

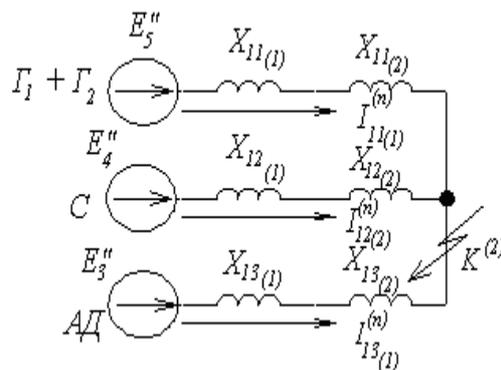
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГОУ ВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

*Прыгов Н.М., Маловастая Е.Ф.*

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся  
по специальностям 311400 – «Электрификация и автоматизация  
сельского хозяйства»



Брянск 2009

УДК 631.371:621.311(075)

ББК 40.7

П 85

Прыгов Н.М., Маловастая Е.Ф. Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по специальностям 311400 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства». Брянск. Издательство Брянской ГСХА, 2009 – 40 с.

Разработали: Н.М. Прыгов, канд. техн. наук, доц.  
Е.Ф. Маловастая

В учебном пособии приведены теоретические сведения для решения практических задач по электромагнитным переходным процессам, в частности для расчетов токов короткого замыкания, рассмотрены особенности расчета токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1 кВ. Даны решения характерных примеров для определения токов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях в начальный момент времени переходного процесса и в любой момент времени.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 311400 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»

Рецензенты: к.т.н., доц. БГТУ Башлыков В.А

Рекомендовано к изданию методической комиссии факультета энергетики и природопользования Брянской государственной сельскохозяйственной академии, протокол №18 от 26 декабря 2008 года.

© Брянская ГСХА, 2009  
© Н.М. Прыгов, 2009  
© Е.Ф. Маловастая, 2009

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

1.	Общие сведения об электромагнитных переходных процессах в системах электроснабжения	4
2.	Практические методы расчета тока трехфазного короткого замыкания	7
2.1.	Выбор расчетных условий	7
2.2.	Системы единиц. Составление схем замещения	8
2.3.	Эквивалентные преобразования схем замещения	13
2.4.	Расчет начального, ударного и наибольшего действующего значения тока трехфазного короткого замыкания	15
2.5.	Расчет тока трехфазного к. з. для любого момента времени переходного процесса	19
3.	Расчет несимметричных коротких замыканий	24
4.	Особенности расчета токов к. з. в схемах сельского электроснабжения напряжением до 1 кВ	35
	Литература	39

## **1. Общие сведения об электромагнитных процессах в системах электроснабжения**

Система электроснабжения – часть электрической системы, которая представляет собой совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией. В свою очередь, электрическая система – совокупность электрических станций и электрических сетей энергосистемы. В состав электрической системы входят синхронные генераторы электростанций, трансформаторы повышающих и понижающих подстанций, линии электропередачи (ЛЭП), потребители электрической энергии. В любой момент времени или на интервале времени в системе протекают процессы, совокупность которых называется режимом системы и характеризуется параметрами, определяющими условия работы системы. Это значения напряжений в различных точках системы, углов сдвига фаз между эдс генераторов и напряжением на шинах приемников, токов и мощностей.

Режимы системы могут быть установившимися и неустойчивыми (переходными). Переходные режимы (процессы) возникают в электрической системе при изменении условий ее работы, которые происходят как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузки (Н), пуск асинхронных двигателей (АД), отключение одной цепи ЛЭП и т. д.), так и в аварийных ситуациях (короткое замыкание (к. з.), обрыв цепи ЛЭП, автоматическое регулирование, возбуждения (АРВ) генераторов и др.)

В общем случае переходный процесс сопровождается нарушением первоначального электромагнитного состояния элементов системы и скорости вращения электрических машин, т. е. процесс характеризуется взаимосвязанными между собой волновыми, электромагнитными и электромеханическими изменениями. В схемах сельского электроснабжения допустимо рассматривать переходный процесс только как электромагнитный.

Изучение переходных режимов необходимо для того, чтобы уметь оценивать значения параметров режима и тем самым заранее предотвращать опасные последствия таких режимов.

Наиболее распространенными и опасными повреждениями в электрической системе являются короткие замыкания. Продолжительность к. з. часто составляет доли секунды или секунды. Однако их последствия иногда бывают весьма тяжелыми. Так, следствием к. з. могут быть: понижение напряжения в значительной части электроэнергетической системы, приводящее к нарушению нормальной работы потребителей электроэнергии и браку продукции; разрушение поврежденного оборудования под действием электрической дуги; разрушение электрооборудования в результате электродинамического и термического действия токов к. з.; нарушение устойчивости электроэнергетической системы.

Коротким замыканием называется всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы замыкание между фазами, а в системах с заземленной нейтралью (или четырехпроводных) также замыкание одной

или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод). При этом токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту замыкания, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима. Виды коротких замыканий представлены в таблице 1.

Короткое замыкание на землю в электроустановке обусловлено соединением с землей одной, двух или трех фаз какого-либо ее элемента, а короткое замыкание с землей сопровождается контактированием точки к. з. с землей.

Т а б л и ц а 1

Поясняющая схема	Сети глухозаземленные (0,38 кВ, 330 кВ и выше) или эффективно заземленные (110 кВ; 220 кВ)		Сети незаземленные (с изолированной нейтралью) или резонансно-заземленные (6; 10; 20; 35 кВ)	
	Термин	Условное обозначение	Термин	Условное обозначение
	Трехфазное к. з.	$K^{(3)}$	Трехфазное к. з. 	$K^{(3)}$
	Трехфазное к. з. на землю.	$K^{(1,1,1)}$	Трехфазное к. з. с землей	$K^{(3з)}$
	Двухфазное к. з.	$K^{(2)}$	Двухфазное к. з.	$K^{(2)}$
	Двухфазное к. з. на землю	$K^{(1,1)}$	Двухфазное к. з. с землей	$K^{(2з)}$
	Однофазное к. з. на землю (или однофазное к. з.)	$K^{(1)}$	Однофазное замыкание на землю	$З^{(1)}$
	Двойное к. з. на землю	$K^{(1+1)}$	Двойное замыкание на землю	$З^{(1+1)}$

Трехфазное к.з. является симметричным, при котором все фазы электроустановки находятся в одинаковых условиях. Все остальные виды к.з. являются несимметричными, поскольку при каждом из них фазы находятся в неодинаковых условиях.

#### **Короткие замыкания могут быть:**

- ✓ металлическими, при которых переходным сопротивлением в месте повреждения можно пренебречь из-за его малого значения;
- ✓ дуговыми, когда в месте к. з. возникает электрическая дуга;
- ✓ устойчивыми, условия возникновения которых сохраняются после отключения поврежденного элемента и последующего включения;
- ✓ неустойчивыми, условия возникновения которых самоликвидируются во время бестоковой паузы при отключении поврежденного элемента.

По данным многолетней аварийной статистики в количественном отношении к.з. распределяются так:  $K^{(3)}$  и  $K^{(1,1,1)} \approx 5\%$ ;  $K^{(2)}$  и  $K^{(1,1)} \approx 10\%$ ;  $K^{(1+1)}$  и  $Z^{(1+1)} \approx 20\%$ ;  $K^{(1)}$  и  $Z^{(1)} \approx 65\%$ .

Если в процессе аварии один вид к.з. переходит в другой, то он называется видоизменяющимся.

#### **Основные причины возникновения к.з.:**

- ✓ нарушение изоляции электрооборудования, вследствие старения, механических повреждений, перенапряжений и прямых ударов молнии;
- ✓ перекрытие токоведущих частей птицами и животными;
- ✓ неправильные действия эксплуатационного персонала.

Исследования переходных процессов при к.з. необходимы для решения ряда задач, например:

- ✓ выбор аппаратуры электроустановок и проверка ее по условиям работы при к. з. (проверка на термическую и электродинамическую стойкость);
- ✓ проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики;
- ✓ оценка влияния токов нулевой последовательности ЛЭП на линии связи;
- ✓ проектирование заземляющих устройств;
- ✓ сопоставление, оценка и выбор схем станций, подстанций, системы;
- ✓ анализ аварий и т. д.

Требуемая точность расчетов во многом определяет возможность принятия тех или иных допущений, упрощающих задачу и выбор методов ее решения.

#### **Основные допущения:**

- ✓ сохранение симметрии трехфазной системы (за исключением места к.з.);
- ✓ отсутствие сдвига по фазе между эдс генераторов;
- ✓ пренебрежение токами намагничивания трансформаторов;
- ✓ линейность всех элементов схемы (отсутствие насыщения электрических машин);
- ✓ пренебрежение активными сопротивлениями элементов схемы. Если результирующее эквивалентное активное сопротивление относительно точки к.з. не превышает 30 % результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления ( $r_{\text{экв}} \leq 1/3 x_{\text{экв}}$ );

- ✓ пренебрежение поперечной емкостью воздушных ЛЭП 110...220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и ЛЭП 330...500 кВ при их длине менее 150 км;
- ✓ отсутствие качаний синхронных машин, если продолжительность к.з. не превышает 0,5 с;
- ✓ приближенный учет комплексных нагрузок в виде постоянного индуктивного сопротивления.

В зависимости от сложности расчетной схемы и целей расчета токи к.з. определяют следующими способами:

- ✓ путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием ЭВМ;
- ✓ аналитическим способом с использованием эквивалентных схем замещения;
- ✓ с применением аналоговых расчетных моделей переменного и постоянного тока;
- ✓ с использованием специальных расчетных кривых.

## 2. Практические методы расчета тока трехфазного короткого замыкания

### 2.1 Выбор расчетных условий

Расчетные условия к.з. – наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться рассматриваемый элемент электроустановки при различных видах к.з.

В соответствии с назначением расчетов выбирают расчетные условия. К ним относят:

- ✓ выбор расчетной схемы;
- ✓ выбор расчетной точки к. з.;
- ✓ выбор расчетного вида к. з.;
- ✓ выбор расчетного времени к. з.

Например: для проверки выбранного выключателя  $Q$  по условиям работы при к.з. необходимо знать максимальное значение тока при к.з. Расчетная схема приведена на рисунке 1. Расчетные условия при к.з. следующие:

- ✓ расчетная схема – включены оба источника  $C_1$  и  $C_2$ ;
- ✓ расчетная точка –  $K_1$ ;
- ✓ расчетный вид к.з. –  $K^{(3)}$ ;
- ✓ расчетное время к.з. –  $t = 0$

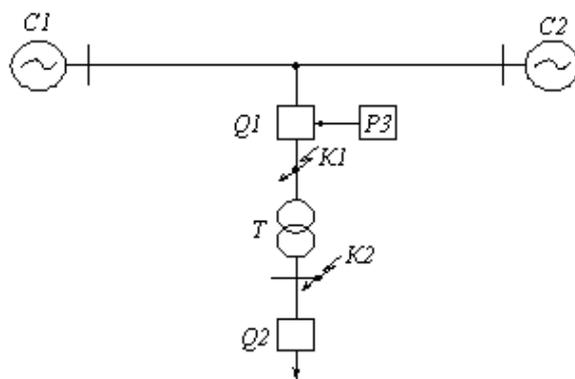


Рисунок 1

Для оценки возможного действия релейной защиты (РЗ) при к.з. необходимо знать минимальное значение тока к.з. в зоне действия защиты. Расчетные условия в этом случае следующие:

- ✓ расчетная схема – отключен один из источников  $C_1$  и  $C_2$  (имеющий наименьшую электрическую удаленность);
- ✓ расчетная точка к. з. –  $K_2$ ;
- ✓ расчетный вид к. з. –  $K^{(2)}$ ;
- ✓ расчетное время к. з. –  $t = t_{ср.РЗ}$  ( время срабатывания релейной защиты).

## 2.2 Системы единиц. Составление схем замещения

При расчетах токов к.з. составляют схему замещения для заданной расчетной схемы электрической системы. Схема замещения представляется в однолинейном изображении (для одной фазы). Элементы расчетной схемы представляют в схеме замещения сопротивлениями, а источники питания (генераторы, синхронные компенсаторы, мощные электродвигатели) – сопротивлениями и эдс (таблица 2).

Параметры элементов расчетной схемы определяют в соответствии с их паспортными данными. Для некоторых элементов сопротивления задают в именованных единицах (Вольт, Ампер, Ом), например: для ЛЭП –  $x_{уд}$ ,  $r_{уд}$ , Ом/км; для других – в относительных единицах при номинальных условиях, например: для генераторов, обобщенной нагрузки, токоограничивающих реакторов. В последнем случае – это доля от сопротивления, найденного из выражения

$$Z = \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H} = \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $S_H$  – номинальные напряжения, ток и мощность данного элемента.

Тогда сопротивления элементов расчетной схемы электроснабжения в именованных единицах:

генератора 
$$x_d'' = x_d^{*(H)} \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

трансформатора 
$$x_T = \frac{u_K \% U_H^2}{100 S_H}, \text{ Ом}, \quad (3)$$

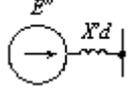
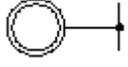
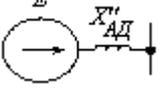
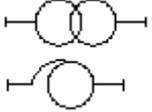
где  $U_H$  – номинальное напряжение обмотки ВН или НН;

реактора 
$$x_P = \frac{x_P \% U_H}{100 \sqrt{3} I_H}, \text{ Ом}, \quad (4)$$

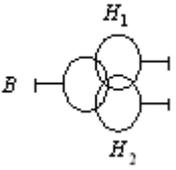
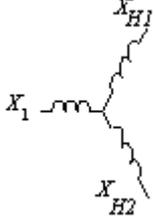
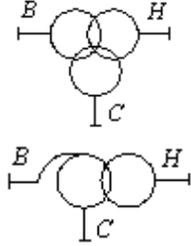
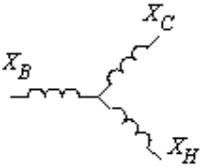
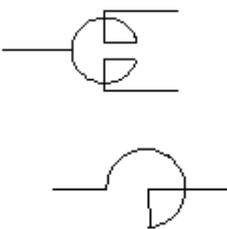
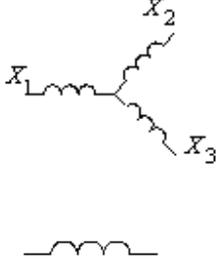
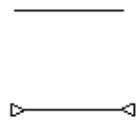
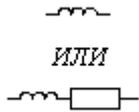
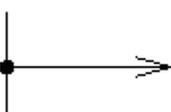
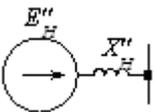
асинхронного двигателя 
$$x_{\partial\sigma}'' = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{U_H^2 \eta \cos \varphi}{P_H}, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где  $K_n$  – коэффициент кратности пускового тока;

Т а б л и ц а 2

Наименование элементов	Обозначение на расчетное схеме	Схема замещения	Реактивности $X$ элементов	
			Ом	Относительные базисные единицы
1	2	3	4	5
Синхронные машины (генераторы, компенсаторы, электродвигатели)			$x_{d^{*(H)}}'' \frac{U_H^2}{S_H}$	$x_{d^{*(H)}}'' \frac{S_{\sigma}}{S_H}$
Асинхронные электродвигатели			$\frac{1}{K_n} \cdot \frac{U_H^2 \eta \cos \varphi}{P_H}$	$\frac{1}{K_n} \cdot \frac{S_{\sigma} \eta \cos \varphi}{P_H}$
Двухобмоточный трансформатор и автотрансформатор			$\frac{u_K \% U_H^2}{100 S_H}$	$\frac{u_K \% S_{\sigma}}{100 S_H}$

Продолжение таблицы 2

<p>Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две цепи обмоткой НН</p>			$x_B = \frac{u_k \% U_H^2}{100 S_H}$ $x_{H1} = x_{H2} = \frac{u_k \% U_H^2}{100 S_H} \cdot 1,75$	$x_B = \frac{u_k \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H} \cdot 0,125$ $x_{H1} = x_{H2} = \frac{u_k \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H} \cdot 1,75$
<p>Трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор (*)</p>			$x_B = 0,5(x_{BH} + x_{BC} - x_{CH});$ $x_C = 0,5(x_{BC} + x_{CH} - x_{BH});$ $x_H = 0,5(x_{BH} + x_{CH} - x_{BC});$ $x_{BH} = \frac{u \%_{KBH}}{100}; \quad x_{BC} = \frac{u \%_{KBC}}{100}$ $x_{CH} = \frac{u \%_{KCH}}{100}$	<p>* Реактивность в относ. ном. ед.</p>
<p>Токоограничивающие реакторы:  простой  сдвоенный</p>			$\frac{x_P \%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}$ $\frac{x_P \%}{100}$	$\frac{x_P \% I_{\bar{\sigma}} U_H}{100 I_H U_{\bar{\sigma}}}$
<p>ЛЭП Воздушная  Кабельная</p>			$x_{yd} \cdot \ell$ $R_{yd} \cdot \ell$	$x_{yd} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}$ $R_{yd} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}$
<p>Обобщенная нагрузка</p>			$0,4 \frac{U_{\bar{\sigma}}}{S_{\bar{\sigma}}}$	$0,4 \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}$

обобщенной (комплексной) нагрузки

$$x''_H = 0,4 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ Ом}, \tag{6}$$

ЛЭП

$$x_L = x_{yd} \cdot \ell, \text{ Ом}. \tag{7}$$

Практически любая расчетная схема содержит трансформаторы. При составлении схемы замещения магнитосвязанные цепи трансформаторов должны быть заменены электрически связанными цепями. Поэтому при расчетах тока к.з. в именованных единицах произвольно принимают одну из ступеней трансформации за основную и к ней приводят параметры всех элементов схемы. Расчетные выражения:

$$\dot{E} = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot E; \quad (8)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{(K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)} \cdot I; \quad (9)$$

$$\dot{Z} = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2 Z, \quad (10)$$

где  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – действительные (фактические) коэффициенты трансформации, указанные в паспортных данных, определяемые в направлении от выбранной основной ступени напряжения к той ступени, элементы которой подлежат приведению.

Допускается также приближенное приведение, когда действительные коэффициенты трансформации трансформаторов заменяются коэффициентами трансформации в виде отношения средних номинальных напряжений соответствующих ступеней трансформации.

В таблице 3 приведена шкала средних номинальных напряжений.

Т а б л и ц а 3

$U_{ср.н},$ кВ	0,4	3,15	6,3	10,5	37	115	230
$U_n,$ кВ	0,38	3	6	10	35	110	220

При этом выражения для пересчета упрощаются:

$$\dot{E} = \frac{U_{ср.н.осн}}{U_{ср.н}} E, \quad (11)$$

$$\dot{I} = \frac{U_{ср.н.}}{U_{ср.н.осн}} I, \quad (12)$$

$$\dot{Z} = \left( \frac{U_{ср.н.осн}}{U_{ср.н}} \right)^2 Z, \quad (13)$$

где  $U_{ср.н.осн}$  – среднее номинальное напряжение ступени, выбранной за основную;  $U_{ср.н}$  – то же ступени, с которой производится пересчет.

Эдс и сопротивления элементов схемы замещения могут быть выражены не только в именованных единицах, но и в относительных единицах. В этом случае все параметры (эдс и сопротивления) элементов схемы замещения выражают в относительных единицах при выбранных базисных единицах измерения. Последние устанавливают для каждой ступени напряжения. Выбирают основную ступень напряжения и для нее произвольно устанавливают базисные единицы измерения. Обычно произвольно задаются базисной мощностью  $S_б$ , МВ·А (которая одинакова

на всех ступенях трансформации) и базисным напряжением  $U_{\bar{o},ocн}$ , равным номинальному напряжению ступени. Две другие величины находят по выражениям:

$$I_{\bar{o},ocн} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o},ocн}}; Z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3}I_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}}}. \quad (14)$$

Базисные единицы на других ступенях напряжения находят через коэффициенты трансформации:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\bar{o}} &= U_{\bar{o},ocн} \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n}; \dot{I}_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{\bar{o}}} \text{ или} \\ \dot{I}_{\bar{o}} &= I_{\bar{o},ocн} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n. \end{aligned} \quad (15)$$

Любые величины, входящие в расчет и заданные в именованных единицах, переводят в относительные базисные величины следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{*(\bar{o})} &= \frac{E}{U_{\bar{o}}}; I_{*(\bar{o})} = \frac{I}{I_{\bar{o}}}; S_{*(\bar{o})} = \frac{S}{S_{\bar{o}}}; \\ Z_{*(\bar{o})} &= \frac{Z}{Z_{\bar{o}}} = Z \frac{\sqrt{3}I_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}} = Z \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $U, I, Z, S$  – значения величин в именованных единицах (кВ, кА, Ом, МВ·А) на расчетной ступени напряжения;  $U_{\bar{o}}, I_{\bar{o}}, Z_{\bar{o}}, S_{\bar{o}}$  – базисные единицы на той же ступени напряжения; (\*) – относительные единицы;  $(\bar{o})$  – величина отнесена к базисным единицам измерения.

Если параметры элементов схемы заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их пересчет к базисным условиям проводят по выражениям:

$$\begin{aligned} E_{*(\bar{o})} &= E_{*(н)} \frac{U_n}{U_{\bar{o}}}; Z_{*(\bar{o})} = Z_{*(н)} \frac{I_{\bar{o}} U_n}{I_n U_{\bar{o}}}; \\ \text{или } Z_{*(\bar{o})}^* &= Z_{*(н)}^* \frac{S_{\bar{o}} U_n^2}{S_n U_{\bar{o}}}. \end{aligned} \quad (17)$$

В приближенных расчетах на всех ступенях трансформации принимают  $U_{\bar{o}} = U_{ср.н}$ . Тогда расчетные выражения упрощаются:

$$E_{*(\bar{o})} = E_{*(н)}; Z_{*(\bar{o})} = Z_{*(н)} \frac{I_{\bar{o}}}{I_n} = Z_{*(н)} \frac{S_{\bar{o}}}{S_n}. \quad (18)$$

После выполнения расчетов в относительных базисных единицах действующие значения напряжений, токов, мощностей в именованных единицах находят по формулам обратного пересчета:

$$U = U_{*(\bar{o})} \cdot U_{\bar{o}}; I = I_{*(\bar{o})} \cdot I_{\bar{o}}; S = S_{*(\bar{o})} \cdot S_{\bar{o}}. \quad (19)$$

Точность расчетов не зависит от того, в какой системе единиц выражают величины.

### 2.3 Эквивалентные преобразования схем замещения

При расчете токов к. з. применяют известные методы преобразования и упрощения схем:

1) Определение результирующего сопротивления последовательно соединенных  $n$  элементов:

$$x_{\text{эк}} = x_1 + x_2 + \dots + x_n. \quad (20)$$

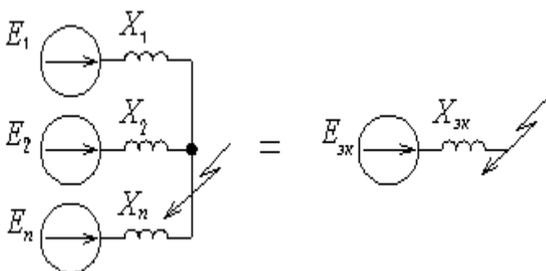
2) Определение результирующего сопротивления при параллельном соединении элементов

$$x_{\text{эк}} = \frac{1}{1/x_1 + 1/x_2 + \dots + 1/x_n}; \quad (21)$$

в частном случае для двух ветвей 
$$x_{\text{эк}} = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2}, \quad (22)$$

для трех ветвей 
$$x_{\text{эк}} = \frac{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}{x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3}, \quad (23)$$

3) Замена  $n$  генерирующих ветвей, подключенных к общему узлу, одной генерирующей ветвью (рис. 2):



$$E_{\text{эк}} = \frac{\sum_1^n E_i Y_i}{\sum_1^n Y_i} \quad (24)$$

Рисунок 2

В частном случае для двух генерирующих ветвей

$$E_{\text{эк}} = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_1 + x_2}. \quad (25)$$

Если эдс одной ветви равна нулю, например, нагрузочная ветвь  $E_2 = 0$ , то

$$E_{\text{эк}} = \frac{E_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2}. \quad (26)$$

4) Преобразование сопротивлений  $x_1, x_2, x_3$ , соединенных в звезду, в эквивалентный треугольник с сопротивлениями  $x_{12}, x_{23}, x_{31}$ , и наоборот (рис. 3):

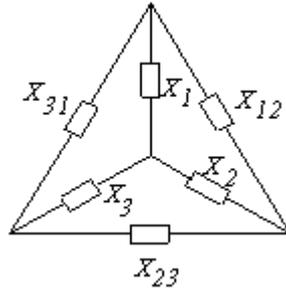


Рисунок 3

$$\begin{aligned}
 x_{12} &= x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3}; x_{23} = x_2 + x_3 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1}; x_{31} = x_3 + x_1 + \frac{x_3 \cdot x_1}{x_2}; \\
 x_1 &= \frac{x_{12} \cdot x_{31}}{x_{12} + x_{31} + x_{23}}; x_2 = \frac{x_{12} \cdot x_{23}}{x_{12} + x_{31} + x_{23}}; x_3 = \frac{x_{23} \cdot x_{31}}{x_{12} + x_{31} + x_{23}}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

5) Определение взаимных сопротивлений между источником и точкой к. з. при преобразовании схем к радиальному виду (рис. 4).

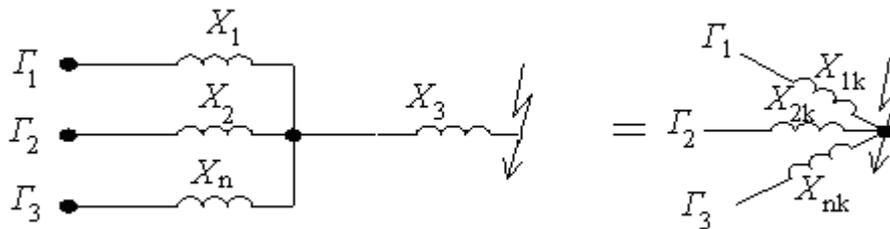


Рисунок 4

Взаимные сопротивления определяют через коэффициенты распределения, характеризующие долю участия каждого источника в питании точки короткого замыкания. В данном случае:

$$x_{1к} = \frac{x_{\Sigma}}{C_I}; x_{2к} = \frac{x_{\Sigma}}{C_{II}}; x_{nk} = \frac{x_{\Sigma}}{C_n},
 \tag{28}$$

где  $C_I, C_{II}, \dots, C_n$  – коэффициенты распределения;

$$C_I + C_{II} + \dots + C_n = 1;$$

$$C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_1}; C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_2}; C_n = \frac{x_{\text{экв}}}{x_n};
 \tag{29}$$

$$x_{\text{экв}} = x_1 // x_2 // x_n; x_{\Sigma} = x_{\text{экв}} + x_3.
 \tag{30}$$

б) Преобразование треугольника с эдс в звезду с эдс (рис. 5):

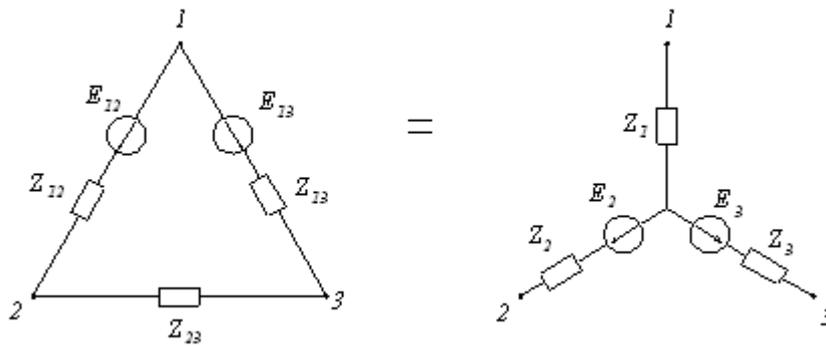


Рисунок 5

$$E_2 = \frac{E_{12}(Z_{13} + Z_{23}) + E_{13} \cdot Z_{12}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{13}}; \quad (31)$$

$$E_3 = \frac{E_{13}(Z_{12} + Z_{23}) + E_{12} \cdot Z_{13}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{13}};$$

$$Z_1 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}; \quad Z_2 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}; \quad (32)$$

$$Z = \frac{Z_{13} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{13}}.$$

Применяют и другие методы преобразования: разрезание узлов с к.з., упрощение за счет симметрирования схем и т. п.

## 2.4 Расчет начального, ударного и наибольшего действующего значений тока трехфазного короткого замыкания

**Пример 1.** В точке «К» заданной расчетной схемы (рисунок 6) произошло трехфазное к.з. Определить начальный, ударный и наибольший действующий ток в генераторе и в месте короткого замыкания.

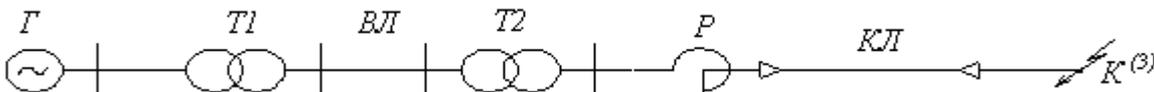


Рисунок 6

Исходные данные:

Генератор Г:  $S_H = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_H = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $x''_{d*} = 0,26$ ;  $\cos \varphi_0 = 0,8$ .

Трансформатор Т1:  $S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $10,5/121 \text{ кВ}$ ;  $u_K = 10,5 \%$ .

Трансформатор Т2:  $S_H = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $110/6,3 \text{ кВ}$ ;  $u_K = 10,5 \%$ .

Воздушная линия ВЛ: длина  $\ell = 80 \text{ км}$ ;  $x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}$ .

Кабельная линия: длина  $\ell = 2,5$  км;  $x_{y\partial} = 0,08$  Ом/км

Реактор P:  $U_n = 6$  кВ;  $I_n = 0,3$  кА;  $x_P = 5$  %.

**Решение в именованных единицах, приведение точное с использованием действительных коэффициентов трансформации.**

Для заданной расчетной схемы составим эквивалентную схему замещения (рисунок 7):

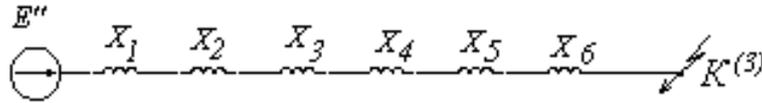


Рисунок 7

Примем в качестве основной ступень, где находится генератор, т. е. I ступень. Тогда действительные коэффициенты трансформации в направлении от основной ступени будут:

$$K_1 = 10,5 / 121 ; \quad K_2 = 110 / 6,3.$$

Сопровождающие элементы схемы, приведенные к основной ступени напряжения, будут:

$$\text{Г:} \quad \dot{x}_1 = x_{d^*}'' \frac{U_n^2}{S_n} = 0,26 \frac{10,5^2}{30} = 0,96 \text{ Ом};$$

$$\text{T1:} \quad \dot{x}_2 = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{n(нн)}^2}{S_n} = \frac{10,5}{100} \frac{10,5^2}{40} = 0,29 \text{ Ом};$$

$$\text{или} \quad \dot{x}_2 = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{n(вн)}^2}{S_n} \cdot K_1^2 = \frac{10,5}{100} \frac{121^2}{40} \cdot \left(\frac{10,5}{121}\right)^2 = 0,29 \text{ Ом};$$

$$\text{ВЛ:} \quad \dot{x}_3 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot K_1^2 = 80 \cdot 0,4 \left(\frac{10,5}{121}\right)^2 = 0,24 \text{ Ом};$$

$$\text{T2:} \quad \dot{x}_4 = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{n(вн)}^2}{S_n} \cdot K_1^2 = \frac{10,5}{100} \frac{110^2}{16} \cdot \left(\frac{10,5}{121}\right)^2 = 0,6 \text{ Ом};$$

$$\text{или} \quad \dot{x}_4 = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{n(нн)}^2}{S_n} \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 = 0,6 \text{ Ом};$$

$$\text{P:} \quad \dot{x}_5 = \frac{x_P \%}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 = \frac{5}{100} \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,3} \cdot \left(\frac{10,5}{121}\right)^2 \cdot \left(\frac{110}{6,3}\right)^2 = 1,33 \text{ Ом};$$

$$\text{КЛ:} \quad \dot{x}_6 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{10,5}{121}\right)^2 \cdot \left(\frac{110}{6,3}\right)^2 = 0,46 \text{ Ом}.$$

Сверхпереходная эдс генератора по продольной оси находится из условия режима до к. з.:

$$E_1'' \approx U_{o*} + I_{o*} \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_o = 1 + 1 \cdot 0,26 \cdot 0,6 = 1,156 \text{ кВ};$$

$$E_1'' = E_1 \cdot U_H = 1,156 \cdot 10,5 = 12,14 \text{ кВ}.$$

Приведем схему к простейшему виду (рис. 8):

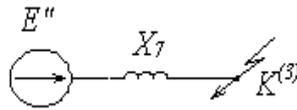


Рисунок 8

Суммарное сопротивление:

$$x_7 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0,96 + 0,29 + 0,24 + 0,6 + 1,33 + 0,46 = 3,88 \text{ Ом}.$$

Ток в генераторе при трехфазном к. з. в точке «K»

$$I_{\kappa\Gamma}''(3) = \frac{E_1''}{\sqrt{3}x_7} = \frac{12,14}{\sqrt{3} \cdot 3,88} = 1,8 \text{ кА}.$$

Ток в месте к. з.

$$I_{\kappa}'' = I_{\kappa\Gamma}''(3) \cdot K_1 \cdot K_2 = 1,8 \cdot \frac{10,5}{121} \cdot \frac{110}{6,3} = 2,73 \text{ кА}.$$

Ударный ток в месте к. з. находят так:

$$i'_y = \sqrt{2} \cdot K_{y\partial} \cdot I_{\kappa}''(3). \quad (33)$$

Ударный коэффициент схемы  $K_{y\partial}$  находят по эквивалентной постоянной времени этой цепи. Активные сопротивления отдельных элементов схемы определяют следующим образом:

$$r = \frac{x}{(x/r)_{cp}}, \quad (34)$$

где  $(x/r)_{cp}$  приведены в [1], с. 137.

$$\Gamma: \quad r_1 = \frac{x_1}{50} = \frac{0,96}{50} = 0,019 \text{ Ом};$$

$$\Gamma 1: \quad r_2 = \frac{x_2}{20} = \frac{0,29}{20} = 0,014 \text{ Ом};$$

$$\text{ВЛ:} \quad r_3 = \frac{x_3}{5} = \frac{0,24}{5} = 0,048 \text{ Ом};$$

$$\Gamma 2: \quad r_4 = \frac{x_4}{15} = \frac{0,6}{15} = 0,04 \text{ Ом};$$

$$\text{P:} \quad r_5 = \frac{x_5}{50} = \frac{1,33}{50} = 0,027 \text{ Ом};$$

$$\text{КЛ:} \quad r_6 = \frac{x_6}{0,5} = \frac{0,46}{0,5} = 0,92 \text{ Ом}.$$

Результирующее активное сопротивление схемы относительно точки короткого замыкания:

$$r_7 = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 = 0,019 + 0,014 + 0,048 + 0,04 + 0,027 + 0,92 = 1,068 \text{ Ом.}$$

Отношение  $\frac{x_7}{r_7} = \frac{3,88}{1,068} = 3,63.$

По кривой  $K_{y\partial} = f(x/r)$  [2], с. 10 находим ударный коэффициент  $K_{y\partial} = 1,4.$  Тогда

$$i'_y = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 2,73 = 5,4 \text{ кА.}$$

Наибольшее действующее значение тока трехфазного к. з. определим по выражению

$$I_y = I_k^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2(K_{y\partial} - 1)^2} = 2,73 \cdot \sqrt{1 + 2(1,4 - 1)^2} = 3,14 \text{ кА.}$$

**Решение в относительных базисных единицах, приведение приближенное.**

При приближенном приведении базисные напряжения на различных ступенях принимаются равными средним номинальным напряжениям этих ступеней. В данном случае имеем:

$$S_{\bar{6}} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

$$U_{\bar{6}I} = 10,5 \text{ кВ}; \quad I_{\bar{6}I} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3}U_{\bar{6}I}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА};$$

$$U_{\bar{6}II} = 115 \text{ кВ}; \quad I_{\bar{6}II} = 0,5 \text{ кА};$$

$$U_{\bar{6}III} = 6,3 \text{ кВ}; \quad I_{\bar{6}III} = 9,18 \text{ кА.}$$

Сопротивление элементов схемы

$$\Gamma: \quad x_{1*(\bar{6})} = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = 0,26 \frac{100}{30} = 0,87.$$

В дальнейших расчетах знак  $*(\bar{6})$  опускаем.

$$T1: \quad x_2 = \frac{u_k \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$\text{ВЛ:} \quad x_3 = x_{y\partial} \cdot \ell \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}II}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,24;$$

$$T2: \quad x_4 = \frac{u_k \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{16} = 0,656;$$

$$P: \quad x_5 = \frac{x_p \%}{100} \frac{I_{\bar{6}III}}{I_H} \frac{U_H}{U_{\bar{6}III}} = \frac{5}{100} \frac{9,18}{0,3} \frac{6}{6,3} = 1,46;$$

$$\text{КЛ:} \quad x_6 = x_{y\partial} \cdot \ell \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}III}^2} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,5.$$

Результирующее сопротивление и эдс:

$$x_7 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 3,986;$$

$$E_{1*(\bar{6})}'' = E_{1*(H)}'' = 1,156.$$

Ток к. з. в \* ( $\bar{b}$ ) единицах

$$I_{к*}''(\bar{b}) = \frac{E_{1*}''(\bar{b})}{X_{7*}(\bar{b})} = \frac{1,156}{3,986} = 0,29.$$

Ток в именованных единицах:

в генераторе  $I_{кГ}''^{(3)} = I_{к*}''(\bar{b}) \cdot I_{\bar{b}I} = 0,29 \cdot 5,5 = 1,6 \text{ кА};$

в месте к. з.  $I_{к}''^{(3)} = I_{к*}''(\bar{b}) \cdot I_{\bar{b}III} = 0,29 \cdot 9,18 = 2,66 \text{ кА}.$

Применение приближенного приведения дает погрешность, приемлемую для практических расчетов, и в данном случае составляет

$$\Delta I \% = \frac{2,73 - 2,66}{2,73} \cdot 100 \% = 2,5 \%$$

Таким образом, расчеты по определению токов к. з. в схемах сельского электроснабжения выполняются, как правило, в относительных базисных единицах с учетом приближенного приведения.

## 2.5 Расчет тока трехфазного к. з. для любого момента времени переходного процесса

Для определения тока в месте замыкания широко применяется метод расчетных кривых. Метод основан на применении специальных кривых  $\gamma_t = f(t, I_{no} * (ном))$  [3].

Порядок расчета:

1. Составляют эквивалентную схему для определения начального тока к. з.  $I_{no}$  и определяют значения сверхпереходных эдс  $E''$  генераторов и нагрузок и сопротивления элементов схемы, например в относительных базисных единицах.

2. Преобразуют схему замещения к радиальному виду, выделив отдельные генерирующие ветви (рисунок 9).

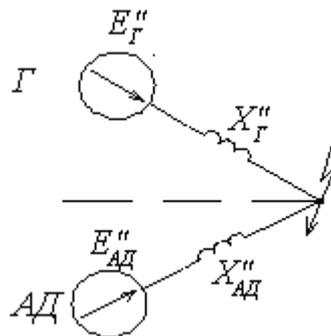


Рисунок 9

3. Аналитически определяют начальные значения токов генерирующих ветвей

$$I_{no^*(\bar{b})} = \frac{E''(\bar{b})}{X''(\bar{b})}, \quad (35)$$

и относительное значение тока

$$I_{no^*(ном)} = \frac{I_{no^*(\bar{b})} \cdot I_{\bar{b}}}{\dot{I}_{ном}}, \quad (36)$$

где  $I_{\bar{b}}$  – базисный ток на той ступени напряжения, где находится точка к. з.;

$\dot{I}_{ном}$  – номинальный ток генерирующей ветви, приведенный к напряжению ступени, где находится точка к. з.;

$$\dot{I}_{ном} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.к} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \text{ – для асинхронных двигателей.}$$

$$\dot{I}_{ном} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.к}} \text{ – для синхронных генераторов, двигателей и компенсаторов}$$

$U_{ср.к}$  – среднее номинальное напряжение ступени где находится точка к. з.

4. По расчетным кривым  $\gamma_t = f(t, I_{no^*(ном)})$  для заданных  $t$  и  $I_{no^*(ном)}$  находят отношение токов:  $\gamma_t = I_{nt} / I_{no}$ .

5. Определяют действующее значение периодической составляющей тока к. з. в момент времени  $t$  в именованных единицах:

$$I_{nt} = \gamma_t \cdot I_{no^*(ном)} \cdot \dot{I}_{ном}. \quad (37)$$

**Пример 2.** Для заданной расчетной схемы (рис. 10) определить ток трехфазного к. з. в следующие моменты времени переходного процесса:  $t = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  с. Генераторы имеют тиристорную систему самовозбуждения.

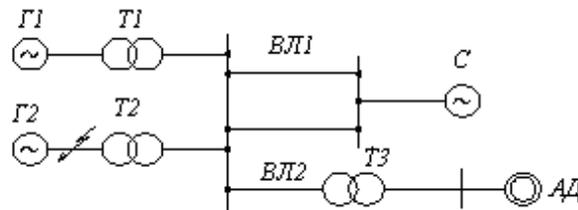


Рисунок 10

Исходные данные:

G1, G2:  $S_H = 36 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_H = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $x''_{d*} = 0,15$ ;  $\cos \varphi_{(0)} = 0,9$ ;  $I_{(0)} = 1,0$

T1, T2:  $S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $10,5/121 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 10,5 \%$ ;

ВЛ1:  $\ell = 50 \text{ км}$ ;  $x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;

ВЛ2:  $\ell = 25 \text{ км}$ ;  $x_{y0} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;

T3:  $S_H = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $110/6,3 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 10,5 \%$ ;

C:  $x_c = 10 \text{ Ом}$ ;

АД:  $P_H = 4,5 \text{ МВт}$ ;  $U_H = 6 \text{ кВ}$ ;  $\cos \varphi = 0,86$ ;  $\eta = 0,9$ ;  $K_n = 5$ ;  $I_{(0)} = 0,9$ .

Намечаем ступени напряжения и устанавливаем на них базисные единицы:

$$S_{\bar{\sigma}} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{\bar{\sigma}I} = 10,5 \text{ кВ}; \quad I_{\bar{\sigma}I} = 5,5 \text{ кА};$$

$$U_{\bar{\sigma}II} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{\bar{\sigma}III} = 6,3 \text{ кВ}.$$

Составим схему замещения для определения тока  $I_{no}$  (рисунок 11):

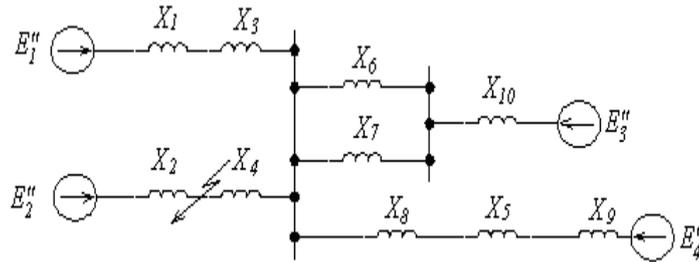


Рисунок 11

Определяем сопротивления элементов схемы в относительных базисных единицах. Приведение приближенное. Знак  $*$ ( $\bar{\sigma}$ ) в расчетах опускаем.

$$\Gamma 1; \Gamma 2: \quad x_1 = x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H} = 0,15 \frac{100}{36} = 0,42;$$

$$T 1; T 2: \quad x_3 = x_4 = \frac{u_K \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$T 3: \quad x_5 = \frac{u_K \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{10} = 1,06;$$

$$ВЛ 1: \quad x_6 = x_7 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}II}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15;$$

$$ВЛ 2: \quad x_8 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}II}^2} = 0,4 \cdot 25 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075;$$

$$АД: \quad x_9 = \frac{1}{K_n} \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} = \frac{1}{5} \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 0,86}{4,5} = 3,44;$$

$$С: \quad x_{10} = x_c \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}II}^2} = 10 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075.$$

Сверхпереходные эдс:

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad E_1'' = E_2'' = U_{(o)*} + I_{(o)*} \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 + 1 \cdot 0,15 \cdot 0,44 = 1,07;$$

$$С: \quad E_3'' = 1,0;$$

$$АД: \quad E_4'' = U_{(o)*} - I_{(o)*} \cdot \frac{1}{K_n} \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 - 0,9 \cdot \frac{1}{5} \cdot 0,51 = 0,91.$$

Преобразуем схему, выделив в качестве генерирующих ветвей (рисунок 12):

I – система С (источник неограниченной мощности, ток определяется аналитически);

II – асинхронный двигатель АД (используются специальные кривые для АД [4]);

III – генератор Г1 – имеет разную удаленность от точки к. з.

IV – генератор Г2 – имеет разную удаленность от точки к. з.

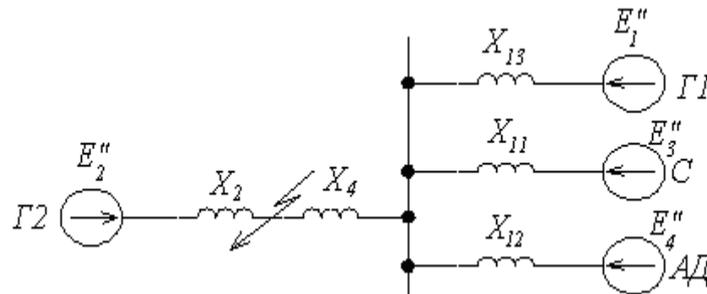


Рисунок 12

$$x_{11} = \frac{x_6}{2} = x_{10} = \frac{0,15}{2} + 0,075 = 0,15;$$

$$x_{12} = x_5 + x_8 + x_9 = 1,05 + 0,075 + 3,44 = 4,656;$$

$$x_{13} = x_1 + x_3 = 0,42 + 0,26 = 0,68.$$

Преобразуем схему, приведя ее к радиальному виду (рисунок 13):

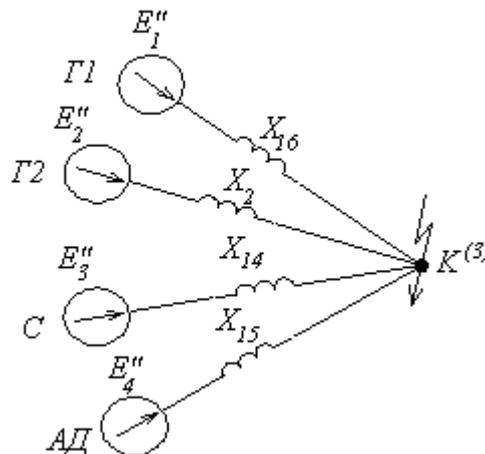


Рисунок 13

$$x_{14} = \frac{x_{\Sigma}}{C_I} = \frac{0,38}{0,8} = 0,475; x_{15} = \frac{x_{\Sigma}}{C_{II}} = \frac{0,38}{0,026} = 14,6; x_{16} = \frac{x_{\Sigma}}{C_{III}} = \frac{0,38}{0,174} = 2,18;$$

$$x_{\text{экв}} = x_{11} // x_{12} // x_{13} = \frac{x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}}{x_{11} \cdot x_{12} + x_{11} \cdot x_{13} + x_{12} \cdot x_{13}} =$$

$$= \frac{0,15 \cdot 4,565 \cdot 0,68}{0,15 \cdot 4,565 + 0,15 \cdot 0,68 + 0,68 \cdot 4,565} = 0,12;$$

$$C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{11}} = \frac{0,12}{0,15} = 0,8; C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{12}} = \frac{0,12}{4,565} = 0,026; C_{III} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{13}} = \frac{0,12}{0,68} = 0,174;$$

$$x_{\Sigma} = x_{\text{экв}} + x_4 = 0,12 + 0,26 = 0,38.$$

Определяем начальные значения токов генерирующих ветвей.

I-я ветвь – Система:

$$I_{14}^{*(\sigma)} = \frac{E_3''}{x_{14}^{*(\sigma)}} = \frac{1,0}{0,475} = 2,1.$$

II-я ветвь – АД:

$$I_{15}^{*(\sigma)} = \frac{E_4''}{x_{15}^{*(\sigma)}} = \frac{0,91}{14,6} = 0,062.$$

III-я ветвь – Г1:

$$I_{16}^{*(\sigma)} = \frac{E_1''}{x_{16}^{*(\sigma)}} = \frac{1,07}{2,18} = 0,49.$$

IV-я ветвь – Г2:

$$I_{2}^{*(\sigma)} = \frac{E_2''}{x_{2}^{*(\sigma)}} = \frac{1,07}{0,42} = 2,55.$$

Ток к. з. от системы неизменен по величине во время переходного процесса и в именованных единицах определяется по выражению

$$I_{14}'' = I_{14\infty} = I_{14}^{*(\sigma)} \cdot I_{\sigma I} = 2,1 \cdot 5,5 = 11,55 \text{ кА.}$$

От остальных генерирующих ветвей ток в заданные моменты времени определяют по расчетным кривым. Для этого находят относительные значения токов  $I_{no}^{*(ном)}$ :

$$I_{no}^{*(ном)15} = \frac{I_{15}^{*(\sigma)} \cdot I_{\sigma I}}{I_{номАД}} = \frac{0,062 \cdot 5,5}{0,32} = 1,07,$$

где  $I_{номАД} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_{cp.k} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{4,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,9 \cdot 0,86} = 0,32 \text{ кА,}$

$$I_{no}^{*(ном)16} = \frac{I_{16}^{*(\sigma)} \cdot I_{\sigma I}}{I_{номГ1}} = \frac{0,49 \cdot 5,5}{1,98} = 1,36,$$

где  $I_{номГ1} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{cp.k}} = \frac{36}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1,98 \text{ кА} = I_{номГ2};$

$$I_{no*(ном)2} = \frac{I_{2*(б)}'' \cdot I_{бI}}{I_{номГ2}} = \frac{2,55 \cdot 5,5}{1,98} = 7,1.$$

Так как для генерирующих ветвей II(АД) и III(Г1) значения относительного тока  $I_{no*(ном)} < 2$ , то периодическая составляющая тока к. з. от указанных ветвей принимается неизменной во времени. Следовательно,

$$I_{15}'' = I_{15\infty} = I_{15*(б)}'' \cdot I_{бI} = 0,062 \cdot 5,5 = 0,34 \text{ кА};$$

$$I_{16}'' = I_{16\infty} = I_{16*(б)}'' \cdot I_{бI} = 0,49 \cdot 5,5 = 2,7 \text{ кА}.$$

Значения периодической составляющей тока к. з. для генерирующей ветви IV(Г2) для заданных моментов времени определены по расчетным кривым и представлены в таблице 4.

Значения полного тока к. з. от всех генерирующих ветвей для заданных моментов времени приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 4

$t, \text{ с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\infty$
$\gamma_t$	1	0,72	0,66	0,62	0,58	0,56	0,25
$I_{nt} = \gamma_t \cdot I_{no*(ном)} \cdot I_{ном}$	14	10,1	9,2	8,7	8,1	7,8	3,53

Т а б л и ц а 5

$t, \text{ с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\infty$
$I_{к}^{(3)}, \text{ кА}$	28,59	24,69	23,79	23,29	22,69	22,39	18,12

### 3. Расчет несимметричных коротких замыканий

Исследования и расчеты при несимметричных к. з. проводят с помощью метода симметричных составляющих. Расчет состоит в том, что заданный несимметричный режим работы системы представлен как результат наложения трех симметричных режимов, один из которых содержит только составляющие прямой последовательности (эдс, токи, сопротивления), другой – только составляющие обратной последовательности и третий – только составляющие нулевой последовательности.

При расчетах токов несимметричных к. з. применяют правило эквивалентности прямой последовательности, согласно которому ток прямой последовательности любого несимметричного к. з. может быть определен как ток при трехфазном к. з. в точке, удаленной от действительной точки к. з. на дополнительное сопротивление, величина которого в зависимости от вида к. з. определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, т. е.:

$$I_{к1}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \Delta Z^{(n)}}, \quad (38)$$

где  $E_{I\Sigma}$ ,  $Z_{I\Sigma}$  – результирующие эдс и сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки к. з.;  $\Delta Z^{(n)}$  – дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности.

Полный ток в месте короткого замыкания находят так:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{k1}^{(n)}, \quad (39)$$

где  $m^{(n)}$  – коэффициент, зависящий от вида к. з.

Из правила эквивалентности следует, что при любом виде к. з. ток  $I_{k1}^{(n)}$  определяется из подобных по структуре схем замещения, рисунок 14.

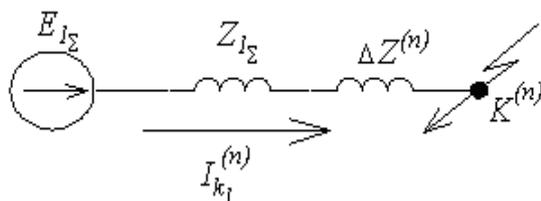


Рисунок 14

Установлено, что симметричные составляющие токов и напряжений в месте к. з., а также полные токи и напряжения в здоровых и поврежденных фазах для любого момента времени пропорциональны току прямой последовательности. Основные расчетные соотношения приведены в таблице 6.

Таким образом, для определения токов при несимметричном к. з. необходимо: составить схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Определить сопротивления элементов и результирующие сопротивления прямой ( $x_{1\Sigma}$ ), обратной ( $x_{2\Sigma}$ ) и нулевой ( $x_{0\Sigma}$ ) последовательностей;

составить комплексные схемы замещения, в которых  $x_{1\Sigma}$ ,  $x_{2\Sigma}$ ,  $x_{3\Sigma}$  соединены между собой определенным образом в зависимости от вида к. з.;

определить ток прямой последовательности в комплексной схеме замещения. Последний является током трехфазного к. з. при эквивалентном трехфазном к. з.;

найти полный ток несимметричного к. з. по выражению (39).

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей находят по соответствующим схемам

**Схема прямой последовательности (ПП)** – обычная схема, которую составляют для расчета симметричного трехфазного к. з. В зависимости от момента времени переходного процесса генераторы, синхронные компенсаторы и нагрузки в схему замещения вводят соответствующими реактивностями и эдс. По схеме определяют  $E_{I\Sigma}$  и  $x_{I\Sigma}$  генерирующих ветвей, а также коэффициенты распределения для них.

**Схема обратной последовательности (ОП)** отличается от схемы ПП отсутствием в ней эдс и значением реактивных сопротивлений генераторов и нагрузок. За начало схемы прямой (обратной) последовательности ( $H1$ ,  $H2$ ) принимают точку, в которую объединены свободные концы генерирующих ветвей (точка нулевого

потенциала). Концом схемы считают точку, где возникло к. з. ( $K_1, K_2$ ).

Для элементов системы с неподвижными магнитосвязанными цепями индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательности равны между собой. Таким образом, для трансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов  $x_1 = x_2$ . Для вращающихся машин  $x_1 \neq x_2$ . В практических расчетах принимают:

для синхронных машин без демпферных обмоток  $x_2 = 1,45 \cdot x'_d$ ;

для турбогенераторов и синхронных машин с демпферными обмотками

$$x_2 = 1,22 \cdot x'_d;$$

для асинхронных двигателей  $x_2 = x''_{d6*} = \frac{1}{K_n} = \frac{1}{I_{пуск*}}$ ;

для комплексной (обобщенной) нагрузки  $x_{2*} = 0,35$ .

Т а б л и ц а 6

Вид к.з.	$K^{(3)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$
Граничные условия	$U_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $U_{KB} = 0$ $U_{KC} = 0$	$I_{KA} = 0$ $I_{KB} = -I_{KC}$ $U_{KB} = U_{KC}$	$U_{KA} = 0$ $I_{KB} = 0$ $I_{KC} = 0$
Соотношение между симметричными составляющими	$I_{KA} = I_{KA1}$ $I_{K2} = 0$ $I_{Ko} = 0$	$U_{KA1} = U_{KA2}$ $U_{KA1} = U_{Ko}$ $I_{KA1} + I_{KA2} + I_{Ko} = 0$	$I_{KA1} = 0$ $U_{KA1} = U_{KA2}$ $I_{KA1} = -I_{KA2}$	$I_{KA1} = I_{KA2}$ $I_{KA1} = I_{Ko}$ $U_{KA1} + U_{KA2} + U_{Ko} = 0$
Дополнительное сопротивление $x^{(n)}$	0	$\frac{x_2 \Sigma \cdot x_o \Sigma}{x_2 \Sigma + x_o \Sigma}$	$x_2$	$x_2 + x_o$
Ток прямой последовательности $I_{KA1}^{(n)}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} \parallel x_{\Sigma o}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}$	$\frac{E_{\Sigma A1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma o}}$
Ток обратной последовательности $I_{KA2}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_o \Sigma}{x_2 \Sigma + x_o \Sigma}$	$-I_{KA1}$	$I_{KA1}$
Ток нулевой последовательности $I_{Ko}^{(n)}$	----	$I_{KA1} \times \frac{x_2 \Sigma}{x_2 \Sigma + x_o \Sigma}$	0	$I_{KA1}$
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2 \Sigma \cdot x_o \Sigma}{(x_2 \Sigma + x_o \Sigma)^2}}$ ( $1,5 \div \sqrt{3}$ )	$\sqrt{3}$	3

Продолжение таблицы 6

Ток к.з. $I_K^{(n)}$	$I_K^{(3)} = I_{KA1}^{(3)}$	$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} \times$ $I_{KA1}^{(1,1)}$	$I_K^{(2)} = m^{(2)} \times$ $I_{KA1}^{(2)}$	$I_K^{(1)} = m^{(1)} \times$ $I_{KA1}^{(1)}$
Напряжение прямой последовательно сти $U_{KA1}^{(n)}$	0	$I_{KA1} (x_2 \parallel x_o)$	$I_{KA1} \times x_2$	$I_{KA1} (x_2 + x_o)$
Напряжение обратной последовательно сти $U_{KA2}^{(n)}$	0	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$	$I_{KA2} \times x_2$
Напряжение нулевой последовательно сти $U_{Ko}^{(n)}$	0	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$	$I_{Ko} \times x_o$

**Схема нулевой последовательности (НП).** Токи НП по существу являются составляющими однофазного тока, разделенного между тремя фазами и возвращающегося через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочки кабелей). Поэтому путь токов НП существенно отличается от путей, по которым протекают токи ПП и ОП.

Составление схемы НП начинают от точки к. з., считая, что в этой точке фазы замкнуты между собой и к ней относительно земли приложено напряжение НП  $U_{ko}$ . Далее выявляют возможные пути протекания токов НП и в схему замещения включаются элементы, через которые протекают токи. Началом схемы ( $H_o$ ) является точка нулевого потенциала (земля), концом – точка к. з. ( $K_o$ ).

Схемы ПП, ОП и НП представлены на рисунок 15

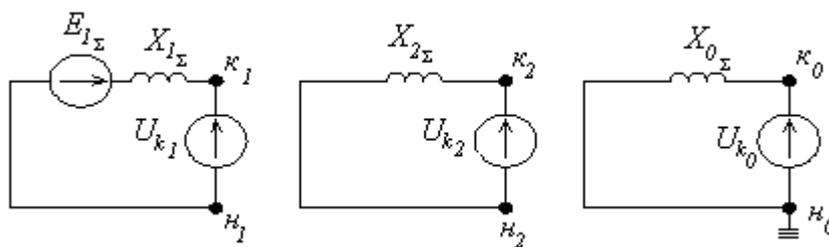


Рисунок 15

Система токов НП существенно отличается от схем ПП и ОП и поэтому сопротивления элементов для токов НП совершенно иные.

**Синхронные машины:** сопротивление НП зависит от конструкции и типа обмоток и колеблется в пределах  $x_{o*} = (0,15 \dots 0,6) \cdot x'_d$ .

**Асинхронные двигатели:** достаточно достоверное значение  $x_o$  может быть получено лишь опытным путем, или по данным завода-изготовителя.

**Комплексная нагрузка:** определяется конкретной схемой соединения элементов нагрузки и питающей сети.

**Реакторы:** представляют собой однофазный аппарат, поэтому  $x_o = x_l$ .

**Воздушные ЛЭП:** токи НП линий электропередачи возвращаются через землю и по грозозащитным заземляющим тросам, если последние имеются. Для практических расчетов принимают:

- одноцепная линия без тросов  $x_o = 3,5 x_l$ ;
- двухцепная линия без тросов  $x_o = 5,5 x_l$ ;
- одноцепная линия со стальным тросом  $x_o = 3 x_l$ ;
- одноцепная линия с медным тросом  $x_o = 2 x_l$ ;
- двухцепная линия со стальным тросом  $x_o = 4,7 x_l$ ;
- двухцепная линия с медным тросом  $x_o = 3 x_l$ .

**Кабельные линии:** приближенно  $x_o \approx (3,5...4,6) x_l$ , или точное значение из замеров в реальных условиях.

**Трансформаторы:** индуктивное сопротивление НП трансформатора определяется его конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки трансформатора, соединенной треугольником ( $\Delta$ ) или в звезду без заземленной нейтрали ( $\curvearrowright$ ), сопротивление НП трансформатора  $x_o = \infty$ , так как в этом случае исключается возможность циркуляции токов НП в данном трансформаторе. Следовательно, конечная величина сопротивления НП трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью ( $\curvearrowleft$ ).

Для трансформаторов со схемой  $\curvearrowleft / \Delta$

$$x_{o*} = x_{l*} = \frac{u_k \%}{100},$$

причем токи НП не выходят за треугольник.

Для трансформаторов со схемой  $\curvearrowleft / \curvearrowleft$

$$x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}; x_{I*} = \frac{u_k \%}{200}; x_{\mu*} = 0,3...1,0.$$

Для трансформаторов со схемой  $\curvearrowleft / \curvearrowright$

$$x_{o*} = x_{I*} + \frac{(x_{II*} + x_{вн*}) \cdot x_{\mu*}}{x_{II*} + x_{вн*} + x_{\mu*}}; x_{II*} = \frac{u_k \%}{200},$$

где  $x_{вн}$  – сопротивление НП элементов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора.

Если на вторичной обмотке нет заземленных элементов, то

$$(x_{вн} = \infty), \text{ то } x_{o*} = x_{I*} + x_{\mu*}.$$

Если нейтраль трансформатора заземлена через сопротивление  $R_N$ , то оно учитывается в схеме замещения утроенным значением.

**Пример 3.** При поочередном к. з. в точке «К» (рис. 16) определить токи двухфазного, однофазного и двухфазного к. з. на землю для момента времени  $t = 0$ .

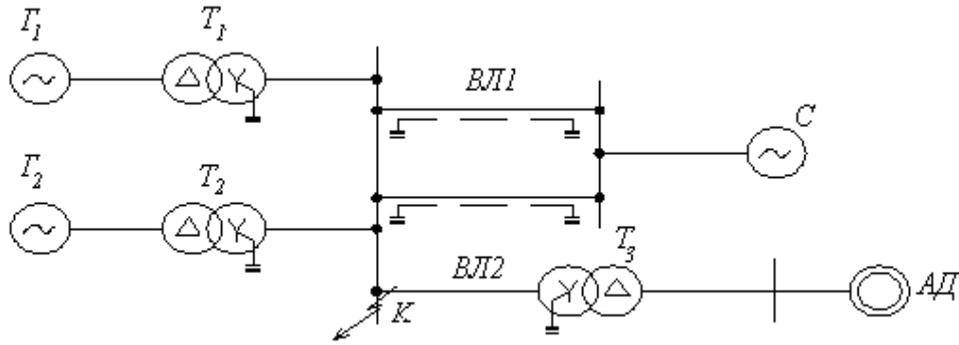


Рисунок 16

Исходные данные:

- $G1, G2: S_n = 35 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_n = 10,5 \text{ кВ}; x''_{d*} = 0,23;$   
 $T1, T2: S_n = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 10,5/121 \text{ кВ}; u_k = 10,5 \%;$   
 $T3: S_n = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}; 110/6,3 \text{ кВ}; u_k = 10,5 \%;$   
 $ВЛ1: \ell = 70 \text{ км}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ двухцепная со стальным тросом};$   
 $ВЛ2: \ell = 25 \text{ км}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ом/км}, \text{ одноцепная без троса};$   
 $АД: P_n = 3,2 \text{ МВт}; U_n = 6 \text{ кВ}; \eta = 0,94; \cos \varphi = 0,9; K_n = 4,2;$   
 $C: x_{c(1)} = x_{c(2)} = 20 \text{ Ом}; x_{c(o)} = 60 \text{ Ом}.$

Расчет проводим в относительных базисных единицах при приближенном приведении.

Намечаем ступени напряжения и устанавливаем базисные единицы:

$$S_{\sigma} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$U_{\sigma I} = 10,5 \text{ кВ}; U_{\sigma II} = 115 \text{ кВ}; U_{\sigma III} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$I_{\sigma II} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma II}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

Схема замещения ПП, рисунок 17:

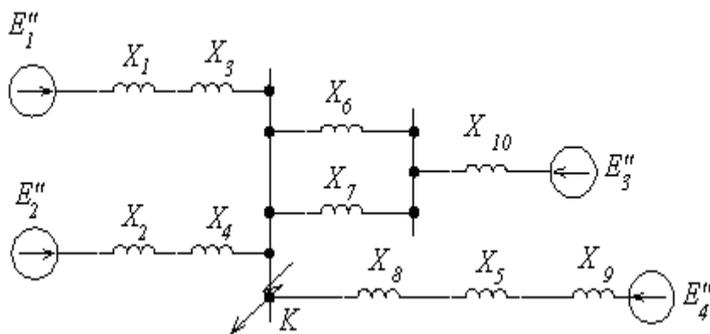


Рисунок 17

Сопротивление элементов схемы ПП:

$$G1; G2: x_{1*(\sigma)} = x_{2*(\sigma)} = x''_d \frac{S_{\sigma}}{S_n} = 0,23 \frac{100}{35} = 0,66.$$

При дальнейших расчетах знак  $*(\sigma)$  опускаем.

$$T1; T2: \quad x_3 = x_4 = \frac{u_k \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$T3: \quad x_5 = \frac{u_k \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{6,3} = 1,67;$$

$$ВЛ1: \quad x_6 = x_7 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}II}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21;$$

$$ВЛ2: \quad x_8 = x_{y\partial} \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}II}^2} = 0,4 \cdot 25 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,075;$$

$$АД: \quad x_9 = \frac{1}{K_n} \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_H} = \frac{1}{4,2} \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 0,94}{3,2} = 6,3;$$

$$С: \quad x_{10} = x_{c(1)} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}II}^2} = 20 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15.$$

Эдс генерирующих ветвей:

$$\Gamma 1, \Gamma 2: \quad E_1'' = E_2'' = U_{(o)}^* + I_{(o)}^* \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 + 1 \cdot 0,23 \cdot 0,6 = 1,14;$$

$$С: \quad E_3'' = 1,0;$$

$$АД: \quad E_4'' = U_{(o)}^* - I_{(o)}^* \cdot x_{АД}'' \cdot \sin \varphi_{(o)} = 1 - 1 \cdot \frac{1}{4,2} \cdot 0,435 = 0,9.$$

Преобразуем схему к радиальному виду, выделив три генерирующих ветви (рисунок 18): систему, генераторы станции, АД.

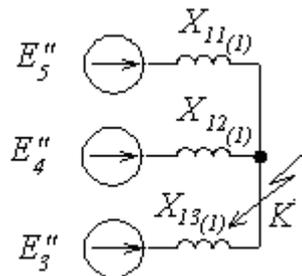


Рисунок 18

$$E_5'' = \frac{E_1'' \cdot (x_1 + x_3) + E_2'' \cdot (x_2 + x_4)}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4} = \frac{1,14(0,66 + 0,26) + 1,14(0,66 + 0,26)}{0,66 + 0,26 + 0,66 + 0,26} = 1,14;$$

$$x_{11} = \frac{(x_1 + x_3)(x_2 + x_4)}{x_1 + x_3 + x_2 + x_4} = \frac{(0,66 + 0,26)(0,66 + 0,26)}{0,66 \cdot 2 + 0,26 \cdot 2} = 0,46;$$

$$x_{12} = x_8 + x_5 + x_9 = 0,075 + 1,67 + 6,3 = 8,05;$$

$$x_{13} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + x_{10} = \frac{0,21 \cdot 0,21}{0,21 + 0,21} + 0,15 = 0,255.$$

Коэффициенты распределения генерирующих ветвей:

$$\Gamma_1, \Gamma_2: C_I = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{11}} = \frac{0,161}{0,46} = 0,35;$$

$$\text{АД: } C_{II} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{12}} = \frac{0,161}{8,05} = 0,018;$$

$$C: C_{III} = \frac{x_{\text{экв}}}{x_{13}} = \frac{0,161}{0,255} = 0,631;$$

$$x_{\text{экв}} = x_{11} // x_{12} // x_{13} = \frac{x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}}{x_{11} \cdot x_{12} + x_{11} \cdot x_{13} + x_{12} \cdot x_{13}} =$$

$$= \frac{0,46 \cdot 8,05 \cdot 0,255}{0,46 \cdot 8,05 + 0,46 \cdot 0,255 + 8,05 \cdot 0,255} = 0,161.$$

Схема замещения ОП (рисунок 19):

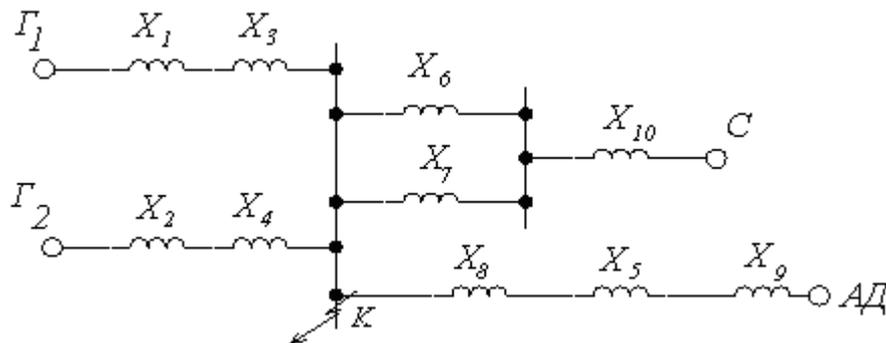


Рисунок 19

Сопротивления элементов схемы ОП такие же, как в схеме ПП, кроме генераторов. Для генераторов имеем:

$$x_{1(2)} = x_{2(2)} = 1,45 \cdot x_{1(1)} = 1,45 \cdot 0,66 = 0,96.$$

Преобразуем схему (рисунок 20) и определим сопротивления генерирующих ветвей для ОП:

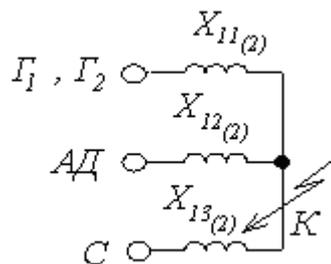


Рисунок 20

$$x_{11(2)} = (x_{1(2)} + x_3) // (x_{2(2)} + x_4) = 0,61; x_{12(2)} = x_{12(1)} = 8,05; x_{13(2)} = x_{13(1)} = 0,255.$$

Резльтирующее сопротивление ОП:

$$x_{2\Sigma} = x_{11(2)} // x_{12(2)} // x_{13(2)} = 0,176.$$

Схема замещения НП (рисунок 21):

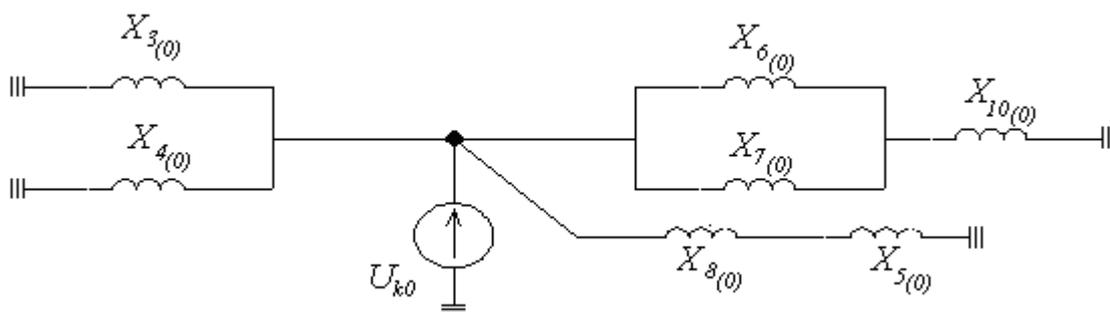


Рисунок 21

Сопротивления элементов схемы:

$$T1, T2: \quad x_{3(o)} = x_{4(o)} = x_{3(l)} = 0,26;$$

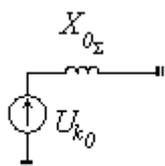
$$T3: \quad x_{5(o)} = x_{5(l)} = 1,67;$$

$$ВЛ1: \quad x_{6(o)} = x_{7(o)} = 4,7 \cdot x_{6(1)} = 4,7 \cdot 0,21 = 1,0;$$

$$ВЛ2: \quad x_{8(o)} = 3,5 \cdot x_{8(1)} = 3,5 \cdot 0,075 = 0,263;$$

$$С: \quad x_{10(o)} = x_{c(o)} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}II}^2} = 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,45.$$

Преобразуем схему (рисунок 22) и определим результирующее (суммарное) сопротивление схемы относительно точки к. з.:



$$\begin{aligned} x_{o\Sigma} &= (x_3 // x_4) // (x_8 + x_5) // \\ & // [(x_6 // x_7) + x_{10}] = \\ &= \left( \frac{0,26 \cdot 0,26}{0,26 + 0,26} \right) // (0,263 + 1,67) // \\ & // \left[ \frac{1 \cdot 1}{1 + 1} + 0,45 \right] = 1,08. \end{aligned}$$

Рисунок 22

Распределим результирующее сопротивление по генерирующим ветвям.

$$Г1, Г2: \quad x_{11(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_I} = \frac{1,08}{0,35} = 3,08;$$

$$АД: \quad x_{12(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{II}} = \frac{1,08}{0,018} = 60;$$

$$С: \quad x_{13(o)} = \frac{x_{o\Sigma}}{C_{III}} = \frac{1,08}{0,631} = 1,71.$$

Расчет двухфазного к. з. в точке «К».

Комплексная схема для определения токов ПП, рисунок 23:

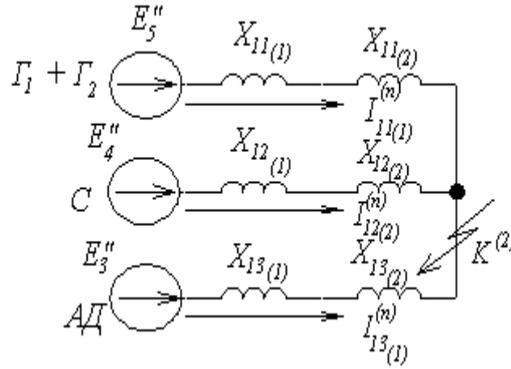


Рисунок 23

Токи ПП генерирующих ветвей:

$$I_{11(1)}^{(2)} = \frac{E_5''}{x_{11(1)} + x_{11(2)}} = \frac{1,14}{0,46 + 0,61} = 1,07;$$

$$I_{12(1)}^{(2)} = \frac{E_4''}{x_{12(1)} + x_{12(2)}} = \frac{0,9}{8,05 + 8,05} = 0,05;$$

$$I_{13(1)}^{(2)} = \frac{E_3''}{x_{13(1)} + x_{13(2)}} = \frac{1}{0,255 + 0,255} = 1,96.$$

Полный ток двухфазного к. з.:

$$I_K^{(2)} = m^{(2)} \cdot (I_{11(1)}^{(2)} + I_{12(1)}^{(2)} + I_{13(1)}^{(2)}) \cdot I_{\delta II} = \sqrt{3}(1,07 + 0,05 + 1,96) \cdot 0,5 = 2,66 \text{ кА}.$$

**Расчет однофазного к. з. в точке «К».**

Комплексная схема для определения токов ПП, рисунок 24:

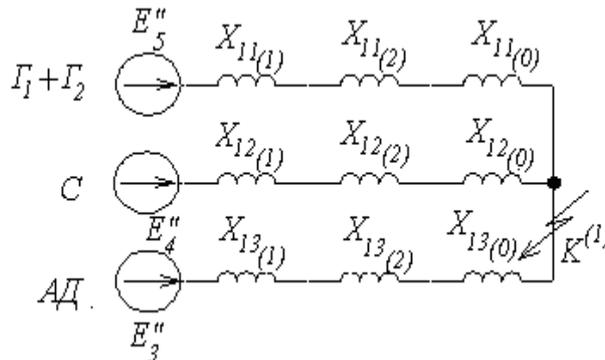


Рисунок 24

Токи прямой последовательности генерирующих ветвей:

$$I_{11(1)}^{(1)} = \frac{E_5''}{x_{11(1)} + x_{11(2)} + x_{11(0)}} = \frac{1,14}{0,46 + 0,61 + 3,08} = 0,275;$$

$$I_{12(1)}^{(1)} = \frac{E_4''}{x_{12(1)} + x_{12(2)} + x_{12(o)}} = \frac{0,9}{8,05 + 8,05 + 60} = 0,0118;$$

$$I_{13(1)}^{(1)} = \frac{E_3''}{x_{13(1)} + x_{13(2)} + x_{13(o)}} = \frac{1}{0,255 + 0,255 + 1,71} = 0,45.$$

Полный ток однофазного к. з.:

$$I_K^{(1)} = m^{(1)} \cdot (I_{11(1)}^{(1)} + I_{12(1)}^{(1)} + I_{13(1)}^{(1)}) \cdot I_{\delta II} = \sqrt{3}(0,275 + 0,0118 + 0,45) \cdot 0,5 = 1,1 \text{ кА}.$$

### Расчет двухфазного к. з. на землю в точке «К».

Комплексная схема для определения токов ПП (рисунок 25):

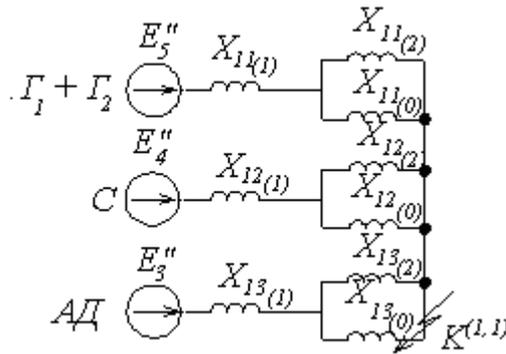


Рисунок 25

Токи ПП генерирующих ветвей:

$$I_{11(1)}^{(1,1)} = \frac{E_5''}{x_{11(1)} + x_{11(2)} // x_{11(o)}} = \frac{1,14}{0,46 + \frac{0,61 \cdot 3,08}{0,61 + 3,08}} = 1,17;$$

$$I_{12(1)}^{(1,1)} = \frac{E_4''}{x_{12(1)} + x_{12(2)} // x_{12(o)}} = \frac{0,9}{8,05 + \frac{8,05 \cdot 60}{8,05 + 60}} = 0,06;$$

$$I_{13(1)}^{(1,1)} = \frac{E_3''}{x_{13(1)} + x_{13(2)} // x_{13(o)}} = \frac{1}{0,255 + \frac{0,255 \cdot 1,71}{0,255 + 1,71}} = 2,1.$$

Полный ток двухфазного к. з. на землю:

$$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot (I_{11(1)}^{(1,1)} + I_{12(1)}^{(1,1)} + I_{13(1)}^{(1,1)}) \cdot I_{\delta II} = 1,62(1,17 + 0,06 + 2,1) \cdot 0,5 = 2,69 \text{ кА}$$

где

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{o\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{o\Sigma})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,176 \cdot 1,08}{(0,176 + 1,08)^2}} = 1,62.$$

#### 4. Особенности расчета токов к.з. в схемах сельского электроснабжения напряжением до 1 кВ

Расчеты токов к. з. в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется проводить в именованных единицах (ГОСТ 28249–89). При составлении эквивалентных схем замещения параметры системы, питающей ЛЭП и трансформатора, приводят к ступени напряжения, где находится точка к.з., причем сопротивления всех элементов схемы замещения выражают в миллиомах. Принципиальная расчетная схема представлена на рисунке 26.

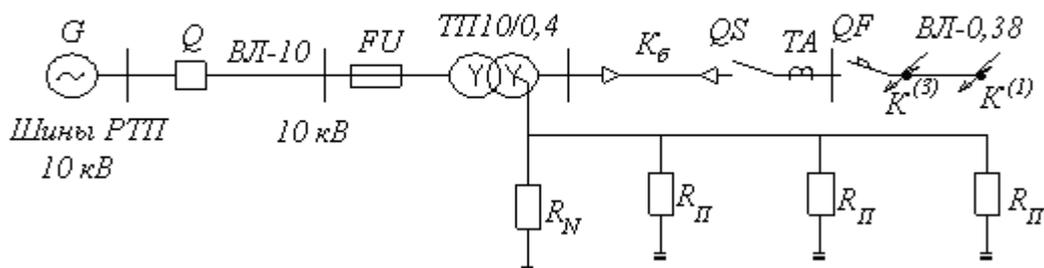


Рисунок 26

В данном случае питание сети 0,4 кВ осуществляется от энергосистемы  $G$  по линии 10 кВ через трансформатор 10/0,4 кВ. Возможно питание сети от автономного источника (генератора).

На схеме:  $FU$  – предохранитель ПКТ-10;  $QS$  – рубильник;  $TA$  – трансформатор тока;  $QF$  – автоматический выключатель на линии 0,38 кВ;  $R_n$  – повторные заземления нулевого провода.

Расчет токов к.з. выполняют с целью определения их значений, необходимых для выбора и проверки электрооборудования на ТП 10/0,4 кВ, для выбора уставок защиты и проверки чувствительности, для выбора и оценки заземляющих устройств.

Особенность расчетов токов к. з. состоит в необходимости учета:

индуктивных сопротивлений всех элементов короткозамкнутой цепи, включая обмотки  $TA$ , и токовые катушки  $QF$ ;

активных сопротивлений элементов;

активных сопротивлений контактов и контактных соединений;

сопротивления электрической дуги в месте к.з.;

значения параметров синхронных и асинхронных двигателей.

Рекомендуется учитывать:

изменения активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при к.з.;

влияние комплексной нагрузки, а также отдельных асинхронных двигателей, если их суммарный номинальный ток превышает 10 % начального значения периодической составляющей тока к.з., рассчитанного без их учета.

Расчету подлежат:

ток трехфазного  $I_{к}^{(3)}$  и двухфазного к. з.  $I_{к}^{(2)}$  на шинах низшего напряжения трансформатора. При этом необходимо определить  $I_{к.макс}^{(3)}$  и  $I_{к.мин}^{(2)}$ . Максимальное значение тока трехфазного к. з. используют при выборе и проверке электрооборудования (рубильников, автоматических выключателей, трансформаторов тока), при согласовании защит (предохранителя ПКТ-10 и автоматического выключателя). Минимальное значение тока двухфазного к. з. применяют для оценки чувствительности отсечки автоматического выключателя;

минимальное значение тока однофазного к. з.  $I_{к.мин}^{(1)}$  в конце линии напряжением 0,38 кВ, необходимого для оценки эффективности зануления в сети.

Схема замещения для расчета тока  $I_{к}^{(3)}$  имеет вид (рисунок 27):

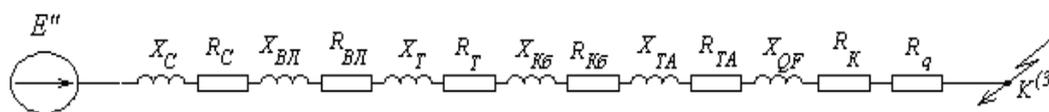


Рисунок 27

Здесь:

$U_{ср.нн.ф} = 230$  В – среднее номинальное напряжение ступени низшего напряжения трансформатора;

$$x_c = \frac{U_{ср.нн}^2}{S_H} \cdot 10^3, \text{ мОм} - \text{сопротивление системы};$$

$$R_{ВЛ} = R_{уд} \cdot \ell \cdot \left( \frac{U_{ср.нн}}{U_{ср.вн}} \right)^2 = R_{уд} \cdot \ell \cdot \left( \frac{0,4}{10} \right)^2 = \frac{R_{уд} \cdot \ell}{625}, \text{ мОм};$$

$$x_{ВЛ} = \frac{x_{уд} \cdot \ell}{625}, \text{ мОм};$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{к.з} \cdot U_{ср.нн}^2}{S_H^2} \cdot 10^6, \text{ мОм} - \text{сопротивление трансформатора};$$

$$x_T = \sqrt{\left( \frac{u_K \%}{100} \right)^2 - \left( \frac{\Delta P_{к.з}}{S_H} \right)^2} \cdot \frac{U_{ср.нн}^2}{S_H} \cdot 10^6, \text{ мОм};$$

$$\left. \begin{aligned} R_{кб} &= R_{уд} \cdot \ell \\ x_{кб} &= x_{уд} \cdot \ell \end{aligned} \right\} - \text{сопротивление кабельных выводов};$$

$R_{ТА}, x_{ТА}$  – активное и индуктивное сопротивления трансформатора тока (ТТ).

Для ТТ с:

$$n_T = 75/5 - R_T = 4,8 \text{ мОм}; x_T = 3 \text{ мОм};$$

$$n_T = 150/5 - R_T = 0,75 \text{ мОм}; x_T = 1,2 \text{ мОм};$$

$$n_T = 200/5 - R_T = 0,42 \text{ мОм}; x_T = 0,67 \text{ мОм}.$$

$R_{QF}$ ,  $x_{QF}$  – активное и индуктивное сопротивления катушек автоматических выключателей.

Для QF с  $I_{ном} = 100 \text{ А} - R_{QF} = 2,15 \text{ мОм}; x_{QF} = 1,2 \text{ мОм};$   
с  $I_{ном} = 140 \text{ А} - R_{QF} = 1,3 \text{ мОм}; x_{QF} = 0,7 \text{ мОм}.$

$R_k$  – сопротивление контактов. Приблизительно  $R_k = 0,1 \text{ мОм}$  – для контактных соединений кабелей,  $R_k = 1,0 \text{ мОм}$  – для коммутационных аппаратов.

$R_d$  – активное сопротивление электрической дуги в месте к. з. Для приближенного учета при к. з. у выводов обмотки НН в разделке кабелей при номинальной мощности трансформатора

$$S_H \leq 250 \text{ кВ}\cdot\text{А} - R_d = 15 \text{ мОм};$$

$$S_H = 400 \text{ кВ}\cdot\text{А} - R_d = 10 \text{ мОм};$$

$$S_H = 630 \text{ кВ}\cdot\text{А} - R_d = 7 \text{ мОм}.$$

Ток трехфазного к. з. без учета подпитки от электродвигателей определяют так:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{ср.нн}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}}, \text{ кА.} \quad (40)$$

При расчете максимального значения тока трехфазного к. з. в суммарных сопротивлениях  $R_{\Sigma}$  и  $x_{\Sigma}$  можно учесть только сопротивления системы, питающей линии и трансформатора 10/0,4 кВ.

Сопротивления ПП трансформаторов 10/0,4 кВ приведены в таблице 7.

Т а б л и ц а 7

$S_T$ , кВ·А	25	40	63	100	160	250	400	630	1000
$R_T$ , мОм	154	88	53	32	16,7	9,5	5,7	3,1	2
$x_T$ , мОм	244	157	101	70,6	42	26,8	17,1	13,6	8,6

Приблизительно величину максимального значения тока трехфазного к.з. на шинах НН подстанции 10/0,4 кВ оценивают по выражению

$$I_{к.макс}^{(3)} = \frac{100}{u_k \%} \cdot \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.нн}}. \quad (41)$$

При расчете минимального значения тока к. з.  $I_{к.мин}^{(3)}$  необходимо учитывать все составляющие цепи к. з. Необходимо также увеличить активное сопротивление кабелей:

$$R_{кбU} = C_U \cdot R_{кб0}, \quad (42)$$

где  $C_U$  – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления кабеля из-за нагрева его током к. з. В приближенных расчетах допускается принимать  $C_U = 1,5$ ;  $R_{кб0}$  – сопротивление кабеля при температуре  $U = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Расчет однофазного тока к. з. $I_{\kappa}^{(1)}$ в конце линии 0,38 кВ

При электроснабжении от системы ток однофазного к.з. допускается рассчитывать по выражению

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{ср.нн.ф}}{\frac{1}{3}Z_T^{(1)} + Z_n}, \quad (43)$$

где  $\frac{1}{3}Z_T^{(1)}$  – расчетное сопротивление трансформатора при однофазном к.з. на стороне 0,4 кВ, приведенное к этому напряжению;  $Z_n$  – сопротивление петли «фазный-нулевой провод»

$$Z_n = \sqrt{(R_{\Sigma\phi} + R_{\Sigma n} + R_{\kappa})^2 + x_{n\Sigma}^2}, \quad (44)$$

где  $R_{\Sigma\phi}$  – суммарное активное сопротивление фазного провода

$$R_{\Sigma\phi} = \sum_{i=1}^n R_{y\partial i} \cdot \ell_i, \quad (45)$$

где  $\ell_i$  – длина  $i$ -го участка;  $R_{y\partial i}$  – удельное сопротивление на  $i$ -м участке;  $R_{\Sigma n}$  – суммарное активное сопротивление нулевого провода;  $R_{\kappa}$  – суммарное сопротивление контактов в линии с учетом переходного сопротивления в месте к. з. Принимается равным  $R_{\kappa} = 20$  мОм при длине линии  $\ell \leq 200$  м,  $R_{\kappa} = 25$  мОм при  $\ell \leq 500$  м;  $x_{n\Sigma}$  – суммарное индуктивное сопротивление петли проводов (фазный-нулевой)

$$x_{n\Sigma} = x_{n.y\partial} \cdot \ell;$$

где  $x_{n.y\partial} = 0,6$  Ом/км – для воздушной ЛЭП 0,38 кВ;  $x_{n.y\partial} = 0,15$  Ом/км – для кабельной линии.

Если пренебречь переходным сопротивлением  $R_{\kappa}$ , то сопротивление петли можно определять так:

$$Z_n = Z_{n.y\partial} \cdot \ell, \quad (46)$$

где  $Z_{n.y\partial}$  – удельное сопротивление (Ом/км) определяется из таблицы 8.

Т а б л и ц а 8

Фазный провод	Нулевой провод				
	A25	A-35	A-50	A-70	A-95
A-25	3,21	2,79	2,46	-	-
A-35	2,79	2,57	2,05	1,82	-
A-50	2,46	2,05	1,73	1,53	1,4
A-70	2,25	1,82	1,53	1,34	1,21
A-95	2,11	1,71	1,4	1,21	1,09

В схемах, питаемых от автономного источника (генератора), расчеты токов к. з. выполняются так же, как и в сетях напряжением выше 1 кВ. Имеются специальные расчетные кривые для определения токов к. з. в произвольный момент времени от синхронной машины (генератора или двигателя) и асинхронных электродвигателей.

В приближенных расчетах принимают следующие параметры:

для синхронной машины –

$$x''_{d*} = 0,15; \quad x_{2*} = x''_{d*}; \quad R_{CD*} = 0,15 x''_{d*};$$

для асинхронного двигателя –

$$x''_{AD*} = 0,18; \quad R_{AD*} = 0,36 x''_{AD*}.$$

## ЛИТЕРАТУРА

Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970 520.

Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ - М. Энергия, 1980. - 85с.

Сукманов В.И. Практикум по переходным процессам в системах электроснабжения. – М.: МИИСП, 1979.

Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: МЭИ, 2000.

Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М.: Издательство НЦ ЭИАС, 2002.

Беяева Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Учебное издание

Николай Михайлович Прыгов  
Екатерина Федоровна Маловастая

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся  
по специальностям 311400 – «Электрификация и автоматизация  
сельского хозяйства»

Научный редактор В.А.Безик  
Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 31.08.2009 г. Формат 60x84 /16  
Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,32. Тираж 100 экз. Изд. 1468.

---

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии.  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА.