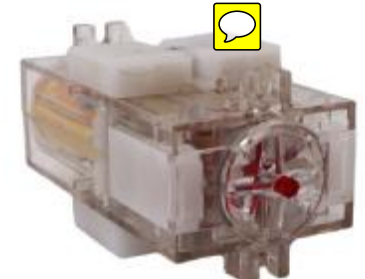
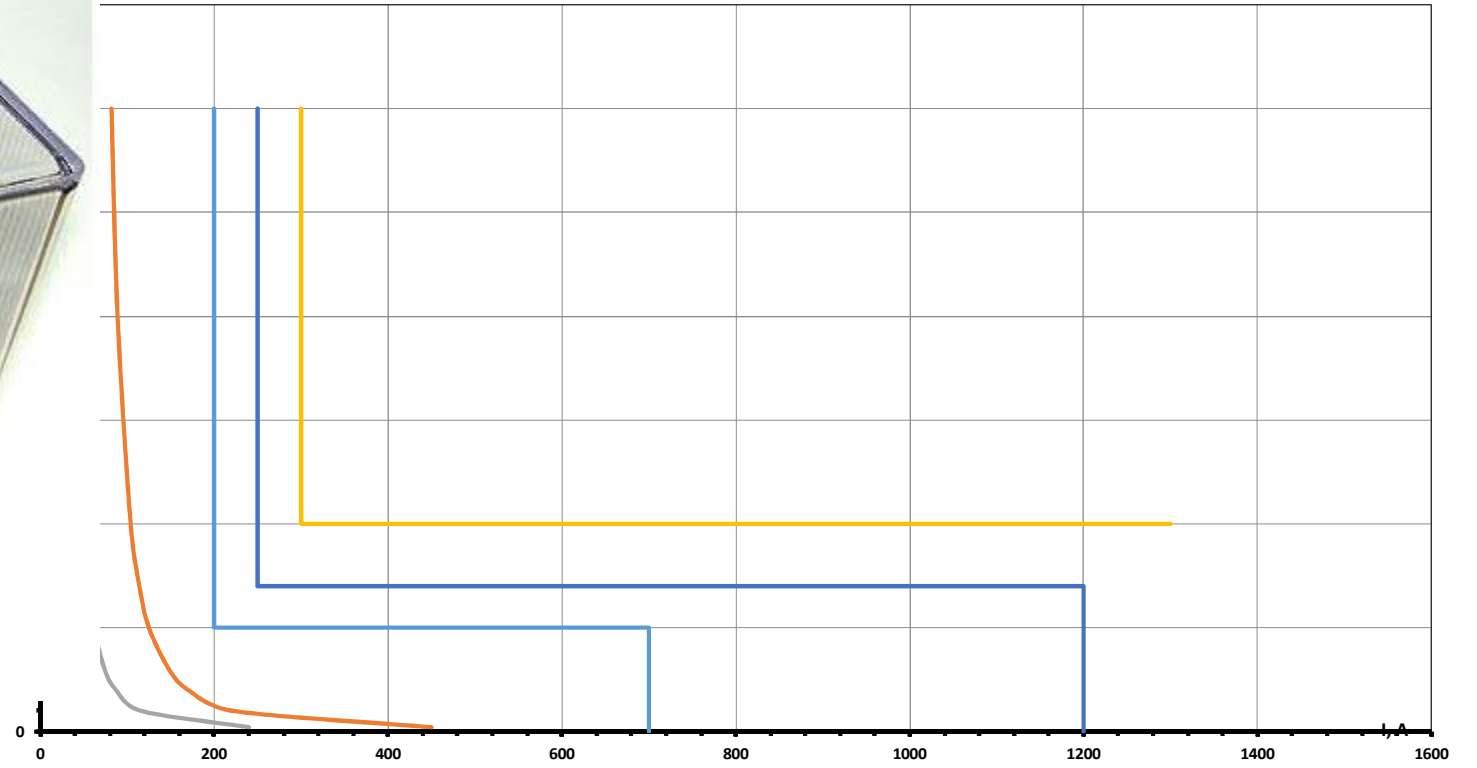


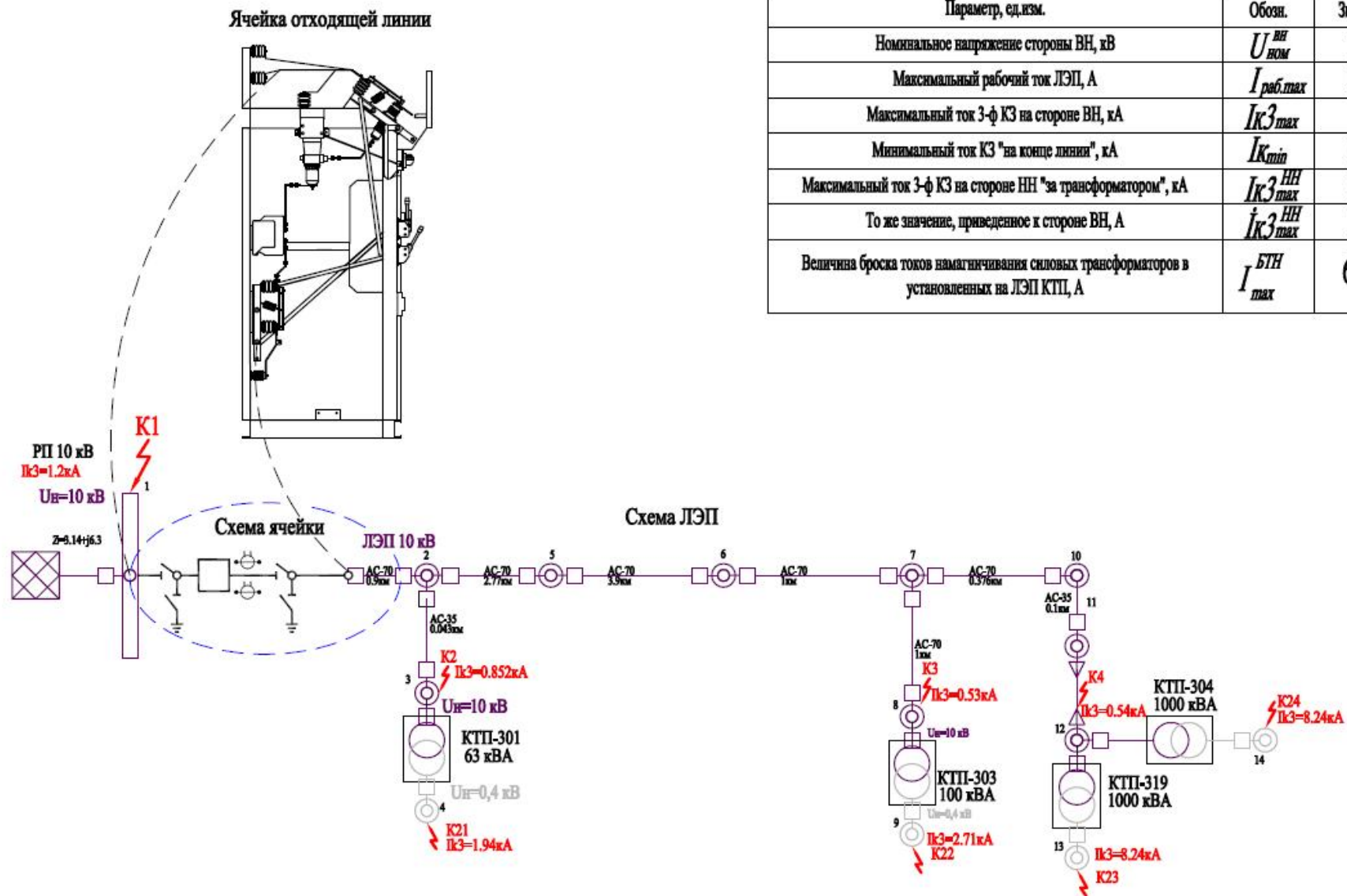
Релейная защита и автоматика систем электроснабжения

Практическое занятие. Теоретическая часть.

Релейная защита распределительных сетей 6(10) кВ. Продолжение

Составил: Кузнецов Д. Б.





Параметры ЛЭП

Параметр, ед.изм.	Обозн.	Значение
Номинальное напряжение стороны ВН, кВ	$U_{\text{ном}}^{\text{ВН}}$	10
Максимальный рабочий ток ЛЭП, А	$I_{\text{раб.мах}}$	100
Максимальный ток 3-ф КЗ на стороне ВН, кА	$I_{\text{к3мах}}$	1,2
Минимальный ток КЗ "на конце линии", кА	$I_{\text{к3min}}$	0,46
Максимальный ток 3-ф КЗ на стороне НН "за трансформатором", кА	$I_{\text{к3мах}}^{\text{НН}}$	8,24
То же значение, приведенное к стороне ВН, А	$I_{\text{к3мах}}^{\text{ВН}}$	330
Величина броска токов намагничивания силовых трансформаторов в установленных на ЛЭП КТП, А	$I_{\text{мах}}^{\text{БТН}}$	625,2

На рисунке представлена схема ВЛ 10 кВ. Параметры данной ЛЭП были нами рассчитаны на предыдущих занятиях. ЛЭП питается от РП 10 кВ и подключена к камере КСО с вакуумным выключателем ВВ/TEL. Необходимо рассчитать уставки защит и выбрать трансформаторы тока в данной ячейке.

1. Расчет и выбор уставок токовых защит.

Как правило, отходящая линия 6(10) кВ защищается простыми токовыми защитами – *максимальной токовой защитой (МТЗ) и токовой отсечкой (ТО)*. Токовые защиты действуют на отключение выключателя при 2-фазных и 3-фазных КЗ в линии с последующей сигнализацией. При выполнении практических заданий по расчетам токовых защит студентам необходимо ознакомиться с презентацией лекции по теме **«Токовые защиты - МТЗ и токовая отсечка»**.

Существует множество типов устройств РЗА, выполняющих функции простых токовых защит. Самые простые из них – *реле максимального тока серии РТ-40*. На рисунке представлена верхняя дверца камеры КСО-298, задняя часть которой служит панелью для монтажа реле и другой аппаратуры.

Дверца камеры КСО. Вид со стороны монтажа



Блок управления вакуумным выключателем ВВ/TEL

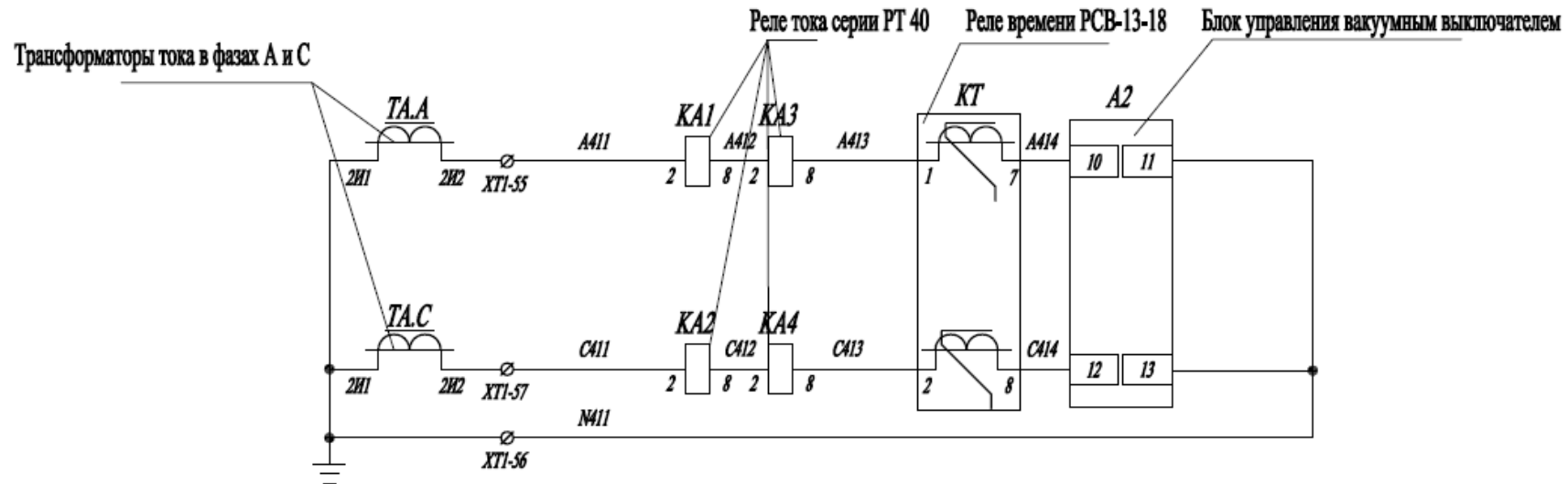
Автоматический выключатель цепей управления

Реле времени РСВ-13-18

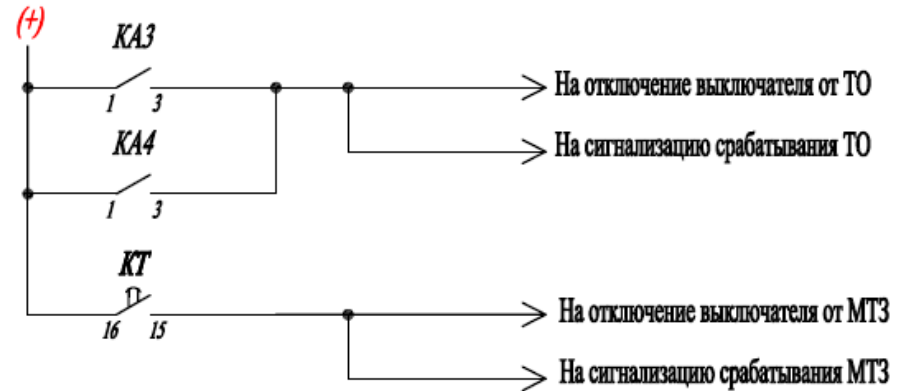
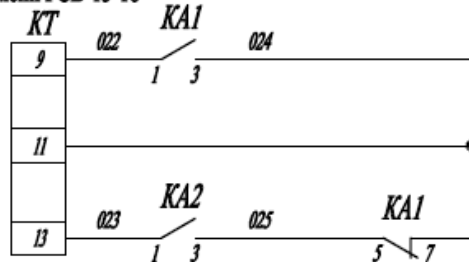
Реле тока РТ 40

Указательные реле

Схема, поясняющая принцип действия токовых защит

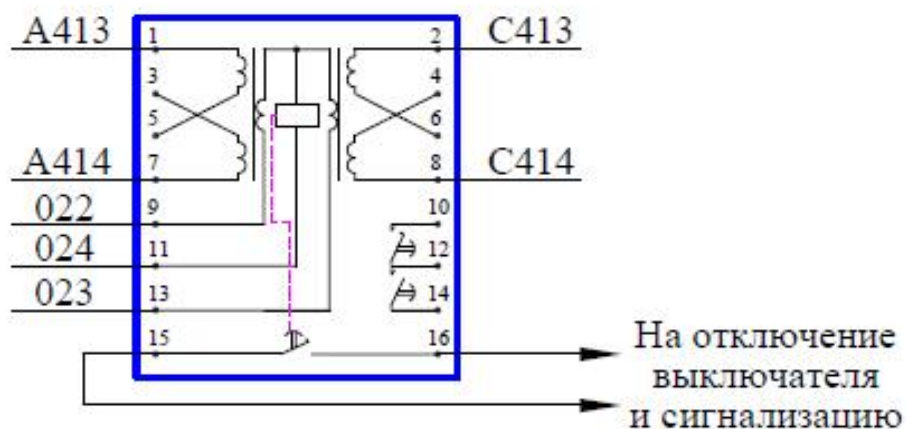


Реле времени РСВ-13-18



Токовые реле **КА3** или **КА4**, срабатывая, замыкают свои контакты (1-3) в результате чего происходит отключение выключателя без выдержки времени и сигнализация срабатывания. Так работает токовая отсечка.

МТЗ работает с выдержкой времени. Токовые реле **КА1** или **КА2**, срабатывая, замыкают свои контакты в цепях управления реле времени **КТ** (контакты 9-11 или 11-13 реле КТ как показано на рисунке):



- Что приведет к срабатыванию контактов 15-16 реле **КТ** (они замкнутся с выдержкой времени). Выключатель отключится.

При каких же условиях должны сработать токовые реле?

Введем понятия и обозначения:

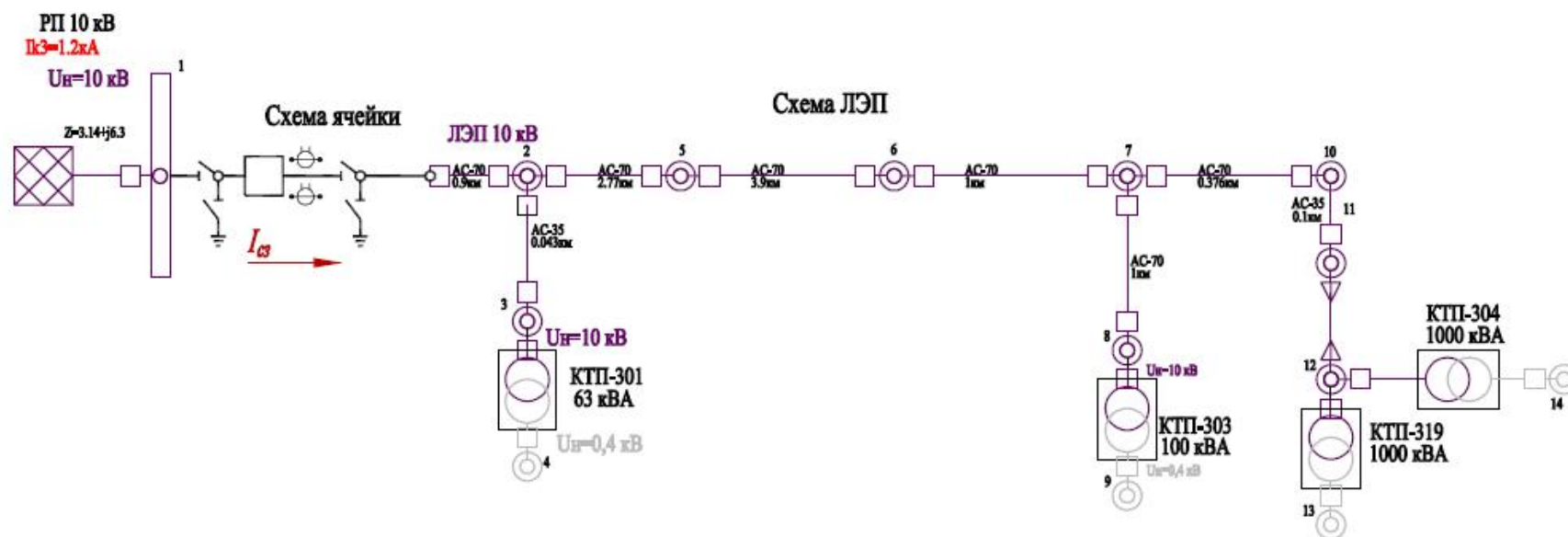
$I_{сз}$ - ток срабатывания защиты ,

$I_{ср}$ - ток срабатывания реле,

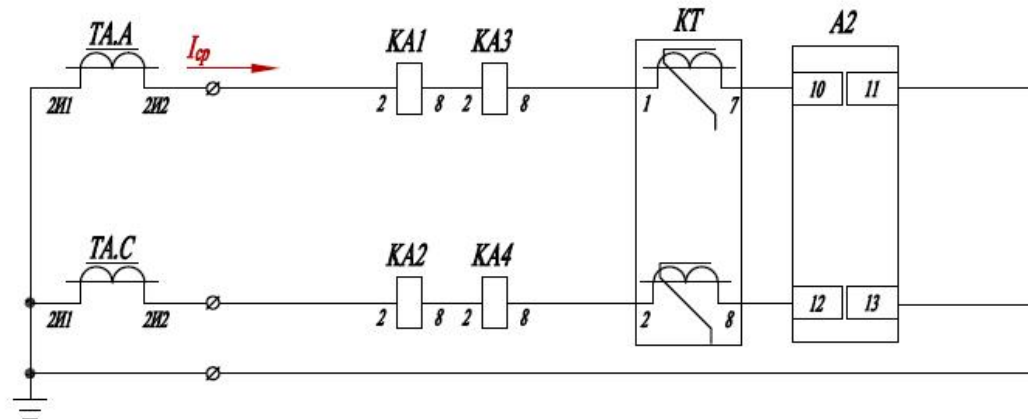
$K_{сх}$ - коэффициент схемы ,

K_I - коэффициент трансформации трансформатора тока .

Под *током срабатывания защиты* понимают минимальный ток в фазе защищаемого элемента, при котором происходит срабатывание измерительного органа. Иными словами, это такой ток в первичной цепи (6 или 10 кВ) при котором во вторичной цепи должно сработать реле и отключить выключатель.



Ток срабатывания реле - минимальное значение тока, при котором срабатывает реле (см. рисунок). $I_{сз}$ и $I_{ср}$ связаны между собой отношением:
$$I_{ср} = \frac{K_{сх} * I_{сз}}{K_I}$$
, где $K_{сх}$ - коэффициент схемы; K_I - коэффициент трансформации трансформаторов тока



где $KA1...KA4$ - реле серии РТ-40

Реле серии РТ-40 (крышка условно снята)

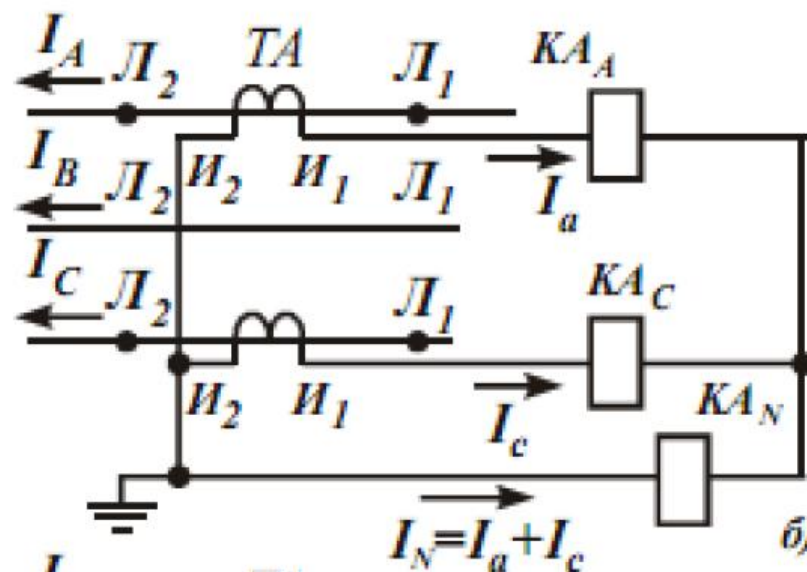
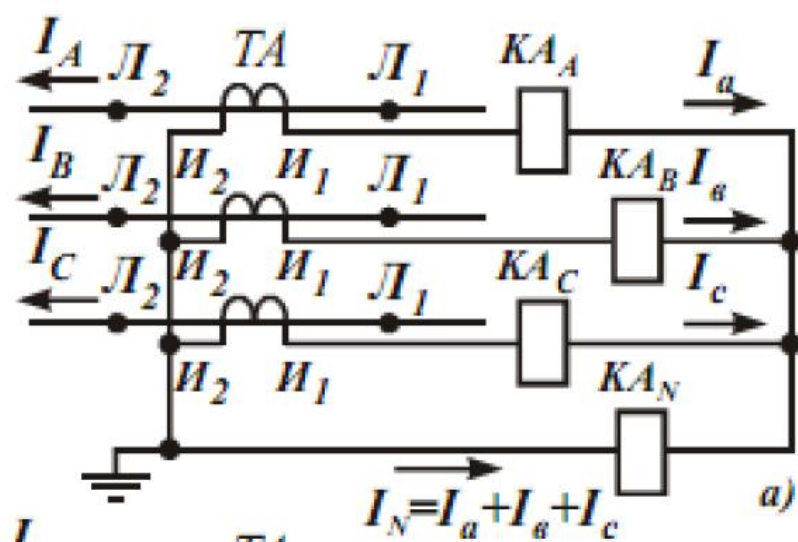


Механизм выбора уставки срабатывания $I_{ср}$

Коэффициент схемы - это коэффициент показывающий во сколько раз токи в реле отличаются от токов которые протекают во вторичной обмотке трансформаторов тока. Такие изменения происходят из-за того что в элементах различных схем вторичные токи могут складываться или вычитаться.

$$k_{\text{сх}} = \frac{I_p}{I_{2.\text{ТТ}}}$$

В распределительных сетях 6, 10 или 35 кВ трансформаторы тока соединяют или в полную звезду (а) или в неполную звезду (б).



Для таких схем соединения трансформаторов тока коэффициент схемы всегда равен 1.

Коэффициент трансформации трансформатора тока — это отношение величины первичного тока к величине вторичного тока:

$$K_I = \frac{I_{\text{перв}}}{I_{\text{втор}}}$$

Сначала вычислим значение $I_{\text{сз}}$ для токовой осечки:

Токовая отсечка без выдержки времени (первая ступень токовой защиты) предназначена для ускорения отключения близких КЗ. Ее уставка (ток срабатывания) рассчитывается по формуле:

$$I_{сз}^{TO} = K_H * I_{max}^{(3)} = 1,3 * I_{max}^{(3)} \quad (1) \quad \text{где } I_{max}^{(3)}$$

- максимальный ток 3-фазного КЗ «на конце линии».

Рассчитанное значение проверяется по двум условиям:

- Отстройка от бросков тока намагничивания трансформаторов, включаемых на «холостой ход».

$$I_{сз}^{TO} > I_{max}^{БН} \quad (2)$$

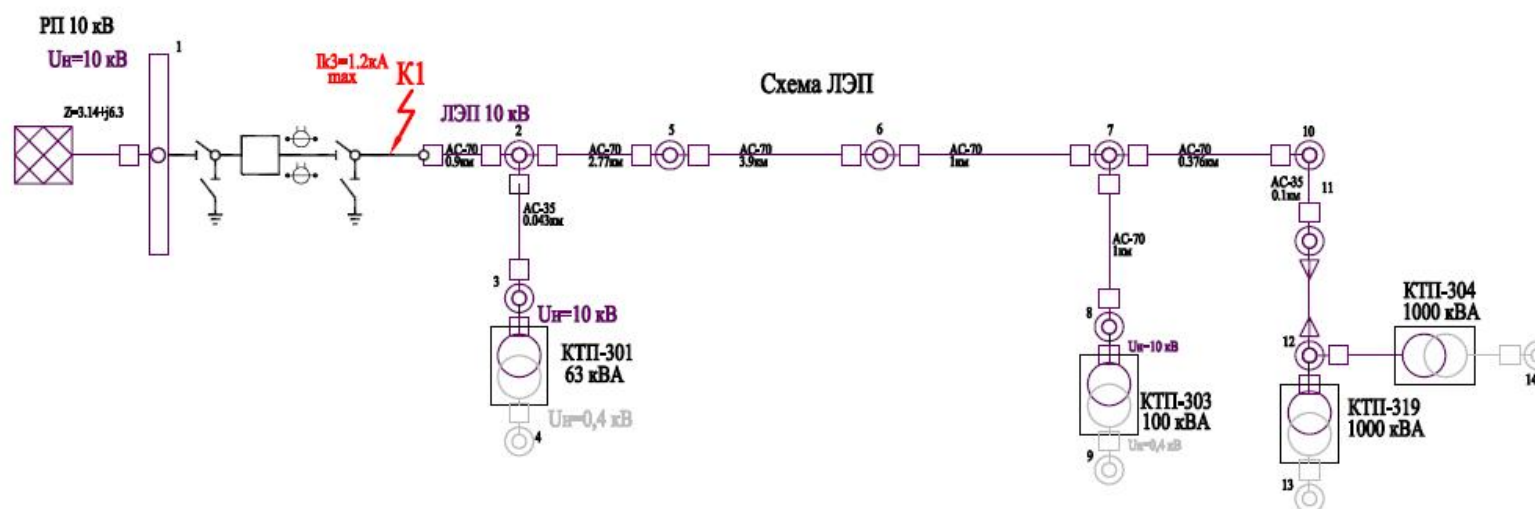
- Отстройка от максимального тока КЗ на стороне НН приведенного на сторону ВН.

$$I_{сз}^{TO} > \dot{I}_{K3_{max}}^{НН} \quad (3)$$

если условия (2) или (3) не выполняются, то окончательно $I_{сз}^{TO}$ выбирается по наибольшему значению этих условий.

Принятое $I_{\text{сз}}^{TO}$ проверяется по чувствительности к минимальному току КЗ в начале линии:

$$K_q^{TO} = \frac{I_{K1}^{(2)}}{I_{\text{сз}}^{(TO)}} \geq 1,2 \quad \text{где} \quad I_{K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{K3_{\text{max}}} \quad (4)$$

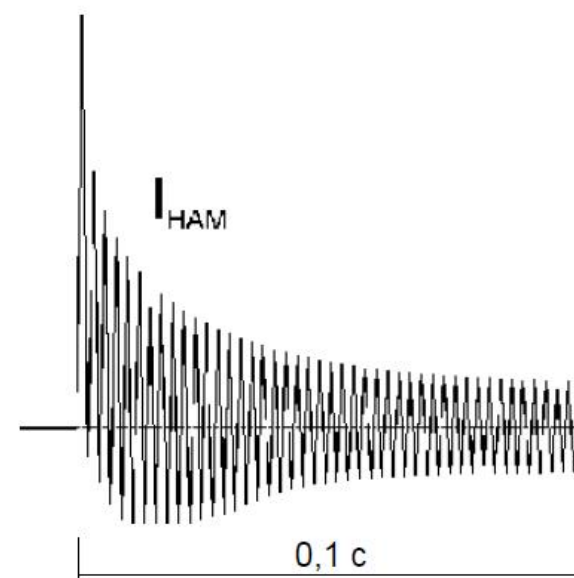


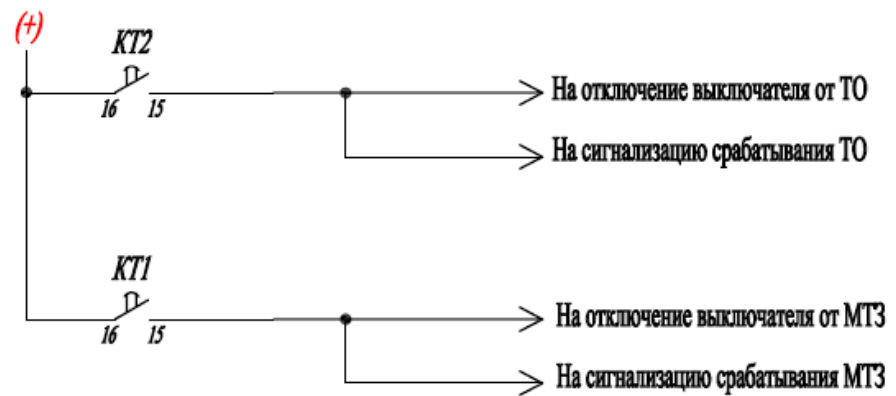
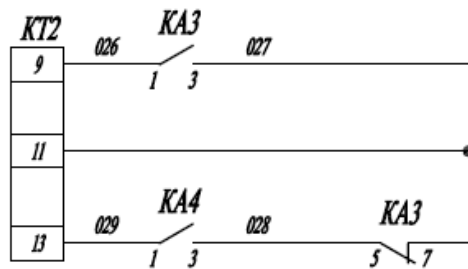
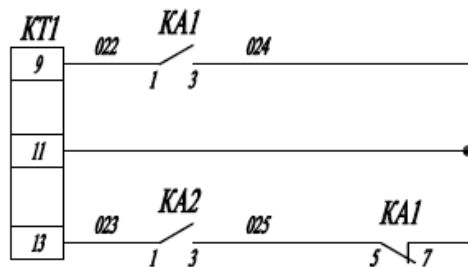
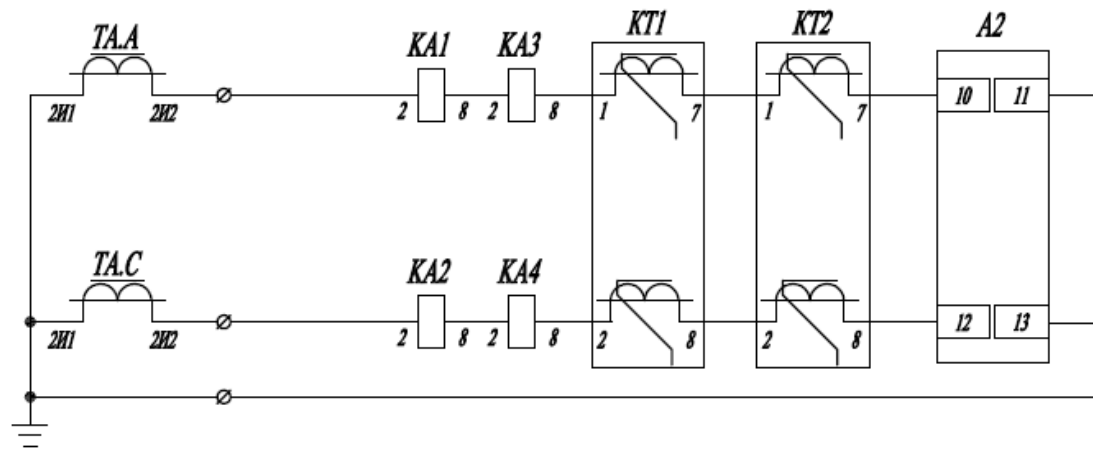
Расчет и выбор $I_{\text{сз}}^{TO}$ для представленной ЛЭП 10 кВ проводится студентами самостоятельно.

Что делать, если не удалось достичь чувствительности большей или равной 1,2? Поскольку на линии установлены КТП, трансформаторы которых защищены плавкими вставками и нет токовых защит, возможно понизить значение $I_{сз}^{TO}$ до величины, при которой условие (4) выполняется. Но при этом должны выполняться условия (2) и (3). Если не будет выполняться условие (2), то отстроиться от БТН возможно, введя выдержку времени на срабатывание токовой отсечки 0,1 с.

Этого времени хватит, чтобы БТН завершился.

В этом случае схема токовых цепей будет выглядеть так как показано на рисунке:



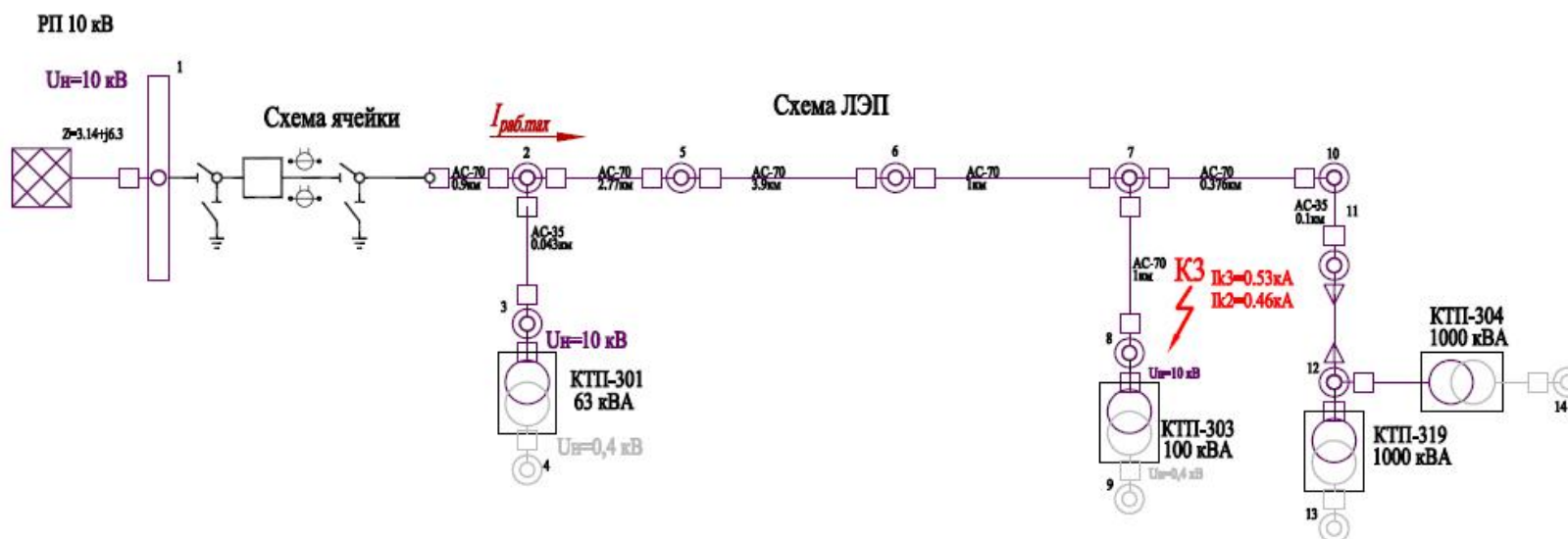


Выполнения же условия (3) на ЛЭП 6(10) кВ как правило, всегда удается достичь.

Определим значение $I_{сз}$ для МТЗ. Максимальная токовая защита контролирует ток в защищаемом элементе, отстраивается от тока нагрузки и при превышении тока уставки, с выдержкой времени действует на отключение этого элемента. МТЗ должна быть чувствительна с коэффициентом не менее 1,5 к минимальным токам КЗ "на конце линии":

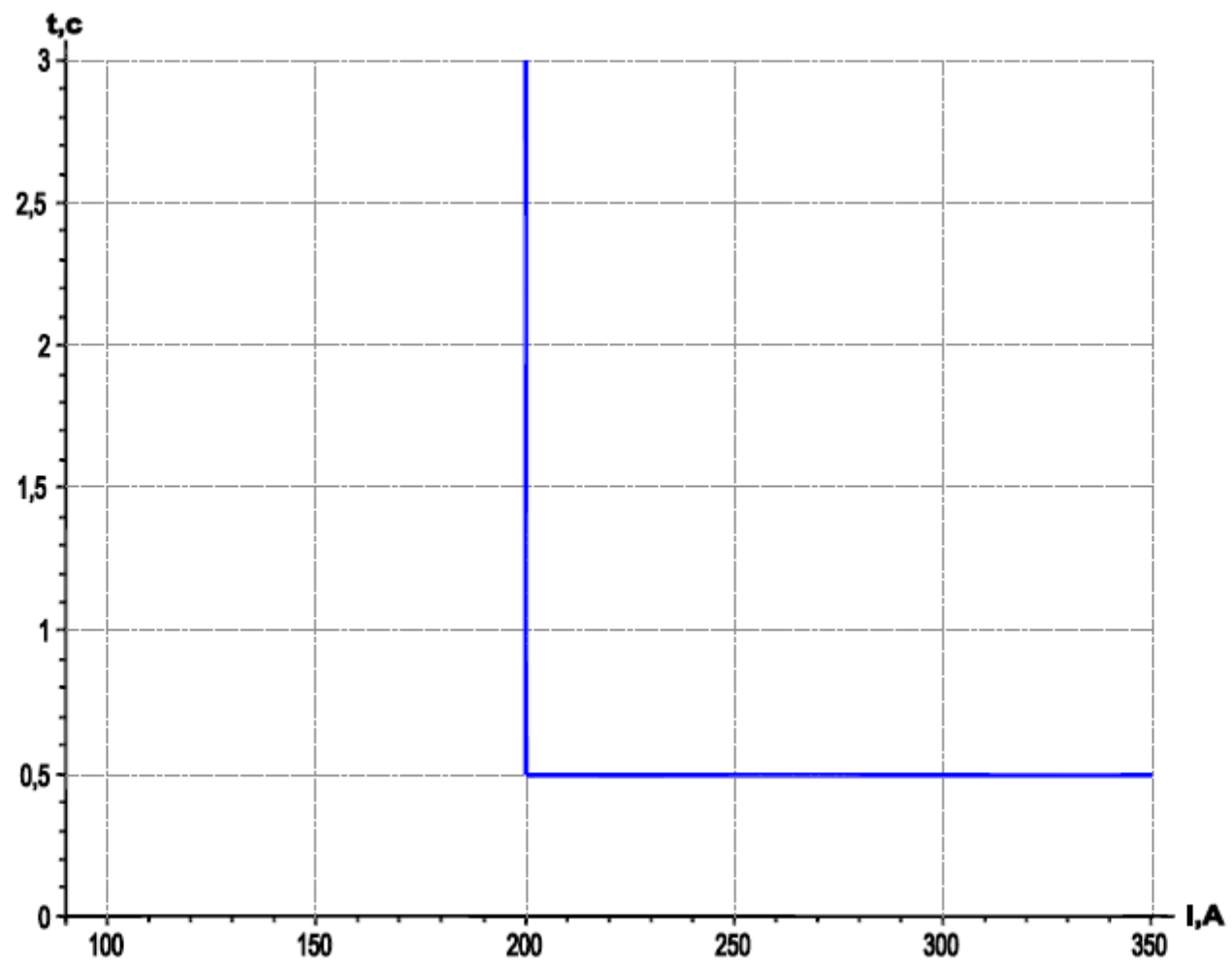
$$K_q^{MTЗ} = \frac{I_{Kmin}}{I_{сз}^{MTЗ}} \geq 1,5$$

и селективна с нижестоящими защитами (плавкими вставками, которые защищают трансформаторы в КТП).



Для расчета и выбора $I_{сз}^{МТЗ}$ необходимо знать:

1. Значение максимального рабочего тока в линии;
2. Минимальное значение тока КЗ «на конце линии»;
3. Номинальный ток плавкой вставки предохранителей, защищающих силовой трансформатор в КТП наибольшей мощности, характеристику его отключения (характеристику плавления).
4. Значение Δt ступени селективности (в секундах).
5. Следует понимать, что МТЗ, выполненная на реле максимального тока серии РТ-40 имеет *независимую характеристику срабатывания*. Допустим, если ток срабатывания МТЗ равен 200 А, а время срабатывания 0,5 с то характеристика срабатывания защиты будет выглядеть так:



МТЗ с независимой характеристикой

Сравнение характеристик отключения различных элементов на графике «Ток – время» называется *картой селективности*.

Ток срабатывания МТЗ рассчитывается по формуле:

$$I_{сз}^{МТЗ} \geq \frac{K_H * K_{сзн}}{K_B} * I_{раб.тах} \quad (5)$$

где

$K_H = 1.2$ для реле РТ-40;

$K_B = 0,8$ для реле РТ-40;

$K_{сзн}$ – коэффициент самозапуска нагрузки, отражающий увеличение рабочего тока $I_{раб. тах}$ за счет одновременного пуска электродвигателей, которые затормозились при снижении напряжения во время КЗ.

Для бытовой нагрузки принимается $K_{сзн} = 1,2-1,3$, для сельскохозяйственных потребителей принимается $K_{сзн} = 1,1-1,2$, для общепромышленной нагрузки принимают $K_{сзн} = 1,8...2.5$.

Расчет $I_{сз}^{MTЗ}$ для данной ЛЭП 10 кВ по формуле (5) проводится студентами самостоятельно с учетом коэффициентов указанных в таблице:

Коэффициенты:	
коэффициент надежности отстройки, K_n	1,2
коэффициент самозапуска, $K_{сзн}$	1,3
коэффициент возврата максимальных реле тока, K_v	0,8

Для обеспечения селективности выдержки времени МТЗ выбираются по ступенчатому принципу. Разница между временем действия МТЗ двух смежных участков называется ступенью времени или ступенью селективности Δt

Для токовых защит на реле серии РТ-40 ступень селективности составляет 0,5 секунд. Поскольку в рассматриваемом примере на ЛЭП отсутствуют другие защиты (МТЗ) а силовые трансформаторы

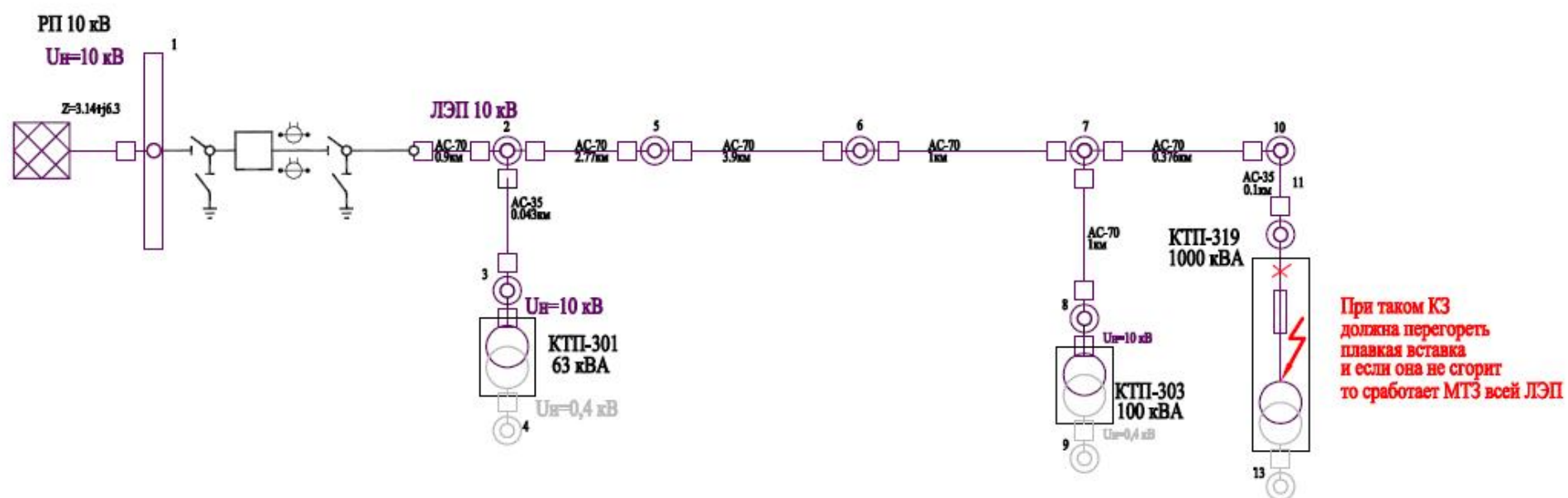
КТП защищаются только плавкими вставками, выдержка времени для МТЗ нашей отходящей линии составит одну ступень селективности, то есть 0,5 секунд.

Как выбрать номинальный ток плавкой вставки предохранителей, защищающих силовой трансформатор в КТП наибольшей мощности и для чего это необходимо?

Это необходимо для согласования защиты силового трансформатора в КТП с нашей защитой (МТЗ).

Иными словами, если КЗ произойдет в зоне действия предохранителя, то сначала должна перегореть плавкая вставка, отключив повреждаемый участок, и лишь в том случае, если перегорания не произойдет, должна сработать МТЗ отходящей линии, отключив при этом всю ЛЭП. Защиты трансформаторов КТП и МТЗ всей ЛЭП должны быть *селективны*.

Данное утверждение иллюстрирует рисунок:



Выбор предохранителя для трансформаторной подстанции



При выборе предохранителей нужно соблюдать следующие условия:

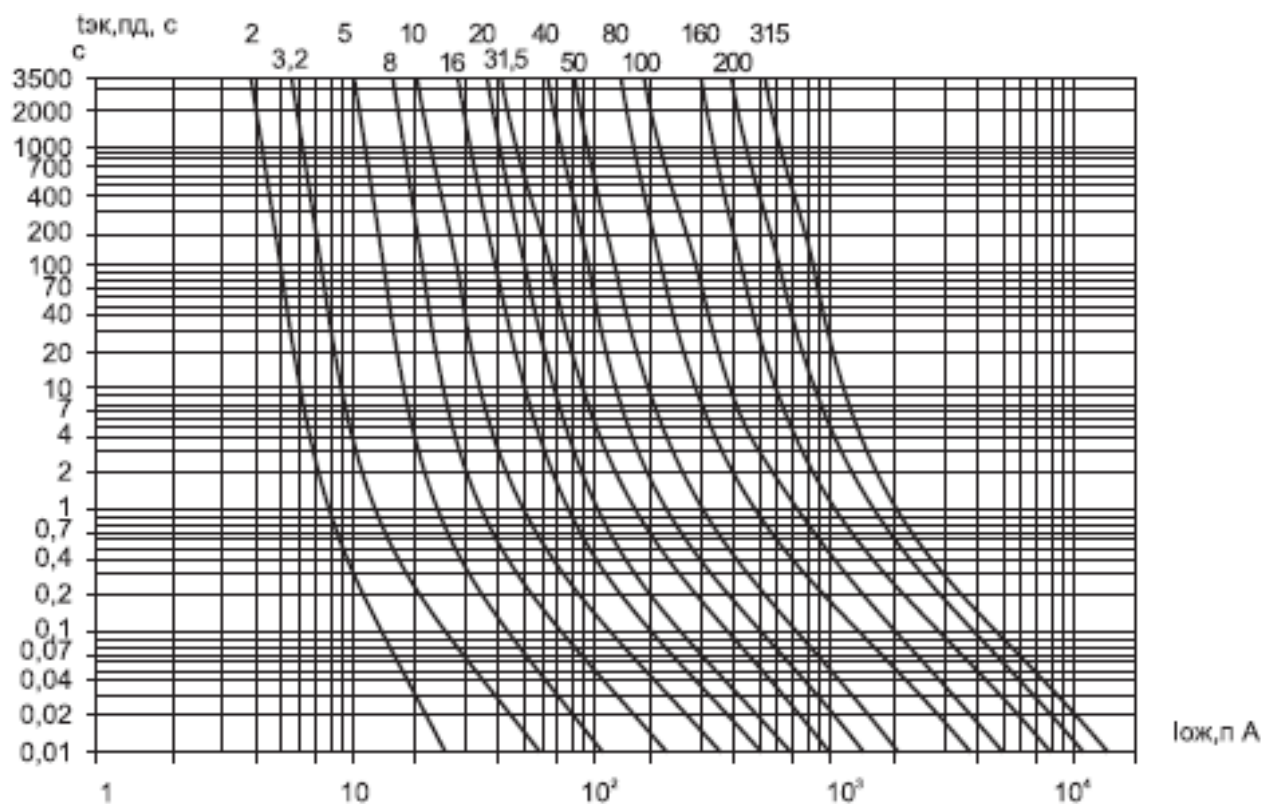
- Предохранитель должен выдержать номинальный ток трансформатора $I_{нт}$ и возможные перегрузки трансформатора $1,3-1,4 I_{нт}$;
- Ток включения обычно $8-12 I_{нт}$ не должен расплавить плавкий элемент быстрее $0,1\text{с}$;
- Ток короткого замыкания должен быть меньше максимального тока отключения и ток короткого замыкания должен быть больше минимального тока отключения предохранителя.



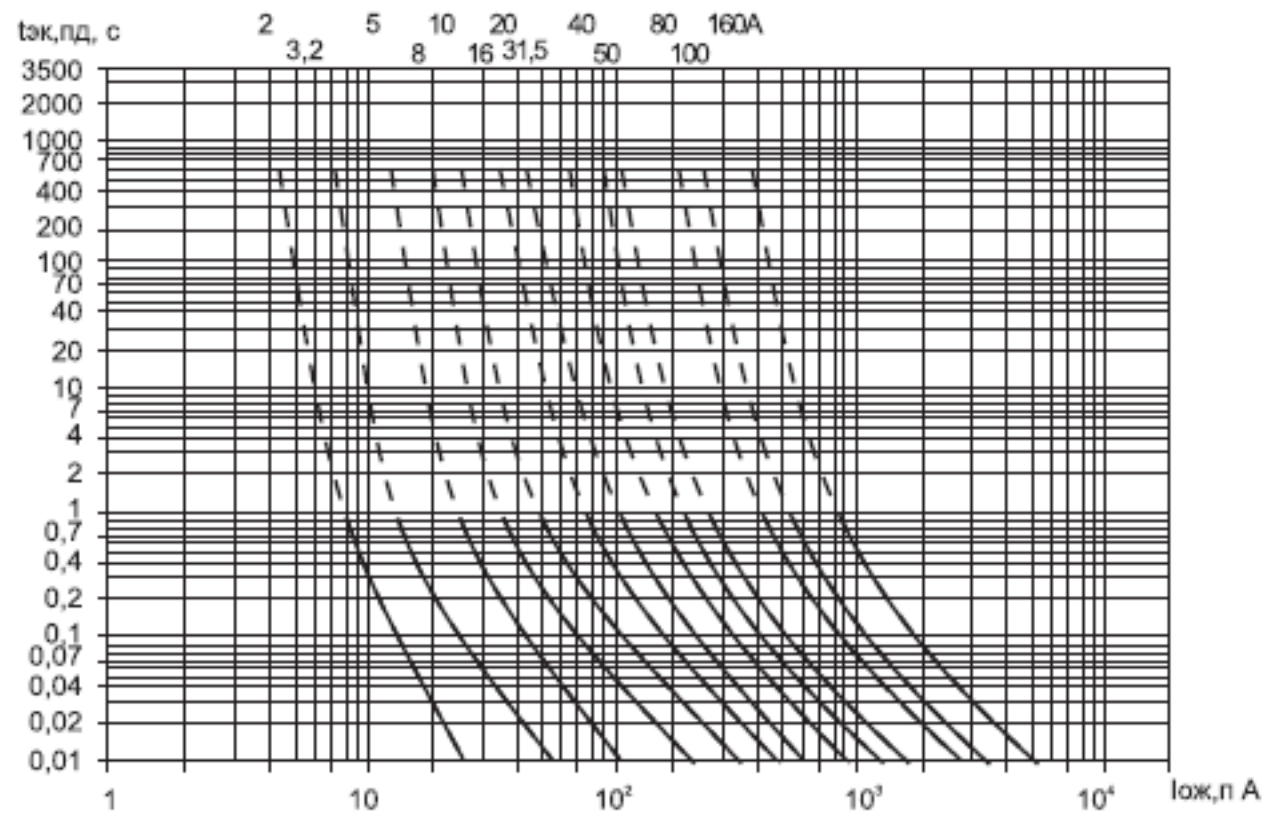
Исходя из этих условий и номинальной мощности трансформатора в таблице приведены рекомендуемые значения номинального тока предохранителя.

Номинальная мощность транс-ра (кВА)	6/7,2 кВ				10/12 кВ			
	Ном. первичный ток транс-ра (А)		Номинальный ток пред-ля		Ном. первичный ток транс-ра (А)		Номинальный ток пред-ля	
	6 кВ	7,2 кВ	IFmin (А)	IFmax (А)	10 кВ	12 кВ	IFmin (А)	IFmax (А)
50	4,8	4,1	10	16	2,9	2,4	6	10
75	7,2	6,2	16	20	4,3	3,6	10	16
100	9,6	8,2	25	32	5,8	4,8	10	16
125	12,1	10,3	32	40	7,2	6	16	20
160	15,4	13,2	40	50	9,2	7,7	20	25
200	19,2	16,4	40	50	11,5	9,6	25	32
250	24,1	20,6	50	63	14,4	12	32	40
315	30,3	26	50	63	18,2	15,2	40	50
400	38,5	33	63	80	23	19,2	50	63
500	48,1	41,2	80	100	28,8	24	50	63
630	60,6	51,9	100	125	36,4	30,3	63	80
800	76,9	66	100	125	46,2	38,5	80	100
1000	96,2	82,5	125	160	57,7	48,1	100	125

Изготовители высоковольтных предохранителей предоставляют их время-токовые характеристики:

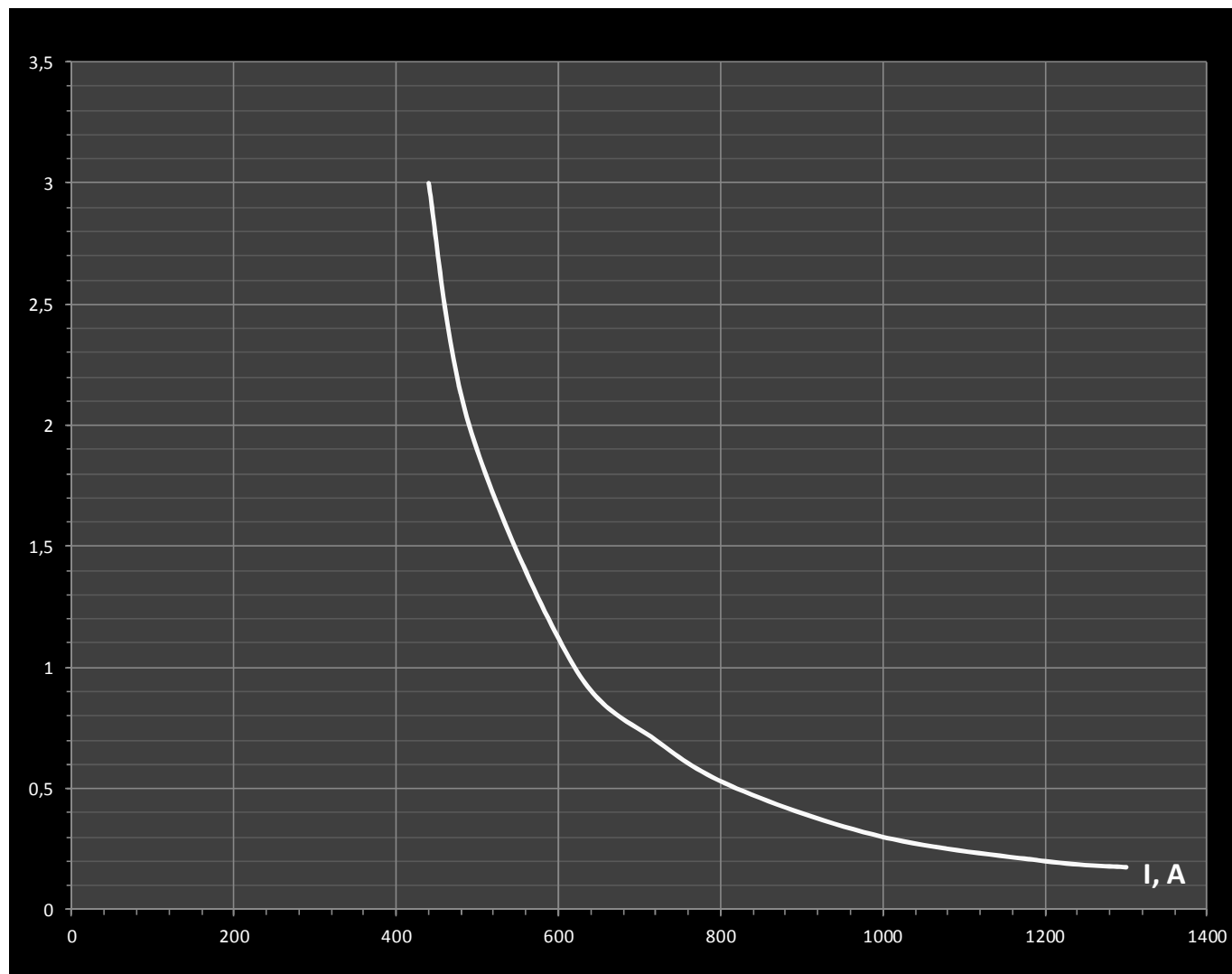


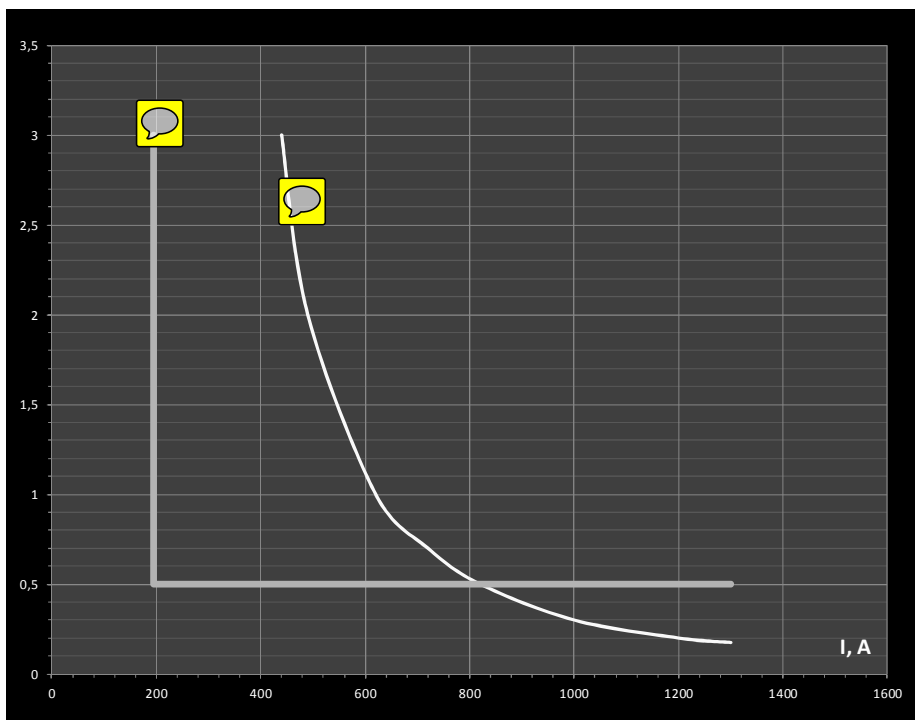
Время-токовые характеристики плавления предохранителей на номинальные токи 2-315 А,
номинальное напряжение 6 кВ



Время-токовые характеристики плавления предохранителей на номинальные токи 2-315 А,
номинальное напряжение 10 кВ

Согласно таблице, номинальный ток плавкой вставки в КТП мощностью 1000 кВА должен быть не менее 100 А. А вот его время-токовая характеристика:



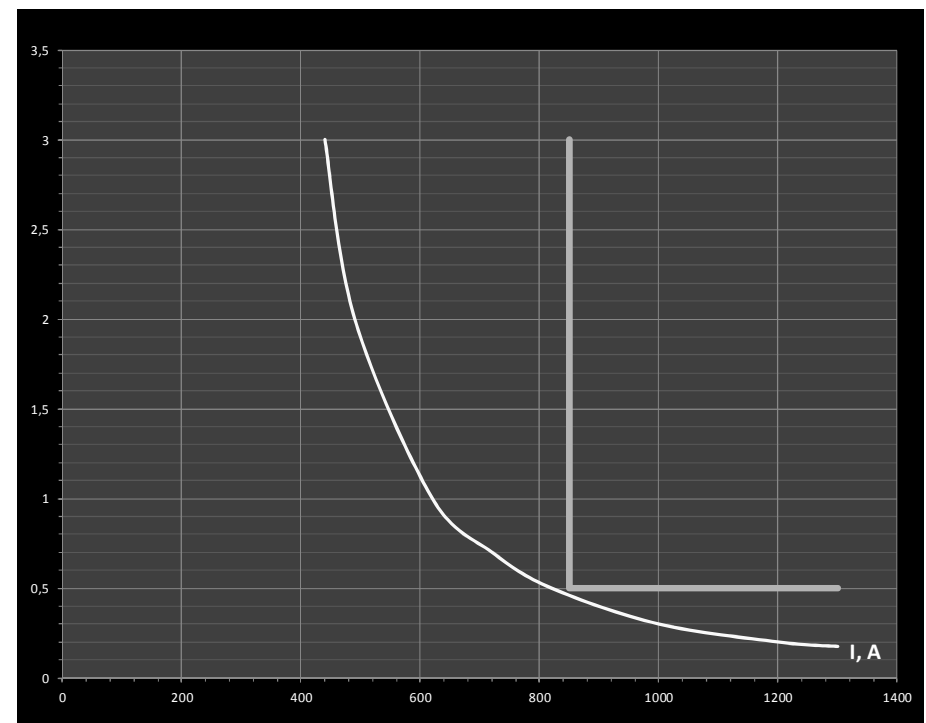


Расчетное значение тока срабатывания МТЗ составит 195 А за время 0,5 с. Сопоставим характеристику отключения ЛЭП и характеристику плавления предохранителя 100 А. Характеристики пересекаются – селективность не обеспечивается. Для того чтобы защиты работали селективно необходимо, чтобы ток срабатывания защиты был не менее 800 А:

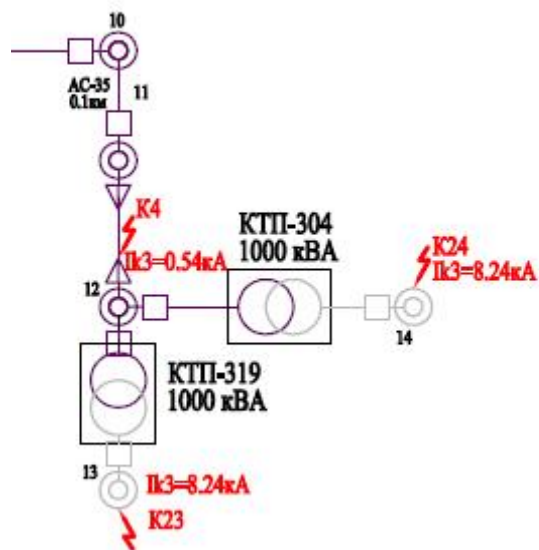
Но в этом случае защита не будет чувствительна к минимальным токам КЗ:

$$K_{\text{ч}}^{\text{MTЗ}} = \frac{I_{\text{Kmin}}}{I_{\text{сз}}^{\text{MTЗ}}} = \frac{460\text{A}}{800\text{A}} < 1,5$$

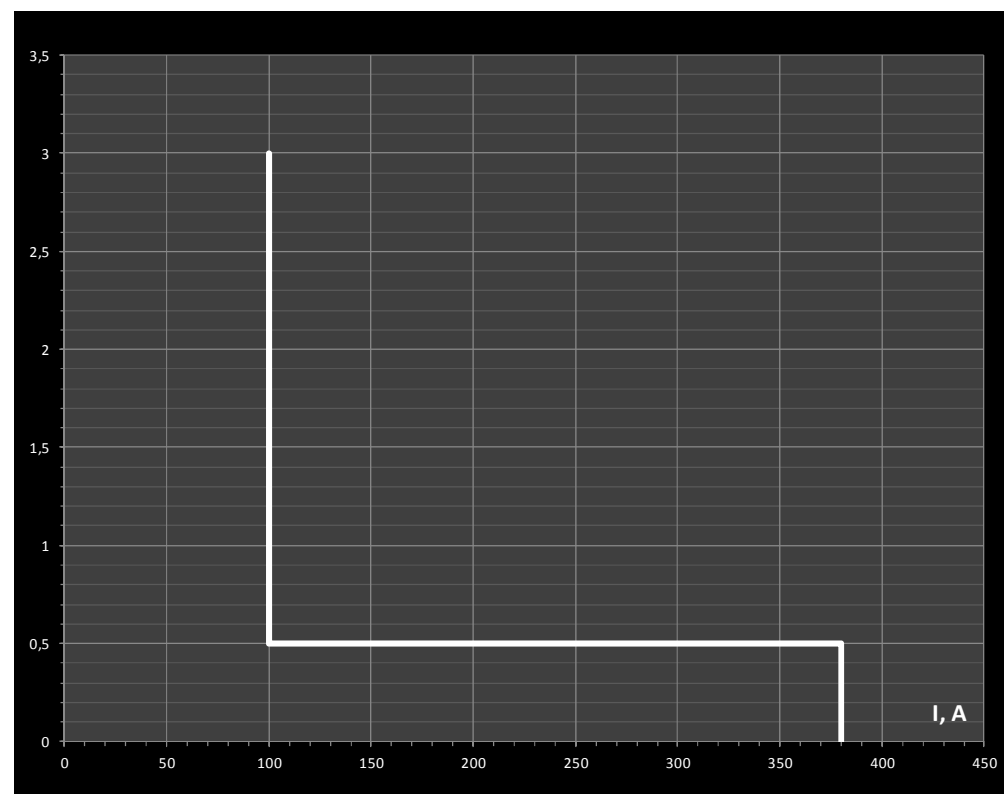
Даже если повысить уставку времени срабатывания защиты до 1 с невозможно подобрать ток срабатывания



так чтоб она была чувствительна . Из этого можно сделать вывод о недопустимости установки на данной ЛЭП КТП мощностью 1000 кВА с предохранителями, которые защищают силовой трансформатор. Необходимо в них устанавливать выключатель и устройства релейной защиты действующие на его отключение. Рассчитаем и выберем токовые защиты для КТП №314 и КТП №319 ЛЭП 10 кВ (расчет производится студентами самостоятельно по формулам (1) – (5)). Результат расчета представлен в таблице и на карте селективности:



	$I_{сз}, A$	$K_{ч}$	t, c
Токовая отсечка (ТО)	380	1,21	0
МТЗ (ТВ)	100	2,9	0,5



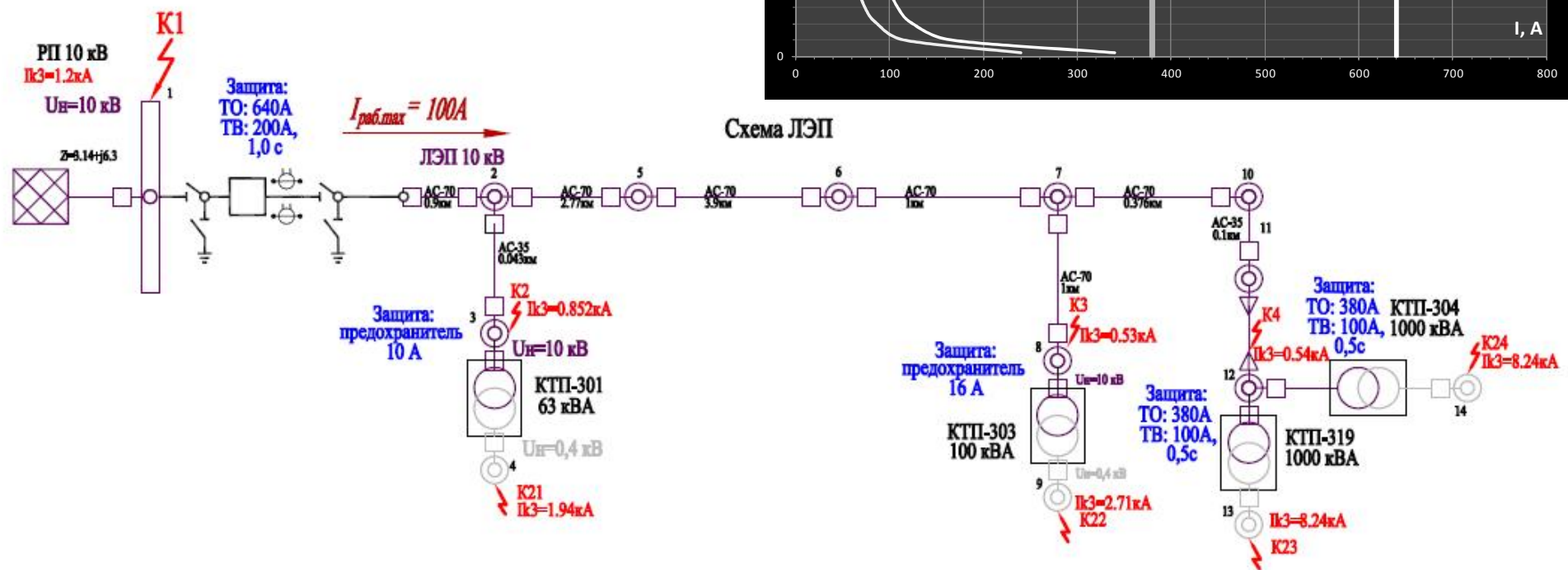
Исходя из условия (5) и согласуясь с защитами всех КТП произведем выбор значения тока срабатывания МТЗ всей линии. Значение $I_{сз} = 200\text{А}$ удовлетворяет условию (5). При этом $Kч=2,3$ что больше 1,5. Значение времени срабатывания защиты определяется из условия:

$$t_{сз}^{МТЗ} = t_{сз\text{пред}} + \Delta t = t_{сз}^{КТП} + 0,5 = 1\text{с}$$

Окончательно выбранные токовые защиты представлены в таблице:

	$I_{сз}, \text{А}$	$Kч$	$t, \text{с}$
Токовая отсечка (ТО)	640	1,63	0
МТЗ (ТВ)	200	2,3	1

Результаты выбора защит и токов срабатывания плавких вставок предохранителей в КТП представлены на схеме. Характеристики срабатывания показаны на карте селективности.



Таким образом, предлагается следующий *порядок расчета и выбора токовых защит ЛЭП 6(10) кВ*:

1. Находится $I_{сз}$ токовой отсечки – сначала по условию (1), а затем отстраивается по условиям (2) и (3). На основании (2) принимается решение о выдержке времени (0 с или 0,1 с) для токовой отсечки.
2. Выбранное значение тока срабатывания отсечки проверяется по чувствительности (выполнение условия (4)).
3. Рассчитывается величина $I_{сз}$ МТЗ по условию (5).
4. Делается анализ распределения защит силовых трансформаторов в КТП по таблицам выбора номинальных токов плавких вставок. *Время-токовые характеристики* плавких вставок являются справочной информацией изготовителей. Строится карта селективности. **Внимание!** В КТП мощностью 1000 кВА рекомендуется отказаться от защиты трансформаторов предохранителями так как практически невозможно настроить МТЗ ЛЭП так, чтобы выполнялись оба условия – и селективности и чувствительности. В таком случае необходимо рассчитать токовые защиты трансформаторов КТП.
5. По карте селективности выбирается значение тока и времени срабатывания МТЗ ЛЭП.

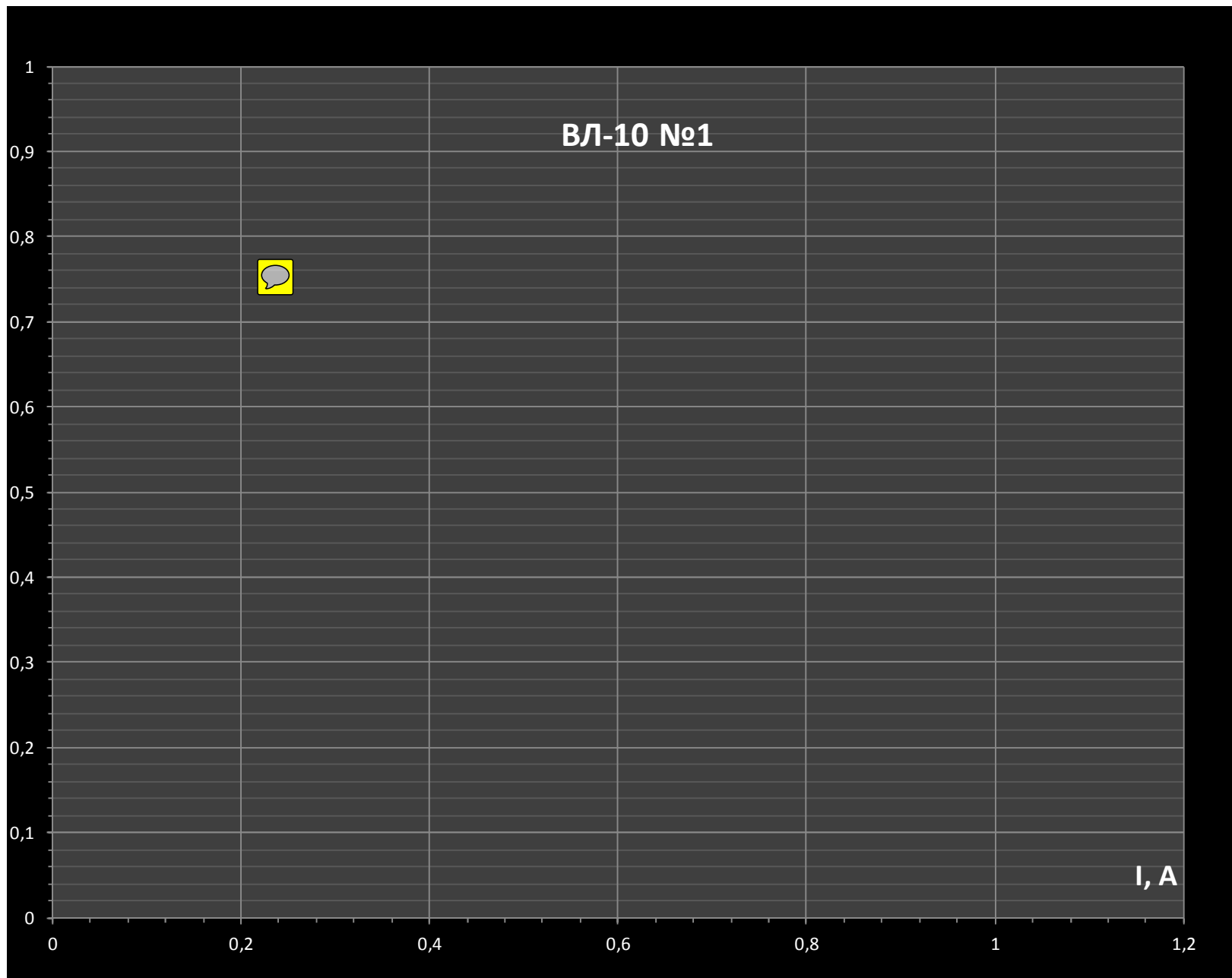
6. Принятое значение тока срабатывания МТЗ ЛЭП проверяется по условию чувствительности к минимальному току КЗ ЛЭП:

$$K_{\text{ч}}^{\text{МТЗ}} = \frac{I_{\text{Кmin}}}{I_{\text{сз}}^{\text{МТЗ}}} \geq 1,5$$

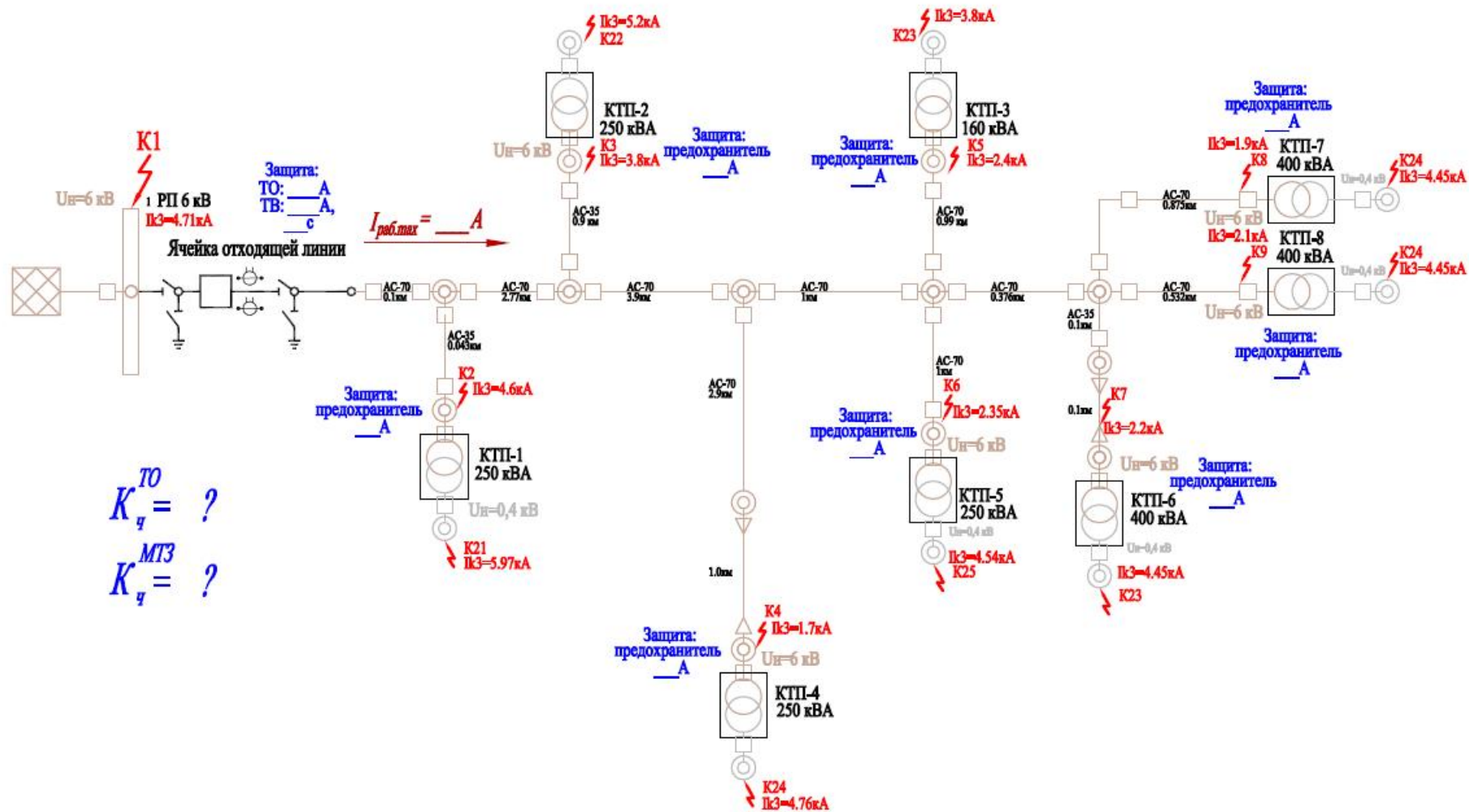
Далее студентам предлагается самостоятельно выбрать уставки токовых защит и построить карты селективности для ЛЭП 6(10) кВ, параметры которых были рассчитаны на предыдущих занятиях.

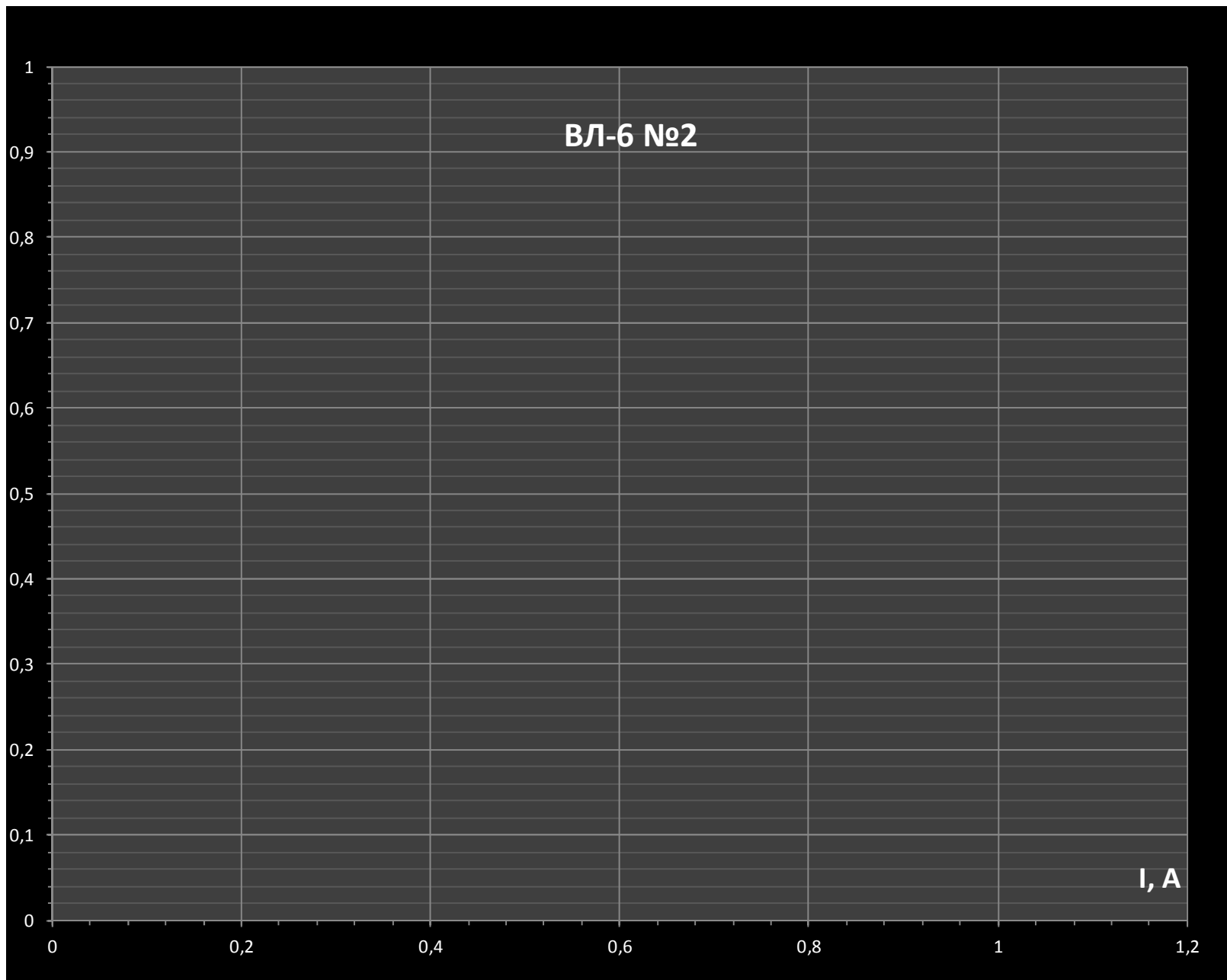
ВЛ-10 №1



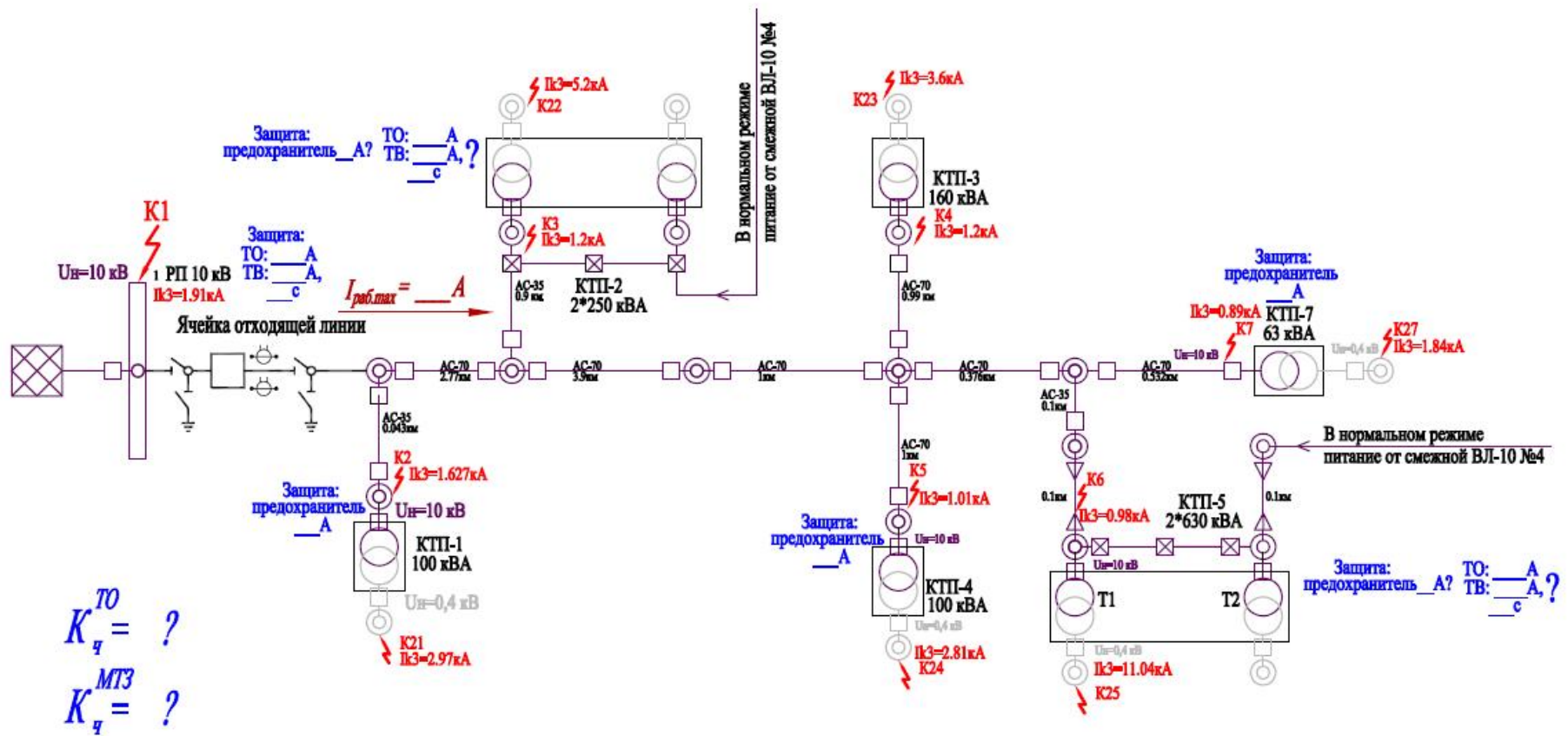


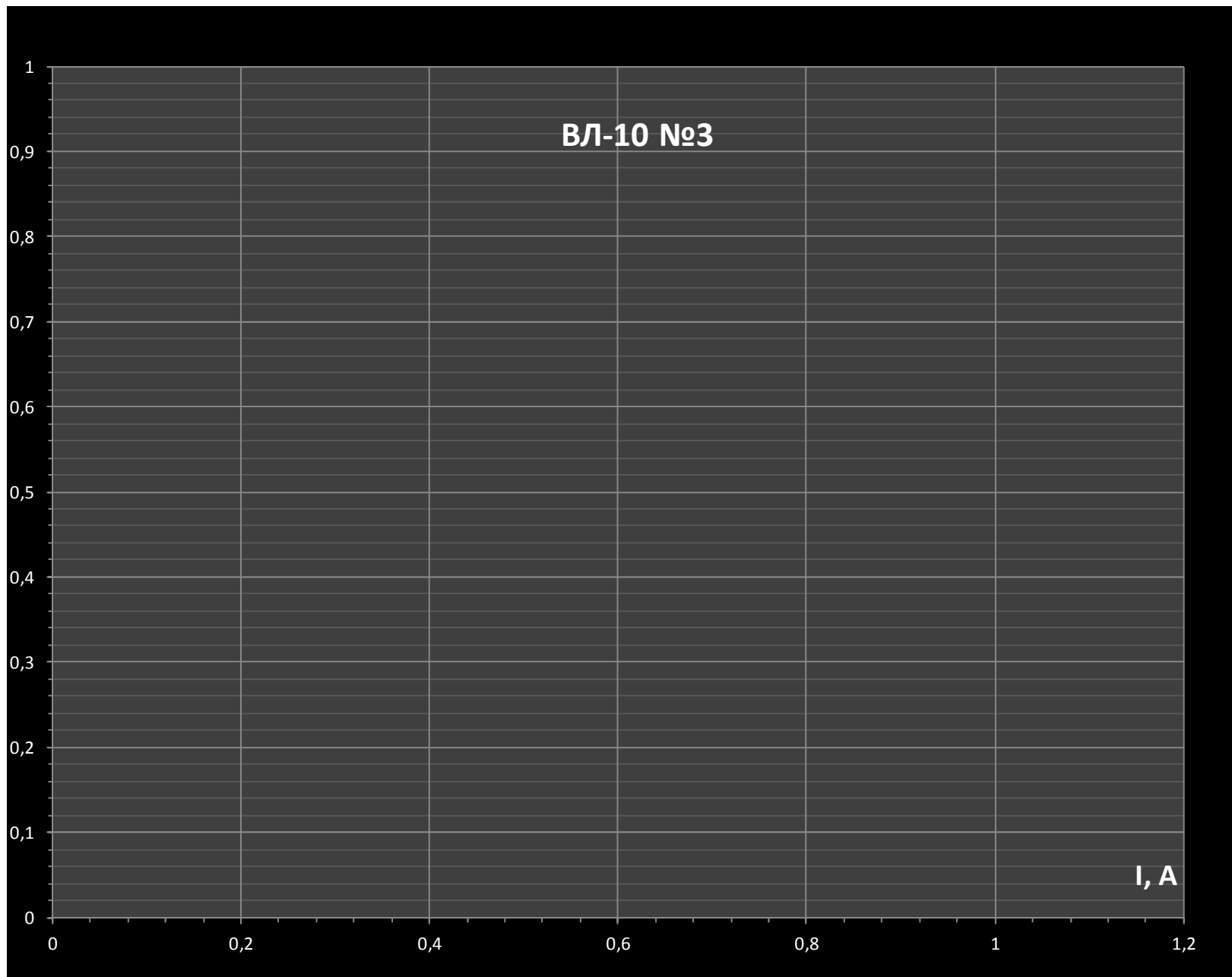
ВЛ-6 №2



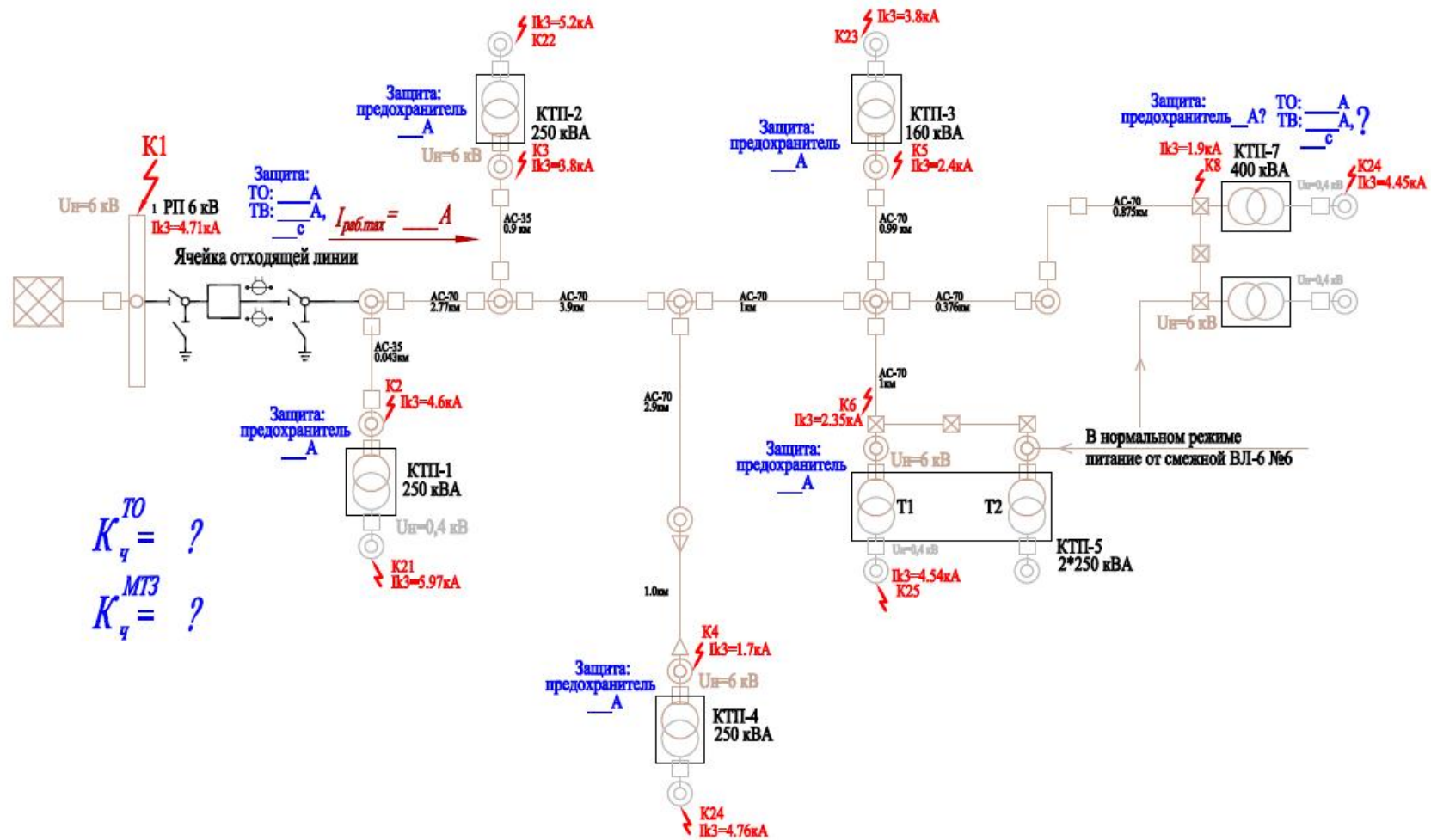


ВЛ-10 №3



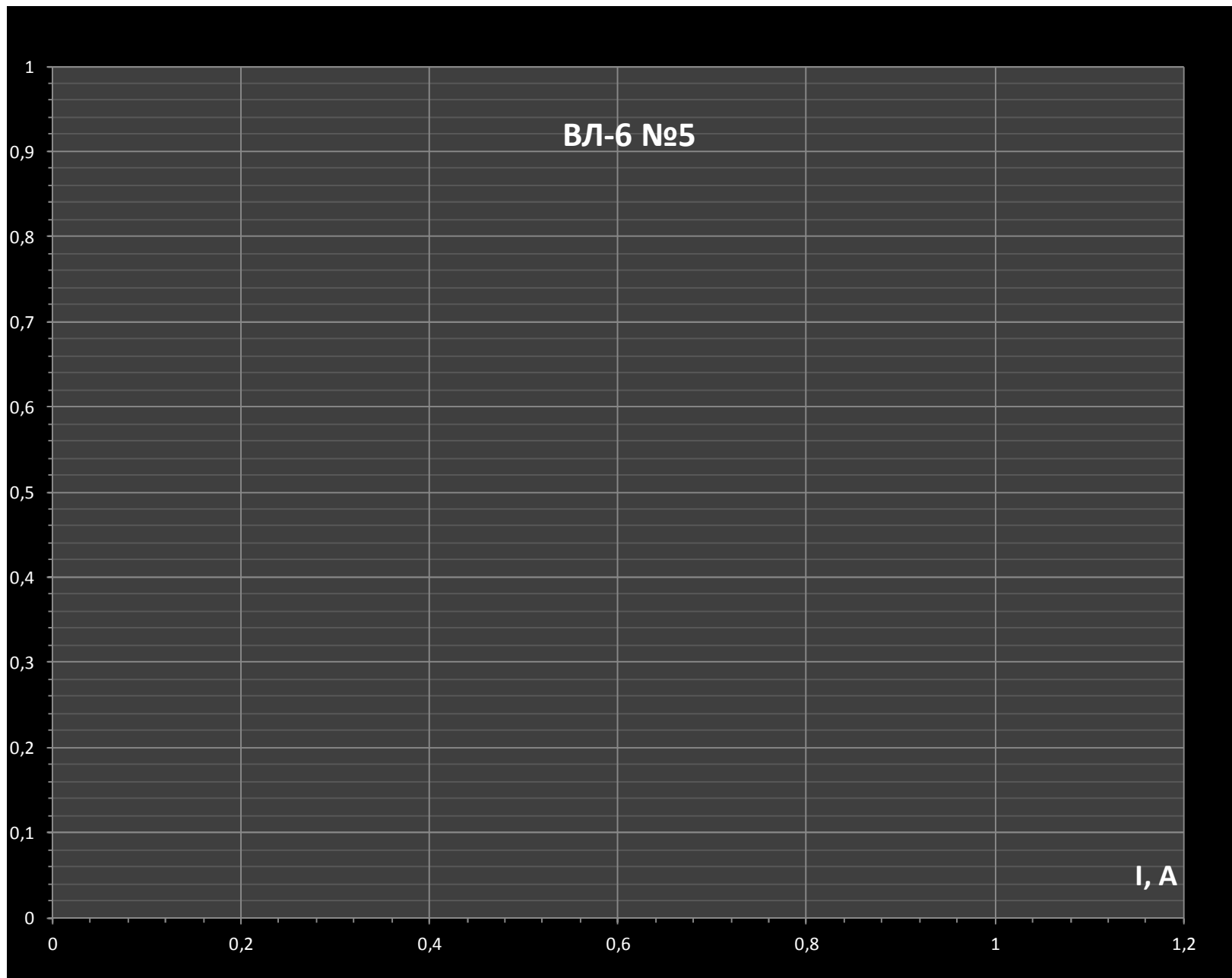


ВЛ-6 №5



$$K_q^{TO} = ?$$

$$K_q^{MTЗ} = ?$$



Как рассчитать и получить значение $I_{ср}$ (ток срабатывания реле)?

Напомним, что

$$I_{ср} = \frac{K_{сх} * I_{сз}}{K_I}$$

Иными словами, для того чтобы подобрать само реле, установить в нем уставку по току

срабатывания необходимо при $K_{сх}=1$ знать значение K_I , то есть *выбрать трансформаторы тока*.

Методике выбора трансформаторов тока посвящена следующая презентация.