

# РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧ ЕСКИХ СИСТЕМ

КУРС ЛЕКЦИЙ

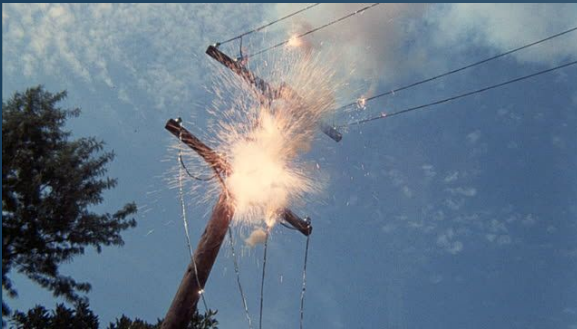
РАЗРАБОТЧИК: ЯКИМЧУК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ



# НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

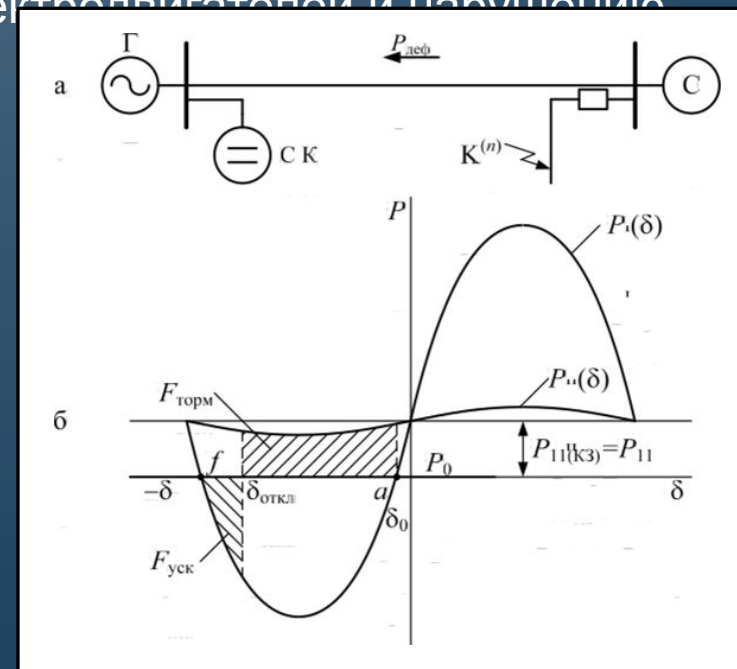
В процессе эксплуатации ЭЭС неминуемо возникают различного рода повреждения: (короткие замыкания между фазами и на землю, обрывы проводов, разрушение изоляции и др.). При этом нарушается нормальная работа энергосистемы в целом.

Короткие замыкания возникают из-за пробоя или перекрытия изоляции, обрывов проводов, ошибочных действий персонала (включения под напряжение заземленного оборудования, отключения разъединителей под нагрузкой) и других причин.



# ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КЗ

- Электрическая дуга с высокой температурой, приводящая к разрушениям токоведущих частей, изоляторов и электрических аппаратов.
- Перегрев неповрежденных токоведущих частей большими токами КЗ (тысячи ампер), и, как следствие, дополнительные повреждения, то есть развитие аварии.
- Глубокое понижение напряжения в сети, электрически связанной с местом повреждения, что может привести к остановке электродвигателей и нарушению параллельной работы генераторов.



# ОСНОВНОЙ СПОСОБ БОРЬБЫ С КЗ

Способ предотвращения развития аварий в большинстве случаев - быстрое отделение поврежденного участка электрической установки или сети при помощи специальных автоматических устройств, которые действуют на отключение выключателей. Такие устройства получили название **релейная защита (РЗ)**.

## Следствие работы РЗ:

- Гаснет электрическая дуга в месте КЗ
- Прекращается прохождение тока КЗ
- Восстанавливается нормальное напряжение на неповрежденной части электрической установки или сети
- Сокращаются размеры или даже совсем предотвращаются повреждения оборудования на котором возникло КЗ
- Восстанавливается нормальная работа неповрежденного оборудования

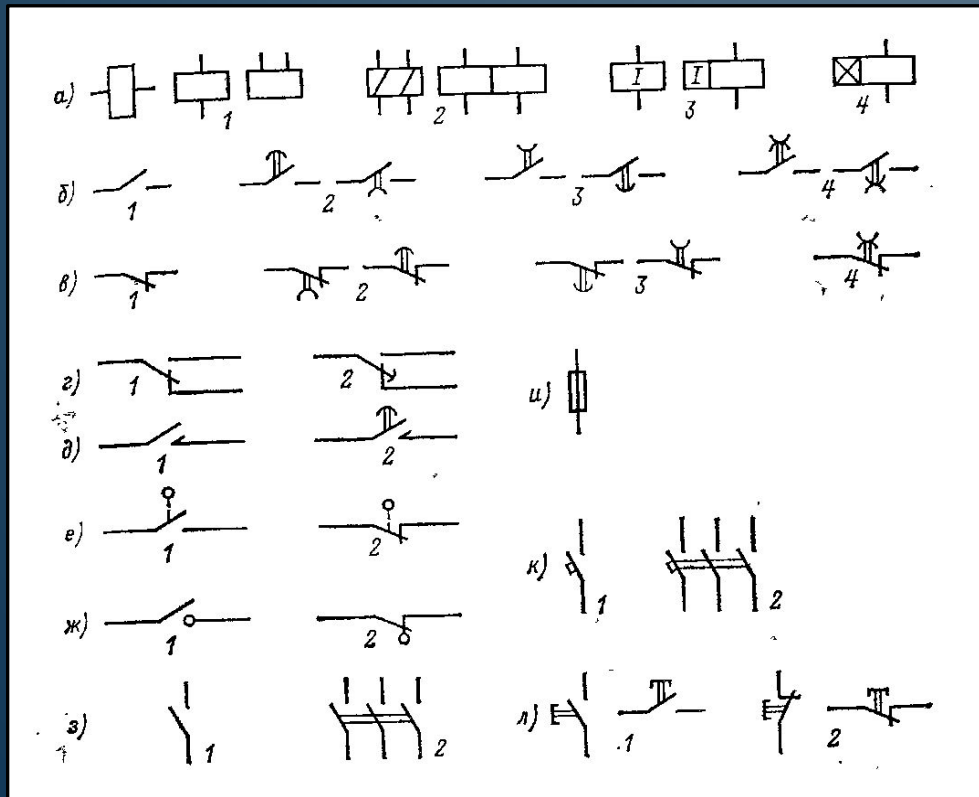
Таким образом, **основное назначение релейной защиты** - выявление места возникновения КЗ и быстрое автоматическое отключение поврежденного оборудования или участка сети от остальной неповрежденной части электрической установки или сети.

# ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВАМ РЗ

- **Быстродействие** - способность защиты с максимальной возможной скоростью реагировать на появления признаков КЗ. При этом уменьшаются размеры повреждений, сохраняется нормальная работа потребителей неповрежденной части установки, предотвращается нарушение параллельной работы генераторов. Современные устройства быстродействующей релейной защиты имеют время действия 0,02—0,1 с.
- **Селективность или избирательность** - способность релейной защиты корректно выявлять место повреждения и отключать его только ближайшими к нему выключателями. При этом снижается количество элементов энергосистемы, выводимых из работы при срабатывании защиты.
- **Чувствительность** – способность защиты гарантированно реагировать при всех видах повреждений, на которые она рассчитана, если они находятся в зоне ее действия. Чувствительность численно оценивается **коэффициентом чувствительности**.
- **Надежность** – способность защиты правильно и безотказно действовать при всех повреждениях и нарушениях нормального режима работы оборудования, в случаях, когда это предусмотрено, и не действовать в нормальных условиях, а также при повреждениях и нарушениях нормального режима работы, когда ее действие не требуется.

# ИЗОБРАЖЕНИЕ СХЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ЧЕРТЕЖАХ

Аппараты изображаются на схемах, как правило, в положениях, соответствующих отсутствию напряжения во всех цепях.



Примеры условных графических обозначений элементов схем релейной защиты:

а — обмотки реле, контакторов: 1 — однообмоточных; 2 — двухобмоточных; 3 — реле тока; 4 — реле времени с задержкой на срабатывание;

б — контакты реле замыкающие: 1 — без замедления; 2 — с замедлением на замыкание; 3 — то же на размыкание; 4 — с замедлением на замыкание и размыкание;

в — контакты реле размыкающие: 1 — без замедления; 2 — с замедлением на размыкание; 3 — то же на замыкание; 4 — с замедлением на размыкание и замыкание;

г — контакты реле переключающие: 1 — с размыканием цепи; 2 — без размыкания цепи;

д — контакты реле замыкающие кратковременно (импульсные, проскальзывающие); 1 — быстродействующий; 2 — с замедлением;

е — контакты путевого выключателя (блок-контакты); 1 — замыкающий; 2 — размыкающий (используется для обозначения вспомогательных контактов в приводах выключателей, разъединителей);

ж — контакты без самовозврата (указательные реле); 1 — замыкающий; 2 — размыкающий;

з — рубильники: 1 — однофазный; 2 — трехфазный;

и — предохранитель;

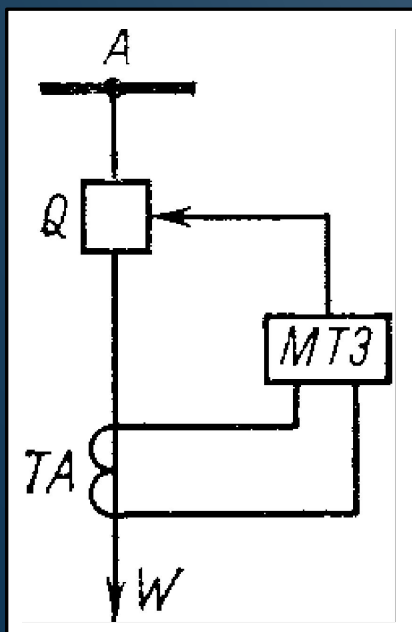
к — автоматический выключатель: 1 — однофазный; 2 — трехфазный;

л — кнопки: 1 — замыкающие; 2 — размыкающие.

# МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ЛЭП (ПРОСТАЯ)

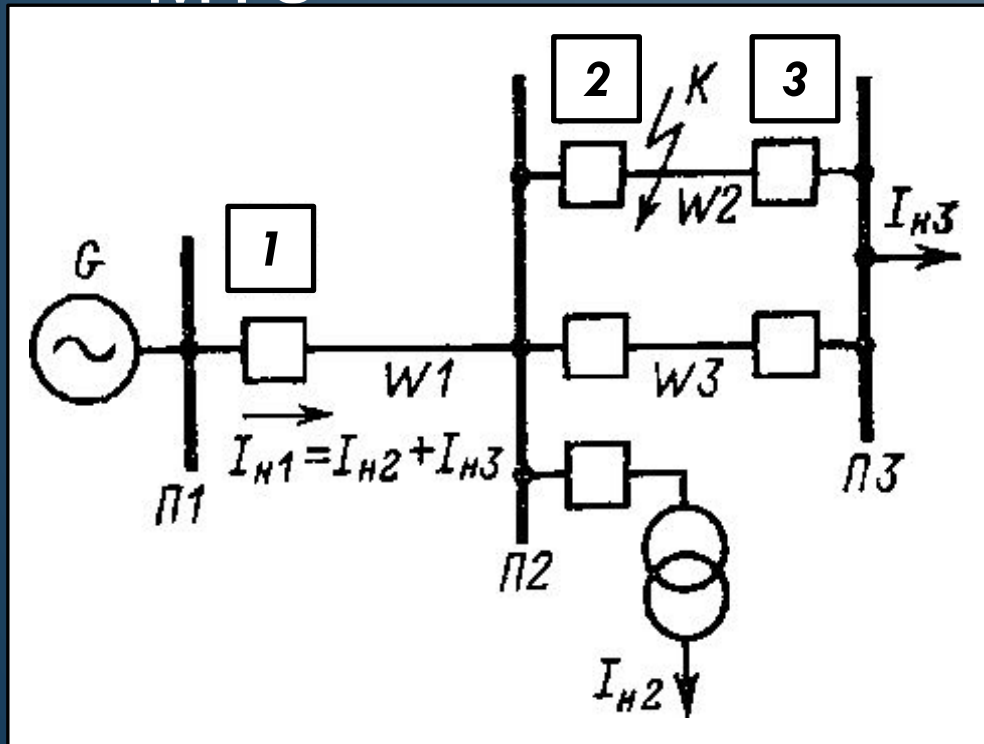
Основной признак возникновения КЗ или ненормального режима работы электроустановок - **резкое увеличение тока** по сравнению с током нагрузки, который становится значительно больше тока нагрузки. Принцип действия максимальной токовой защиты (МТЗ) основан на выявлении этого изменения тока.

При увеличении тока до заранее установленного значения, защита сработает и отключит выключатель Q. Значение тока, при котором происходит срабатывание защиты, называется током срабатывания защиты  $I_{сз}$ .



Отсюда первое требование к МТЗ – она должна правильно выявлять момент возникновения повреждения в защищаемой цепи. Это достигается установкой правильного значения тока срабатывания. **Так обеспечивается чувствительность.**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ МТЗ



Ток срабатывания МТЗ должен быть больше максимального реально возможного тока нагрузки с учетом повышения тока при самозапуске двигателей потребителей.

Самозапуск – процесс частичного или полного останова электродвигателей (снижения частоты вращения), в результате кратковременного перерыва питания, с последующим восстановлением частоты вращения. При самозапуске двигатели потребляют повышенный ток, превышающий номинальное значение.

При успешном самозапуске двигатели после затормаживания вновь набирают обороты и продолжают работу. При этом потребляемый ток постепенно снижается до номинальной величины.

При неуспешном самозапуске двигатели не разгоняются и останавливаются.



# КОЭФФИЦИЕНТ ВОЗВРАТА ЗАЩИТЫ

**Ток срабатывания** защиты  $I_{сз}$  – минимальный ток, при котором начинается работа защиты (и продолжает работать до истечения выдержки времени). Команда на отключение выключателя при этом пока не подается.

**Выдержка времени** - время, по истечении которого с момента начала работы (запуска) защиты подается команда на отключение выключателя.

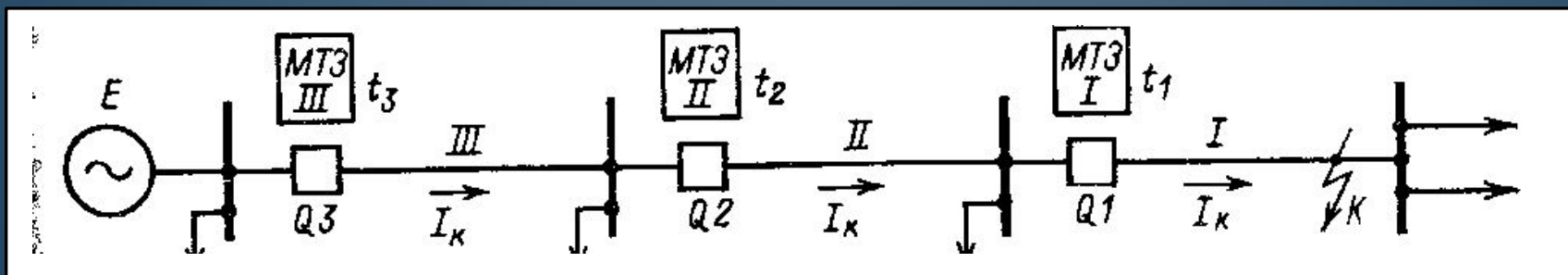
**Ток возврата** защиты  $I_{вз}$  – максимальный ток, при котором произойдет возврат защиты в исходное положение (прерывание отсчета выдержки времени).

**Коэффициент возврата** – отношение тока возврата к току срабатывания.

$$K_B = \frac{I_{вз}}{I_{сз}}$$

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ МТЗ

Появление большого тока в элементе не всегда является признаком его повреждения. Ток повреждения проходит не только по поврежденному элементу, но и по связанным с ним неповрежденным элементам электросети.

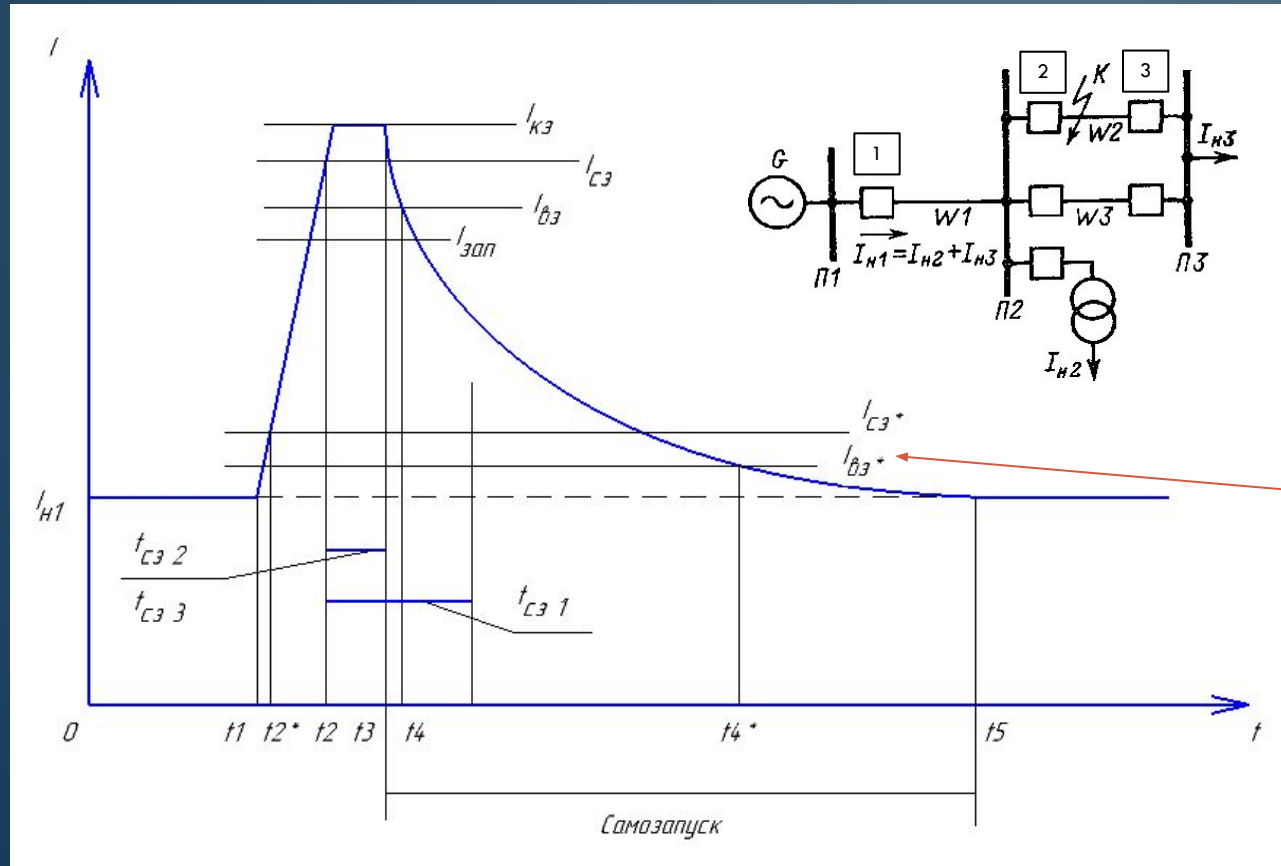


Отсюда второе требование к МТЗ - правильный выбор поврежденного участка. Выполнения этого требования в МТЗ обеспечивается настройкой различного времени срабатывания, возрастающего в направлении к источнику питания  $t_3 > t_2 > t_1$ . **Так обеспечивается селективность.**

При КЗ запустятся все три защиты, первой срабатывает защита МТЗ I и отключит выключатель Q1, ток в линиях II и III снизится до тока нагрузки, становится меньше тока возврата, защиты МТЗ II и МТЗ III возвращаются в исходное положение и не срабатывают.

Для каждого комплекта защиты создается своя искусственная задержка на срабатывание (используется реле времени).

# ВЛИЯНИЕ САМОЗАПУСКА НА СЕЛЕКТИВНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ КЗ



$t_1$  – момент возникновения КЗ на линии W2;  
 $t_2$  – момент срабатывания  
 токового реле защит 1, 2, 3;  
 $t_3$  – момент срабатывания  
 реле времени защит 2 и 3;  
 $t_4$  – момент возврата  
 токового реле защиты 1;  
 $t_5$  – момент окончания  
 процесса самозапуска (от  $t_3$  до  $t_5$ );

\* - вариант параметров настройки  
 защиты 1, не обеспечивающих  
 селективность  
 (происходит ложное  
 срабатывание защиты 1 в процессе  
 самозапуска)

$I_{H1}$  - ток нагрузки в нормальном режиме в линии W1;  
 $I_{K3}$  - ток при КЗ, протекающий по линии W1;  
 $I_{C3}$  - ток срабатывания защиты 1;  
 $I_{B3}$  - ток возврата защиты 1;  
 $I_{зап}$  - ток самозапуска;  
 $t_{C3 1}, t_{C3 2}, t_{C3 3}$  - время срабатывания защит 1, 2, 3 соответственно.

Должно выполняться условие:

$$t_{C3 1} > (t_4 - t_2),$$

чтобы защита 1 не успела сработать в процессе самозапуска.

Момент  $t_4$  должен наступить раньше, чем истечет выдержка  $t_{C3 1}$

# РАСЧЕТ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

$$I_{\text{зап}} = k_3 I_{\text{раб.макс}}$$

$$I_{\text{вз}} = k_{\text{н}} I_{\text{зап}} = k_{\text{н}} k_3 I_{\text{раб.макс.}}$$

$$k_{\text{в}} = \frac{I_{\text{вз}}}{I_{\text{сз}}}; I_{\text{вз}} = k_{\text{в}} I_{\text{сз}}$$

$$k_{\text{в}} I_{\text{сз}} = k_{\text{н}} k_3 I_{\text{раб.макс.}}$$

$I_{\text{раб. макс}}$  - максимальный рабочий ток с учетом возможной перегрузки;

$k_{\text{н}}$  - коэффициент надежности (отстройки), 1,10 – 1,25;

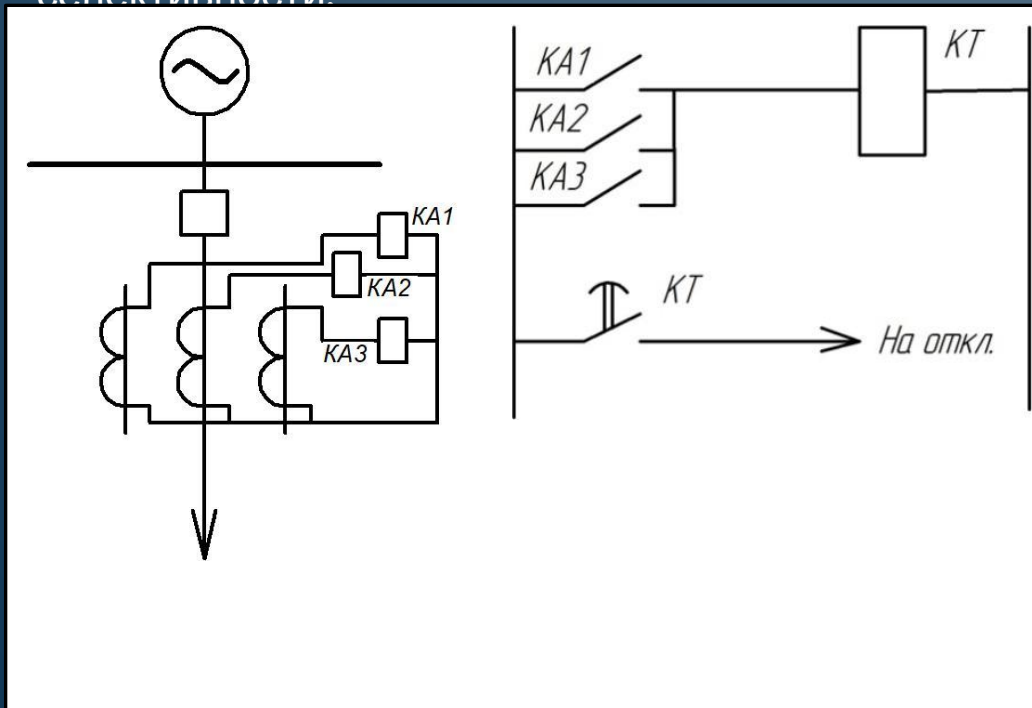
$k_3$  - коэффициент самозапуска, справочная величина, 2 – 3.

Ток срабатывания МТЗ

$$I_{\text{сз}} = \frac{k_{\text{н}} k_3}{k_{\text{в}}} I_{\text{раб.макс.}}$$

# СХЕМА ПРОСТОЙ МТЗ

- КА1-КА3 – токовые реле, контакты которых замыкаются при превышении током порога срабатывания (уставки).
- КТ – реле времени, служит для создания искусственной выдержки времени с целью обеспечения селективности.



Выражение для расчета времени срабатывания (уставка реле КТ):

$$t_{с.з.} = t_{с.з. смеж} + \Delta t$$

где  $t_{с.з. смеж}$  – время срабатывания аналогичной защиты МТЗ смежного элемента, стоящего дальше от источника питания;  
 $\Delta t$  - степень селективности, принимается равной 0,5 сек.

# ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МТЗ

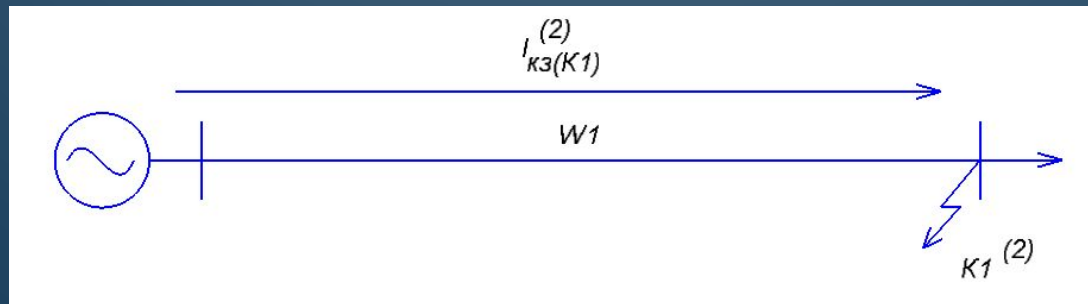
Чувствительность МТЗ численно оценивается коэффициентом чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}}$$

где  $I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}$  – минимальный ток в защите при двухфазном КЗ в конце защищаемой линии;

$I_{\text{сз}}$  - ток срабатывания защиты.

Коэффициент чувствительности простой МТЗ должен быть **не менее 1,5**.



# ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ПРОСТОЙ МТЗ

## Преимущества

Наиболее простая и дешевая защита.

## Недостатки

Наличие искусственно созданной выдержки времени; время отключения КЗ затягивается.

Недостаточная чувствительность при большой протяженности линий и значительной нагрузке.

# МТЗ ЛЭП С БЛОКИРОВКОЙ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

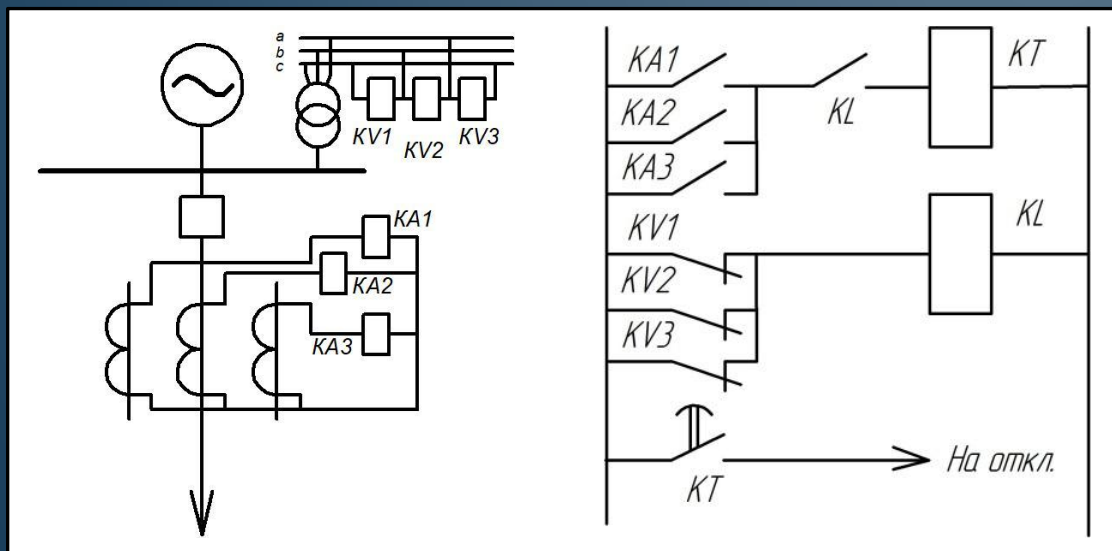
## Общие положения

При больших токах самозапуска или нагрузки ток срабатывания МТЗ получается настолько большим, что коэффициент чувствительности становится меньше допустимого значения. В этих случаях для повышения чувствительности защиты применяется блокировка минимального напряжения.

Защита действует на отключение только, если сработают одновременно токовые реле и реле минимального напряжения, то есть когда возрастают токи и понижается напряжение. Это бывает только при КЗ. Если ток перегрузки или самозапуска больше тока срабатывания реле, токовые реле сработают, но отключение не произойдет, так как блокирующие реле минимального напряжения не подействуют.



# СХЕМА МТЗ С БЛОКИРОВКОЙ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ



KA1 – KA3 – контакты токовых реле, замыкаются при превышении током порога срабатывания (уставки).  
KV1 – KV3 – реле минимального напряжения подключены к трансформатору напряжения;  
контакты данных реле замыкаются при снижении напряжения ниже допустимого порога только при КЗ  
(в режиме перегрузки или самозапуска остаются разомкнутыми, обмотка промежуточного реле KL остается обесточенной,  
контакт KL разомкнут, работа защиты заблокирована - запрещена).  
KL – промежуточное реле, срабатывает при значительном снижении напряжения (только при КЗ, когда замкнутся контакты KV1 – KV3).  
KT – реле времени, служит для создания искусственной выдержки времени с целью обеспечения селективности.

# ТОК СРАБАТЫВАНИЯ МТЗ С БЛОКИРОВКОЙ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

- 

$$I_{сз} = \frac{K_H}{K_B} I_{НОМ}$$

где  $I_{НОМ}$  - номинальный ток в линии (не учитывает режим перегрузки, меньше максимального рабочего тока  $I_{раб.макс}$ , используемого в формуле расчета тока срабатывания простой МТЗ).

В формуле отсутствует коэффициент самозапуска. Несрабатывание при самозапуске обеспечивается тем, что контакты реле напряжения KV1 – KV3 в данном режиме остаются разомкнутыми (напряжение при самозапуске снижается не так сильно, как при КЗ).

# НАПРЯЖЕНИЕ СРАБАТЫВАНИЯ МТЗ С БЛОКИРОВКОЙ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Выражение для расчета напряжения срабатывания реле блокировки минимального напряжения выбирается в соответствии со следующими требованиями:

- 1) защита не должна действовать при эксплуатационных понижениях напряжения до минимально возможного рабочего значения  $U_{\text{раб.мин}}$ ;
- 2) защита должна надежно действовать при КЗ на защищаемом участке с требуемым коэффициентом чувствительности.

Напряжение срабатывания защиты для выполнения первого условия:

$$U_{\text{сз}} = \frac{U_{\text{раб.мин}}}{k_{\text{н}} k_{\text{в}}}$$

где  $k_{\text{н}}$  - коэффициент надежности, принимается равным 1,1;

$k_{\text{в}}$  - коэффициент возврата (для реле минимального действия принимается равным 1,15).

# ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Коэффициент чувствительности по напряжению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{сз}}}{U_{\text{К.макс}}}$$

где  $U_{\text{К.макс}}$  - максимально возможное напряжения на шинах в месте установки защиты при наименьшем возможном токе КЗ (в режиме двухфазного КЗ в конце защищаемой линии).

Благодаря тому, что при расчет тока срабатывания не учитывается коэффициент самозапуска и используется величина номинального, а не максимального рабочего тока, ток срабатывания защиты при прочих равных условиях будет меньше, чем для простой МТЗ.

Соответственно, коэффициент чувствительности повышается (ток срабатывания защиты уменьшается, ток двухфазного КЗ остается неизменным).

Коэффициент чувствительности по току и напряжению МТЗ с блокировкой минимального напряжения должен быть не менее 1,5.

# МГНОВЕННАЯ ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА ЛЭП (МТО)

## Общие положения

Токсовая отсечка – разновидность МТЗ со следующими особенностями:

- в большинстве случаев срабатывает без выдержки времени;
- ограниченная зона действия;
- для обеспечения селективности ток срабатывания отсечки отстраивается не от тока нагрузки, а от тока КЗ в конце защищаемой линии.

## Выражение для расчета тока срабатывания

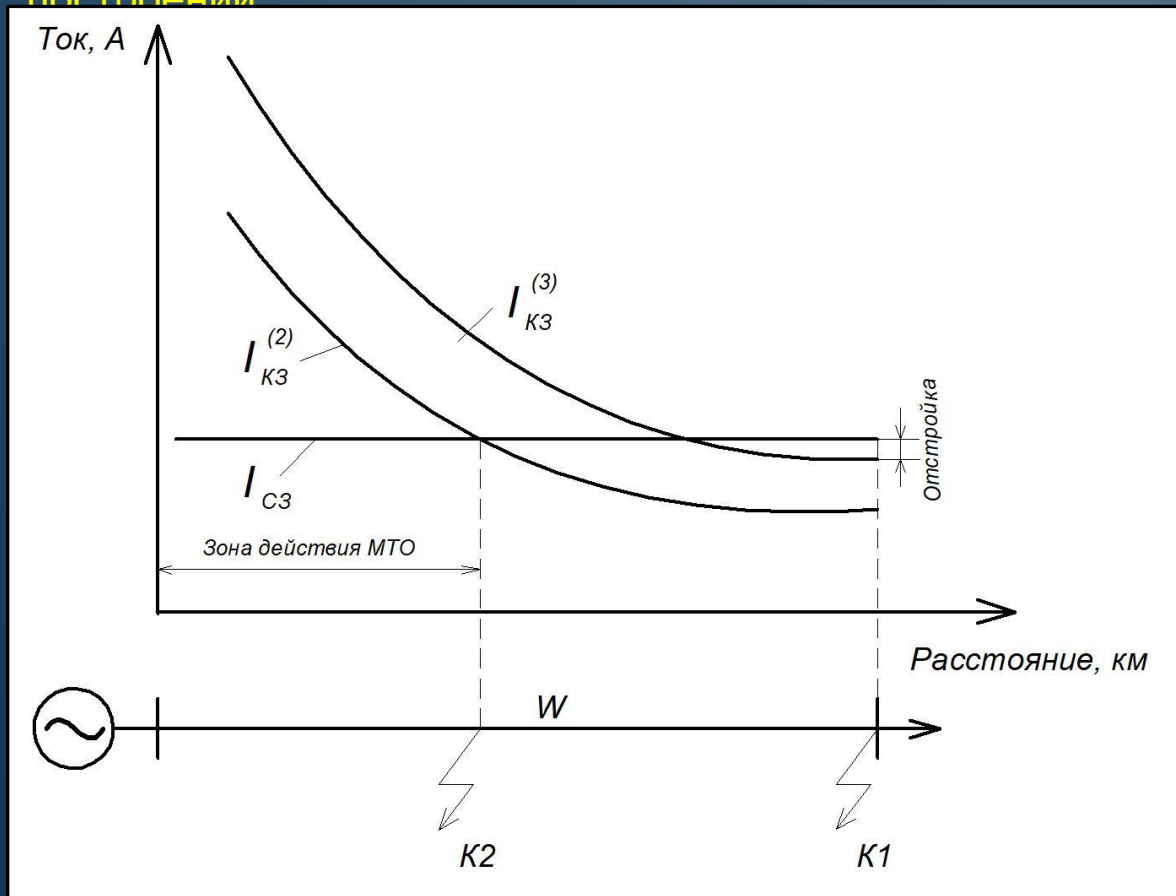
Ток срабатывания мгновенной токовой отсечки выбирается так, чтобы она не работала при повреждениях на смежной линии или в трансформаторе питаемой подстанции:

$$I_{сз} = K_H I_{КЗ.макс}^{(3)}$$

где  $K_H$  - коэффициент надежности (отстройки), обеспечивает запас отстройки тока срабатывания от тока трехфазного КЗ;  $I_{КЗ.макс}^{(3)}$  - максимальный ток в защите при трехфазном коротком замыкании в конце защищаемой линии.

# ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ ЛЭП

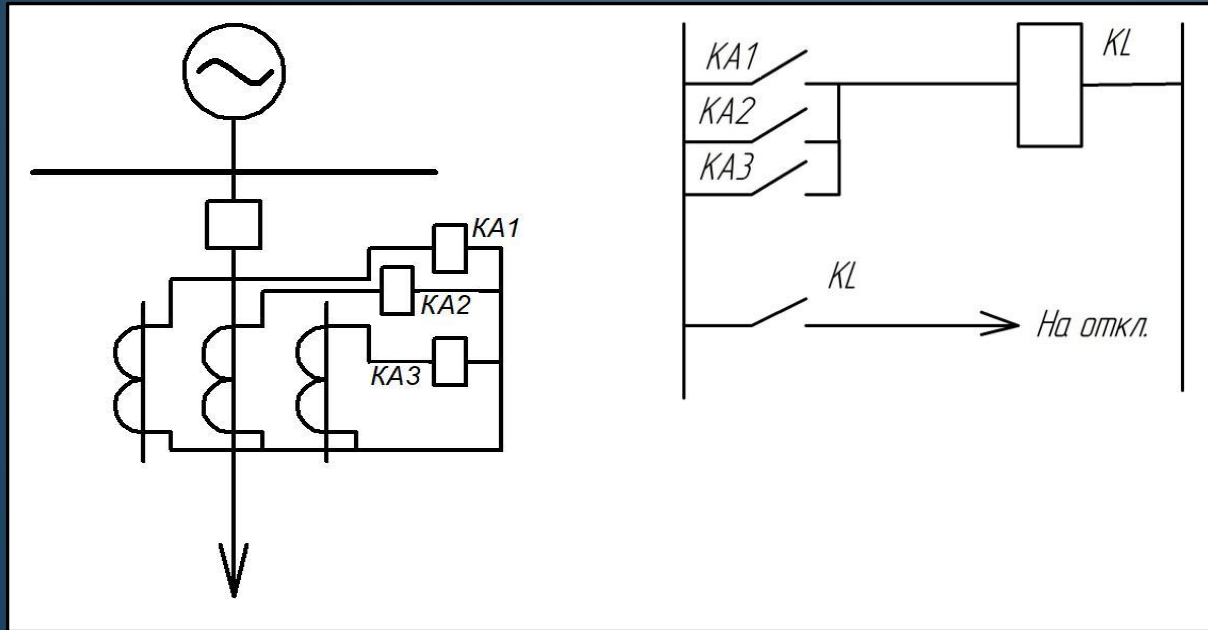
Выполняется по длине зоны действия защиты, которая определяется в результате графических построений



Строится кривая зависимости тока трехфазного КЗ  $I_{КЗ}^{(3)}$  от расстояния между защитой и местом КЗ. Строится горизонтальная прямая тока срабатывания  $I_{СЗ}$ , отстроенная от тока трехфазного КЗ в конце защищаемой линии (точка K1). Строится кривая зависимости тока двухфазного КЗ  $I_{КЗ}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{КЗ}^{(3)}$  от расстояния между защитой и местом КЗ. Точка пересечения кривой  $I_{КЗ}^{(2)}$  и прямой  $I_{СЗ}$  соответствует границе зоны действия МТО (точка K2). Левее этой точки ток КЗ превышает ток срабатывания защиты (защита сработает при двухфазном и, тем более, трехфазном КЗ).

Длина зоны действия должна составлять не менее 20% длины защищаемой линии.

# СХЕМА МТО



- KA1 – KA3 – контакты токовых реле, замыкаются при превышении током порога срабатывания (уставки).
- KL – промежуточное реле, срабатывает мгновенно без выдержки времени при замыкании любого из контактов KA1 – KA3, замыкает свой контакт и подает команду на отключение выключателя.

## Преимущества

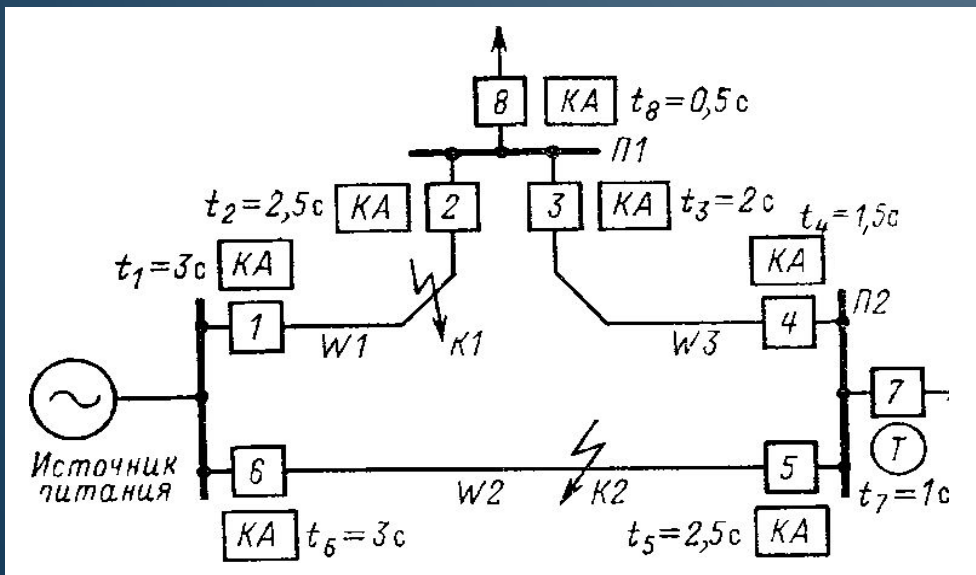
- Простая и дешевая защита.
- Высокое быстродействие, срабатывает без выдержки времени.
- Обеспечивает быстрое отключение наиболее опасных КЗ вблизи источника питания, сопровождающихся протеканием значительных опасных токов.

## Недостатки

- Защищает только часть линии, на которой устанавливается.
- Используется как дополнительная защита.

# МАКСИМАЛЬНАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА ЛЭП

Максимальная токовая защита используется главным образом для радиальных линий с односторонним питанием. В кольцевой сети, в сети с двусторонним питанием и особенно в сложных сетях с несколькими источниками питания максимальная токовая защита в большинстве случаев **не может обеспечить селективного действия**.



Выдержки времени, определяемые по ступенчатому принципу как для простой МТЗ:

- на выключателе 4 = 1 + 0,5 = 1,5 с;
- на выключателе 3 = 1,5 + 0,5 = 2 с;
- на выключателе 2 = 2 + 0,5 = 2,5 с;
- на выключателе 1 = 2,5 + 0,5 = 3 с;
- на выключателе 5 = 2 + 0,5 = 2,5 с;
- на выключателе 6 = 2,5 + 0,5 = 3 с.

При такой настройке максимальная токовая защита будет действовать селективно при КЗ на линиях, отходящих к нагрузке, и на шинах подстанций П1 и П2. Однако при КЗ на линиях W1 и W2 защита будет действовать **неселективно**.

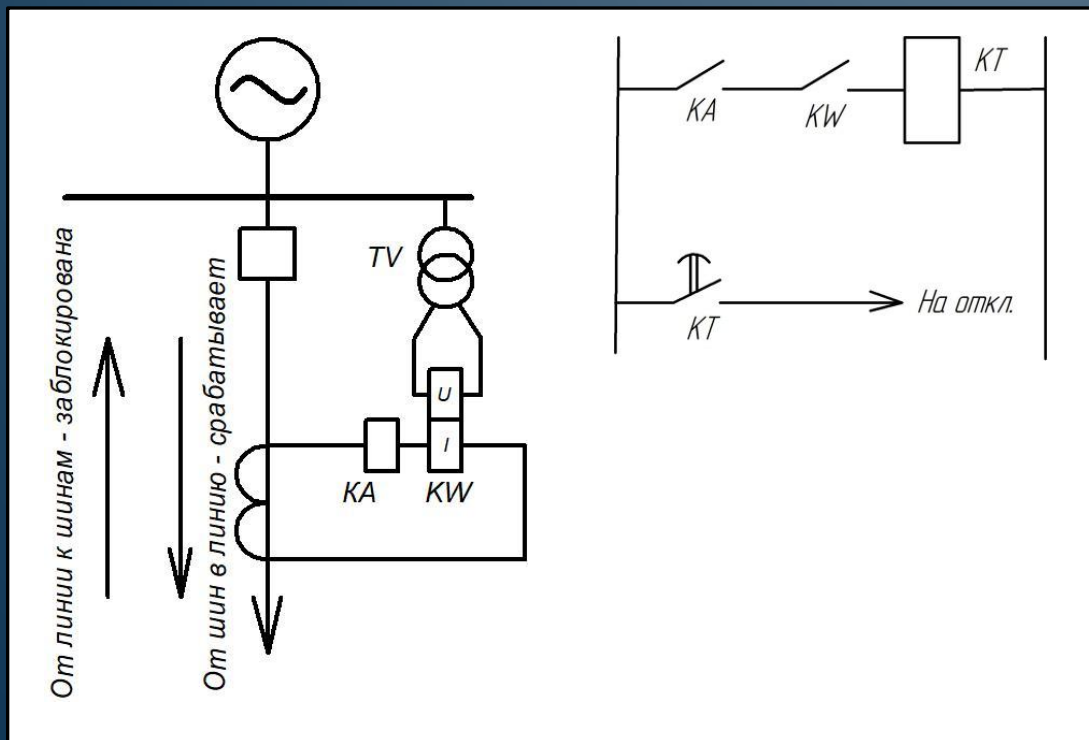
КЗ в точке К1 – должны отключиться 1 и 2, отключатся 1 и 4, подстанция П1 потеряет питание.

КЗ в точке К2 – должны отключиться 5 и 6, отключатся 4 и 6, подстанция П2 потеряет питание.



Для селективного отключения повреждений в кольцевой сети необходимо, чтобы защита различала, на какой из линий произошло КЗ. Таким свойством обладает **максимальная направленная защита**.

Защита действует на отключение выключателя только в случае, когда сработают одновременно токовое реле  $KA$  и **реле направления мощности  $KW$** .  $KW$  замыкает свои контакты только при направлении мощности КЗ **от шин подстанции в линию**.



Функциональная схема для упрощения условно показана в однолинейном исполнении.

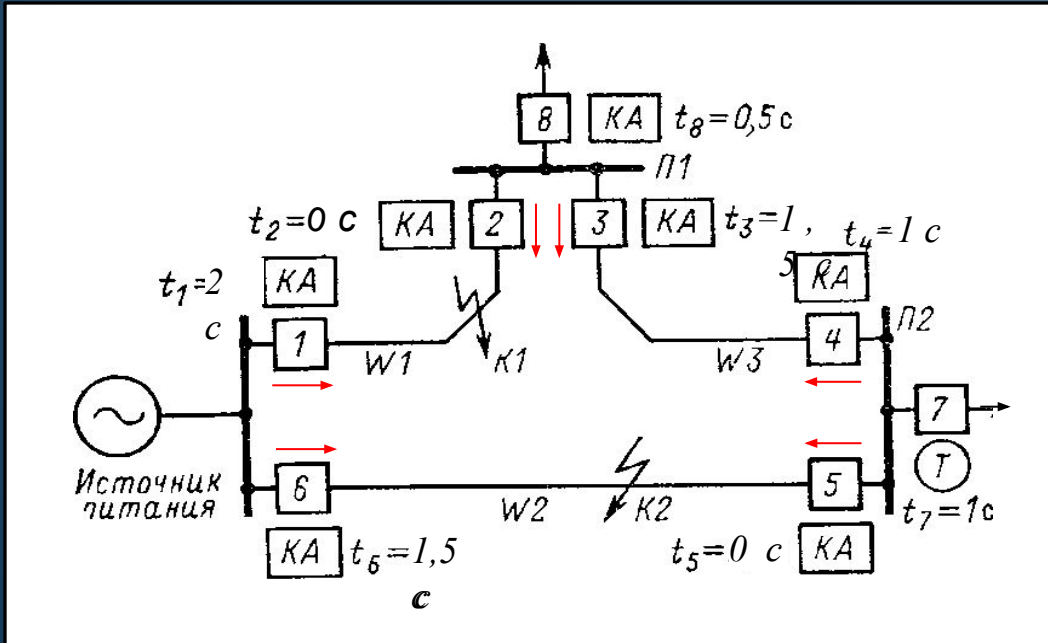
$KA$  – контакты токового реле, замыкаются при превышении током порога срабатывания (уставки).

$KW$  – реле направления мощности имеет две обмотки – тока и напряжения; контакт реле **замыкается** только при протекании мощности в направлении от шин в линию, при направлении мощности от линии к шинам остается разомкнутым и запрещает (блокирует) работу защиты.

$KT$  – реле времени, служит для создания искусственной выдержки времени с целью обеспечения селективности.

# ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ

Выбор выдержек времени максимальных направленных защит производится по ступенчатому принципу, но с учетом направленности их действия, т. е. производится согласование защит, действующих в одном направлении.



При использовании направленной защиты вместо обычной МТЗ требования селективности будут выполнены при КЗ на любых линиях сети (как на

ответвлениях к потребителям, так и в кольце).

**Будет отключаться только поврежденная**

Обход по часовой стрелке от выключателя 2 в направлении 2-3-4-5-6 при КЗ в точке К1:  
 $t_2=0$  с;

$t_3$  – не учитывается;

$t_4=t_2+0,5=0+0,5=0,5$  с;

$t_4=t_8+0,5=0,5+0,5=1,0$  с;

$t_4=\max\{0,5; 1,0\}=1,0$  с;

$t_5$  – не учитывается;

$t_6=t_4+0,5=1,0+0,5=1,5$  с.

Обход против часовой стрелки от выключателя 5

в направлении 5-4-3-2-1 при КЗ в точке К1:

$t_5=0$  с;

$t_4$  – не учитывается;

$t_3=t_2+0,5=0+0,5=0,5$  с;

$t_3=t_7+0,5=1,0+0,5=1,5$  с;

$t_3=\max\{0,5; 1,5\}=1,5$  с;

$t_2$  – не учитывается;

$t_1=t_3+0,5=1,5+0,5=2,0$  с.

# «МЕРТВАЯ ЗОНА» ПО НАПРЯЖЕНИЮ

«Мертвая зона». При трехфазных КЗ вблизи шин подстанции, где установлена направленная МТЗ, напряжение на шинах подстанции понижается практически до нуля. Мощность на реле направления мощности оказывается недостаточной для действия реле, защита отказывает. Участок линии, в пределах которого при трехфазных КЗ происходит отказ защиты по указанной причине, называется «мертвой зоной». Наличие «мертвой зоны» - недостаток максимальной направленной защиты, присущий всем защитам, зависящим от напряжения.

## ТОК СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

Ток срабатывания пусковых токовых реле максимальной направленной защиты выбирается аналогично с максимальной токовой защитой.

### Преимущества

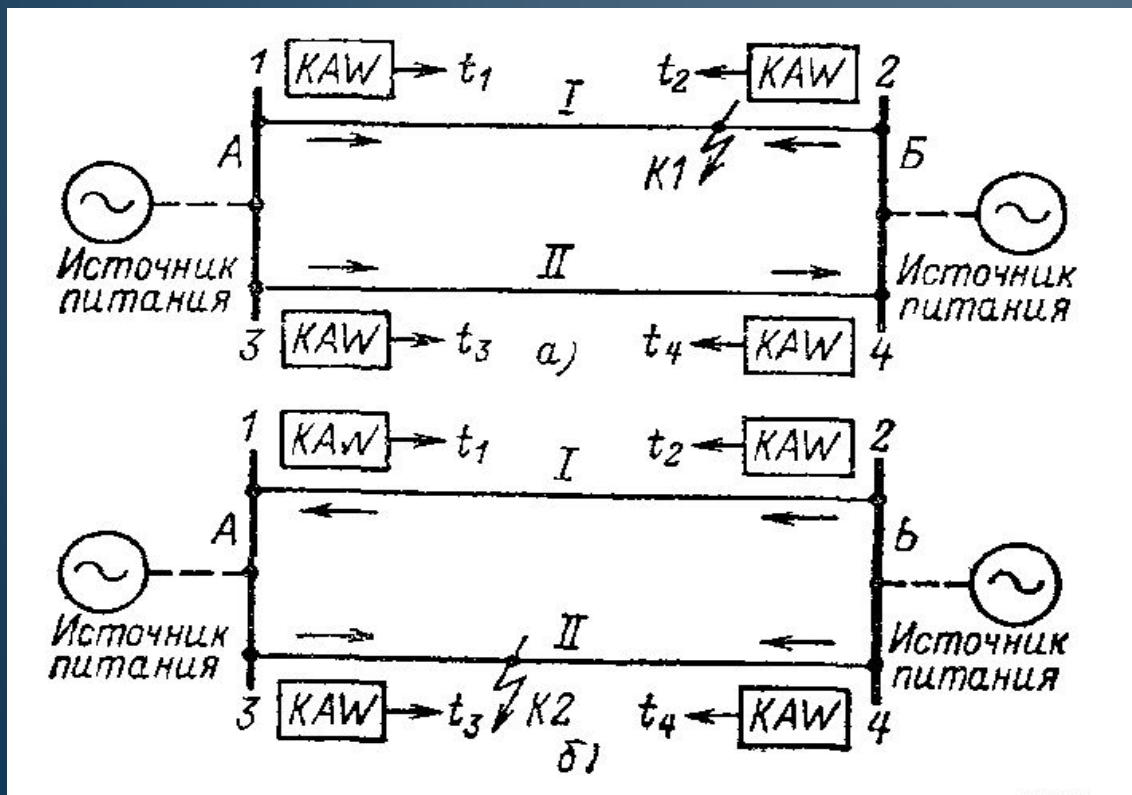
Обеспечивает селективность при КЗ на линиях в кольцевых сетях с одним источником питания, если питание на линию может быть подано с обеих сторон.

### Недостатки

Наличие мертвой зоны по напряжению. Требует установки дополнительных защит, обеспечивающих срабатывание при КЗ в мертвой зоне (например, токовой отсечки).

# ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЛЭП

В сетях с двумя и более источниками питания максимальная направленная защита не обеспечивает селективности действия.

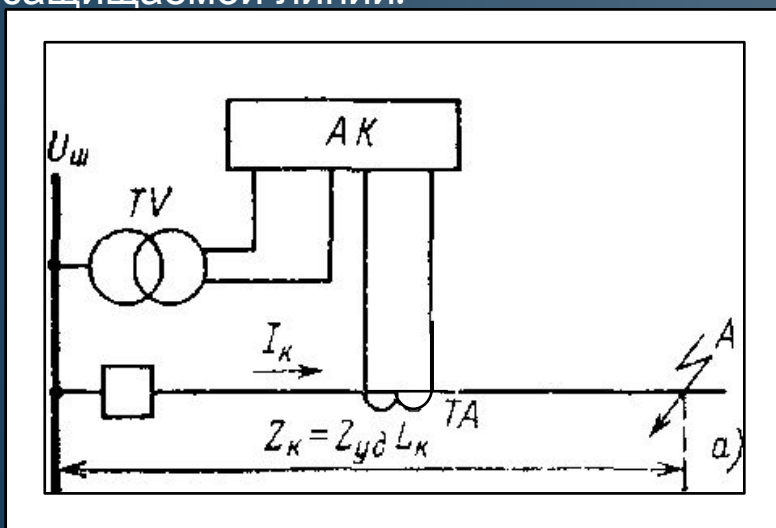


При КЗ в точке К1 на линии I приходят в действие максимальные направленные защиты 1, 2 и 3. Для селективного отключения только поврежденной линии I защита 2 должна иметь выдержку времени меньше, чем защита 3.

При КЗ в точке К2 на линии II приходят в действие защиты 2, 3, 4. Для селективного отключения линии II защита 3 должна иметь выдержку времени меньше, чем защита 2.

Выполнение этих несовместимых требований с помощью максимальной направленной защиты невозможно. Для защиты сетей с более сложной схемой и несколькими источниками питания используется дистанционная защита.

Дистанционной называется защита, **выдержка времени** которой автоматически **изменяется в зависимости от удаленности** места КЗ от места установки защиты. Определение удаленности до места КЗ производится измерением сопротивления цепи КЗ, пропорционального отношению остаточного напряжения на шинах, где установлена защита, и значения тока КЗ, проходящего по защищаемой линии.



$Z_k$  пропорционально дистанции  $L_k$  от места установки защиты до места КЗ.

Основной орган дистанционной защиты - **реле сопротивления КЗ**. Его назначение - измерение сопротивления линии до места КЗ.

При КЗ в точке А:

$I_k$  - ток, проходящий по защищаемой линии к месту КЗ;

$U_{ш}$  - напряжение на шинах подстанции;

$Z_k$  - сопротивление участка линии от шин подстанции до места КЗ.

$$U_{ш} = I_k \cdot Z_k.$$

$$\frac{U_{ш}}{I_k} = \frac{I_k \cdot Z_k}{I_k} = Z_k.$$

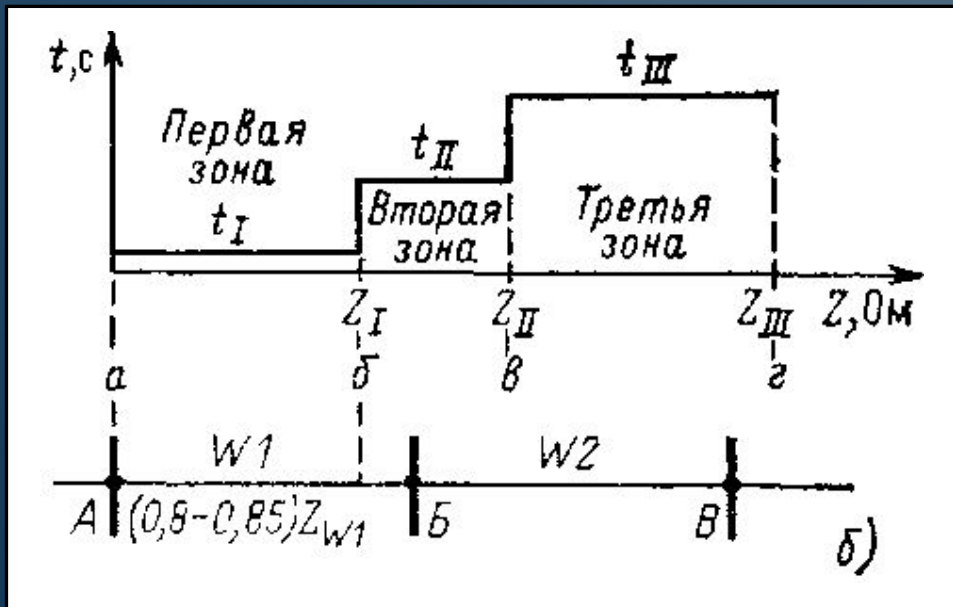
$$Z_k = Z_{уд} \cdot L_k.$$

$$\frac{U_{ш}}{I_k} = Z_{уд} \cdot L_k.$$

# ХАРАКТЕРИСТИКА ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Характеристика времени срабатывания дистанционной защиты - зависимость выдержки времени дистанционной защиты от сопротивления (или расстояния) до места КЗ.

Существуют три вида характеристики: наклонная, комбинированная и ступенчатая. В России обычно используются дистанционные защиты со ступенчатыми характеристиками.



А—Б - первая зона, Б—В – вторая, В—Г — третья. Каждой зоне соответствует степень выдержки времени, неизменная в пределах зоны.

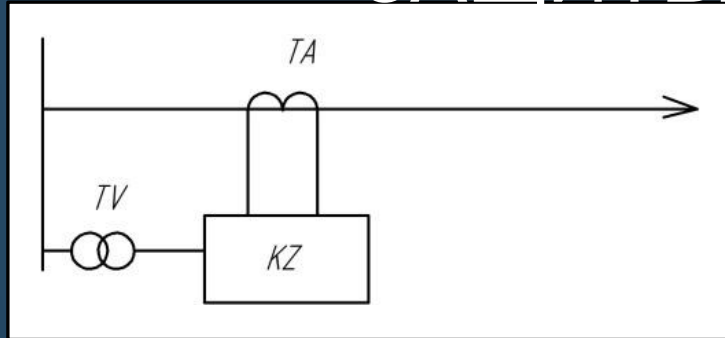
Первая зона: (без выдержки времени), настраивается на 80–85 % длины защищаемой линии  $W1$ . Большой охват линии недопустим, так как из-за погрешностей трансформаторов тока, трансформаторов напряжения и самого реле сопротивления защита может сработать при КЗ на смежной линии  $W2$ .

Вторая зона: охватывает конец линии  $W1$ , шины подстанции Б и часть линии  $W2$ .

Третья зона: охватывает линию  $W2$  для резервирования на случай отказа ее защиты или выключателя.

Чем больше сопротивление до места КЗ, тем с большей выдержкой времени действует дистанционная защита.

# СХЕМА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ



KZ – реле сопротивления, по измеряемым значениям тока КЗ (через трансформатор тока ТА) и остаточного напряжения на шинах подстанции (через трансформатор напряжения TV) оценивает сопротивление и расстояние (дистанцию) от места установки защиты (подстанции) до места КЗ. В зависимости от результата замера (удаленности КЗ) выбирает разные выдержки времени срабатывания.

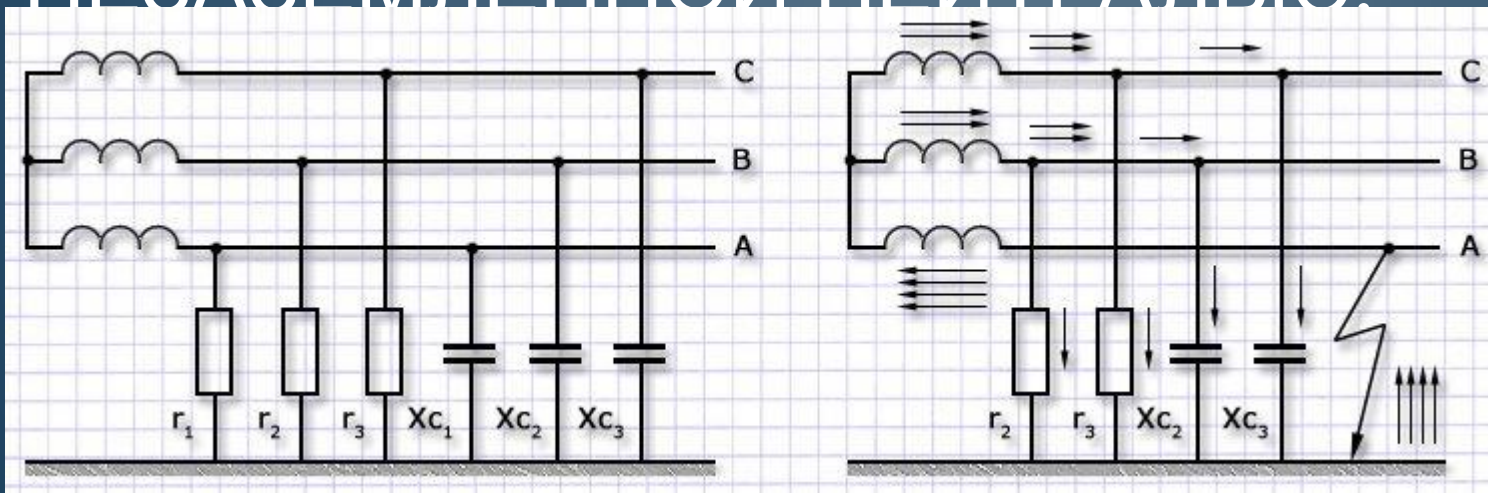
## Преимущества дистанционной защиты

Обеспечивает селективность при КЗ на линиях в сетях сложной конфигурации с двумя и более источниками питания.

## Недостатки дистанционной защиты

Наличие мертвой зоны по напряжению. Требуется установка дополнительных защит, обеспечивающих срабатывание при КЗ в мертвой зоне (например, токовой отсечки).

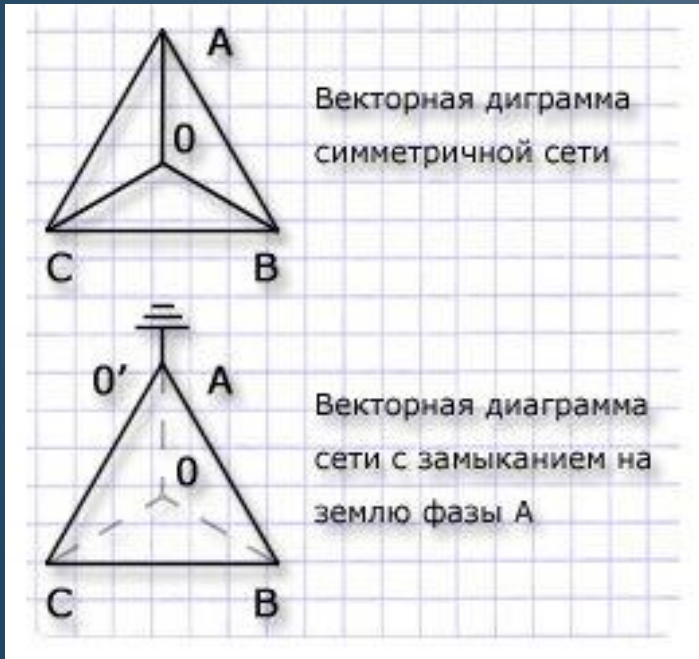
# СИГНАЛИЗАЦИЯ ОБ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.



Сети 6 – 35 кВ работают с изолированными нулевыми точками трансформаторов и генераторов или с заземленными через компенсирующие катушки.

Ток однофазного замыкания на землю зависит от напряжения сети и ее емкости относительно земли. Чем выше напряжение сети и чем больше емкость, тем больше ток замыкания на землю. Емкость сети зависит главным образом от суммарной протяженности кабельных и воздушных линий: при одинаковой протяженности кабельные сети имеют емкость значительно большую, чем воздушные. Так, например, ток замыкания на землю на каждые 100 км сети напряжением 6 кВ примерно составляет 1,5 А для воздушных и 80 А для кабельных линий (при сечении кабелей 95 мм<sup>2</sup>).



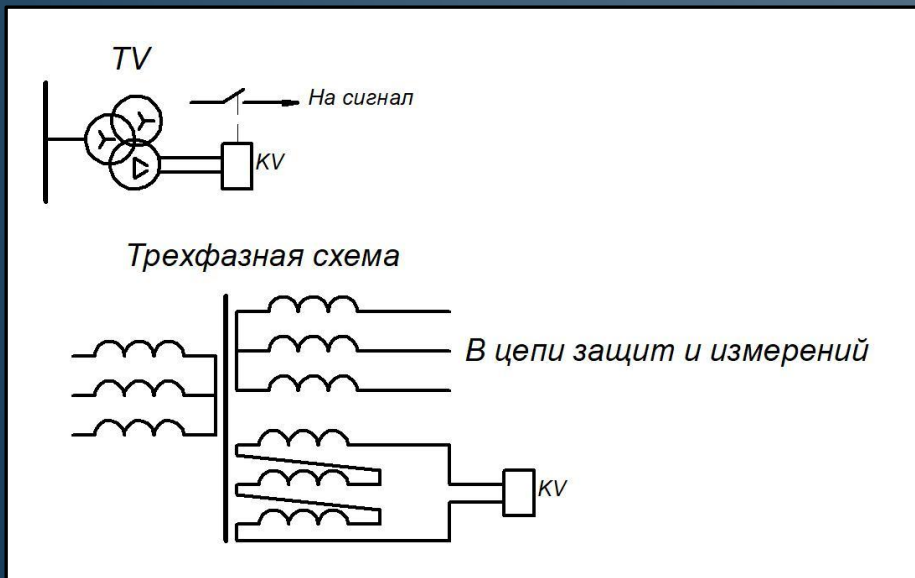


Междуфазные напряжения при замыкании на землю остаются неизменными и ток замыкания на землю имеет небольшое значение, при этих условиях однофазные замыкания на землю в сети 6 – 35 кВ непосредственной опасности для потребителей не представляют и быстрого отключения, как правило, не требуют.

Однако повышение фазных напряжений неповрежденных фаз в 1,73 раза может вызвать перекрытие или пробой изоляции на второй фазе, что приведет к образованию двойного замыкания на землю, т. е. к двухфазному КЗ.

Длительное прохождение тока однофазного замыкания на землю в месте замыкания также может привести к повреждению изоляции. Поэтому по правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей допускается работа в режиме однофазного замыкания на землю в течение 2 ч. За это время поврежденный участок должен быть выявлен и отключен.

# СХЕМА ОБЩЕЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ОБ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ



$$U_A + U_B + U_C = 3 \cdot U_0$$

В нормальном режиме  $U_0 \approx 0$ .  
При однофазном замыкании  $U_0 \gg 0$

Отыскание места замыкания на землю производится с помощью общих или индивидуальных устройств сигнализации. Общая сигнализация при замыканиях на землю может выполняться способом, показанным на рисунке.

При возникновении замыкания на землю на специальной обмотке появляется напряжение, реле KV срабатывает и подает общий сигнал.

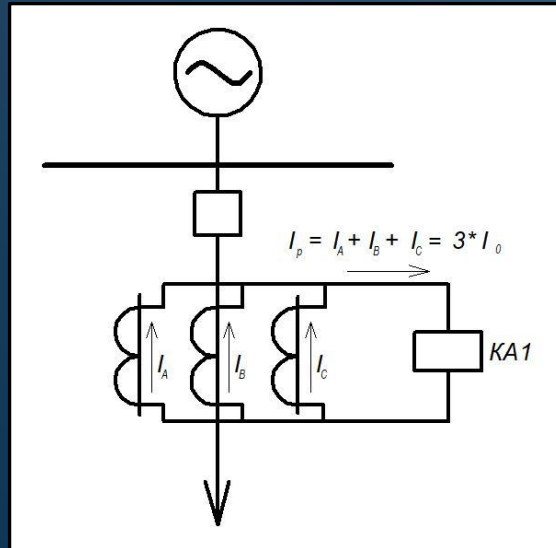
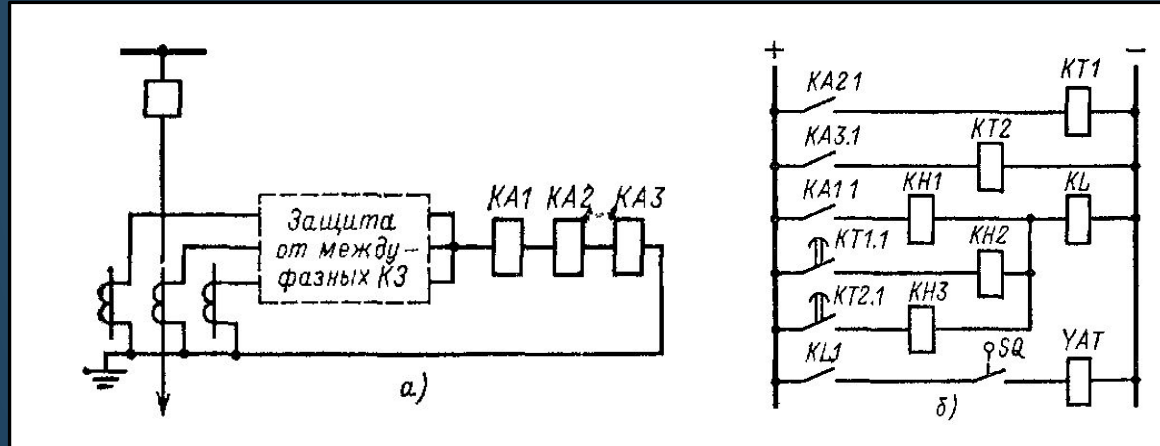
Реле напряжения KV включено на специальную обмотку TV, соединенную по схеме фильтра напряжения нулевой последовательности «разомкнутый треугольник». Напряжение на выходе данной обмотки равно сумме напряжений трех фаз, которая в свою очередь равна утроенному напряжению нулевой последовательности  $U_0$ .

# ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТИ С ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В сетях с заземленной нейтралью применяется **максимальная токовая защита от однофазных КЗ**. Токовые реле включаются на ТТ, собранные в схему фильтра токов нулевой последовательности. Наиболее распространена защита, состоящая из двух или трех ступеней.

- **Первая ступень:** мгновенная отсечка, защищающая часть линии.
- **Вторая ступень:** максимальная токовая защита с ограниченной зоной действия, ток срабатывания которой согласуется с током срабатывания первой ступени аналогичной защиты смежного участка.
- **Третья ступень:** максимальная токовая защита с током срабатывания, отстроенным от тока небаланса, и выдержкой времени, выбранной по условию селективности с третьей или второй ступенью защиты второго участка.

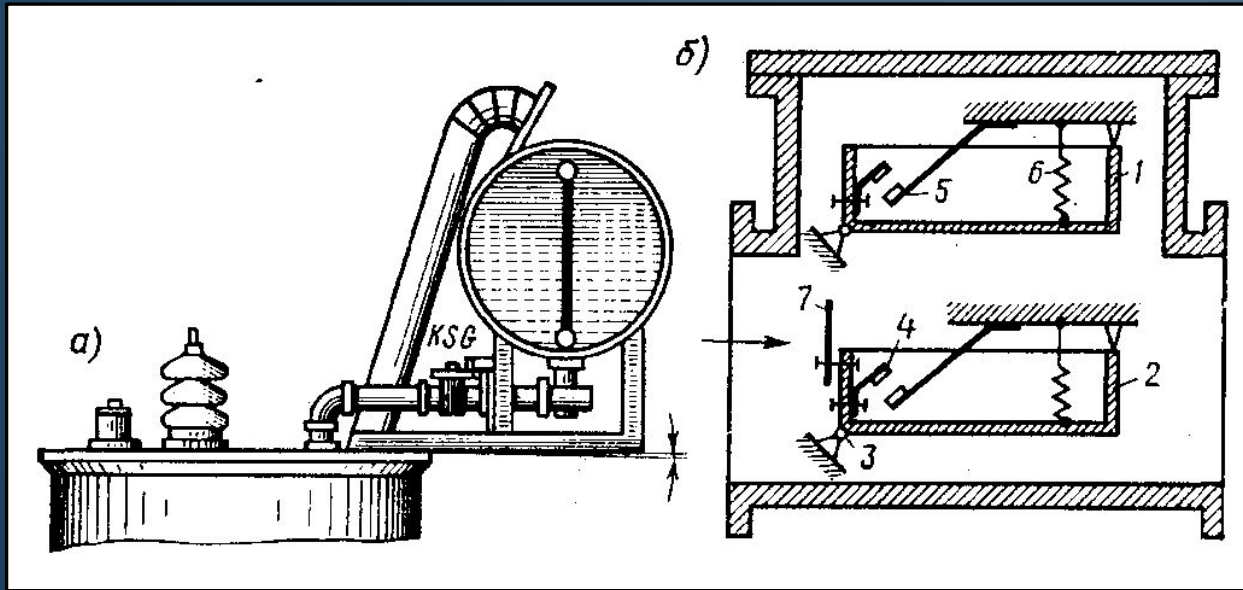
# СХЕМА ЗАЩИТЫ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ



Три трансформатора тока соединяются параллельно. На выходе такой схемы ток равен сумме токов трех фаз, которая равна утроенному значению тока нулевой последовательности. Ток нулевой последовательности в режиме без КЗ на землю мал и обусловлен только некоторой несимметрией фазных токов. Однако при КЗ на землю ток нулевой последовательности значительно возрастает и вызывает срабатывание реле и запуск защиты.

Благодаря существенному отличию величины тока нулевой последовательности в режиме без повреждения и при КЗ, срабатывание защиты надежно обеспечивается с высокой степенью

# ГАЗОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА



Принцип действия - использование явления газообразования в баке поврежденного трансформатора. При повреждениях внутри трансформатора происходит нагрев, горение дуги и термическое разложение масла, выделяется газ. Интенсивность газообразования зависит от характера и размеров повреждения. Газовая защита способна различать степень повреждения и в зависимости от этого действовать на сигнал или отключение.

Основным элементом газовой защиты - газовое реле KSG. Устанавливается в маслопроводе между баком и расширителем. Реле чашечного типа РГЧЗ-66 приведено на рисунке. Две алюминиевые чашки 1 и 2 могут вращаться вместе с подвижными контактами 4 вокруг осей 3. Контакты 4 замыкаются с неподвижными контактами 5 при опускании чашек. В нормальном режиме корпус реле заполнен маслом, чашки удерживаются пружинами 6 в верхнем положении. При газообразовании масло вытесняется из корпуса, уровень масла в корпусе понижается, масса чашки с маслом преодолевает силу пружины. Чашки опускаются, контакты замыкаются. Сначала опускается верхняя чашка и реле действует на сигнал. Далее нижняя чашка замыкает контакт на отключение. При интенсивном газообразовании (дуга при междуфазном КЗ) сильный поток масла и газов проходит из бака в расширитель через газовое реле, действует на лопасть 7. Лопасть поворачивается и замыкает нижний контакт в цепи отключения трансформатора.

Газовую защиту **нельзя использовать в качестве единственной защиты** трансформатора от внутренних повреждений.

Газовая защита обязательна для трансформаторов мощностью **6300 кВА и более**. Допускается устанавливать газовую защиту и на трансформаторах меньшей мощности. Для внутрицеховых подстанций газовую защиту следует устанавливать на понижающих трансформаторах практически любой мощности, допускающих это по конструкции, независимо от наличия другой быстродействующей защиты.

### Преимущества

- Высокая чувствительность, реагирует практически на все виды повреждений внутри бака;
- Сравнительно высокое быстродействие;
- Простота выполнения;
- Способность защищать трансформатор при недопустимом понижении уровня масла по любым причинам.

### Недостатки

- Не реагирует на повреждения, расположенные вне бака.
- Ложная работа при попадании воздуха в бак трансформатора (при доливке масла, после ремонта системы охлаждения и др.).
- Ложное срабатывание защиты в районах, подверженных землетрясениям. В таких случаях допускается возможность перевода действия отключающего элемента на сигнал.

# МТЗ ТРАНСФОРМАТОРА (ПРОСТАЯ)

МТЗ служит для отключения трансформатора при КЗ на выводах или внутри трансформатора, а также на сборных шинах или линиях со стороны потребителя.

В качестве **основной** максимальная токовая защита применяется **только на трансформаторах малой мощности**, так как имеет недопустимо большую выдержку времени. На трансформаторах, имеющих отдельную защиту от повреждений в самом трансформаторе и на его выводах максимальная токовая защита применяется в качестве **дополнительной**.

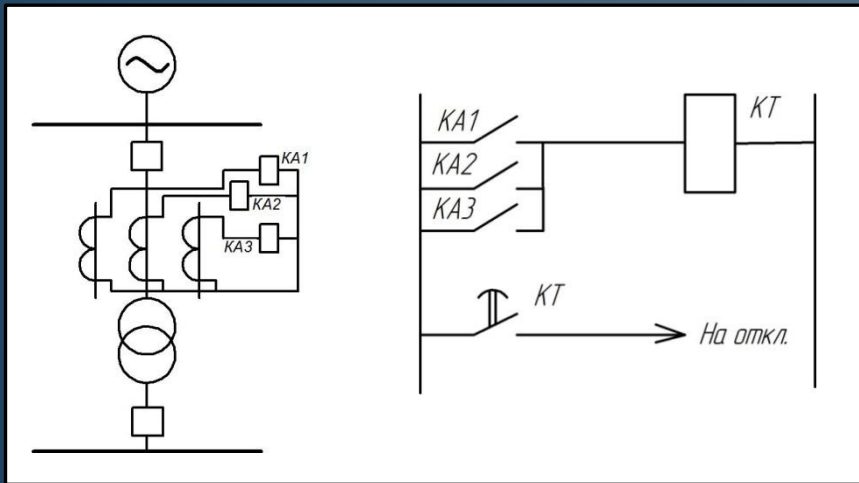
МТЗ применяется в качестве **резервной** защиты трансформаторов **от сверхтоков внешних КЗ**.

Работает при отказе основных защит трансформатора, а также при отказах защит или выключателей смежного оборудования.

В качестве защиты от сверхтоков при междуфазных КЗ используется простая МТЗ, МТЗ с пуском по напряжению, максимальная направленная защита, МТЗ обратной последовательности.

**Устанавливается со стороны источника питания**, при наличии нескольких источников – со стороны главного источника.

# СХЕМА ПРОСТОЙ МТЗ ТРАНСФОРМАТОРА



KA1-KA3 – токовые реле, контакты которых замыкаются при превышении током порога срабатывания (уставки).

КТ – реле времени, служит для создания искусственной выдержки времени с целью обеспечения селективности.

**Выражение для расчета тока срабатывания (аналогично с МТЗ ЛЭП)**

$$I_{сз} = \frac{K_H K_3}{K_B} I_{раб.макс}$$

где  $K_H$  - коэффициент надежности (отстройки), обеспечивает запас отстройки тока срабатывания от максимального рабочего тока;  $K_3$  - коэффициент самозапуска, учитывает увеличения тока нагрузки при самозапуске;

$K_B = \frac{I_{вр}}{I_{ср}}$  - коэффициент возврата реле;  $I_{вр}$  - ток возврата реле (максимальный ток, при котором реле возвращается в исходное состояние, которое было до срабатывания);  $I_{ср}$  - ток срабатывания реле (минимальный ток, при котором реле срабатывает, переключает контакты в состояние, противоположное исходному);  $I_{раб.макс}$  - максимальный рабочий ток в трансформаторе.



# МТЗ ТРАНСФОРМАТОРА С ПУСКОМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

На повышающих трансформаторах простая максимальная токовая защита **не удовлетворяет требованиям чувствительности**, поэтому применяется максимальная токовая защита с пуском по напряжению.

Наличие реле напряжения позволяет выбрать ток срабатывания защиты без учета тока перегрузки и самозапуска.

$$I_{сз} = \frac{K_H}{K_B} I_{НОМ}$$

где

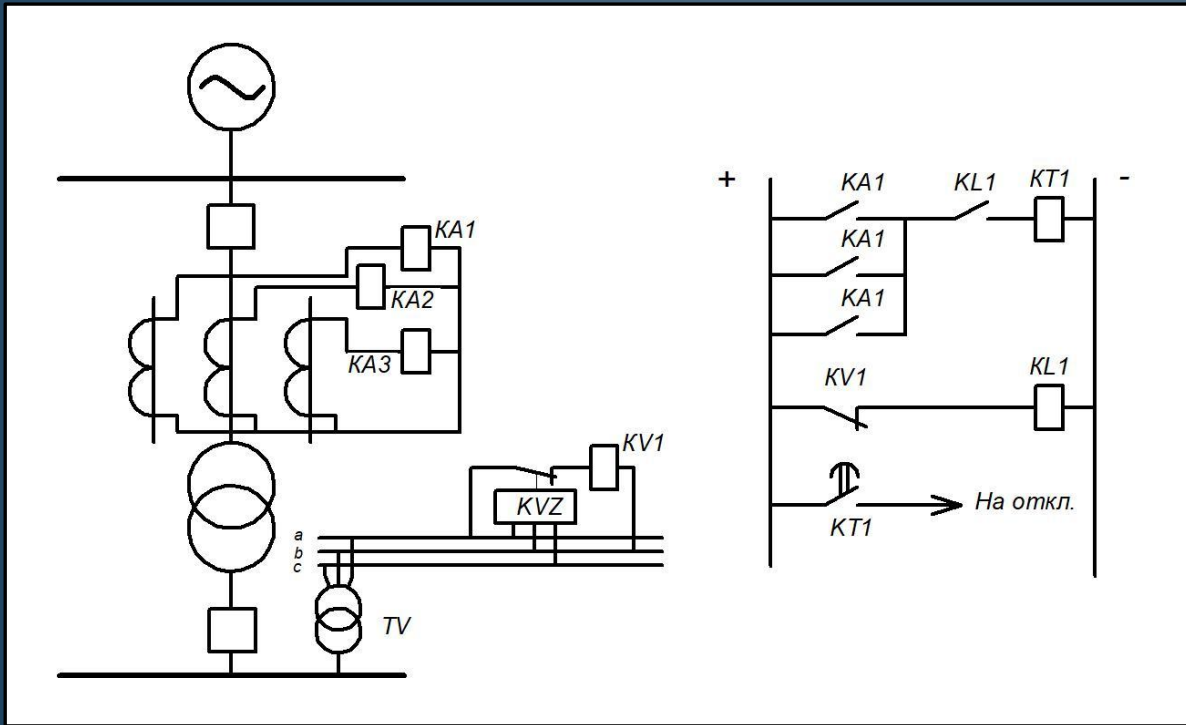
$K_B = \frac{I_{вр}}{I_{ср}}$  - коэффициент возврата реле;

$I_{вр}$  - ток возврата реле (максимальный ток, при котором реле возвращается в исходное состояние, которое было до срабатывания);

$I_{ср}$  - ток срабатывания реле (минимальный ток, при котором реле срабатывает, переключает контакты в состояние, противоположное исходному);

$I_{НОМ}$  - номинальный ток трансформатора (не учитывает режим перегрузки, меньше максимального рабочего тока  $I_{раб.макс}$ , используемого в формуле расчета тока срабатывания простой МТЗ).

В формуле отсутствует коэффициент самозапуска. Несрабатывание при самозапуске обеспечивается тем, что контакты реле напряжения KV1 в данном режиме остаются разомкнутыми (напряжение обратной последовательности при самозапуске не возникает).



KVZ – фильтр-реле напряжений обратной последовательности.

KV1 – реле минимального напряжения, замыкает контакт при понижении напряжения на обмотке ниже установленного в нормальном рабочем режиме напряжения обратной последовательности пренебрежимо мало. На выходе фильтра KVZ напряжения практически нет.

При несимметричных КЗ (двухфазных) на выходе фильтра KVZ появляется напряжение и он размыкает свой контакт. Напряжение с обмотки реле KV1 снимается, контакт KV1 замыкается. Срабатывает реле KL1. Замыкается контакт KL1, тем самым разрешая работу защиты.

При самозапуске и перегрузке напряжение обратной последовательности отсутствует, обмотка KV1 находится под напряжением, контакт KV1 разомкнут, обмотка реле KL1 обесточена, контакт KL1 разомкнут, работа защиты запрещена (заблокирована) даже при замкнутых контактах KA1 – KA3.

При симметричном трехфазном КЗ напряжение обратной последовательности также отсутствует, однако при этом очень сильно снижаются напряжения всех трех фаз. Обмотка KV1 теряет питание даже при замкнутом контакте KVZ и работа защиты разрешается.

# РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ

Напряжение срабатывания реле KV1 принимается равным:

$$U_{сз} = \frac{U_{раб.мин}}{K_B \cdot K_H}$$

где  $K_H$  - коэффициент надежности 1,1;

$U_{раб.мин}$  - минимальное рабочее напряжение.

$$U_{раб.мин} = (0,9...0,95)U_{ном.}$$

Напряжение срабатывания фильтра-реле напряжений обратной последовательности KVZ:

$$U_{2с.з} = 0,06 \cdot U_{ном.}$$

Благодаря тому, что в формуле расчета тока срабатывания отсутствует коэффициент самозапуска и используется величина номинального, а не максимального рабочего тока, ток срабатывания защиты при прочих равных условиях будет меньше, чем для простой МТЗ.

Соответственно, коэффициент чувствительности повышается (ток срабатывания защиты в знаменателе уменьшается, ток двухазного КЗ в числителе остается неизменным).

Коэффициент чувствительности МТЗ трансформатора с пуском по напряжению должен быть не менее 1,5.

### **Преимущества**

- Сравнительно простая и дешевая защита.
- Чувствительность выше, чем у простой МТЗ.

### **Недостатки**

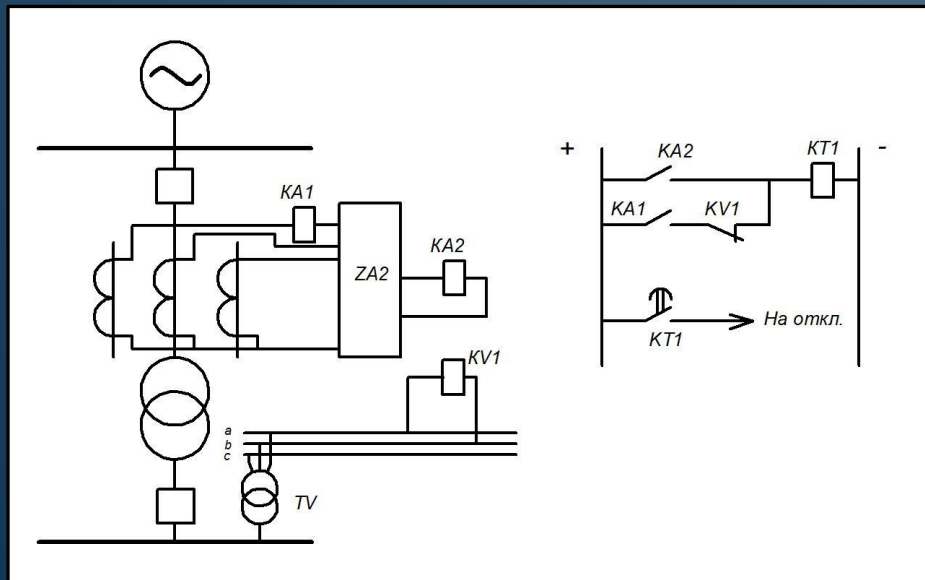
- Наличие искусственно созданной выдержки времени; время отключения КЗ затягивается.
- Усложнение защиты за счет добавления реле напряжения и промежуточного реле.
- В ряде случаев чувствительность все равно остается недостаточно высокой, особенно на повышающих трансформаторах.

# МТЗ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

При недостаточной чувствительности максимальной токовой защиты с блокировкой минимального напряжения применяют максимальную токовую защиту обратной последовательности.

**Пусковой орган** – токовое реле, включенное **через фильтр токов обратной последовательности**.

Защита приходит в действие от токов обратной последовательности, вызванных несимметричными внешними КЗ или КЗ внутри трансформатора.



Ток срабатывания защиты выбирается по следующим условиям:

- отстройка от токов небаланса фильтра токов обратной последовательности в режиме максимальной нагрузки;
- согласование по чувствительности с защитами присоединений со стороны высшего напряжения.

Практика показала, что эти условия выполняются при

$$I_{с.з} = (0,5...0,7) \cdot I_{НОМ}.$$

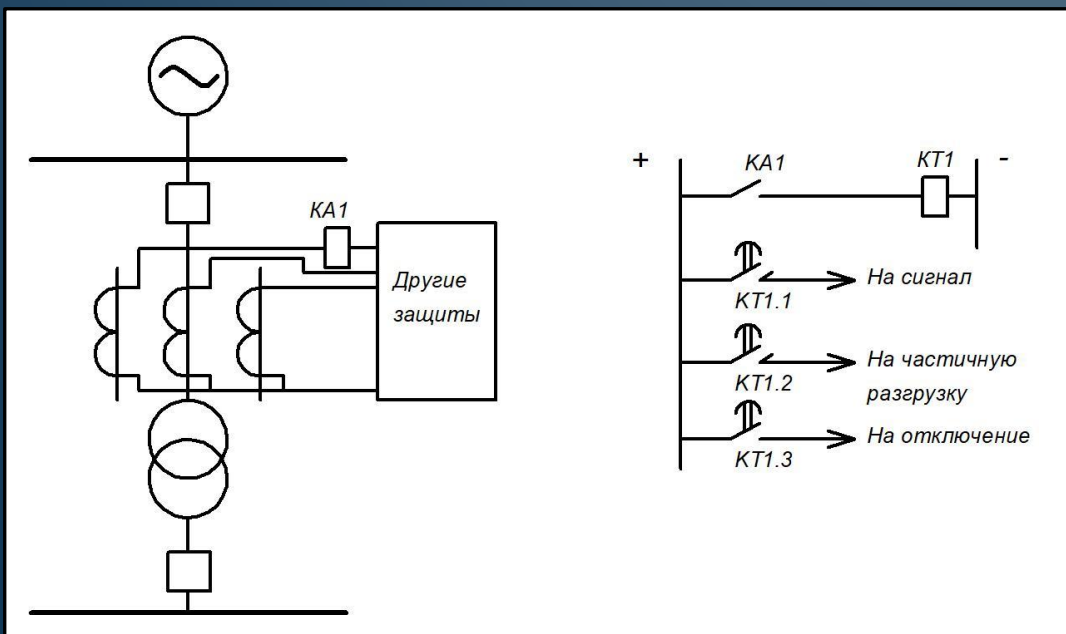
Защита обратной последовательности не действует при симметричных трехфазных КЗ, так как при этом отсутствуют токи обратной последовательности. Поэтому она дополняется приставкой, реагирующей на симметричные КЗ. Приставка представляет собой максимальную токовую защиту с пуском минимального напряжения в однофазном исполнении (KA1, KV1).

**Оценка чувствительности не требуется.**

# ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

На двухобмоточных трансформаторах защита от перегрузки устанавливается со стороны питания. На трехобмоточных трансформаторах при двухстороннем питании защиты устанавливаются с двух сторон, а при трехстороннем – с трех сторон.

Так как перегрузка обычно симметрична, то защиту выполняют в однофазном исполнении (реле устанавливается только в одной фазе).



Ток срабатывания максимальной токовой защиты от перегрузки выбирается из условия:

$$I_{с.з} = \frac{k_H}{k_B} \cdot I_{НОМ}$$

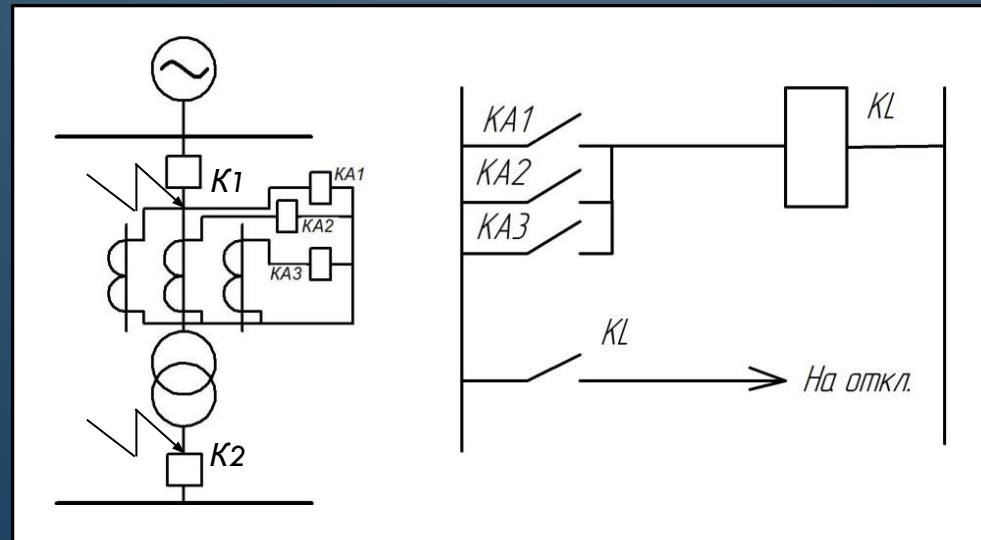
## Расчет времени срабатывания

На подстанции без сопровождающего персонала защита от перегрузки выбирается с тремя выдержками времени. Время действия первой ступени на  $\Delta t$  больше, чем у максимальной токовой защиты от внешних КЗ. Вторая ступень действует на разгрузку трансформатора, третья ступень – на его отключение.

# ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА ТРАНСФОРМАТОРА

Токовая отсечка применяется на трансформаторах мощностью ниже 6300 кВА, работающих одиночно и 4000 кВА, работающих параллельно. В зону действия токовой отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны питания. Токовые отсечки предназначены для защиты от междуфазных КЗ и действуют без выдержки времени.

Токовая отсечка устанавливается со стороны питания



Ток срабатывания токовой отсечки выбирается по двум условиям:

1. Токовая отсечка не должна работать при КЗ за трансформатором

$$I_{сз} = K_H I_{КЗ.макс}^{(3)}$$

где

$K_H$  - коэффициент надежности (отстройки), обеспечивает запас отстройки тока срабатывания от максимального рабочего тока;

$I_{КЗ.макс}^{(3)}$  - максимальный ток в защите при трехфазном коротком замыкании за трансформатором со стороны нагрузки (К2).

2. Токовая отсечка должна отстраиваться от броска тока намагничивания  $I_{нам}$ , возникающего при включении трансформатора под напряжение:

$$I_{с.з} > I_{нам}$$

Данное требование выполняется, если ток срабатывания выбрать

$$I_{с.з} = (3...5) \cdot I_{ном}$$

Окончательно за ток срабатывание принимается наибольшее из двух полученных значений.



**Оценка чувствительности** выполняется по величине коэффициента чувствительности

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}}$$

где

$I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}$  – минимальный ток в защите при двухфазном КЗ на выводах трансформатора со стороны питания (**К1**);

$I_{\text{сз}}$  - ток срабатывания защиты.

Коэффициент чувствительности мгновенной токовой отсечки должен быть **не менее 2**.

### **Преимущества**

- Простая и дешевая защита.
- Высокое быстродействие (отсутствие выдержки времени).
- Обеспечивает быстрое отключение наиболее опасных КЗ вблизи источника питания, сопровождающихся протеканием значительных опасных токов.

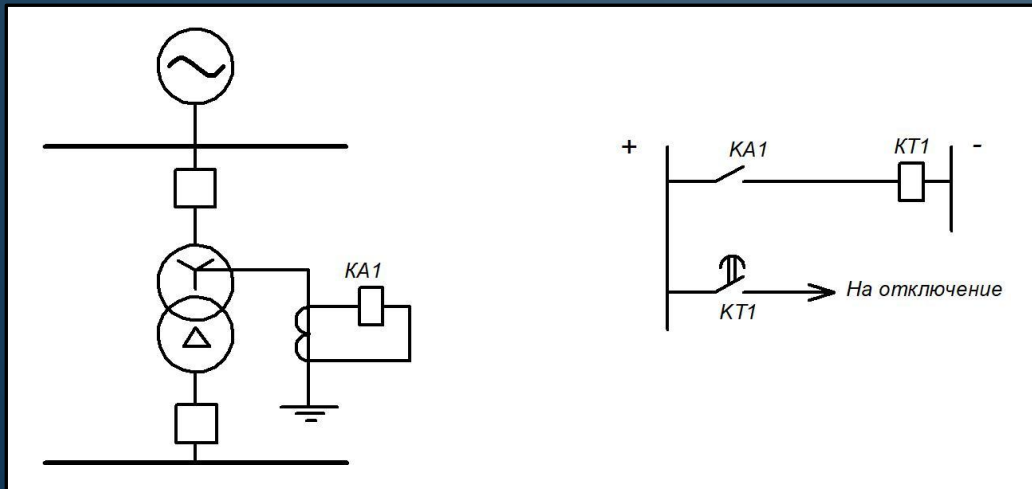
### **Недостатки**

- Защищает только выводы и часть обмотки трансформатора со стороны питания.

# ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Применяется для защиты от однофазных КЗ в сетях с эффективно или глухо заземленной нейтралью. Защиты выполняют при помощи реле тока, подключенного к трансформатору тока, встроенному в нейтраль трансформатора.

В зону действия защиты входит обмотка «звезда», в которой установлена защита, сборные шины на стороне данной обмотки, и участки линий примыкающих к данным сборным шинам



Через данный проводник протекает сумма токов трех фаз, которая равна утроенному значению тока нулевой последовательности  $I_A + I_B + I_C = 3 * I_0$ . Ток нулевой последовательности в режиме без КЗ на землю мал и обусловлен только некоторой несимметрией токов. Однако при КЗ на землю ток нулевой последовательности значительно возрастает и вызывает срабатывание реле и запуск защиты. Благодаря существенному отличию величины тока нулевой последовательности в режиме без повреждения и при КЗ, срабатывание защиты надежно обеспечивается с высокой степенью чувствительности.

Ток срабатывания защиты определяется из двух условий.

1. Отстройки от небаланса  $I_{Нб}$ :

$$I_{с.з} = k_{от} \cdot I_{Нб},$$

где  $I_{Нб}$  – обусловлен несимметричной нагрузкой трансформатора.

Принимается

$$I_{с.з} = (0,25 \dots 0,5) \cdot I_{НОМ}.$$

2. Согласования по чувствительности с защитами нулевой последовательности установленных в сети высшего напряжения:

$$I_{с.з} = k_{от} \cdot I_{max. \text{отсеч.}}$$

Защита действует на отключение с выдержкой времени, которую выбирают из условия согласования данной защиты с защитами нулевой последовательности, установленными в сети высшего напряжения.

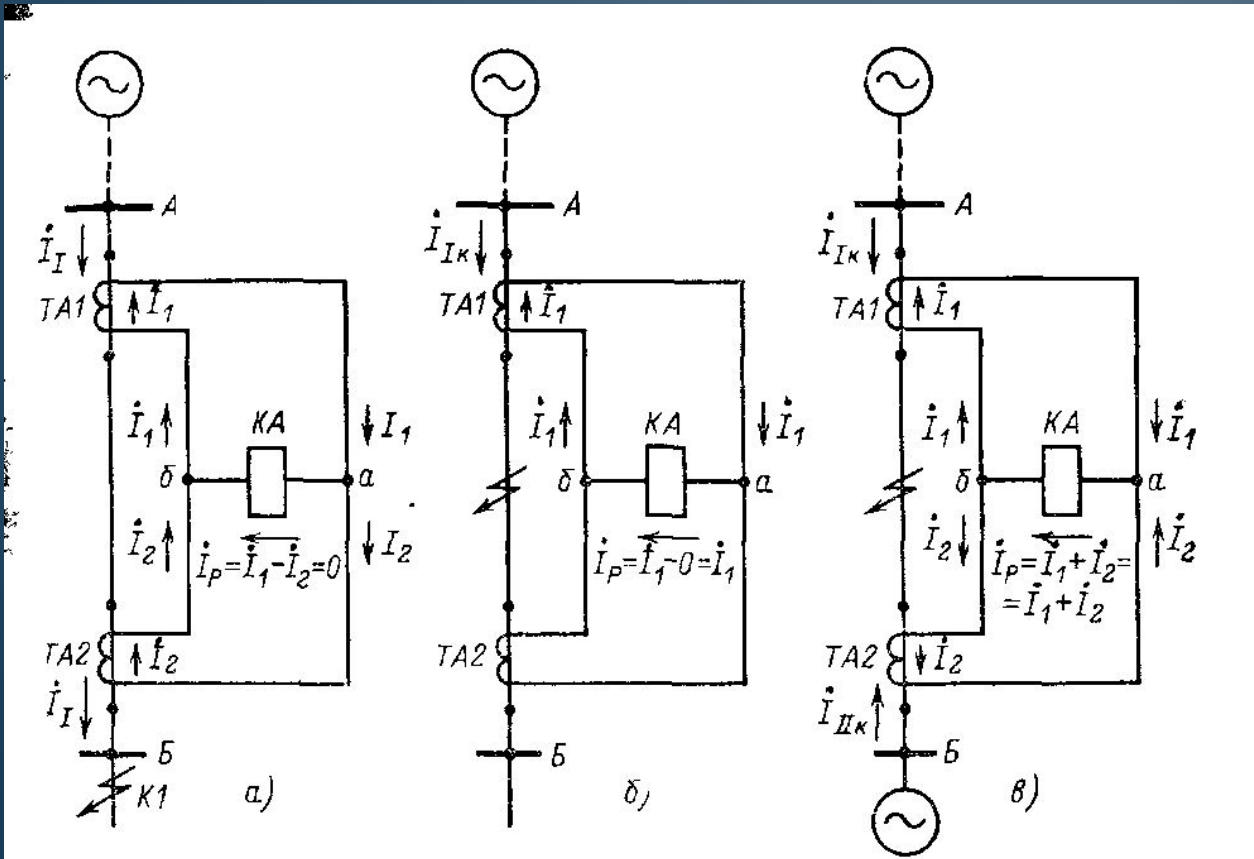
# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА

## Общие положения

Предназначена для защиты от повреждений внутри трансформатора и на его выводах. Применяется:

- на одиночно работающих трансформаторах мощностью свыше 6300 кВА;
- на параллельно работающих трансформаторах мощностью от 4000 кВА и более;
- на трансформаторах мощностью более 1000 кВА в случае, если отсечка не обеспечивает необходимую чувствительность, а время срабатывания максимальной токовой защиты более 1 с.

Является основной защитой трансформаторов мощностью более 6000 кВА..



Прохождение токов в схеме продольной дифференциальной защиты с циркулирующими токами  
 а — при КЗ вне зоны защиты; б — при КЗ в зоне защиты при одностороннем питании; в — то же при двухстороннем питании.

Основной принцип действия для большей наглядности поясняется на примере продольной дифференциальной защиты ЛЭП.

Для осуществления продольной дифференциальной защиты с обеих сторон защищаемой линии устанавливаются ТТ, коэффициенты трансформации которых подбираются так, чтобы вторичные токи при протекании через трансформатор сквозного тока КЗ были равны.

В нормальном режиме и при внешнем КЗ ток  $I_I$  имеет разное направление относительно шин подстанций. Так, на подстанции А он направлен от шин в линию, а на подстанции Б — от линии к шинам.

Вторичные обмотки трансформаторов тока ТА1 и ТА2 соединяются между собой соединительными проводами в дифференциальную схему. В такой схеме при прохождении по защищаемой линии сквозного тока (нагрузки или КЗ) по соединительным проводам постоянно циркулирует ток, равный по значению вторичному току ТТ:

$$I_1 = I_2 = I_{Ц} = \frac{I_I}{K_I}.$$

Поэтому такая схема называется схемой с циркулирующими токами. Параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока включается обмотка токового реле КА, которое вместе с ТТ образует дифференциальную защиту.

На рис. (а) показаны первичные и вторичные токи при внешнем КЗ в точке К1, когда по защищаемой линии проходит сквозной ток. В этом случае в соединительных проводах циркулирует ток, равный вторичному току ТТ. На основании первого закона Кирхгофа для точки а верно равенство:

$$I_p = I_1 - I_2.$$

При прохождении по защищаемой линии сквозного тока  $I_I$ , равенстве коэффициентов трансформации трансформаторов тока ТА1 и ТА2 и работе их без погрешности или с одинаковыми погрешностями вторичные токи равны друг другу ( $I_1 = I_2$ ), и поэтому

$$I_P = I_1 - I_2 = 0.$$

Таким образом, при прохождении по защищаемой линии тока нагрузки или внешнего КЗ ток в реле дифференциальной защиты отсутствует и, следовательно, дифференциальная защита на такие режимы не реагирует. Отсюда следует, что, поскольку дифференциальная защита не реагирует на КЗ на другом оборудовании, она не требует выдержки времени, т. е. является селективной по принципу действия (защита абсолютной селективности).

# ТОК НЕБАЛАНСА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Для ТТ можно записать выражения:  $I_1 = \frac{I_I}{K_I} - I_{1\text{нам}}$ ,  $I_2 = \frac{I_I}{K_I} - I_{2\text{нам}}$ , где  $I_{1\text{нам}}$ ,  $I_{2\text{нам}}$  - токи намагничивания ТА1 и ТА2, определяющие их погрешность.

Отсюда с учетом предыдущего выражения

$$I_p = \frac{I_I}{K_I} - I_{1\text{нам}} - \frac{I_I}{K_I} + I_{2\text{нам}} = I_{2\text{нам}} - I_{1\text{нам}}.$$

Таким образом, в условиях прохождения по защищаемой линии тока внешнего КЗ ток в реле дифференциальной защиты равен разности токов намагничивания ТТ.

Если при прохождении по защищаемой линии тока нагрузки или внешнего КЗ вторичные токи трансформаторов тока ТА1 и ТА2 не равны друг другу, т.е.  $I_1 \neq I_2$ , то  $I_p \neq 0$  и в реле проходит ток небаланса:

$$I_{\text{нб}} = I_1 - I_2 = I_{2\text{нам}} - I_{1\text{нам}}.$$



Токи небаланса возникают из-за погрешностей ТТ в коэффициенте трансформации или по углу, приводящих к неравенству вторичных токов ТТ, соединенных в дифференциальную схему,

Для того чтобы дифференциальная защита не сработала ложно от токов небаланса, ток срабатывания защиты должен быть больше максимального значения тока небаланса при внешнем КЗ.

$$I_{с.з.} = k_H \cdot I_{нб.мах.}$$

где  $k_H$  — коэффициент надежности отстройки, больший единицы;

$I_{нб.мах.}$  — максимальное значение тока небаланса при внешнем КЗ.

Рис. (б) - КЗ на защищаемой линии при одностороннем питании от подстанции А. Ток КЗ проходит только через ТА1,  $I_2 = 0$ .

В реле проходит полный ток КЗ  $I_p = I_1 = \frac{I_{IK}}{K_I}$ , под воздействием которого защита срабатывает и производит отключение поврежденной линии.

Рис. 25(в) - Двустороннее питание места КЗ от подстанций А и Б. Ток в реле равен

$$I_p = I_1 - (-I_2) = I_1 + I_2 = \frac{I_{IK}}{K_I} + \frac{I_{IIK}}{K_I} = \frac{I_K}{K_I}.$$

В реле проходит полный ток КЗ.

Участок, **ограниченный трансформаторами тока**, называется **зоной действия** продольной дифференциальной защиты.

При внешнем КЗ (точка К1) ток в дифференциальном реле близок к нулю, так как вторичные токи равны и противоположны по направлению. При КЗ в зоне действия защиты (точки К2 и К3) через реле протекает ток, защита сработает и отключит выключатель.

# ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

## 1. Необходимость компенсации сдвигов токов по фазе.

Для этого у силовых трансформаторов с группой соединения  $Y/\Delta$  трансформаторы тока на стороне « $\Delta$ » силового трансформатора соединяются по схеме « $Y$ », а на стороне « $Y$ » силового трансформатора по схеме « $\Delta$ ». Такое решение позволяет компенсировать сдвиг фаз тока в симметричном и несимметричном режимах. Если обмотки силового трансформатора соединены по схеме  $Y/Y$ , то трансформаторы тока с обеих сторон должны быть соединены по схеме « $Y$ ».

## 2. Необходимость компенсации неравенств токов.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока стараются подобрать таким образом, чтобы их вторичные токи были одинаковыми. Но коэффициенты трансформации строго стандартизированы, поэтому полностью ликвидировать токи небаланса не удастся.

В случае значительной разности токов плеч применяют уравнильные трансформаторы и автотрансформаторы.

# СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ НЕБАЛАНСА

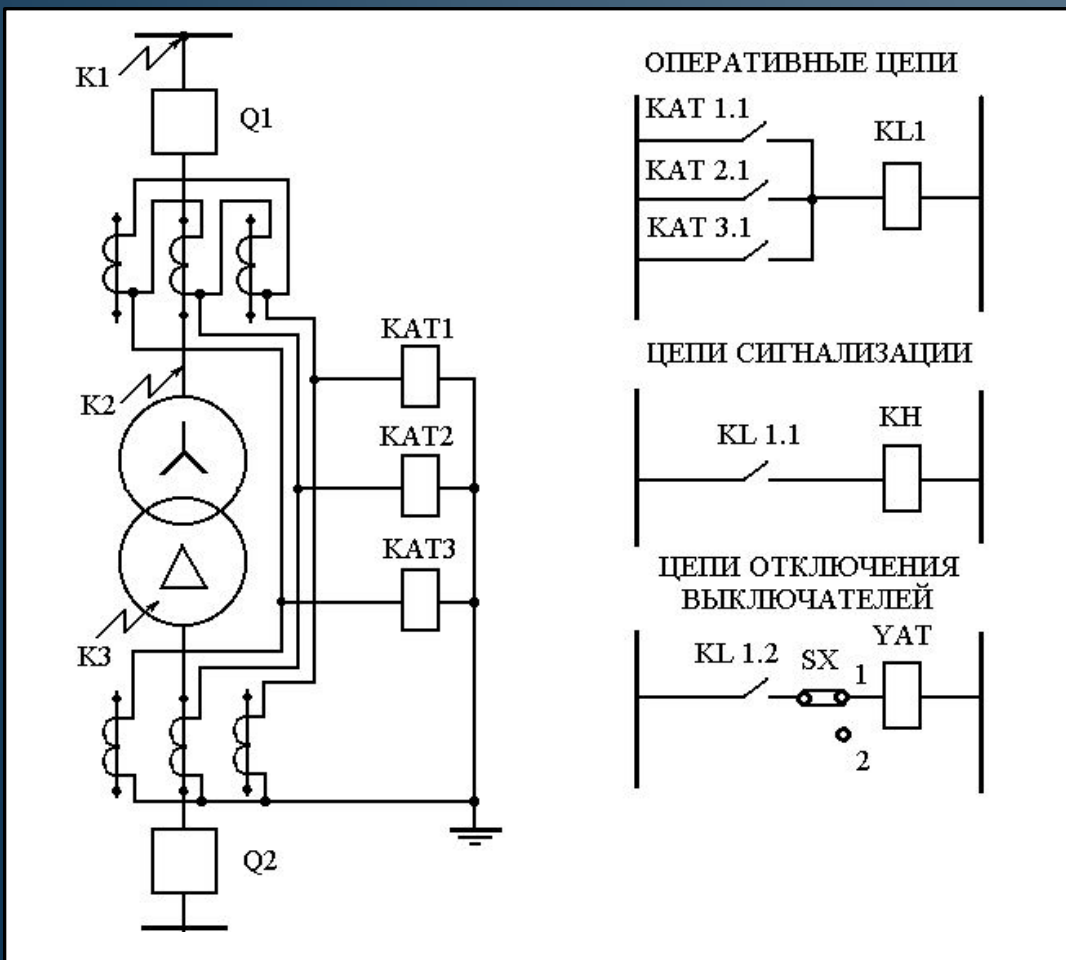
## 1. Ток небаланса обусловленные наличием РПН.

Использование РПН приводит к нарушению соотношения между первичными и вторичными токами, что обуславливает появление в цепях защиты тока небаланса. У трансформаторов с ПБВ ток небаланса имеет небольшое значение, так как пределы регулирования  $\Delta U = \pm 5\%$ . У трансформаторов с РПН  $\Delta U = \pm 15\%$ . В последнем случае необходимо учитывать ток небаланса при выборе тока срабатывания защиты.

**2. Токи небаланса, возникающие из-за разнотипности трансформаторов тока,** установленных на высокой и низкой сторонах силового трансформатора. Нередко на стороне высшего напряжения используются встроенные трансформаторы тока, а на стороне низшего напряжения – выносного типа (другого типа и конструкции). В таких случаях измерительные трансформаторы тока могут иметь различные номинальные параметры. В режиме внешнего КЗ кратности токов у них также неодинаковы. Эти обстоятельства обуславливают повышенное значение токов небаланса по сравнению с дифференциальной защитой линий. Поэтому при расчете тока срабатывания дифференциальной защиты трансформатора коэффициент однотипности выбирают большим.

**3. Токи небаланса, возникающие из-за неточной компенсации неравенства токов плеч.** Точная установка расчетного значения числа витков регулировочных устройств не всегда возможна, так как число выводов уравнивательных автотрансформаторов, например, ограничено.

# СХЕМА ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА



Участок, ограниченный трансформаторами тока, называется зоной действия продольной дифференциальной защиты.

При внешнем КЗ (точка К1) ток в дифференциальном реле близок к нулю, так как вторичные токи равны и противоположны по направлению. При КЗ в зоне действия защиты (точки К2 и К3) через реле протекает ток, защита сработает и отключит выключатель.

# РАСЧЕТ ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

При выборе тока срабатывания защиты  $I_{с.з}$  из условия отстройки от токов небаланса рассматривают два случая:

1. Ток срабатывания защиты отстраивается от **броска тока намагничивания** при включении трансформатора под нагрузку. Другие составляющие тока небаланса при этом не учитываются

$$I_{с.з} = k_{отс} \cdot I_{нб.нам}.$$

В зависимости от используемых реле и способа отстройки коэффициент  $k_{отс}$  принимается равным 0,3 ...4,5.

2. Ток срабатывания защиты выбирается больше, чем **максимальный ток небаланса**, проходящий через защиту при внешнем КЗ. В этом случае бросок тока намагничивания при включении трансформатора не учитывается.

$$I_{с.з} = k_{отс} (I'_{нб} + I''_{нб} + I'''_{нб}).$$

Ток срабатывания принимают **наибольшим из двух значений**, полученных по этим условиям.

**В большинстве случаев** ток срабатывания защиты, выбранный по первому условию значительно превышает ток срабатывания защиты, выбранный по второму. Поэтому чаще производят отстройку защиты **от бросков тока намагничивания**.

# СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКА НЕБАЛАНСА

а)  $I'_{нб}$  – обусловлен погрешностью трансформаторов тока:

$$I'_{нб} = k_{п} \cdot k_{одн} \cdot \varepsilon \cdot I_{к.мах} ,$$

где  $k_{п}$ - коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической составляющей тока;  $k_{одн}$  - коэффициент однотипности трансформаторов тока, установленных на стороне высшего и низшего напряжения (для расчета дифференциальной защиты трансформатора принимается  $k_{одн}=1$ );  $\varepsilon$  - относительное значение полной погрешности трансформаторов тока, принимается равным 0,1;  $I_{к.мах}$  - максимальный ток внешнего КЗ.

б)  $I''_{нб}$  – обусловлен наличием РПН:

$$I''_{нб} = \Delta U \cdot I_{к.мах} ,$$

где  $\Delta U$  - половина диапазона регулирования.

в)  $I'''_{нб}$  – обусловлен неточным выравнением токов плеч защиты уравнительными обмотками:

$$I'''_{нб} = I_{к.мах} (W_{о.расч.} - W_{о}) / W_{о.расч.} ,$$

где  $W_{о.расч}$  - расчетное значение числа витков неосновной обмотки;  $W_{о}$  - выбранное число витков обмотки.

# ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

выполняется по величине коэффициента чувствительности

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}}$$

где

$I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}$  – минимальный ток в трансформаторе при двухфазном КЗ на выводах со стороны нагрузки;

$I_{\text{сз}}$  - ток срабатывания защиты.

Дифференциальная защита обладает высокой чувствительностью, так как реагирует на полный ток КЗ.

**Коэффициент чувствительности** дифференциальной защиты трансформатора должен быть **не менее 2**.



## Преимущества

- Высокое быстродействие (отсутствие выдержки времени).
- Обеспечивает быстрое отключение любых КЗ в зоне действия защиты.
- Высокая чувствительность.
- Абсолютная селективность (зона срабатывания защиты ограничена местами установки трансформаторов тока).

## Недостатки

- Сложность, сравнительно высокая стоимость.

# ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Отстройка защиты от броска тока намагничивания достигается в основном тремя путями:

- загрузлением защиты по току срабатывания (**дифференциальная отсечка**);
- включением реле через промежуточные **насыщающиеся трансформаторы** тока (НТТ) (защита на базе реле РНТ);
- выявлением различия между формой кривой тока КЗ и формой кривой тока намагничивания (**защита с торможением**).

Если определяющим оказывается условие 2, а коэффициент чувствительности получается недостаточным, то используют специальные реле с торможением, например типа ДЗТ. Наибольшие возможности для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности имеет дифференциальная защита ДЗТ-21.

**Дифференциальной отсечкой** называется дифференциальная защита мгновенного действия, имеющая ток срабатывания больше броска намагничивающего тока.

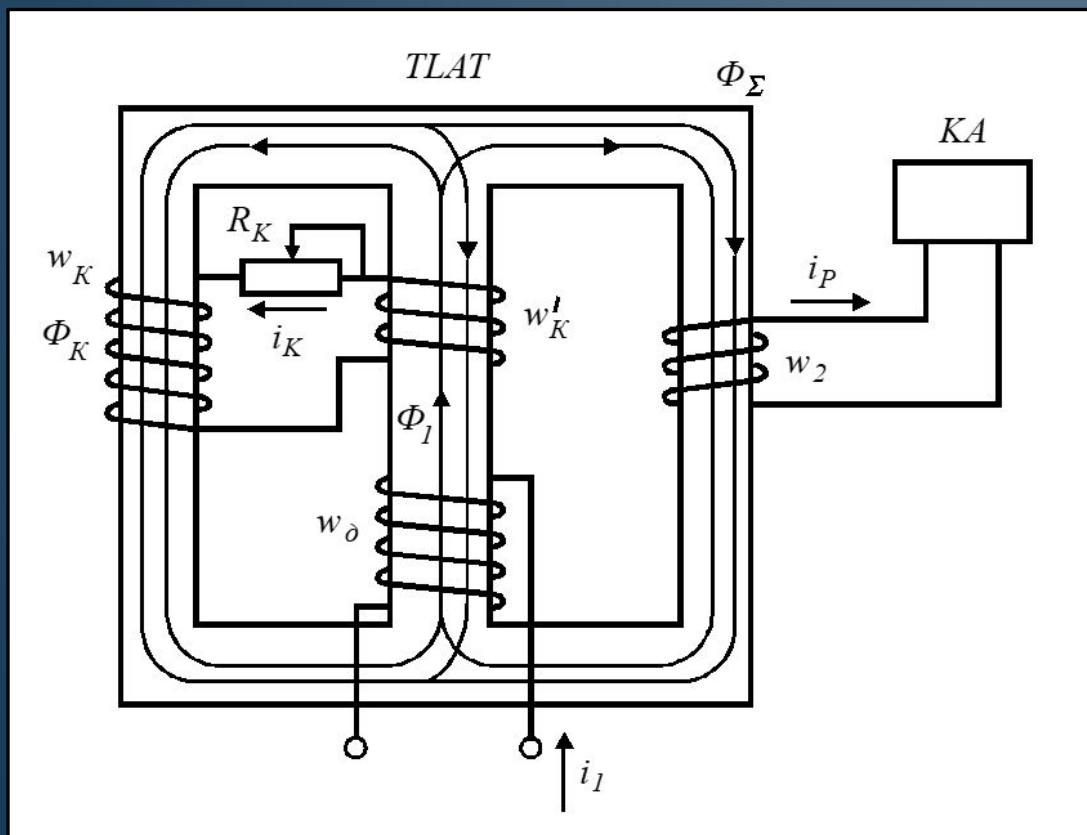
Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяется условием отстройки от броска намагничивающего тока (принимается  $k_{отс}=3÷4$ ) и отстройки от тока небаланса.

# ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С БНТ

**Дифференциальная защита с быстронасыщающимися трансформаторами (БНТ) на реле тока серии РНТ-560.**

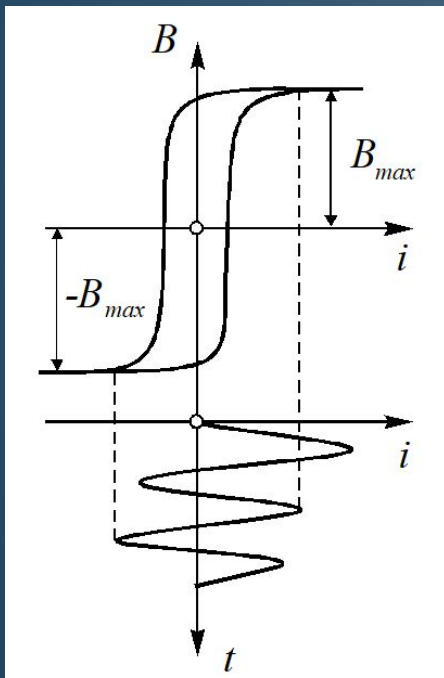
Основными элементами этих реле являются насыщающиеся трансформаторы тока  $TLAT$ , первичная обмотка которых  $W_1$  включается в дифференциальную цепь защиты. К вторичной обмотке  $TLAT$   $W_2$  подключается исполнительное реле тока  $KA$ .

Для сердечника трансформатора  $TLAT$  применяется сталь с широкой петлей гистерезиса. Сечение сердечника, параметры реле и обмоток подбираются таким образом, что во вторичную цепь хорошо трансформируется только синусоидальный ток. Аperiodический ток практически не трансформируется и в исполнительное реле не попадает, а производит лишь подмагничивание сердечника.



Для усиления или ослабления подмагничивающего действия апериодического тока, поступающего в обмотку  $W_d$ , у реле серии РНТ используется короткозамкнутая обмотка  $W_k$ , состоящая из двух секций, расположенных на среднем и левом стержнях насыщающегося трансформатора тока.

При прохождении по рабочей обмотке симметричного синусоидального тока, магнитный поток  $\Phi_1$  в среднем стержне наводит в первой секции  $W_k$  э.д.с., под действием которой протекает ток  $i_1$ , который, проходя по второй секции  $W_k$ , создает в правом стержне магнитный поток  $\Phi_k$ . Суммарный магнитный поток  $\Phi_\Sigma = \Phi_1 + \Phi_k$ , замыкаясь через правый стержень, наводит во вторичной обмотке ток  $i_2$ , который проходит по обмотке реле  $KA$  и вызывает его срабатывание. Таким образом, ток из рабочей обмотки  $W_d$  трансформируется во вторичную обмотку  $W_2$  как непосредственно, так и путем двойной трансформации из обмотки  $W_k$ . При этом чем больше число витков короткозамкнутых обмоток или чем меньше их сопротивление, тем больше магнитный поток и тем, следовательно, сильнее проявляется действие двойной трансформации.



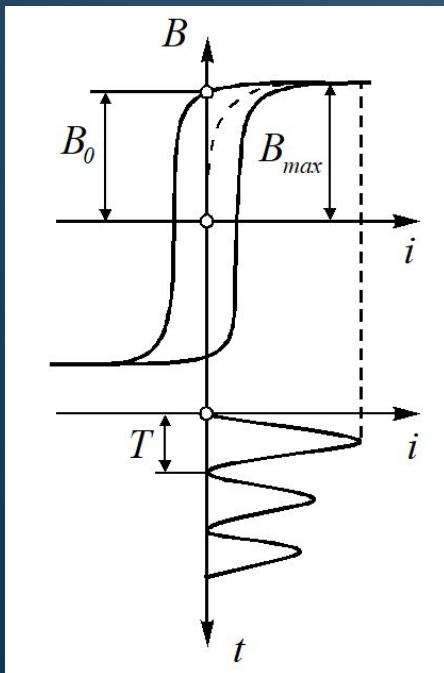
Насыщающийся трансформатор тока  $TAT$  работает как обычный трансформатор, если через его первичную обмотку проходит симметричный синусоидальный ток. В этом случае магнитный поток  $\Phi$  и пропорциональная ему магнитная индукция в сердечнике трансформатора  $B$  изменяются от положительного  $B_{max}$  до отрицательного  $B_{min}$  максимальных значений, создавая большую э.д.с.  $e$  на вторичной обмотке  $TAT$  и достаточный для работы исполнительного реле  $KA$  ток :

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt},$$

$$\Phi = B \cdot S,$$

$$e = -WS \frac{dB}{dt},$$

где  $S$  – сечение магнитопровода.



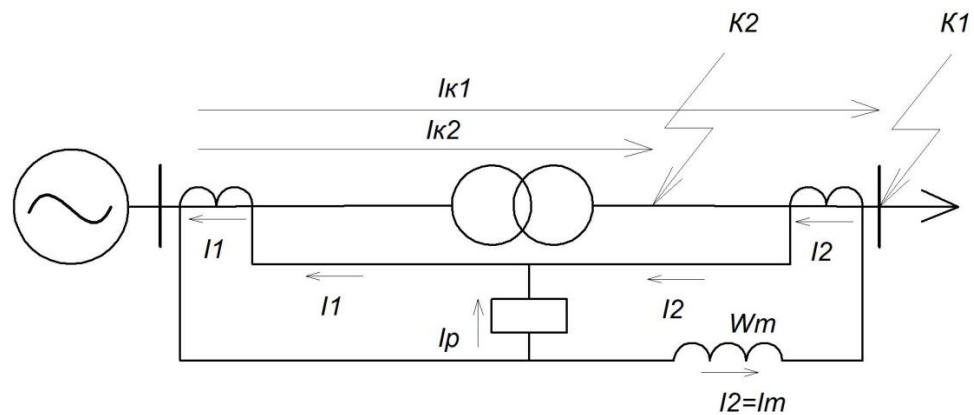
Иначе работает насыщающийся трансформатор, если через его первичную обмотку проходит ток с несимметричной формой кривой, имеющей одностороннее смещение (рисунок 29). Такое смещение кривой тока относительно оси времени происходит из-за наличия апериодической составляющей. В этом случае магнитный поток и магнитная индукция в сердечнике трансформатора будут изменяться только от положительного максимального значения  $B_{max}$  до значения  $B_0$ . Несмотря на большое значение магнитной индукции, скорость ее изменения будет небольшой, поэтому на вторичной обмотке будет создаваться небольшая э.д.с. и недостаточный для работы реле ток.

При прохождении по рабочей обмотке насыщающегося трансформатора несимметричного тока, его трансформация во вторичную обмотку как непосредственная, так и особенно двойная существенно ослабляются, благодаря чему ток во вторичной обмотке не достигает значения, равного току срабатывания реле.

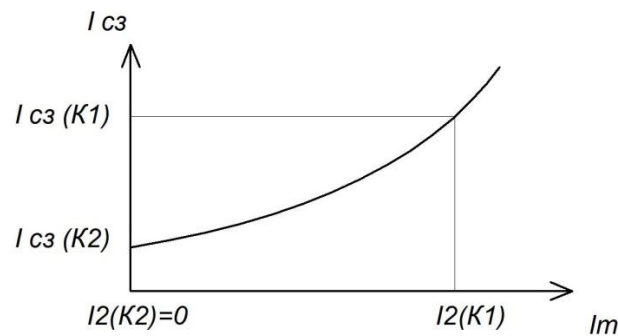
При включении токовых реле через насыщающиеся трансформаторы тока они становятся нечувствительными к токам намагничивания силовых трансформаторов и токам небаланса при переходных процессах, что дает возможность повысить чувствительность защиты. В то же время реле с насыщающимся трансформатором тока надежно срабатывает при коротком замыкании в зоне защиты, когда токи имеют несимметричную форму лишь в первый момент времени и по истечении нескольких периодов, когда затухает переходный процесс, становятся симметричными. Такие токи хорошо трансформируются через насыщающиеся трансформаторы тока и приводят в действие исполнительное реле КА.

Ток срабатывания дифференциальной защиты с БНТ определяется условием отстройки от броска намагничивающего тока (принимается  $k_{отс} = 1,3$ ) и отстройки от тока небаланса.

# ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С ТОРМОЖЕНИЕМ



Тормозная характеристика



В ряде случаев, когда при внешних КЗ через дифференциальную защиту проходят большие токи небаланса, ток срабатывания, получается очень большими. При этом дифференциальная защита может не обеспечивать необходимой чувствительности.

Для повышения чувствительности дифференциальной защиты в таких случаях используются реле с тормозным действием типа ДЗТ. У таких реле имеется дополнительная тормозная обмотка  $W_m$ .

Тормозная обмотка включается в плечо дифференциальной защиты, по которой проходит ток сквозного КЗ при повреждении в точке К1. Ток в тормозной обмотке, равный  $I_2(K1)$ , приводит к увеличению тока срабатывания реле до величины  $I_{cs}(K1)$  и обеспечивает отстройку от увеличивающихся токов небаланса. Защита при КЗ в точке К1 не действует, так как увеличение тока срабатывания приводит к снижению чувствительности защиты.

При КЗ в точке К2 ток в тормозной обмотке отсутствует и эффект торможения не проявляется. Ток срабатывания реле минимален и равен  $I_{cs}(K2)$ . Чувствительности максимальна. Защита срабатывает.

Ток срабатывания дифференциальной защиты с ДЗТ-11 определяется только условием отстройки от броска намагничивающего тока (принимается  $k_{отс} = 1,5$ ).