

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

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 двух составляющих: вынужденной и свободной. 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 – $i_{ат}$.

$$i = i_{пт} + i_{ат}.$$

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 $t = 0,01$ с.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{п0}.$$

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 и на рисунке 1.

Таблица 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		1,80
На стороне до 1000 В трансформаторов мощностью:	1600, 2500 кВА	1,40
	630, 1000 кВА	1,30
	100, 250, 400 кВА	1,20
Удаленные точки КЗ с учетом активного сопротивления		По рис. 1

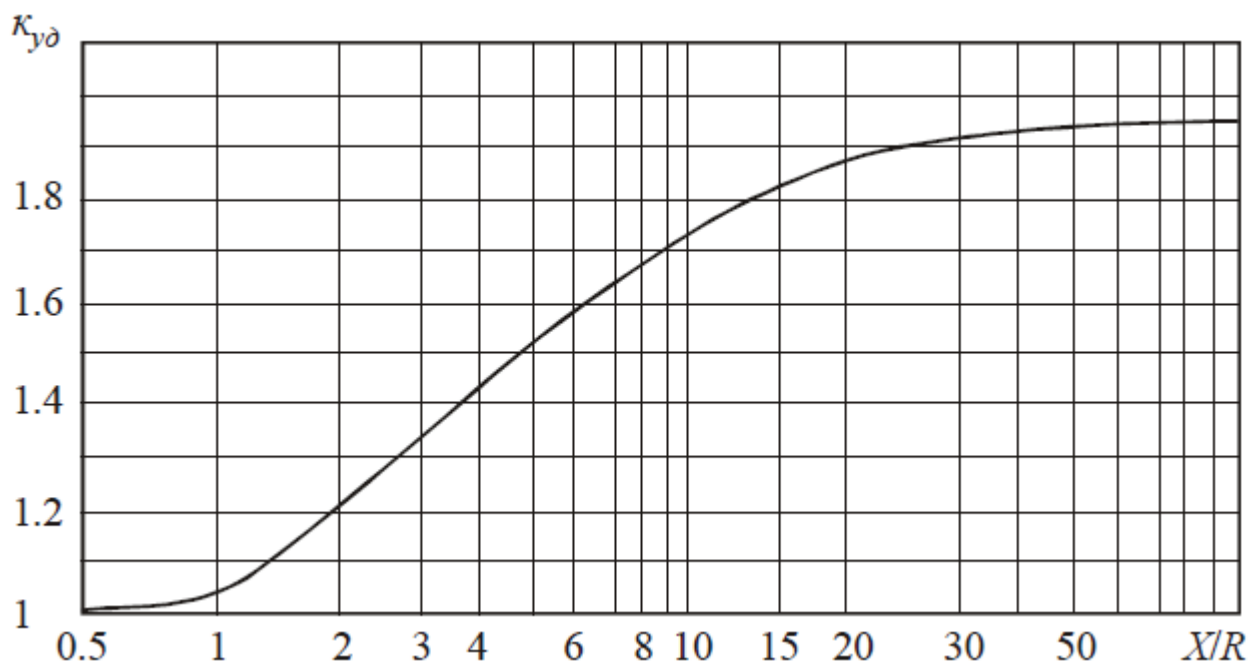


Рисунок 1 – Кривая для определения ударного коэффициента

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.

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

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

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

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

в) однофазное КЗ, кА

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

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.

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:

$$Z_{\text{тр}}^{(1)} = \frac{u_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}.$$

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

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

При соединении $Y / Y_{\text{н}} - Z_{\text{тр}}^{(1)} \neq 3 \cdot Z_{\text{тр}}$. Определенная экспериментальным путем величина $Z_{\text{тр}}^{(1)}$ приведена в таблице 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 $U_{\text{ср.ном}}$, кВ.

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

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

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

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

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

Электроустановки объектов электроснабжения напряжением до 1000 В обычно запитываются от понижающих трансформаторов с номинальной мощностью $S_{\text{ном тр}} = 25 \dots 2500$ кВА. Если мощность КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора $S_{\text{кз сист}} \geq 25 \cdot S_{\text{ном тр}}$, 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. $x_{\text{сист}} = 0$.

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:

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

а активное и индуктивное – по соотношениям:

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

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 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:

$$R = r_0 \cdot L \text{ и } X = x_0 \cdot L,$$

где r_0 x_0 , – удельные активное и индуктивное сопротивления, Ом/м; L – протяженность линии, м.

В таблице 3 приведены сопротивления шинопроводов, в таблице 5 – сопротивления проводов и кабелей. Для неизолированных проводов удельное активное сопротивление дано в таблице 6, реактивное в таблице 11. При отсутствии данных x_0 принимается в соответствии с таблицей 7.

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

Сопротивления токопровода (шин) от трансформатора к автоматическому выключателю ориентировочно принимаются равными:

$$R_{ш} = 0,5 \text{ мОм} \text{ и } X_{ш} = 2,25 \text{ мОм}.$$

Значения переходного сопротивления контактов для различных ступеней электроснабжения даны в таблице 4, а неподвижных контактных соединений – в таблице 8.

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока $R_{т.т}$ и $X_{т.т}$ приведены в таблице 9, а сопротивления токовых катушек расцепителей автоматических выключателей R_a и X_a и переходные сопротивления контактов R_k отключающих аппаратов – в таблице 10.

Таблица 2 – Сопротивления понижающих трансформаторов мощностью до 1600 кВА, 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 _н	1,28	4,5	52,0	102,0	114,0	1237
100	10	Y/Y _н	1,97	4,5	31,5	64,7	72,0	779
160	10	Y/Y _н	2,65	4,5	16,6	41,7	45,0	487
250	10	Y/Y _н	3,70	4,5	9,4	27,2	28,7	312
400	10	Y/Y _н	5,50	4,5	5,5	17,1	18,0	195
630	10	Y/Y _н	7,60	5,5	3,1	13,6	14,0	129
1000	10	Y/Y _н	12,20	5,5	2,0	8,5	8,8	81
1600	10	Y/Y _н	18,00	5,5	1,0	5,4	5,4	54

Таблица 3 – Удельные сопротивления комплектных шинопроводов

Параметры	Тип комплектного шинопровода						
	ШМА				ШРА		
$I_{ном}, \text{ А}$	1250	1600	2500	3200	250	400	630
$r_0, \text{ мОм/м}$	0,034	0,030	0,017	0,015	0,21	0,15	0,10
$x_0, \text{ мОм/м}$	0,016	0,014	0,008	0,007	0,21	0,17	0,13
$r_{0(\phi-0)}, \text{ мОм/м}$	0,068	0,60	0,034	0,030	0,42	0,30	0,20
$x_{0(\phi-0)}, \text{ мОм/м}$	0,053	0,60	0,075	0,044	0,42	0,24	0,26
$z_{0(\phi-0)}, \text{ мОм/м}$	0,086	0,87	0,082	0,053	0,59	0,38	0,33

Таблица 4 – Переходные сопротивления на ступенях распределения

Ступень	Место	$R_{\text{ступ, мОм}}$	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 5 – Активное и индуктивное сопротивления проводов и кабелей с алюминиевыми и медными жилами

Сечение, мм ²	Сопротивление, мОм/м					
	Активное		Индуктивное			
	Алюминий	Медь	Провода открыто проложенные	Кабель с бумажной поясной изоляцией	Провода в трубах, кабель с любой изоляцией (кроме бумажной)	Воздушная линия до 1000 В
2,5	12,500	7,400	0,358	0,1040	0,116	—
4	7,810	4,630	0,343	0,0950	0,107	—
6	5,210	3,090	0,330	0,0900	0,100	—
10	3,12 0	1,840	0,307	0,0730	0,099	—
16	1,95 0	1,160	0,293	0,0675	0,095	0,354
25	1,25 0	0,740	0,278	0,0662	0,091	0,339
35	0,894	0,530	0,268	0,0637	0,088	0,330
50	0,625	0,370	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	0,210	0,0596	0,079	—
185	0,169	0,100	0,210	0,0596	0,078	—
240	0,130	0,077	0,200	0,0587	0,077	—

Таблица 6 – Активное сопротивление 1 км кабельных и воздушных линий, Ом/км

Площадь сечения, мм ²	Жила трехжильного кабеля		Фаза, выполненная проводом марки			
	Алюминиевая	Медная	А	АС и АСО	АСУ	М
1	—	18,500	—	—	—	—
1,5	—	12,500	—	—	—	—
2,5	12,500	7,400	—	—	—	—
4	7,810	4,630	—	—	—	—
6	5,210	3,090	—	—	—	—
10	3,120	1,840	—	—	—	3,060
16	1,950	1,160	1,980	2,060	—	1,840
25	1,250	0,740	1,280	1,310	—	1,200
35	0,894	0,530	0,920	0,850	—	0,740
50	0,625	0,370	0,640	0,650	—	0,540
70	0,447	0,265	0,460	0,460	—	0,390
95	0,329	0,195	0,340	0,370	—	0,280
120	0,261	0,154	0,270	0,270	0,280	0,200
150	0,208	0,124	0,210	0,210	0,210	0,158
185	0,169	0,100	0,185	0,170	0,170	0,103
240	0,130	0,077	—	0,132	0,132	0,078
300	—	—	—	0,107	0,107	—
400	—	—	—	0,080	0,080	—

Таблица 7 – Среднее значения погонных реактивных сопротивлений линий сети

Характеристики линий		x_0 , мОм
Кабельные линии	до 1000 В	0,06
	6-10 кВ	0,08
Изолированные провода внутренней проводки		0,11
Шинопроводы		0,15
Воздушные линии	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 8 – Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений

Кабель		Комплектный привод	
$S, \text{мм}^2$	$R_k, \text{мОм}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$R_k, \text{мОм}$
16	0,085	Распределительный	
25	0,064	250	0,0090
35	0,056	400	0,0060
50	0,043	630	0,0037
70	0,029	Магистральный	
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 9 – Средние значения сопротивлений первичных обмоток трансформаторов тока

Коэффициент трансформации	Сопротивления, мОм, трансформаторов точности			
	1		3	
	$X_{\text{тг}}$	$R_{\text{тг}}$	$X_{\text{тг}}$	$R_{\text{тг}}$
20/5	67,00	42,00	17,00	19,00
30/5	30,00	20,00	8,00	8,20
40/5	17,00	11,00	4,20	4,80
50/5	11,00	7,00	2,80	3,00
75/5	4,80	3,00	1,20	1,30
100/5	1,70	2,70	0,70	0,75
150/5	1,20	0,75	0,30	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,30	0,20	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 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 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

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.

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_{Σ} , x_{Σ} – суммарные активное и реактивное сопротивления сети от источника питания до места КЗ.

Активное сопротивление трансформаторов также необходимо учитывать в расчетах токов КЗ, если $r_{\text{тр}} \geq 0,3 \cdot x_{\text{тр}}$. 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 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетные формулы для определения сопротивлений

Элемент ЭУ, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	Относительные единицы, о.е.
Генератор $X_d, \%$		$x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$	$x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}}$
Энергосистема $I_{\text{откл.ном}}$ $S_{\text{кз сист}}$ $x_{\text{сист}}$		$x = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}}}$ или $x = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{кз сист}}}$	$x = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}} \cdot U_{\text{ср.ном}}}$ или $x = \frac{S_6}{S_{\text{кз сист}}}$
Двухобмоточный трансформатор $u_{\text{кз}}, \%$		$x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном.тр}}}$	$x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном.тр}}}$

Продолжение таблицы 2.1

Реактор x_p , Ом		$x = x_p \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$	$x = x_p \cdot \frac{S_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$
Линия		$x = x_0 \cdot l$ $r = r_0 \cdot l$	$x = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2}$ $r = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2}$

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

S_6 – 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.

2.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для схемы электроснабжения цеховой подстанции (рисунок 2.1) 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».

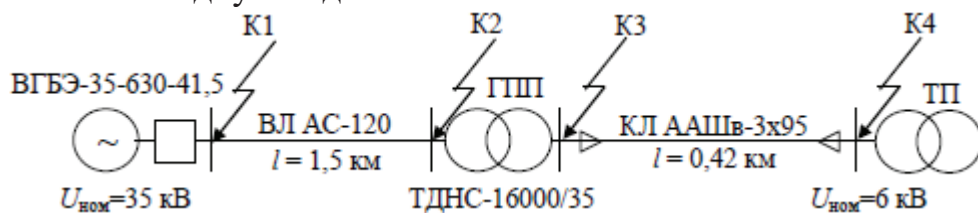


Рисунок 2.1 – Расчетная схема распределительной сети

Определение сопротивлений

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

Принимаем $U_{\text{ср.ном}} = 37$ кВ.

Определяем мощность КЗ системы:

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

Расчет ведем в относительных единицах. Производим расчёт сопротивлений сети, принимая базисную мощность $S_6 = 100$ МВА.

1. Сопротивление энергосистемы:

$$x_{\text{сист}} = \frac{S_6}{S_{\text{КЗ сист}}} = \frac{100}{2660} = 0,038 \text{ о.е.}$$

2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{\text{вл}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,27 \cdot 1,5 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,03 \text{ о.е.}$$

$$x_{\text{вл}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,309 \cdot 1,5 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,034 \text{ о.е.},$$

где $l = 1,5$ км – длина воздушной линии; $U_{\text{ср.ном}}$ – базисное напряжение данной ступени трансформации, кВ; $r_0 = 0,27$ Ом/км – активное сопротивление провода АС-120 (таблица 6); $x_0 = 0,309$ Ом/км – индуктивное сопротивление провода АС-120 (таблица 12).

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656 \text{ о.е.},$$

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

Активным сопротивлением пренебрегаем, так как трансформатор большой мощности.

4. Сопротивление кабельной линии:

$$r_{\text{кл}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,329 \cdot 0,42 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,348 \text{ о.е.}$$

$$x_{\text{кл}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,0602 \cdot 0,42 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,064 \text{ о.е.},$$

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) (таблица 6); $x_0 = 0,0602$ Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв-(3х95) (таблица 5).

Составляем схему замещения – рисунок 2.2.

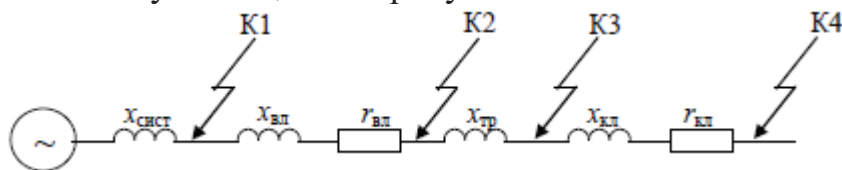


Рисунок 2.2 – Схема замещения участка распределительной сети

В сетях среднего напряжения (6-35 кВ) в России применяют изолированную нейтраль. 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:

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

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

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

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:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}}, \text{ кА},$$

а затем определяют реальное значение периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{I_6}{Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}.$$

Будем определять токи трехфазного КЗ по намеченным точкам.

Точка К1:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА};$$

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

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

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 41,05 = 104,50 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}} = 1,8$ (по таблице 1).

Точка К2:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА};$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,078} = 20,00 \text{ кА}.$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034)^2 + (0,030)^2} = 0,078 \text{ о.е.}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot 20,00 = 35,36 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}} = 1,25$ при $X/R = 2,4$ (см. рисунок 1).

Точка К3:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА};$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,729} = 12,57 \text{ кА}.$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656)^2 + (0,030)^2} = 0,729 \text{ о.е.}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 12,57 = 33,78 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}} = 1,9$ при $X/R = 24,3$ (см. рисунок 1).

Точка К4:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,876} = 10,46 \text{ кА}.$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}} + x_{\text{кл}})^2 + (r_{\text{вл}} + r_{\text{кл}})^2} =$$

$$= \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656 + 0,064)^2 + (0,030 + 0,348)^2} = 0,876 \text{ о.е.}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,22 \cdot 10,46 = 18,05 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}} = 1,22$ при $X/R = 2,1$ (см. рисунок 1).

Таблица 2.2 – Сводная ведомость токов КЗ

Расчетные точки		К1	К2	К3	К4
ТКЗ, кА	$I_{\text{кз}}^{(3)}$	41,05	20,00	12,57	10,46
	$i_{\text{уд}}$	104,50	35,36	33,78	18,05

2.3. ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рисунок 2.3) 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 таблицей 11.

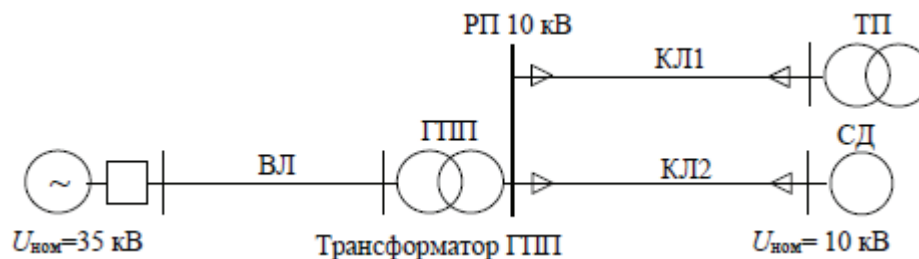


Рисунок 2.3 – Расчетная схема распределительной сети

Варианты заданий приведены в таблице 2.3. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 2.3 – Варианты заданий

№ вар.	Система	ВЛ		Трансформатор		КЛ1		КЛ2	
	$S_{кз}, \text{МВА}$	$S, \text{мм}^2$	$l, \text{км}$	$S, \text{МВА}$	$U_{кз}, \%$	$S, \text{мм}^2$	$l, \text{км}$	$S, \text{мм}^2$	$l, \text{км}$
1	5000	АС-240	5,6	40	11,0	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	11,0	95	1,2	120	0,3
6	3000	АС-120	4,1	32	11,0	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	11,0	120	2,2	95	1,1
10	3000	АС-185	5,0	25	10,5	70	3,5	50	0,4

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.

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?