

A photograph of a high-voltage electrical substation. The scene is dominated by tall, rusted metal lattice towers and cross-arms. Several large, multi-tiered ceramic insulators are mounted on the towers, supporting high-voltage power lines. The background shows a clear blue sky and a flat, open landscape with some distant structures. The text is overlaid in the center of the image.

Фомина З.А.
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИИ
ПО КУРСУ
«Релейная защита»

ТЕМА

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Основные требования, предъявляемые к релейной защите

Основные органы релейной защиты

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные органы

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

3. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

4. КЛАССИФИКАЦИЯ РЗ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИХ ДЕЙСТВИЯ

5. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

6. ЗАЩИТЫ ПОНИЖАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

7. ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

8. ЗАЩИТА ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

9. ЗАЩИТА ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

10. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

В системе энергоснабжения возможны следующие режимы работы энергетического оборудования и электрических сетей:

1. Нормальный режим: $I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$, $t_{\text{раб}} \rightarrow \infty$;
2. Ненормальный режим (перегрузка): $I_{\text{раб}} > I_{\text{ном}}$, $t_{\text{раб}}$ ограничено;
3. Аварийный: $I_{\text{раб}} \gg I_{\text{ном}}$, $t_{\text{раб}} \rightarrow 0$.

Основные требования, предъявляемые к релейной защите

К релейной защите предъявляются следующие основные требования:

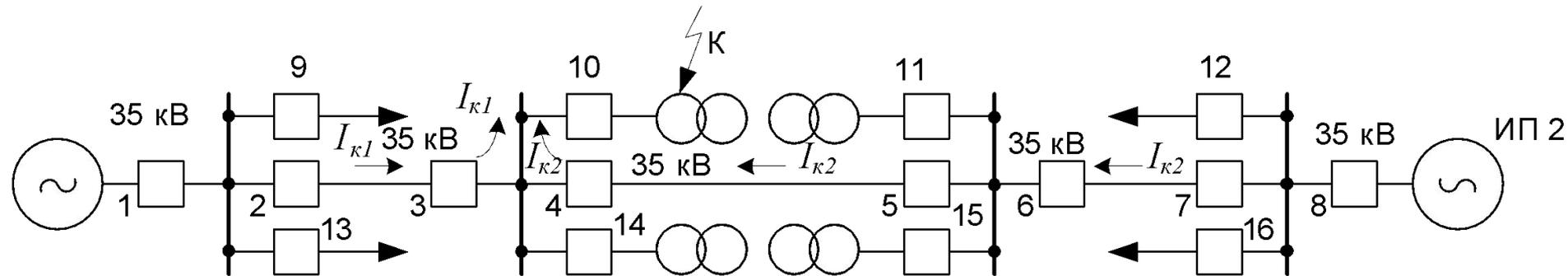
- 1. Быстродействие;**
- 2. Селективность;**
- 3. Чувствительность;**
- 4. Надежность.**

Быстродействие— это свойство релейной защиты отключать повреждение с минимально возможной выдержкой времени. Быстрое отключение поврежденного оборудования или участка электрической установки предотвращает или уменьшает размеры повреждений, сохраняет нормальную работу потребителей неповрежденной части установки. Длительное протекание тока короткого замыкания может привести к повреждению неповрежденных участков оборудования, линий, трансформаторов, по которым протекает ток короткого замыкания из-за термического перегрева оборудования. Допустимое время протекания тока через оборудование, не вызывающее его повреждения указываются в ГОСТах на оборудование.

Для обеспечения устойчивости параллельной работы генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, по которым осуществляется параллельная работа и все другие части электрической установки или электрической сети должны оснащаться быстродействующей релейной защитой. Современные устройства быстродействующей релейной защиты имеют время действия 0,02–0,1 сек. Для распределительных сетей такое быстродействие необязательно. Оно определяется термической устойчивостью, но и в этом случае следует стремиться к минимально возможной выдержке времени. Время срабатывания быстродействующей ступени защиты должно составлять 0,05–0,1 сек.

Селективность (избирательность)

Селективностью называется способность релейной защиты выявлять место повреждения и отключать его только ближайшими к нему выключателями. Все неповрежденные элементы и участки электросети остаются в работе. При одностороннем питании должен отключаться ближайший от поврежденного элемента выключатель, а при двустороннем – ближайшие от него с двух сторон выключатели. При КЗ в точке К должен отключиться выключатель 10, а выключатели 1 – 8 должны остаться включенными, несмотря на прохождение через элементы этих цепей токов КЗ $I_{к1}$ и $I_{к2}$. Отключение других выключателей привело бы к прекращению электроснабжения приемников электроэнергии, не имеющих повреждений. Для несложных сетей и электроустановок избирательность достигается настройкой релейной защиты на срабатывание при различных токах и времени.



Чувствительность – это свойство защиты надежно срабатывать при КЗ в конце защищаемого участка в минимальном режиме работы системы.

Защита должна обладать такой чувствительностью к тем видам повреждений и нарушений нормального режима работы в данной электрической установке или электрической сети, на которые она рассчитана, чтобы было обеспечено ее действие в начале возникновения повреждения, чем сокращаются размеры повреждения оборудования в месте КЗ.

Чувствительность защиты должна также обеспечивать ее действие при повреждениях на смежных участках. Так, например, если при повреждении в точке **К** по какой-либо причине не отключится выключатель 10, то должна подействовать защита следующего к источникам питания выключателям 3 и 4 и отключить этот выключатель. Такое действие защиты называется дальним резервированием смежного или следующего участка.

Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности, определяемым как отношение минимального значения контролируемой величины (например, тока) при КЗ в конце защищаемого участка к величине тока срабатывания (уставке) защиты:

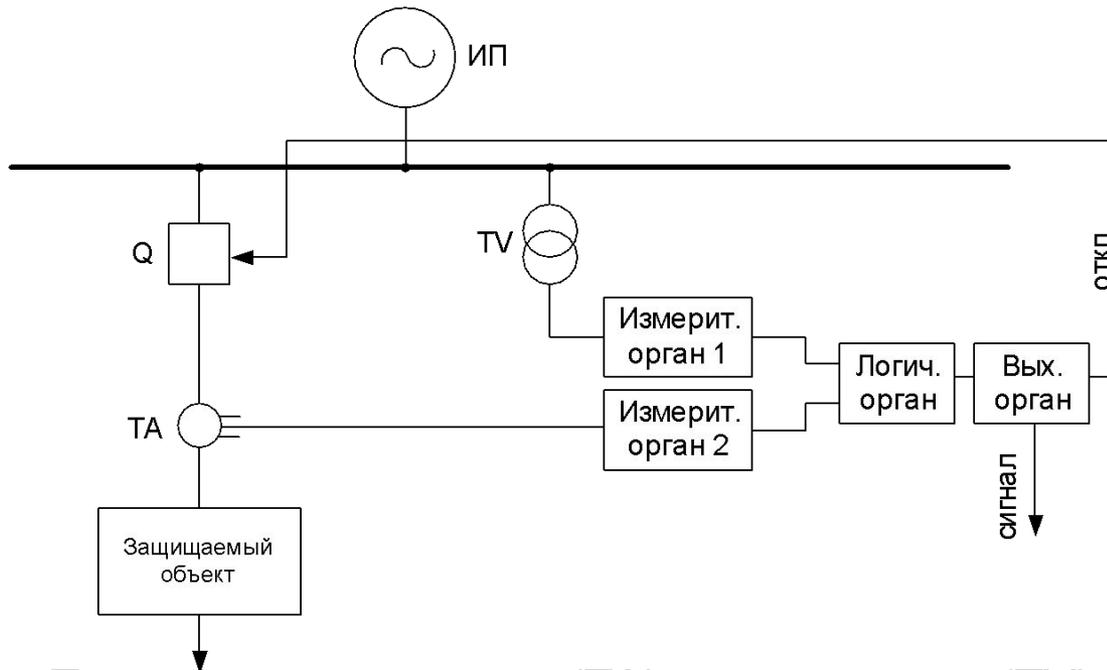
$$K_u = \frac{I_{к min}}{I_{cp}} \quad (K_u > 1)$$

Коэффициенты чувствительности нормируются в ПУЭ, и величина их составляет для КЗ в защищаемой зоне $K_{\psi} = 1,5$; в зоне резервирования – $K_{\psi} = 1,2$; для быстродействующих дифференциальных защит $K_{\psi} = 2$. Ток срабатывания защиты должен быть меньше тока короткого замыкания на величину определяемую коэффициентом чувствительности (K_{ψ}). Уставка по напряжению и сопротивлению должна быть больше параметров напряжения и сопротивления срабатывания на такую же величину. Коэффициент чувствительности учитывает погрешности реле, расчета параметров, влияние переходного сопротивления и электрической дуги в месте КЗ

Надежность – это свойство защиты гарантированно выполнять свои функции на протяжении всего периода эксплуатации. Защита должна правильно и безотказно действовать на отключение выключателей оборудования при всех его повреждениях и нарушениях нормального режима работы, для действия при которых она предназначена, и не действовать в нормальных условиях, а также при таких повреждениях и нарушениях нормального режима работы, при которых действие данной защиты не предусмотрено, и должна действовать другая защита. Требование надежности обеспечивается совершенством принципов защиты и конструкций аппаратуры, добротностью деталей, простотой выполнения, а также уровнем эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ОРГАНЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

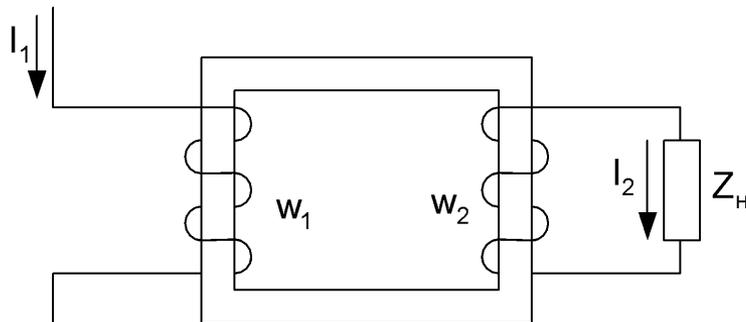
Структурная схема релейной защиты



1. Трансформаторы тока (ТА) и напряжения (TV), с выходов которых снимаются показания тока и напряжения в цепи защищаемого объекта (ЗО);
2. Измерительные органы, которыми, как правило, являются релейные элементы;
3. Логические органы, осуществляющие логические операции с сигналами от измерительных органов;
4. Выходной орган, формирующий сигналы на отключение выключателя (Q) и индикацию срабатывания защиты.

Трансформаторы тока (ТТ или ТА) применяют в установках напряжением до 1000 В и выше. Они относятся к измерительным трансформаторам и предназначены для расширения предела измерения измерительных приборов (органов РЗ), а в высоковольтных цепях, кроме того, - для изоляции приборов и реле от высокого напряжения. Благодаря им приборы для измерения тока и реле не только изолируются от высоковольтной цепи, но могут быть удалены от нее на значительное расстояние и сосредоточены на щите управления.

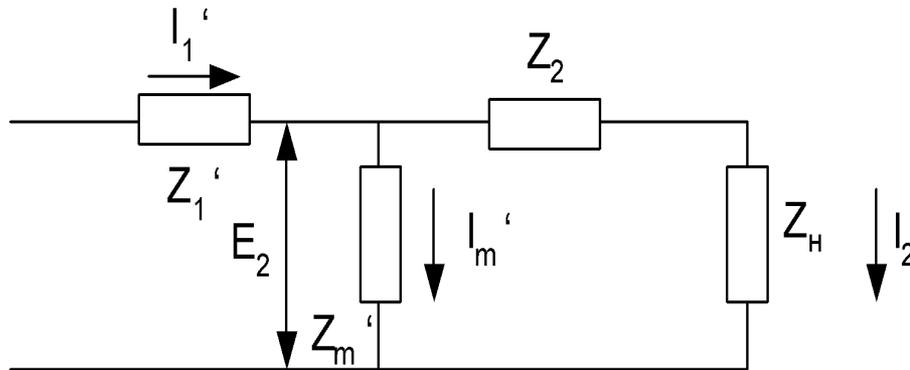
Трансформаторы тока изготовляют с расчетом получить во вторичной обмотке ток 1А или 5А при номинальном токе в первичной обмотке. Трансформатор тока состоит из замкнутого магнитопровода, первичной обмотки W_1 , включаемой последовательно в высоковольтную цепь для контролирования тока I_1 , и вторичной обмотки W_2 , к которой присоединяют нагрузку Z_H , представляющую собой сумму сопротивлений последовательно включенных обмоток реле, измерительных приборов и соединительных проводов.



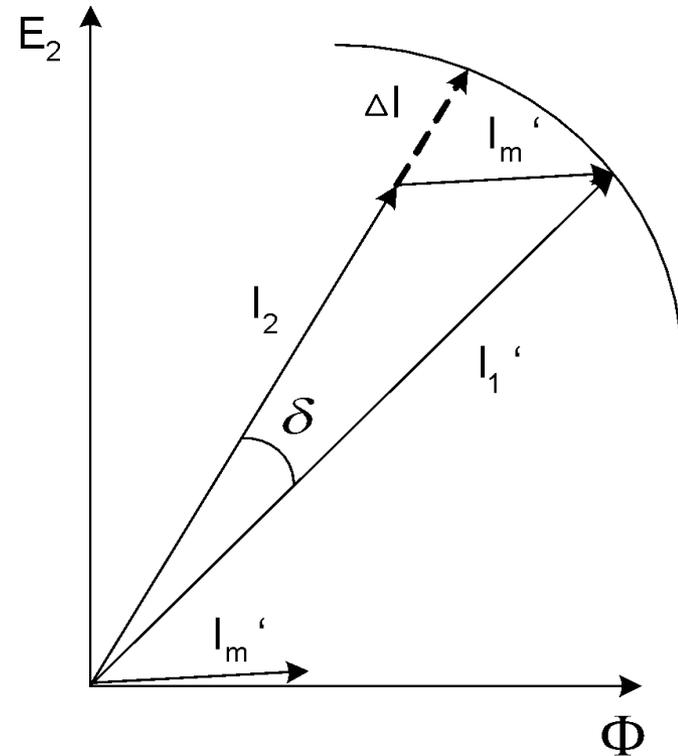
Нормальным для ТТ является режим работы с малым сопротивлением вторичной цепи, т.е. режим КЗ. При этом не допускается размыкание цепи вторичной обмотки, поскольку тогда весь первичный ток становится намагничивающим и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора резко увеличивается, что приводит к насыщению магнитопровода, возрастанию в нем потерь и недопустимому нагреву изоляции обмоток. Кроме того, на разомкнутой вторичной обмотке появляются опасные для людей и изоляции пики напряжения в несколько тысяч вольт.

Векторная диаграмма ТТ

Схема замещения трансформатора тока



Сопротивления Z_1' и Z_m' приведены ко вторичной обмотке



Вторичный ток отличается от приведенного первичного по абсолютному значению на токовую погрешность $\Delta I = I_1' - I_2$ и по фазе на угловую погрешность δ , которые определяют искажение формы кривой вторичного тока, что может явиться причиной отказа срабатывания некоторых видов измерительных органов, применяемых в РЗ. Для правильной работы большинства ее устройств в установившемся режиме погрешность по току не должна превышать 10%, а погрешность по углу 7° . Угловая погрешность возрастает с увеличением нагрузки вторичной обмотки.

Трансформаторы тока (ТА)

Как и любой измерительный прибор, ТА дает погрешность в измерении, определяемую из выражения, %,

$$\Delta I = \frac{K_{ТА} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100$$

где $K_{ТА}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока равный

$$K_{ТА} = \frac{I_{1ном}}{I_{2ном}}$$

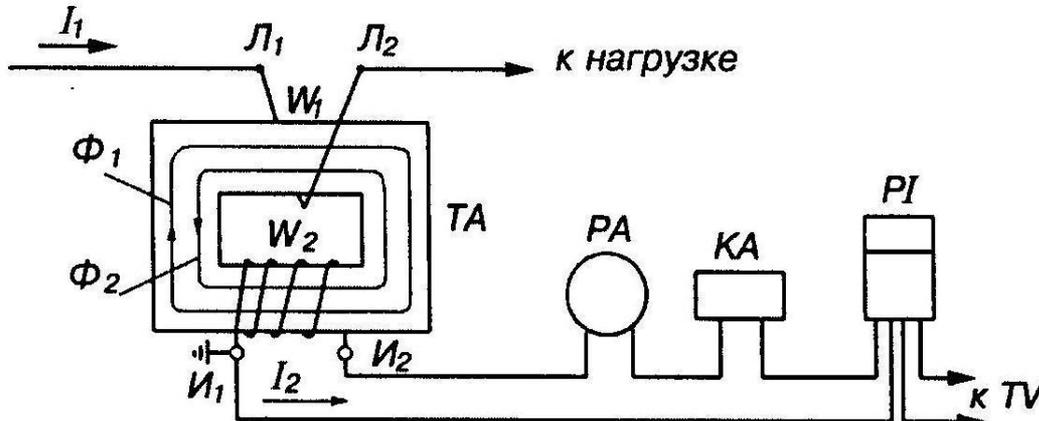


Схема включения трансформатора тока и подключения к нему приборов

Предельно допустимые погрешности трансформаторов тока

Класс точности	Наибольшая погрешность	
	Токовая, %	Угловая, мин
0,2	± 0,2	± 10
0,5	± 0,5	± 30
1	± 1	± 60
3	± 3	не нормируется
10	± 10	не нормируется

Требования к классам точности трансформаторов тока ГОСТ 7746—2001.

Класс точности	Первичный ток, % от номинального значения	Предел допускаемой погрешности			Предел вторичной нагрузки, % от номинального значения
		токовой, %	угловой		
0,1	5	±0,4	±15'	±0,45 срад	25-100
	20	±0,2	±8'	±0,24 срад	
	100-120	±0,1	±5'	±0,15 срад	
0,2	5	±0,75	±30'	±0,9 срад	
	20	±0,35	±15'	±0,45 срад	
	100-120	±0,2	±10'	±0,3 срад	
0,2S	1	±0,75	±30'	±0,9 срад	
	5	±0,35	±15'	±0,45 срад	
	20	±0,2	±10'	±0,3 срад	
	100	±0,2	±10'	±0,3 срад	
	120	±0,2	±10'	±0,3 срад	
0,5	5	±1,5	±90'	±2,7 срад	
	20	±0,75	±45'	±1,35 срад	
	100-120	±0,5	±30'	±0,9 срад	
0,5S	1	±1,5	±90'	±2,7 срад	
	5	±0,75	±45'	±1,35 срад	
	20	±0,5	±30'	±0,9 срад	
	100	±0,5	±30'	±0,9 срад	
	120	±0,5	±30'	±0,9 срад	

Погрешность зависит от загрузки первичного тока. Чем выше полнее загрузка- тем выше точность.

Для коммерческого учета, как правило, применяют обмотки с классами точности 0,5S и 0,2S. Буква "S" обозначает, что трансформатор тока проверяется по пяти точкам от 1% до 120% (1-5-20-100-120) от номинального тока. Обмотки классов точности 1, 0,5, 0,2 проверяются лишь в четырех точках: 5-20-100-120% от номинального тока.

Для релейной защиты используют обмотки с классами точности 10P или 5P и проверяют данные обмотки в трех точках: 50-100-120% от номинального тока трансформатора. Такие обмотки соответствуют классу точности «3».

Отечественные трансформаторы тока имеют следующие обозначения:

первая буква в обозначении «Т» — трансформатор тока

вторая буква — разновидность конструкции:

«П» — проходной,

«О» — опорный,

«Ш» — шинный,

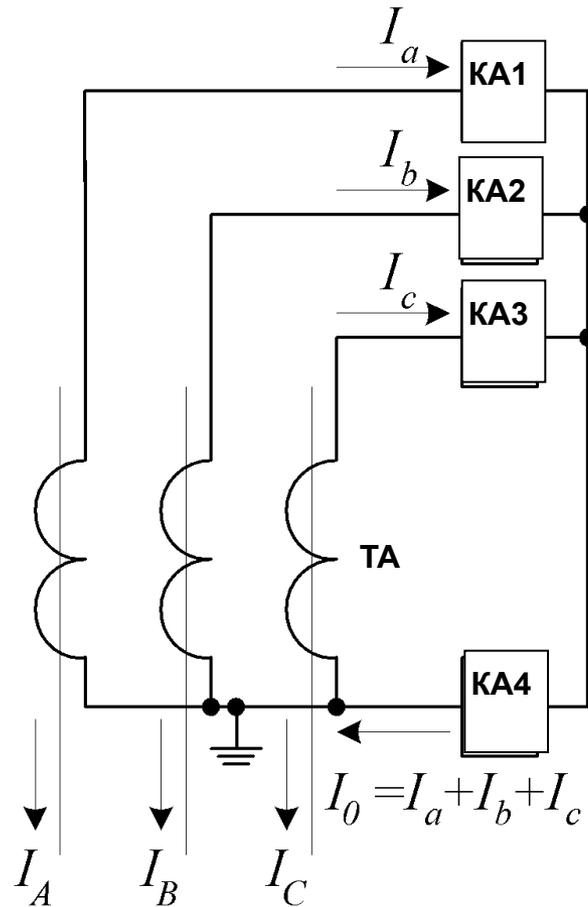
«Ф» — в фарфоровой крышке

третья буква — материал изоляции: «М» — масляная, «Л» — литая изоляция, «Г» — газовая (элегаз).

Далее через тире пишется класс изоляции трансформатора тока, климатическое исполнение и категория установки. Например: ТПЛ — 10УХЛ4 100/5А: «трансформатор тока проходной с литой изоляцией с классом изоляции 10 кВ, для умеренного и холодного климата, категории 4 с коэффициентом трансформации 100/5» (читается как «сто на пять»).

Основные схемы соединения трансформаторов тока и обмоток реле тока

Схема соединения ТТ в «звезду»



Данная схема применяется для защит, реагирующих на все виды однофазных и многофазных КЗ.

Схема соединения ТТ в «неполную звезду»

Данная схема применяется в сетях с изолированной нейтралью только для защит от междуфазных замыканий. Для защиты трехфазных электрических сетей и трансформаторов со схемой соединения обмоток Δ/Δ можно применять соединения ТТ в неполную звезду с двумя реле (в обратный провод реле не включается).

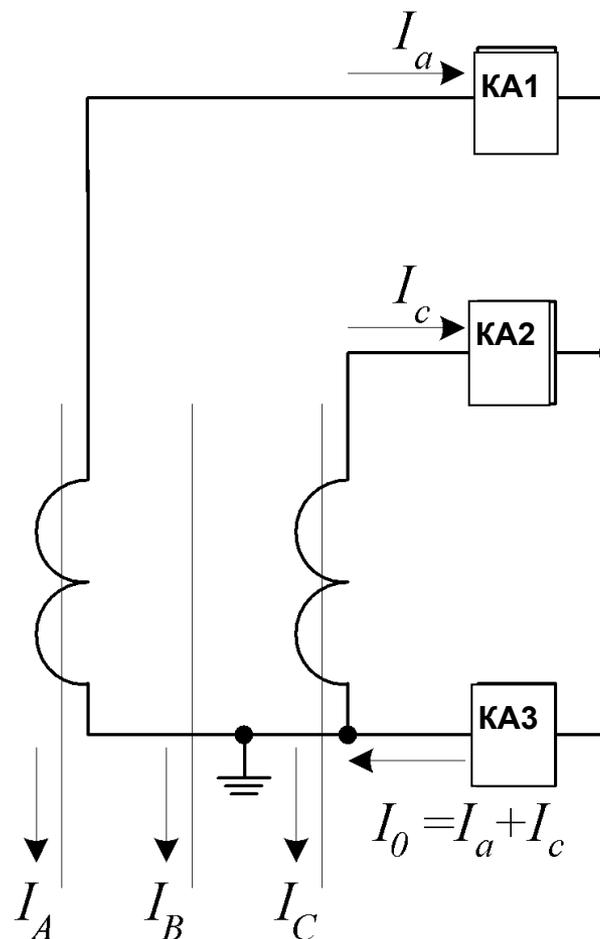
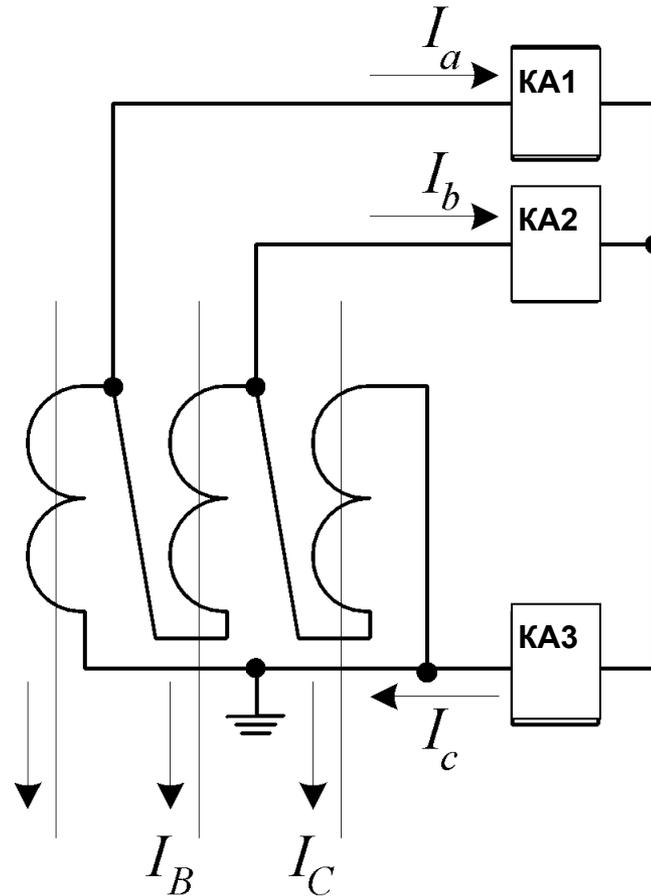
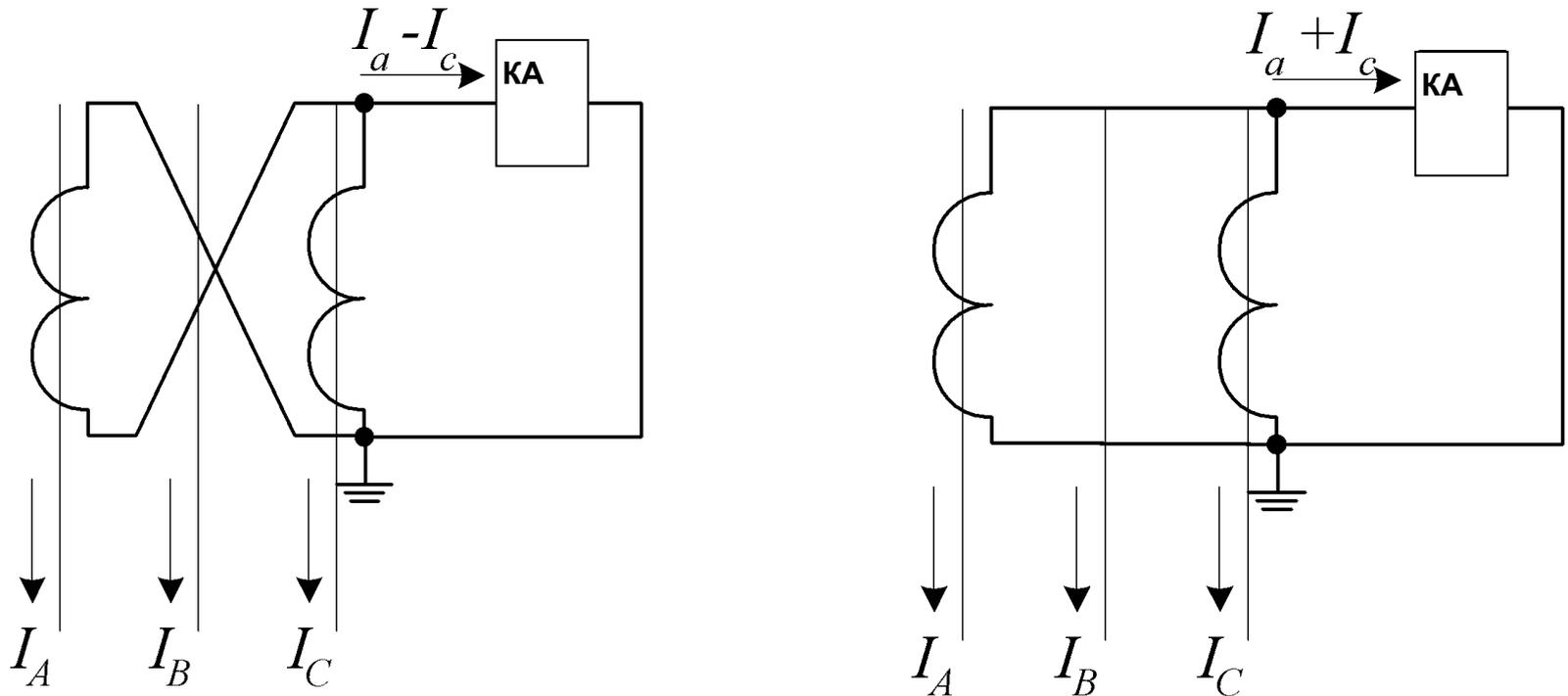


Схема соединения ТТ в «треугольник»



Данная схема применяется для защит, реагирующих на все виды однофазных и многофазных КЗ. Больше всего эта схема применяется для дифференциальных защит трансформатора.

Схема соединения ТТ на «разность токов двух фаз» (а) и на «сумму токов двух фаз» (б):



Данные схемы применяются для защит, реагирующих на трехфазные и двухфазные КЗ.

При определении расчетного тока I_p , протекающего через обмотку реле, необходимо учитывать коэффициент схемы (K_{cx}) равный

$$K_{cx} = \frac{I_{2нагр}}{I_{2ТА}}$$

где $I_{2нагр}$ – ток в обмотке реле, А;

$I_{2ТА}$ – ток во вторичной обмотке ТТ той же фазы.

Трансформаторы напряжения (ТН или TV)

Трансформаторы напряжения (TV) применяют для измерения напряжения в электроустановках напряжением свыше 1000 В. Они предназначены для изоляции цепей обмоток вольтметров, счетчиков, реле и других приборов от сети первичного напряжения и понижение первичного напряжения до величины удобной для питания приборов.

Вследствие потерь напряжения в обмотках от намагничивающего тока и тока нагрузки TV дают при измерении погрешности, которые тем больше, чем больше ток намагничивания и ток во вторичной цепи. Для уменьшения погрешности применяют обмотки с малым индуктивным и активным сопротивлениями, а для магнитопровода с целью уменьшения тока намагничивания применяют специальную сталь, имеющую повышенное значение коэффициента магнитной проницаемости.

Нагрузку, присоединяемую ко вторичной обмотке, ограничивают определенным значением, чтобы погрешность не превышала допускаемой. Погрешность в измерении напряжения, %, определяется выражением

$$\Delta U = \frac{K_{TV} \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100$$

где K_{TV} – коэффициент трансформации трансформатора напряжения равный:

$$K_{TV} = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}$$

Трансформаторы напряжения (ТН)



Схема подключения приборов и реле к сети через однофазный трансформатор напряжения

Предельно допустимые погрешности трансформаторов напряжения.

Класс точности	Предел допускаемой погрешности	
	напряжения, %	угловой
0,1	$\pm 0,1$	± 5 мин $\pm 0,15^\circ$
0,2	$\pm 0,2$	± 10 мин $\pm 0,3^\circ$
0,5	$\pm 0,5$	± 20 мин $\pm 0,6^\circ$
1,0	$\pm 1,0$	± 40 мин $\pm 1,2^\circ$
3,0	$\pm 3,0$	Не нормируют
ЗР	$\pm 3,0$	± 120 мин $\pm 3,5^\circ$
6Р	$\pm 6,0$	± 240 мин $\pm 7,0^\circ$

ГОСТ 1983-2001

ТН для измерения, имеют классы точности, : 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0.

ТН для защиты- классы точности ЗР или 6Р.

Один и тот же TV может работать в различных классах точности.

Высшему классу точности соответствует наименьшая нагрузка вторичной обмотки, с повышением нагрузки класс точности снижается. Высший класс точности TV является номинальным, а нагрузка вторичной обмотки, при которой погрешность его не превышает установленной для этого класса точности, называется номинальной мощностью.

Обозначения типов сухих и масляных измерительных трансформаторов напряжения состоят из букв и цифр:

например, НОС-0,5; НОАУ 35-66; ЗНОМ-35-65; НТМИ-10; НКФ-110-58

Н — напряжение,

О — однофазный,

Т — трехфазный,

М — масляный,

К — каскадный или с компенсационной обмоткой,

З — с заземленным вводом высшего напряжения,

И — с обмоткой для контроля изоляции,

Ф — в фарфоровом корпусе;

первая цифра после букв обозначает напряжение, вторая — год разработки.

На щитках трансформатора дробью указывают:

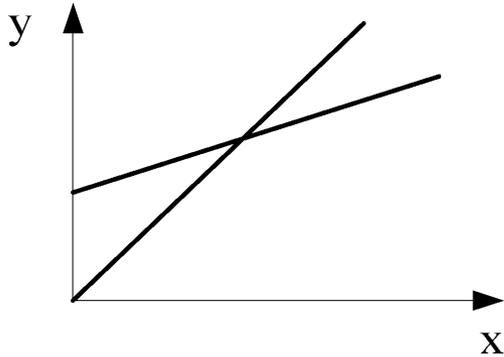
в числителе — типовую мощность, кВА;

в знаменателе — напряжение, кВ.

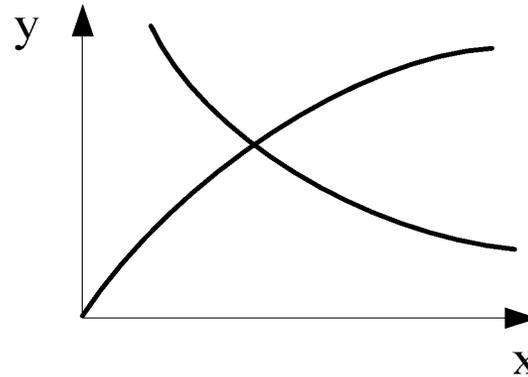
Трансформаторы напряжения в сетях с изолированной нейтралью могут входить в феррорезонанс с ёмкостями сетей (особенно кабельных), что может приводить к выходу их из строя. Для предотвращения порчи трансформаторов напряжения в результате феррорезонанса разработаны антирезонансные трансформаторы напряжения типа НАМИ.

Измерительные органы

Измерительные органы состоят из элементов следующих типов:

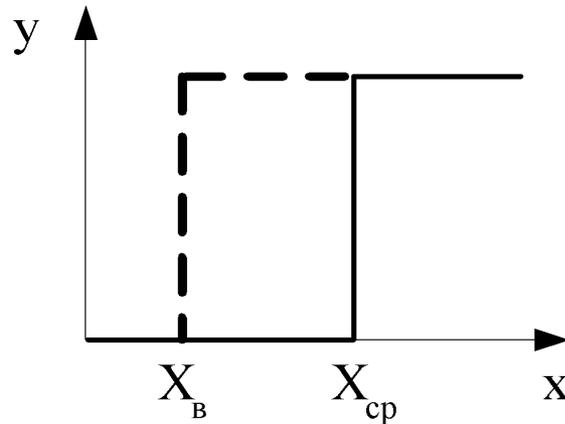


Линейные, у которых передаточная характеристика имеет линейный характер изменения



Нелинейные, у которых передаточная характеристика имеет нелинейный характер изменения

Релейные элементы, у которых передаточная характеристика имеет релейный характер изменения



Функционирование релейных элементов характеризуется коэффициентом возврата, который определяется выражением:

$$K_{\text{в}} = \frac{X_{\text{в}}}{X_{\text{сп}}}$$

где $X_{\text{сп}}$ – величина тока или напряжения срабатывания релейного элемента;
 $X_{\text{в}}$ – величина тока или напряжения, при котором происходит возврат в исходное состояние релейного элемента.

В релейной защите используются измерительные органы, в состав которых входят релейные элементы (РЭ).

Релейные элементы классифицируются по:

1. Способу включения РЭ:

Первичные (прямое включение в цепь защищаемого элемента);

Вторичные (включение через измерительные трансформаторы тока, напряжения).

2. Реагирующему параметру:

Реагируют на электрические параметры (I, U, Z, f, S и т.д.);

Реагируют на неэлектрические параметры (T °C, V и т.д.).

3. Элементной базе:

3.1. Электромеханические РЭ, которые разделяются по принципу действия на:

- электромагнитные РЭ;
- магнитоэлектрические РЭ;
- индукционные РЭ.

3.2. Электронные РЭ:

- полупроводниковые РЭ (на базе дискретных полупроводниковых элементов);
- микроэлектронные РЭ (на базе интегральных микросхем).

3.3. Программируемые РЭ (на базе микропроцессорной техники).

4. Назначению:

4.1. **Измерительные реле** (тока, напряжения, сопротивления, мощности, частоты, температуры, уровня). Для измерительных реле характерно наличие опорных (образцовых) элементов в виде калиброванных пружин, источников стабильного напряжения, тока и т.п. Они входят в состав реле и воспроизводят заранее установленные значения (называемые уставкой) какой-либо физической величины, с которой сравнивается контролируемая величина. Измерительные реле обладают высокой чувствительностью (воспринимают даже незначительные изменения контролируемого параметра) и имеют высокий коэффициент возврата (отношение величины срабатывания и возврата). По характеру изменения параметра подразделяются на:

- реле максимального типа (срабатывание реле происходит при токе или напряжении больше, чем ток или напряжение срабатывания реле);
- реле минимального типа (срабатывание реле происходит при токе или напряжении меньше, чем ток или напряжение срабатывания реле).

4.2. **Логические реле** (промежуточные, двухпозиционные, времени, сигнальные). Логические реле служат для размножения импульсов, полученных от других реле, усиления этих импульсов и передачи команд другим аппаратам (промежуточные реле), создания выдержек времени между отдельными операциями (реле времени), и для регистрации действия как самих реле, так и других вторичных аппаратов (указательные реле)

5. Способу воздействия на выключатель:

5.1. Реле прямого действия подвижная система которых механически связана с отключающим устройством коммутационного аппарата (РТМ, РТВ);

5.2. Реле косвенного действия, которые управляют цепью электромагнита отключения.

Выходные органы

Выходной орган является связующим звеном между логической частью релейной защиты и катушкой отключения выключателя ЗО. Логическая часть этого органа рассчитана на малые токи и может коммутировать лишь небольшие мощности, а на катушку отключения подается напряжение 110 или 220 В и ток в ней равен 5-10 А.

В релейной защите, выполненной на контактных элементах, в качестве выходных органов используют электромагнитные промежуточные реле РЭН-17, РКС-3, ТКЕ и др. В релейной защите, выполненной на бесконтактных элементах, выходной орган содержит в качестве управляющего элемента тиристор, который имеет высокое быстродействие, чувствителен к помехам.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Классификация РЗ

по характеру изменения параметра

Максимального типа

Минимального типа

по выполняемой функции

Основные (первоочередное отключение повреждения)

Резервные (отключение при отказе в работе основной защиты)

Дополнительные (частичное дублирование основной защиты)

По назначению

Токвые (ТО и МТЗ)

Дифференциальные (продольные и поперечные)

Дистанционные (ненаправленные и направленные)

Мощности (направленные)

Потенциальные (защиты по напряжению)

Высокочастотные и телеблокировки

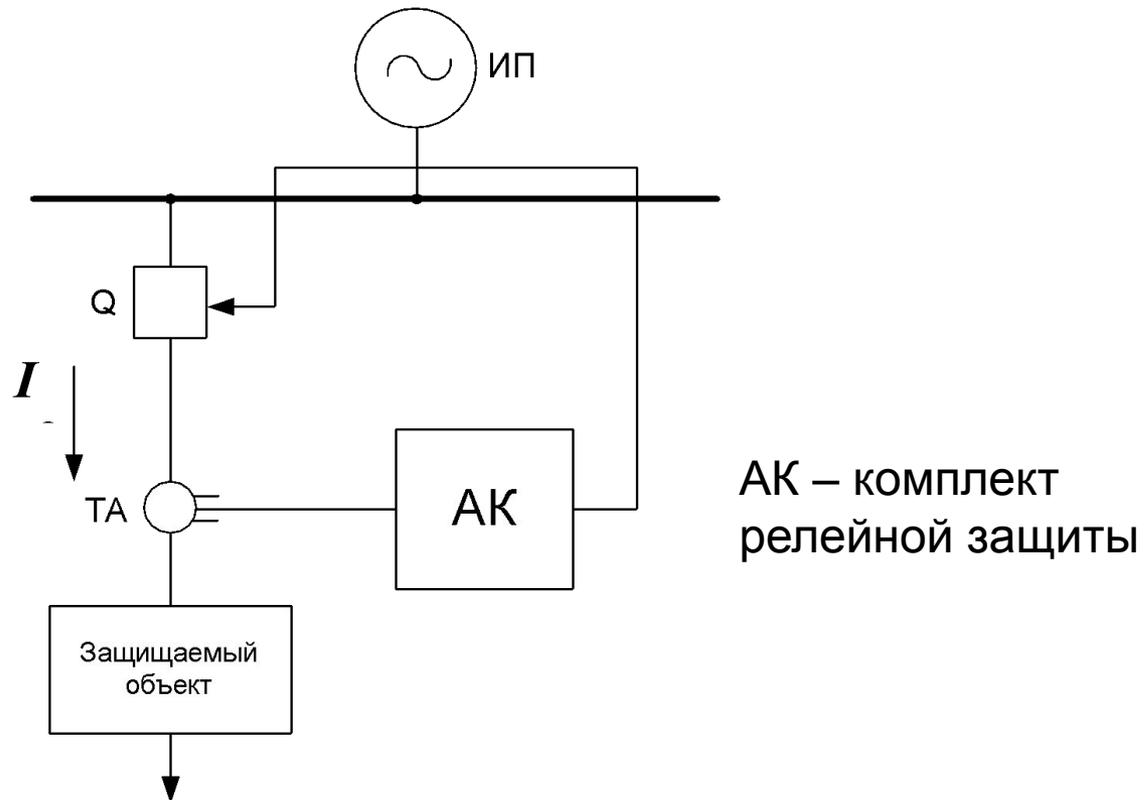
Импульсные

Прочие (реагирующие на неэлектрические параметры)

Токовые защиты. Максимальная токовая защита и токовая отсечка

Максимальной токовой защитой (МТЗ) называют такую защиту, которая приходит в действие при возрастании тока I до определенного значения в цепи защищаемого объекта в случае КЗ или перегрузки; при этом время срабатывания МТЗ одно и то же независимо от величины тока ненормального режима. Это время определяется уставкой реле времени.

Структурная схема защиты



Срабатывание комплекта защиты МТЗ произойдет при выполнении условия $I \geq I_{сз}$. Ток срабатывания защиты $I_{сз}$ для МТЗ определяется по формуле:

$$I_{сз} = K_{з} \cdot I_{нагр.мах}$$

где $K_{з}$ – коэффициент запаса, $K_{з} = 1,1 \div 1,2$;

$I_{нагр.мах}$ – максимальный ток нагрузки, протекающий в конце зоны защиты.

Ток срабатывания реле $I_{ср}$ комплекта защиты АК будет равен

$$I_{ср} = \frac{I_{сз}}{K_{\epsilon} \cdot K_{ТА}} \cdot K_{сх}$$

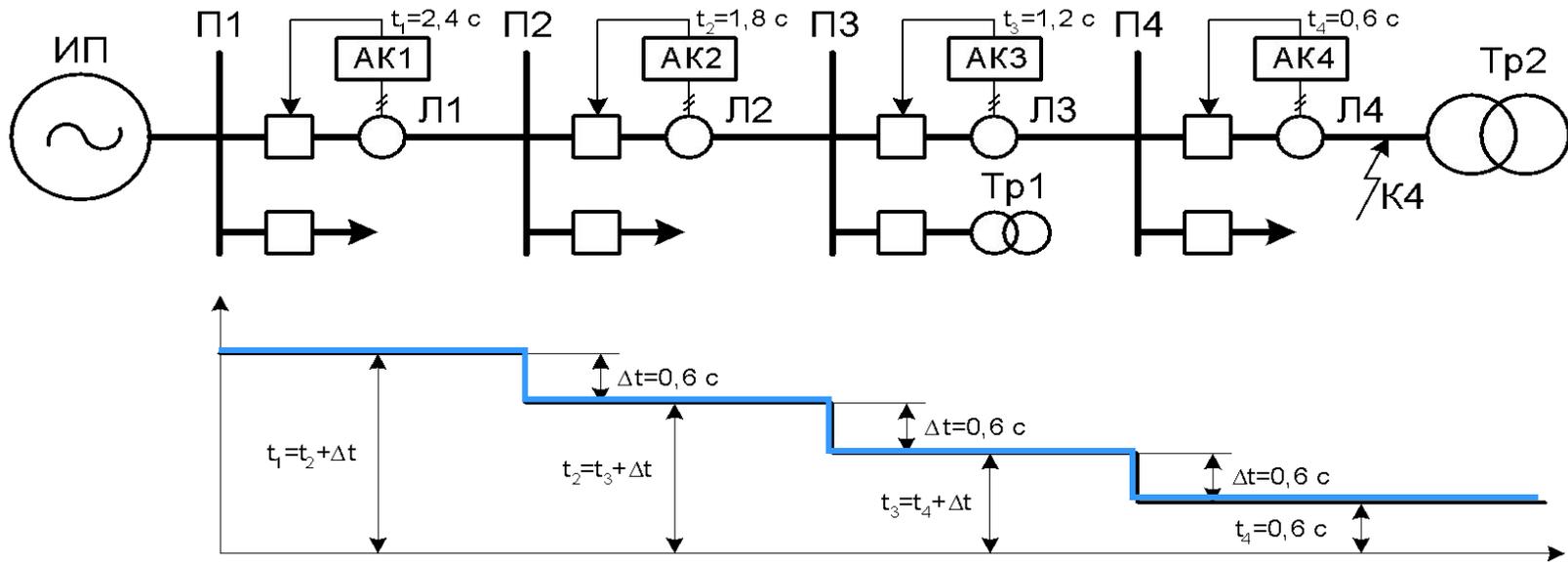
Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности $K_{ч}$ равным

$$K_{ч} = \frac{I_{к min}}{I_{сз}}$$

где $I_{к min}$ – наименьший ток КЗ в конце зоны защиты;

МТЗ в трехфазном исполнении реагирует на все виды КЗ (одно-, двух- и трехфазные), в двухфазном исполнении лишь на двух- и трехфазные. Данная защита всегда производит отключение выключателя с одной и той же выдержкой времени, на которую отрегулировано реле времени независимо от удаленности точки КЗ в цепи ЗО от места установки защиты. Защита применяется в сетях с односторонним питанием для одиночных и радиальных последовательно соединенных линий.

Избирательность действия достигается настройкой реле времени защит на различные времена срабатывания



К источнику питания ИП присоединены 4 линии: Л1 ÷ Л4, на которых установлены комплекты защит АК1 ÷ АК4. Наиболее удаленная от источника питания линия Л4 должна иметь наименьшую выдержку времени $t_4 = 0,6 \text{ с}$. У следующего по направлению к ИП комплекта защиты АК3 на линии Л₃ время срабатывания на $\Delta t = 0,5-0,6 \text{ с}$ больше, т.е. $t_3 = t_4 + \Delta t = 1,2 \text{ с}$ и т.д. Разница во времени срабатывания комплектов защит смежных линий принимается такой, чтобы при повреждении на линиях, удаленных от ИП, обеспечивалось срабатывание их комплектов защит раньше, чем комплектов защит линий, расположенных ближе к ИП. Например, при К₃ в точке К₄ протекающий ток К3 вызовет срабатывание токовых реле комплектов защит АК1 ÷ АК4, однако отключение места повреждения произведет только комплект защиты АК4, т.к. выдержка времени у него меньше, чем у остальных АК. Реле времени комплектов защит АК1, АК2, АК3 тоже возбуждятся, и их подвижные контакты придут в действие, но вследствие отключения точки К3 комплектом защит АК4 токовые реле комплектов АК1, АК2, АК3 потеряют возбуждение, разомкнут своими контактами цепи питания обмоток реле времени, якоря которых возвратятся в исходное положение.

Токовой отсечкой (ТО) называют максимальную токовую защиту с ограниченной зоной действия. Она предназначена для быстрого отключения КЗ. Это особенно важно для линий, близко расположенных к ИП, при большом числе ступеней МТЗ. Токовые отсечки бывают мгновенного действия и с выдержкой времени (двух-ступенчатые токовые отсечки с выдержкой времени второй ступени до 0,6 с). ТО применяют в двухфазном исполнении как для сетей с малым током замыкания на землю, так и для сетей с большим током замыкания на землю. Она предназначена защищать линию от междуфазных КЗ.

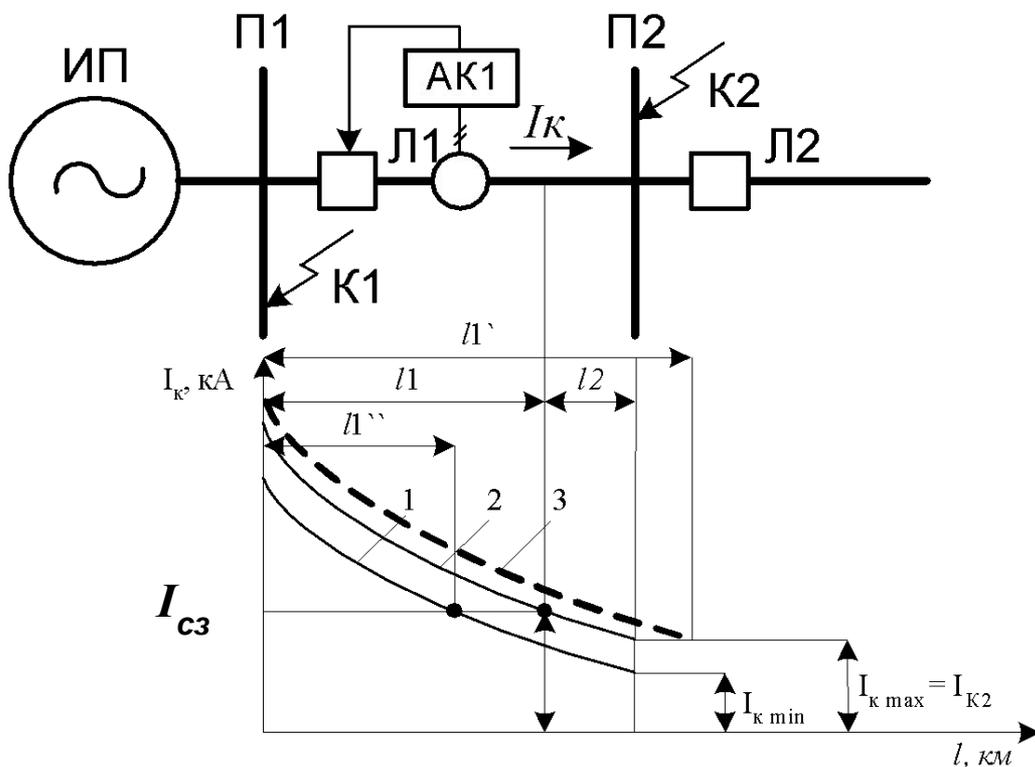
Избирательность действия токовой отсечки обеспечивают выбором соответствующего тока срабатывания защиты $I_{сз}$ в зависимости от тока КЗ в конце защищаемой линии.

На рис. кривая 2 показывает изменение тока КЗ в зависимости от удаленности точки КЗ от источника питания ИП при одностороннем питании. Чтобы ТО не реагировала на КЗ в точке К2 на шинах приемной подстанции или КЗ в начале следующей линии, ток срабатывания ТО $I_{сз}$ принимают больше тока КЗ $I_{к2}$. Это принято называть отстройкой ТО от токов КЗ на шинах приемной подстанции. Ток срабатывания защиты $I_{сз}$ равен:

$$I_{сз} = K_3 \cdot I_{к max}$$

где K_3 – коэффициент запаса, $K_3 = 1,2 \div 1,3$;

$I_{к max}$ – максимальный ток КЗ, протекающий в конце зоны защиты.



Расчетный ток КЗ находят при максимальном режиме работы энергосистемы (кривая 2), реально возможном в эксплуатации. Точка пересечения кривой изменения тока КЗ (кривая 2) с током $I_{cз}$ (горизонтальная линия) определяет длину защищаемой зоны l_1 от места установки защиты. Участок линии длиной l_2 остается не защищенным ТО и называется «мертвой зоной» ТО. Длина защитной зоны ТО при прочих равных условиях зависит от величины тока КЗ и значения коэффициента запаса K_3 . Чем меньше K_3 и больше ток КЗ, тем длиннее защитная зона. При переходе системы на минимальный режим работы (кривая 1) защитная зона ТО уменьшается (l_1'') вследствие уменьшения тока КЗ. Защитная зона ТО составляет 60-30 % длины линии. Нельзя рассчитывать $I_{cз}$ при минимальном режиме. Если ток КЗ согласно кривой 2 принять при минимальном режиме работы системы и определить защитную зону l_1 , то при максимальном режиме (кривая 3) защитная зона удлинится до l_1' и выходит за пределы защищаемой линии Л1. Ток срабатывания реле I_{cp} ТО будет равен

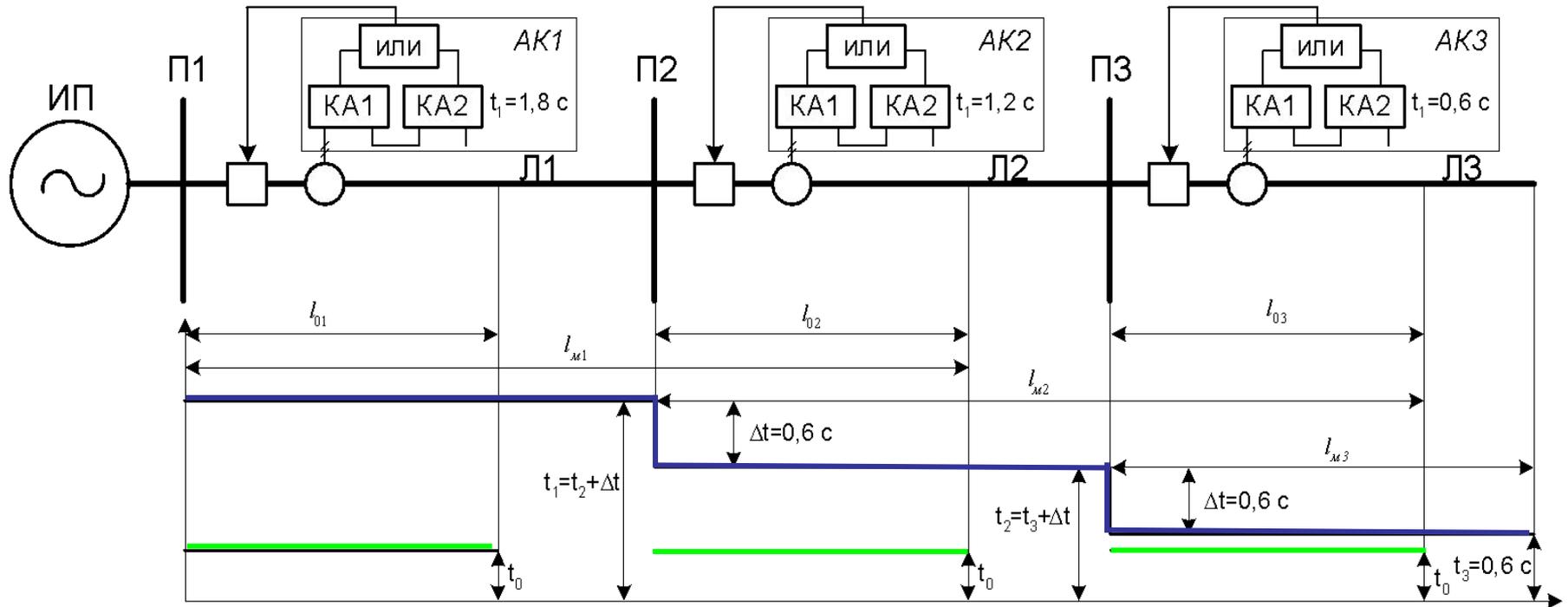
$$I_{cp} = \frac{I_{cз}}{K_{TA}} \cdot K_{cx}$$

Коэффициент чувствительности ТО ($K_q \geq 1,5$)
$$K_q = \frac{I_{k min}}{I_{cз}}$$

где $I_{k min}$ – ток КЗ в начале защищаемой линии при минимальном режиме работы системы.

Поскольку ТО, отстроенная от токов КЗ на шинах приемной подстанции, не защищает всю линию, не резервирует защиты следующего по направлению от источника питания участка и не реагирует на токи перегрузки. Следовательно, она не может быть единственной защитой линии. Поэтому ТО применяют как вспомогательную защиту для ускорения отключения КЗ совместно с другими защитами, которые реагируют на повреждения в любом месте линии, на токи перегрузки и резервируют защиты следующего участка, но имеют значительные выдержки времени.

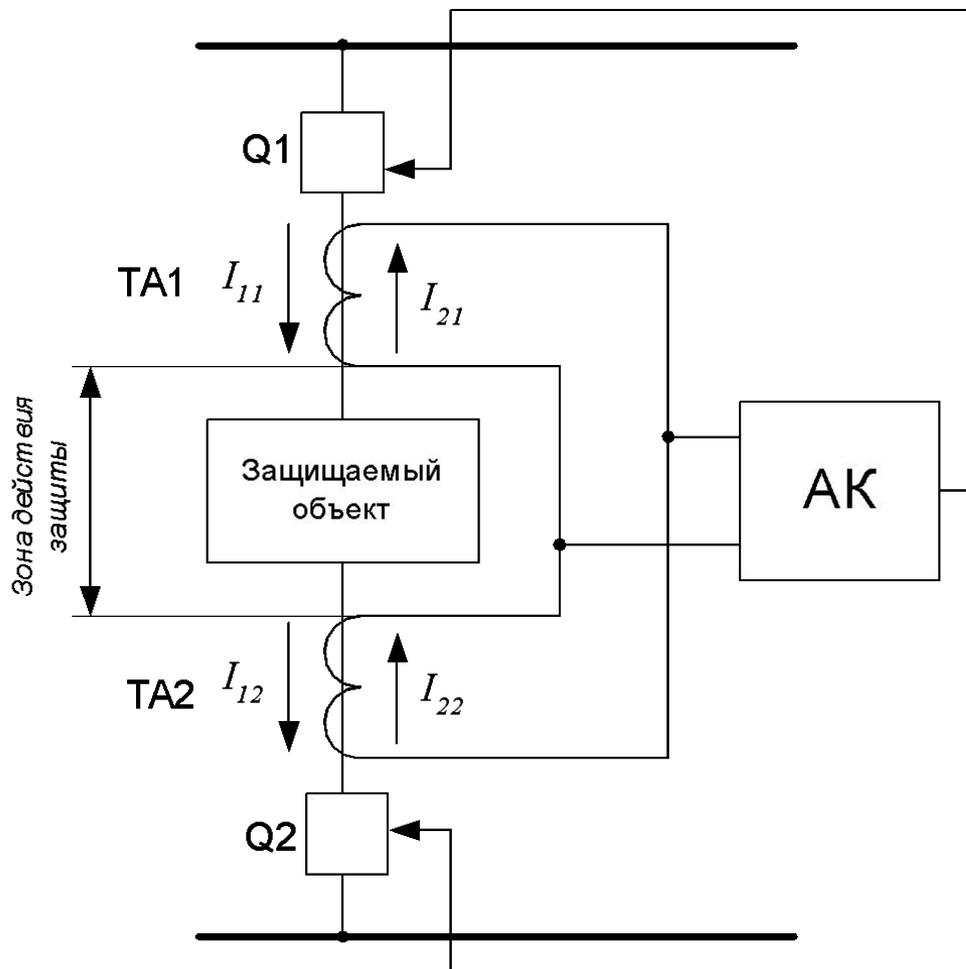
Структурная схема МТЗ линии совместно с ТО и схема, иллюстрирующая их избирательное действие



Из диаграммы выдержек времени и защитных зон ТО и МТЗ для сети с односторонним питанием видно, что при КЗ в пределах защитных зон ТО l_{01} , l_{02} , l_{03} отключение происходит практически мгновенно со временем t_0 , а при КЗ за их пределами на участках $l_{м1}$, $l_{м2}$, $l_{м3}$ - с выдержками времени t_1 , t_2 , t_3 .

Дифференциальная защита

Дифференциальная защита предназначена для срабатывания при появлении повреждения внутри ЗО, на его выводах и соединениях с выключателями. Защита является быстродействующей.



По обе стороны ЗО устанавливаются ТА, их вторичные обмотки соединяются дополнительными проводами согласно последовательно (с циркулирующими токами). ТА выбирают так, чтобы их вторичные токи I_{21} и I_{22} в нормальном режиме работы ЗО были примерно одинаковы. Тогда ток в реле будет равен:

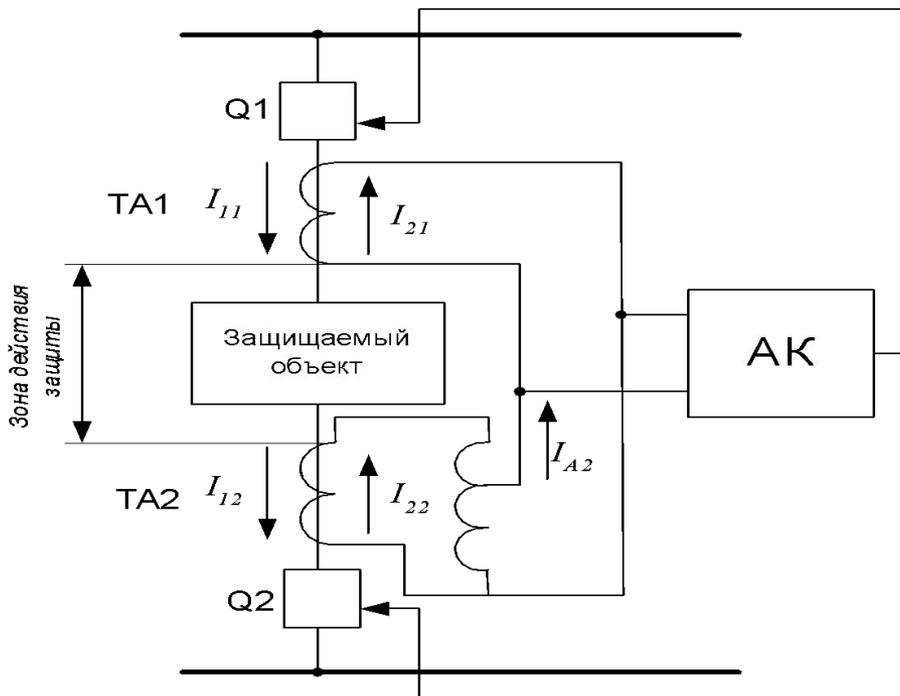
$$I_p = I_{21} - I_{22} = I_{нб},$$

где $I_{нб}$ – ток небаланса, А.

Ток небаланса невелик и не вызовет срабатывания комплекта дифференциальной защиты АК в нормальном режиме.

При КЗ в любой точке, находящейся между трансформаторами тока, в том числе и внутри ЗО, ток I_{12} исчезает ($I_p = I_{21}$) или меняет свое направление (течет от шин к точке повреждения, $I_p = I_{21} + I_{22}$). В обоих случаях ток в АК увеличивается и срабатывает комплект дифференциальной защиты.

Для правильной работы дифференциальной защиты необходимо, чтобы ток небаланса в нормальном режиме и при внешних КЗ, на которые защита реагировать не должна, был бы как можно меньше. На этот ток в основном влияют коэффициенты трансформации ТА и броски тока намагничивания внутри ЗО. Компенсация неравенства токов во вторичных обмотка ТА достигается в основном установкой автотрансформатора, с коэффициентом трансформации КА, обеспечивающим равенство токов в соединительных проводах: $I_{A2} = I_{21}$



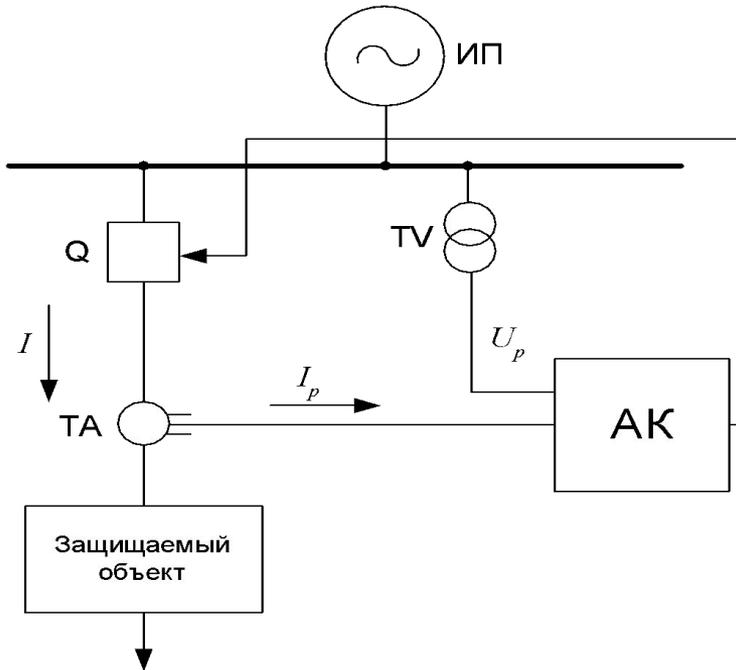
Дифференциальная защита должна быть отстроена от токов небаланса по условию $I_{сз} > I_{нб}$, что приводит к снижению ее чувствительности. Отстройка дифференциальной защиты от броска тока намагничивания достигается применением быстронасыщающихся трансформаторов тока (БНТТ).

Дистанционная защита

Дистанционной называется такая защита, которая работает на принципе измерения полного $z = z_{0l}$, активного $r = r_{0l}$ или реактивного $x = x_{0l}$ сопротивления от места установки реле до точки КЗ на линии (z_0, r_0, x_0 – полное, активное и реактивное удельные сопротивления ЗО, Ом/км; l – расстояние от места установки реле до точки КЗ, км). Наибольшее распространение получила дистанционная защита на принципе измерения полного сопротивления (z):

$$\underline{z} = \frac{\underline{U}_p}{\underline{I}_p} = z \cdot e^{j\phi}$$

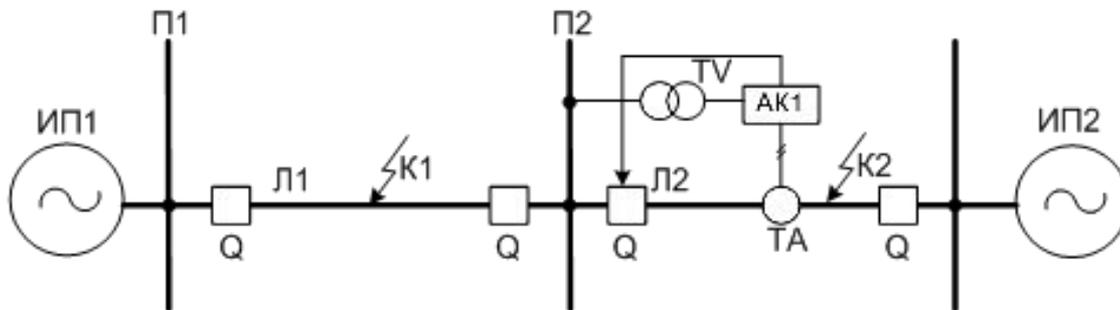
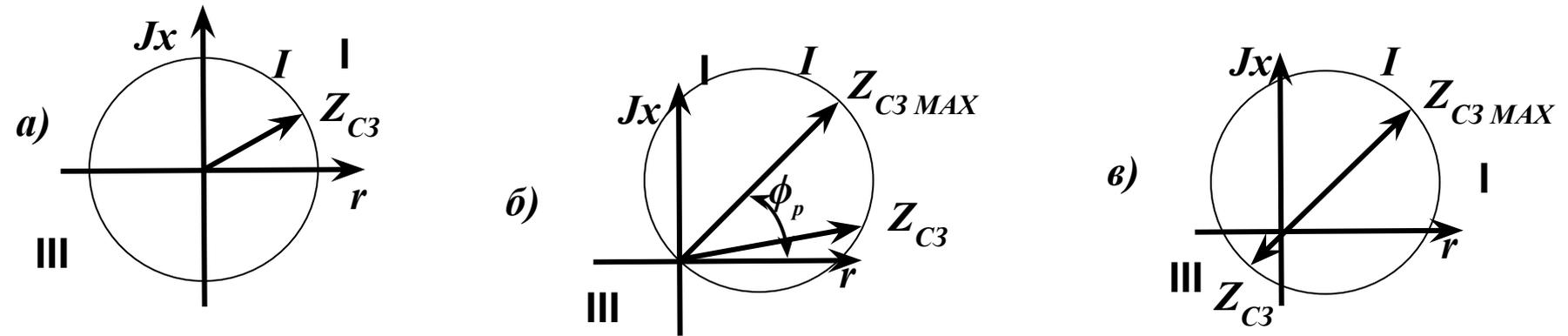
где $\underline{U}_p, \underline{I}_p$ – напряжение и ток, подводимые к комплекту дистанционной защиты АК с трансформаторов напряжения и тока соответственно



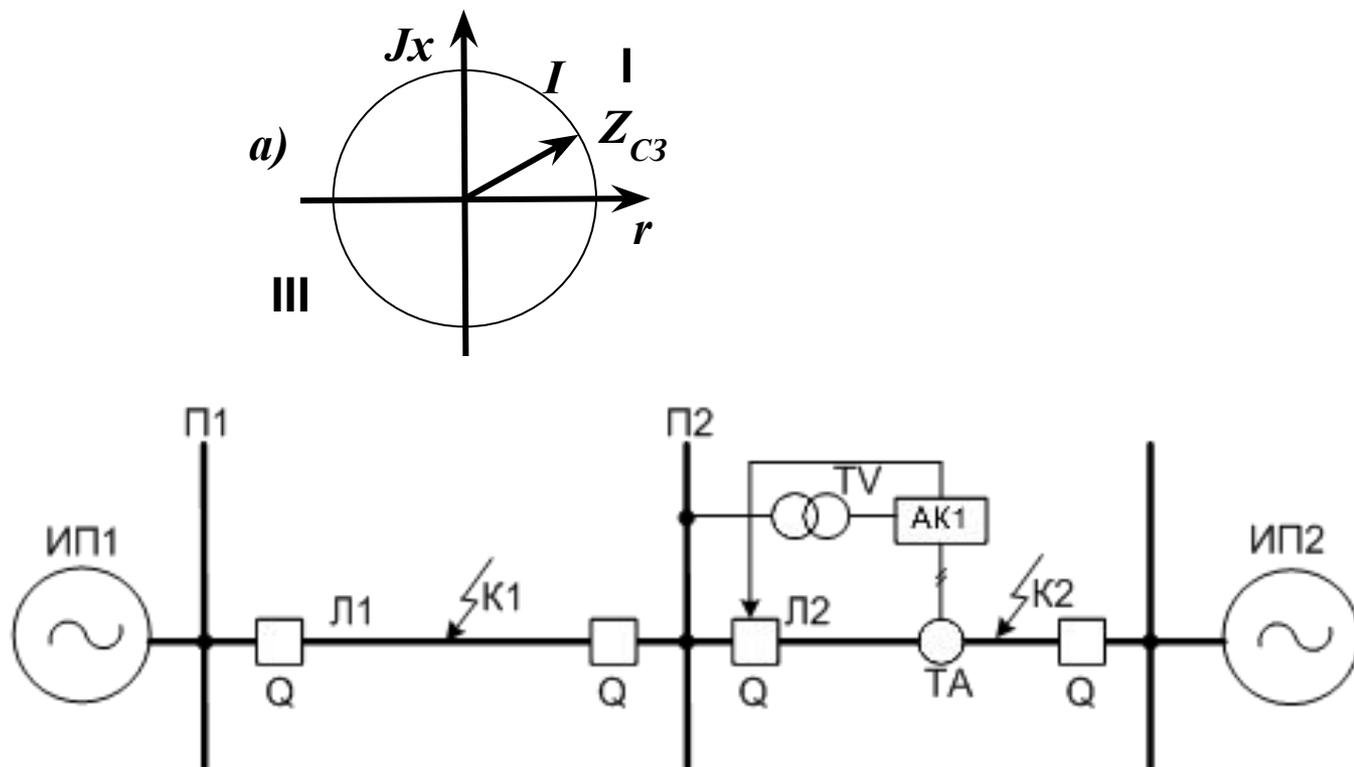
Измерительным органом комплекта дистанционной защиты АК является реле сопротивления, которое относится к классу реле минимального типа. Различают 2 основных типа реле сопротивления:

1. Величина сопротивления срабатывания реле зависит только от отношения U_p / I_p
2. Величина сопротивления срабатывания реле зависит не только от отношения

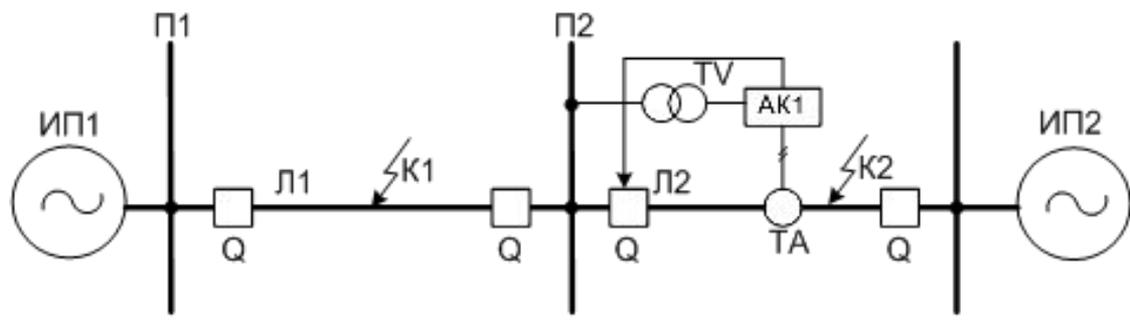
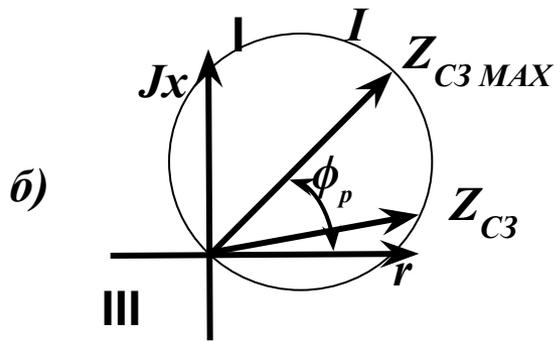
отношения U_p / I_p но и от угла ϕ_p , U_p и I_p между подведенными к реле с уставкой срабатывания защиты $z_{c3} = f(\phi_p)$ (см. рис. б).



Характеристика реле, представленного на рис. а, является характеристикой *ненаправленного реле полного сопротивления*, а защита, выполненная на таком реле называется *ненаправленной дистанционной защитой*. Реле с такой характеристикой имеет одинаковое $Z_{сз} = k$ во всех четырех квадрантах, т.е. как в квадранте I, что соответствует КЗ на защищаемой линии Л2, так и в квадранте III (за спиной) – КЗ за шинами подстанции П2 на линии Л1. Такое реле применяется при защите шин 6 и 10 кВ, т.е. там где не требуется различной чувствительности к активным и реактивным слагаемым полного сопротивления.



Характеристика срабатывания реле, представленная на рис. б, то же окружность, но проходит через начало координат комплексной плоскости. У реле с такой характеристикой $Z_{сз}$ для разных ϕ_p будет разным. $Z_{сз \max} = D$, (D - диаметр окружности). Из рис. б видно, что основная область срабатывания реле расположена в квадранте I, чем обеспечивается защита линии Л2. Не работает реле в III квадранте, т.е. при КЗ на Л1. Реле с такой характеристикой называется *направленным реле полного сопротивления*, а защита, выполненная на таком реле называется *направленной дистанционной защитой*. Такое реле имеет «мертвую зону» по направлению при КЗ вблизи шин подстанции, как на защищаемой линии Л2, так и на незащищаемой линии Л1.

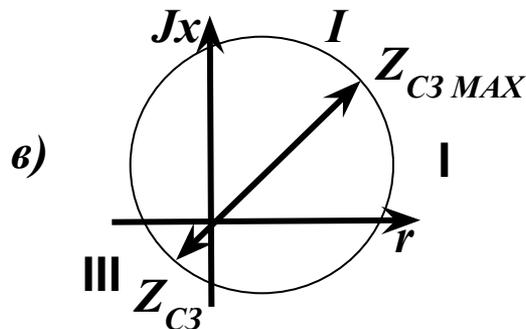


На рис. в приведена смещенная круговая характеристика срабатывания реле, которая является промежуточной между характеристиками, представленными на рис. а и рис. б. Окружность этой характеристики смещена вдоль линии максимальной чувствительности на $Z_{см}$. Реле с такой характеристикой работает как в квадранте I, так и в квадранте III. Следовательно, это реле не является направленным. Данное реле используют, в основном, в защитах шин подстанции. Время срабатывания дистанционной защиты t зависит от отношения $\frac{U_p}{I_p}$

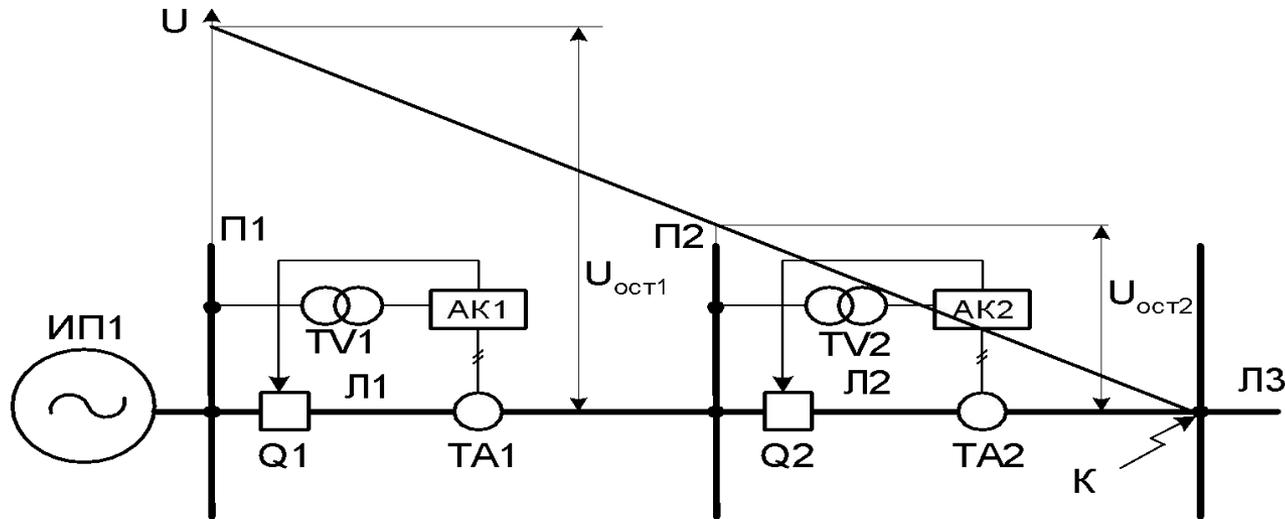
т.е. $t = f\left(\frac{U_p}{I_p}\right)$ где $U_p = \frac{U_{ост}}{K_{TV}}$

$U_{ост}$ – остаточное напряжение на шинах подстанции;

$I_p = \frac{I_k}{K_{TA}}$, I_k – ток короткого замыкания.



Для пояснения зависимости примем $K_{TA} = K_{TV}$ на подстанциях П1 и П2



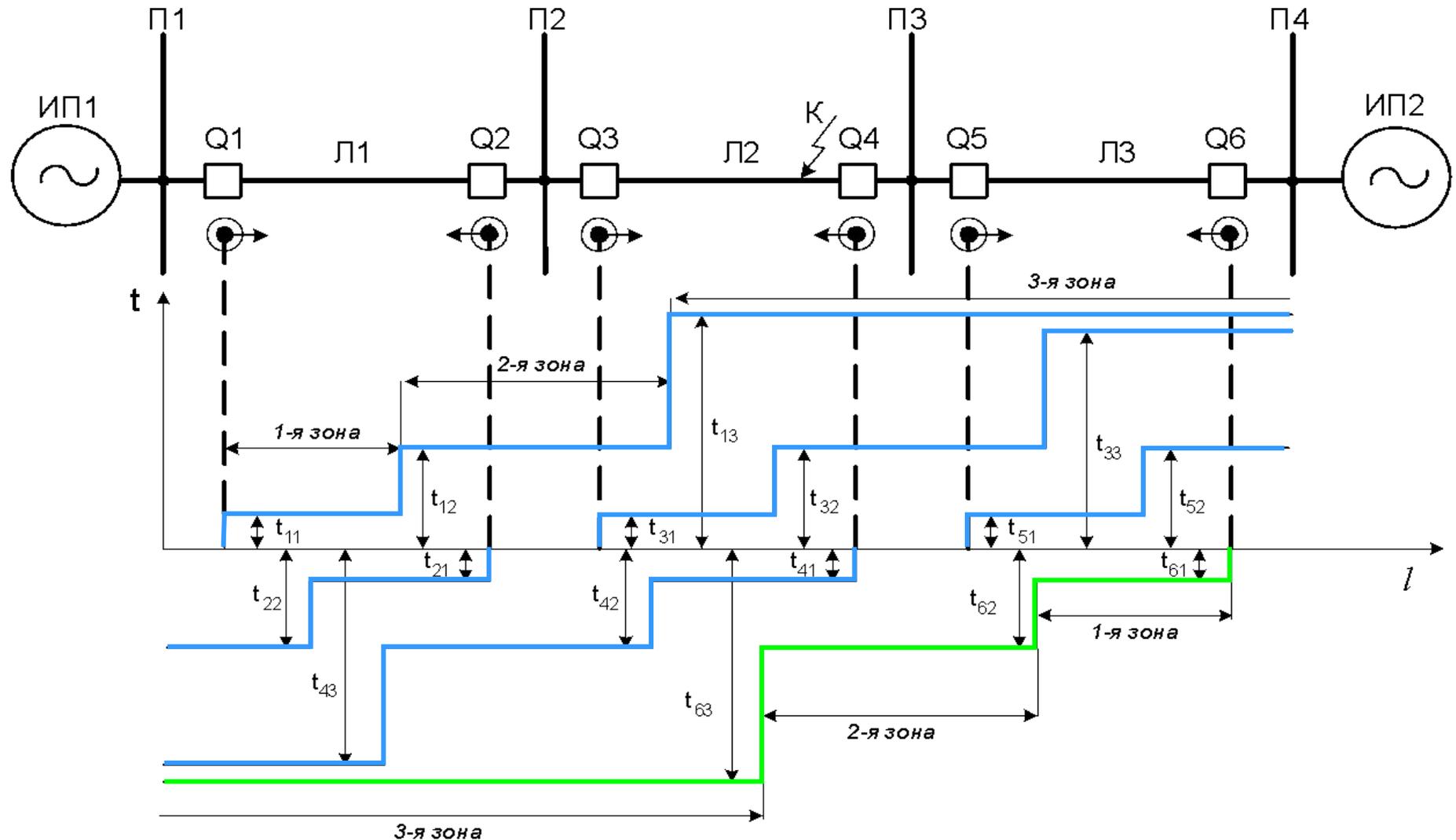
При КЗ в точке К по линиям Л1 и Л2 протекают одинаковые токи I_k . Поскольку $U_{ост1} > U_{ост2}$, то $Z_{p1} > Z_{p2}$ и $t_1 = f(Z_{p1}) > t_2 = f(Z_{p2})$. Защита подстанции П2 должна работать быстрее, т.к. от нее до точки КЗ расстояние меньше.

По характеристикам, представляющим зависимость времени срабатывания от расстояния до точки КЗ, дистанционные защиты подразделяются на 3 вида: с плавно зависимой, ступенчатой и комбинированной характеристиками.

Наибольшее применение получили с двух- и трехступенчатыми характеристиками. Каждая ступень определяет длину защитной зоны с соответствующим временем срабатывания защиты.

Дистанционные защиты бывают ненаправленные и направленные: первые применяют в радиальных сетях с односторонним питанием; вторые – в сетях любой конфигурации. Направленная дистанционная защита обеспечивает избирательное отключение повреждений линий с относительно небольшой выдержкой времени в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания. Использовать ее в простых сетях (радиальных с 1 ИП), в которых используют ТО и МТЗ нецелесообразно, поскольку это очень дорого.

Избирательное действие трехступенчатой направленной дистанционной защиты в радиальной сети с двухсторонним питанием обеспечивается подбором выдержек времени и уставок сопротивлений срабатывания. Выдержки времени выбирают при питании линии сначала от одного ИП, например ИП1, а потом от другого – ИП2.



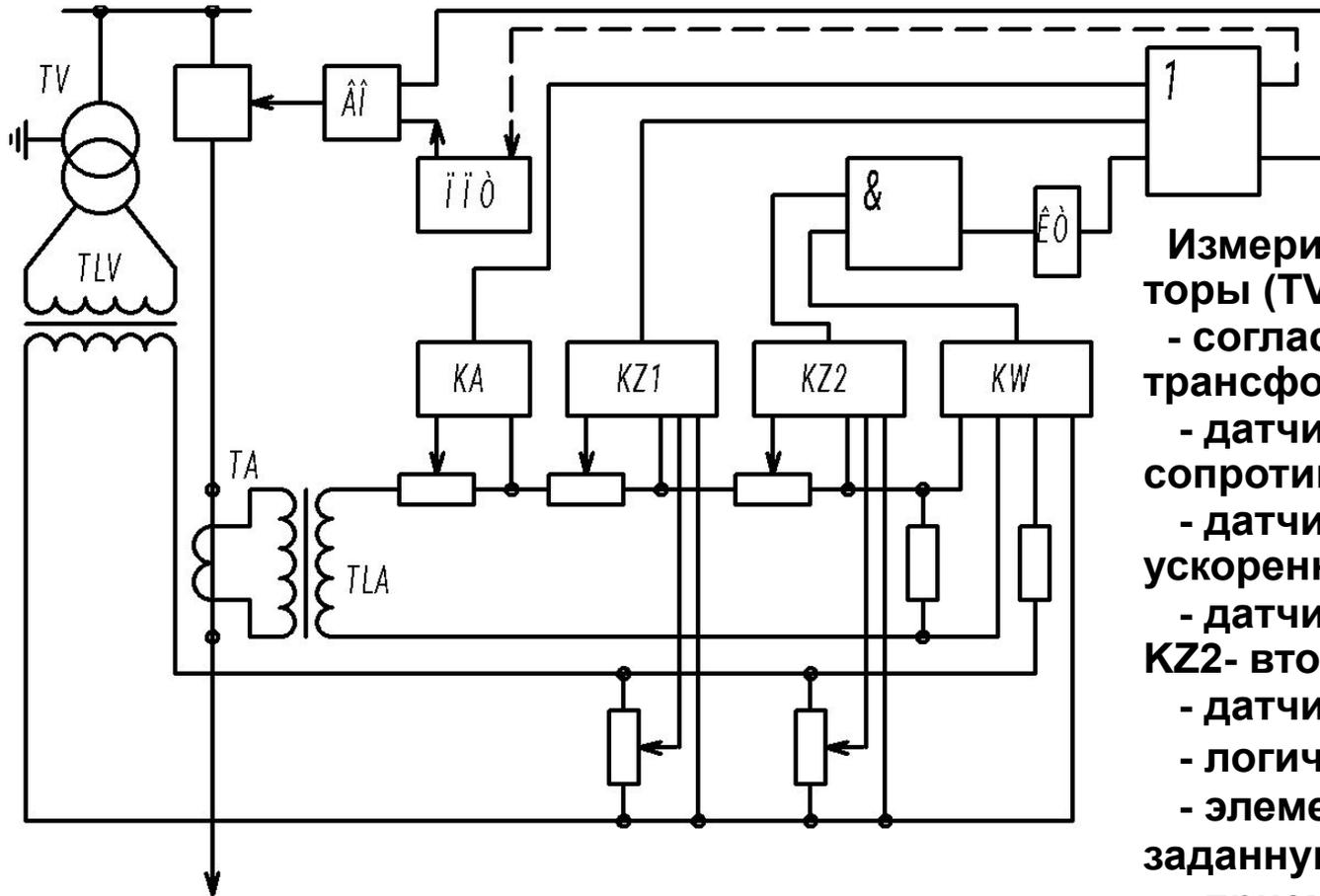
1-я зона – 70-80 % длины защитной линии. Время срабатывания t_{11} (первая цифра номер защиты, вторая цифра – номер зоны) защиты 1 определяется собственным временем срабатывания реле, входящих в схему защиты, и составляет 0,1-0,2 с. Ограничение длины 1-ой зоны вводится для возможности избирательного действия защиты при КЗ на смежном участке из-за погрешностей реле дистанционной защиты в измерении сопротивления до точки КЗ.

2-я зона – в эту зону входит незащищенный участок защищаемой линии и 30-40 % длины смежной линии. Время t_{12} подбирают искусственно, но выдержка времени 2-ой зоны должна быть больше выдержек времени защит линий, присоединенных к шинам подстанции, питающейся от защищаемой линии.

3-я зона – в 3-ю зону входят участки, сопротивление до которых не измеряет реле сопротивления. Время срабатывания t_{13} подбирают искусственно, но оно должно быть больше времени срабатывания резервных защит.

При КЗ в точке К на поврежденной линии срабатывает 1-я ступень защиты 4 с временем t_{41} и 2-я ступень защиты 3 со временем t_{32} . Защиты 2 и 5 не срабатывают, т.к. их органы направления имеют настройку, противоположную направлению мощности КЗ. Придут в действие защиты 6 и 1, но отключения не произведут, т.к. $t_{62} > t_{41}$ и $t_{13} > t_{32}$.

Структурная схема электронного комплекта защит фидера контактной сети тяговой подстанции (УЭЗФТ)



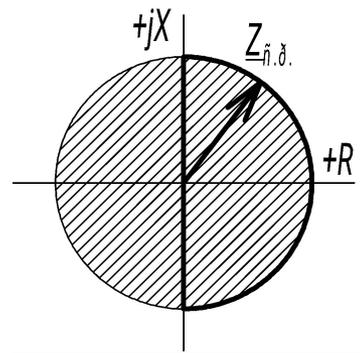
Измерительные трансформаторы (TV и TA),
- согласующие промежуточные трансформаторы TLV и TLA,
- датчик (реле) полного сопротивления KZ1,
- датчик тока КА, исполняет ускоренную токовую отсечку,
- датчик полного сопротивления KZ2- вторая ступень защиты,
- датчик фазового угла KW
- логический орган «И»(&),
- элемент КТ, формирующий заданную выдержку времени,
- приемопередатчик телеблокировки ППТ.

- ячейка «ИЛИ», выходной орган (ВО) защиты, который отключает высоковольт-ный выключатель.

Регулировка уставок срабатывания измерительных органов КА, KZ1, KZ2, KW осуществляется потенциометрами, включенными во вторичные обмотки промежуточных трансформаторов.

Первая ступень дистанционной защиты ДЗ1 выполнена с помощью датчика (реле) полного сопротивления KZ1, характеристика которого приведена на рис. Эта ступень не имеет выдержки времени. Датчик KZ1 имеет собственное время срабатывания 30-60 мс.

Для обеспечения более быстрого отключения КЗ, возникающих вблизи тяговой подстанции, в первую ступень защиты включают ускоренную токовую отсечку. Ее роль выполняет датчик тока КА с временем срабатывания 5–10 мс. Первая ступень защиты защищает 80 – 85 % расстояния между подстанцией и постом секционирования.



Угловая характеристика реле сопротивления KZ1

Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики ЦЗА

ООО "НИИЭФА-ЭНЕРГО" разрабатывает и выпускает микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики серии ЦЗА, являющиеся полнофункциональными фидерами терминалами, то есть реализующими все необходимые виды защит, автоматику работы распредустройства, местное и дистанционное управление присоединением, регистрацию и хранение 16-ти аварийных процессов, вычисление коммутационного ресурса выключателя.

Устройства ЦЗА состоят из двух блоков - блок управления (БУ) и блок защит и автоматики (БЗА). На БУ расположены кнопки местного управления выключателем и разъединителями, элементы индикации их состояния, алфавитно-цифровой дисплей для отображения текущих контролируемых параметров, просмотра и ввода уставок защит.

В блоке БЗА реализуются собственно алгоритмы защит, управления и автоматики.

В состав блока БЗА входят модули дискретного ввода/вывода, аналогового ввода, модули контроллеров защит и автоматики. Блоки БУ и БЗА соединяются между собой интерфейсным кабелем (RS-485).

Программное обеспечение (ПО) устройств ЦЗА выполняется с помощью специализированного языка блочных схем. Библиотека блоков содержит элементы, реализующие набор логических функций (И, НЕ, ИЛИ) триггеры, таймеры, счетчики, буферные элементы и др.

В настоящее время разработаны и выпускаются следующие виды устройств ЦЗА:

ЦЗАФ-825 - устройство цифровой защиты и автоматики фидера контактного рельса для ТП метрополитена;

ЦЗАФ-3,3 - устройство цифровой защиты и автоматики фидера контактной сети постоянного тока;

ЦЗА-27,5 - ФКС - устройство цифровой защиты и автоматики фидера контактной сети переменного тока.

На основе ЦЗА-27,5-ФКС разработаны и выпускаются устройства цифровой защиты и автоматики для всех соединений РУ-27,5 кВ:

ЦЗА-27,5-ДПР

ЦЗА-27,5-УПК

ЦЗА-27,5-ВВ

ЦЗА-27,5-ТСН

ЦЗА-27,5-ФПГ



ЦЗАФ-825



ЦЗАФ-3,3



ЦЗА- 27,5 кВ- ФКС