38,5 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 6,6; 11 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 10,5\%; u_{\text{кВ-Н}} = 17,5\%; u_{\text{кС-Н}} = 6,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 220 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТД-80000/220	$S_{\text{НОМ}} = 80 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 242 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 10,5; 13,8 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 11\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 315 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДЦ-125000/220	$S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 242 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 10,5; 13,8 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 380 \text{ кВт};$
Трансформатор	ТДЦ-200000/220	$S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 242 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 10,5; 15,75; 18 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 660 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДЦ-250000/220	$S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 242 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 13,8; 15,75 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 640 \text{ кВт}$
Трансформатор	ТДЦ-400000/220	$S_{\text{НОМ}} = 400 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 242 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 13,8; 15,75; 20,0 \text{ кВ}; u_{\text{к}} = 10,5\%;$ $\Delta p_{\text{к}} = 880 \text{ кВт}$

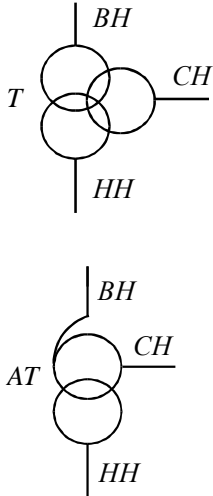
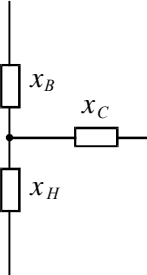
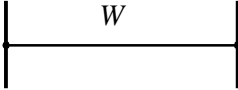
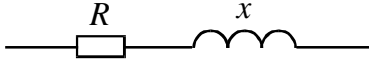
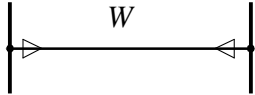
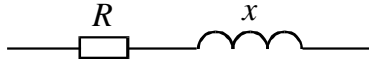
1	2	3
Автотрансформатор	АТДЦТН-63000/220/110	$S_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 10,5; 38,5 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 11\%; u_{\text{кВ-Н}} = 45\%; u_{\text{кС-Н}} = 28\%;$ $\Delta p_{\text{кВ-С}} = 200 \text{ кВт}$
Автотрансформатор	АТДЦТН-125000/220/110	$S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВА}; \Delta p_{\text{кВ-С}} = 315 \text{ кВт};$ $U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ}; U_{\text{СННОМ}} = 121 \text{ кВ};$ $U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 6,6; 10,5; 11; 38,5 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 11\%; u_{\text{кВ-Н}} = 45\%; u_{\text{кС-Н}} = 28\%$
Автотрансформатор	АТДЦТН-200000/220/110	$S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 10,5; 38,5 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 11\%; u_{\text{кВ-Н}} = 45\%; u_{\text{кС-Н}} = 28\%;$ $\Delta p_{\text{кВ-С}} = 430 \text{ кВт}$
Автотрансформатор	АТДЦТН-250000/220/110	$S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}; U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ};$ $U_{\text{СННОМ}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{НННОМ}} = 6,3; 10,5; 38,5 \text{ кВ};$ $u_{\text{кВ-С}} = 11\%; u_{\text{кВ-Н}} = 45\%; u_{\text{кС-Н}} = 28\%;$ $\Delta p_{\text{кВ-С}} = 500 \text{ кВт}$

Схемы замещения элементов электрических систем

Таблица П2.1

Наименование элемента и его основные параметры	Принципиальная схема	Схема замещения
1	2	3
<p>Генератор $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А) или $P_{\text{НОМ}}$ (МВт); $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$; $x_{*d}''(\text{НОМ})$; $x_{*2}(\text{НОМ})$; T_a (с);</p>		
<p>Синхронный компенсатор $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А) или $P_{\text{НОМ}}$ (МВт); $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$; $x_{*d}''(\text{НОМ})$; $x_{*2}(\text{НОМ})$; T_a (с)</p>		
<p>Синхронный двигатель $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А) или $P_{\text{НОМ}}$ (МВт); $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$; $x_{*d}''(\text{НОМ})$ или $K_{\text{П}} = I_{*\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{НОМ}}$ и $M_{*\text{пуск}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{НОМ}}$; $x_{*2}(\text{НОМ})$; T_a (с)</p>		
<p>Асинхронный двигатель $P_{\text{НОМ}}$ (МВт) (механическая на валу); $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$; η; $K_{\text{П}} = I_{*\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{НОМ}}$</p>		
<p>Эквивалентный источник (система) $U_{\text{НОМ}}$ или $U_{\text{ср}}$ (кВ); $S_{\text{к}}$ (МВ·А) или $I_{\text{отк.НОМ}}$ (кА), или $x_{*(\text{НОМ})}$ и $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А).</p>		
<p>Обобщённая нагрузка $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А).</p>		

1	2	3
<p>Двухобмоточный трансформатор (автотрансформатор) $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А); $U_{\text{ВННОМ}}$ (кВ); $U_{\text{НННОМ}}$ (кВ); $u_{\text{к}}$ (%)</p>		
<p>Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А) $U_{\text{ВННОМ}}$ (кВ); $U_{\text{НН1НОМ}}$ (кВ); $U_{\text{НН2НОМ}}$ (кВ); $u_{\text{кВ-Н}}$ (%).</p>		
<p>Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две части обмоткой НН, при параллельной работе обмоток низшего напряжения $S_{\text{НОМ}}$ (МВ·А); $U_{\text{ВННОМ}}$ (кВ); $U_{\text{НН1НОМ}}$ (кВ); $U_{\text{НН2НОМ}}$ (кВ); $u_{\text{кВ-Н}}$ (%).</p>		
<p>Реактор $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $I_{\text{НОМ}}$ (А); $x_{\text{НОМ}}$ (Ом).</p>		
<p>Сдвоенный реактор $U_{\text{НОМ}}$ (кВ); $I_{\text{НОМ}}$ (А); $x_{\text{НОМ}}$ (Ом); $k_{\text{св}}$.</p>		

1	2	3
<p>Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) $S_{\text{ном}}$ (МВ·А); $U_{\text{ВНном}}$ (кВ); $U_{\text{СНном}}$ (кВ); $U_{\text{ННном}}$ (кВ); $u_{\text{кВ-Н}}$(%); $u_{\text{кВ-С}}$(%); $u_{\text{кС-Н}}$ (%).</p>		
<p>Воздушная линия электропередачи $U_{\text{ном}}$ (кВ); $x_{\text{пог}}$ (Ом/км); $r_{\text{пог}}$ (Ом/км)</p>		
<p>Кабельная линия электропередачи $U_{\text{ном}}$ (кВ); $x_{\text{пог}}$ (Ом/км); $r_{\text{пог}}$ (Ом/км);</p>		

Расчетные выражения для определения сопротивлений элементов электрических систем

Таблица ПЗ-1

Наименование элемента	Исходный параметр	Сопротивление элемента, Ом
1	2	3
Генератор (синхронный компенсатор)	$U_{НОМ};$ $S_{НОМ};$ $x''_{*d(НОМ)}$	$x = x''_d = x''_{*d(НОМ)} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$
Синхронный двигатель	$U_{НОМ}; S_{НОМ}$ (или $P_{НОМ}$ и $\cos\varphi_{НОМ}$); $x''_{*d(НОМ)}$ (или $I_{*пуск} \equiv K_{П};$ $M_{*пуск}$)	$S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\cos\varphi_{НОМ}};$ $x = x''_d = x''_{*d(НОМ)} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}};$ $x''_{*d(НОМ)} = \frac{1}{I_{*пуск}} \cdot \sqrt{1 - (M_{*пуск} / I_{*пуск})^2}$
Асинхронный двигатель	$P_{НОМ};$ $\cos\varphi_{НОМ};$ $U_{НОМ};$ $K_{П};$ η	$x = x'' = x''_{*(НОМ)} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}};$ $x''_{*(НОМ)} = \frac{1}{K_{П}};$ $S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\cos\varphi_{НОМ} \cdot \frac{\eta}{100}}$
Обобщённая нагрузка	$U_{НОМ};$ $S_{НОМ}$	$x = x'' = 0,35 \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$
Эквивалентный источник (система)	$U_{ср};$ $S_{к}$	$x = U_{ср}^2 / S_{к}$
	$I_{отк.НОМ}$ (номинальный ток отключения выключателя)	$x = -U_{ср} / (\sqrt{3}I_{отк.НОМ})$ (формула позволяет определить x очень приближённо)
	$U_{НОМ};$ $S_{НОМ};$ $x''_{*(НОМ)}$	$x = x''_{*(НОМ)} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$

Окончание таблицы ПЗ-1

1	2	3
Двухобмоточный трансформатор	$U_{ВНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-Н}.$	$x = \frac{u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$U_{ВНном};$ $U_{СНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-С}; u_{кВ-Н};$ $u_{кС-Н}$	$x_{НВ} = \frac{0,5(u_{кВ-С} + u_{кВ-Н} - u_{кС-Н})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_{СН} = \frac{0,5(u_{кВ-С} + u_{кС-Н} - u_{кВ-Н})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_{НН} = \frac{0,5(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части	$U_{ВНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-Н}.$	$x_{ВН} = \frac{0,125 \cdot u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_{НН1} = x_{НН2} = \frac{1,75 \cdot u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части, при параллельной работе обмоток НН	$U_{ВНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-Н}$	$x = \frac{u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Реактор	$x_{ном}$	$x = x_{ном}$
Сдвоенный реактор	$x_{ном};$ $k_{св}$	$x_1 = -k_{св} \cdot x_{ном}$ $x_2 = x_3 = (1 + k_{св}) \cdot x_{ном}$
Воздушная линия электропередачи	$x_{пог};$ $r_{пог};$ l	$x = x_{пог} \cdot l$ $r = r_{пог} \cdot l;$
Кабельная линия электропередачи	$x_{пог};$ $r_{пог};$ l	$x = x_{пог} \cdot l;$ $r = r_{пог} \cdot l$

Приведенные параметры элементов схемы замещения в системе относительных базисных единиц при средних коэффициентах трансформации

Таблица П4.1

Наименование элемента		Относительные единицы
1		2
Генератор, компенсатор, двигатель	синхронный синхронный	$x_*'' = x_{*d(НОМ)}'' \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}}$
Генератор, синхронный двигатель	в режиме перевозбуждения	$E_*'' = \sqrt{\left(U_{*0(НОМ)} + I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*d(НОМ)}'' \cdot \sin \varphi_0 \right)^2 + \left(I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*d(НОМ)}'' \cdot \cos \varphi_0 \right)^2}$ при предшествующем номинальном режиме: $U_{*0(НОМ)} = 1 \quad I_{*0(НОМ)} = 1 \quad \varphi_0 = \varphi_{НОМ}$
	в режиме невозбуждения	$E_*'' = \sqrt{\left(U_{*0(НОМ)} - I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*d(НОМ)}'' \cdot \sin \varphi_0 \right)^2 + \left(I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*d(НОМ)}'' \cdot \cos \varphi_0 \right)^2}$
Синхронный компенсатор	в режиме перевозбуждения	$E_*'' = U_{*0(НОМ)} + I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*d(НОМ)}''$ при предшествующем номинальном режиме: $U_{*0(НОМ)} = 1 \quad I_{*0(НОМ)} = 1$
	в режиме невозбуждения	$E_*'' = U_{*0(НОМ)} - I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*d(НОМ)}''$
Асинхронный двигатель		$x_*'' = x_{*(НОМ)}'' \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}}$
		$E_*'' = \sqrt{\left(U_{*0(НОМ)} - I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*(НОМ)}'' \cdot \sin \varphi_0 \right)^2 + \left(I_{*0(НОМ)} \cdot x_{*(НОМ)}'' \cdot \cos \varphi_0 \right)^2}$ при предшествующем номинальном режиме: $U_{*0(НОМ)} = 1 \quad I_{*0(НОМ)} = 1 \quad \varphi_0 = \varphi_{НОМ}$
Эквивалентная система		$x_* = \frac{S_{\delta}}{S_K} \quad x_* = x_{*(НОМ)} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} \quad x_* = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ.ОТК} \cdot U_{CP}}$
		$E_* = \frac{U_0}{U_{НОМ}} = U_{*0(НОМ)}$ обычно принимают $E_* = 1$

Окончание таблицы П4.1	
1	2
Обобщённая нагрузка	$x_*'' = 0,35 \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$E_*'' = 0,85$
Двухобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$x_* = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части	$x_{*B} = \frac{0,125 \cdot u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{*H1} = x_{*H2} = \frac{1,75 \cdot u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$x_{*BH} = \frac{0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кВ-Н}} - u_{\text{кС-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{*CH} = \frac{0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{*HH} = \frac{0,5(u_{\text{кВ-Н}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-С}})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части, при параллельной работе обмоток НН	$x_* = \frac{u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Реактор	$x_* = x_{\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
Сдвоенный реактор	$x_{*1} = -k_{\text{св}} \cdot x_{\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
	$x_{*2} = x_{*3} = (1 + k_{\text{св}}) \cdot x_{\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
Воздушная линия	$x_* = x_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2} \quad r_* = r_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
Кабельная линия	$x_* = x_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2} \quad r_* = r_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$

Выражения для преобразования схем замещения

Таблица П5.1

Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Сопротивления элементов преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}}$ <p>где $\underline{Y}_{эк} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n$</p> $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}; \underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3};$ <p>При двух ветвях</p> $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена нескольких источников эквивалентным			$E_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} \sum_{K=1}^n \underline{Y}_K E_K$ <p>При двух ветвях</p> $\dot{E}_{эк} = \frac{\dot{E}_1 \underline{Z}_2 + \dot{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование треугольника в звезду			$\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$
Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_F + \frac{\underline{Z}_H \underline{Z}_F}{\underline{Z}_G}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$ <p>где $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$</p> <p>Аналогично и при большем числе ветвей</p>

Типовые кривые

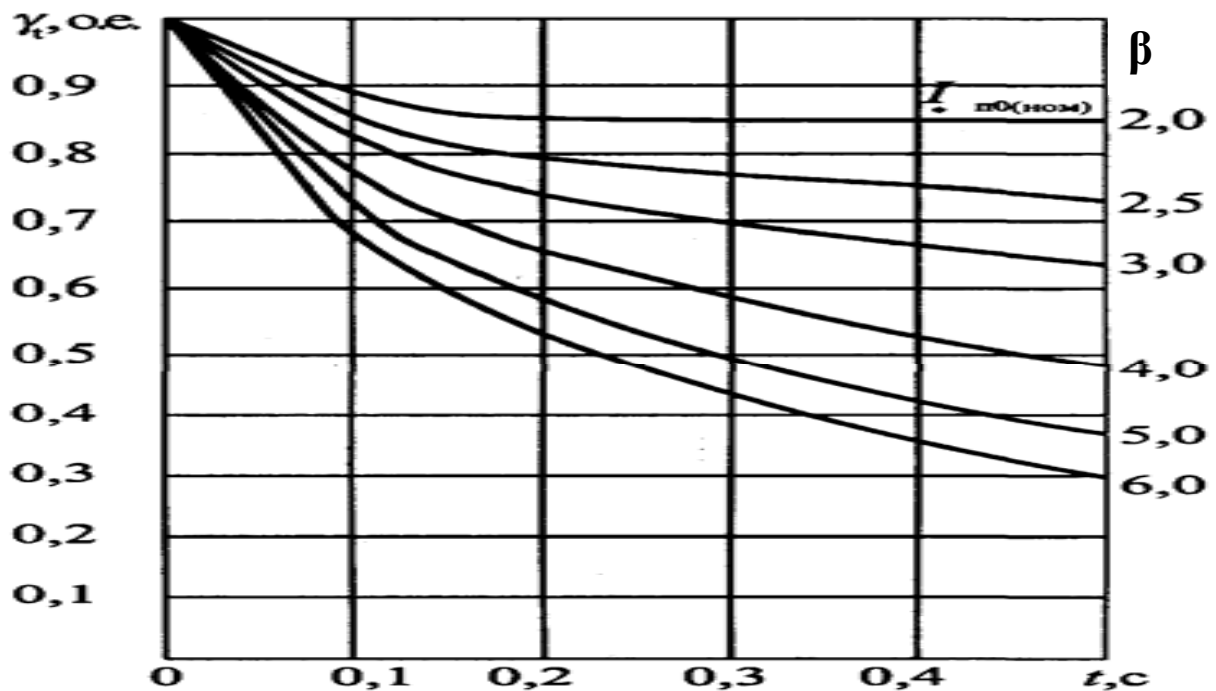


Рис. Пб.1. Типовые кривые для турбогенераторов с тиристорной системой самовозбуждения: ТВФ-100, ТВФ-110, ТВФ-120, ТВВ-160, ТВВ-167, ТВВ-200, ТВВ-220, ТГВ-220, ТЗВ-220, ТЗВ-320

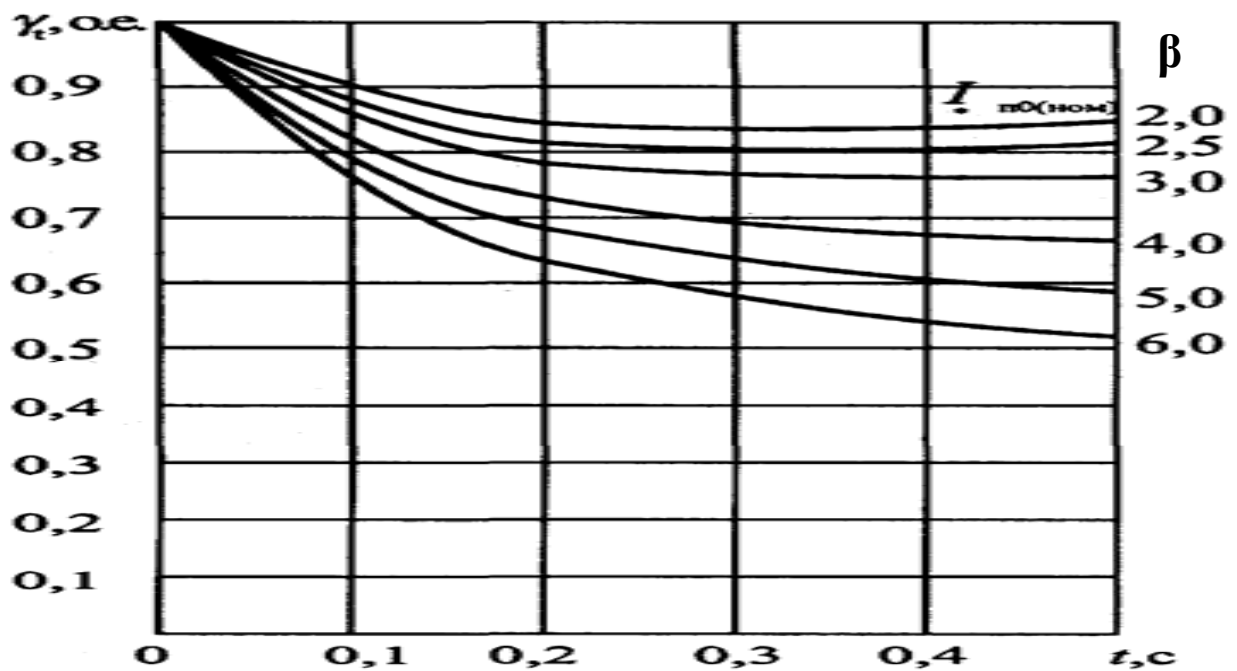


Рис. Пб.2. Типовые кривые для турбогенераторов с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения: ТВФ-63, ТВФ-110)

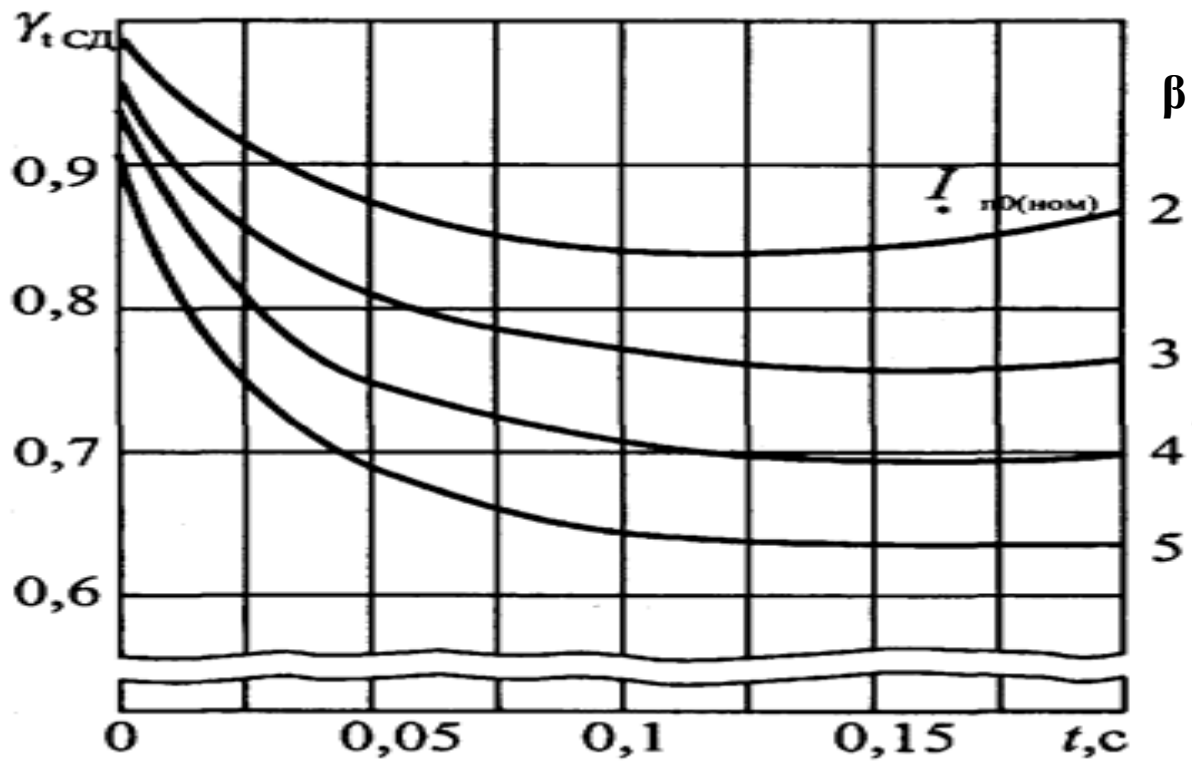


Рис. П6.3. Типовые кривые для синхронного электродвигателя

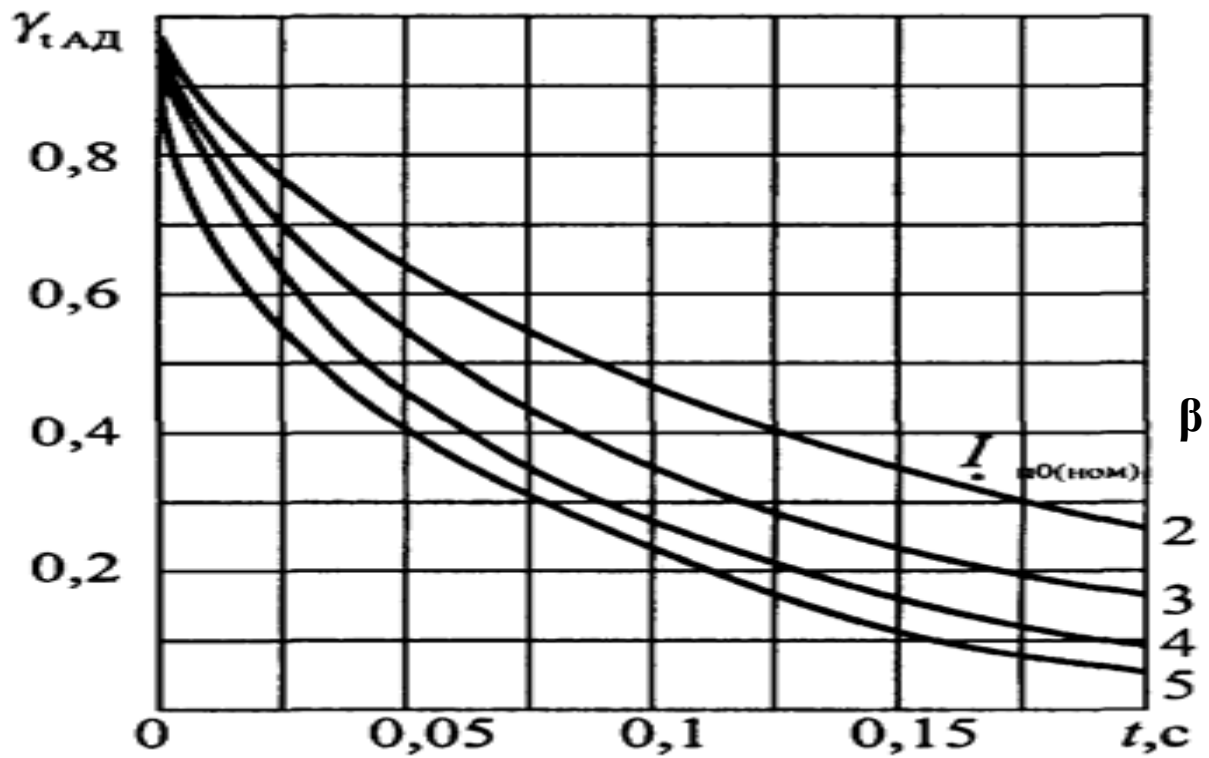


Рис. П6.4. Типовые кривые для асинхронного электродвигателя

**Параметры характерных ветвей электрических систем
(средние значения отношения x/r , постоянной времени T_a и ударного коэффициента K_y для характерных ветвей, примыкающих к точке короткого замыкания [1, 10])**

Таблица П7.1

Наименование ветви или место КЗ	x/r	K_y	T_a , с
Ветвь генератор – трансформатор	30–50	1,9–1,95	0,1–0,2
Ветвь асинхронного двигателя	6,3	1,6	0,02
КЗ за линейным реактором на электростанции	30	1,9	0,1
КЗ за линейным реактором на подстанции	18–20	1,85	0,06
КЗ за кабельной линией 6–10 кВ	3	1,4	0,01
КЗ за трансформатором мощностью до 1000 кВ·А	6,3	1,6	0,02
КЗ на присоединении распределительного устройства повышенного напряжения подстанции	15	1,8	0,05
КЗ на присоединении вторичного напряжения подстанции	20	1,85	0,06
КЗ на шинах собственных нужд электростанции за трансформаторами 16–80 МВ·А	20–30	1,85–1,9	0,06–0,1

Таблица П7.2

Характерные ветви электрической системы, примыкающие к точке КЗ	T_a , с	K_y
Турбогенераторы мощностью: 12 – 60 МВт 100 – 1000 МВт	0,16 – 0,25 0,4 – 0,54	1,940 – 1,995 1,975 – 1,980
Блок турбогенератор (60 МВт) – трансформатор при номинальном напряжении генератора: 6,3 кВ 10,5 кВ	0,2 0,15	1,95 1,935
Блок турбогенератор – повышающий трансформатор 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
Система, связанная с шинами, где рассматривается КЗ, воздушными ЛЭП напряжение: 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
Система, связанная со сборными шинами 6 – 10 кВ через трансформаторы единичной мощностью: 80 МВ·А и выше 32 – 80 МВ·А 5,6 – 32 МВ·А 1000 кВ·А и ниже	0,06 – 0,15 0,05 – 0,1 0,02 – 0,05 0,02	1,85 – 1,935 1,82 – 1,904 1,60 – 1,82 1,6
Ветви, защищенные реактором с номинальным током, А: 1000 А и выше 630 А и ниже	0,23 0,10	1,956 1,904
Распределительные сети напряжением 6 – 10 кВ	0,01	1,369

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Расчет тока при трехфазном коротком замыкании	
1.1. Общее представление о характере тока короткого замыкания	4
1.2. Основные допущения и порядок расчета	9
1.3. Приведение сопротивлений к основной ступени напряжения	10
1.4. Система относительных единиц	13
1.5. Выражения для определения ЭДС и сопротивлений элементов расчетной схемы и приведения их к базисным условиям	15
1.6. Расчетная схема и параметры её элементов	157
1.7. Расчёт параметров схемы замещения	21
1.8. Преобразование схемы замещения	23
1.9. Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К4	25
1.10. Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени и ударного тока	Ошибка! Закладка не определена.
	30
1.11. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени	34
1.12. Расчет тока короткого замыкания в точке К8	36
1.13. Учет влияния электродвигателей при расчете тока трехфазного короткого замыкания	44
1.14. Особенности расчета токов короткого замыкания в системах собственных нужд электростанций	51
2. Применение узловых потенциалов для расчёта тока трёхфазного короткого замыкания	54
2.1. Расчетная схема и её схема замещения	54
2.2. Расчёт тока трёхфазного короткого замыкания с помощью узловых потенциалов	56
Библиографический список	62
Приложения	
Приложение 1. Элементы электрических систем, используемые в курсовой работе	63
Приложение 2. Схемы замещения элементов электрических систем	67
Приложение 3. Расчётные выражения для определения сопротивлений элементов электрических систем	70
Приложение 4. Приведенные параметры элементов схемы замещения в системе относительных базисных единиц при средних коэффициентах трансформации	72
Приложение 5. Выражения для преобразования схем замещения	74
Приложение 6. Типовые кривые	75
Приложение 7. Параметры характерных ветвей электрических систем	77