

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ЭНИН  
\_\_\_\_\_ Боровиков Ю.С.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Часть 1

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Математическое моделирование в системах электроснабжения» для студентов 3 курса, обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика»

*Составитель С.Г.Обухов*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2011

# 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

## 1.1. Теоретические сведения

Коротким замыканием (КЗ) называется преднамеренное или случайное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение двух точек электрической сети между собой или землей, при котором токи в ветвях электроустановки резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

КЗ являются одним из основных видов аварий в системах электроснабжения, в связи с чем расчет токов КЗ является важнейшей задачей проектирования таких систем.

На стадии проектировании любой системы электроснабжения необходимо определить максимально возможные (в начале каждого участка) и минимально возможные (в конце участка) токи КЗ. По максимальным токам производится проверка сечений проводников, коммутационных и защитных аппаратов на термическую и динамическую стойкость к токам КЗ; расчет минимальных токов необходим для правильного выбора уставок аппаратов защиты.

В сетях трехфазного электрического тока короткие замыкания могут быть трехфазные, двухфазные и однофазные. Трехфазные и двухфазные короткие замыкания – это симметричные КЗ. В сетях с глухозаземленной нейтралью возможны несимметричные однофазные КЗ при замыкании одной фазы на землю или корпус электроустановки.

Полный ток короткого замыкания определяется суммой вынужденной и свободной составляющих. Вынужденная составляющая тока КЗ обусловлена действием источника питания. Она имеет периодический характер изменения с частотой, равной частоте напряжения источника. Эту составляющую называют периодической составляющей тока КЗ –  $i_{пт}$ . Свободная составляющая тока КЗ обусловлена изменением энергии магнитного поля в индуктивности электрической цепи, запасенной до момента возникновения КЗ. Свободная составляющая тока КЗ из-за обязательного наличия в электрической цепи активного сопротивления затухает по экспоненциальному закону без перемены знака и называется аperiodической составляющей тока КЗ –  $i_{ат}$ .

$$i = i_{пт} + i_{ат} \quad (1.1)$$

Наибольшее амплитудное значение полного тока наблюдается через полпериода (0,01 с) после начала КЗ. Этот ток называется ударным током короткого замыкания  $i_{уд}$  и определяется как сумма амплитудного значения периодической составляющей тока и мгновенного значения аperiodической составляющей для  $t = 0,01с$ .

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} I_{п0} \quad (1.2)$$

где  $k_{уд}$  – ударный коэффициент тока КЗ;  $I_{п0}$  – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

Ударный коэффициент  $k_{уд}$  зависит от соотношения между активным и реактивным сопротивлением цепи КЗ, т.е. от расстояния между местом КЗ и источника питания. Значения  $k_{уд}$  в зависимости от места КЗ приведены в таблице 1.1 и на рисунке 1.1.

Таблица 1.1

Ударные коэффициенты в зависимости от места короткого замыкания

Место короткого замыкания	$k_{уд}$
Выводы явнополюсного генератора с успокоительной обмоткой	1,93
Выводы турбогенератора	1,91
В цепи без учета активного сопротивления	1,8
На стороне до 1000 В трансформаторов мощностью: 1600, 2500 кВ·А	1,4
630, 1000 кВ·А	1,3
100, 250, 400 кВ·А	1,2
Удаленные точки КЗ с учетом активного сопротивления	по рис.1

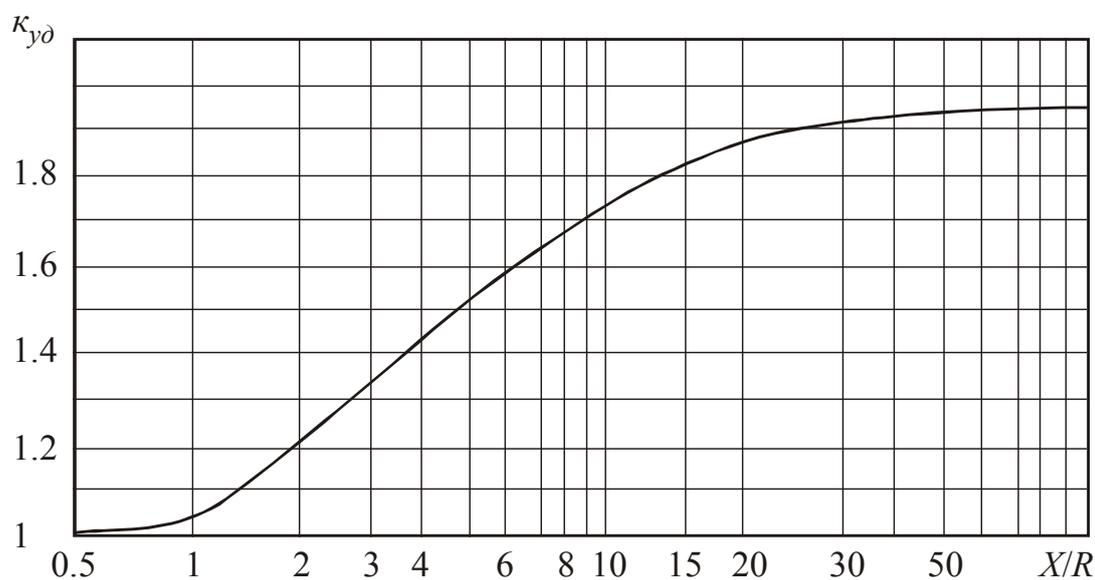


Рис. 1.1. Кривая для определения ударного коэффициента

Для определения токов КЗ обычно пользуются методами математического моделирования. Процесс моделирования системы электроснабжения для расчета токов КЗ включает в себя несколько этапов.

1. Для упрощения расчетов принимают ряд допущений:

- трехфазную систему считают симметричной;
- не учитывают насыщения магнитных систем, что позволяет считать все цепи линейными, следовательно, может быть применен принцип наложения;
- пренебрегают намагничивающими токами силовых трансформаторов и емкостными проводимостями всех элементов короткозамкнутой сети (кроме воздушных линий 330 кВ и выше и кабельных линий 110 кВ и выше);
- в течение всего процесса КЗ ЭДС генераторов системы считают совпадающими по фазе;
- электродвижущие силы всех источников питания, значительно удаленных от места КЗ, считают неизменными.

Применение таких допущений вполне оправдано, так как они существенно упрощают математическое описание системы, при этом не увеличивая погрешность расчета.

Если указанные допущения принять нельзя, то расчет токов КЗ следует производить более точным способом [12, 13].

2. Для расчета токов КЗ составляется расчетная схема – упрощенная однолинейная схема электроустановки, в которой учитывают все источники питания (генераторы, синхронные компенсаторы, энергосистемы), трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы. При составлении расчетной схемы исходят из условий длительной работы электроустановок рассчитываемой сети.

3. По расчетной схеме составляется схема замещения, в которой указываются сопротивления всех элементов и намечаются точки для расчета токов КЗ. Генераторы, трансформаторы большой мощности, воздушные линии, реакторы обычно представляются в схеме замещения их индуктивными сопротивлениями, так как активные сопротивления во много раз меньше индуктивных. Кабельные линии 6-10 кВ, трансформаторы, мощностью до 1000 кВА в схеме замещения представляются индуктивными и активными сопротивлениями.

Все сопротивления схемы замещения подсчитывают в именованных (Ом) или в относительных единицах. При расчете в относительных единицах задаются базовыми величинами: напряжением  $U_6$  и мощностью  $S_6$ .

За базовое напряжение принимают среднее номинальное напряжение той ступени, где производится расчет токов КЗ. Среднее значение напряжения принимают на 5 % выше номинального напряжения сети.

Шкала  $U_{\text{ср.ном}}$ : 230, 115, 37, 10.5, 6.3, 0.4, 0.23 кВ.

За базовую мощность для удобства подсчетов принимают 100, 1000 МВА или номинальную мощность самого большого трансформатора.

Для определения токов КЗ используют следующие формулы:

а) трехфазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \quad (1.3)$$

где  $I_{\text{кз}}^{(3)}$  – действующее значение установившегося тока КЗ;  $U_{\text{ср.ном}}$  – среднее номинальное (линейное) напряжение системы, приведенное к ступени, на которой рассматривается КЗ;  $Z_{\text{рез}}$  – полное (или индуктивное) сопротивление до места КЗ.

б) двухфазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)} \quad (1.4)$$

в) однофазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\phi-0}}. \quad (1.5)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{\phi-0}$  – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{\text{тр}}^{(1)}$  – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, Ом.

Величина  $Z_{\text{тр}}^{(1)}$  сильно зависит от схемы соединения его обмоток. При схемах соединений  $\Delta / Y_{\text{н}}$  и  $Y / Z_{\text{н}}$  величина  $Z_{\text{тр}}^{(1)}/3$  равна сопротивлению трансформатора при трех- или двухфазном КЗ и определяется по выражению:

$$Z_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 S_{\text{ном тр}}}. \quad (1.6)$$

Для указанных схем соединений при питании от системы бесконечной мощности ток однофазного КЗ на выводах трансформатора равен току трехфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{тр}}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{тр}}} = I_{\text{кз}}^{(3)}. \quad (1.7)$$

При соединении  $Y / Y_H$  –  $Z_{тр}^{(1)} \neq 3 Z_{тр}$ . Определенная экспериментальным путем величина  $Z_{тр}^{(1)}$  приведена в таблице 1.2.

Полное сопротивление петли короткого замыкания  $Z_{\phi-0}$  состоит из сопротивлений фазного и нулевого проводов.

4. Моделирование отдельных элементов системы электроснабжения производится следующим образом:

а) Электрическая система (источник питания)

Электрическая система с достаточной для практических расчетов точностью моделируется источником ЭДС за индуктивным сопротивлением (активным сопротивлением системы обычно пренебрегают, ввиду его малости).

Величина ЭДС принимается равным среднему номинальному напряжению сети  $U_{ср.ном}$ , кВ.

Индуктивное сопротивление системы находится по значению мощности КЗ на выводах обмотки высшего напряжения питающего трансформатора:

$$x_{сист} = \frac{(U_{ср.ном})^2}{S_{кз\ сист.}}$$

где  $S_{кз.сист.}$  – мощность КЗ системы, кВА.

При отсутствии данных о величине  $S_{кз\ сист.}$  значение  $x_{сист}$  может быть определено по номинальному току отключения выключателя  $I_{ном\ откл.}$  установленного в питающей сети напряжением выше 1000 В:

$$x_{сист} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном\ откл.}}$$

Электроустановки объектов электроснабжения напряжением до 1000 В обычно запитываются от понижающих трансформаторов с номинальной мощностью  $S_{ном\ тр.} = 25 \dots 2500$  кВА. Если мощность КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора  $S_{кз\ сист.} \geq 25 \cdot S_{ном\ тр.}$ , то периодическая составляющая тока КЗ будет неизменной. В большинстве случаев для цеховых сетей это соотношение выполняется. Тогда можно считать, что КЗ в сетях до 1000 В питается от системы с неограниченной мощностью, т.е.  $x_{сист.} = 0$ .

б) Двухобмоточный силовой трансформатор

При моделировании схемы замещения силовых трансформаторов для расчета токов КЗ пренебрегают поперечными составляющими, которые в данной постановке задачи не актуальны.

Полное сопротивление двухобмоточных трансформаторов определяется по выражению:

$$Z_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ.тр}}}, \text{ или } Z_{\text{тр}} = \sqrt{R_{\text{тр}}^2 + X_{\text{тр}}^2},$$

а активное и индуктивное – по соотношениям:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}; \quad X_{\text{тр}} = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{кз}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{НОМ}}}\right)^2} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$$

где  $u_{\text{кз}}$  – напряжение короткого замыкания, %;  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение трансформатора, В;  $\Delta P_{\text{кз}}$  – потери короткого замыкания, кВт;  $S_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Сопротивление трансформатора будет приведено к тому напряжению, которое подставляется в качестве  $U_{\text{НОМ}}$ .

Значения сопротивлений трансформаторов приведены в таблице 1.2.

#### в) Проводники

В качестве проводников электрической энергии в системах электроснабжения используют воздушные линии (ВЛ), кабельные линии (КЛ), провода и шинопроводы, которые моделируются активными и индуктивными сопротивлениями:

$$R = r_0 \cdot L, \quad x = x_0 \cdot L$$

где  $r_0$ ,  $x_0$  – удельные активное и индуктивное сопротивления, Ом/м;

$L$  – протяженность линии, м.

В таблице 1.3 приведены сопротивления шинопроводов, в таблице 1.5 – сопротивления проводов и кабелей. Для неизолированных проводов удельное активное сопротивление дано в таблице 1.6, реактивное в таблице 1.11. При отсутствии данных  $x_0$  принимается в соответствии с таблицей 1.7.

г) Контактные соединения, измерительные приборы, коммутационные и защитные аппараты.

Сопротивления токопровода (шин) от трансформатора к автоматическому выключателю ориентировочно принимаются равными  $R_{\text{ш}} = 0,5$  мОм, а  $X_{\text{ш}} = 2,25$  мОм. Значения переходного сопротивления контактов для различных ступеней электроснабжения даны в таблице 1.4, а неподвижных контактных соединений – в таблице 1.8.

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока  $R_{\text{т.т}}$  и  $X_{\text{т.т}}$  приведены в таблице 1.9, а сопротивления токовых катушек расцепителей автоматических выключателей  $R_a$  и  $X_a$  и переходные сопротивления контактов  $R_k$  отключающих аппаратов – в таблице 1.10.

Таблица 1.2

Сопровитления понижающих трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А, приведенные к вторичному напряжению 0,4/0,23 кВ

Мощность, кВА	Верхний предел первичного напряжения, кВ	Схема соединений обмоток	$\Delta P_{кз}$ , кВт	$u_{кз}$ , %	$R_{тр}$ , мОм	$X_{тр}$ , мОм	$Z_{тр}$ , мОм	$Z_{тр}^{(1)}$ , мОм
63	10	Y/Y <sub>H</sub>	1,28	4,5	52	102	114	1237
100	10	Y/Y <sub>H</sub>	1,97	4,5	31,5	64,7	72	779
160	10	Y/Y <sub>H</sub>	2,65	4,5	16,6	41,7	45	487
250	10	Y/Y <sub>H</sub>	3,7	4,5	9,4	27,2	28,7	312
400	10	Y/Y <sub>H</sub>	5,5	4,5	5,5	17,1	18	195
630	10	Y/Y <sub>H</sub>	7,6	5,5	3,1	13,6	14	129
1000	10	Y/Y <sub>H</sub>	12,2	5,5	2	8,5	8,8	81
1600	10	Y/Y <sub>H</sub>	18	5,5	1	5,4	5,4	54

Таблица 1.3

Удельные сопротивления комплектных шинопроводов

Параметры	Тип комплектного шинопровода						
	ШМА				ШРА		
$I_{ном}$ , А	1250	1600	2500	3200	250	400	630
$r_0$ , мОм/м	0,034	0,030	0,017	0,015	0,21	0,15	0,10
$x_0$ , мОм/м	0,016	0,014	0,008	0,007	0,21	0,17	0,13
$r_{0(\phi-0)}$ , мОм/м	0,068	0,060	0,034	0,030	0,42	0,30	0,20
$x_{0(\phi-0)}$ , мОм/м	0,053	0,060	0,075	0,044	0,42	0,24	0,26
$z_{0(\phi-0)}$ , мОм/м	0,086	0,087	0,082	0,053	0,59	0,38	0,33

Таблица 1.4

Переходные сопротивления на ступенях распределения

Ступень	Место	$R_{ступ.}$ , мОм	Дополнительные сведения
1	Распределительные устройства подстанции	15	Используются при отсутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопротивлениях в сетях, питающихся от цеховых трансформаторов мощностью до 2500 кВА включительно
2	Первичные распределительные цеховые пункты	20	
3	Вторичные распределительные цеховые пункты	25	
4	Аппаратура управления электроприемников, получающих питания от вторичных РП	30	

Таблица 1.5

Активное и индуктивное сопротивления проводов и кабелей  
с алюминиевыми и медными жилами

Сечение, мм <sup>2</sup>	Сопротивление, мОм/м					
	активное		индуктивное			
	алюминий	медь	провода открыто проложен- ные	кабель с бумажной поясной изоляцияй	провода в трубах, кабель с любой изоляцияй (кроме бумажной)	воздушная линия до 1000 В
2,5	12,5	7,4	0,358	0,104	0,116	—
4,0	7,81	4,63	0,343	0,095	0,107	—
6,0	5,21	3,09	0,330	0,09	0,1	—
10	3,12	1,84	0,307	0,073	0,099	—
16	1,95	1,16	0,293	0,0675	0,095	0,354
25	1,25	0,74	0,278	0,0662	0,091	0,339
35	0,894	0,53	0,268	0,0637	0,088	0,330
50	0,625	0,37	0,256	0,0625	0,085	0,317
70	0,447	0,265	0,245	0,0612	0,082	0,307
95	0,329	0,195	0,236	0,0602	0,081	0,297
120	0,261	0,154	0,229	0,0602	0,080	0,293
150	0,208	0,124	0,21	0,0596	0,079	—
185	0,169	0,1	0,21	0,0596	0,078	—
240	0,130	0,077	0,20	0,0587	0,077	—

Таблица 1.6

Активное сопротивление 1 км кабельных и воздушных линий, Ом/км

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Жила трехжильного кабеля		Фаза, выполненная проводом марки			
	алюминиевая	медная	А	АС и АСО	АСУ	М
1	—	18,5	—	—	—	—
1,5	—	12,5	—	—	—	—
2,5	12,5	7,4	—	—	—	—
4	7,81	4,63	—	—	—	—
6	5,21	3,09	—	—	—	3,06
10	3,12	1,84	—	—	—	1,84
16	1,95	1,16	1,98	2,06	—	1,2
25	1,25	0,74	1,28	1,31	—	0,74
35	0,894	0,53	0,92	0,85	—	0,54
50	0,625	0,37	0,64	0,65	—	0,39
70	0,447	0,265	0,46	0,46	—	0,28
95	0,329	0,195	0,34	0,37	—	0,2
120	0,261	0,154	0,27	0,27	0,28	0,158
150	0,208	0,124	0,21	0,21	0,21	0,128
185	0,169	0,1	0,185	0,17	0,17	0,103
240	0,13	0,077	—	0,132	0,131	0,078
300	—	—	—	0,107	0,106	—
400	—	—	—	0,08	0,079	—

Таблица 1.7

Среднее значения погонных реактивных сопротивлений линий сети

Характеристика линий	$x_0$ , мОм/м
Кабельные линии напряжением: до 1000 В	0,06
6–10 кВ	0,08
Изолированные провода внутренней проводки	0,11
Шинопроводы	0,15
Воздушные линии напряжением: до 1000 В	0,31
6–10 кВ	0,38
35–220 кВ	0,40
500 кВ (с тремя проводами в фазе)	0,29

Таблица 1.8

Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений

Кабель		Комплектный шинопровод	
$S$ , мм <sup>2</sup>	$R_k$ , мОм	$I_{ном}$ , А	$R_k$ , мОм
16	0,085	<i>Распределительный</i>	
25	0,064	250	0,009
35	0,056	400	0,006
50	0,043	630	0,0037
70	0,029	<i>Магистральный</i>	
95	0,027	1600	0,0034
120	0,024	2500	0,0024
185	0,021	3200	0,0012
240	0,012	4000	0,0011

Таблица 1.9

Средние значения сопротивлений первичных обмоток трансформаторов тока

Коэффициент трансформации	Сопротивления, мОм, трансформаторов тока класса точности			
	1		3	
	$X_{т.т}$	$R_{т.т}$	$X_{т.т}$	$R_{т.т}$
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
600/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблица 1.10

## Средние значения сопротивлений отключающих аппаратов

Номинальный ток, А	Сопротивления расцепителей автоматических выключателей при 65°C, мОм		Переходные сопротивления контактов, $R_k$ , мОм		
	$R_a$	$X_a$	автоматических выключателей	рубильников	разъединителей
50	5,50	4,50	1,3	—	—
70	2,40	2,00	1,00	—	—
100	1,30	1,20	0,75	0,50	—
150	0,70	0,70	0,70	0,45	—
200	0,40	0,50	0,60	0,40	—
400	0,15	0,17	0,40	0,20	0,20
600	0,12	0,13	0,25	0,15	0,15
1000	0,10	0,10	0,15	0,08	0,08
1600	0,08	0,08	0,10	—	0,06
2000	0,07	0,08	0,08	—	0,03
2500	0,06	0,07	0,07	—	0,03
3000	0,05	0,07	0,06	—	0,02
4000	0,04	0,05	0,05	—	—

Таблица 1.11

## Реактивное сопротивление неизолированных алюминиевых и сталеалюминиевых проводов, Ом/км

Марка	При среднем геометрическом расстоянии между проводами, мм									
	800	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
A-35	0,352	0,366	0,391	0,410	—	—	—	—	—	—
A-50	0,341	0,355	0,380	0,398	0,413	0,423	0,433	0,442	—	—
A-70	0,331	0,345	0,370	0,388	0,402	0,413	0,423	0,431	—	—
A-95	0,319	0,333	0,358	0,377	0,393	0,402	0,413	0,421	—	—
A-120	0,313	0,327	0,352	0,371	0,385	0,396	0,405	0,414	—	—
A-150	0,305	0,315	0,344	0,363	0,376	0,388	0,398	0,406	0,416	0,422
A-185	0,298	0,311	0,339	0,355	0,370	0,382	0,391	0,399	0,409	0,416
A-240	—	0,304	0,329	0,347	0,361	0,372	0,382	0,391	0,401	0,406
A-300	—	0,297	0,322	0,340	0,354	0,366	0,376	0,381	0,394	0,401
A-400	—	0,289	0,315	0,331	0,344	0,356	0,366	0,374	0,386	0,391
A-500	—	0,281	0,305	0,324	0,337	0,348	0,389	0,366	0,377	0,383
A-600	—	0,275	0,300	0,318	0,330	0,343	0,353	0,361	0,370	0,377
AC-16	0,374	0,389	0,411	0,430	0,442	—	—	—	—	—
AC-25	0,362	0,376	0,398	0,407	0,417	0,431	—	—	—	—
AC-35	0,346	0,362	0,385	0,403	0,412	0,429	0,438	0,446	—	—
AC-50	0,338	0,353	0,374	0,392	0,406	0,418	0,427	0,435	—	—
AC-70	0,327	0,341	0,364	0,382	0,396	0,408	0,417	0,425	0,433	0,440
AC-95	0,317	0,331	0,353	0,371	0,385	0,397	0,406	0,414	0,422	0,429
AC-120	0,309	0,323	0,347	0,365	0,379	0,391	0,400	0,408	0,416	0,423
AC-150	—	—	—	0,358	0,372	0,384	0,398	0,401	0,409	0,416
AC-185	—	—	—	—	0,365	0,377	0,386	0,394	0,402	0,409
AC-240	—	—	—	—	—	0,369	0,378	0,386	0,394	0,401
AC-300	—	—	—	—	—	0,358	0,368	0,379	0,385	0,395

## Лабораторная работа № 1

### 1.2. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В

**Цель работы:** овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях выше 1000 В.

#### 1.2.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При расчете токов КЗ в сетях выше 1000 В обязателен учет индуктивных сопротивлений элементов сети: электродвигателей, трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий, токопроводов. Активное сопротивление учитывается для воздушных ЛЭП с малым сечением проводов и со стальными проводами, а также для кабельных линий большой протяженности с малым сечением жил. Целесообразно учитывать активное сопротивление, если  $r_{\Sigma} \geq x_{\Sigma} / 3$ , где  $r_{\Sigma}$ ,  $x_{\Sigma}$  – суммарные активное и реактивное сопротивления сети от источника питания до места КЗ.

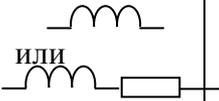
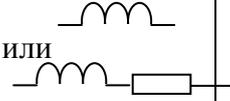
Активное сопротивление трансформаторов также необходимо учитывать в расчетах токов КЗ, если  $r_{\text{тр}} \geq 0,3x_{\text{тр}}$ . Кроме этого, на сопротивление влияет изменение числа витков обмоток устройствами регулирования напряжения. Учесть действительное положение ответвлений каждого трансформатора в распределительных сетях практически невозможно, поскольку их положение изменяется в зависимости от значения нагрузки, схемы и режима работы сети. Поэтому при расчетах принимается, что все трансформаторы включены на основное ответвление, соответствующее их номинальному напряжению.

Все сопротивления схемы замещения подсчитывают в именованных (Ом) или в относительных единицах. При расчете в относительных единицах задаются базовыми величинами: напряжением  $U_6$  и мощностью  $S_6$ .

Расчетные формулы для моделирования элементов системы электроснабжения приведены в таблице 1.12.

Таблица 1.12

Расчетные формулы для определения сопротивлений

Элемент ЭУ, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	относительные единицы
Генератор, $X_d, \%$		$x = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Энергосистема $I_{\text{ОТКЛ.НОМ}}$ $S_{\text{КЗ.СИСТ}}$ $x_{\text{СИСТ}}$		$x = \frac{U_{\text{ср.НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{ОТКЛ.НОМ}}}$ или $x = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{КЗ.СИСТ}}}$	$x = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} \cdot U_{\text{ср.НОМ}}}$ или $x = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{КЗ.СИСТ}}}$
Двухобмоточный трансформатор $u_{\text{КЗ}}, \%$		$x = \frac{u_{\text{КЗ}}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ.ТР}}}$	$x = \frac{u_{\text{КЗ}}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ.ТР}}}$
Реактор $x_p, \text{Ом}$		$x = x_p \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$	$x = x_p \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$
Линия $r_0, x_0$		$x = x_0 l$ $r = r_0 l$	$x = x_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.НОМ}}^2}$ $r = r_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.НОМ}}^2}$

$S_{\text{НОМ}}$  – номинальные мощности элементов, МВА;

$S_{\text{б}}$  – базовая мощность, МВА;

$S_{\text{КЗ.СИСТ}}$  – мощность КЗ энергосистемы, МВА;

$I_{\text{ОТКЛ.НОМ}}$  – номинальный ток отключения выключателя, кА;

$u_{\text{КЗ}}$  – напряжение КЗ трансформатора, %;

$x_p$  – сопротивление реактора, Ом;

$r_0, x_0$  – активное и индуктивное сопротивления линии на 1 км длины;

$l$  – длина линии, км;

$X_d$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора;

$U_{\text{ср}}$  – среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ.

### 1.2.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для схемы электроснабжения цеховой подстанции (рис. 1.2) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

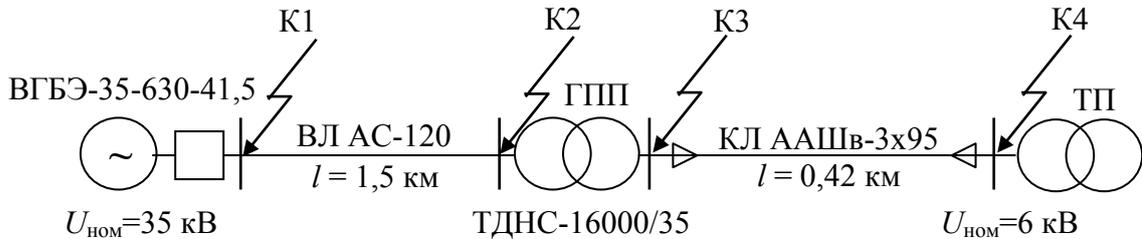


Рис.1.2. Расчетная схема распределительной сети

#### Определение сопротивлений

На подстанции энергосистемы установлен выключатель высокого напряжения ВГБЭ-35-630-41,5 с номинальным током отключения КЗ  $I_{откл.ном} = 41,5$  кА.

Принимаем  $U_{ср.ном} = 37$  кВ.

Определяем мощность КЗ системы;

$$S_{кз.сист} = \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot I_{откл.ном} = \sqrt{3} \cdot 37 \cdot 41,5 = 2660 \text{ МВА.}$$

Расчет ведем в относительных единицах. Производим расчёт сопротивлений сети, принимая базисную мощность  $S_{б} = 100$  МВА.

1. Сопротивление энергосистемы:

$$x_{сист} = \frac{S_{б}}{S_{кз.сист}} = \frac{100}{2660} = 0,038$$

2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{вл} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_{б}}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0,27 \cdot 1,5 \cdot 100}{37^2} = 0,03$$

$$x_{вл} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_{б}}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0,309 \cdot 1,5 \cdot 100}{37^2} = 0,034$$

где:  $l = 1,5$  км - длина воздушной линии;

$U_{ср.ном}$  - базисное напряжение данной ступени трансформации, кВ;

$r_0 = 0,27$  Ом/км - активное сопротивление провода АС-120 (табл.1.6);

$x_0 = 0,309$  Ом/км - индуктивное сопротивление провода АС-120 (табл.1.12).

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656$$

Активным сопротивлением пренебрегаем, так как трансформатор большой мощности.

где  $S_{\text{ном.тр}} = 16$  МВА- номинальная мощность трансформатора;  
 $u_{\text{кз}} = 10,5\%$  – напряжение короткого замыкания трансформатора;

4. Сопротивление кабельной линии:

$$r_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,329 \cdot 0,42 \cdot 100}{6,3^2} = 0,348;$$

$$x_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,0602 \cdot 0,42 \cdot 100}{6,3^2} = 0,064,$$

где:  $l = 0,42$  км – длина кабельной линии;

$U_{\text{ср.ном}} = 6,3$  кВ – базисное напряжение данной ступени трансформации;

$r_0 = 0,329$  Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.1.6);

$x_0 = 0,0602$  Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.1.5)

Составляем схему замещения – рис. 1.3.

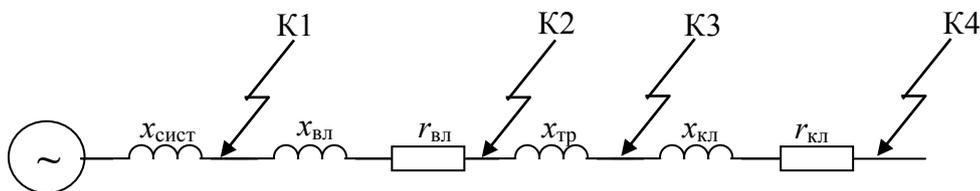


Рис.1.3.Схема замещения участка распределительной сети

### **Расчет токов КЗ**

В сетях среднего напряжения (6-35 кВ) в России применяют изолированную нейтрль. Ток однофазного замыкания на землю в таких сетях невелик, его величина определяется емкостью линии (зависит от напряжения, длины и типа линии), и этот режим не является аварийным. Соответственно, рассчитывать токи однофазного КЗ в сетях среднего напряжения нет необходимости.

Ток двухфазного КЗ легко определяется по рассчитанному току трехфазного:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)}$$

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

где  $Z_{\text{рез}}$  – полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

При расчете в системе относительных единиц сначала находят базисный ток КЗ на рассматриваемой ступени трансформации:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}, \text{ кА}$$

а затем определяют реальное значение периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{I_{\text{б}}}{Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

Будем определять токи трехфазного КЗ по намеченным точкам.

Точка К1:

$$I_{\text{б}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,038} = 41,05 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = x_{\text{сист}} = 0,038$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 41,05 = 104,5 \text{ кА}$$

$$k_{\text{уд}} = 1,8 \text{ по таблице 1.1.}$$

Точка К2:

$$I_{\text{б}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,078} = 20 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034)^2 + (0,03)^2} = 0,078$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 20 = 50,91 \text{ кА}$$

$$k_{\text{уд}} = 1,8 \text{ по таблице 1.1.}$$

Точка К3:

$$I_{\sigma} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{9,16}{0,729} = 12,57 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{ВЛ}} + x_{\text{тр}})^2 + (r_{\text{ВЛ}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656)^2 + (0,03)^2} = 0,729$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 12,57 = 31,99 \text{ кА}$$

$k_{\text{уд}} = 1,8$  по таблице 1.1.

Точка К4:

$$I_{\sigma} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{9,16}{0,876} = 10,46 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{ВЛ}} + x_{\text{тр}} + x_{\text{кл}})^2 + (r_{\text{ВЛ}} + r_{\text{кл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656 + 0,064)^2 + (0,03 + 0,348)^2} = 0,876$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 10,46 = 26,83 \text{ кА}$$

$k_{\text{уд}} = 1,8$  по таблице 1.1.

Сводная ведомость токов КЗ

Расчетные точки	К1	К2	К3	К4	
Токи КЗ, кА	$I_{\text{КЗ}}^{(3)}$	41,05	20,0	12,57	10,46
	$i_{\text{уд}}$	104,5	50,91	31,99	26,83

### **1.2.3. ЗАДАНИЕ**

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рис. 1.4) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ». Кабельные линии к цеховой ТП и высоковольтному синхронному двигателю (СД) выполнены кабелями с бумажной поясной изоляцией. Среднее геометрическое расстояние между проводами воздушной линии электропередачи (ВЛ) принимаются любым, в соответствии с табл.1.11.

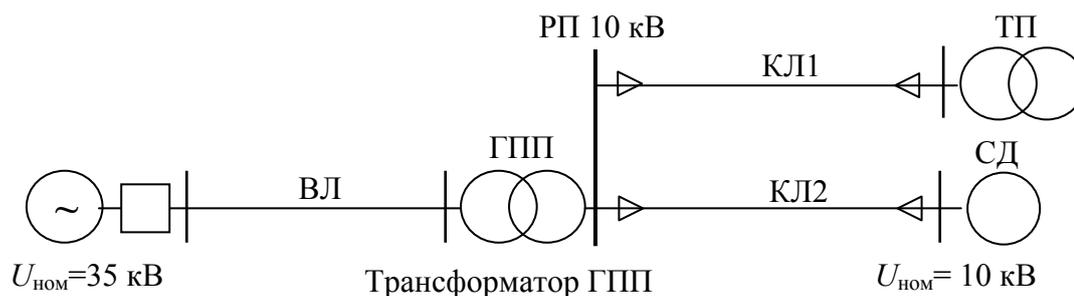


Рис.1.4. Расчетная схема распределительной сети

Варианты заданий приведены в таблице 1.13. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 1.13

Варианты заданий									
№ вар	Система	ВЛ		Трансформатор ГПП		КЛ1		КЛ2	
	$S_{кз},$ МВА	$S,$ мм <sup>2</sup>	$l,$ км	$S,$ МВА	$u_{кз},$ %	$S,$ мм <sup>2</sup>	$l,$ км	$S,$ мм <sup>2</sup>	$l,$ км
1	5000	АС-240	5,6	40	11	150	1,2	95	0,5
2	4000	АС-185	10,2	32	10,5	120	0,6	70	1,2
3	3000	АС-150	5,4	25	10,5	120	0,8	95	0,6
4	2000	АС-120	6,8	16	10,5	95	1,2	50	0,8
5	2000	АС-150	10,5	25	11	95	1,2	120	0,3
6	3000	АС-120	4,1	32	11	70	0,4	70	0,2
7	1000	АС-95	2,2	16	10,5	50	0,2	70	0,5
8	1000	АС-70	3,4	10	10,5	35	0,4	50	0,2
9	2000	АС-240	12,5	32	11	120	2,2	95	1,1
10	3000	АС-185	5	25	10,5	70	3,5	50	0,4

#### 1.2.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Расчетную схему и схему замещения с указанием контрольных точек расчета токов КЗ
3. Результаты расчетов сопротивлений схемы замещения
4. Результаты расчетов токов КЗ
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ
6. Выводы

#### 1.2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы цели расчета КЗ ?
2. Какие условия и основные допущения принимаются при расчете токов КЗ в системах электроснабжения и почему ?

3. Назовите отличия принципиальной схемы, расчетной схемы и схемы замещения.
4. Почему при моделировании элементов схемы электроснабжения для расчета токов КЗ не учитываются их поперечные составляющие ?
5. В каких случаях допускается не учитывать активные сопротивления элементов схемы электроснабжения ?
6. Объясните понятие ударного тока КЗ, периодической и апериодической составляющих
7. На каких участках электрической сети необходимо определять токи КЗ ?
8. Что понимается под термином «относительные единицы»?
9. Как выбираются и пересчитываются базисные условия для различных ступеней напряжения электроэнергетической системы ?
10. Зависит ли результат расчета тока КЗ от выбора базисных условий ?

## **Лабораторная работа № 2**

### **1.3. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В в среде Electronics Workbench**

**Цель работы:** овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях выше 1000 В в системе схемотехнического моделирования Electronics Workbench

#### ***1.3.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

Одной из наиболее известных программ схемотехнического моделирования является Electronics Workbench (разработка фирмы Interactive Image Technologies, [www.interactiv.com](http://www.interactiv.com)). Electronics Workbench является доступным и удобным инструментом математического моделирования, предоставляющий пользователю большое количество электронных компонент и контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам. После составления схемы и её упрощения путем оформления подсхем, моделирование начинается щелчком обычного выключателя. При этом от пользователя скрыт сложный математический алгоритм работы программы, и при ее соответствующей настройке, реальные эксперименты может проводить пользователь, имеющий квалификацию электрика, а не программиста.

Программа Electronics Workbench может быть использована для построения математической модели системы электроснабжения и расчета

токов КЗ.

При построении математической модели системы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде схемотехнического моделирования Electronics Workbench следует обратить внимание на следующие факторы:

1. По умолчанию тип измерительных приборов в программе установлен на «постоянный ток» - DC. Так как моделирование проводится для системы переменного тока нужно изменить тип используемых измерительных приборов на «переменный ток» - AC. Для этого, открыв двойным щелчком мыши, окно свойств измерительного прибора, выберите вкладку «Value», и в раскрывающемся списке «Mode» установите AC (рис. 1.5). Для уменьшения погрешности измерений можно выставить величину внутреннего сопротивления амперметра в  $1 \cdot 10^{-12}$  Ом (Resistance – 1 pΩ).

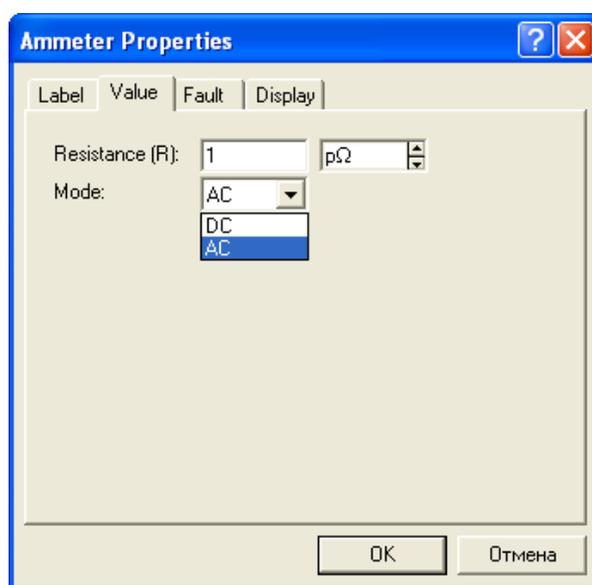


Рис.1.5. Окно свойств амперметра в редакторе Electronics Workbench

2. Величина индуктивных сопротивлений в программе задается не в Ом, а в Гн. Для перехода от величины индуктивного сопротивления, заданного в Ом, к индуктивности в Гн нужно воспользоваться известной формулой:

$$L = \frac{x}{2\pi f}, \text{ где } f - \text{ частота сети, Гц.}$$

### **1.3.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА**

Для схемы электроснабжения (лаб. работа №1, рис. 1.2) требуется составить схему замещения в редакторе Electronics Workbench; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

### **Определение сопротивлений**

Составляем схему замещения для расчета токов КЗ в абсолютных единицах. Так как трехфазная система симметрична, достаточно составить однолинейную схему замещения одной фазы сети.

#### 1. Сопротивление энергосистемы:

Энергосистема моделируется неизменной ЭДС за индуктивным сопротивлением  $x_{\text{сист}}$ .

Определяем фазную ЭДС энергосистемы:

$$e = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{37}{\sqrt{3}} = 21,362 \text{ кВ}$$

Определяем сопротивление системы:

$$x_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 41,5} = 0,515 \text{ Ом}$$

Переходим к индуктивности

$$L = \frac{x_{\text{сист}}}{2\pi f} = \frac{0,515}{2\pi \cdot 50} = 1,639 \text{ мГн}$$

#### 2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{\text{ВЛ}} = r_0 \cdot l = 0,27 \cdot 1,5 = 0,405 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{ВЛ}} = x_0 \cdot l = 0,309 \cdot 1,5 = 0,4635 \text{ Ом}$$

где:  $l = 1,5$  км - длина воздушной линии;

$r_0 = 0,27$  Ом/км - активное сопротивление провода АС-120 (табл.1.6);

$x_0 = 0,309$  Ом/км - индуктивное сопротивление провода АС-120 (табл.1.12).

Переходим к индуктивности

$$L = \frac{x_{\text{ВЛ}}}{2\pi f} = \frac{0,4635}{2\pi \cdot 50} = 1,476 \text{ мГн}$$

#### 3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x = \frac{u_{\text{кз}}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{37^2}{16} = 8,984 \text{ Ом}$$

$$L = \frac{x_{\text{тр}}}{2\pi f} = \frac{8,984}{2\pi \cdot 50} = 28,61 \text{ мГн}$$

*Примечание:* сопротивление трансформатора можно приводить к любой обмотке (высшего или низшего напряжения). Соответственно сопротивления трансформатора в схеме замещения должны находиться на том же напряжении, к которому приведен трансформатор.

$S_{\text{ном.тр}} = 16$  МВА- номинальная мощность трансформатора;

$u_{\text{кз}} = 10,5\%$  – напряжение короткого замыкания трансформатора;

Сопротивления трансформатора приведены к обмотке высшего напряжения.

Для моделирования силового трансформатора при расчете токов КЗ в среде Electronics Workbench удобно использовать его линейную модель, окно свойств которой представлено на рис.1.6.

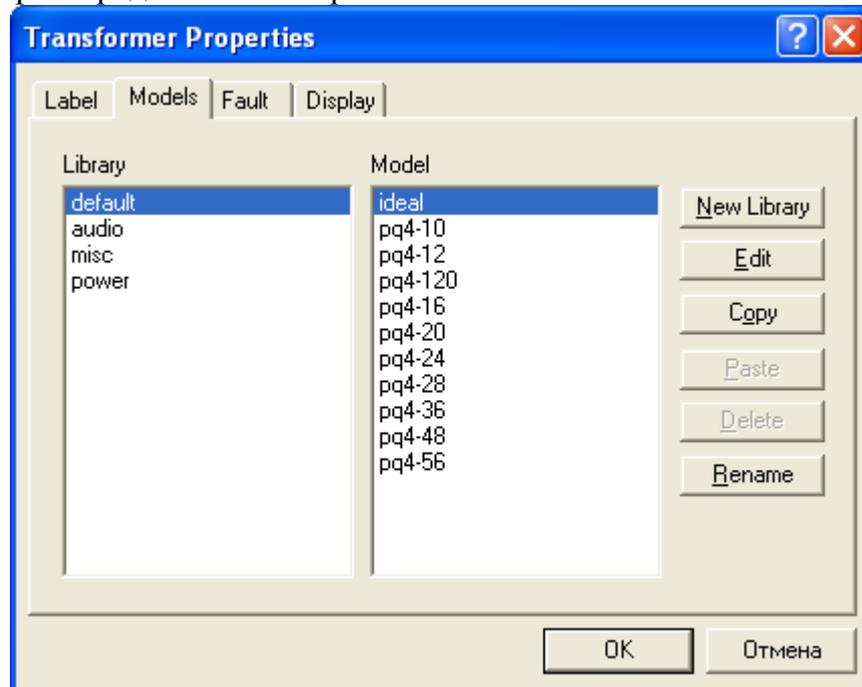


Рис.1.6. Окно свойств линейного трансформатора в редакторе Electronics Workbench

Определим коэффициент трансформации трансформатора ГПП

$$k_{тр} = \frac{U_{ср.ном.ВН}}{U_{ср.ном.НН}} = \frac{37}{6.3} = 5.873,$$

в окне свойств на вкладке «Models» из предлагаемой библиотеки (Library) трансформаторов выберем силовой (power), Из предлагаемой базы моделей (Model) силовых трансформаторов выберем идеальный (ideal) и нажмем кнопку редактирования его свойств - Edit. Откроется окно свойств идеального силового трансформатора (рис. 1.7), в которое нужно ввести рассчитанный нами коэффициент трансформации (primary-to-secondary turns ratio)  $k_{тр} = N = 5,873$ . Остальные значения параметров трансформатора изменять нет необходимости.

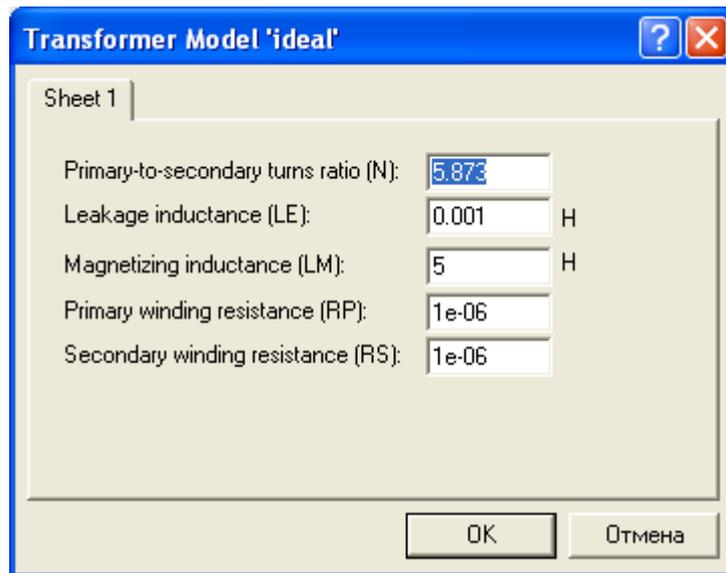


Рис.1.7. Окно свойств идеального силового трансформатора в редакторе Electronics Workbench

#### 4. Сопротивление кабельной линии 6,3 кВ:

$$r_{\text{кл}} = r_0 \cdot l = 0.329 \cdot 0,42 = 0,138 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{кл}} = x_0 \cdot l = 0.0602 \cdot 0,42 = 0,0263 \text{ Ом}$$

где:  $l = 0,42$  км – длина кабельной линии;

$r_0 = 0,329$  Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШВ–(3х95) (табл.1.6);

$x_0 = 0,0602$  Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШВ–(3х95) (табл.1.5)

Переходим к индуктивности

$$L = \frac{x_{\text{вл}}}{2\pi f} = \frac{0,0263}{2\pi \cdot 50} = 0,081 \text{ мГн}$$

В окне схемотехнического редактора собираем схему замещения для расчета токов КЗ. Для полноты исследования введем в расчетную схему сопротивление нагрузки.

Определим сопротивление нагрузки для одной фазы трансформатора, приняв за коэффициент загрузки силового трансформатора по активной мощности наиболее типичный случай –  $K_3 = 0,7$ .

$$P_{\text{ф.тр}} = K_3 \cdot S_{\text{тр.ф.ном}} = \frac{U_{\text{ф.ном}}^2}{R_{\text{н}}}, \text{ откуда } R_{\text{н}} = 3,21 \text{ Ом}$$

Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде Electronics Workbench представлена на рис.1.8.

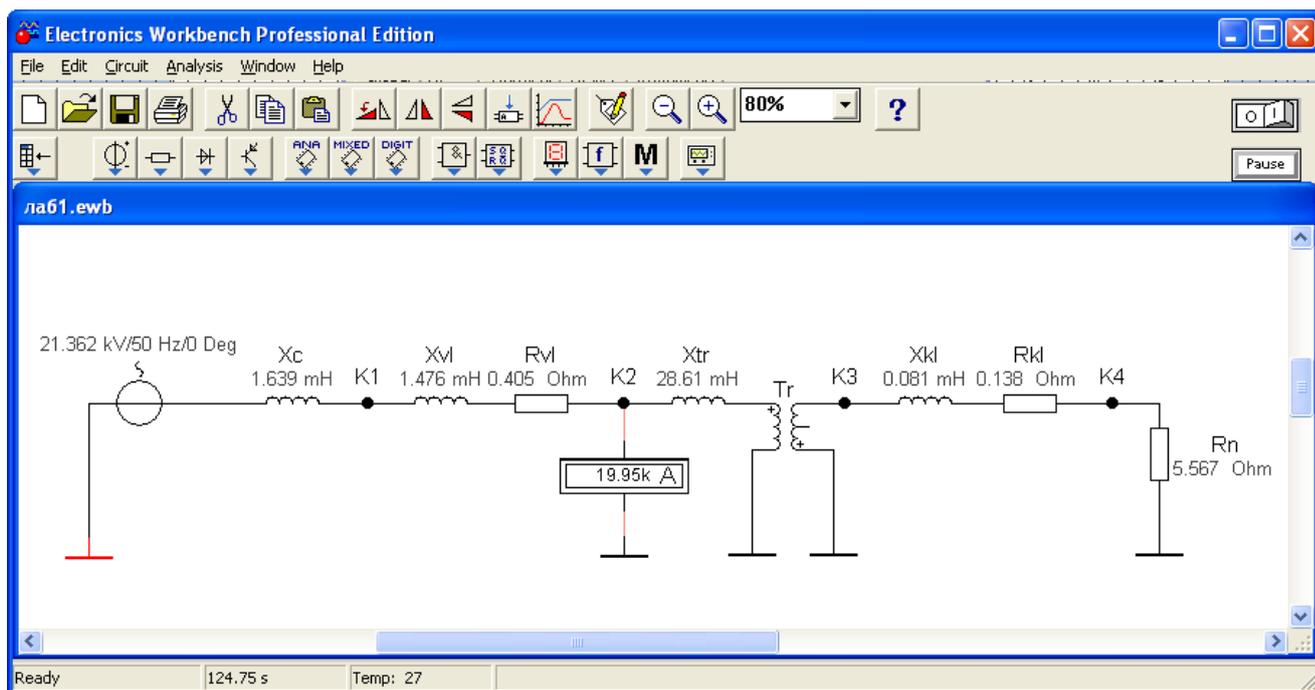


Рис.1.8. Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде Electronics Workbench

Показания амперметра, подключенного между точкой К2 и землей, иллюстрируют установившееся значение тока КЗ в этой точке. Однако, в отличие от линейной математической модели системы электроснабжения, представленной в лабораторной работе №1, данная модель позволяет не только определить установившиеся значения токов КЗ в намеченных точках, но и изучить поведение системы в переходных процессах.

Добавим в каждую ветвь изучаемой схемы по одному шунтирующему сопротивлению небольшого номинала (например 0,001 Ом) и ключ К для замыкания электрической цепи по команде клавиши клавиатуры ПК. Подключим к шунту электронный осциллограф. Подадим питание на схему и замкнем ключ К.

Модифицированная схема исследований приведена на рис.1.9, экран осциллографа с кривой тока КЗ в расчетной точке К4 на рис.1.10.

Так как, кривые тока и напряжения на активном элементе совпадают, мы можем визуально наблюдать переходный процесс изменения тока в процессе короткого замыкания. С помощью, имеющихся в арсенале осциллографа визиров (на рис.1.10 красная и синие линии), легко определить величину мгновенного значения напряжения на шунтирующем резисторе в произвольный момент времени, а затем определить и величину тока.

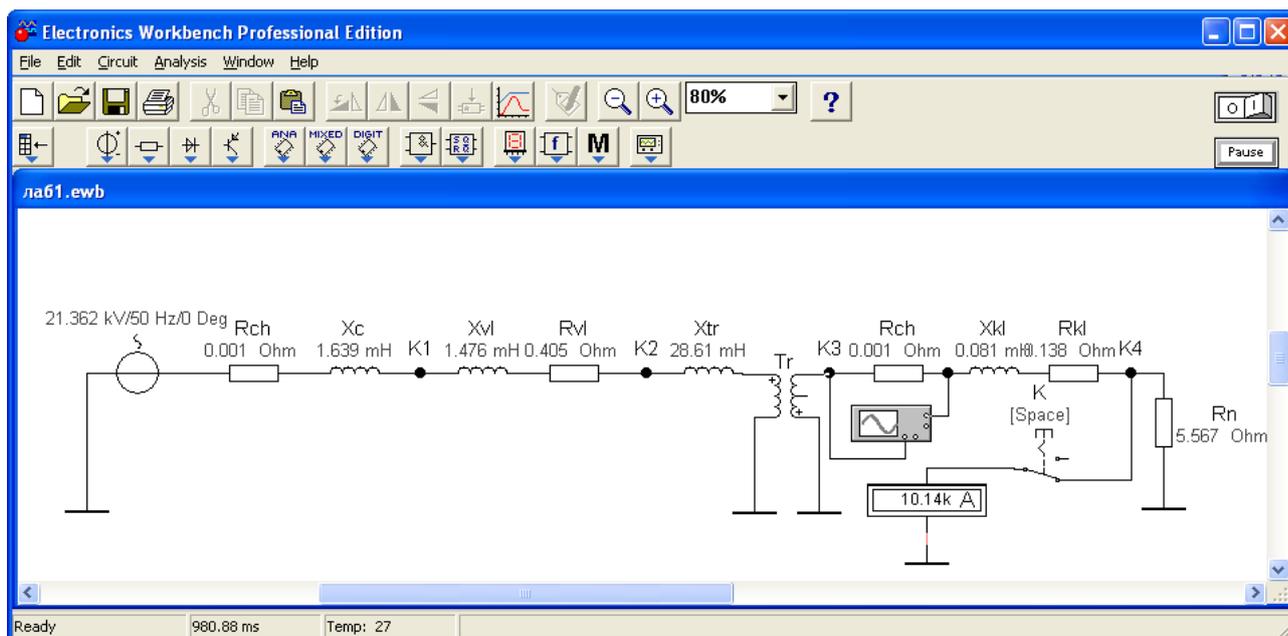


Рис.1.9. Математическая модель схемы электроснабжения для исследования переходных процессов КЗ

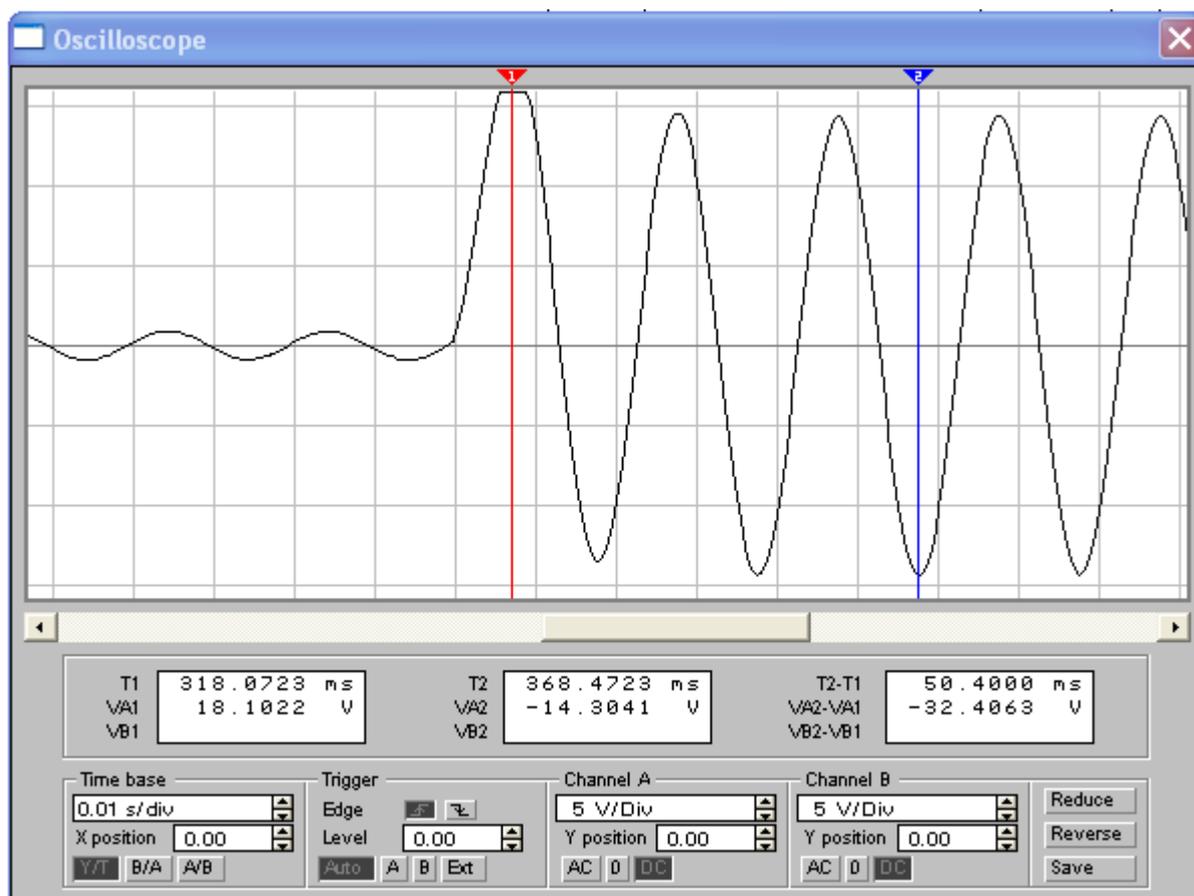


Рис.1.10. Кривая изменения тока в точке К4 во время переходного процесса КЗ

### **1.3.3. ЗАДАНИЕ**

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рис. 1.4) требуется составить схему замещения для определения токов КЗ в программе схемотехнического моделирования Electronics Workbench; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Провести исследования переходных процессов изменения токов во время КЗ, определить по осциллографу значения ударного тока КЗ в каждой точке и длительность переходного процесса КЗ. Сравнить и проанализировать результаты моделирования схемы электроснабжения с результатами, полученными в лабораторной работе №1.

### **1.3.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Расчетную схему и схему замещения с указанием контрольных точек расчета токов КЗ
3. Результаты расчетов сопротивлений схемы замещения
4. Результаты расчетов токов КЗ
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ
6. Выводы

### **1.3.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие математические модели нужно использовать для анализа установившихся и переходных процессов в системах электроснабжения
2. Назовите основные этапы математического моделирования системы электроснабжения для расчета токов КЗ
3. Какие математические методы используются в программах схемотехнического моделирования для определения выходных электрических параметров
4. От каких факторов зависит величина апериодической составляющей тока КЗ и длительность переходного процесса
5. От каких факторов зависит точность результатов моделирования
6. Какое действие оказывают токи КЗ на электрооборудование
7. Способы ограничения токов КЗ в системах электроснабжения

## Лабораторная работа № 3

### 1.4. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В

**Цель работы:** овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях до 1000 В.

#### 1.4.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

В большинстве практических случаях можно считать, что КЗ в сетях до 1000 В питается от системы с неограниченной мощностью, т.е. периодическая составляющая тока КЗ неизменна в течение всего времени существования режима КЗ:

$$I_{пт}^{(3)} = I_{кз}^{(3)}$$

При расчетах токов КЗ в установках напряжением до 1000 В необходимо учитывать активные и индуктивные сопротивления до точки КЗ всех элементов короткозамкнутой сети: силового трансформатора, проводов, кабелей и шин, токовых катушек расцепителей автоматических выключателей, первичных обмоток трансформаторов тока, переходных контактов аппаратов (определяются по справочным материалам, приведенным в п.1.1 настоящего практикума).

Сопротивление электрической дуги, возникающей в месте КЗ, рассчитывается (обычно при определении чувствительности релейных защит) по соотношению:

$$r_{д} = \frac{1000 l_{д}}{I_{д}},$$

где  $I_{д}$  – ток, проходящий через дугу (принимается ток, определенный без учета сопротивления дуги при КЗ в том же месте);  $l_{д}$  – длина дуги (м), равна расстоянию между токоведущими частями.

При расчете однофазных токов КЗ значения удельных индуктивных сопротивлений петли «фаза-нуль» принимается равным:

$x_0 = 0,15$  мОм/м – для КЛ до 1 кВ и проводов в трубах;

$x_0 = 0,6$  мОм/м – для ВЛ до 1 кВ;

$x_0 = 0,4$  мОм/м – для изолированных открыто проложенных проводов;

$x_0 = 0,2$  мОм/м – для шинопроводов.

Расчет параметров цепи и токов КЗ выполняется в именованных единицах, напряжение принимается на 5% выше номинального напряжения сети (т.е.  $U_{ср. ном}$ )



$R_{КЛ2} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм}$   $X_{КЛ2} = x_0 \cdot l = 0,085 \cdot 20 = 1,7 \text{ мОм}$   
 8. Переходные сопротивления ступеней распределения (табл. 1.4):

$$R_{РУНН} = 15 \text{ мОм} \quad R_{ШП} = 25 \text{ мОм}$$

9. Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений (табл.1.8):

$$R_{кКЛ1} = 0.024 \text{ мОм} \quad R_{кКЛ2} = 0.043 \text{ мОм}$$

Схема замещения цеховой сети для расчета токов трехфазного и двухфазного КЗ представлена на рис.1.12.

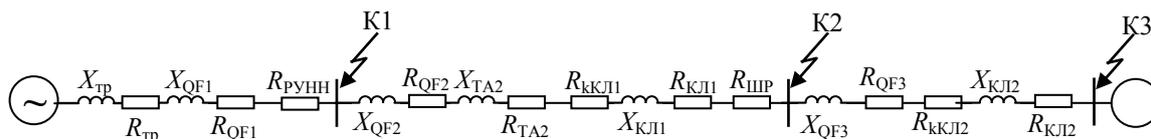


Рис.1.12. Схема замещения цеховой сети

Упростим схему замещения, определив эквивалентные сопротивления на участках схемы между точками КЗ

$$R_1 = R_{тр} + R_{QF1} + R_{РУНН} = 2 + 0,08 + 15 = 17,08 \text{ мОм}$$

$$X_1 = X_{тр} + X_{QF1} = 8,5 + 0,08 = 8,08 \text{ мОм}$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{ТА2} + R_{кКЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШП} = 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 = 25,87 \text{ мОм}$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{ТА2} + X_{КЛ1} = 0,13 + 0,05 + 0,8 = 8,18 \text{ мОм}$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{кКЛ2} + R_{КЛ2} = 2,4 + 0,043 + 12,5 = 14,943 \text{ мОм}$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ мОм}$$

Упрощенная схема замещения представлена на рис. 1.13.

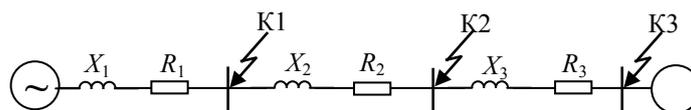


Рис.1.13. Упрощенная схема замещения цеховой сети

### **Расчет трехфазных и двухфазных токов КЗ**

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} Z_{рез}}, \text{ кА}$$

где  $Z_{рез}$  – полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

Точка К1:

$$Z_{рез} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{17,08^2 + 8,08^2} = 18,88 \text{ мОм}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18,08} = 12,77 \text{ кА}$$

По рис.1.1 определим  $k_{\text{уд}}$ . Для этого требуется определить  $X_1/R_1=0,47$ , откуда  $k_{\text{уд}} = 1,0$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 12,77 = 18,1 \text{ кА}$$

Ток двухфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 \cdot 12,77 = 11,1 \text{ кА}$$

Точка К2:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2} = \sqrt{(17,08+25,87)^2 + (8,08+8,18)^2} = 45,9 \text{ мОм}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 45,9} = 5,0 \text{ кА}$$

По рис.1.1 определим  $k_{\text{уд}}$ . Для этого требуется определить  $X/R \leq 0,5$ , откуда  $k_{\text{уд}} = 1,0$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 5,0 = 7,1 \text{ кА}$$

Ток двухфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 \cdot 5,0 = 4,35 \text{ кА}$$

Точка К3:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1+R_2+R_3)^2 + (X_1+X_2+X_3)^2} = \sqrt{(17,08+25,87+14,94)^2 + (8,08+8,18+3,7)^2} = 61,2 \text{ мОм}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 61,2} = 3,77 \text{ кА}$$

По рис.1.1 определим  $k_{\text{уд}}$ . Для этого требуется определить  $X/R \leq 0,5$ , откуда  $k_{\text{уд}} = 1,0$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 3,77 = 5,33 \text{ кА}$$

Ток двухфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 \cdot 3,77 = 3,28 \text{ кА}$$

### Расчет однофазных КЗ

Определим сопротивления и составим схему замещения для расчета токов однофазного КЗ

Сопротивления трансформатора по табл. 1.2  $Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм}$

К схеме замещения, изображенной на рис.1.12 нужно добавить сопротивления нулевых проводников.

Сопротивления нулевой жилы кабельных линий КЛ1 и КЛ2 (удельные сопротивления из табл.1.5):

$R_{0\text{-КЛ1}} = r_0 \cdot l / n = 0,261 \cdot 10 / 4 = 0,653 \text{ мОм}$  (с учетом 4 параллельно проложенных кабелей)

$$R_{0\text{-КЛ2}} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм}$$

Кроме этого изменятся индуктивные сопротивления кабельных линий

$$X_{\text{КЛ1}} = x_0 \cdot l = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ мОм}$$

$$X_{\text{КЛ2}} = x_0 \cdot l = 0,15 \cdot 20 = 3 \text{ мОм}$$

Значения удельных индуктивных сопротивлений определены по рекомендациям, приведенным в п.1.4.1.

Схема замещения цеховой сети для расчета токов однофазного КЗ представлена на рис.1.14.

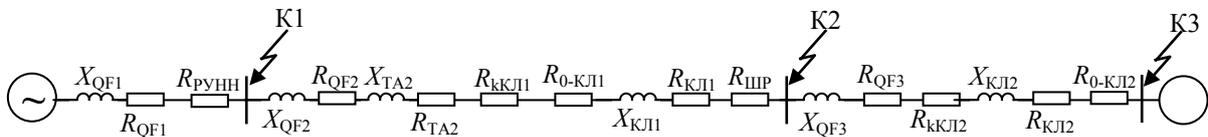


Рис.1.14. Схема замещения цеховой сети для расчета однофазных КЗ

Упростим схему замещения, определив эквивалентные сопротивления на участках схемы между точками КЗ

$$R_1 = R_{\text{QF1}} + R_{\text{PУНН}} = 0,08 + 15 = 15,08 \text{ мОм}$$

$$X_1 = X_{\text{QF1}} = 0,08 = 8,08 \text{ мОм}$$

$$R_2 = R_{\text{QF2}} + R_{\text{ТА2}} + R_{\text{kКЛ1}} + R_{\text{КЛ1}} + R_{\text{ШП}} + R_{0\text{-КЛ1}} = \\ = 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 + 0,653 = 26,52 \text{ мОм}$$

$$X_2 = X_{\text{QF2}} + X_{\text{ТА2}} + X_{\text{КЛ1}} = 0,13 + 0,05 + 0,8 = 8,18 \text{ мОм}$$

$$R_3 = R_{\text{QF3}} + R_{\text{kКЛ2}} + R_{\text{КЛ2}} + R_{0\text{-КЛ2}} = 2,4 + 0,043 + 12,5 + 12,5 = 27,44 \text{ мОм}$$

$$X_3 = X_{\text{QF3}} + X_{\text{КЛ2}} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ мОм}$$

Упрощенная схема замещения цеховой сети для расчета токов однофазных КЗ не изменится (рис. 1.13), однако значения сопротивлений будут другими.

Ток однофазного КЗ определяется по формуле

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\phi-0}}$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{\phi-0}$  – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{\text{тр}}^{(1)}$  – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, Ом.

Точка К1:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{15,08^2 + 8,08^2} = 17,1 \text{ мОм}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{\frac{81}{3} + 17,1} = 5,2 \text{ кА}$$

Точка К2:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2} = \sqrt{(15,08 + 26,52)^2 + (8,08 + 8,18)^2} = 44,67 \text{ мОм}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{27 + 44,67} = 3,2 \text{ кА}$$

Точка К3:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_1+R_2+R_3)^2 + (X_1+X_2+X_3)^2} =$$

$$\sqrt{(15,08 + 26,52 + 27,44)^2 + (8,08 + 8,18 + 3,7)^2} = 71,9 \text{ мОм}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{27 + 71,9} = 2,3 \text{ кА}$$

Сводная ведомость токов КЗ

Расчетные точки		К1	К2	К3
Токи КЗ, кА	$I_{\text{КЗ}}^{(1)}$	5,2	3,2	2,3
	$I_{\text{КЗ}}^{(2)}$	11,1	4,35	3,28
	$I_{\text{КЗ}}^{(3)}$	12,8	5,0	3,8
	$i_{\text{уд}}$	18,1	7,1	5,3

### 1.4.3. ЗАДАНИЕ

Для схемы цеховой сети до 1000 В (рис. 1.15) определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ». Питание распределительного шкафа ШР от распределительного устройства РУ цеховой подстанции выполнено шинопроводом ШНП. Для питания отдельных электроприемников используются четыре одножильных провода марки АПРТО одинакового сечения с прокладкой в трубах.

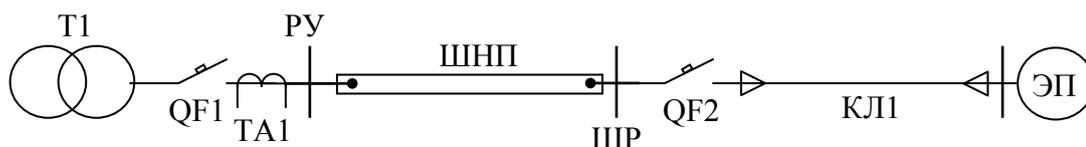


Рис.1.15. Схема электроснабжения цеховой сети

Варианты заданий приведены в таблице 1.14. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 1.14

Варианты заданий

№ вар	T1	QF1			ШНП			QF2			КЛ1				
	$S_{\text{ном}}$ , кВА	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{ном}}$ , А	$l$ , м	$I_{\text{ном}}$ , А	$S_2$ , мм <sup>2</sup>	$l$ , м	$I_{\text{ном}}$ , А	$S_2$ , мм <sup>2</sup>	$l$ , м	$I_{\text{ном}}$ , А	$S_2$ , мм <sup>2</sup>	$l$ , м		
1	1600	2500	2500	30	250	120	10	11	1600	2500	2500	10	80	25	20
2	1000	1600	1600	25	200	95	15	12	1000	1600	1600	20	100	35	10
3	630	1000	1250	20	160	70	5	13	630	1000	1250	30	125	50	20
4	400	630	630	15	125	50	10	14	400	630	630	20	160	70	25
5	250	400	400	10	100	35	15	15	250	400	400	10	200	95	25
6	1600	2500	3200	10	80	25	20	16	1600	2500	3200	20	250	120	10
7	1000	1600	2500	15	250	120	10	17	1000	1600	2500	30	250	120	5
8	630	1000	1600	20	200	95	5	18	630	1000	1600	15	160	95	15
9	400	630	1000	25	160	95	20	19	400	630	1000	20	125	70	10
10	250	400	630	30	125	70	10	20	250	400	630	25	100	50	20

#### 1.4.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Расчетную схему и схему замещения с указанием контрольных точек расчета токов КЗ
3. Результаты расчетов сопротивлений схем замещения
4. Результаты расчетов токов КЗ
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ
6. Выводы

#### 1.4.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие особенности моделирования схемы электроснабжения для расчета токов однофазного КЗ
2. Какое влияние оказывает схема соединения обмоток цехового трансформатора на токи однофазного КЗ
3. Какие различия в моделировании схем электроснабжения для расчета токов КЗ в сетях до и выше 1000 В
4. Какие меры можно принять для ограничения токов КЗ в цеховых сетях

## Лабораторная работа № 4

### 1.5. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В в среде Electronics Workbench

**Цель работы:** овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях до 1000 В в среде схемотехнического моделирования Electronics Workbench

#### 1.5.1. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для схемы электроснабжения (лаб. работа №3, рис. 1.11) требуется составить схемы замещения в редакторе Electronics Workbench; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

#### *Моделирование схемы цеховой сети для расчета токов трехфазного и двухфазного КЗ*

Схема замещения одной фазы сети для расчета токов КЗ определена в предыдущей лабораторной работе (рис. 1.13). Соберем данную схему в схемотехническом редакторе, дополнив ее амперметром на выводе источника питания и активным сопротивлением нагрузки.

Определим сопротивление нагрузки для одной фазы цехового трансформатора, приняв за коэффициент загрузки силового трансформатора по активной мощности наиболее типичный случай –  $K_3 = 0,7$ .

$$P_{\text{ф.тр}} = K_3 \cdot S_{\text{тр.ф.ном}} = \frac{U_{\text{ф.ном}}^2}{R_{\text{н}}} = 233 \text{ кВт}, \text{ откуда } R_{\text{н}} = 0,21 \text{ Ом}$$

В окне редактора выделим все элементы схемы замещения для одной фазы сети, скопируем их в буфер обмена и сделаем две вставки. Соберем схему моделируемой системы электроснабжения в трехфазном исполнении, для чего выполним необходимые соединения. Сделаем систему питающих ЭДС симметричной, установив угол сдвига фаз В и С 120 и 240 градусов соответственно. Для этого нужно открыть окно редактора свойств источника переменного напряжения (AC Voltage Source) и внести соответствующие изменения (рис. 1.16).

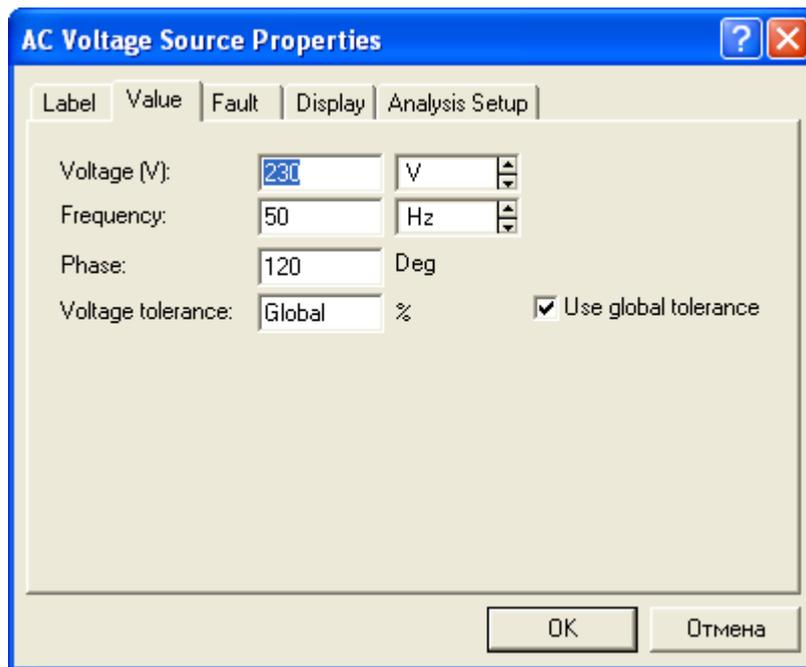


Рис.1.16. Окно свойств источника переменного напряжения

Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов трехфазных и двухфазных КЗ в среде Electronics Workbench представлена на рис.1.17.

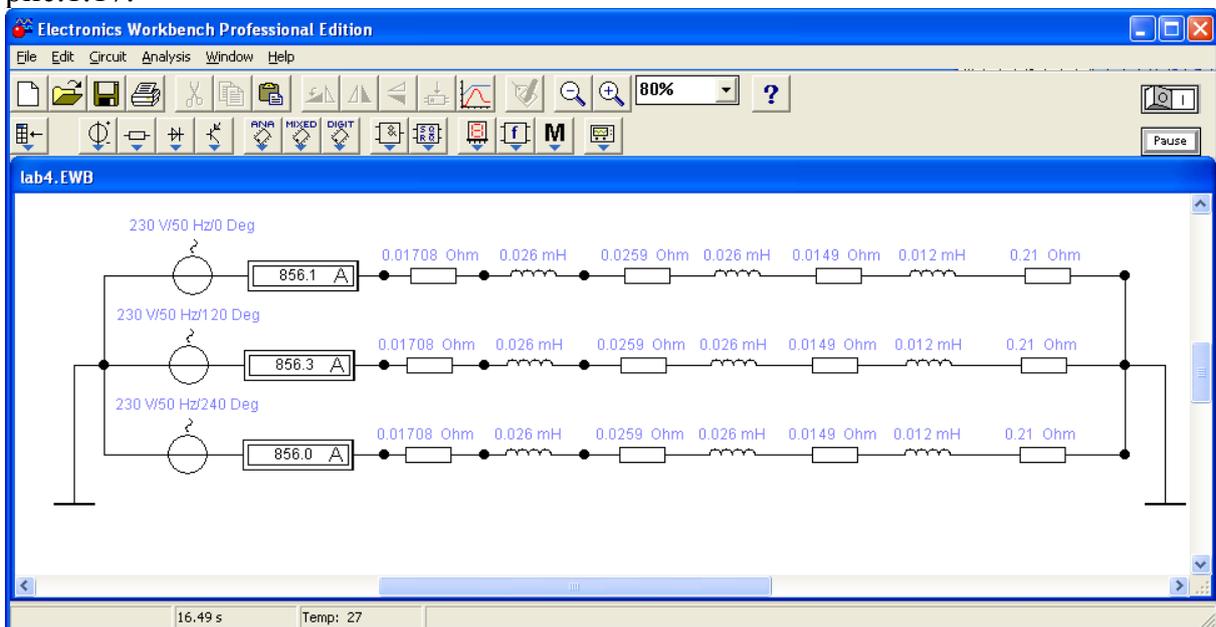


Рис.1.17. Схема цеховой сети в режиме номинальной нагрузки

Для удобства исследования дополним математическую модель коммутационными ключами (Switch), управляемыми клавишами с клавиатуры и для каждого ключа назначим свою клавишу. Для этого нужно

открыть окно свойств каждого ключа и внести необходимые изменения (рис. 1.18).

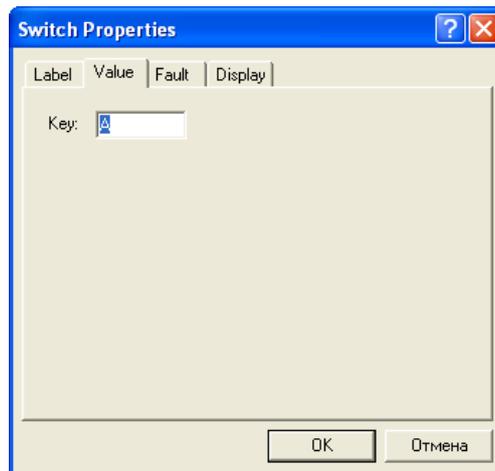


Рис.1.18. Окно свойств ключа

На рис. 1.19 представлена математическая модель системы электроснабжения для исследования режимов трех-, двухфазных КЗ. На рисунке показана схема в режиме трехфазного КЗ в точке K1.

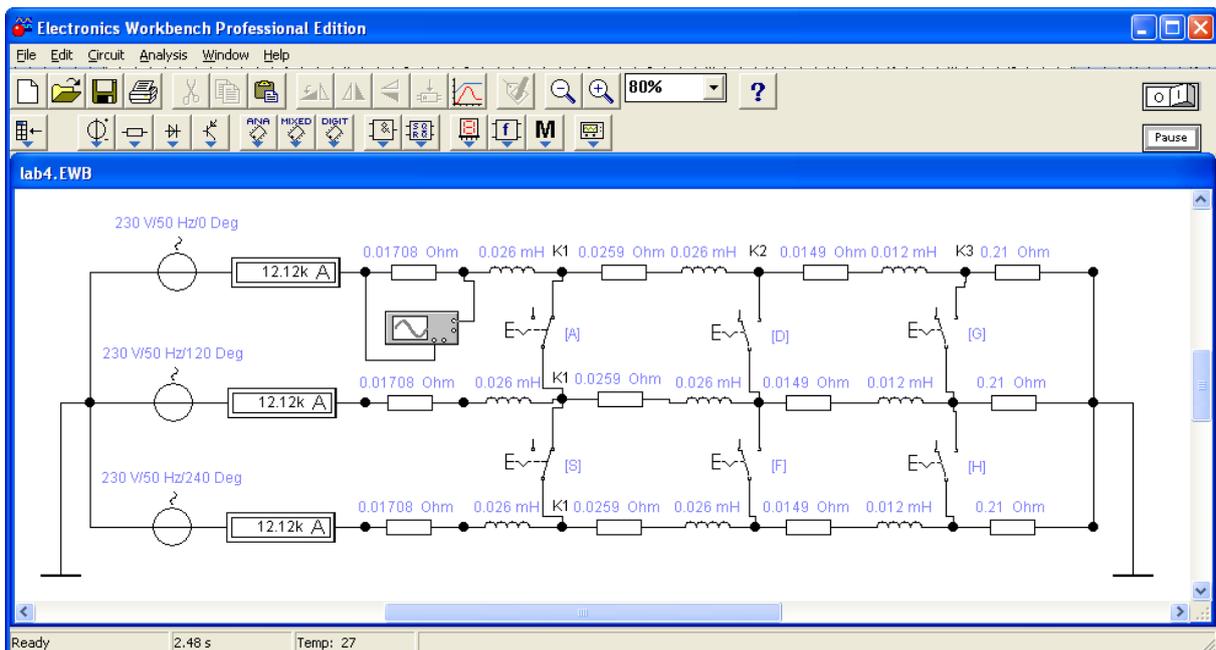


Рис.1.19. Схема цеховой сети в режиме трехфазного КЗ в точке K1

Замыкая соответствующие ключи можно провести исследования цеховой системы электроснабжения в режимах трехфазных и двухфазных КЗ.

### **Моделирование схемы цеховой сети для анализа режима однофазного КЗ**

Принципиальное отличие режима однофазного КЗ от двух-, трехфазных заключается в том, что режим работы сети в этом случае является несимметричным. И если в режимах трех-, двухфазных КЗ нулевой провод остается ненагруженным, то в режиме однофазного КЗ по нулевому проводу протекает ток короткого замыкания. Это легко увидеть на математической модели, подключив между общей точкой фазных ЭДС и землей амперметр.

Для исследования схемы электроснабжения в режимах однофазного КЗ нужно добавить в математическую модель сопротивления нулевых проводников и учесть изменение сопротивления трансформатора.

Сопротивление силового трансформатора при загрузке одной фазы (однофазное КЗ) по табл. 1.2  $Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм}$

Приведем к одной фазе  $Z_{\text{тр.ф}}^{(1)} = Z_{\text{тр}}^{(1)} / 3 = 27 \text{ мОм}$

Будем считать сопротивление силового трансформатора чисто индуктивным.

Сопротивления нулевых жил кабельных линий КЛ1 и КЛ2 определены в лабораторной работе № 3:

$$R_{0\text{-КЛ1}} = 0,653 \text{ мОм}$$

$$R_{0\text{-КЛ2}} = 12,5 \text{ мОм}$$

Дополним математическую модель двумя сопротивлениями: активным  $R_0 = R_{0\text{-КЛ1}} + R_{0\text{-КЛ2}} = 13,15 \text{ мОм}$  и реактивным  $X_0 = 27 \text{ мОм}$ .

Подключим эти сопротивления между общей точкой ЭДС и землей и добавим еще три ключа. Математическая модель готова к исследованию режимов однофазных КЗ.

На рис. 1.20 представлена математическая модель системы электроснабжения для исследования всех возможных режимов КЗ. На рисунке представлена модель схемы цеховой сети в режиме однофазного КЗ на землю фазы С в точке К1.

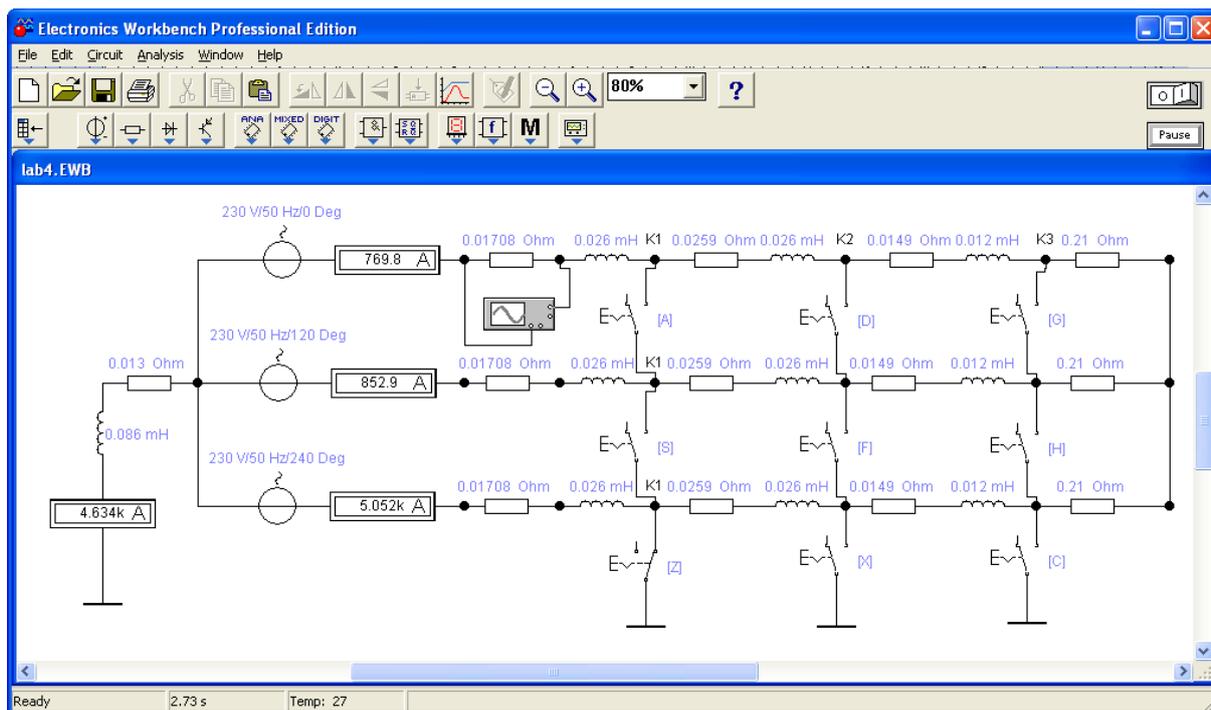


Рис.1.20. Схема цеховой сети в режиме однофазного КЗ фазы С в точке К1

### 1.5.2. ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети до 1000 В (рис. 1.15) требуется составить математическую модель цеховой системы электроснабжения для исследования режимов КЗ в программе схемотехнического моделирования Electronics Workbench; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Провести исследования переходных процессов изменения токов во время КЗ, определить по осциллографу значения ударного тока КЗ в каждой точке и длительность переходного процесса КЗ. Сравнить и проанализировать результаты моделирования схемы электроснабжения с результатами, полученными в лабораторной работе №3.

### 1.5.3. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Значения токов КЗ, определенные методом математического моделирования
3. Сводную ведомость токов КЗ
4. Выводы

### 1.5.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие математические модели нужно использовать для анализа установившихся и переходных процессов в системах электроснабжения

2. Какие математические методы используются в программах схемотехнического моделирования для определения выходных электрических параметров
3. От каких факторов зависит величина апериодической составляющей тока КЗ и длительность переходного процесса
4. От каких факторов зависит точность результатов моделирования
5. Какое действие оказывают токи КЗ на электрооборудование
6. Способы ограничения токов КЗ в системах электроснабжения