

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания по выполнению расчетно-графической работы
для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2026

УДК 621.316.925.1

Составители:

А. М. Науменко, А. А. Кузнецов

Одобрено кафедрой «Автоматизация производственных процессов»
УО «ВГТУ», протокол № 8 от 21.02.2025.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 8 от 28.04.2026.

Релейная защита и автоматика систем электроснабжения :
методические указания по выполнению расчетно-графической работы / сост.
А. М. Науменко, А. А. Кузнецов – Витебск : УО «ВГТУ», 2026. – 40 с.

В методических указаниях содержится материал по выполнению расчетно-графической работы по дисциплине «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения» в соответствии с учебной программой. Приведены практические методы расчетов релейной защиты силового электрооборудования.

Методические указания предназначены для студентов, изучающих дисциплину, для использования на практических занятиях, при выполнении лабораторных работ, при выполнении расчетно-графической работы и подготовке к итоговому контролю знаний.

УДК 621.316.925.1

© УО «ВГТУ», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие рекомендации по выполнению упрощенных расчетов токов короткого замыкания	5
2. Составление схемы замещения и вычисление сопротивлений элементов сети	6
3. Вычисление токов короткого замыкания	7
4. Построение кривых спада тока короткого замыкания по линиям	8
5. Исходные данные	13
6 Расчет токов КЗ в точках K_1 , K_2 , K_3	18
6.1 Расчет токов КЗ в точке K_1	18
6.2 Расчет токов КЗ в точке K_2	19
6.2.1 Расчет подпитки со стороны системы	19
6.2.2 Расчет подпитки от АД	20
6.2.3 Расчет подпитки от СД	20
6.2.4 Определение суммарного тока КЗ в точке K_2	21
6.3 Расчет токов КЗ в точке K_3	21
7 Релейная защита асинхронного двигателя	24
7.1 Защита от междофазных КЗ	24
7.2 Релейная защита от замыканий на землю в обмотках статора	25
7.3 Защита от перегрузки	25
7.4 Защита от понижения напряжения	26
8 Релейная защита синхронного двигателя	27
8.1 Защита от коротких замыканий	27
8.2 Защита от замыканий на землю в обмотках статора	27
8.3 Защита от перегрузки	28
8.4 Защита от понижения напряжения	28
9 Релейная защита трансформатора ГПП	28
9.1 Максимальная токовая защита от КЗ	28
9.2 Максимальная токовая защита с пуском по напряжению	29
9.3 Защита от перегрузки	30
9.4 Токовая отсечка	31
9.5 Дифференциальная защита трансформатора ГПП	31
9.5.1 Расчет дифференциальной защиты на реле ДЗТ-11	33
10 Релейная защита трансформатора цеховой трансформаторной подстанции	33
10.1 Защита от КЗ	33
10.2 Защита от перегрузки	35
11 Расчетная проверка трансформатора тока	35
11.1 Проверка на погрешность в 10 %	35
11.2 Проверка точности работы реле при максимальном токе КЗ	36

11.3 Проверка на максимальное значение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора тока	37
11.4 Проверка на максимальное значение тока во вторичной обмотке трансформатора тока	37
12 Построение карты селективности	37
Список используемых источников	39

1. Общие рекомендации по выполнению упрощенных расчетов токов короткого замыкания

При проектировании релейной защиты допускается вычисление приближенных значений токов короткого замыкания (КЗ) [1]. Точность, а, следовательно, и принимаемые допущения зависят от назначения расчетов. Для выбора и проверки параметров срабатывания устройств релейной защиты, как правило, принимаются следующие основные допущения:

а) схемы отдельных последовательностей приводятся к одной ступени напряжения при учете средних коэффициентов трансформации трансформаторов. Точные коэффициенты трансформации подлежат учету при наличии трансформаторов с широким диапазоном встроенного регулирования в проектах защит этих элементов;

б) не учитываются активные сопротивления элементов схем отдельных последовательностей, за исключением линий, для которых отношение $K_L/X_L = 0,3-0,4$;

в) не учитываются поперечные емкости линий протяженностью меньше 200–250 км напряжением 110–220 кВ;

г) принимается, как правило, равенство сопротивлений в схемах прямой и обратной последовательностей;

д) допустимо ограничиваться вычислением только аварийных составляющих токов прямой последовательности.

Для повышения точности расчетов, некоторые допущения иногда исключаются, например, учитывают активные сопротивления элементов, действительные коэффициенты трансформации и т. д. Методика уточненных расчетов токов КЗ рассмотрена в [1].

Для выбора уставок и проверки чувствительности релейной защиты обычно используется начальное (сверхпереходное) значение тока КЗ. При этом следует иметь в виду, что для цепей релейной защиты важно знать не величину тока в месте повреждения, а значения токов, протекающих по отдельным элементам участка сети.

Для определения начального сверхпереходного значения тока КЗ составляются расчетные схемы и схемы замещения. Поскольку для выбора релейной защиты нужно знать максимальные и минимальные токи КЗ, протекающие через защищаемый элемент, то это требует правильного подхода к выбору расчетных схем. Для определения величины тока срабатывания защиты расчетная схема должна быть такова, чтобы ток, проходящий через защищаемый элемент сети, был максимальным. Для определения чувствительности защиты необходимо получить минимальную величину тока, проходящего через тот же элемент сети.

Например, наибольшая величина тока КЗ на одной из параллельных линий будет при условии, когда одна из параллельных линий отключена (для ремонта), а наименьшая величина, когда включены обе линии. В кольцевой

сети минимальная величина тока КЗ в линиях будет при замкнутом кольце, а максимальная величина при разомкнутом кольце (отключена одна из линий кольца).

При выборе режимов допускается возможность одновременного отключения двух или трех элементов энергосистемы.

2. Составление схемы замещения и вычисление сопротивлений элементов сети

На основании выбранных расчетных схем составляются схемы замещения прямой последовательности, в которых отдельные элементы расчетных схем заменяются соответствующими сопротивлениями, а для источников питания указываются их ЭДС или напряжения на зажимах. На схеме замещения указываются наименования подстанций, расчетные точки КЗ и величины сопротивлений элементов сети с обязательной их маркировкой.

При расчетах в именованных единицах сопротивления всех элементов должны быть выражены в омах и приведены к среднему напряжению одной электрической ступени (как правило, к напряжению ступени короткого замыкания). При этом устанавливаются следующие значения средних напряжений: 340, 230; 115; 37, 10,5; 6,3 кВ. Приведение сопротивления, выраженного в омах, к выбранному базовому (расчетному) напряжению, производят по следующей формуле

$$X_{\text{прив}} = X \cdot \frac{U_{\text{с.р.1}}^2}{U_{\text{с.р.2}}^2}, \quad (2.1)$$

где X – сопротивление рассматриваемого элемента в именованных единицах на той ступени напряжения, на которой находится элемент; $U_{\text{с.р.1}}^2$ – среднее напряжение ступени приведения; $U_{\text{с.р.2}}^2$ – среднее напряжение ступени, на которой находится элемент.

При расчете в относительных единицах сопротивления всех элементов приводятся к одним и тем же базисным условиям.

В табл. 2.1 приведены расчетные выражения для определения приведенных значений сопротивлений.

Удельное реактивное сопротивление линии $X_{\text{уд}}$ можно принимать равным 0,4 Ом/км для воздушных линий 6–220 кВ.

Для кабельных линий 6–10 кВ – $X_{\text{уд}} = 0,08$ Ом/км [1,2].

Активное сопротивление линий можно принимать на основании данных [1,3] или подсчитывать по выражению

$$R = L / \gamma S, \quad (2.2)$$

где γ – удельная проводимость равная для меди 57 м/(Ом·мм²) и для алюминия – 34 м/(Ом·мм²).

Для трансформаторов с изменяющимся под нагрузкой коэффициентом трансформации сопротивление трансформатора, а следовательно и ток КЗ, может изменяться в широких пределах в зависимости от положения регулирующего устройства. Для таких трансформаторов нужно рассчитывать сопротивление не только для среднего, но и для крайних положений регулятора [3,11].

Таблица 2.1 – Расчетные выражения для определения приведенных значений сопротивлений

Наименование	Именованные единицы, Ом	Относительные единицы, о.е.
Энергосистема	$X = X_{с.ном.} \cdot \left(\frac{U_{с.р.}^2}{S_{ном}}\right)$	$X = X_{с.ном.} \cdot \left(\frac{S_6}{S_{ном}}\right)$
Трансформатор	$X = \left(\frac{X_{Тс\%}}{100}\right) \cdot \left(\frac{U_{с.р.}^2}{S_{ном}}\right)$	$X = \left(\frac{X_{Тс\%}}{100}\right) \cdot \left(\frac{S_6}{S_{ном}}\right)$
Линия электропередачи	$X = X_{уд} \cdot L \cdot \left(\frac{U_{с.р.1}^2}{U_{с.р.2}^2}\right)$	$X = X_{уд} \cdot L \cdot \left(\frac{S_6}{U_{с.р.}^2}\right)$

3. Вычисление токов короткого замыкания

При упрощенных расчетах токов КЗ определяют действующее значение периодической составляющей для момента времени $t = 0$, полагая, что ЭДС всех генераторов совпадают по величине и фазе.

Для определения токов КЗ пользуются следующими расчетными выражениями:

а) при трехфазном КЗ полный ток фазы равен току прямой последовательности

$$I_K^{(3)} = U_{с.р.}^2 / \sqrt{3} X_{1\Sigma} \quad (3.1)$$

где $X_{1\Sigma}$ – результирующее сопротивление прямой последовательности в Ом, приведенное к точке КЗ; $U_{с.р.}$ – среднее напряжение ступени в точке КЗ.

$$I_K^{(3)} = I_B / X_{\Sigma Б} \quad (3.2)$$

где I_B – базисный ток ступени КЗ. $I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_{с.р.})$; $X_{\Sigma Б}$ – суммарное

сопротивление схемы замещения при принятых базисных условиях в относительных единицах;

б) при двухфазных КЗ полный ток поврежденной фазы равен

$$I_K^{(2)} = \sqrt{3}/2 \cdot I_K^{(3)} \quad (3.3)$$

Результаты расчетов токов КЗ для всех намеченных точек КЗ сводят в табл. 3.1. *Последовательность* расчета необходимо принять такой, чтобы при вычислении токов в каждой следующей точке КЗ использовались результаты преобразования для предыдущей точки.

Таблица 3.1 – Результаты расчетов токов КЗ

Расчетная схема	Точка КЗ	Величины токов в линиях или трансформаторах, кА						Режим (максимальный или минимальный)
		Л1	Л2	Л3	Т1	Т2		
Отключена линия Включены все линии и т. д.	К1 КІ							

4. Построение кривых спада тока короткого замыкания по линиям

Кривые спада тока $I_{КЗ} = f(L)$ строятся по токам, протекающим по первичным обмоткам ТТ защиты данной линии при перемещении точки КЗ вдоль этой линии. Для её построения нужно рассчитывать токи КЗ на расстоянии 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 для каждой линии.

Для линий с односторонним питанием первичный ток защиты равен полному току трехфазного (двухфазного) КЗ на линии. В сетях сложной конфигурации определение первичного тока защиты несколько затруднено при КЗ в начале линии непосредственно у шин подстанции. В этом случае первичный ток защиты равен полному току КЗ на шинах за вычетом тока линии, для которой производится построение кривой. При КЗ в середине и конце линии ток через ТТ защиты равен той части тока повреждения, которая протекает со стороны данной подстанции. Принцип построения кривых спада тока КЗ по линиям показан на рис. 4.1.

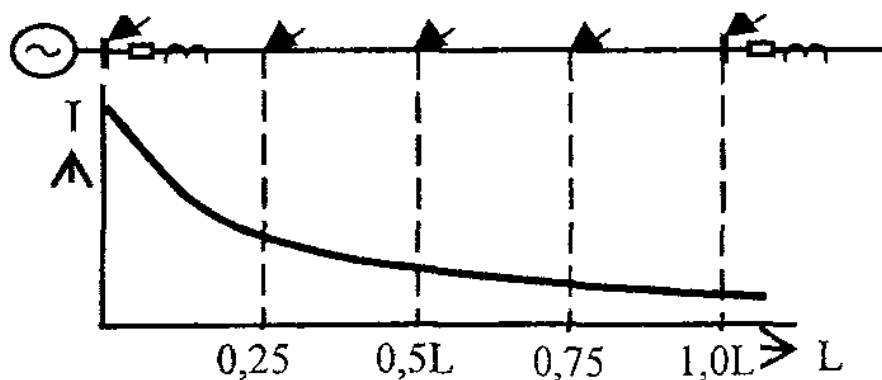


Рисунок 4.1 – Кривые спадаения токов КЗ по линиям

Селективность – одно из четырех основных требований к релейной защите. Это требование состоит в том, что при возникновении короткого замыкания, должен отключаться только поврежденный участок, а остальная часть схемы – продолжала работать.

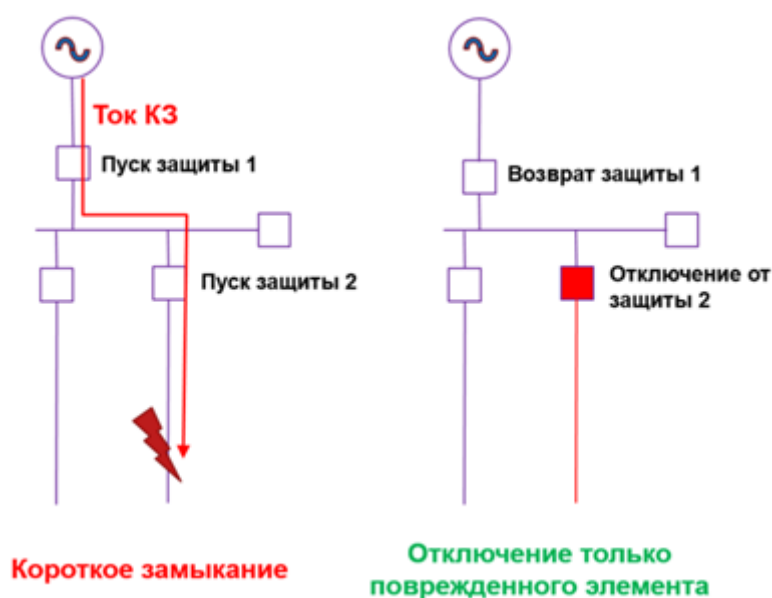


Рисунок 4.2 – Реализация требований селективности

На рисунке видно, что при КЗ ток протекает через две защиты, каждая из которых пускается. Однако, должна сработать только та защита, которая расположена ближе всего к месту короткого замыкания. Если такое условие соблюдается для любых режимов сети, то говорят, что данные защиты

Каждая токовая защита имеет свою характеристику, которая отражает насколько быстро защита срабатывает при определенном токе. Такая характеристика называется времятоковой.

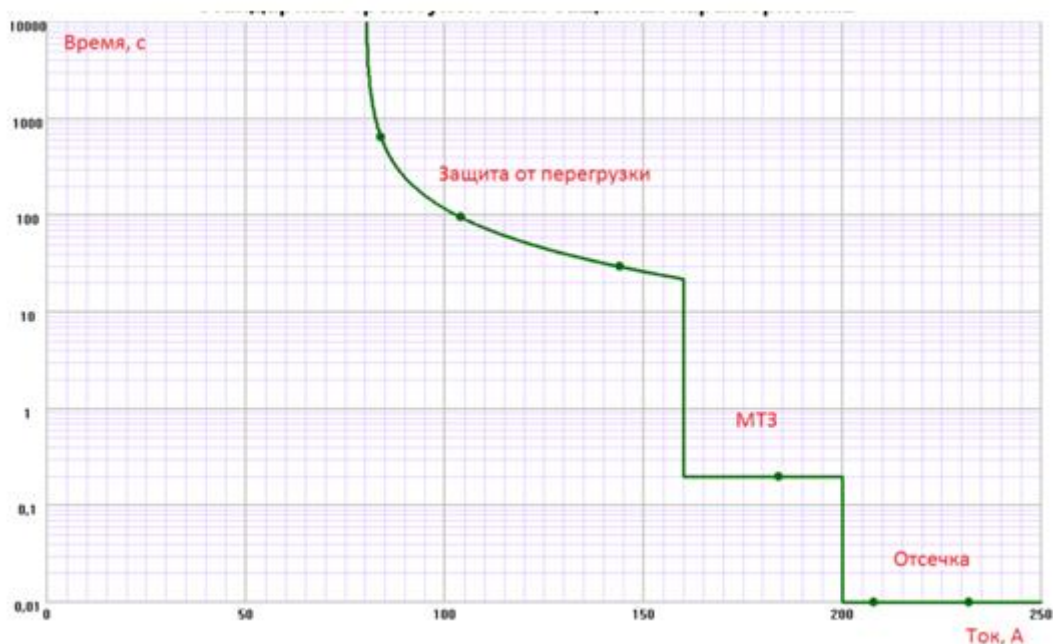


Рисунок 4.3 – Пример времятоковой характеристики

Обычно максимальные токовые защиты содержат несколько ступеней, каждая из которых отвечает за свою задачу.

Защита от перегрузки устраняет токи перегрузки, которые возникают из-за механических неисправностей двигателей, присутствия на их валу нагрузки выше номинальной, а также снижения напряжения в сети. Эта защита чувствует самые малые аварийные токи, но работает с самыми большими выдержками времени.

Максимальная токовая защита (МТЗ) защищает присоединение от всех видов коротких замыканий. Для большинства присоединений 0,4–6(10) кВ МТЗ является основной защитой. Время выдержки МТЗ находится в пределах от 0 до нескольких секунд.

Токовая отсечка (ТО) защищает часть присоединения от больших токов коротких замыканий. Работает обычно без выдержки времени.

Совокупность ступеней формирует **характеристику защиты** присоединения. На рисунке выше защита имеет трехступенчатую характеристику.

Как построить карту селективности?

В сети последовательно установлены защитные аппараты и у каждого есть своя характеристика. Если взять любую защиту и относительно нее рассматривать схему, то защиты, находящиеся рядом с рассматриваемой, будут называться смежными.

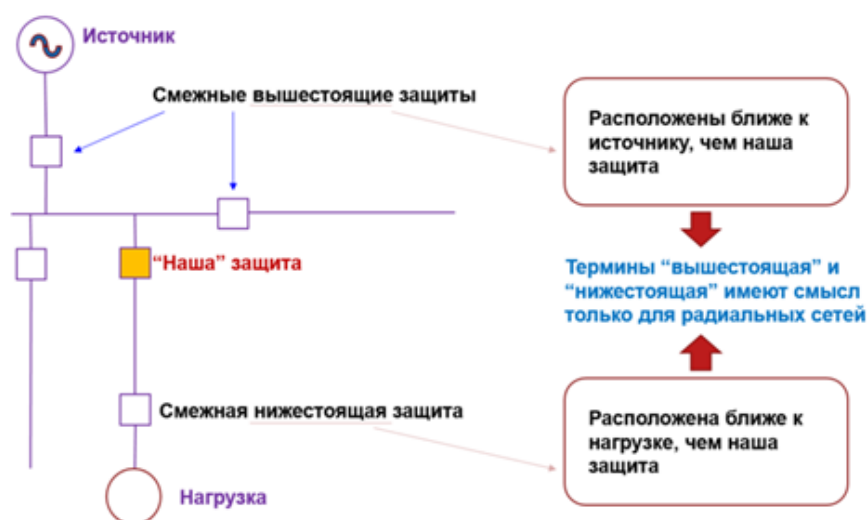


Рисунок 4.4 – Смежные защиты

Переводя требование селективности релейных защит на язык характеристик получаем:

Времятоковые характеристики смежных защит не должны пересекаться и между ними всегда должен быть резерв по оси времени, который называется ступень селективности.

Как убедиться, что защиты селективны между собой?

Нужно, по рассчитанным уставкам, построить на одном графике все характеристики смежных защит и проанализировать график на предмет пересечений защитных характеристик. Если пересечений нет и между кривыми всегда есть промежуток по оси времени равный 0,25–0,3 с (ступень селективности для современных защит), то значит защиты селективны между собой.

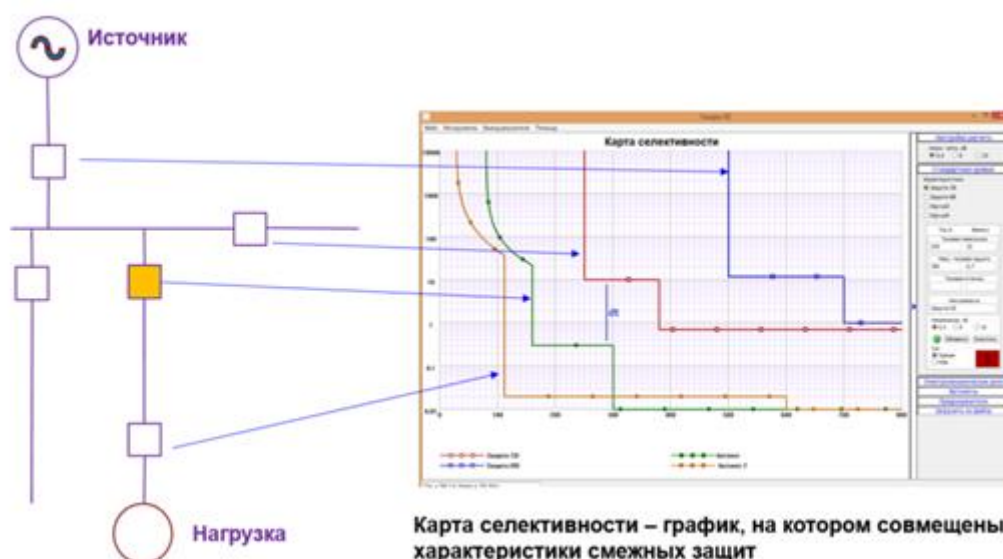


Рисунок 4.5 – Пример карты селективности

Данный график называется **картой селективности**.

Стоит отметить, что токовые отсечки смежных защит на графике могут пересекаться потому, что их селективность обеспечивается особым выбором тока срабатывания (токовая селективность).

Характеристики защит от перегрузки и МТЗ смежных защит не должны пересекаться, так как их селективность обеспечивается различными выдержками времени срабатывания (временная селективность).

Анализ карты селективности проводится визуально, либо, если построение проведено в программе, автоматически.

Когда нужна карта селективности?

Обычно карта селективности строится для **максимальных токовых защит**, а именно для защиты от перегрузки, МТЗ и токовой отсечки (ТО).

Несмотря на то, что дистанционные защиты также являются защитами с относительной селективностью, для них карту селективности обычно не строят. Это связано с тем, что селективность этих защит достаточно просто проанализировать по расчету.

Максимальные токовые защиты используются, в основном, для присоединений классом напряжения до 110 кВ включительно.

Таким образом получаем, что карта селективности должна быть построена для защит сетей 0,4–110 кВ, а именно:

- Все защиты сети 0,4 кВ (селективность автоматических выключателей и плавких вставок);
- Все защиты сетей 6–10 кВ (кроме дифференциальных защит генераторов и двигателей);
- Большая часть сетей 35 кВ (там, где нет дистанционных защит);
- Резервные защиты понижающих трансформаторов с высшим напряжением 110 кВ (последний элемент карты селективности).

Сегодня во многих проектах, особенно на напряжении 0,4 кВ, карта селективности отсутствует. Это нарушение норм проектирования, приводящее к неселективным отключениям потребителей.

Основные правила построения карты селективности:

- все уставки защит должны быть приведены к одному напряжению;
- правильно выбирайте масштаб построения, чтобы были видны все граничные точки. Для выполнения этого условия часто используют логарифмический масштаб.

На карте селективности отображаются не только защитные характеристики, но и граничные (минимальный и максимальный) токи коротких замыканий в расчетных точках схемы.

5. Исходные данные

Рассчитать токов КЗ точках К1, К2, К3. Рассчитать и выбрать релейную защиту асинхронного двигателя АД, синхронного двигателя СД, трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП) Т1, трансформатора цеховой трансформаторной подстанции Т2, провести проверку трансформатора тока, построить карту селективности для линии электропитания, показанной на рисунке 5.1. Данные для расчетов представлены в таблицах 5.2–5.3.

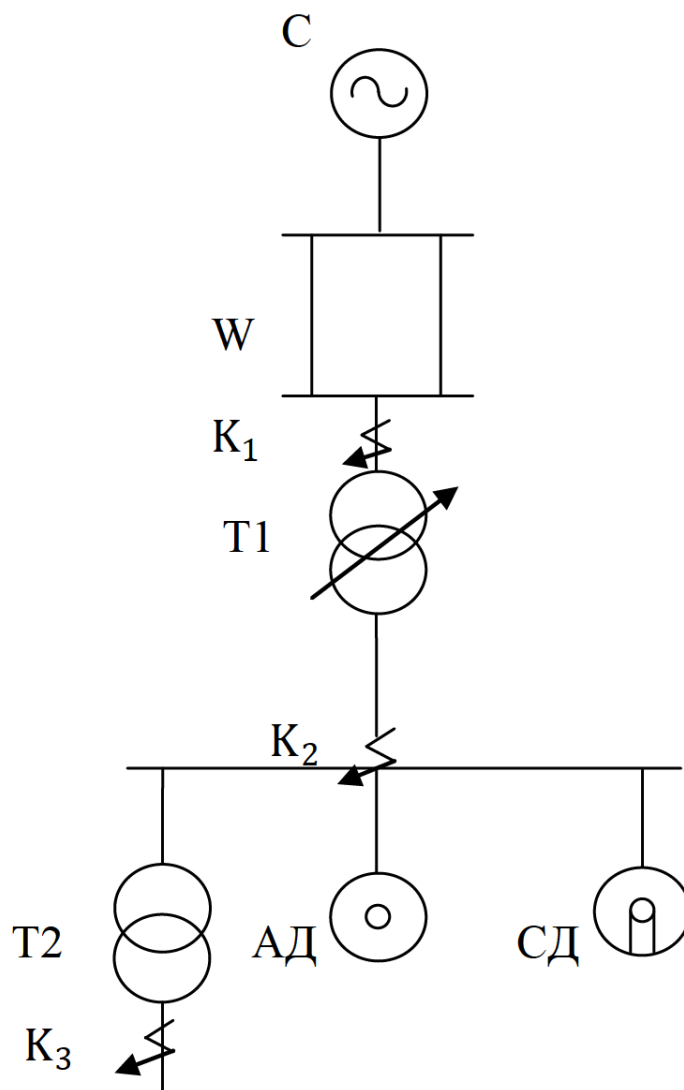


Рисунок 5.1 – Исходная схема

Таблица 5.1 – Исходные данные в примере расчета

Элем. сх.	Параметры схемы	
С	$S_{кз}$, МВА	840
W	X_0 , Ом/км	0,36
	L, км	42
	N, шт.	2
T1	P, МВА	6,3
	U_{BH} , кВ	110
	U_{HH} , кВ	6
	$U_{к\%min}$, %	8,1
	$U_{к\%max}$, %	11,5
T2	P, МВА	0,63
	U_{BH} , кВ	6
	U_{HH} , кВ	0,4
	$U_{к\%}$, %	6
АД	P, МВА	1,6
	η , %	0,96
	$\cos \varphi$	0,89
	K_{Π}	5
СД	P, МВА	2,4
	$\cos \varphi$	0,89
	X''_d	0,14

Таблица 5.2 – Исходные данные для расчетов. Вариант 1–10

Элементы схемы	Параметры схемы	Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
С	$S_{\text{кв}}, \text{МВА}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780
W	$X_0, \text{Ом/км}$	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
W	L, км	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
W	N, шт.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T1	P, МВА	6,3	10	16	6,3	10	16	6,3	10	16	6,3
T1	$U_{\text{вл}}, \text{кВ}$	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
T1	$U_{\text{инн}}, \text{кВ}$	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
T1	$u_{\text{к}}^0 \text{шт}, \%$	8	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9
T1	$u_{\text{к}}^0 \text{таx}, \%$	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,4
T2	P, МВА	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T2	$U_{\text{вл}}, \text{кВ}$	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
T2	$U_{\text{инн}}, \text{кВ}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
T2	$u_{\text{к}}^0 \%, \%$	6	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6	6,1	6,2	6,3
АД	P, МВА	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4
АД	$\eta, \%$	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98	0,96
АД	$\cos \phi$	0,86	0,86	0,86	0,86	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88
АД	$K_{\text{п}}$	5	5	5	5,2	5,2	5,2	5,4	5,4	5,4	5,6
СД	P, МВА	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,8	1,7	1,6
СД	$\cos \phi$	0,9	0,9	0,9	0,89	0,89	0,89	0,91	0,91	0,91	0,9
СД	$X''_{\text{д}}$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Таблица 5.3 – Исходные данные для расчетов. Вариант 11–20

[illegible]

Таблица 5.4 – Исходные данные для расчетов. Вариант 21–30

Элементы схемы	Параметры схемы	Вариант									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
С	$S_{\text{кв}}, \text{МВА}$	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860
W	$X_0, \text{Ом/км}$	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
W	$L, \text{км}$	58	60	40	42	44	46	48	50	52	54
W	$N, \text{шт.}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T1	$P, \text{МВА}$	16	6,3	10	16	6,3	10	16	6,3	10	16
T1	$U_{\text{вн}}, \text{кВ}$	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
T1	$U_{\text{инн}}, \text{кВ}$	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
T1	$u_{\text{к}}^0 \text{шт}, \%$	8,9	9	8	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7
T1	$u_{\text{к}}^0 \text{тах}, \%$	12,3	12,4	12,5	12,6	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12
T2	$P, \text{МВА}$	0,63	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T2	$U_{\text{вн}}, \text{кВ}$	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
T2	$U_{\text{инн}}, \text{кВ}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
T2	$u_{\text{к}}^0, \%$	6,2	6,3	6,4	6,5	6	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
АД	$P, \text{МВА}$	2,4	2,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2
АД	$\eta, \%$	0,98	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98
АД	$\cos \phi$	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,89	0,89
АД	$K_{\text{п}}$	5,4	5,6	5,6	5,6	5	5	5	5,2	5,2	5,2
СД	$P, \text{МВА}$	1,6	1,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,8
СД	$\cos \phi$	0,9	0,89	0,89	0,89	0,91	0,91	0,91	0,9	0,9	0,9
СД	$X''_{\text{д}}$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

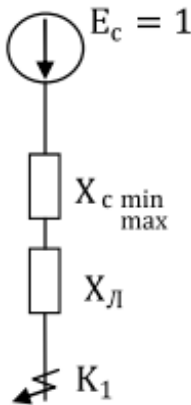
6 Расчет токов КЗ точках К₁, К₂, К₃

6.1 Расчет токов КЗ в точке К₁

Расчет производим в минимальном и максимальном режимах работы энергосистемы.

$$S_{\text{кз max}} = S_{\text{кз}} = 840 \text{ МВА};$$

$$S_{\text{кз min}} = 0,8 \cdot S_{\text{кз max}} = 0,8 \cdot 840 = 672 \text{ МВА};$$



$$X_c = \frac{S_6}{S_{\text{кз}}}; \text{ принимаем } S_6 = S_{\text{кз max}}.$$

Рассчитаем X_c , X_L согласно схеме замещения 1 (рис. 6.1).

$$X_{c \text{ max}} = \frac{S_{\text{кз max}}}{S_{\text{кз min}}} = \frac{840}{672} = 1,25 \text{ о. е.};$$

$$X_{c \text{ min}} = \frac{S_{\text{кз max}}}{S_{\text{кз max}}} = \frac{840}{840} = 1 \text{ о. е.};$$

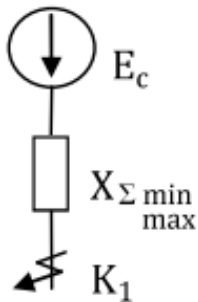
Рисунок 6.1 –
Схема замещения 1

$$X_L = \frac{X_0 \cdot l}{n} \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = \frac{0,36 \cdot 42}{2} \cdot \frac{840}{115^2} = 0,480 \text{ о. е.}$$

Рассчитаем X_Σ согласно схеме замещения 2 (рис. 6.2).

$$X_{\Sigma \text{ max}} = X_{c \text{ max}} + X_L = 1,25 + 0,480 = 1,730 \text{ о. е.};$$

$$X_{\Sigma \text{ min}} = X_{c \text{ min}} + X_L = 1 + 0,480 = 1,480 \text{ о. е.};$$



$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{61}} = \frac{840}{\sqrt{3} \cdot 115} = 4,217 \text{ кА};$$

$$I_{\text{К1 max}}^{(3)} = \frac{E_c}{X_{\Sigma \text{ min}}} \cdot I_{61} = \frac{1}{1,480} \cdot 4,217 = 2,849 \text{ кА};$$

$$I_{\text{К1 min}}^{(3)} = \frac{E_c}{X_{\Sigma \text{ max}}} \cdot I_{61} = \frac{1}{1,730} \cdot 4,217 = 2,437 \text{ кА};$$

Рисунок 6.2 –
Схема замещения 2

$$I_{K1 \max}^{(2)} = I_{K1 \max}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 2,849 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 2,467 \text{ кА};$$

$$I_{K1 \min}^{(2)} = I_{K1 \min}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 2,437 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 2,111 \text{ кА}.$$

Таблица 6.1 – Токи КЗ в точке K_1

	$I_{K1}^{(3)}$	$I_{K1}^{(2)}$
min	2,437	2,111
max	2,849	2,467

6.2 Расчет токов КЗ в точке K_2 .

6.2.1 Расчет подпитки со стороны системы

Регулирование под нагрузкой для трансформатора 110 кВ принимаем $\pm 16\%$. Рассчитаем $X_{T1 \min}$, $X_{T1 \max}$ согласно схеме замещения 3 (рис. 6.3).

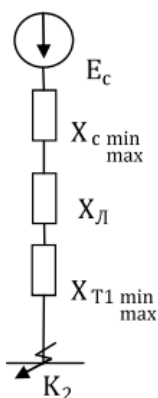


Рисунок 6.3 –
Схема
замещения 3

$$X_{T1 \min} = \frac{U_{K\% \min}}{100} \cdot \frac{(U_{BH} \cdot (1 - \Delta U_{РПН}))^2}{S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} =$$

$$= \frac{8,1}{100} \cdot \frac{(110 \cdot (1 - 0,16))^2}{10} \cdot \frac{840}{115^2} = 4,393 \text{ о. е.};$$

$$X_{T1 \max} = \frac{U_{K\% \max}}{100} \cdot \frac{(U_{BH} \cdot (1 + \Delta U_{РПН}))^2}{S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} =$$

$$= \frac{11,5}{100} \cdot \frac{(110 \cdot (1 + 0,16))^2}{10} \cdot \frac{840}{115^2} = 11,893 \text{ о. е.};$$

Рассчитаем $X_{\Sigma \min}$, $X_{\Sigma \max}$ согласно схеме замещения 4 (рис. 6.4).

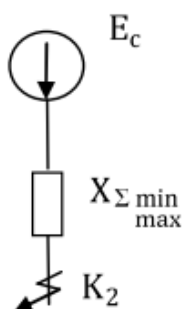


Рисунок 6.4 –
Схема
замещения 4

$$X_{\Sigma \min} = X_{c \min} + X_L + X_{T1 \min} = 1 + 0,480 + 4,393 =$$

$$= 5,873 \text{ о. е.};$$

$$X_{\Sigma \max} = X_{c \max} + X_L + X_{T1 \max} = 1,25 + 0,480 +$$

$$+ 11,893 = 13,623 \text{ о. е.};$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{62}} = \frac{840}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 76,980 \text{ кА};$$

$$I_{K2 \min}^{(3)} = \frac{E_c}{X_{\Sigma \max}} \cdot I_{62} = \frac{1}{13,623} \cdot 76,980 = 5,651 \text{ кА};$$

$$I_{K2 \max}^{(3)} = \frac{E_c}{X_{\Sigma \min}} \cdot I_{62} = \frac{1}{5,873} \cdot 76,980 = 13,108 \text{ кА};$$

$$I_{K2 \min}^{(2)} = I_{K2 \min}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 5,651 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 4,894 \text{ кА};$$

$$I_{K2 \max}^{(2)} = I_{K2 \max}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 13,108 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 11,352 \text{ кА}.$$

Таблица 6.2 – Токи КЗ в точке K_2

	$I_{K2}^{(3)}$	$I_{K2}^{(2)}$
min	5,651	4,894
max	13,108	11,352

6.2.2 Расчет подпитки от АД

Рассчитаем $I_{AD}^{(3)}$ согласно схеме замещения 5 (рис. 6.5).

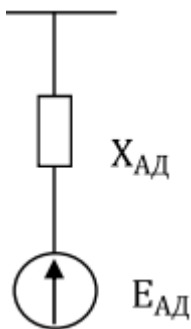


Рисунок 6.5 – Схема замещения 5

$$S_{AD} = \frac{P_{AD}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1,6}{0,96 \cdot 0,89} = 1,873 \text{ о. е.};$$

$$X_{AD} = \frac{1}{K_{\Pi}} \cdot \frac{S_6}{S_{AD}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{840}{1,873} = 89,712 \text{ о. е.};$$

$$E_{AD} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{\Pi}}\right)^2 - \frac{2 \cdot \cos \varphi}{K_{\Pi}}} =$$

$$= \sqrt{1 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 - \frac{2 \cdot 0,89}{5}} = 0,827 \text{ о. е.};$$

$$I_{AD}^{(3)} = \frac{E_{AD}}{X_{AD}} \cdot I_{62} = \frac{0,827}{89,712} \cdot 76,980 = 0,71 \text{ кА}.$$

6.2.3 Расчет подпитки от СД

Рассчитаем $I_{CD}^{(3)}$ согласно схеме замещения 6 (рис. 6.6).

$$E_{CD} = \sqrt{(1 - X_d'' \cdot \sin \varphi)^2 + (X_d'' \cdot \cos \varphi)^2} =$$

$$= \sqrt{(1 - 0,14 \cdot 0,456)^2 + (0,14 \cdot 0,89)^2} = 0,944 \text{ о. е.};$$

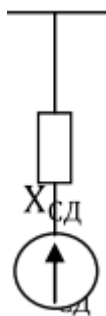


Рисунок 6.6 –
Схема
замещения 6

$$S_{\text{ном}} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{2,4}{0,89} = 2,697 \text{ МВА};$$

$$X_{\text{CD}} = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = 0,14 \cdot \frac{840}{2,697} = 43,610 \text{ о. е.};$$

$$I_{\text{CD}}^{(3)} = \frac{E_{\text{CD}}}{X_{\text{CD}}} \cdot I_{62} = \frac{0,944}{43,610} \cdot 76,980 = 1,667 \text{ кА}.$$

6.2.4 Определение суммарного тока КЗ в точке К₂

$$I_{\Sigma K2 \text{ min}}^{(3)} = I_{K2 \text{ min}}^{(3)} + I_{AД}^{(3)} + I_{\text{CD}}^{(3)} = 5,651 + 0,71 + 1,667 = 8,028 \text{ кА};$$

$$I_{\Sigma K2 \text{ max}}^{(3)} = I_{K2 \text{ max}}^{(3)} + I_{AД}^{(3)} + I_{\text{CD}}^{(3)} = 13,108 + 0,71 + 1,667 = 15,485 \text{ кА};$$

$$I_{\Sigma K2 \text{ min}}^{(2)} = I_{\Sigma K2 \text{ min}}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 8,028 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 6,952 \text{ кА};$$

$$I_{\Sigma K2 \text{ max}}^{(2)} = I_{\Sigma K2 \text{ max}}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 15,485 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 13,410 \text{ кА}.$$

Таблица 6.3 – Суммарный ток КЗ в точке К₂

	$I_{\Sigma K2}^{(3)}$	$I_{\Sigma K2}^{(2)}$
min	8,028	6,952
max	15,485	13,410

6.3 Расчет токов КЗ в точке К₃

Рассчитаем X_{T2} согласно схемам замещения 7, 8 (рис. 6.7 и 6.8).

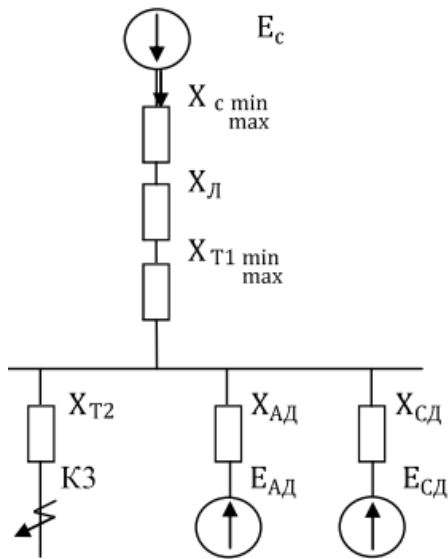


Рисунок 6.7 – Схема замещения 7

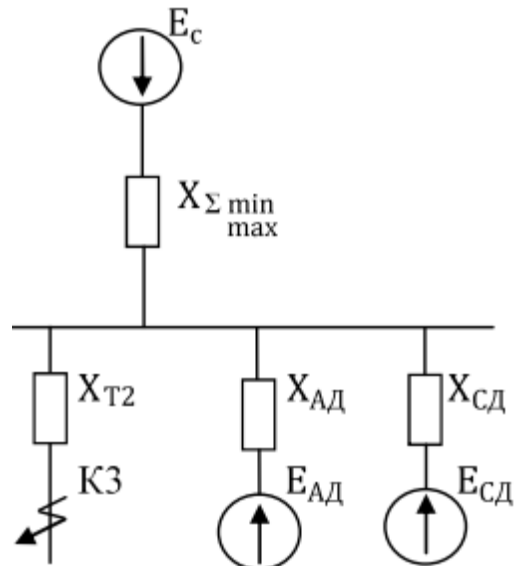


Рисунок 6.8 – Схема замещения 8

$$X_{T2} = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_6}{U_{62}^2} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6^2}{1} \cdot \frac{840}{6,3^2} = 45,714 \text{ о. е.}$$

Найдем эквивалентную ЭДС и сопротивления двигателей согласно схемам замещения 9, 10 (рис. 6.9 и 6.10).

$$X_{\text{ЭД}} = \frac{X_{\text{АД}} \cdot X_{\text{СД}}}{X_{\text{АД}} + X_{\text{СД}}} = \frac{89,712 \cdot 43,610}{89,712 + 43,610} = 29,345 \text{ о. е.}$$

$$E_{\text{ЭД}} = \frac{E_{\text{АД}} \cdot X_{\text{СД}} + E_{\text{СД}} \cdot X_{\text{АД}}}{X_{\text{АД}} + X_{\text{СД}}} = \frac{0,827 \cdot 43,610 + 0,944 \cdot 89,712}{89,712 + 43,610} = 0,906 \text{ о. е.}$$

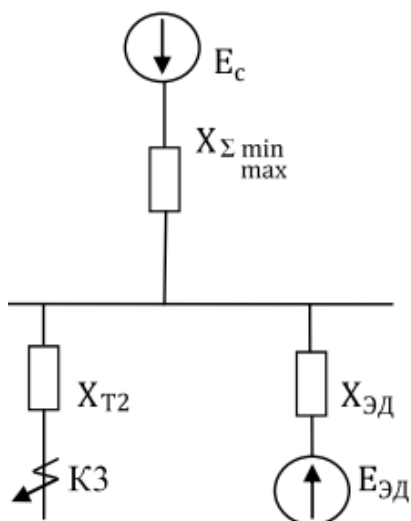


Рисунок 6.9 – Схема замещения 9

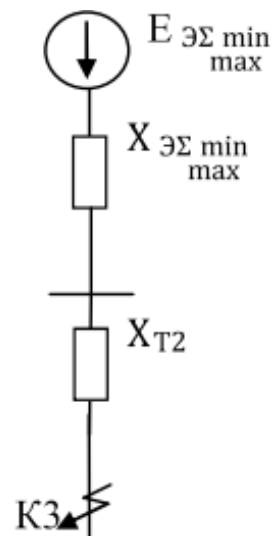


Рисунок 6.10 – Схема замещения 10

$$X_{\Sigma \min} = \frac{X_{\Sigma \min} \cdot X_{\Sigma \Delta}}{X_{\Sigma \min} + X_{\Sigma \Delta}} = \frac{5,873 \cdot 29,345}{5,873 + 29,345} = 4,893 \text{ о. е.};$$

$$X_{\Sigma \max} = \frac{X_{\Sigma \max} \cdot X_{\Sigma \Delta}}{X_{\Sigma \max} + X_{\Sigma \Delta}} = \frac{13,623 \cdot 29,345}{13,623 + 29,345} = 9,304 \text{ о. е.};$$

$$E_{\Sigma \min} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot X_{\Sigma \Delta} + E_{\Sigma \Delta} \cdot X_{\Sigma \min}}{X_{\Sigma \min} + X_{\Sigma \Delta}} = \frac{1 \cdot 29,345 + 0,906 \cdot 5,873}{5,873 + 29,345} =$$

$$= 0,984 \text{ о. е.};$$

$$E_{\Sigma \max} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot X_{\Sigma \Delta} + E_{\Sigma \Delta} \cdot X_{\Sigma \max}}{X_{\Sigma \max} + X_{\Sigma \Delta}} = \frac{1 \cdot 29,345 + 0,906 \cdot 13,623}{13,623 + 29,345} =$$

$$= 0,970 \text{ о. е.}$$

Рассчитаем $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$ согласно схеме замещения 10 (рис. 6.10).

$$X_{\text{рез min}} = X_{\text{T2}} + X_{\Sigma \min} = 45,714 + 4,893 = 50,608 \text{ о. е.};$$

$$X_{\text{рез max}} = X_{\text{T2}} + X_{\Sigma \max} = 45,714 + 9,304 = 55,018 \text{ о. е.};$$

$$I_{63} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{63}} = \frac{840}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1212,436 \text{ кА};$$

$$I_{\text{КЗ max}}^{(3)} = \frac{E_{\Sigma \min}}{X_{\text{рез min}}} \cdot I_{63} = \frac{0,984}{50,608} \cdot 1212,436 = 23,582 \text{ кА};$$

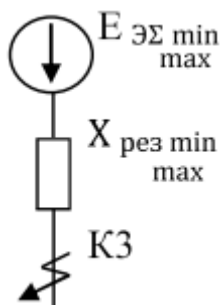


Рисунок 6.10 –
Схема
замещения 10

$$I_{\text{КЗ min}}^{(3)} = \frac{E_{\Sigma \max}}{X_{\text{рез max}}} \cdot I_{63} = \frac{0,970}{55,018} \cdot 1212,436 = 21,380 \text{ кА};$$

$$I_{\text{КЗ max}}^{(2)} = I_{\text{КЗ max}}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 23,582 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 20,423 \text{ кА};$$

$$I_{\text{КЗ min}}^{(2)} = I_{\text{КЗ min}}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 21,380 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 18,516 \text{ кА}.$$

Таблица 6.4 – Токи КЗ в точке КЗ

	$I_{\text{КЗ}}^{(3)}$	$I_{\text{КЗ}}^{(2)}$
min	21,380	18,516
max	23,582	20,423

7 Релейная защита асинхронного двигателя

7.1 Защита от междофазных КЗ

Устанавливаем токовую отсечку на реле КА1 (рис. 7.1).

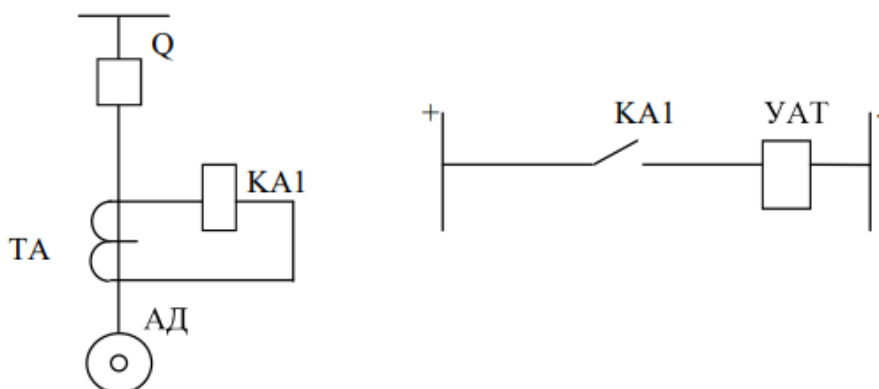


Рисунок 7.1 – Схема токовой отсечки

Расчет производится только в амперах:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1,6}{0,96 \cdot 0,89} = 1,873 \text{ МВА};$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{1,873}{\sqrt{3} \cdot 6} = 180,197 \text{ А};$$

$$I''_{\text{max}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}} = 5 \cdot 180,197 = 900,984 \text{ А}.$$

Определяем ток срабатывания отсечки:

$$I_{\text{co}} \geq K_{\text{отс}} \cdot I''_{\text{max}} = 1,4 \cdot 900,984 = 1261,377 \text{ А}.$$

Выбор трансформатора тока производится из набора номинальных значений. Выбираем 200/5, т. к. $I_{\text{ном}} = 180,197 \text{ А}$. $K_{\text{сх}} = 1$, при соединении трансформаторов тока в звезду.

Определяем ток срабатывания реле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{co}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_{\text{ТА}}} = \frac{1261,377 \cdot 1}{40} = 31,534 \text{ А},$$

где $n_{\text{ТА}} = 40$ – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Выбираем реле РТ 40/100 с пределом уставок 25–50 А и с последовательным соединением катушек.

Проверяем чувствительность защиты:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\Sigma K2 \min}^{(2)}}{I_{\text{co}}} = \frac{6,952 \cdot 1000}{1261,377} = 5,51 > 2,$$

отсюда, защита по чувствительности проходит.

7.2 Релейная защита от замыканий на землю в обмотках статора

Этот тип релейной защиты устанавливается, если ток срабатывания защиты превышает 5 А.

$$C = \frac{0,0187 \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{НОМ}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{НОМ}})}} = \frac{0,0187 \cdot 1,873 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)}} =$$

$$= 0,979 \cdot 10^{-8} \text{ Ф};$$

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3,464 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$I_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_{\phi} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,979 \cdot 10^{-8} \cdot 3,464 \cdot 10^3 = 10,652 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$I_{\text{сз}} \geq K_{\text{отс}} \cdot K_{\phi} \cdot I_c = 1,2 \cdot 2,5 \cdot 10,652 \cdot 10^{-3} = 31,956 \cdot 10^{-3} \text{ А},$$

где $K_{\phi} = 2,5$ – коэффициент, учитывающий бросок емкостных токов;
 I_c – собственный емкостный ток двигателя.

Т. к. ток меньше 5 А, то данный тип защиты не устанавливаем.

7.3 Защита от перегрузки

Устанавливаем максимальную токовую защиту с выдержкой времени на реле КА2 и КТ1 (рис. 7.2).

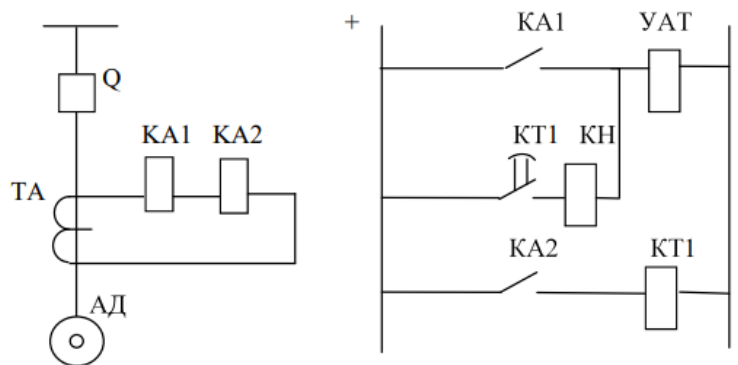


Рисунок 7.2 – Схема токовой отсечки и максимальной токовой защиты

8 Релейная защита синхронного двигателя

8.1 Защита от коротких замыканий

Используем ту же схему, что и для асинхронного двигателя.

$$S_{\text{ном}} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{2,4}{0,89} = 2,697 \text{ МВА};$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{2,697}{\sqrt{3} \cdot 6} = 259,483 \text{ А};$$

$$I''_{\text{max}} = \frac{E_{\text{сд}}}{X''_{\text{д}}} \cdot I_{\text{ном}} = \frac{0,944}{0,14} \cdot 259,483 = 1750,429 \text{ А};$$

$$I_{\text{сз}} \geq K_{\text{отс}} \cdot I''_{\text{max}} = 1,4 \cdot 1750,429 = 2450,600 \text{ А};$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_{\text{ТА}}} = \frac{2450,600 \cdot 1}{60} = 40,843 \text{ А}.$$

Выбираем реле РТ 40/50 с пределом уставок 25–50 А и параллельным соединением катушек.

Проверяем чувствительность защиты:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\Sigma\text{К}2 \text{ min}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{6,952 \cdot 1000}{2450,600} = 2,837 > 2,$$

следовательно, защита по чувствительности проходит.

8.2 Защита от замыканий на землю в обмотках статора

$$C = \frac{0,0187 \cdot S_{\text{ном}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{\text{ном}} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{\text{ном}})}} = \frac{0,0187 \cdot 2,697 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)}} = 1,41 \cdot 10^{-8} \text{ Ф};$$

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3,464 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$I_{\text{с}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_{\phi} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,41 \cdot 10^{-8} \cdot 3,464 \cdot 10^3 = 15,339 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$I_{\text{сз}} \geq K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{б}} \cdot I_{\text{с}} = 1,2 \cdot 2,5 \cdot 15,339 \cdot 10^{-3} = 46,017 \cdot 10^{-3} \text{ А},$$

где $K_6 = 2,5$ – коэффициент, учитывающий бросок емкостных токов;
 I_c – собственный емкостный ток двигателя.

Т. к. ток меньше 5 А, то данный тип защиты не устанавливаем.

8.3 Защита от перегрузки

$$I_{сз} = \frac{K_{отс}}{K_B} \cdot I_{ном} = \frac{1,1}{0,8} \cdot 259,483 = 356,789 \text{ А},$$

где $K_{отс} = 1,1$ – коэффициент отстройки, $K_B = 0,8$ – коэффициент возврата.

$$I_{ср} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{n_{ТА}} = \frac{356,789 \cdot 1}{60} = 5,946 \text{ А}.$$

Выбираем реле РТ 40/10 с пределом установок 5–10 А с параллельным соединением катушек.

8.4 Защита от понижения напряжения

Аналогична асинхронному двигателю.

9 Релейная защита трансформатора ГПП

9.1 Максимальная токовая защита от КЗ

МТЗ трансформатора ГПП выполняем на реле КА и КТ (рис. 9.1).

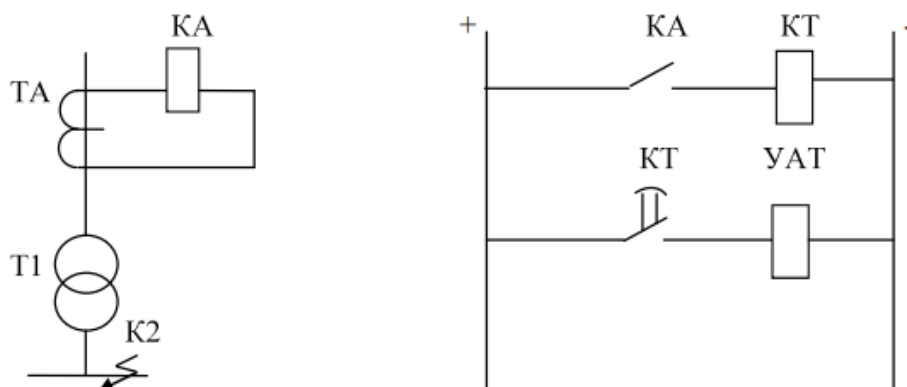


Рисунок 9.1 – Схема максимальной токовой защиты

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 52,486 \text{ A};$$

$$I_{\text{сз}} = \frac{K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{сзп}}}{K_{\text{в}}} \cdot I_{\text{НОМ}} = \frac{1,2 \cdot 2,5}{0,8} \cdot 52,486 = 196,824 \text{ A},$$

где $K_{\text{отс}} = 1,2$ – коэффициент отстройки, $K_{\text{сзп}} = 2,5$ – коэффициент самозапуска, $K_{\text{в}} = 0,8$ – коэффициент возврата.

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_{\text{ТА}}} = \frac{196,824 \cdot 1}{20} = 9,841 \text{ A}.$$

Выбираем реле РТ 40/20 с пределом установок 5–10 А и последовательным соединением катушек.

Проверяем защиту на чувствительность к двухфазным КЗ на стороне низкого напряжения:

$$I_{\text{К2 min}}^{(2)'} = \frac{I_{\text{К2 min}}^{(2)}}{n_{\text{T1}}} = \frac{4,894}{18,33} = 266,978 \text{ A};$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К2 min}}^{(2)'}}{I_{\text{сз}}} = \frac{266,978}{196,824} = 1,356 < 1,5,$$

отсюда, защита по чувствительности не проходит, устанавливаем МТЗ с пуском по напряжению.

9.2 Максимальная токовая защита с пуском по напряжению

Ток срабатывания защиты

$$I_{\text{сз}} \geq \frac{K_{\text{отс}}}{K_{\text{в}}} \cdot I_{\text{НОМ}} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 52,486 = 78,730 \text{ A};$$

Напряжение срабатывания защиты

$$U_{\text{сз}} = 0,5 \cdot U_{\text{НОМ}} = 0,5 \cdot 6 = 3 \text{ кВ}$$

$$I_{cp} = \frac{I_{c3} \cdot K_{cx}}{n_{TA}} = \frac{78,730 \cdot 1}{20} = 3,936 \text{ A}$$

Выбираем реле РТ 40/10 с последовательным соединением катушек и пределом уставок 2,5–5 А.

$$U_{cp} = \frac{U_{c3}}{n_{TV}} = \frac{3}{60} = 50 \text{ В}$$

где n_{TV} – коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Выбираем реле РН 54/160 с пределом уставок 40–160.

9.3 Защита от перегрузки

Устанавливаем максимальную токовую защиту на реле КА2 и КТ2 (рис. 9.2).

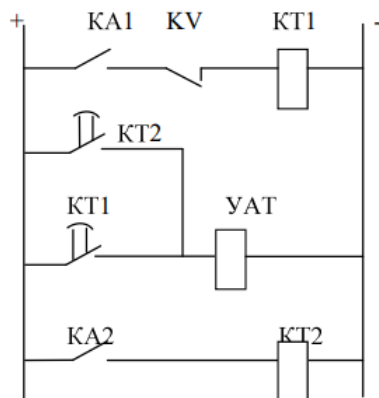


Рисунок 9.2 – Схема МТЗ с пуском по напряжению и МТЗ от перегрузки

$$I_{c3} = \frac{K_{отс}}{K_B} \cdot I_{ном} = \frac{1,05}{0,8} \cdot 52,486 = 68,888 \text{ A},$$

где $K_{отс} = 1,05$ – коэффициент отстройки, $K_B = 0,8$ – коэффициент возврата.

$$I_{cp} = \frac{I_{c3} \cdot K_{cx}}{n_{TA}} = \frac{68,888 \cdot 1}{20} = 3,445 \text{ A}.$$

Выбираем реле РТ 40/10 с пределом установок 2,5–5 А и последовательным соединением катушек.

9.4 Токовая отсечка

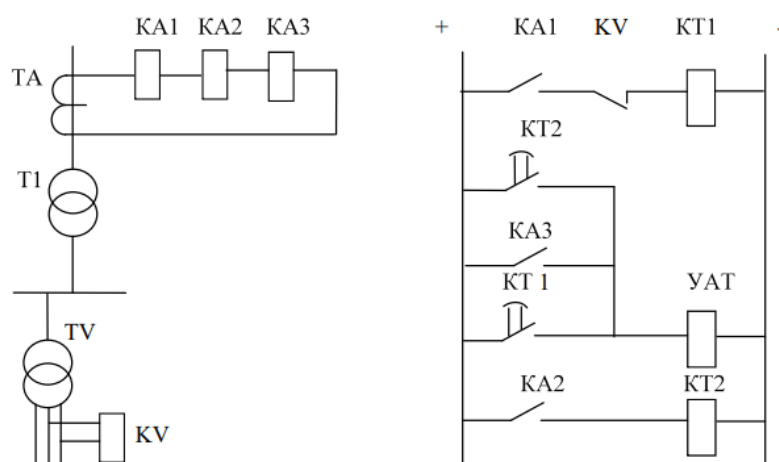


Рисунок 9.3 – Схема МТЗ с пуском по напряжению, МТЗ от перегрузки и токовой отсечки

$$I_{\Sigma K2 \max}^{(3)'} = \frac{I_{\Sigma K2 \max}^{(3)}}{n_{T1}} = \frac{15,485 \cdot 1000}{18,33} = 844,784 \text{ A.}$$

Определяем ток срабатывания отсечки:

$$I_{co} \geq K_{отс} \cdot I''_{\max} = 1,4 \cdot 844,784 = 1182,697 \text{ A.}$$

Определяем ток срабатывания реле:

$$I_{cp} = \frac{I_{co} \cdot K_{cx}}{n_{ТА}} = \frac{1182,697 \cdot 1}{20} = 59,135 \text{ A,}$$

где $n_{ТА} = 20$ – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Выбираем реле РТ 40/200 с пределом уставок 50–100 А и с последовательным соединением катушек.

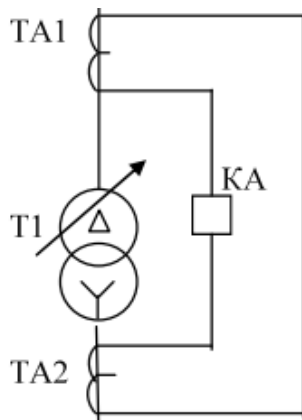
9.5 Дифференциальная защита трансформатора ГПП

Расчет тока небаланса ДЗТ (рис. 9.4):

$$I_{K2 \max}^{(3)'} = \frac{I_{K2 \max}^{(3)}}{n_{T1}} = \frac{13,108 \cdot 1000}{18,33} = 715,119 \text{ A.}$$

$$I'_{нб} = K_{одн} \cdot K_{апер} \cdot \varepsilon \cdot I_{K2 \max}^{(3)'} = 1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 715,119 = 71,512 \text{ A.}$$

где $K_{одн} = 1$ – коэфф. однотипности, $K_{апер}$ – коэфф. апериодической составляющей, $\varepsilon = 0,1$ – относительная погрешность ТА.



$$I''_{нб} = \Delta U_{рпн} \cdot I_{K2 \max}^{(3)'} = 0,16 \cdot 715,119 = 114,419 \text{ A;}$$

$$I_{нб} = I'_{нб} + I''_{нб} + I'''_{нб} = 71,512 + 114,419 + 0 = 185,931 \text{ A}$$

где $I'''_{нб} = 0$, т. к. не выбрано реле дифференциальной защиты.

Рисунок 9.4 – Схема ДЗТ

Ток срабатывания защиты:

$$I_{сз} \geq K_{отс} \cdot I_{нб} = 1,3 \cdot 185,931 = 241,710 \text{ A,}$$

где $K_{отс} = 1,3$ – коэффициент отстройки.

Таблица 9.1 – Вторичные токи в плечах защиты

	ВН	НН
I_1	52,49	962,3
Коэффициент трансформации ТТ	100/5	1000/5
Схема соединения ТТ	Δ	Y
Вторичный ток I_2 , А	4,545	4,812

$$I_{2 \text{ ВН}} = \frac{I_{1 \text{ ВН}} \cdot K_{сх}}{n_{ТА}} = \frac{52,49 \cdot \sqrt{3}}{20} = 4,545 \text{ A;}$$

$$I_{2 \text{ НН}} = \frac{I_{1 \text{ НН}} \cdot K_{сх}}{n_{ТА}} = \frac{962,3 \cdot 1}{200} = 4,812 \text{ A;}$$

$$K_q = \frac{I_{K2 \min}^{(2)'}}{I_{сз}} = \frac{266,978}{241,710} = 1,105;$$

$$I_{K2 \min}^{(2)'} = \frac{I_{K2 \min}^{(2)}}{n_{Т1}} = \frac{4,894 \cdot 1000}{18,33} = 266,978 \text{ A.}$$

Т. к. $K_q = 1,105 < 2$, то рассчитываем дифференц. защиту на ДЗТ-11.

9.5.1 Расчет дифференциальной защиты на реле ДЗТ-11

Ток срабатывания на стороне ВН:

$$I_{cp} = \frac{1,5 \cdot I_{1 \text{ ВН}} \cdot K_{cx}}{n_{TA}} = 1,5 \cdot I_{2 \text{ ВН}} = 1,5 \cdot 4,545 = 6,818 \text{ А.}$$

Число витков на неосновной и основной сторонах:

$$\omega_{\text{неосн р}} = \frac{F}{I_{cp}} = \frac{100}{6,818} = 14,66 \text{ витков} \rightarrow \omega_{\text{неосн ст}} = 14 \text{ витков.}$$

$$\omega_{\text{осн р}} = \frac{\omega_{\text{неосн р}} \cdot I_{1 \text{ ВН}}}{I_{1 \text{ НН}}} = \frac{14,66 \cdot 52,486}{962,3} = 0,8 \text{ витка} \rightarrow \omega_{\text{осн ст}} = 1 \text{ виток};$$

Число витков на тормозной обмотке:

$$\begin{aligned} \omega_{т р} &= \left(\varepsilon + \Delta U + \frac{|\omega_{\text{осн ст}} - \omega_{\text{осн р}}|}{\omega_{\text{осн р}}} \right) \cdot \frac{1,5 \cdot \omega_{\text{осн ст}}}{\text{tg } \alpha} = \\ &= \left(0,1 + 0,16 + \frac{|1 - 0,8|}{0,8} \right) \cdot \frac{1,5 \cdot 1}{0,75} = 1,02 \text{ витка} \rightarrow \omega_{т ст} = 2 \text{ витка.} \end{aligned}$$

Расчет тока через реле при минимальном 2-х фазном КЗ на стороне НН:

$$I_{p \text{ min}} = \frac{I_{K2}^{(2)} / (U_{ВН} / U_{НН})}{n_{TA}} = \frac{4,894 / (110 / 6)}{20} = 13,346 \text{ А;}$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{p \text{ min}} \cdot \omega_{\text{неосн ст}}}{100} = \frac{13,346 \cdot 14}{100} = 1,869.$$

Т. к. $K_{\text{ч}} = 1,869 > 2$, то ДЗТ-11 по чувствительности не проходит.

10 Релейная защита трансформатора цеховой трансформаторной подстанции

10.1 Защита от КЗ

Рассчитываем МТЗ на стороне ВН на реле КА1 (рис. 10.1).

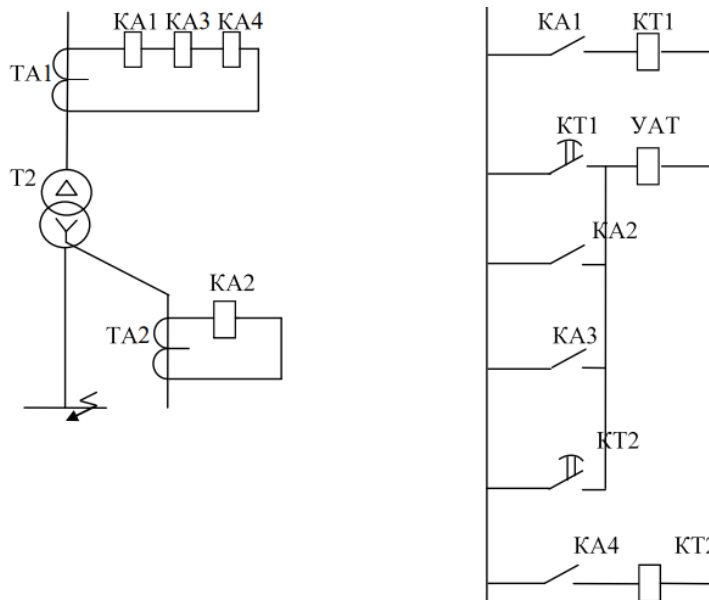


Рисунок 10.1 – Схема релейной защиты

Уставки МТЗ рассчитываются двумя способами:

1 способ:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6} = 96,225 \text{ A};$$

$$I_{\text{сз}} = \frac{K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{сзп}}}{K_{\text{в}}} \cdot I_{\text{НОМ}} = \frac{1,2 \cdot 2,5}{0,8} \cdot 96,225 = 360,844 \text{ A};$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}}{n_{\text{ТА}}} = \frac{360,844 \cdot 1}{20} = 18,042 \text{ A}.$$

2 способ:

$$I_{\text{раб max}} = 0,7 \cdot I_{\text{НОМ}} = 0,7 \cdot 96,225 = 67,358 \text{ A};$$

$$I_{\text{сз}} = K_{\text{отс}} \cdot (I_{\text{раб max}} + K_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{раб max}}) = 1,2 \cdot (67,358 + 2,5 \cdot 67,358) =$$

$$= 282,902 \text{ A}.$$

Сравнивая два $I_{\text{сз}}$, за основу берем максимальное значение, где $I_{\text{сз}} = 360,844 \text{ A}$. Выбираем реле РТ 40/50 с пределом уставок 12,5–25 А и с последовательным соединением катушек.

Проверяем чувствительность выбранной защиты на 2-х фазное КЗ на стороне НН:

$$I_{\text{КЗ min}}^{(2)'} = \frac{I_{\text{КЗ min}}^{(2)}}{n_{\text{ТА}}} = \frac{18,516}{15} = 1,234 \text{ кА};$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ min}}^{(2)'}}{I_{\text{сз}}} = \frac{1,425}{360,844} = 3,421.$$

Т. к. $K_q > 1,5$, то защита по чувствительности проходит.

Проверяем чувствительность выбранной защиты на 1-о фазное КЗ на стороне НН:

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 230,940 \text{ В};$$
$$I_{K3}^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{1}{3} \cdot Z_T} = \frac{230,940}{\frac{1}{3} \cdot 0,027} = 25,660 \text{ кА};$$
$$I_{K3}^{(1)'} = \frac{I_{K3}^{(1)}}{n_{TA}} = \frac{25,66}{15} = 1,711 \text{ кА};$$
$$K_q = \frac{I_{K3}^{(1)'}}{I_{сз}} = \frac{1,711 \cdot 10^3}{360,844} = 4,741.$$

Т. к. $K_q > 1,5$, то защита по чувствительности проходит.

10.2 Защита от перегрузки

Устанавливаем МТЗ на реле КА4.

$$I_{сз} = \frac{K_{отс}}{K_B} \cdot I_{ном} = \frac{1,05}{0,8} \cdot 96,225 = 126,295 \text{ А};$$
$$I_{ср} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{n_{TA}} = \frac{126,295 \cdot 1}{20} = 6,315 \text{ А}.$$

Выбираем реле РТ 40/20 с пределом уставок 5–10 А и с последовательным соединением катушек.

11 Расчетная проверка трансформатора тока

11.1 Проверка на погрешность в 10 %

Принимаем за основу, рассчитанную ранее релейную защиту АД (рис. 11.1).

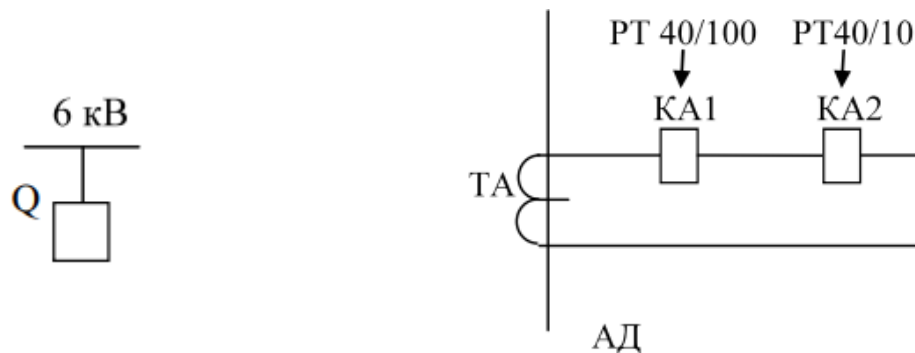


Рисунок 11.1 – Релейная защита АД

Трансформатор тока был соединен в неполную звезду.

$$Z_{\text{пр}} = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 35}{2,5} = 0,245 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{р общ}} = Z_{\text{р1}} + Z_{\text{р2}} = \frac{S_1}{I_{2 \text{ обм}}^2} + \frac{S_2}{I_{2 \text{ обм}}^2} = \frac{10}{5^2} + \frac{8}{5^2} = 0,72 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{пер}} = 0,1 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{н расч}} = \sqrt{3} \cdot Z_{\text{пр}} + Z_{\text{р общ}} + Z_{\text{пер}} = \sqrt{3} \cdot 0,245 + 0,72 + 0,1 = 1,244 \text{ Ом}.$$

Коэффициент предельной кратности:

$$K_{10} = \frac{I_{\text{со}}}{I_{1 \text{ обм}}} = \frac{1261,377}{300} = 4,205.$$

Трансформатор тока (300/5) удовлетворяет требованиям погрешности в 10 %, т. к. $Z_{\text{н расч}} < Z_{\text{доп}}$.

11.2 Проверка точности работы реле при максимальном токе КЗ

$$K_{\text{max}} = \frac{I_{\Sigma \text{КЗ}}^{(3)}}{I_{1 \text{ обм}}} = \frac{15,485}{300} = 51,616;$$

$$A = \frac{K_{\text{max}}}{K_{10}} = \frac{51,616}{4,205} = 12,276.$$

Значение погрешности для коэффициента А: $f = 79 \%$, т. к. $79 \% > 50 \%$, то необходимо увеличить первичный ток. Берем трансформатор 1000/5, отсюда:

$$K_{10} = 4,205; \quad K_{\text{max}} = 15,485; \quad A = 12,276.$$

11.3 Проверка на максимальное значение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора тока

$$U_{2 \max} = \sqrt{2} \cdot K_{\max} \cdot I_{2 \text{ обм}} \cdot Z_{\text{н расч}} = \sqrt{2} \cdot 15,485 \cdot 5 \cdot 1,244 = 136,250 \text{ В.}$$

$U_{2 \max}$ меньше допустимого значения напряжения в 1000 В.

11.4 Проверка на максимальное значение тока во вторичной обмотке трансформатора тока

$$I_{2 \max} = \frac{15,485 \cdot 1}{200} = 77,424 \text{ А.}$$

$I_{2 \max}$ меньше допустимого значения тока в 150 А.

12 Построение карты селективности

Таблица 12.1 – Максимальные токовые защиты от перегрузок

Т2	АД	СД	Т1
126,3	247,8	356,8	68,9
6 кВ			110 кВ

Токи приводим к напряжению в 6 кВ:

$$68,888 \cdot \frac{110}{6} = 1262,947 \text{ А.}$$

Построим карту селективности для МТЗ (рис. 12.1).

Таблица 12.2 – Токовые отсечки от КЗ

Т2	АД	СД	Т1
2201,0	1261,4	2450,6	1182,7
6 кВ			110 кВ

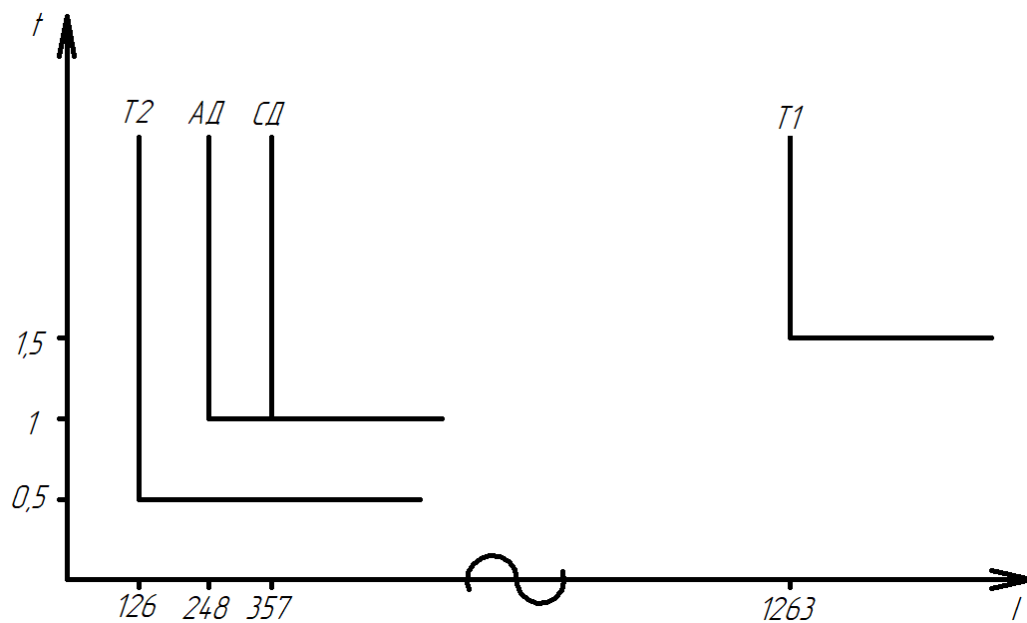


Рисунок 12.1 – Карта селективности для МТЗ

Токи приводим к напряжению в 6 кВ:

$$1182,697 \cdot \frac{110}{6} = 21682,778$$

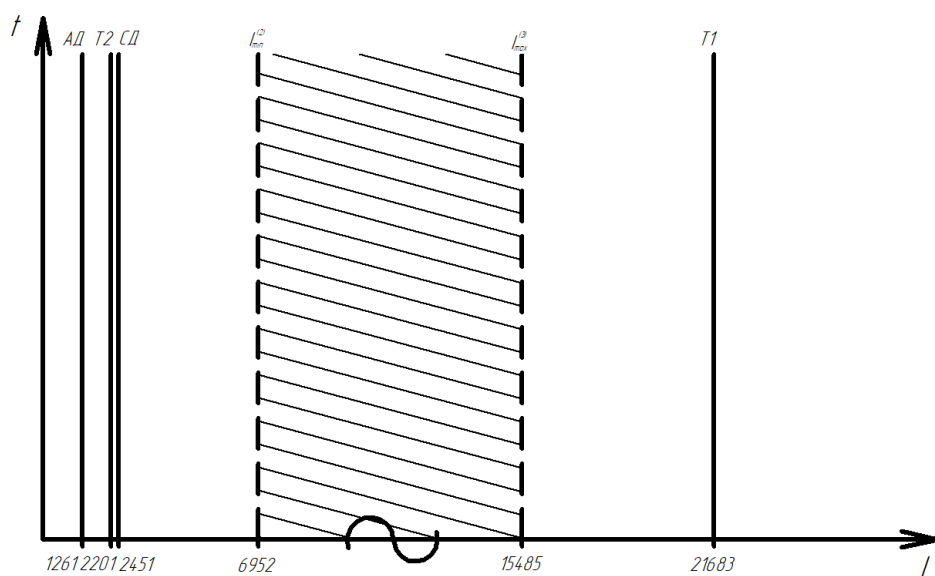


Рисунок 12.2 – Карта селективности для ТО

Список используемых источников

1. Руководящие указания по релейной защите. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сети 110–750 кВ. / Москва : Энергия, – 152 с.
2. Басс, Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Электроэнергетика" по дисциплине "Релейная защита электроэнергетических систем" / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев ; под ред. А. Ф. Дьякова. – 2-е изд., стер. – Москва: МЭИ, 2006. – 294 с.
3. Ханин, Ю. И. Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения : Лабораторный практикум / Ю. И Ханин ; – Волгоград : Волгоградский государственный аграрный университет, 2018. – 124 с. – Текст : электронный // Znanium : электронно-библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/1007853> (дата обращения: 06.05.2026). – Режим доступа: по подписке.
4. Горемыкин, С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие / С. А. Горемыкин ; – Москва : ИНФРА-М, 2025. – 191 с. – Текст : электронный // Znanium : электронно-библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2184900> (дата обращения: 06.05.2026). – Режим доступа: по подписке.

Учебное издание

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания по выполнению расчетно-графической работы

Составители:

Наumenko Андрей Михайлович
Кузнецов Андрей Александрович

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *А.М. Наumenко*

Подписано к печати 21.05.2026. Усл. печ. листов 2,5.
Уч.-изд. листов 3,0. Заказ № 120.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.