



Министерство образования и науки Самарской области
Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение
Самарской области
«САМАРСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»
(ГБПОУ «СЭК»)

О.Н. Спирина

Тема 2.1. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Конспект лекций для студентов
специальности 13.02.03 Электрические станции, сети и системы

ПМ.02 Эксплуатация электрооборудования электрических станций,
сетей и систем

МДК.02.02. Релейная защита электрооборудования электрических
станций сетей и систем

Самара 2016

Печатается по решению методического совета государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения Самарской области «Самарский энергетический колледж»

Конспект лекций по теме 2.1 *Расчёт токов короткого замыкания* МДК.02.02. *Релейная защита электрооборудования электрических станций сетей и систем* ПМ.02 *Эксплуатация электрооборудования электрических станций, сетей и систем* для студентов специальности 13.02.03 / сост: Спирина О.Н. – Самара: ГБПОУ «СЭК», 2016 – 24 с.

В издании представлен конспект лекций по теме 2.1 *Расчёт токов короткого замыкания* МДК.02.02. *Релейная защита электрооборудования электрических станций сетей и систем* ПМ.02 *Эксплуатация электрооборудования электрических станций, сетей и систем*

Замечания, предложения и пожелания направлять в ГБПОУ «СЭК» по адресу: 443001, г. Самара, ул. Самарская 205-А или по электронной почте info@sam-ek.ru

Введение

Цель настоящих лекций – оказание помощи студентам при самостоятельном изучении методов расчётов токов короткого замыкания и при проведении самих расчётов в период курсового и дипломного проектирования.

Пособие содержит основы методики расчётов токов короткого замыкания, примеры расчётов и необходимые при проектировании справочные данные.

Студентам рекомендуется вначале изучить физические процессы короткого замыкания по основной учебной литературе. Явление короткого замыкания протекает по-разному в зависимости от видов короткого замыкания, мощности питающих источников (бесконечной или ограниченной мощности), удалённости точки короткого замыкания от источника питания и т. д.

Только усвоив предварительно особенности процессов короткого замыкания, протекающих в различных условиях, можно обоснованно выбрать нужный метод расчёта, правильно подобрать справочный материал и использовать в качестве образца тот или иной пример расчёта.

На точность расчётов и их методику существенно влияет цель расчётов токов короткого замыкания. В данном пособии рассматриваются методы расчётов, которые используются для выбора электрооборудования.

При изучении настоящего пособия очень важно обратить внимание на принципы составления расчётных схем, схем замещения и выражений для определения сопротивления цепи короткого замыкания, как в относительных единицах, так и в именованных.

Тема 2.1. Расчёт токов короткого замыкания

Общая характеристика процесса короткого замыкания:
виды КЗ, причины и последствия КЗ

Короткое замыкание в электроустановке (КЗ) – всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки между собой или с землёй, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

Короткое замыкание на землю в электроустановке (КЗ на землю) – короткое замыкание в электроустановке, обусловленное соединением с землёй какого-либо её токоведущего элемента. КЗ могут происходить в электроустановках переменного и постоянного тока.

Виды коротких замыканий можно разделить на две группы – *симметричные* и *несимметричные* КЗ.

Симметричное короткое замыкание – КЗ в электроустановке, при котором все её фазы находятся в одинаковых условиях.

К симметричным КЗ относится только трёхфазное короткое замыкание.

Трёхфазное короткое замыкание – КЗ между тремя фазами в трёхфазной электроэнергетической системе.

Примечание: При трёхфазном КЗ наличие или отсутствие замыкания на землю не влияет на параметры КЗ.

Несимметричное короткое замыкание – КЗ в электроустановке, при котором одна из её фаз находится в условиях, отличных от условий других фаз.

К несимметричным КЗ относятся:

- *Однофазное короткое замыкание на землю* – КЗ на землю в трёхфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземлёнными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза.

Примечание: Однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью коротким не является.

- *Двухфазное короткое замыкание* – КЗ между двумя фазами в трёхфазной электроэнергетической системе.
- *Двухфазное короткое замыкание на землю* – КЗ на землю в трёхфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземлёнными нейтральными силовых элементов, при котором с землёй соединяются две фазы.
- *Двойное короткое замыкание на землю в электроустановке* – КЗ на землю двух разных фаз в трёхфазной электроэнергетической системе в разных, но электрически связанных между собой точках.

Для краткости для обозначения различных видов КЗ обычно применяют следующие сокращения:

- $K^{(3)}$ - трёхфазное КЗ;
- $K^{(2)}$ - двухфазное КЗ;
- $K^{(1,1)}$ - двухфазное КЗ на землю;
- $K^{(1)}$ - однофазное КЗ на землю;

Причинами КЗ обычно являются нарушения изоляции, вызванные:

- её механическими повреждениями,
- старением,
- набросами посторонних тел на провода линий электропередачи,
- проездом под линиями негабаритных механизмов (кранов с поднятой стрелой и т.п.),
- прямыми ударами молнии,
- перенапряжениями,
- неудовлетворительным уходом за оборудованием.

Часто **причиной повреждений** в электроустановках, сопровождающихся короткими замыканиями, являются неправильные действия обслуживающего персонала. Примерами таких действий являются ошибочные отключения разъединителем цепи с током, включения разъединителей на короткую, ошибочные действия при переключениях в главных схемах и в схемах релейной защиты и автоматики.

Последствия КЗ. При КЗ токи в повреждённых фазах увеличиваются в несколько раз по сравнению с их нормальным значением, а напряжения снижаются, особенно вблизи места повреждения. Протекание больших токов КЗ вызывает повышенный нагрев проводников, а это ведёт к увеличению потерь электроэнергии, ускоряет старение и разрушение изоляции, может привести к потере механической прочности токоведущих частей и электрических аппаратов.

Снижение уровня напряжения при КЗ в сети ведет к уменьшению вращающего момента электродвигателей, их торможению, снижению производительности и даже к полному останову.

Резкое снижение напряжения при КЗ может привести к нарушению устойчивости параллельной работы генераторов электростанций и частей электрической системы, возникновению системных аварий.

Трёхфазное короткое замыкание

Короткое замыкание в цепи, питающейся от шин неизменного напряжения

На рис.1 показана простая симметричная трехфазная цепь с активно-индуктивным сопротивлением, что характерно для большинства реальных электрических сетей. Цепь питается от источника, у которого в нормальном режиме работы и при КЗ на зажимах сохраняется симметричная и неизменная по значению трёхфазная система напряжений.

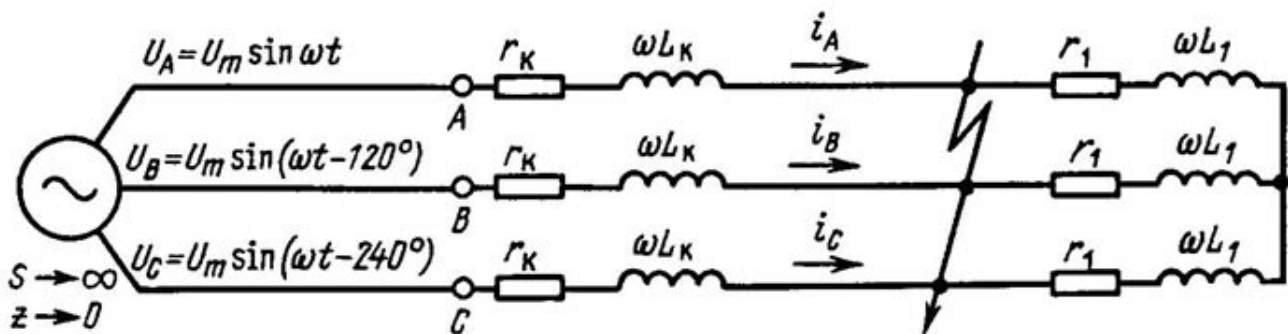


Рисунок 1 – Трёхфазная симметричная цепь, питаемая от шин неизменного напряжения (от источника бесконечной мощности)

Векторная диаграмма рассматриваемой цепи для нормального режима работы показана на рис.2, а. Угол φ между током и напряжением каждой фазы определяется соотношением активных и индуктивных сопротивлений всей цепи, включая нагрузку.

Короткое замыкание делит цепь на две части: правую с сопротивлениями r_1 и $x_1 = \omega L_1$ в каждой фазе и левую, содержащую источник питания и сопротивления цепи КЗ r_K и $x_K = \omega L_K$. Процессы в обеих частях схемы при трёхфазном КЗ протекают независимо.

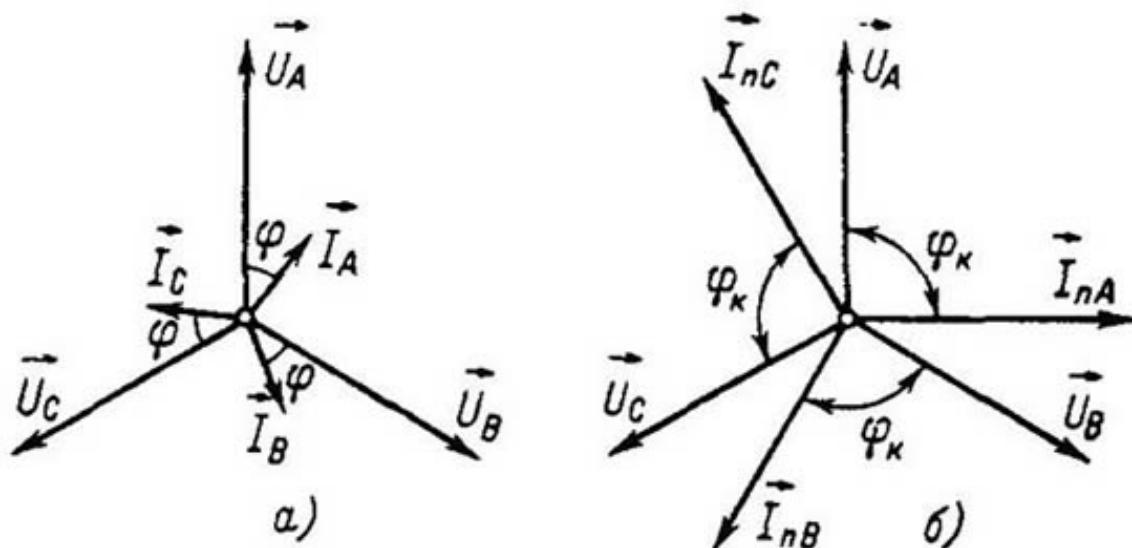


Рисунок 2 – Векторные диаграммы токов и напряжений:
а - в нормальном режиме; б - при трехфазном коротком замыкании

Правая часть рассматриваемой цепи оказывается зашунтированной КЗ, и ток в ней будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасённая в индуктивности L_1 энергия магнитного поля не перейдёт в тепло, выделяющееся в активном сопротивлении r_1 . Этот ток при активно-индуктивном характере сопротивления цепи не превышает тока нормального режима и, постепенно затухая до нуля, не представляет опасности для оборудования.

Изменение режима в левой части цепи, содержащей источник питания, при наличии индуктивности L_K также сопровождается переходным процессом. Из курса «Теоретические основы электротехники» известно уравнение, описывающее этот процесс:

$$u = ir_K + L_K \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где u и i – соответственно мгновенные значения напряжения и тока рассматриваемой фазы.

Решение этого уравнения даёт выражение для мгновенного значения тока в любой момент времени t от начала КЗ:

$$i_{k,t} = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a,0} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (2)$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения источника; Z_K – полное сопротивление присоединённого к источнику участка цепи (цепи КЗ); α – фазовый угол напряжения источника в момент $t = 0$; φ_K – угол сдвига тока в цепи КЗ относительно напряжения источника той же фазы; T_a – постоянная времени цепи КЗ:

$$T_a = \frac{L_K}{r_K} = \frac{x_K}{\omega r_K}. \quad (3)$$

Как видно из (2), полный ток КЗ складывается из двух составляющих: вынужденной, обусловленной действием напряжения источника (первый член в пра-

вой части уравнения), и свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности L_K (второй член уравнения).

Вынужденная составляющая тока КЗ имеет периодический характер с частотой, равной частоте напряжения источника. Называют эту составляющую обычно периодической составляющей тока КЗ

$$i_{n,t} = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) = I_{n,m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K), \quad (4)$$

где $I_{n,m}$ – амплитудное значение периодической составляющей тока.

Угол сдвига φ_K между векторами тока и напряжения определяется соотношением активных и индуктивных сопротивлений цепи КЗ. Для реальных цепей обычно $x_K \gg r_K$ и $\varphi_K = 45-90^\circ$. Векторная диаграмма для периодической составляющей КЗ при $\varphi_K = 90^\circ$ показана на рис.2,б. Свободная составляющая тока

$$i_{a,t} = i_{a,0} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \quad (5)$$

имеет аperiодический характер изменения, на основании чего эту составляющую тока называют также аperiодической составляющей тока КЗ.

Начальное значение аperiодической составляющей тока КЗ в каждой фазе определится по выражению (2) для момента времени $t=0$:

$$i_{a,0} = i_{K,0} - i_{n,0}; \quad (6)$$

здесь $i_{K,0}$ – начальное значение тока КЗ, которое с учётом невозможности изменения тока скачком в цепи с индуктивностью равно $i_{(0)}$ – току предшествующего режима в данной фазе к моменту $t=0$. Значение периодической составляющей тока при $t=0$ определится как

$$i_{n,0} = I_{n,m} \sin(\alpha - \varphi_K). \quad (7)$$

Представляют определённый интерес условия возникновения максимально возможного значения полного тока КЗ и его аperiодической составляющей. Из (6) и (7) при $x_K \gg r_K$ и $\varphi_K \approx 90^\circ$ следует, что максимальное значение тока $i_{a,0}$ будет в случае, если напряжение в момент возникновения КЗ проходит через нулевое значение ($\alpha=0$) и тока в цепи до КЗ нет, т.е. $i_{(0)}=0$. При этом $i_{a,0}=I_{n,m}$. Кривая изменения тока при условии максимального значения аperiодической составляющей тока показана на рис.4. Здесь $i_{a,0}=I_{n,m}$.

Максимальное мгновенное значение полного тока наступает обычно через 0,01 с после начала процесса КЗ (рис.3). Оно носит название ударного тока и обозначается i_y . Ударный ток определится из (2) для момента времени $t=0,01$ с:

$$i_y = I_{n,m} + I_{n,m} e^{-\frac{0,01}{\tau_a}} = I_{n,m} (1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_a}}), \quad (8)$$

или

$$i_y = k_y I_{n,m}, \quad (9)$$

где k_y – ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени цепи КЗ:

$$k_y = (1 + e^{-\frac{0,01}{T_s}}). \quad (10)$$

Переходный процесс в случае питания от шин неизменного напряжения завершается после затухания аperiodической составляющей тока, и далее полный ток КЗ равен его периодической составляющей, неизменной по амплитуде.

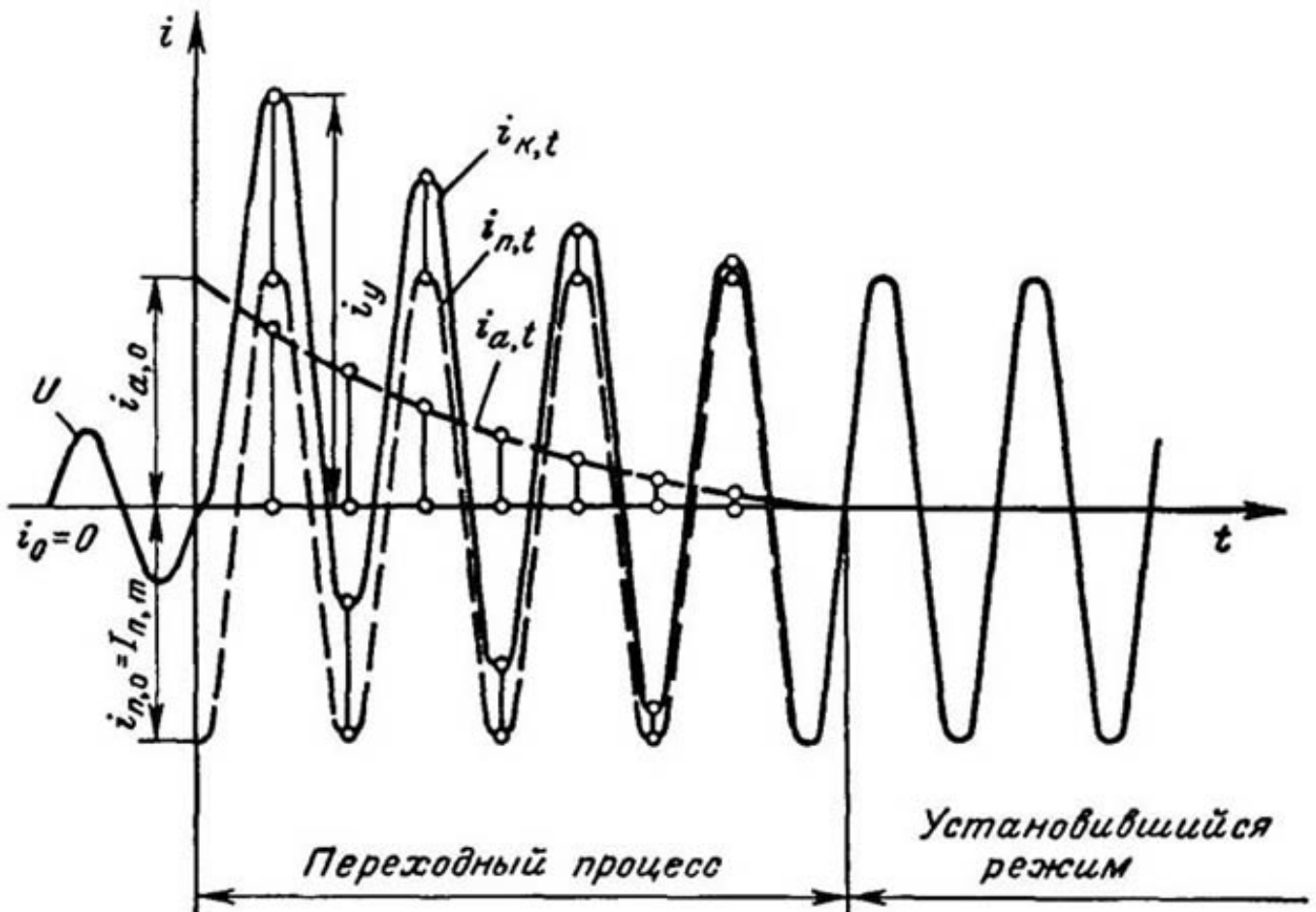


Рисунок 3 – Изменение тока КЗ в цепи, питаемой от шин неизменного напряжения при максимальном значении аperiodической составляющей

Действующее значение тока для произвольного момента времени КЗ t равно:

периодической составляющей

$$I_{п,t} = I_{п,0} = \frac{I_{п,m}}{\sqrt{2}} = \text{const}; \quad (11)$$

аperiodической составляющей

$$I_{a,t} = i_{a,t}; \quad (12)$$

полного тока КЗ

$$I_{к,t} = \sqrt{I_{п,t}^2 + i_{a,t}^2} \quad (13)$$

Расчёт токов КЗ производится для выбора и проверки электрических аппаратов и токоведущих частей, а также для выбора уставок релейной защиты.

Расчётными токами КЗ являются:

- $I_{по}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ (определяется для момента времени $t = 0$);
- $I_{пт}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ для момента времени начала расхождения дугогасительных контактов коммутационного аппарата τ ;
- $i_{уд}$ – ударный ток (амплитуда мгновенного значения тока КЗ);
- $i_{ат}$ – аperiodическая составляющая тока КЗ в момент времени τ ;

Ток $I_{по}$ необходим для определения теплового воздействия тока КЗ.

Ток $i_{уд}$ – для определения электродинамического воздействия тока КЗ.

Токи $I_{пт}$, $i_{ат}$ – для проверки выключателей на отключающую способность.

При выполнении расчётов используются следующие *допущения*:

1. При расчёте действующего значения периодической составляющей тока КЗ в установках напряжением свыше 1000 В 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: $r_{\Sigma} \leq 0,3 x_{\Sigma}$.

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

3. Пренебрегают намагничивающими токами трансформаторов.

4. Не учитывают поперечные ёмкости 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 трёхфазная 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, КЗ считается металлическим, то есть переходное сопротивление электрической дуги в месте КЗ принято равным нулю.

Порядок расчёта тока трёхфазного КЗ

1. Составляется расчётная схема электрической сети – упрощённая однолинейная схема электрической системы с указанием всех влияющих на ток КЗ элементов.

2. По расчётной схеме составляется схема замещения для заданной точки КЗ и определяются параметры элементов схемы. Источники питания вводятся своими ЭДС и сопротивлениями, а остальные элементы – только сопротивлениями.

3. Путём 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 $I_{по}$ 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, с помощью метода типовых кривых определяют действующие значения периодической составляющей тока КЗ в интересующие моменты времени.

Расчётная схема электрической сети – упрощённая однолинейная схема электрической системы с указанием всех влияющих на ток КЗ элементов.

В схему *включаются* генераторы, силовые трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы и *наносятся* параметры, необходимые для расчёта: номинальные напряжения и мощности, длины линий, материал и сечения проводов (кабелей) или индуктивные сопротивления линий (при необходимости и активные сопротивления).

Сопротивления выключателей, разъединителей и других аппаратов, соединительных кабелей и шин в распределительных устройствах напряжением выше 1000 В не учитываются и сами элементы на расчётную схему не наносятся.

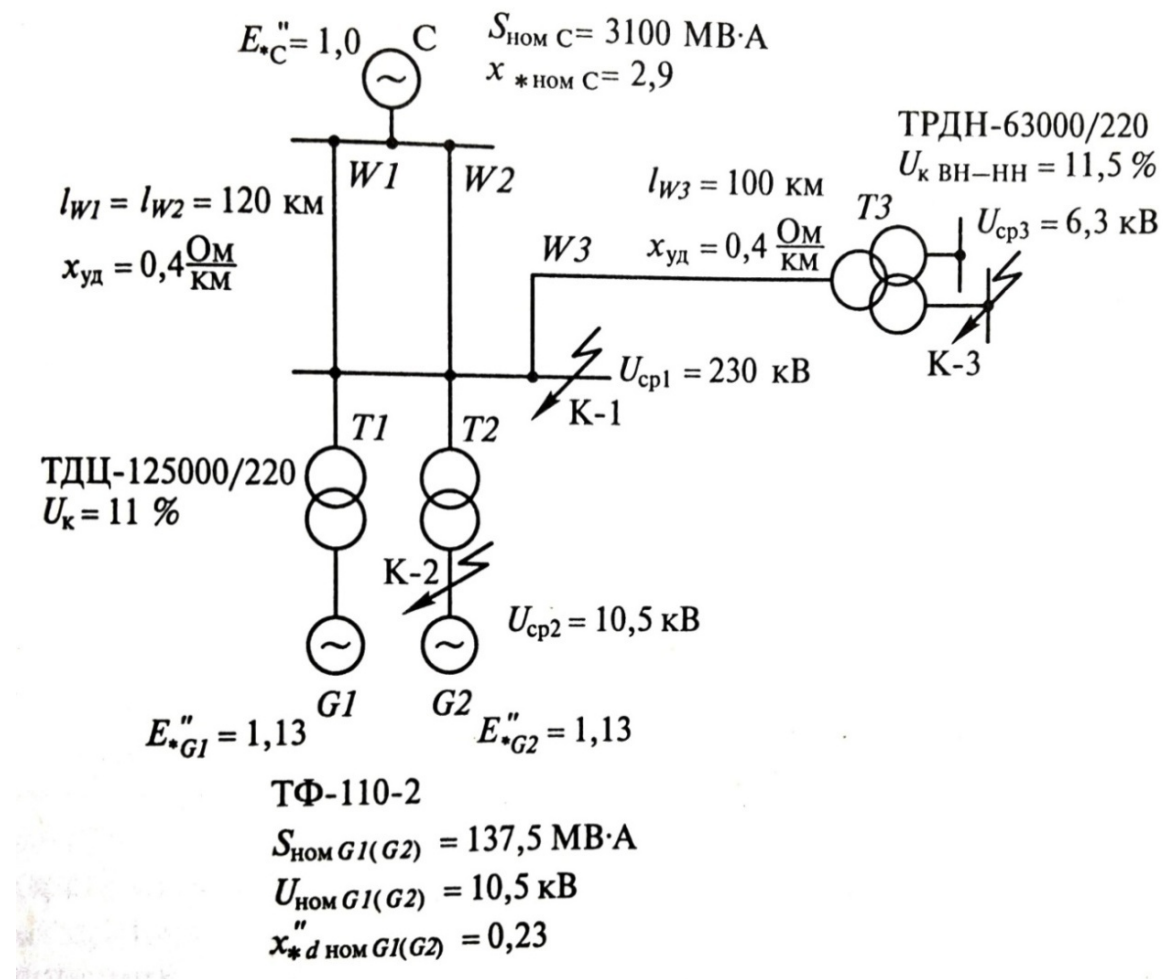


Рисунок 4 - Пример расчетной схемы

Расчётные точки КЗ

Для определения числа и мест точек КЗ прежде всего нужно знать какое электрооборудование расчётной схемы подлежит проверке на устойчивость от действия токов КЗ (ПУЭ п. п. 1.4.1, 1.4.2 и 1.4.3). Расчетные точки намечаются так, чтобы по выбираемому оборудованию протекал наибольший ток КЗ, т. е. чтобы оборудование попадало в наиболее тяжелые условия.

ПУЭ 1.4.6: Расчетный ток КЗ следует определять, исходя из условия повреждения в такой точке рассматриваемой цепи, при КЗ в которой аппараты и проводники этой цепи находятся в наиболее тяжелых условиях.

Схема замещения составляется по расчётной схеме. Как правило, для каждой точки КЗ.

Все элементы на схемах замещения показываются в виде индуктивных и активных сопротивлений.

Все сопротивления на схеме замещения нумеруются в виде дроби, числителем которой является порядковый номер элемента, а знаменателем – его величина. На схеме замещения указываются также средние номинальные напряжения ступеней.

Шкала $U_{\text{ср}}$: 0,23; 0,4; 0,525; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ

Существует 2 метода расчета:

- в относительных единицах;
- в именованных единицах.

Для установок напряжением выше 1000 В сопротивления обычно выражаются в относительных единицах, а для установок напряжением ниже 1000 В – в именованных единицах.

При вычислении сопротивлений в относительных единицах все сопротивления приводятся к базисным условиям. При производстве расчётов в именованных единицах все сопротивления приводятся к той ступени напряжения, где находится расчётная точка.

Расчёт токов КЗ в относительных единицах

Расчёт индуктивных сопротивлений производится в относительных единицах, приведённых к базисной мощности (S_6). За S_6 принимается любое число, удобное для расчётов: 10, 100, 1000 МВА. Указывается порядковый номер и величина сопротивлений на схеме замещения в виде дроби (порядковый номер/величина).

Источники питания вводятся своими ЭДС (прил. А.1) и сопротивлениями, а остальные элементы – только сопротивлениями.

Величина сопротивлений рассчитывается по формулам приложения А.2 (для относительных единиц).

Производится преобразование схемы к простейшему виду, чтобы источник или группа источников соединялись с точкой КЗ через одно результирующее

сопротивление. Основные формулы преобразования схем приведены в приложении А.3.

Для упрощения расчётов генераторы, а иногда генераторы и энергосистему, допускается объединять в один эквивалентный источник питания. При объединении источников питания их мощности суммируются, а сопротивления ветвей складываются параллельно.

Если КЗ произошло непосредственно на выводах генератора, то объединять его с другими источниками нельзя.

В случае объединения источников питания с различными значениями ЭДС $E''_{*эКВ}$ определяется по формуле:

$$E''_{*эКВ} = \frac{E''_{*1} \cdot x_{*2} + E''_{*2} \cdot x_{*1}}{x_{*1} + x_{*2}} \quad (14)$$

Расчёт токов трехфазного КЗ производится по формуле:

$$I_{по} = I_6 E''_{*эКВ} / (\sqrt{3} \cdot x_{*рез}); \quad (15)$$

где $I_{по}$ – периодическая слагающая тока КЗ в начальный момент времени, кА;

I_6 – базисный ток на ступени напряжения точки КЗ;

$x_{*рез}$ – результирующее сопротивление до точки КЗ.

$$I_6 = S_6 / (\sqrt{3} \cdot U_{ср}) \quad (16)$$

где $U_{ср}$ – среднее напряжение в точке КЗ.

$$i_y = \sqrt{2} k_y \cdot I_{по} \quad (17)$$

где i_y – ударный ток КЗ, кА; k_y – ударный коэффициент, таблица А.5.

На величину тока КЗ могут оказать влияние асинхронные электродвигатели мощностью более 100 кВт, если они присоединены вблизи места КЗ. Объясняется это тем, что при КЗ резко снижается напряжение, и электродвигатели, вращаясь по инерции, генерируют ток в место КЗ. Этот ток быстро затухает, поэтому влияние электродвигателей учитывают при определении $I_{по}$ и i_y .

$$I_{под} = (0,9/x''_{*d}) I_{ном д} \quad (18)$$

где 0,9 – расчётная относительная ЭДС;

x''_{*d} – относительное сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного электродвигателя; $I_{ном д}$ – номинальный ток одновременно работающих электродвигателей, кА.

В среднем можно принять $x''_{*d} = 0,2$, тогда

$$I_{под} = (0,9/0,2) = 4,5 I_{ном д} \quad (19)$$

Апериодическая составляющая тока КЗ от асинхронных двигателей затухает очень быстро, поэтому её можно не учитывать при определении ударного тока, когда

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{под} = \sqrt{2} \cdot 4,5 \cdot I_{ном д} = 6,5 \cdot I_{ном д} \quad (20)$$

Пример решения задачи. Определить величины токов КЗ в точках К1, К2, КЗ и на зажимах генератора при КЗ в указанных точках.

Исходные данные для выполнения расчёта:

Генератор: $S_{\text{номГ}} = 75 \text{ МВА}$,
 $U_{\text{номГ}} = 10.5 \text{ кВ}$,
 $x''_d = 0.195$.

Трансформатор Т1: $S_{\text{номТ}} = 80 \text{ МВА}$,
 $U_{\text{номВН}} = 115 \text{ кВ}$,
 $U_{\text{номНН}} = 10.5 \text{ кВ}$,
 $u_{\text{к\%}} = 11\%$.

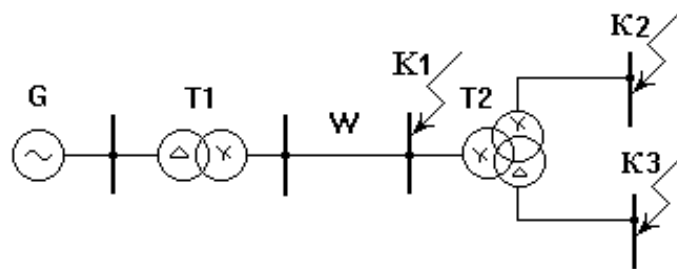


Рисунок 5 – Расчётная схема электроустановки

Линия W: одноцепная линия на ж/б опорах длиной 65 км, $X_{\text{уд}} = 0.4 \text{ Ом/км}$.

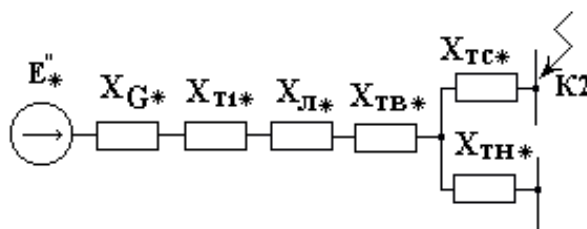
Трансформатор Т2: $S_{\text{номТ}} = 63 \text{ МВА}$,

$U_{\text{номВН}} = 115 \text{ кВ}$, $u_{\text{кВН\%}} = 18 \%$.

$U_{\text{номВС}} = 38.5 \text{ кВ}$, $u_{\text{кВС\%}} = 10.5 \%$.

$U_{\text{номНН}} = 6.6 \text{ кВ}$, $u_{\text{кН\%}} = 7\%$.

Схема замещения для определения тока КЗ в расчётной точке К2:



Примем значение базовой мощности $S_б = 100 \text{ МВА}$.

Приведённое значение сверхпереходной ЭДС $E'' = 1.08$ (мощность генератора $< 100 \text{ МВА}$, см. табл.А.1 приложения А).

Сопротивление генератора:

$$X_{G*} = x''_d \frac{S_б}{S_{\text{номГ}}} = 0.195 \cdot \frac{100}{75} = 0.26$$

Сопротивление двухобмоточного трансформатора Т1:

$$X_{T1*} = \frac{u_{\text{к\%}}}{100} \frac{S_б}{S_{\text{номТ1}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0.138.$$

Сопротивление линии:

$$X_{Л*} = X_{\text{уд}} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{\text{ср}}^2} = 0.4 \cdot 65 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.197$$

Напряжения короткого замыкания обмоток трёхобмоточного трансформатора Т2:

$$u_{\text{КВ}}\% = 0.5 (u_{\text{КВН}}\% + u_{\text{КВС}}\% - u_{\text{КН}}\%) = 0.5 (18 + 10.5 - 7) = 10.75 \%,$$

$$u_{\text{КС}}\% = 0.5 (u_{\text{КВС}}\% + u_{\text{КН}}\% - u_{\text{КВН}}\%) = 0.5 (10.5 + 7 - 18) = -0.25 \%,$$

$$u_{\text{КН}}\% = 0.5 (u_{\text{КВН}}\% + u_{\text{КН}}\% - u_{\text{КВС}}\%) = 0.5 (18 + 7 - 10.5) = 7.25\%.$$

Сопротивление обмоток трансформатора Т2:

$$X_{TB*} = \frac{u_{ke\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{номТ}} = \frac{10.75}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0.171.$$

$$X_{TC*} = \frac{u_{kc\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{номТ}} = \frac{-0.25}{100} \cdot \frac{100}{63} = -0.004.$$

$$X_{TH*} = \frac{u_{kh\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{номТ}} = \frac{7.25}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0.115$$

Если пренебречь незначительным сопротивлением обмотки среднего напряжения, то результирующее сопротивление току КЗ в точке К2 будет равно:

$$X_{рез2*} = X_{G*} + X_{T1*} + X_{л*} + X_{TB*} = 0,26 + 0,138 + 0,197 + 0,171 = 0,766$$

Базовый ток на ступени КЗ со средним напряжением 37 кВ, кА:

$$I_{\delta 2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$$

Периодическая составляющая тока КЗ, кА:

$$I_{no2} = \frac{E''}{X_{рез2*}} \cdot I_{\delta 2} = \frac{1.08}{0.766} \cdot 1.56 = 2.199 \text{ кА}$$

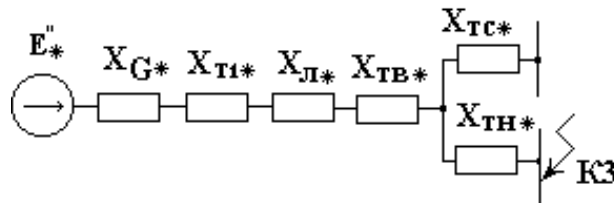
По таблице А.5 приложения А определим $k_{уд} = 1,82$. Ударный ток в расчётной точке, кА:

$$i_{y\delta 2} = \sqrt{2} \cdot I_{no2} \cdot k_{y\delta 2} = \sqrt{2} \cdot 2.199 \cdot 1.82 = 5.66 \text{ кА}$$

Ток на зажимах генератора при коротком замыкании в расчётной точке К2, кА:

$$I_G = I_{no2} \cdot \left(\frac{U_{\delta 2}}{U_{ном, G}} \right) = 2.199 \cdot \left(\frac{37}{10.5} \right) = 7.75$$

Схема замещения для расчётной точки КЗ:



$$X_{рез3*} = X_{G*} + X_{T1*} + X_{л*} + X_{T\delta*} + X_{TH*} = 0,26 + 0,138 + 0,197 + 0,171 + 0,115 = 0,881$$

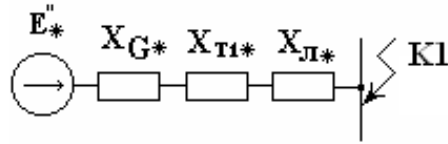
$$I_{\delta 3} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 3}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 9.16 \text{ кА}$$

$$I_{no3} = \frac{E''}{X_{рез3*}} \cdot I_{\delta 3} = \frac{1.08}{0.881} \cdot 9.16 = 11.2 \text{ кА}$$

$$i_{y\delta 3} = \sqrt{2} \cdot I_{no3} \cdot k_{y\delta 3} = \sqrt{2} \cdot 11.2 \cdot 1.904 = 30.2 \text{ кА}$$

$$I_G = I_{no3} \cdot \left(\frac{U_{\delta 3}}{U_{ном, G}} \right) = 11.2 \cdot \left(\frac{6.3}{10.5} \right) = 6.72 \text{ кА}$$

Схема замещения для точки К1:



$$X_{рез1*} = X_{G*} + X_{T1*} + X_{Л*} = 0,26 + 0,138 + 0,197 = 0.595$$

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0.502 \text{ kA}$$

$$I_{no1} = \frac{1.08}{0.595} \cdot 0.502 = 0.911 \text{ kA}$$

$$i_{y\delta 1} = \sqrt{2} \cdot 0.911 \cdot 1.707 = 2.199 \text{ kA}$$

$$I_G = I_{no1} \cdot \left(\frac{U_{\delta 1}}{U_{ном, G}} \right) = 0.911 \cdot \left(\frac{115}{10.5} \right) = 9.97 \text{ kA}.$$

Расчёт токов КЗ в именованных единицах

Метод именованных единиц применяют при расчётах токов КЗ сравнительно простых электрических схем с небольшим числом ступеней трансформации.

Сопротивления и ЭДС схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения, принятой за основную. В практических расчетах за основную часто принимают ступень, где расположена точка КЗ.

При расчёте данным методом параметры схемы выражают в именованных единицах (омах, амперах, вольтах и т. д.).

ВНИМАНИЕ! Складывать сопротивления, приведенные к разным ступеням напряжения нельзя!

Производится расчёт периодической слагающей тока трёхфазного КЗ по формуле:

$$I_{по} = \frac{E''_{*ЭКВ} U_{\delta}}{\sqrt{3} x_{рез}} \quad (21)$$

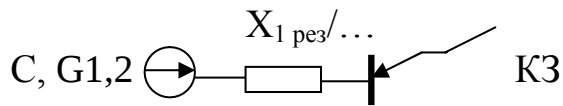
Если напряжение ступени КЗ отличается от напряжения, принятого при расчёте за базисное напряжение – U_{δ} , полученный ток КЗ $I_{по}$ необходимо привести к реальному напряжению ступени КЗ по выражению:

$$I_K = I_{по} \cdot \frac{U_{\delta}}{U_{ср}} \quad (22)$$

Определение расчётных токов несимметричных коротких замыканий

Для определения несимметричных коротких замыканий используются расчёты и преобразования, изложенные выше.

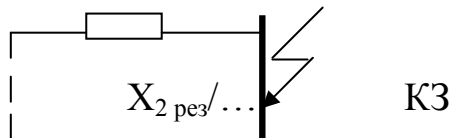
Преобразовать схему замещения прямой последовательности путем объединения всех источников питания одного сопротивления. Определить $X_{1рез}$ – результирующее сопротивление прямой последовательности относительно точки КЗ;



Определить $X_{2рез}$ – результирующее сопротивление обратной последовательности. Схемы замещения обратной последовательности такие же, как и схемы прямой последовательности, но при ЭДС источников, равных нулю.

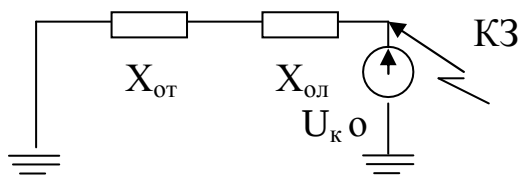
При равенстве сопротивлений всех элементов (в практических расчётах для вращающихся машин $X_2 = X_1$) на схемах прямой и обратной последовательностей можно принять:

$$X_{2рез} = X_{1рез}$$



Определить $X_{0рез}$ – результирующее сопротивление нулевой последовательности. В схеме замещения учитываются сопротивления, связанные с землей. Приступая к составлению схемы замещения нулевой последовательности, сначала нужно установить возможные контуры протекания тока нулевой последовательности. Для образования таких контуров необходимо, чтобы в цепи, электрически связанной с местом КЗ, имелись заземлённые нейтралы. При нескольких заземлённых нейтралах, электрически связанных между собой, токи нулевой последовательности разветвляются между ними.

Схему нулевой последовательности начинают составлять от точки КЗ. Концы элементов схемы нулевой последовательности, через которые возвращаются токи нулевой последовательности, имеют потенциал земли. В схеме нулевой последовательности учитывается одна фаза, а через сопротивление нулевой последовательности протекает ток нулевой последовательности всех трёх фаз. Чтобы учесть действительное падение напряжения в этом сопротивлении, его надо увеличить в 3 раза.



Сопротивление нулевой последовательности определяется:

- для линий электропередачи – $x_0 = k \cdot x_1$. Значения коэффициента k приведены в таблице :

Характеристика линии	Отношение x_0 / x_1
1. Одноцепная линия без тросов	3,5
2. То же со стальными тросами	3,0
3. То же с хорошо проводящими тросами	2,0
4. Двухцепная линия без тросов	5,5
5. То же со стальными тросами	4,7
6. То же с хорошо проводящими тросами	3,0

Для трансформаторов – $x_* = \frac{x_{тр}\%}{100} \frac{S_6}{S_{ном}}$

двухобмоточных – $x_0 = x_B + x_H = x_{B-H} = x_1$;

трёхобмоточных – $x_0 = x_B + x_H = x_{B-H} = x_1$ (не учитывается обмотка СН);

автотрансформатор – учитываются все обмотки.

Расчёт токов несимметричных КЗ:

- двухфазного КЗ: $I_{по}^2 = \frac{\sqrt{3}E_*''}{x_{*1рез} + x_{*2рез}} I_6 = \frac{\sqrt{3}E_*''}{2 x_{*1рез}} I_6 = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{по}^3$
- однофазного КЗ: $I_{по}^1 = \frac{3E_*''}{x_{*1рез} + x_{*2рез} + x_{*0рез}} I_6$

Контрольные вопросы

1. Дать определение короткого замыкания.
2. Что называется коротким замыканием на землю?
3. Какие виды короткого замыкания относятся к симметричным?
4. Какие виды короткого замыкания относятся к несимметричным?
5. Перечислить виды короткого замыкания.
6. Перечислить основные причины короткого замыкания.
7. Назвать последствия короткого замыкания.
8. Что такое T_a ? Записать формулу.
9. Назвать составляющие полного тока короткого замыкания.
10. Что вы знаете о вынужденной составляющей тока короткого замыкания (можно зарисовать)?
11. Что вы знаете о свободной составляющей тока короткого замыкания (можно зарисовать)?
12. Что такое ударный ток, и чему он равен?
13. Основные допущения, принимаемые при расчётах тока короткого замыкания.
14. Порядок расчёта тока трёхфазного короткого замыкания.
15. Что такое расчётная схема?
16. Что называется схемой замещения?
17. Какие методы расчёта токов короткого замыкания вы знаете?
18. Алгоритм расчёта токов короткого замыкания в именованных единицах.
19. Алгоритм расчёта токов короткого замыкания в относительных единицах.

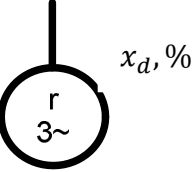
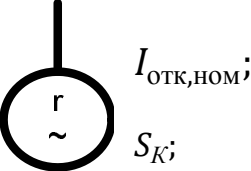
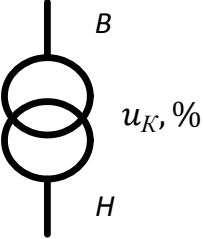
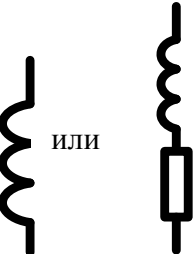
Таблица А.1 – Средние значения сверхпереходной ЭДС E'' и сверхпереходного сопротивления x'' , отнесённые к номинальной мощности источников питания

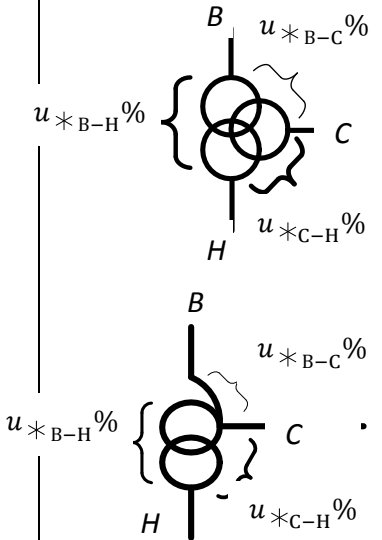
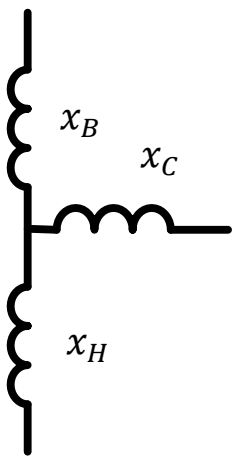
Источники питания	E'' , отн. ед.	x'' , отн. ед.
Энергосистема	1,0	-
Турбогенератор до 100 МВт	1,08	0,125
Турбогенератор 100–500МВт	1,13	0,2
Гидрогенератор с успокоительной обмоткой	1,13	0,2
Гидрогенератор без успокоительной обмотки	1,18	0,27
Синхронный компенсатор	1,2	0,2
Синхронный двигатель	1,1	0,2
Асинхронный двигатель	0,9	0,2

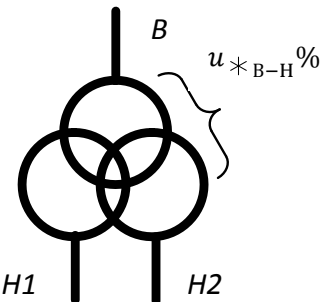
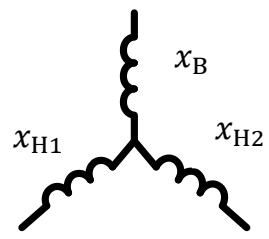
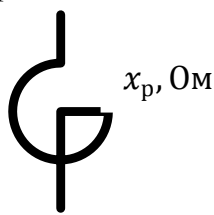
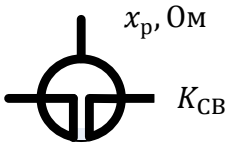
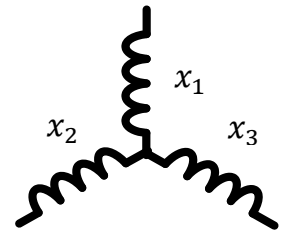
Таблица А.2 – Средние значения удельных индуктивных сопротивлений линий электропередачи

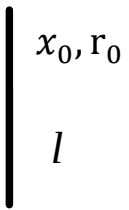
Линия электропередачи	$x_{уд}$, Ом/км
Одноцепная воздушная линия, кВ:	
6–220	0,4
220–330 (при расщеплении на два провода в фазе)	0,325
400–500 (при расщеплении на три провода в фазе)	0,307
750 (при расщеплении на четыре провода в фазе)	0,28
Трёхжильный кабель, кВ:	
6–10	0,08
35	0,12
Одножильный маслонаполненный кабель 110–220 кВ	0,16

Таблица А.3 – Расчётные формулы для определения сопротивлений

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчётные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
Генератор 		$X = \frac{x_d \%}{100} \frac{U_6^2}{S_{\text{ном}}}$	$x_* = \frac{x_d \%}{100} \frac{S_6}{S_{\text{ном}}}$
Энергосистема 		$X = \frac{U_6^2}{\sqrt{3} I_{\text{отк, ном}} U_{\text{ср}}}$ или $X = \frac{U_6^2}{S_K}$ или $X = x_{*, \text{с, ном}} \frac{U_6^2}{S_K}$	$x_* = \frac{S_6}{\sqrt{3} I_{\text{отк, ном}} U_{\text{ср}}}$ или $x_* = \frac{S_6}{S_K}$ или $x_* = x_{*, \text{с, ном}} \frac{S_6}{S_{\text{ном}}}$
Двухобмоточный трансформатор 		$X = \frac{u_K \%}{100} \frac{U_6^2}{S_{\text{ном}}}$	$x_* = \frac{u_K \%}{100} \frac{S_6}{S_{\text{ном}}}$
С учётом активного сопротивления			

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчётные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
		$r = \frac{P_K U_6^2 10^{-3}}{S_{НОМ}^2}$ $x = \sqrt{u_{*K}^2 - \left(\frac{P_K}{S_{НОМ}}\right)^2} \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}$	$r_* = \frac{P_K S_6 10^{-3}}{S_{НОМ}^2}$ $x_* = \sqrt{u_{*K}^2 - \left(\frac{P_K}{S_{НОМ}}\right)^2} \frac{S_6}{S_{НОМ}}$
Трёхобмоточный трансформатор и автотрансформатор 		$x_B = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KB-C}\% - u_{KC-H}\%) }{100} \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}$ $x_C = \frac{0,5 (u_{KB-C}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-H}\%) }{100} \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}$ $x_H = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-C}\%) }{100} \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}$	$x_{*B} = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KB-C}\% - u_{KC-H}\%) }{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}}$ $x_{*C} = \frac{0,5 (u_{KB-C}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-H}\%) }{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}}$ $x_{*H} = \frac{0,5 (u_{KB-H}\% + u_{KC-H}\% - u_{KB-C}\%) }{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}}$

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчётные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
Трёхфазный трансформатор с расщеплённой обмоткой НН 		$x_B = \frac{0,125 u_{\text{KB-H}}\%}{100} \frac{U_6^2}{S_{\text{НОМ}}}$ $x_{H1} = x_{H2} = \frac{0,75 u_{\text{KB-H}}\%}{100} \frac{U_6^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_{*B} = \frac{0,125 u_{\text{KB-H}}\%}{100} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$ $x_{*H1} = x_{*H2} = \frac{0,75 u_{\text{KB-H}}\%}{100} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
Реактор 		$X = x_P \frac{U_6^2}{U_{\text{cp}}^2}$	$x_* = x_P \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2}$
Сдвоенный реактор 		$x_1 = -x_p k_{\text{cp}} \frac{U_6^2}{U_{\text{cp}}^2}$ $x_2 = x_3 = x_p (1 + k_{\text{CB}}) \frac{U_6^2}{U_{\text{cp}}^2}$	$x_{*1} = -x_p k_{\text{CB}} \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2}$ $x_{*1} = x_{*2} = x_p (1 + k_{\text{CB}}) \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2}$

Элемент электроустановки, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчётные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
Линия 		$x = x_0 l \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$ $r = r_0 l \frac{U_6^2}{U_{cp}^2}$	$x_* = x_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2}$ $r_* = r_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2}$

Примечание:

$S_{ном}$ — номинальные мощности элементов (генератора, трансформатора, энергосистемы), МВ·А;

S_6 — базовая мощность, МВ·А;

S_K — мощность КЗ энергосистемы, МВ·А;

$I_{отк.ном}$ — номинальный ток отключения выключателя, кА;

$x_{*C,ном}$ — относительное номинальное сопротивление энергосистемы;

u_K — напряжение КЗ трансформатора, %;

x_p — сопротивление реактора, Ом;

P_K — потери КЗ трансформатора, кВт;

r_0, x_0 — активное и индуктивное сопротивления линии на 1 км длины, Ом/км;

l — длина линии, км;

U_6 — базовое напряжение, кВ;

U_{cp} — среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ;

x_d — сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора, %.

Таблица А.4 – Основные формулы преобразования схем

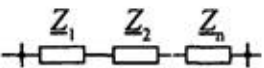
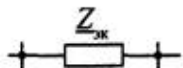
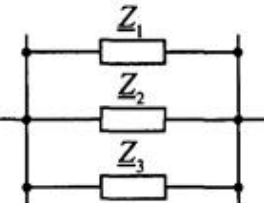
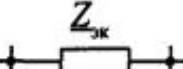
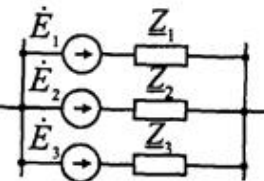
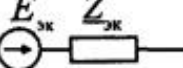
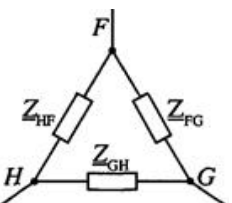
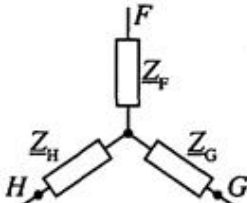
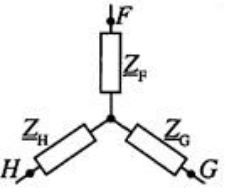
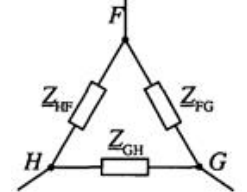
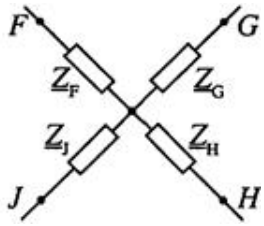
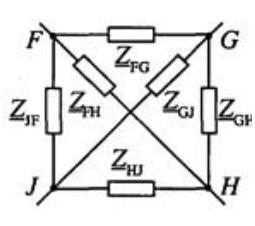
Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Сопротивление элементов преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} \text{ где}$ $\underline{Y}_{эк} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n$ $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2};$ $\underline{Y}_n = \frac{1}{\underline{Z}_n}$ $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена нескольких источников эквивалентным			$\underline{E}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} \sum_{K=1}^n \underline{Y}_K \underline{E}_K$ При двух ветвях $\underline{E}_{эк} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}_2 + \underline{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
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			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$, где $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$ Аналогично и при большем числе ветвей

Таблица А.5 – Значения постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ и ударного коэффициента

Место КЗ	T_a	k_y
Выводы явнополюсного гидрогенератора:		
без успокоительной обмотки	0,2	1,95
с успокоительной обмоткой	0,13	1,93
Выводы турбогенератора, МВт:		
12 - 60	0,16 – 0,25	1,94-1,955
100 – 1000	0,4 – 0,54	1,975-1,98
За блоком генератор-трансформатор при мощности генератора, МВт:		
60	0,15	1,935
100 – 200	0,26	1,965
300	0,32	1,977
За воздушными линиями напряжением, кВ:		
35 – 110	0,22	1,608
220	0,03	1,717
За понижающим трансформатором мощностью, МВ·А		
80	0,06	1,85
32 – 63	0,05	1,82
менее 32	0,045	1,8
Распределительные сети 6 – 10кВ	0,01	1,369

Таблица А.6 – Значения коэффициентов k_y и q зависимости от места КЗ

Место короткого замыкания	Коэффициенты	
	k_y	q
Выводы явнополюсного гидрогенератора:		
без успокоительной обмотки	1,95	1,68
с успокоительной обмоткой	1,93	1,65
Выводы турбогенератора	1,91	1,63
В цепи без учета активного сопротивления	1,8	1,52
На стороне НН трансформатора, кВ·А		
630 – 1000	1,3	-
100 – 400	1,2	1,09