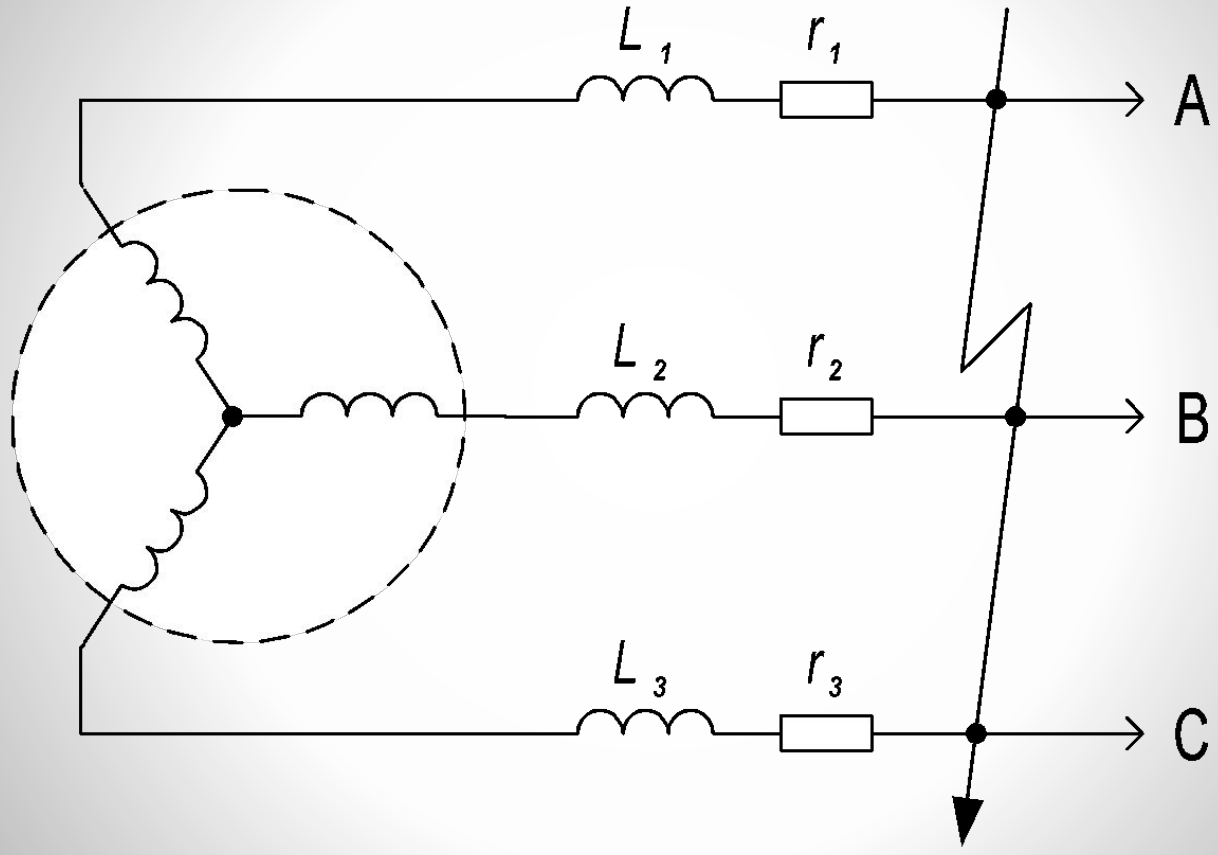
Расчет токов КЗ

Коротким замыканием (КЗ) называют всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или с землёй, при этом токи в аппаратах и проводниках, примыкающих к месту электрического соединения (иначе – точке КЗ), резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного (нормального) режима

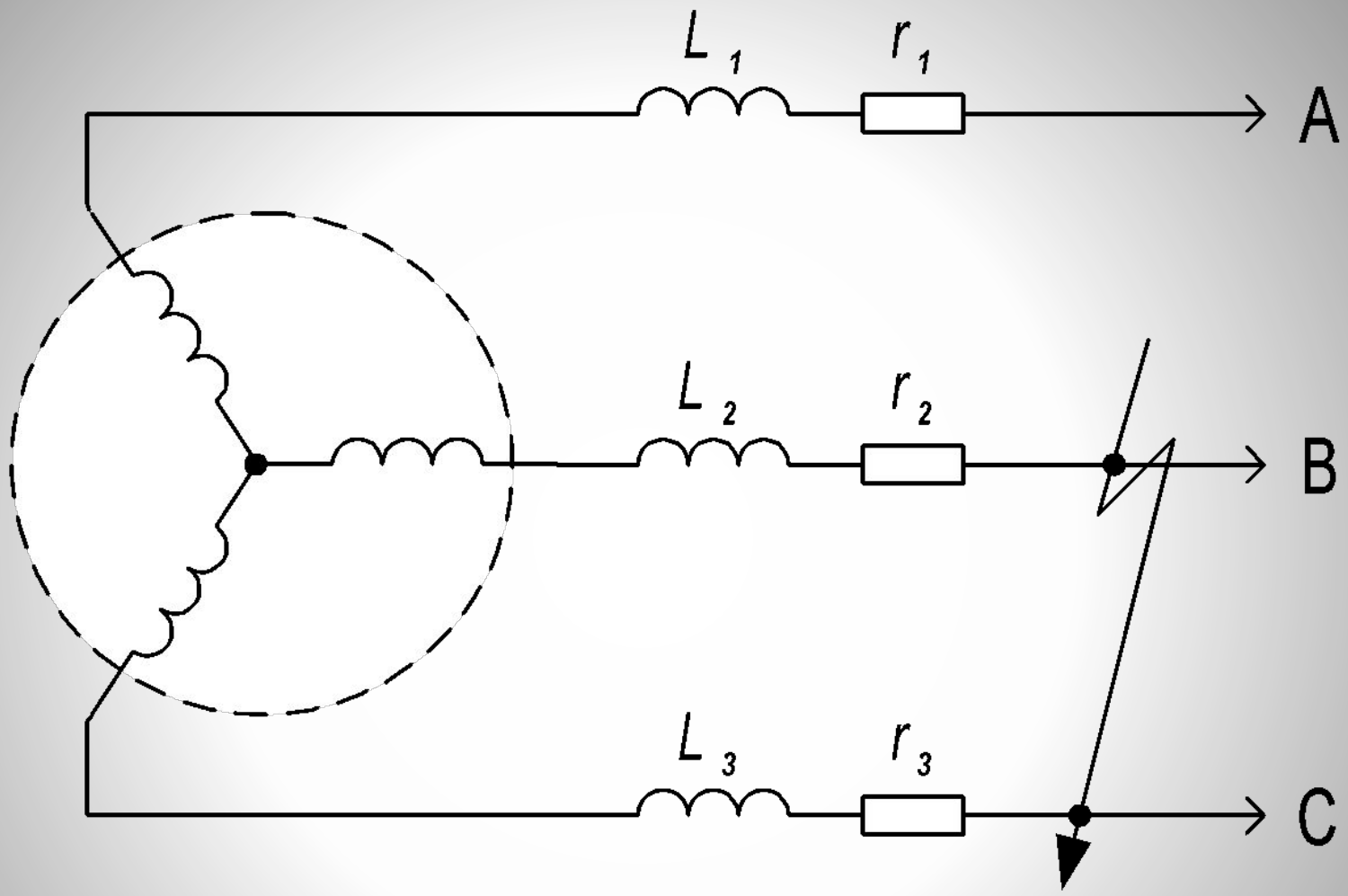
- К основным причинам возникновения коротких замыканий следует
- отнести:
- • нарушение изоляции электрического оборудования, которые вызываются старением изоляционных материалов;
- • недостаточно тщательный уход за оборудованием;
- • механические повреждения изоляции (например, повреждение
- кабеля при выполнении земляных работ);
- • ошибочные действия обслуживающего персонала с высоко-
- вольтными выключателями и разъединителями;
- • перекрытие голых токоведущих частей животными и птицами.

- КЗ бывают случайными и преднамеренными

Вопрос 1 Классификация коротких замыканий

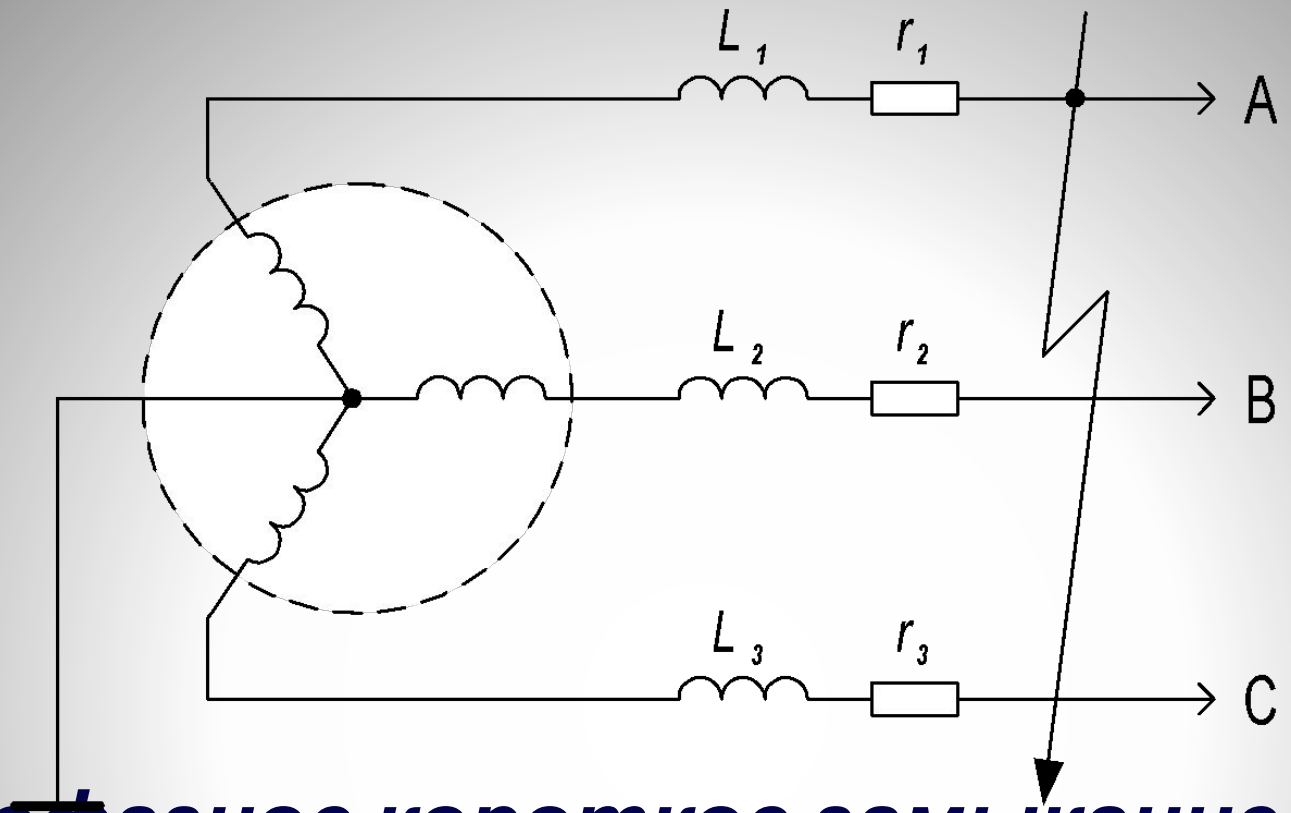


Трехфазное короткое замыкание К $^{(3)}$ **– КЗ между тремя фазами в трехфазной ЭЭС**



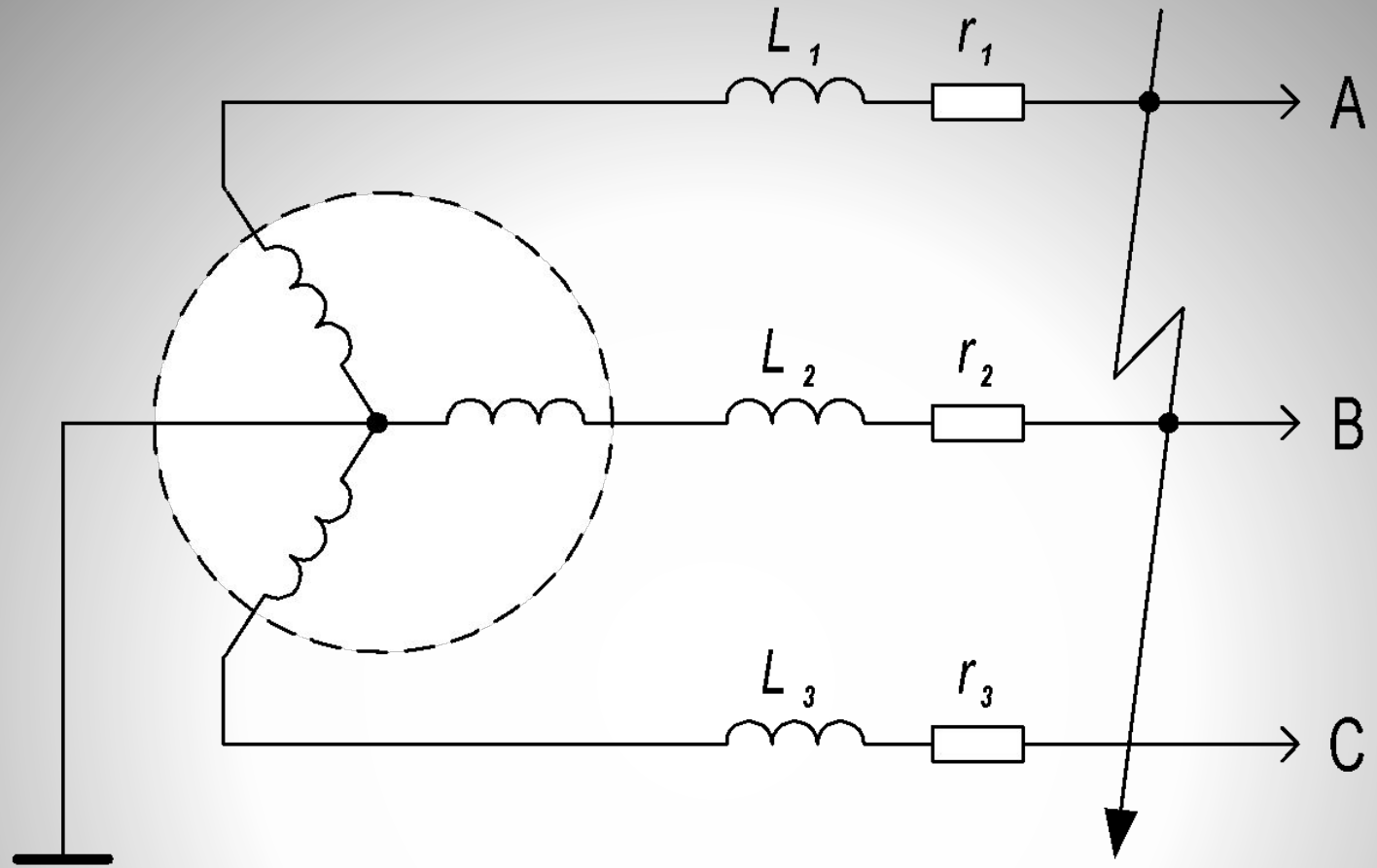
Двухфазное короткое замыкание К – КЗ **между двумя фазами в трехфазной ЭЭС**

(2)



Однофазное короткое замыкание К – КЗ (1)

на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо- или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна



Двухфазное короткое замыкание на землю К$^{(1,1)}$ – КЗ **на землю в трехфазной ЭЭС с глухо- или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей**

В системах с изолированной нейтралью замыкание одной фазы на землю не является КЗ и называется *замыканием на землю З$^{(1)}$* или *простым замыканием*.

В местах КЗ часто образуется электрическая *дуга и переходное сопротивление, вызываемое загрязнением, наличием остатков изоляции, гари и пр.*

***Сопротивление электрической дуги и переходное сопротивление имеют нелинейный характер.* Учет их влияния на ток КЗ представляет собой сложную задачу.**

В случае, *когда переходное сопротивление и сопротивлении дуги малы, ими пренебрегают.* Такое замыкание называют *металлическим*. *Расчет максимально возможных токов проводят для металлического КЗ*.

В трехфазных системах *все КЗ обычно делят на симметричные и несимметричные*. *При симметричном КЗ* все фазы электроустановки находятся в одинаковых условиях, а при *несимметричном КЗ* одна из фаз находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз (такую фазу

В количественном отношении КЗ в сетях, **по усредненным данным, распределяются по видам следующим образом:**

$K^{(3)} = 5\ \%;$

$K^{(2)} = 10\ \%;$

$K^{(1)} = 65\ \%;$

$K^{(1,1)}$ и $K^{(1-1)} = 20\ \%$.

Однако статистические исследования, проведенные в последние годы, показали, что относительная частота различных видов КЗ существенно зависит и от напряжения сети

Как следует из этих данных,

преобладающее большинство коротких

Относительная частота возникновения различных видов КЗ

Вид и условное обозначение $К^{(n)}$ КЗ	Относительная частота коротких замыканий (%) в сетях напряжением, кВ							
	До1	6-20	35	110	220	330	500	750
Трехфазные - $К^{(3)}$	29	9-11	8	4	2	1	1	1
Двухфазные –$К^{(2)}$		17-19	18	5	3	4	2	1
Однофазные –$К^{(1)}$	71	60-61	67	83	88	91	95-96	97
Двухфазные на землю – $К^{(1,1)}$		11-12	7	8	7	4	1-2	1

Короткое замыкание в симметричной цепи предприятий

- Расчет токов КЗ в электрических сетях промышленных предприятий несколько отличается от расчетов КЗ для электрических сетей и систем, так как можно не учитывать
- - турбо- и гидрогенераторы электростанций,
- подпитку от нескольких источников питания,
- работу разветвленных сложных кольцевых схем,
- свойства дальних ЛЭП,
- действительные коэффициенты трансформации.

Расчет токов КЗ в установках напряжением выше 1000 В

- Расчет токов КЗ в установках напряжением выше 1000 В имеет ряд особенностей по сравнению с расчетом токов КЗ в установках напряжением до 1000 В. Эти особенности заключаются в следующем:
- активные сопротивления элементов системы электроснабжения при определении тока КЗ не учитывают, если выполняется условие $r\Sigma < (x\Sigma /3)$, где $r\Sigma$ и $x\Sigma$ – суммарные активные и реактивные сопротивления элементов системы электроснабжения до точки КЗ;
- при определении токов КЗ учитывают подпитку от двигателей высокого напряжения; подпитку от синхронных двигателей учитывают как в ударном, так и в отключаемом токе КЗ; подпитку от асинхронных двигателей –только в ударном токе КЗ.

Выбор расчётных точек КЗ

- Выбор расчётных точек производится на основе анализа схемы
- электроснабжения с целью нахождения наиболее неблагоприятных условий повреждений, определяющих выбор аппаратов и проводников.
- Как правило, расчетными точками являются выводы высшего напряжения понижающих трансформаторов, участки между выводами низшего напряжения трансформаторов и реакторами, сборные шины распределительных устройств, выводы электроприёмников, выводы выключателей отходящих линий.

Какие КЗ рассчитываем

- Для выбора аппаратов по отключающей способности, по электро-
- динамической и электротермической стойкости к токам КЗ рассчитываются токи трехфазных КЗ в месте установки аппаратов.
- На генераторном напряжении электрических станций – трёхфазное или двухфазное в зависимости от того, какое из них приводит к большему нагреву.
- Для проверки коэффициентов чувствительности релейной защиты в сетях 10 (6) кВ – токи двухфазных КЗ в конце защищаемого участка сети.
- Для выбора аппаратов по коммутационной способности – по большему из значений, полученных для случаев трёхфазного и однофазного КЗ на землю (в сетях с большими токами КЗ на землю).
- Для проверки эффективности отключения однофазных КЗ в четырёхпроводных сетях до 1 кВ – токи однофазных КЗ в конце защищаемого участка.
- Для одиночных кабелей – токи трёхфазных КЗ в начале кабеля, для пучка из двух и более кабелей, включённых в параллель, – токи трёхфазных КЗ за пучком.

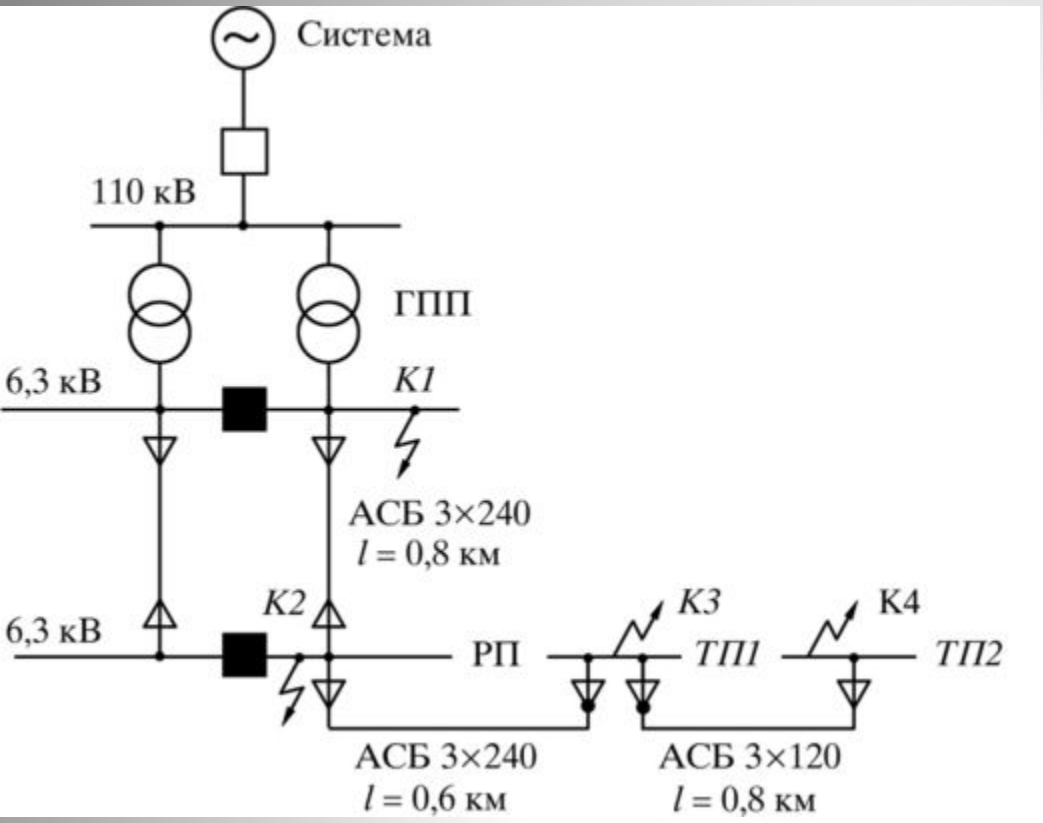
Допущения при расчете токов КЗ в электроустановках предприятий

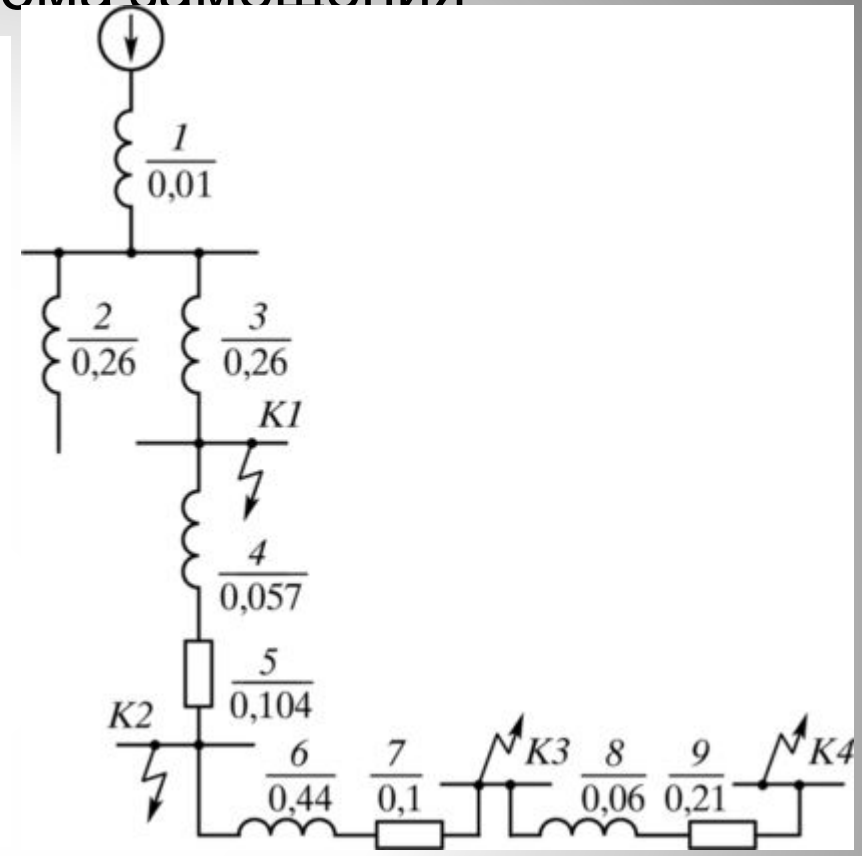
- • электродвижущие силы источников питания считают неизменными;
- • трехфазную систему считают симметричной;
- • не учитывают насыщение магнитных систем, что позволяет считать все цепи линейными;
- • пренебрегают емкостными проводимостями всех элементов короткозамкнутой цепи;
- • не учитывают влияние недвигательной нагрузки на токи КЗ;
- • не учитывают подпитку места КЗ со стороны электродвигателей напряжением до 1 кВ.

Последовательность расчета токов трехфазного КЗ при питании от системы неограниченной мощности : https://m.studref.com/493393/tehnika/raschet_tokov_korotkogo_zamykaniya_napryazhenii_vyshe

- 1**. По расчётной схеме составляется схема замещения**.
- Расчётная схема для определения токов КЗ представляет собой схему в однолинейном исполнении, в которую введены генераторы, компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели, оказывающие влияние на ток КЗ, а также элементы систем электроснабжения (линии, трансформаторы, реакторы и т. д.), связывающие источники электроэнергии с местом КЗ. На расчётной схеме показывают расчётные точки КЗ, выбор которых зависит от цели расчётов токов КЗ.
- На схеме замещения все элементы цепи КЗ заменены индуктивными сопротивлениями (в сетях до 1000В – индуктивными и активными) и соединены в той последовательности, которая имеется на расчётной схеме, при этом трансформаторные связи заменяются электрическими.
- Элементы систем электроснабжения, связывающие источники электроэнергии с местом КЗ, вводят в схему замещения **сопротивлениями, а источники электроэнергии – сопротивлениями и ЭДС.** Сопротивления и ЭДС схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения (основная ступень). В практических расчётах за основную ступень удобно принимать ступень, где определяются токи КЗ. На схеме замещения каждое сопротивление имеет цифровое обозначение в виде дроби: в числителе – порядковый номер сопротивления, а в знаменателе – расчётное значение его. Параметры элементов схемы замещения можно выражать в именованных или относительных единицах.
- **Обычно в сетях напряжением выше 1кВ применяют для расчёта токов КЗ относительные единицы, а в сетях до 1000В – именованные единицы**.
- При составлении схемы замещения в относительных единицах значения ЭДС и

Расчетная схема и схема замещения

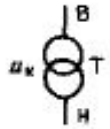
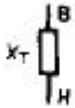
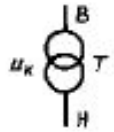
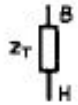
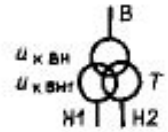
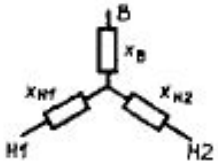
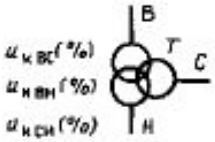
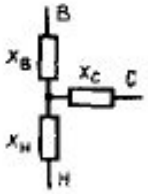




На расчетной схеме показывают мощности трансформаторов, марки проводов и кабелей, их длину, что необходимо для определения их сопротивлений.
На схеме замещения указываются сопротивления всех элементов расчетной схемы. Намечаются точки расчета токов КЗ. Генераторы, трансформаторы мощностью больше 1600 кВ А, реакторы на схемах замещения представляются индуктивными сопротивлениями. Воздушные и кабельные линии, трансформаторы мощностью до 1600 кВ А представляются активными и

Барыбин стр 120

Таблица 2.41. **Индуктивные и активные сопротивления элементов сети**

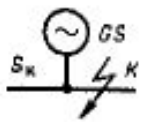
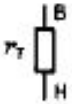
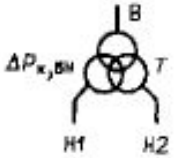
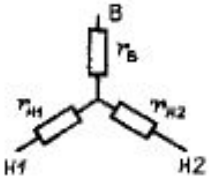
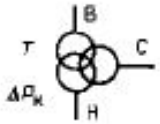
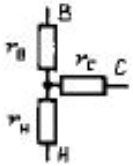
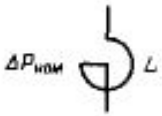
Элемент сети	Схема		Формула для определения сопротивлений в схеме замещения при $U_б = U_{ср,ном}$	
	расчетная	замещения	отн. ед.	Ом
Индуктивные сопротивления сети				
Трансформатор двухобмоточный			$x_{*Т} = \frac{u_к S_б}{100 S_{ном,т}}$	$x_Т = \frac{u_к U^2_{ср,ном}}{100 S_{ном,т}}$
Трансформатор двухобмоточный с напряжением НН до 1 кВ			–	$z_Т = \frac{u_к U^2_{ср,ном}}{100 S_{ном,т}}$; $x_Т = \sqrt{z_Т^2 - r_Т^2}$
Трансформатор двухобмоточный с расщепленной обмоткой низшего напряжения			$x_{*В} = \frac{u_{кВН} S_б}{100 S_{ном,т}} \left(1 - \frac{K_р}{4}\right)$; $x_{*Н1} = x_{*Н2} = \frac{u_{кВН} S_б K_р}{100 S_{ном,т} \cdot 2}$	$x_В = \frac{u_{кВН} U^2_{ср,ном}}{100 S_{ном,т}} \left(1 - \frac{K_р}{4}\right)$; $x_{Н1} = x_{Н2} = \frac{u_{кВН} U^2_{ср,ном} K_р}{100 S_{ном,т} \cdot 2}$, где $K_р = 4\left(\frac{u_{кВН1}}{u_{кВН}} - 1\right)$
Трансформатор трехобмоточный			$x_{*В} = \frac{u_{кВ} S_б}{100 S_{ном,т}}$; $x_{*С} = \frac{u_{кС} S_б}{100 S_{ном,т}}$; $x_{*Н} = \frac{u_{кН} S_б}{100 S_{ном,т}}$; где $u_{кВ} = 0{,}5(u_{кВС} + u_{кВН} - u_{кСН})$, %; $u_{кС} = 0{,}5(u_{кВС} + u_{кСН} - u_{кВН})$, %; $u_{кН} = 0{,}5(u_{кВН} + u_{кСН} - u_{кВС})$, %	$x_В = \frac{u_{кВ} U^2_{ср,ном}}{100 S_{ном,т}}$; $x_С = \frac{u_{кС} U^2_{ср,ном}}{100 S_{ном,т}}$; $x_Н = \frac{u_{кН} U^2_{ср,ном}}{100 S_{ном,т}}$,

Барыбин стр 121

Продолжение табл. 2.41

Элемент сети	Схема		Формула для определения сопротивлений в схеме замещения при $U_б = U_{ср,ном}$	
	расчетная	замещения	отн. ед.	Ом
Реактор токоограничивающий одинарный	$x_{ном}$ L	x_L	$x_{*L} = x_{ном} \frac{S_б}{U^2_{ср,ном}}$	$x_L = x_{ном}$
Реактор токоограничивающий сдвоенный	1 L $x_{ном}$ $K_р$ 2 3	1 x_1 x_2 x_3 2 3	$x_{*1} = -K_р x_{ном} \frac{S_б}{U^2_{ср,ном}}$; $x_{2*} = x_{3*} = (1 + K_р) \times$ $\times x_{ном} \frac{S_б}{U^2_{ср,ном}}$	$x_1 = -K_р x_{ном}$; $x_2 = x_3 = (1 + K_р) x_{ном}$
Линия электропередачи	$x_{уд}$ l WL (KL)	$x_{WL}(x_{KL})$	$x_{*WL} = x_{уд} l \frac{S_б}{U^2_{ср,ном}}$	$x_{WL} = x_{уд} l$
Асинхронный электродвигатель	$K_п$ M	x_M	$x_{*M} = x''_{*к} \frac{S_б}{S_{ном}}$ где $x'_к = 1/K_п$	$x_M = x''_к = \frac{U^2_{ср,ном}}{S_{ном}}$,
Синхронный электродвигатель	x''_d MG	x_{MG}	$x_{*MG} = x''_d \frac{S_б}{S_{ном}}$	$x_{MG} = x''_d \frac{U^2_{ср,ном}}{S_{ном}}$

Активные сопротивления СЗ Барыбин

Энергосистема			$x_{*GS} = \frac{S_б}{S_к}$	$x_{GS} = \frac{U^2_{ср,ном}}{S_к}$
		Активные сопротивления сети		
Трансформатор двухобмоточный			$r_{*T} = \frac{\Delta P_к S_б}{S^2_{ном,т}}$	$r = \frac{\Delta P_к U^2_{ср,ном}}{S^2_{ном,т}}$
Трансформатор двухобмоточный с расщепленной обмоткой НН			$r_{*B} = \frac{\Delta P_{к\,вн} S_б}{2S^2_{ном,т}}$; $r_{*H1} = r_{*H2} = 2r_{*B}$	$r_B = \frac{\Delta P_{к,\,вн} U^2_{ср,ном}}{2S^2_{ном,т}}$; $r_{H1} = r_{H2} = 2r_B$
Трансформатор трехобмоточный (см. примеч. 2)			$r_{*B} = r_{*C} = r_{*H} = 0{,}5r_*$, где $r_* = \frac{\Delta P_к S_б}{S^2_{ном,т}}$	$r_B = r_C = r_H = 0{,}5r$, где $r_1 = \frac{\Delta P_к U^2_{ср,ном}}{S^2_{ном,т}}$
Реактор токоограничивающий одинарный			$r_{*L} = \frac{\Delta P_{ном} S_б}{I^2_{ном} U^2_{ср,ном}}$	$r_L = \frac{\Delta P_{ном}}{I^2_{ном}}$

Активные сопротивления СЗ

Продолжение табл. 1.41

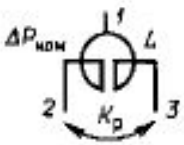
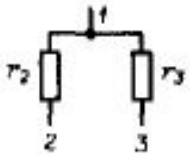
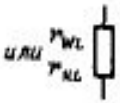
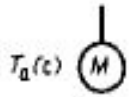
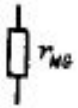
Элемент сети	Схема		Формула для определения сопротивлений в схеме замещения при $U_б = U_{ср,ном}$	
	расчетная	замещения	отн. ед.	Ом
Реактор токоограничивающий сдвоенный			$r_{*2} = r_{*3} = \frac{\Delta P_{ном} S_б}{I_{ном} U^2_{ср,ном}}$	$r_2 = r_3 = \frac{\Delta P_{ном}}{I^2_{ном}}$
Линия электропередачи			$r_{WL} = r_{уд} l \frac{S_б}{U^2_{ср,ном}}$	$r_{WL} = r_{уд} l$
Асинхронный электродвигатель			$r_{*M} = \frac{x_{*M}}{\omega T_a}$	$r_M = \frac{x_M}{\omega T_a}$
Синхронный электродвигатель			$r_{*MG} = \frac{x_{*MG}}{\omega T_a}$	$r_{MG} = \frac{x_{MG}}{\omega T_a}$

Таблица 5.2

Расчетные выражения для определения приведенных значений сопротивлений

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Именованные единицы, Ом	Относительные единицы, о.е.
1	2	3	4
Генератор (G)	$x''_{d*ном}$; $S_{ном\,G}$, МВ·А	$x_б = x''_{d*ном} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном\,G}}$	$x_{*б} = x''_{d*ном} \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,G}}$
	x''_d, %; $S_{ном\,G}$, МВ·А	$x_б = \frac{x''_d\%}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном\,G}}$	$x_{*б} = \frac{x''_d\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,G}}$
Энергосистема (C)	$S_к$, МВ·А	$x_б = \frac{U_б^2}{S_к}$	$x_{*б} = \frac{S_б}{S_к}$
	$I_{откл.ном}$, кА	$x_б = \frac{U_б^2}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{ср}}$	$x_{*б} = \frac{S_б}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{ср}}$
	$x_{*ном\,C}$; $S_{ном\,C}$, МВ·А	$x_б = x_{*номC} \frac{U_б^2}{S_{ном\,C}}$	$x_{*б} = x_{*номC} \frac{S_б}{S_{ном\,C}}$
Трансформатор (T)	$u_к$, %; $S_{ном.т}$, МВ·А	$x_б = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*б} = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.т}}$
Автотрансформатор и трехобмоточный трансформатор (Т) (схема замещения – звезда)	$u_{к,B-C}$, %; $u_{к,B-H}$, %; $u_{к,C-H}$, %; $S_{ном}$, МВ·А	$x_{бB} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,B-H} - u_{к,C-H}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{бC} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,C-H} - u_{к,B-H}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{бH} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-H} + u_{к,C-H} - u_{к,B-C}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*бB} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,B-H} - u_{к,C-H}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*бC} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,C-H} - u_{к,B-H}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*бH} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-H} + u_{к,C-H} - u_{к,B-C}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$

1	2	3	4
Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения (Т)	$U_{к,В-Н}$, %; $S_{ном.т}$, МВ·А	$x_{бВ} = \left(\frac{u_{к,В-Н}}{100} - 0{,}5\frac{u_{к,Н1-Н2}}{100}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{б1} = x_{б2} = \frac{2u_{к,В-Н}}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*бВ} = \left(\frac{u_{к,В-Н}}{100} - 0{,}5\frac{u_{к,Н1-Н2}}{100}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*б1} = x_{*б2} = \frac{2u_{к,В-Н}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.т}}$
Синхронные и асинхронные электродвигатели, компенсаторы (M)	x''_d; $S_{ном.М}$, МВ·А	$x_б = x''_d \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.М}}$	$x_{*б} = x''_d \cdot \frac{S_б}{S_{ном.М}}$
Реактор (LR)	$x_{ном.LR}$, Ом	$x_б = x_{номLR}\frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$	$x_{*б} = x_{номLR}\frac{S_б}{U_{ср}^2}$
Линия электропередачи (W)	$x_{уд}$, Ом/км; l, км	$x_б = x_{уд} \cdot l\frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$	$x_{*б} = x_{уд} \cdot l\frac{S_б}{U_{ср}^2}$

Примечание: $S_{ном}$ – номинальные мощности элементов (генератора, трансформатора, энергосистемы), МВА; $S_б$ – базисная мощность, МВ·А; $S_к$ – мощность КЗ энергосистемы, МВ·А; $I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА; $x_{*ном.С}$ – относительное номинальное сопротивление энергосистемы; $u_к$% – напряжение КЗ трансформатора; $I_б$ – базисный ток, кА; $U_{ср}$ – среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ; $x_{уд}$ – индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км; l – длина линии, км.

Таблица 5.1

Средние удельные значения индуктивных сопротивлений воздушных и кабельных 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
Трехжильный кабель, кВ:	
6–10	0,08
35	0,12
Одножильный маслонаполненный кабель 110–220 кВ	0,16

Последовательность расчета токов трехфазного КЗ при питании от системы неограниченной мощности :

- 2. **Принимаются базисные условия.**
- В качестве базовых величин принимаются базовая (базисная) мощность Sб и базовое (базисное) напряжение Uб.
- За базисную мощность принимается суммарная мощность генераторов (если мощности генераторов известны), мощность короткого замыкания на входе СЭС или принимается Sб =100 МВА (Sб =1000 МВА) при неизвестной мощности генераторов.
- Для основной ступени, для которой производится расчёт токов короткого замыкания принимается Uб = Uср . Среднее значение напряжения ступени электрической цепи Uср берётся на 5% выше номинального напряжения сети :
- **Uср = 0,23кВ; 0,4; 0,525; 0,69; 3.15кВ; 6,3кВ; 10,5кВ; 15,75кВ; 21кВ; 37кВ**.
- Тогда базисные (базовые) токи и сопротивления на основной ступени определяются по выражениям (МВ · А, кВ, кА, Ом):

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}}; \quad X_б = \frac{U_б}{\sqrt{3} \cdot I_б} = \frac{U_{ср} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot S_б} = \frac{U_{ср}^2}{S_б}.$$

Последовательность расчёта токов трёхфазного КЗ при питании от системы неограниченной мощности :

- 3. **Определяются значения сопротивлений отдельных элементов** цепи КЗ (по формулам и паспортным данным или по справочным данным) в именованных единицах или относительных единицах, приведённых к базисным условиям.
- 4. **Определяется результирующие сопротивления цепи КЗ** путём преобразования схемы замещения и приведения её к одному результирующему сопротивлению ($X_{*\ рез(цепи\ КЗ)}$ или $Z_{*рез(цепи\ КЗ)}$).
- 5. **Находится отношение сопротивлений** источников питания $\Sigma X_{расч.\ ИП}$ к полному результирующему сопротивлению цепи КЗ $Z_{рез.(цепи\ КЗ);}$ по значению отношения определяется вид системы (неограниченная или ограниченная) и алгоритм дальнейшего расчёта.
- 6. **Определяется результирующие сопротивления цепи КЗ** с учётом мощности системы (если базисная мощность не равна суммарной мощности генераторов системы электроснабжения).
- 7. **Определяются необходимые значения токов КЗ**.

- Необходимость учета Синхронных генераторов возникает при подключении на генераторном напряжении РП к ТЭЦ. Для рпасчета должны быть известны: номинальное напряжение U ном, ЭДС E`` , постоянная времени затухания апериодической составляющей Та. Все кроме ЭДС – из паспорта. В случае отсутствия - справочник

Таблица 5.4

Средние значения сверхпереходной ЭДС E''_* и сверхпереходного сопротивления x''_*, отнесенные к номинальной мощности источников питания

Источники питания	E''_*, отн. ед.	x''_*, отн. ед.
Турбогенератор до 100 МВт	1,08	0,125
Турбогенератор 100–500 МВт	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

Внимание КР

- Если источником питания является энергосистема, заданная результирующим сопротивлением Хс, током кз Ik или мощностью Sk

,

$$S_к = \sqrt{3}\, U_{ср} I_к,$$

Когда необходимые данные об энергосистеме отсутствуют, расчеты производят по предельному току отключения $I_{отк}$ выключателей, установленных на шинах связи с энергосистемой. Ток отключения приравнивают к току КЗ $I_к$, и затем определяют сопротивление системы в именованных и относительных единицах:

$$x_с = U_{ср}/\sqrt{3}\, I_к; \qquad x_с = U_{ср}^2/S_к; \qquad (9.4)$$
$$x_{б.с} = S_б/S_к = S_б/S_{отк}; \qquad x_{б.с} = I_б/I_к = I_б/I_{отк},$$

где $I_к$ — заданный ток КЗ энергосистемы, приведенный к напряжению $U_{ср}$; $S_к$ — мощность трехфазного КЗ на шинах источника питания; $S_{отк}$ — мощность отключения выключателя по каталогу, установленного на присоединении подстанции предприятия к системе.

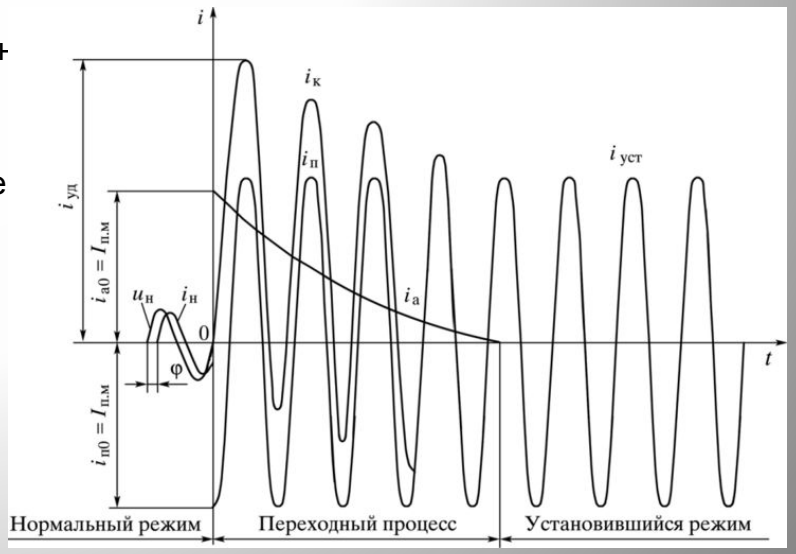
Для проверки аппаратуры системы электроснабжения необходимо, как правило, определяют следующие значения токов для режима КЗ:

- - ток I ″ (или I по) − действующее значение периодического тока в начальный момент КЗ (сверхпереходный);
- - токи $I_{0,1}$, $I_{0,2}$ − действующее значение периодических токов
- соответственно через 0,1сек и через 0,2сек после начала процесса КЗ;
- - ток I ∞ − действующее значение установившегося периодического тока при КЗ;
- - ток iуд − ударный ток;
- - ток Iу − наибольшее действующее значение тока КЗ за первый период от начала процесса КЗ.
- Если напряжение на шинах источника при КЗ остается неизмен

что имеет место в системах электроснабжения промышленных предприятий, то ток КЗ считается равным начальному действующему значению периодической составляюще

$$I_{п.0} = I_{п} = I_{кз}^{(3)}$$

$$i_{у} = \sqrt{2} k_{у} I_{кз}^{(3)}.$$



- В случае питания КЗ от энергосистемы расчетное выражение для определения периодической составляющей приобретает вид

$$I_к = I^{(3)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot z_\Sigma} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x_с + x_в)^2 + r_в^2}}, \qquad (9.2)$$

где $U_{ср}$ — напряжение на шинах энергосистемы; $z_\Sigma = \sqrt{(x_с + x_в)^2 + r_в^2}$ — результирующее сопротивление цепи КЗ; $x_с$ — результирующее сопротивление (индуктивное) энергосистемы относительно места ее подключения в расчетной схеме; $x_в$, $r_в$ — соответственно индуктивное и активное сопротивления от места подключения энергосистемы до точки КЗ. Без учета активного сопротивления периодический ток

$$I_к = I^{(3)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot x_\Sigma} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x_с + x_в)}}, \qquad (9.3)$$

где x_Σ — результирующее индуктивное сопротивление цепи КЗ. Мощность КЗ в заданной точке КЗ при базовом напряжении

$$S_к = S_к^{(3)} = \sqrt{3} \cdot U_{ср} \cdot I_к, \qquad (9.4)$$

где $I_к$ — ток в рассматриваемой точке КЗ, приведенный к напряжению $U_{ср}$.

В относительных единицах, если источником питания в расчетной схеме сети является энергосистема, ЭДС системы и напряжение на ее шинах равны: $E_б^* = U_{ср} = 1$, отсюда

$$I_к = I^{(3)} = I_б / z_{\Sigma(б)}. \qquad (9.5)$$

Без учета активного сопротивления

$$I_к = I^{(3)} = I_б / x_{\Sigma(б)}. \qquad (9.6)$$

При расчетах токов трехфазного КЗ для выбора аппаратов и проводников принято считать, что максимальное мгновенное значение тока КЗ или ударный ток наступает через 0,01 с с момента возникновения короткого замыкания.

Для схем с последовательно включенными элементами ударный ток определяют по выражению

$$i_{уд} = i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot I_{п0}^{(3)} \cdot (1 + e^{-0,01/T_а}) = \sqrt{2} \cdot I_{п0}^{(3)} \cdot K_{уд}, \qquad (9.7)$$

где $T_а$ — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ; $K_{уд}$ — ударный коэффициент для времени t = 0,01 с. Постоянную времени $T_а$ определяют по уравнению

$$T_а = x_\Sigma / (\omega r_\Sigma), \qquad (9.8)$$

где x_Σ и r_Σ – соответственно суммарные индуктивное и активное сопротивления схемы от источника питания до места КЗ.

КЗ в удаленных от генератора точках ударный коэффициент определяют по кривой зависимости $K_{уд} = f(T_а)$ (рис. 5.3).

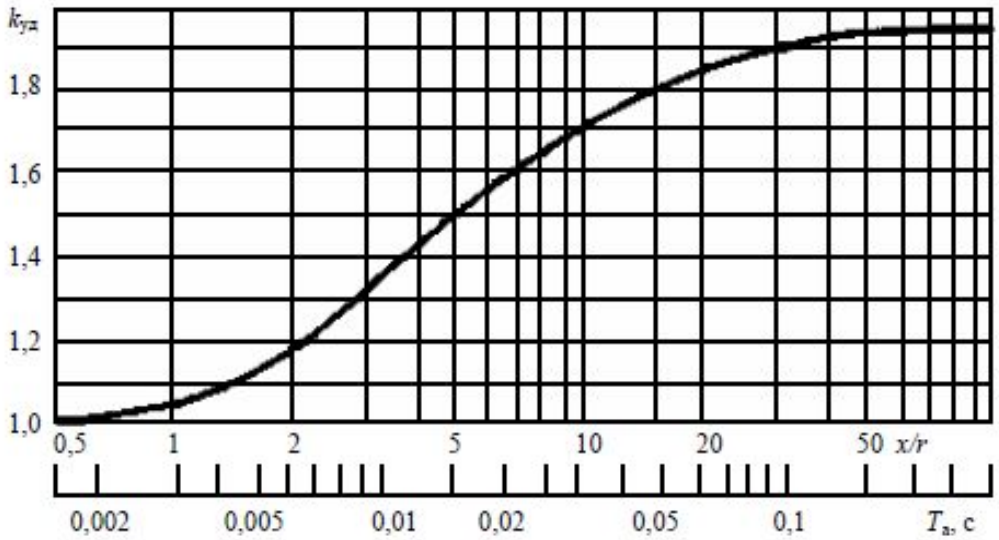


Рис. 5.3. Зависимость ударного коэффициента $K_{уд}$ от постоянной времени $T_а = x/r$

Таблица 5.3

Значения коэффициентов $K_{уд}$, q

Место короткого замыкания	Коэффициенты	
	$K_{уд}$	q
Выводы явнополюсного генератора без успокоительной обмотки	1,95	1,68
То же с успокоительной обмоткой	1,93	1,65
Выводы турбогенератора	1,91	1,63
В цепи, когда не учитывается активное сопротивление	1,8	1,52
На низшей стороне трансформаторов:		
1600; 2500	1,4	–
630; 1000 кВА	1,3	–
100; 250; 400 кВА	1,2	1,09
Удаленные точки КЗ с учетом величины активного сопротивления	По рис. 5.1	

Действующее значение полного тока КЗ за первый период определяют по формуле

$$I_{\text{v}} = I_{\text{по}} \sqrt{1 + 2(K_{\text{уд}} - 1)^2}\,. \qquad (5.6)$$

Для упрощенных расчетов можно принимать [3.2]:

- в сетях 110—220 кВ $к_у$ = 1,8;
- за трансформатором ГПП $к_у$ = 1,7;
- в сети 6—10 кВ при длине линии до 300 м $к_у$ = 1,4.

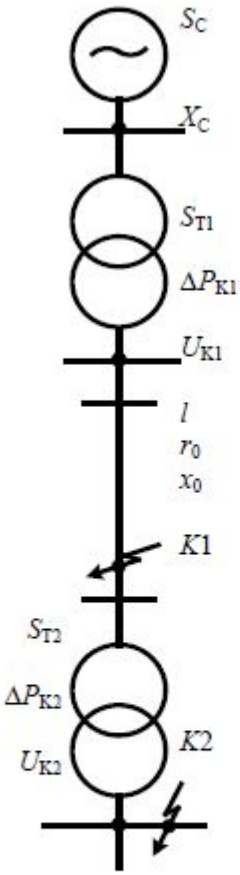


Рис. 5.1. Расчетная схема

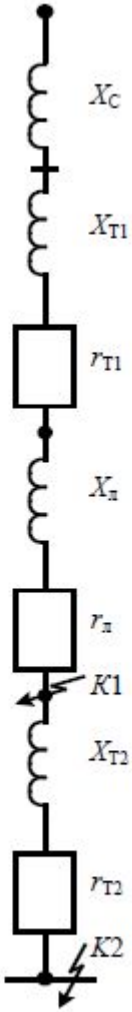


Рис. 5.2. Схема замещения

Таблица 5.2

Расчетные выражения для определения приведенных значений сопротивлений

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Именованные единицы, Ом	Относительные единицы, о.е.
1	2	3	4
Генератор (G)	$x''_{d*ном}$; $S_{ном\,G}$, МВ·А	$x_б = x''_{d*ном} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном\,G}}$	$x_{*б} = x''_{d*ном} \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,G}}$
	x''_d, %; $S_{ном\,G}$, МВ·А	$x_б = \frac{x''_d\%}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном\,G}}$	$x_{*б} = \frac{x''_d\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,G}}$
Энергосистема (C)	$S_к$, МВ·А	$x_б = \frac{U_б^2}{S_к}$	$x_{*б} = \frac{S_б}{S_к}$
	$I_{откл.ном}$, кА	$x_б = \frac{U_б^2}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{ср}}$	$x_{*б} = \frac{S_б}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{ср}}$
	$x_{*ном\,C}$; $S_{ном\,C}$, МВ·А	$x_б = x_{*номC} \frac{U_б^2}{S_{ном\,C}}$	$x_{*б} = x_{*номC} \frac{S_б}{S_{ном\,C}}$
Трансформатор (T)	$u_к$, %; $S_{ном.т}$, МВ·А	$x_б = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*б} = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.т}}$
Автотрансформатор и трехобмоточный трансформатор (Т) (схема замещения – звезда)	$u_{к,B-C}$, %; $u_{к,B-H}$, %; $u_{к,C-H}$, %; $S_{ном}$, МВ·А	$x_{бB} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,B-H} - u_{к,C-H}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{бC} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,C-H} - u_{к,B-H}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{бH} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-H} + u_{к,C-H} - u_{к,B-C}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*бB} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,B-H} - u_{к,C-H}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*бC} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,C-H} - u_{к,B-H}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*бH} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-H} + u_{к,C-H} - u_{к,B-C}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$

1	2	3	4
Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения (Т)	$U_{к,В-Н}$, %; $S_{ном.т}$, МВ·А	$x_{бВ} = \left(\frac{u_{к,В-Н}}{100} - 0{,}5\frac{u_{к,Н1-Н2}}{100}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{б1} = x_{б2} = \frac{2u_{к,В-Н}}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*бВ} = \left(\frac{u_{к,В-Н}}{100} - 0{,}5\frac{u_{к,Н1-Н2}}{100}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*б1} = x_{*б2} = \frac{2u_{к,В-Н}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.т}}$
Синхронные и асинхронные электродвигатели, компенсаторы (M)	x''_d; $S_{ном.М}$, МВ·А	$x_б = x''_d \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.М}}$	$x_{*б} = x''_d \cdot \frac{S_б}{S_{ном.М}}$
Реактор (LR)	$x_{ном.LR}$, Ом	$x_б = x_{номLR}\frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$	$x_{*б} = x_{номLR}\frac{S_б}{U_{ср}^2}$
Линия электропередачи (W)	$x_{уд}$, Ом/км; l, км	$x_б = x_{уд} \cdot l\frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$	$x_{*б} = x_{уд} \cdot l\frac{S_б}{U_{ср}^2}$

Примечание: $S_{ном}$ – номинальные мощности элементов (генератора, трансформатора, энергосистемы), МВА; $S_б$ – базисная мощность, МВ·А; $S_к$ – мощность КЗ энергосистемы, МВ·А; $I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА; $x_{*ном.С}$ – относительное номинальное сопротивление энергосистемы; $u_к$% – напряжение КЗ трансформатора; $I_б$ – базисный ток, кА; $U_{ср}$ – среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ; $x_{уд}$ – индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км; l – длина линии, км.

Ударный ток синхронного и асинхронного электродвигателей определяется следующим образом:

$$i_{уд} = i_{уд}^{(3)} = I_{п0Д}^{(3)} \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{кз} \cdot K_{уд}, \qquad (9.9)$$

где $K_{уд}$ — ударный коэффициент цепи двигателя.

Если сопротивление внешней цепи электродвигателя невелико $[z_в < (0{,}1–0{,}2)x_2]$ и его не требуется учитывать, $K_{уд}$ берется из таблиц; если внешнее сопротивление подлежит учету, то $K_{уд}$ следует определять аналитически.

Если расчетную схему в результате преобразования можно представить в виде двух или нескольких независимых генерирующих ветвей, ударный ток в месте КЗ определяют как сумму ударных токов этих ветвей.

Действующее значение полного тока КЗ I_t в произвольный момент времени равно

$$I_t = \sqrt{I_{пt}^2 + I_{аt}^2}, \qquad (9.10)$$

где $I_{пt}$ — действующее значение периодической слагающей тока КЗ в произвольный момент времени (по расчетным кривым); $I_{аt}$, — действующее значение апериодической слагающей тока КЗ в тот же момент времени.

Действующее значение тока КЗ за первый период от начала процесса

$$I_t = I_{п0}^{(3)} \sqrt{1 + 2 \cdot (K_{уд} - 1)^2}, \qquad (9.11)$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент, определяемый по $K_{уд} = 1 + \alpha$ (рис. 9.1).

Во всех случаях, когда не учитывается активное сопротивление цепи КЗ, обычно принимают $K_{уд} = 1{,}8$. Для удаленных точек КЗ с учетом активного сопротивления $K_{уд}$ определяется по экспоненциальной зависимости отношения времени КЗ к постоянной $T_а$.

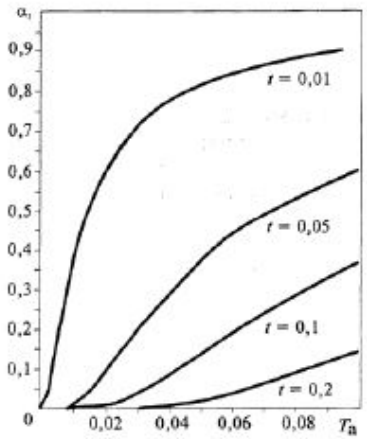


Рис. 9.1. Кривые для определения коэффициента затухания периодической слагающей тока КЗ

Условную мощность КЗ для произвольного момента времени (для выбора выключателя по отключающей способности) определяют по формуле

$$S_t = \sqrt{3} \cdot U_{ср} \cdot I_t, \qquad (9.12)$$

Учет подпитки от двигателей

- **<u>Учет подпитки мест короткого замыкания от электродвигателей производится, если двигатели непосредственно связаны с точкой короткого замыкания электрически и находятся в зоне малой удаленности</u>**. Токи короткого замыкания от двигателей, отдаленных от точки короткого замыкания ступенью трансформации или через обмотки

Если двигатели подключены к точке короткого замыкания кабельными линиями длиной не более 300 м, начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания определяется без учета внешнего сопротивления:

$$I_{п0} = E'' \cdot I_{ном} / x''_d, \qquad (9.13)$$

где x''_d – сопротивление двигателя в относительных единицах по каталожным данным; E'' – сверхпереходная ЭДС; $I_{ном}$ – номинальный ток двигателя.

Значение периодической составляющей тока короткого замыкания в момент отключения выключателя:

1) от асинхронного двигателя

$$I_{пt} = I_{п0} e^{-t/T_р}, \qquad (9.14)$$

где $T_р$ — расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока короткого замыкания двигателя; при отсутствии данных можно принять $T_р$ = 0,04–0,06 с;

2) от синхронного двигателя

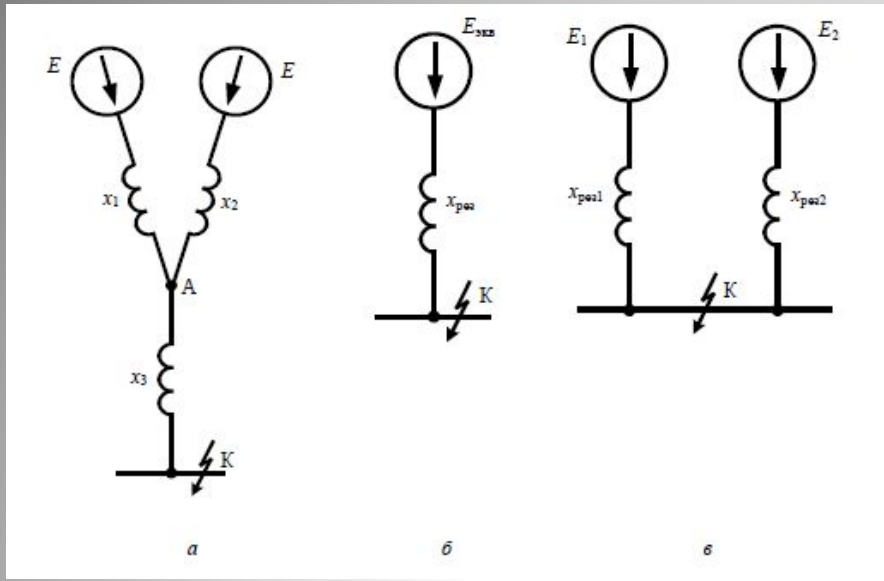
$$I_{пt} = I^*_п I_{п0}, \qquad (9.15)$$

где $I^*_п$ определяется по кривым ($I^*_п$ = 0,7 при t = 0,1 с и 0,6 при 0,25 с). Если тип двигателя не известен, то значение $I^*_п$ можно определить по усредненной кривой, как для двигателя серии СДН.

Апериодическая составляющая и ударный ток от двигателей:

$$i_{а} = \sqrt{2} I_{п0} e^{-t/T_{а}}; \;\; i_{уд} = k_{уд} \sqrt{2} I_{п0}; \;\; k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_{а}}. \qquad (9.16)$$

При отсутствии данных можно принять $T_{а}$ = 0,04 для асинхронных двигателей и $T_{а}$ = 0,06 с для синхронных.



одинаковых условиях по отношению к месту КЗ. Объединение одноименных источников питания допустимо при условии

$$\frac{S_1 x_{1*}}{S_2 x_{2*}} = 0,4 - 2,5, \qquad (5.10)$$

где S_1, S_2 – мощность первого и второго источников питания; x_{1*}, x_{2*} – соответствующие сопротивления от источников питания до точки КЗ, приведенные к базисной мощности.

Если ЭДС источников не равны, но выполняется условие (5.11), то эквивалентную ЭДС для двух ветвей схемы замещения определяют по формуле

$$E_{экв*} = \frac{E_{1*} y_1 + E_{2*} y_2}{y_1 + y_2}, \qquad (5.11)$$

где $y_1 = 1/x_{1*}$; $y_2 = 1/x_{2*}$.

При равенстве $E_{1*} = E_{2*}$ очевидно, что $E_{экв*} = E_{1*} = E_{2*}$.

$$K_{р1} = I_{п1*} = x_{экв*} / x_{1*};$$

$$K_{р2} = I_{п2*} = x_{экв*} / x_{2*}, \qquad (5.12)$$

где $x_{экв*} = x_{1*} x_{2*} / (x_{1*} + x_{2*})$.

Результирующее сопротивление от источника питания до точки КЗ после преобразования схемы составит (рис. 5.4, *б*):

$$x_{раз*} = (x_{экв*} + x_{3*}). \qquad (5.13)$$

Токораспределение по ветвям должно быть неизменным до преобразования схемы и после, поэтому справедливы следующие равенства:

$$x_{рез1*} = x_{рез*} / K_{р1};$$

$$x_{рез2*} = x_{рез*} / K_{р2}. \qquad (5.14)$$

Периодическую составляющую тока в рассматриваемой точке КЗ определяют по формуле

$$I_{по} = \frac{E''_* I_б}{x_{рез*}}, \qquad (5.15)$$

где E''_* – ЭДС источника, отн. ед.; $x_{рез*}$ – результирующее сопротивление цепи КЗ, приведенное к базисным условиям.

Токи в ветвях схемы замещения составят

$$I_{по1} = I_{по} K_{р1};$$

$$I_{по1} = I_{по} K_{р1}. \qquad (5.16)$$

ПРИМЕР

Определить ток трехфазного КЗ в точках К1, К2, К3 (рис. 5.5, *а*). Питание осуществляется от системы бесконечной мощности. Параметры, необходимые для расчета, приведены на рис. 5.5. *а*. Проведем решение в относительных и именованных единицах

1. Принимаем за базисные единицы $S_б = 100$ МВ·А и средние напряжения ступеней $U_{б1} = 37$; $U_{б2} = 10{,}5$ кВ. Определяем базисные токи кА по (5.4),

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б1}} = \frac{100}{\sqrt{3}\cdot 37} = 1{,}56;$$

$$I_{б2} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б2}} = \frac{100}{\sqrt{3}\cdot 10{,}5} = 5{,}5.$$

Составляем схему замещения и определяем сопротивления элементов в базисных единицах в соответствии с табл. 5.1.

Трансформаторы Т1 и Т2:

$$x_{т1*} = \frac{u_{кт1}}{100}\cdot\frac{S_б}{S_{ном.т}} = \frac{10{,}5}{100}\cdot\frac{100}{63} = 0{,}167;$$

$$x_{т2*} = \frac{8}{100}\cdot\frac{100}{10} = 0{,}8.$$

Воздушная линия Л1:

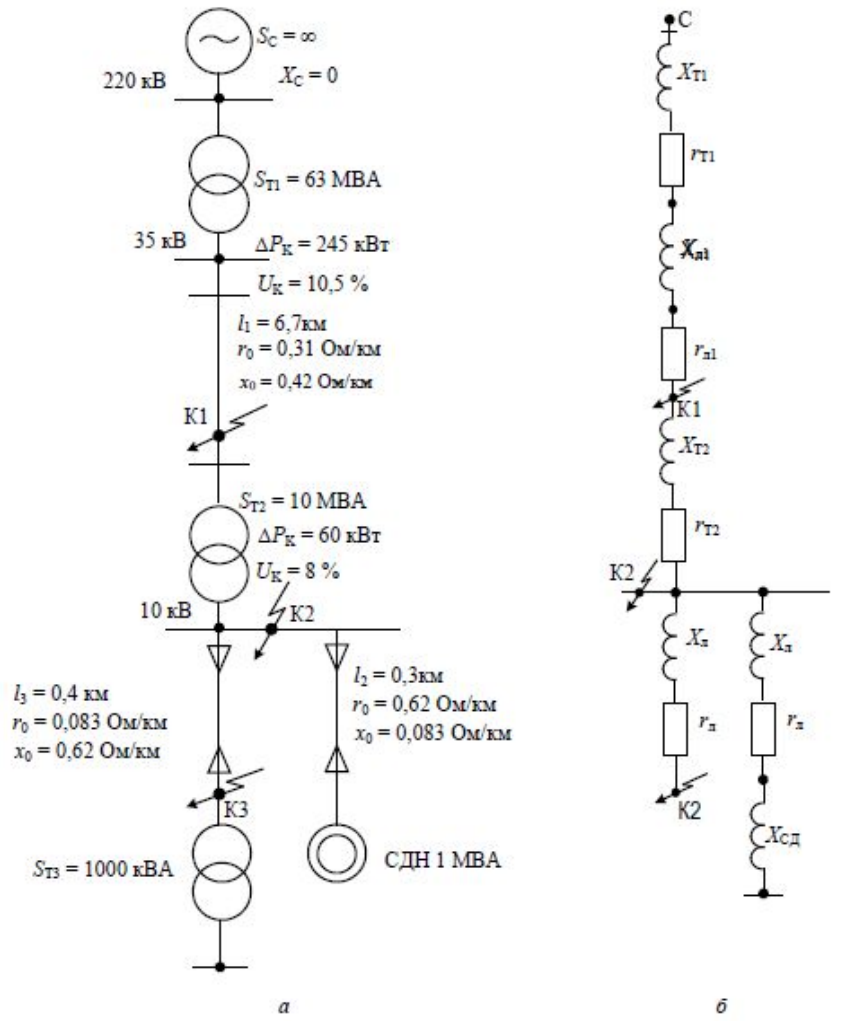
$$x_{л1*} = x_0 l\frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}4\cdot 6{,}7\frac{100}{37^2} = 0{,}196;$$

$$r_{л1*} = r_0 l\frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}31\cdot 6{,}7\frac{100}{37^2} = 0{,}152.$$

Кабельные линии Л2, Л3:

$$x_{л2*} = 0{,}62\cdot 0{,}4\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}225; \qquad r_{л2*} = 0{,}08\cdot 0{,}4\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}029;$$

$$x_{л3*} = 0{,}62\cdot 0{,}3\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}169; \qquad r_{л3*} = 0{,}08\cdot 0{,}3\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}022.$$



Синхронный двигатель:

$$x''_{сд*} = x''_d\frac{S_б}{S_{ном.сд}} = 0{,}2\frac{100}{1} = 20.$$

3. Определяем суммарное сопротивление до точки К1:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{т1*} + x_{л1*} = 0{,}167 + 0{,}196 = 0{,}363; \quad r_{\Sigma 1*} = r_{л1*} = 0{,}152.$$

4. Определяем ток К3, кА, в точке К1. Так как условие $r_\Sigma < x_\Sigma/3$ для точки К1 не выполняется, то учитываем в расчетах активное сопротивление

$$I_{к.К1} = \frac{I_б}{Z_{\Sigma 1*}} = \frac{1{,}56}{\sqrt{0{,}363^2 + 0{,}152^2}} = 3{,}96.$$

5. Определяем суммарное сопротивление со стороны системы и со стороны синхронного двигателя до точки К2:

$$x_{\Sigma c2*} = x_{\Sigma 1*} + x_{т2*} = 0{,}363 + 0{,}8 = 1{,}163; \qquad r_{\Sigma c2*} = r_{\Sigma 1*} = 0{,}152;$$

$$x_{\Sigma сд2*} = x''_{сд} + x_{л3*} = 20 + 0{,}169 = 20{,}169; \qquad r_{\Sigma сд2*} = r_{л3*} = 0{,}022.$$

Так как условие $r_\Sigma < x_\Sigma/3$ для точки К2 выполняется, то не учитываем в расчетах активное сопротивление.

6. Определяем токи, кА, в точке К2 отдельно от системы и от синхронного двигателя:

$$I_{к.с.К2} = \frac{1}{x_{рез1*}} I_{б2} = \frac{1}{1{,}163} \cdot 5{,}5 = 4{,}73;$$

$$I_{к.сд.К2} = \frac{1}{x_{рез2*}} I_{б2} = \frac{1}{20{,}169} \cdot 5{,}5 = 0{,}27.$$

Суммарный ток, кА, в точке К2:

$$I_{к.К2} = I_{к.с.К2} + I_{к.сд.К2} = 4{,}73 + 0{,}27 = 5{,}0.$$

7. Определяем результирующие сопротивления до точки К3.

Объединять систему бесконечной мощности и синхронный двигатель нельзя, поэтому определяем токи с помощью коэффициентов распределения. Находим эквивалентное сопротивление от источников питания, коэффициенты распределения и результирующие сопротивления до точки К2 по (5.11), (5.12), (5.13).

$$x_{\text{экв2*}} = \frac{x_{\Sigma c2*} x_{\Sigma сд2*}}{x_{\Sigma c2*} + x_{\Sigma сд2*}} = \frac{1{,}163 \cdot 20{,}169}{1{,}163 + 20{,}169} = 1{,}1;$$

$$K_{\text{р}1} = \frac{x_{\text{экв2*}}}{x_{\Sigma c2*}} = \frac{1{,}1}{1{,}163} = 0{,}946; \quad K_{\text{р}2} = \frac{x_{\text{экв2*}}}{x_{\Sigma сд2*}} = \frac{1{,}1}{20{,}169} = 0{,}0545;$$

$$x_{\text{рез3*}} = x_{\text{экв2*}} + x_{\text{л2*}} = 1{,}1 + 0{,}225 = 1{,}325;$$

$$x_{\text{рез13*}} = \frac{x_{\text{рез3*}}}{K_{\text{р}1}} = \frac{1{,}325}{0{,}946} = 1{,}4; \quad x_{\text{рез23*}} = \frac{x_{\text{рез3*}}}{K_{\text{р}2}} = \frac{1{,}325}{0{,}0545} = 24{,}3.$$

8. Определяем токи, кА, в точке К3 отдельно от системы и от синхронного двигателя

$$I_{\text{к.с.К3}} = \frac{1}{x_{\text{рез13*}}} I_{62} = \frac{1}{1{,}4} \cdot 5{,}5 = 3{,}93;$$

$$I_{\text{к.сд.К3}} = \frac{1}{x_{\text{рез23*}}} I_{62} = \frac{1}{24{,}3} \cdot 5{,}5 = 0{,}226.$$

Суммарный ток, кА, в точке К3:

$$I_{\text{к.К3}} = I_{\text{к.с.К3}} + I_{\text{к.сд.К3}} = 3{,}93 + 0{,}226 = 4{,}156.$$

9. Определяем ударный ток, кА, в точке К1. Находим ударный коэффициент по кривой (рис. 5.3) в зависимости от отношения x_{Σ}/r_{Σ}:

$$T_{\text{а1}} = \frac{x_{\Sigma 1*}}{r_{\Sigma 1*}} = \frac{0{,}363}{0{,}152} = 2{,}39;$$

$$K_{\text{уд1}} = 1{,}24;$$

$$i_{\text{уд1}} = \sqrt{2} I_{\text{к.К1}} K_{\text{уд1}} = 1{,}41 \cdot 3{,}96 \cdot 1{,}24 = 6{,}92.$$

10. Определяем ударные токи, кА, в точках К2, К3. Находим ударные коэффициенты, $K_{\text{уд1}} = K_{\text{уд2}} = 1{,}8$.

$$i_{\text{уд2}} = \sqrt{2} I_{\text{к.К2}} K_{\text{уд2}} = 1{,}41 \cdot 5{,}0 \cdot 1{,}8 = 12{,}69;$$

$$i_{\text{уд3}} = \sqrt{2} I_{\text{к.К3}} K_{\text{уд3}} = 1{,}41 \cdot 4{,}156 \cdot 1{,}8 = 10{,}54.$$

Короткое замыкание в сетях напряжением до 1 кВ.

В практических расчетах для характерной схемы сети до 1 кВ можно пользоваться значениями $R_{пс}$, приведенными ниже для точек $К_1$–$К_4$:

Мощность трансформатора, кВА			
	1000	1600	2500
$R_{пс}$, мОм, для точек*:			
$К_1$	6,41	6,81	15,42
$К_2$	4,01 / 5,92	2,72 / 3,81	1,86 / 3,01
$К_3$	18,38 / 22,31	12,01 / 15,95	6,92 / 9,26
$К_4$	7,09 / 7,79	4,51 / 5,27	3,62 / 4,59

* В числителе значения при магистральной схеме, в знаменателе — при радиальной.

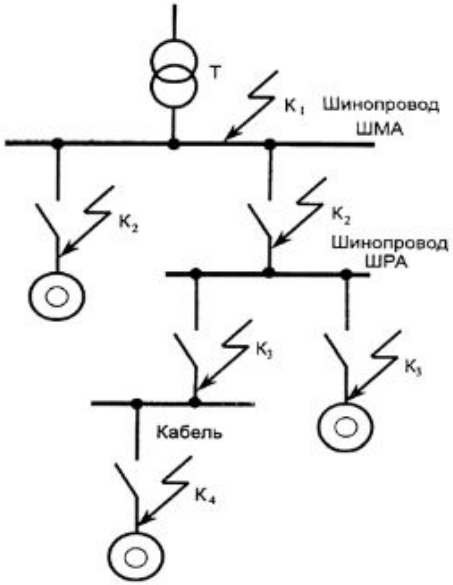


Рис. . Характерная схема цеховой электрической сети для расчета токов КЗ