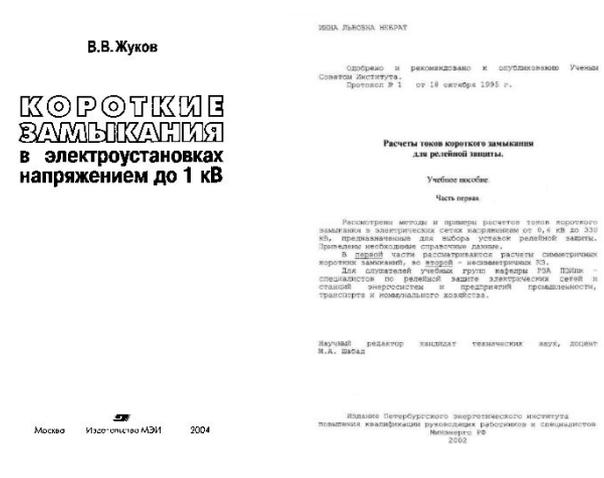
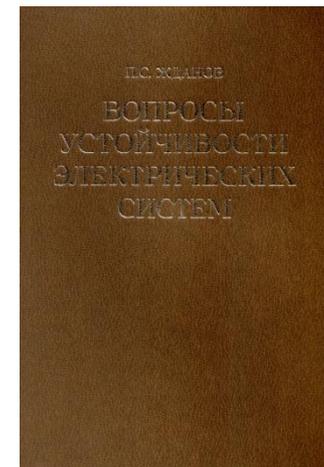
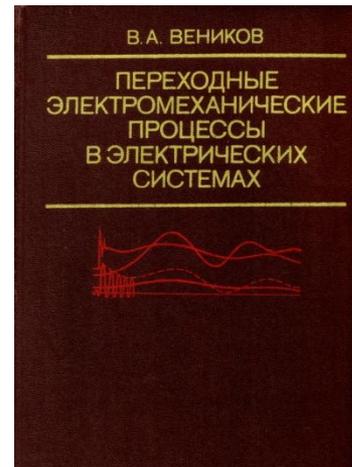
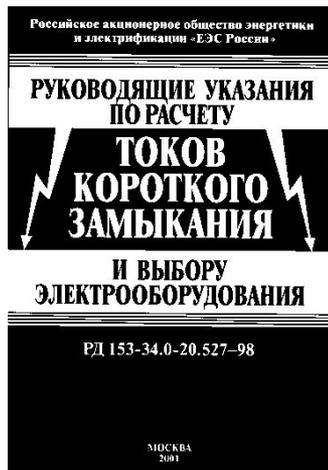


# Глава 5

## **Короткое замыкание**

# Литература



- ГОСТ 26522–85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 17 с.
- ГОСТ 27514–87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 40 с.
- ГОСТ Р 50270–92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 60 с.
- ГОСТ 29176–91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 40 с.
- ГОСТ Р 50254–92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 57 с.

*Короткое замыкание (КЗ)* – всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение токоведущих частей отдельных фаз между собой, а в установках с заземленной нейтралью также и с землей или с нулевым проводом, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

При изолированной нейтрали замыкание одной фазы на «землю» создает не аварийный, а лишь не нормальный режим работы. КЗ в этом случае вызывает ток всего 4 – 5 А, который в дальнейшем поддерживает электрическую дугу и становится причиной пожаров и взрывов.

Замыкание между отдельными фазами или между фазой и землей, большей частью происходит из-за нарушения изоляции между токоведущими частями, вызванные ее старением (износом, высыхания), перенапряжениями (пробоем), механическими повреждениями, дефектами. Повреждение междуфазной изоляции в установках с изолированной или заземленной нейтралью всегда приводит к возникновению аварийных режимов КЗ. Также причинами КЗ могут являться неправильные действия обслуживающего персонала при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой или включение их на ошибочно оставленное заземление); повреждения проводов и опор ЛЭП, вызванные их неудовлетворительным состоянием, гололедом, ураганым ветром, схлопыванием, набросом или перекрытием птицами проводов и другими причинами.

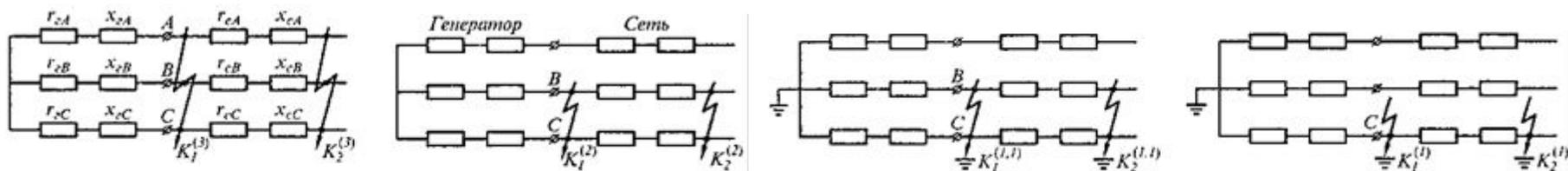
В электрических установках могут возникать различные виды коротких замыканий сопровождающихся резким увеличением тока в поврежденных фазах до значений, превосходящих в несколько раз номинальные.

Чаще всего КЗ происходит *через переходное сопротивление*, например через сопротивление электрической дуги, возникающей в месте повреждения изоляции – *дуговое КЗ*, при котором напряжение в точке КЗ может быть значительным. Иногда возникают *металлические (глухие) КЗ*, когда в месте КЗ существует непосредственный контакт токоведущих элементов. Для упрощения анализа в большинстве случаев при расчете КЗ рассматривают без учета переходных сопротивлений. В зависимости от места возникновения КЗ различают:

- 1) КЗ на зажимах источника;
- 2) КЗ за сопротивлением.

По числу замкнувшихся фаз различают следующие виды КЗ:

- 1) трехфазное КЗ – три фазы электроустановки соединяются между собой. Точка трехфазного КЗ обозначается  $K^{(3)}$ .
- 2) двухфазное КЗ – две фазы соединяются между собой без соединения с землей. В кабельных сетях часто оно переходит в трехфазное КЗ. Точка двухфазного КЗ обозначается  $K^{(2)}$ .
- 3) двойное замыкание на землю – две фазы трехфазной четырехпроводной системы соединяются между собой и с землей. Точка двухфазного КЗ на землю обозначается  $K^{(1,1)}$ .
- 4) однофазное КЗ – одна фаза трехфазной четырехпроводной системы соединяется с нейтралью источника через землю. Точка однофазного КЗ обозначается  $K^{(1)}$ .



Относительная вероятность трехфазного КЗ в сети с изолированной нейтралью – 1 – 7 %, двухфазного в сети с изолированной нейтралью – 2 – 13 %, однофазного в цепи с заземленной нейтралью – 60 – 90 %, двухфазного на землю в сети с заземленной нейтралью – 5 – 20 %.

При возникновении КЗ общее сопротивление цепи системы электроснабжения уменьшается, вследствие чего токи в ветвях системы резко увеличиваются, а напряжения на отдельных участках системы снижаются.

Протекание токов КЗ через элементы электрических установок вызывает **электродинамическое и тепловое воздействия**.

Продолжительность КЗ составляет обычно доли секунды и, как исключение, может длиться несколько секунд. В течение этого короткого промежутка времени выделение тепла настолько велико, что температура проводников и аппаратов выходит за пределы, установленные для нормального режима. Процесс нагревания прекращается в момент автоматического отключения поврежденного участка системы, после чего происходит относительно медленное остывание.

Даже кратковременное повышение температуры проводников и контактов при КЗ может ускорить старение и разрушение изоляции, вызвать сваривание и разрушение контактов, потерю механической прочности шин и проводов, пожары и т.п. Для надежности работы электрической системы необходимо исключить такие повреждения, что достигается выбором соответствующих размеров токоведущих частей и по возможности быстрым отключением поврежденных частей.

Способность аппарата и проводника противостоять кратковременному тепловому действию тока КЗ без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе, называется **термической стойкостью**.

Термическое действие сводится к нагреву токоведущих частей и аппаратов, по которым протекает ток КЗ. Критерием термической стойкости является конечная температура, которая ограничивается механической прочностью металлов, деформациями частей аппаратов, а также нагревостойкостью изоляции. Допустимые конечные температуры для аппаратов и проводников установлены на основании опыта. Они выше допустимых температур при нормальной работе, поскольку изменение механических свойств металлов и износ изоляции определяется не только температурой, но и продолжительностью нагревания, которая в рассматриваемых условиях мала.

Для термической стойкости аппаратов должно быть выполнено условие

$$W_{\text{выд}} \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \cdot R_{\text{апп}},$$

где  $W_{\text{выд}}$  – количество тепловой энергии, выделенной за время короткого замыкания;

$I_{\text{тер}}$  – номинальный ток термической стойкости аппарата;

$t_{\text{тер}}$  – номинальное время термической стойкости аппарата;

$R_{\text{апп}}$  – сопротивление аппарата.

Или

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}},$$

где  $B_{\text{к}}$  – импульс квадратичного тока короткого замыкания, пропорциональный количеству тепловой энергии, выделенной за время короткого замыкания (интеграл Джоуля).

Например тепловой импульс короткого замыкания в электрических сетях можно рассчитать по формуле:

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п.0}}^2 \cdot (t_{\text{отк}} + T_{\text{а}}),$$

где  $I_{\text{п.0}}$  – действующее значение периодической составляющей начального тока короткого замыкания;

$T_{\text{а}}$  – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания:

$$T_{\text{а}} = \frac{L}{R} = \frac{X}{314 \cdot R}.$$

Согласно ПУЭ время отключения  $t_{\text{отк}}$  складывается из времени действия основной релейной защиты данной цепи  $t_{\text{р.з}}$  и полного времени отключения выключателя  $t_{\text{о.в}}$ :

$$t_{\text{отк}} = t_{\text{р.з}} + t_{\text{о.в}}.$$

Токи КЗ сопровождаются значительными электродинамическими усилиями между проводниками, что может вызвать разрушение токоведущих частей и изоляции. В виду больших значений токов КЗ эти воздействия приводят к повреждению электроустановок, т.к. механическая сила взаимодействия, возникающая между двумя проводниками с током, прямопропорциональна произведению токов в проводниках и обратнопропорциональна расстоянию между ними, т.е. получается – току КЗ в квадрате. Однако она также зависит от формы и сечения проводника. В трехфазных системах наибольшей нагрузке подвергается средняя шина.

Способность аппарата (проводника) противостоять силам, возникающим при коротком замыкании, называется **электродинамической стойкостью**.

Расчетам на электродинамическую стойкость подвергают кроме шинных конструкций и их изоляторов так же все виды выключателей, разъединителей и трансформаторов тока, т.е. всю аппаратуру, через которую протекает ток КЗ.

Она выражается либо непосредственно амплитудным значением тока ( $i_{дин}$ ) при котором механические напряжения детали не превышают допустимых, либо кратностью этого тока амплитуде номинального тока:

$$i_{дин} \geq i_{уд}$$

или

$$k_{дин} = \frac{i_{дин}}{\sqrt{2}I_{ном}}$$

$$\sqrt{2} \cdot k_{дин} \cdot I_{ном} \geq i_{уд},$$

где  $i_{уд}$  – ударный ток короткого замыкания, кА.

При выборе токоведущих частей шин и изоляторов приходится рассчитывать возникающие ЭДУ и сравнивать их с допустимыми значениями. Механическая прочность элементов конструкций зависит не только от величины ЭДУ, но и от их направления, длительности, крутизны нарастания. Работа электрических аппаратов при динамических режимах работы изучена недостаточно, поэтому расчеты всегда ведут по максимальному значению ЭДУ. Расчет прочности детали конструкции аппарата основан на формуле из сопромата:

$$\sigma_p \leq \sigma_{\text{доп}},$$

где  $\sigma_p$  – расчетное механическое напряжение в конструкции, МПа;

$\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое напряжение материала на изгиб, МПа.

Для медных шин  $\sigma_{\text{доп}} = 171,5 - 178,4$  МПа,

для алюминиевых шин  $\sigma_{\text{доп}} = 41,2 - 48$  МПа,

для шин из алюминиевого сплава АД31Т-1  $\sigma_{\text{доп}} = 82,9$  МПа.

Для шин закрепленных на изоляторах:

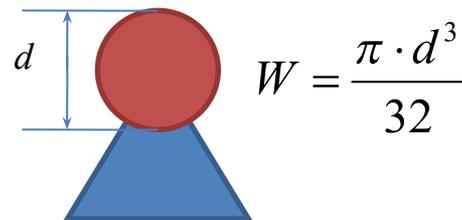
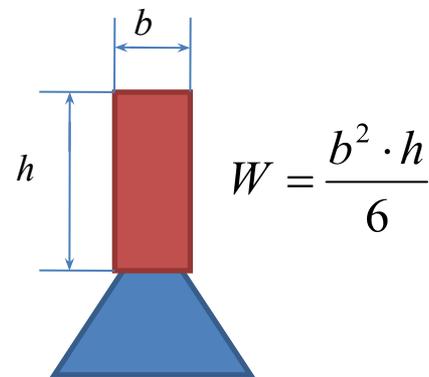
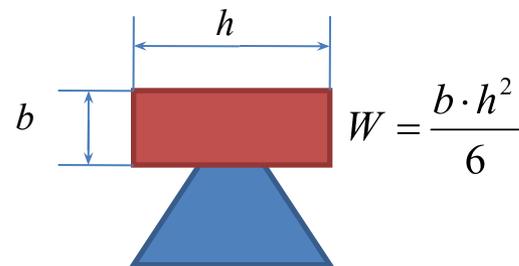
$$\sigma_p = \frac{M}{W}.$$

где  $M$  – максимальный изгибающий момент, Н·м;

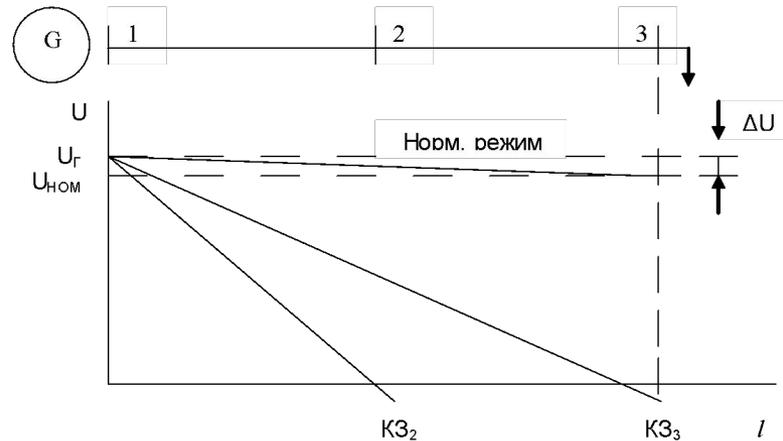
$W$  – момент сопротивления шины, м<sup>3</sup>.

Момент сопротивления для шин зависит от формы поперечного сечения шины и расположения осей. Он определяется по формулам, известным из сопромата:

$$M = F \cdot l. \quad F = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot k_\phi \cdot \frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right].$$



Также короткое замыкание в сети может сопровождаться прекращением питания потребителей, присоединенным к точкам, в которых произошло КЗ; нарушением нормальной работы других потребителей, подключенных к неповрежденным участкам сети, вследствие понижения напряжения на этих участках; нарушением нормальной работы энергетической системы.

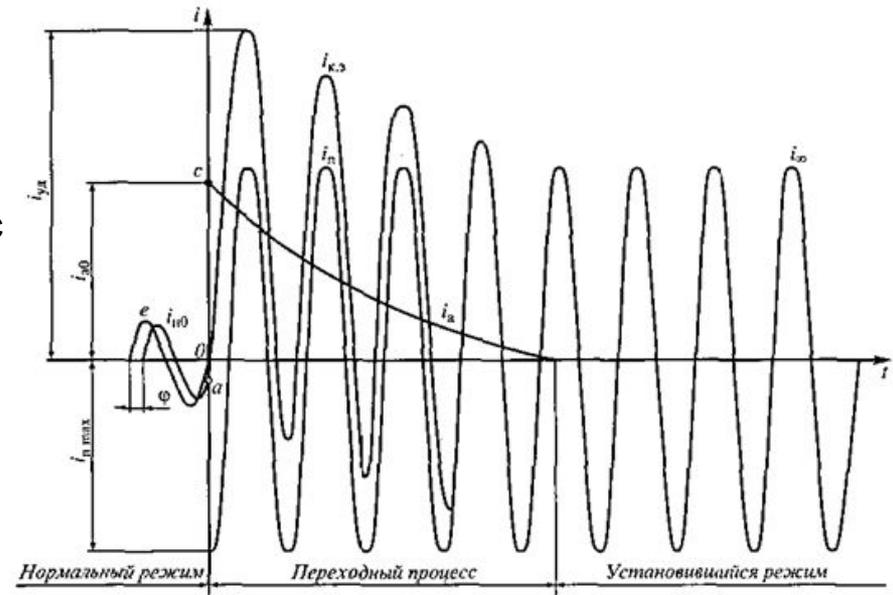


Снижение напряжения на шинах потребителя может привести к опасным последствиям. Особенно чувствительна к снижениям напряжения двигательная нагрузка. При глубоких снижениях напряжения уменьшается вращающий момент двигателя до значений, меньших момента сопротивления механизма. Двигатель тормозится, что влечет за собой увеличение потребляемого им тока. При этом еще больше увеличивается падение напряжения в сети, вследствие чего может развиваться лавинообразный процесс, захватывающий все большее количество потребителей электроэнергии. Резкое понижение напряжения при КЗ может привести к нарушению устойчивости параллельной работы генераторов и к системной аварии с большим ущербом.

Рассмотрим возникновение тока КЗ в цепи переменного тока с синусоидальной ЭДС, от источника неограниченной мощности. Значения токов КЗ зависят от момента времени.

Итак, при возникновении КЗ, в цепи появляются токи, имеющие следующие названия:

- периодическая составляющая тока КЗ, определяется по закону Ома и изменяется по гармонической кривой в соответствии с синусоидальной ЭДС генератора с рабочей частотой;
- аperiodическая составляющая – определяется характером затухания тока КЗ, зависящего от активного сопротивления цепи и обмоток статора генератора, изменяющаяся со временем без перемены знака.
- полный ток КЗ, который получается от алгебраического сложения первых двух.



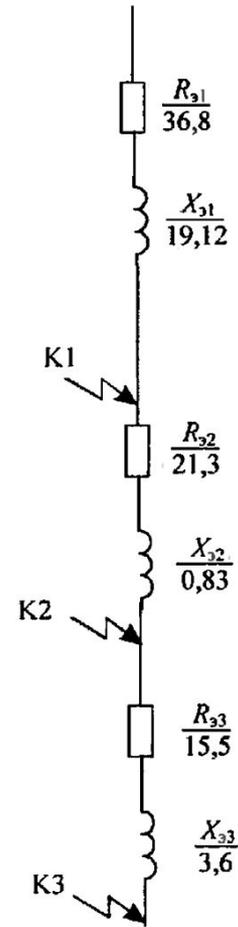
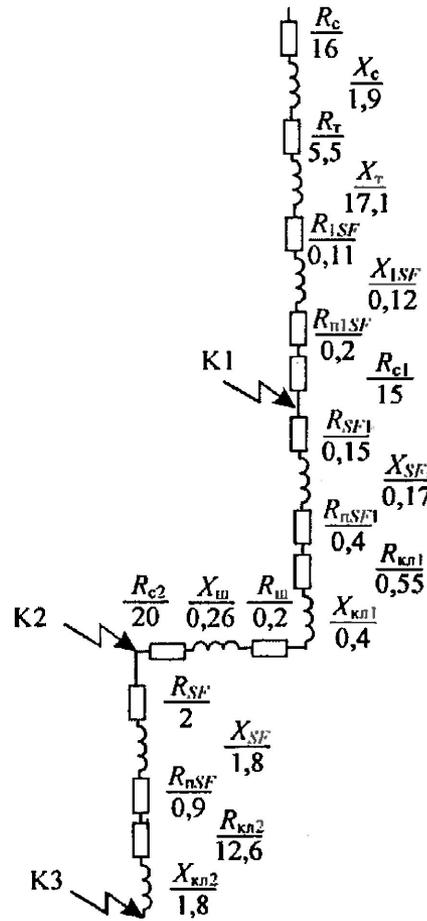
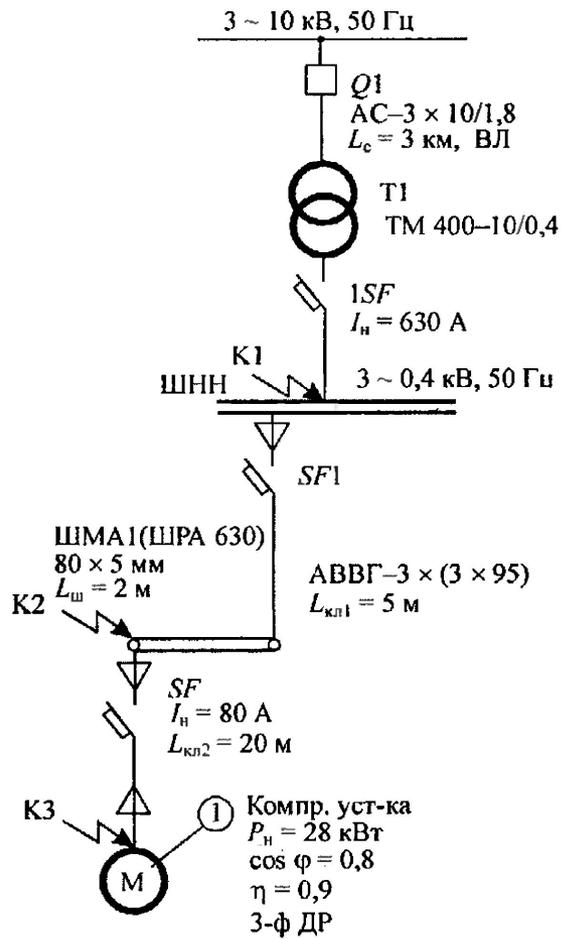
Действующее значение периодической составляющей тока КЗ  $I_{II} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}}$

Мгновенное значение периодической составляющей тока КЗ  $i_{II} = \sqrt{2} I_{II} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$

Аperiodическая составляющая затухает по экспоненциальному закону  $i_a = i_{a0} e^{-t/T_a}$ ,

Ударный ток, соответствующий времени  $t = 0,01$  с, т.е. через полпериода после возникновения КЗ,

$$i_y^{(3)} = i_a + i_{n.max} = i_{a0} e^{-t/T_a} + \sqrt{2} I_{n0}^{(3)} = \sqrt{2} I_{n0}^{(3)} (e^{-t/T_a} + 1) = k_y \sqrt{2} I_{n0}^{(3)},$$



Точка	$R_K$ , мОм	$X_K$ , мОм	$Z_K$ , мОм	$R_K / X_K$	$K_y$	$I_K^{(3)}$ , кА	$i_y$ , кА	$I_{\infty}^{(3)}$ , кА	$I_K^{(2)}$ , кА	$Z_n$ , мОм	$I_K^{(1)}$ , кА
К1	36,8	19,12	41,5	1,9	1,0	5,6	7,9	5,6	4,9	15	2,9
К2	58,1	19,95	61,4	2,9	1,0	3,6	5,1	3,6	3,1	36,9	2,2
К3	73,6	23,55	77,3	3,1	1,0	2,8	4,0	2,8	2,4	62,3	1,7

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_K^{(3)} = 0,87 I_K^{(3)}$$

$$I_K^{(1)} = \frac{V_{кф}}{Z_n + \frac{z_T^{(1)}}{3}}$$

## Средства для уменьшения воздействия токов короткого замыкания

В СЭС, с одной стороны, токи КЗ должны быть достаточны по значению для реагирования на них устройств релейной защиты, а с другой – ограничены с целью возможности использования выключателей с меньшей отключающей способностью. Если по условиям тока КЗ требуемые пределы не обеспечиваются, то принимаются меры по ограничению тока КЗ и (или) времени его действия (увеличение сопротивления цепи (использование трансформаторов с расщепленными обмотками и токоограничивающих реакторов);

- уменьшение мощности тока КЗ (секционирование основной сети энергосистемы, шин электростанций и подстанций);
- использование быстродействующих выключателей;
- уменьшение времени действия защиты, действующей при коротких замыканиях;
- правильное вычисление величины токов КЗ и выбор необходимой аппаратуры, защиты и средств для ограничения токов КЗ;
- устранение причин, вызывающих короткие замыкания.