

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:

$$I_{nt}^{(3)} = I_{кз}^{(3)}$$

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:

$$r_d = \frac{1000 l_d}{I_d},$$

где I_d – ток, проходящий через дугу (принимается ток, определенный без учета сопротивления дуги при КЗ в том же месте); l_d – 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. $U_{ср. ном}$)

1.4.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для схемы электроснабжения цеховой сети (рис. 1.11) определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ». Питание распределительного шкафа ШР выполнено кабелем АНРГ с открытой прокладкой по стене; для питания отдельных электроприемников цеха используются провода АБВГ с прокладкой в трубах. Для подключения измерительных приборов в схеме электроснабжения установлены трансформаторы тока ТА1 и ТА2 с классом точности 1,0.

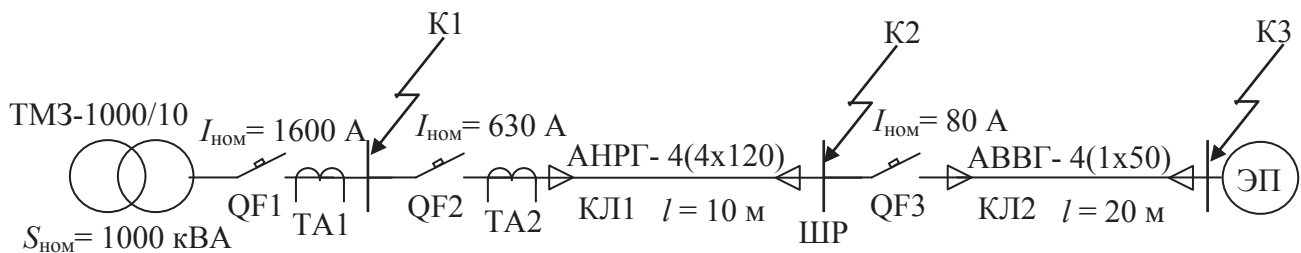


Рис.1.11. Расчетная схема распределительной сети

Расчет ведем в абсолютных единицах. Сопротивления элементов схемы электроснабжения приводим к номинальному напряжению вторичной обмотки 0,4 кВ.

Определяем сопротивления для расчета трехфазного КЗ

1. Сопротивления трансформатора (табл. 1.2):

$$R_{тр} = 2,0 \text{ мОм} \quad X_{тр} = 8,5 \text{ мОм}$$

2. Сопротивления автоматического выключателя QF1 (табл.1.10):

$$R_{QF1} = 0,08 \text{ мОм} \quad X_{QF1} = 0,08 \text{ мОм} \quad R_{kQF1} = 0,1 \text{ мОм}$$

3. Сопротивления автоматического выключателя QF2 (табл.1.10):

$$R_{QF2} = 0,12 \text{ мОм} \quad X_{QF2} = 0,13 \text{ мОм} \quad R_{kQF2} = 0,25 \text{ мОм}$$

4. Сопротивления первичной обмотки трансформатора тока ТА2 (табл.1.9):

$$R_{ТА2} = 0,07 \text{ мОм} \quad X_{ТА2} = 0,05 \text{ мОм}$$

Примечание: сопротивления трансформатора тока ТА1 можно не учитывать ввиду их малости.

5. Сопротивления кабельной линии КЛ1 (удельные сопротивления из табл.1.5):

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

$$X_{КЛ1} = x_0 \cdot l = 0,08 \cdot 10 = 0,8 \text{ мОм}$$

6. Сопротивления автоматического выключателя QF3 (табл.1.10):

$$R_{QF3} = 2,4 \text{ мОм} \quad X_{QF3} = 2,0 \text{ мОм} \quad R_{kQF3} = 1,0 \text{ мОм}$$

7. Сопротивления кабельной линии КЛ2 (удельные сопротивления из табл.1.5):

$R_{KJ2} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм}$ $X_{KJ2} = x_0 \cdot l = 0,085 \cdot 20 = 1,7 \text{ мОм}$
 8. Переходные сопротивления ступеней распределения (табл. 1.4):

$$R_{ру\text{ нн}} = 15 \text{ мОм} \quad R_{шп} = 25 \text{ мОм}$$

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.

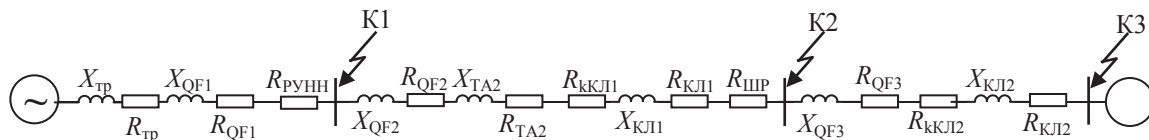


Рис.1.12. Схема замещения цеховой сети

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.

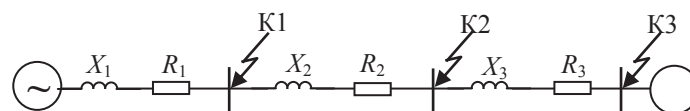


Рис.1.13. Упрощенная схема замещения цеховой сети

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

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)} = 0,87 I_{K3}^{(3)} = 0,87 \cdot 3,77 = 3,28 \text{ кА}$$

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.

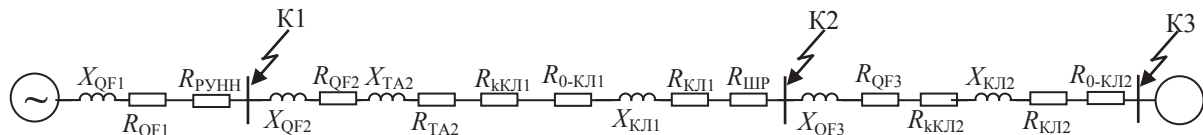


Рис.1.14. Схема замещения цеховой сети для расчета однофазных КЗ

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

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

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

$$R_2 = R_{QF2} + R_{\text{ТА2}} + R_{\text{кКЛ1}} + R_{\text{КЛ1}} + R_{\text{ШП}} + R_{0\text{-КЛ1}} = 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 + 0,653 = 26,52 \text{ мОм}$$

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

$$R_3 = R_{QF3} + R_{\text{кКЛ2}} + R_{\text{КЛ2}} + R_{0\text{-КЛ2}} = 2,4 + 0,043 + 12,5 + 12,5 = 27,44 \text{ мОм}$$

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

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_{ϕ} – 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.

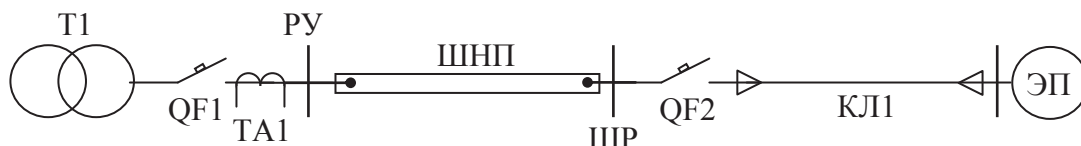


Рис.1.15. Схема электроснабжения цеховой сети

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

Таблица 1.14

Варианты заданий																	
№ вар	T1	QF1	ШНП			QF2	КЛ1		№ вар	T1	QF1	ШНП			QF2	КЛ1	
	$S_{\text{НОМ}},$ кВА	$I_{\text{НОМ}},$ А	$I_{\text{НОМ}},$ А	$l,$ м	$I_{\text{НОМ}},$ А	$S,$ мм ²	$l,$ м	$S_{\text{НОМ}},$ кВА		$I_{\text{НОМ}},$ А	$I_{\text{НОМ}},$ А	$l,$ м	$I_{\text{НОМ}},$ А	$S,$ мм ²	$l,$ 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 – $K_3 = 0,7$.

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

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).

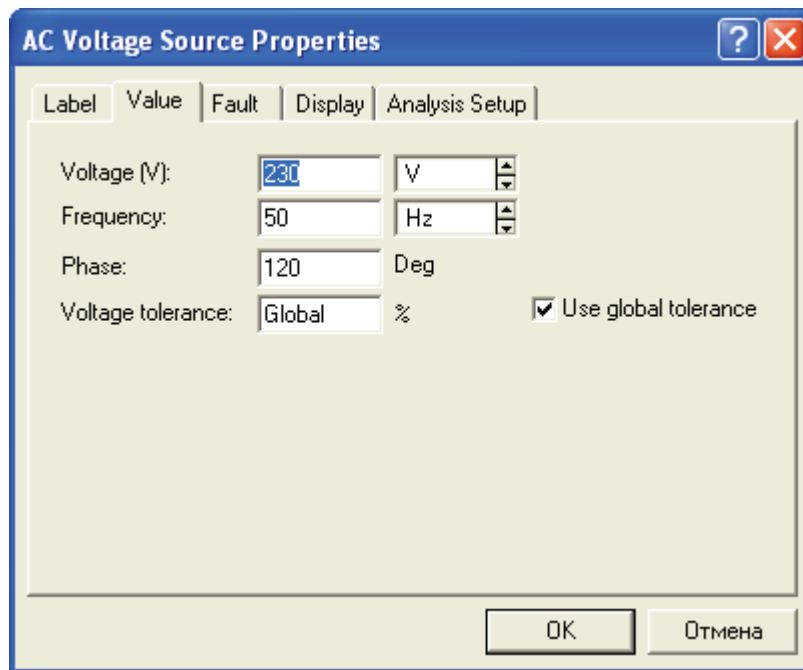


Рис.1.16. Окно свойств источника переменного напряжения

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

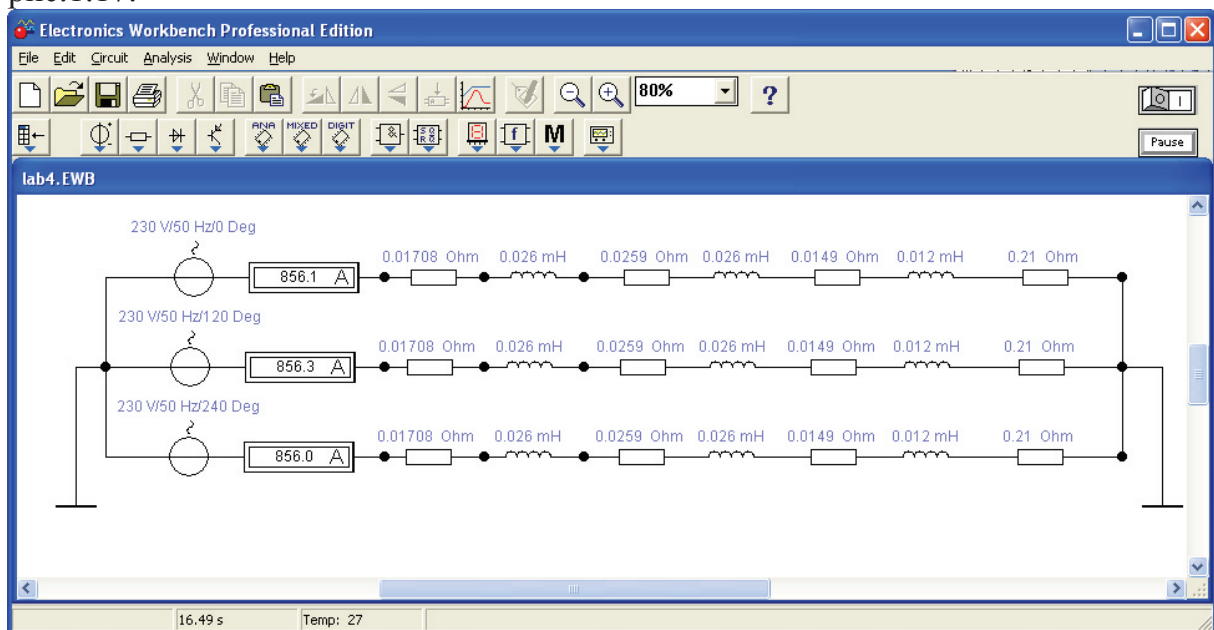


Рис.1.17. Схема цеховой сети в режиме номинальной нагрузки

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).

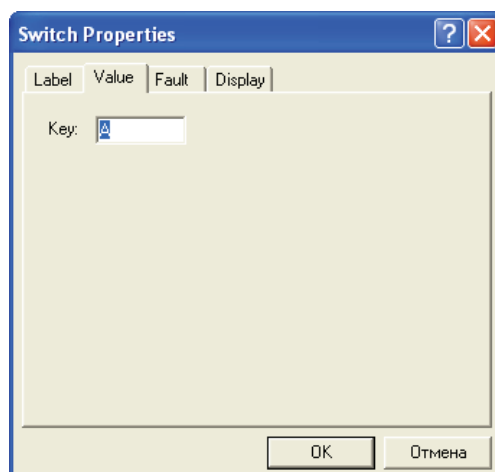


Рис.1.18. Окно свойств ключа

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.

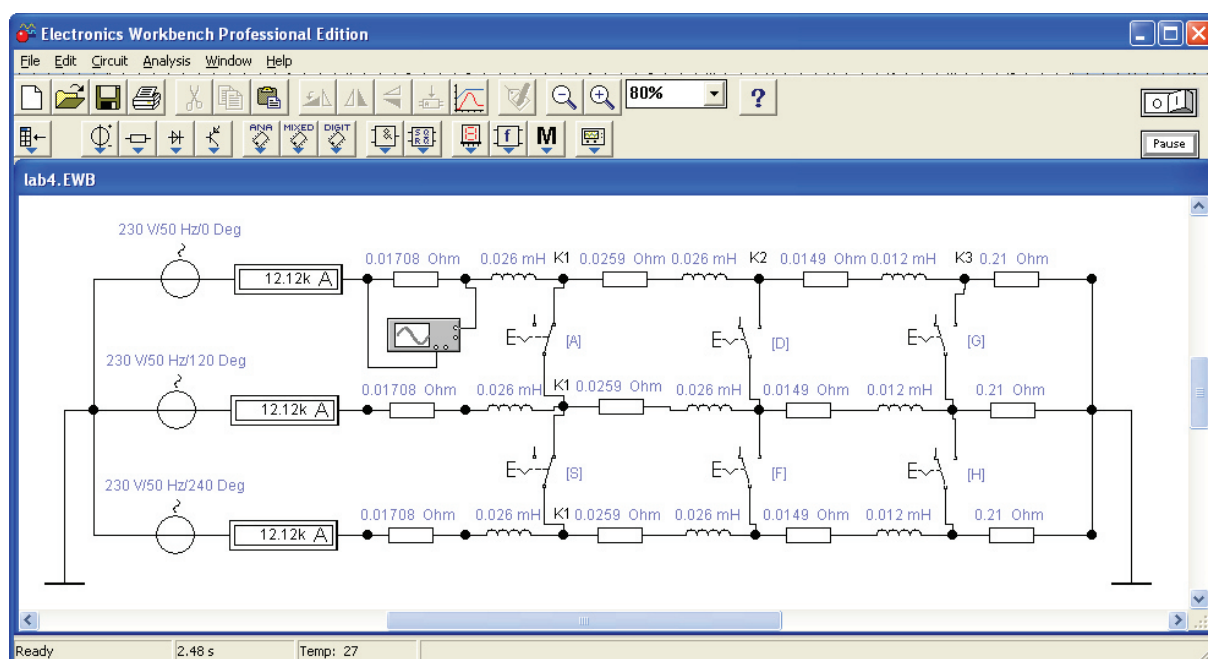


Рис.1.19. Схема цеховой сети в режиме трехфазного КЗ в точке K1

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.

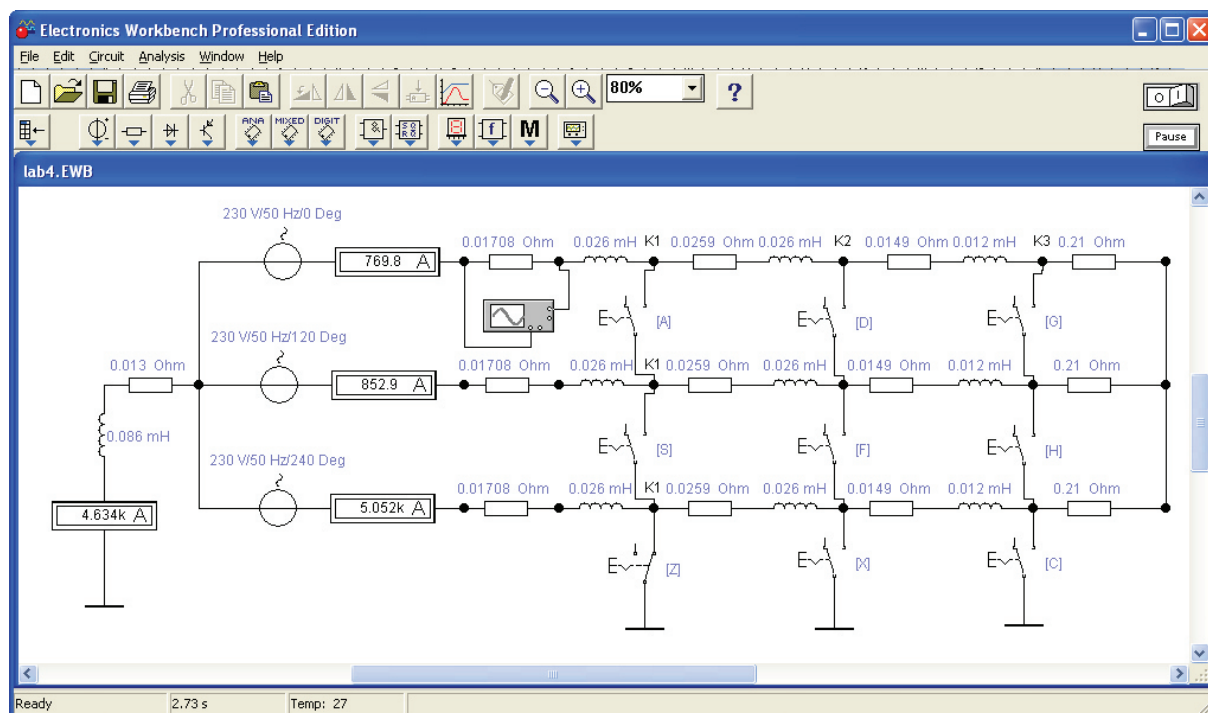


Рис.1.20. Схема цеховой сети в режиме однофазного КЗ фазы С в точке К1

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