

# РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Лекции: 32 ч  
Практики: 24 ч  
Лабораторные: 16 ч  
Самост.: 108 ч

Экзамен

Васильев Алексей Сергеевич

к.т.н. доцент ОЭЭ ИШЭ

## Лекция 3

# Токовые ступенчатые защиты (ТСЗ)

## Общие сведения Ненаправленные токовые защиты

## Область применения ТСЗ

- воздушные и кабельные линии 6-35 кВ,
- понижающие трансформаторы 35 кВ и ниже,
- генераторы малой мощности (до 5 МВт),
- двигатели.

Предназначена для ликвидации **трехфазных и двухфазных КЗ**.



## ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7.

### Раздел 3. Защита и автоматика

#### Основная защита присоединения

ПУЭ (п. 3.2.14) – “На **каждом** из элементов электроустановки должна быть предусмотрена основная защита, предназначенная для ее действия при повреждениях **в пределах всего** защищаемого **элемента с временем, меньшим, чем у других** установленных на этом элементе защит”.

Примеры основных защит:

- Линии 0,4, 6, 10 кВ – МТЗ,
- Двигатели – дифференциальная защита,
- Трансформаторы менее 6.3 МВА – МТЗ
- Трансформаторы более 6.3 МВА – дифференциальная и газовая

### ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7.

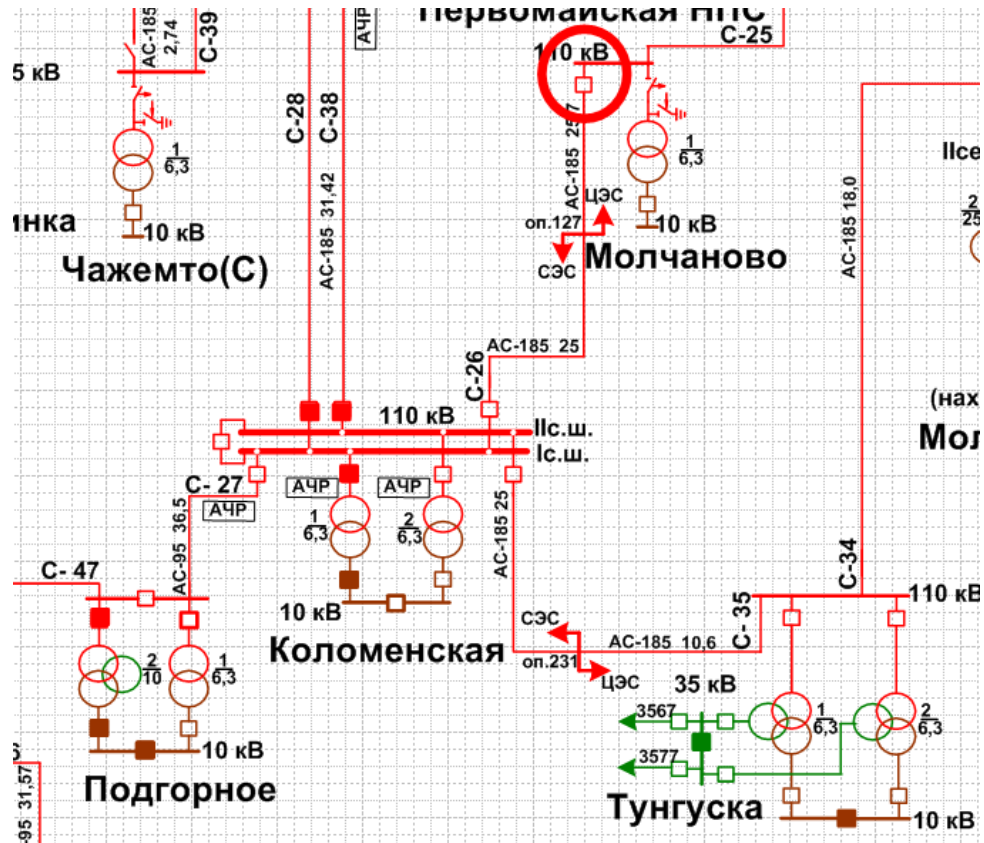
#### Раздел 3. Защита и автоматика

##### Резервная защита присоединения

**ПУЭ (п.3.2.15)** – “Для действия при отказах защит или выключателей смежных элементов следует предусматривать резервную защиту, предназначенную для обеспечения дальнего резервного действия. Если основная защита элемента обладает абсолютной селективностью (например, высокочастотная защита, продольная и поперечная дифференциальные защиты), то на данном элементе должна быть установлена резервная защита, выполняющая функции не только дальнего, но и ближнего резервирования, т. е. действующая при отказе основной защиты данного элемента или выведении ее из работы...”



# Схема энергорайона



**Задача:** подготовить исходные данные для расчета уставок защит линии С-26 ПС «Молчаново» для заданного режима

## Подготовка исходных данных

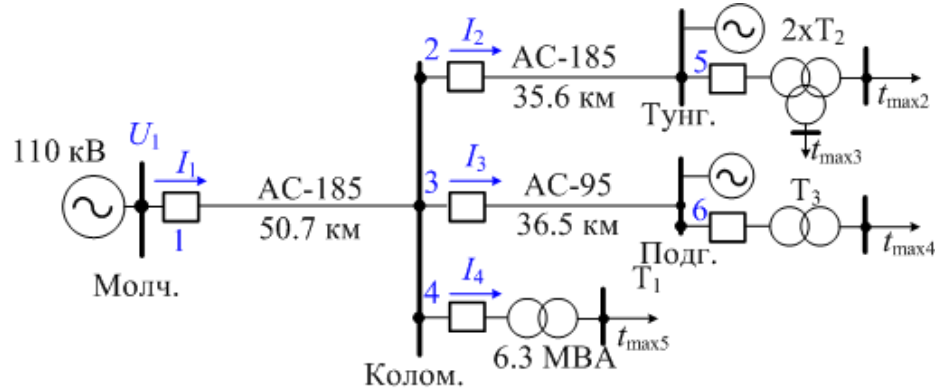


Схема эквивалентированного энергорайона  
относительно защиты 1

Определение коэффициента самозапуска  $K_{сз}$  производится исходя из количества и мощности асинхронных двигателей в нагрузке.

$$K_{сз} = 1.1 - 3$$

Выдержки времени максимальной токовой защиты нагрузок

$$t_{\max 1}, t_{\max 2}, t_{\max 3}, t_{\max 4}, t_{\max 5}$$

Максимальные рабочие токи:

$I_1, I_2, I_3, I_4$  определяются

- по запросу в РДУ на основании расчета в ПК «РАСТР» (контрольные замеры «Зимний максимум»);
- принимаются равными 70% от термической стойкости провода (стр. 428),
- для  $T_1 - I_4 = 0.8 I_{\text{НОМТ}}$ ;
- принимаются равными 70% от номинального значения тока трансформатора тока.

•  $U_1 = 0.8 \cdot 110 \text{ кВ}$  – минимальное рабочее напряжение на шинах ПС «Молчаново».



# Подготовка исходных данных

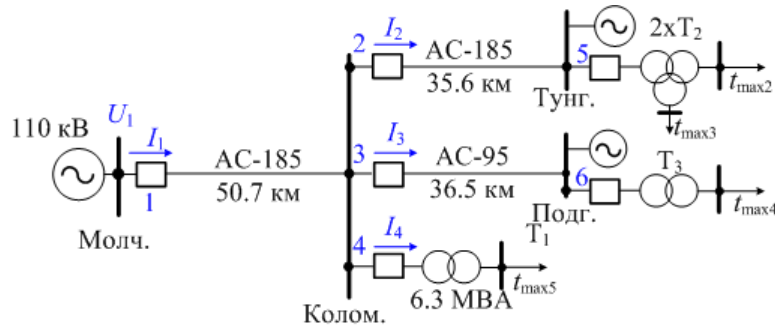


Схема эквивалентированного энергоаона относительно защиты 1

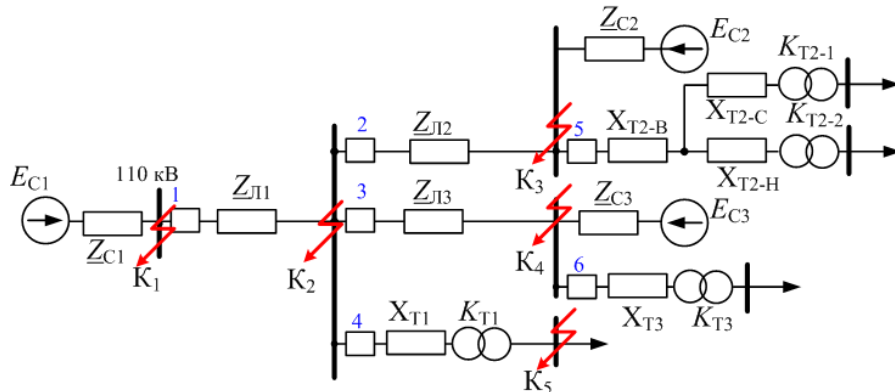


Схема замещения (С3)

относительно защиты 1 с точками КЗ

Расчет параметров схемы

замещения:

$Z_{Л1}, Z_{Л2}, Z_{Л3}$  – стр. 433,

$X_{Т1}$  – стр. 146

$$E_{C1} = 1.1 \cdot 110 \text{ кВ}$$

Информация о значении эквивалентных сопротивлении системы

$Z_{C1}$  при трехфазных КЗ на шинах подстанций

– запрашивается в РДУ (региональное диспетчерское управление).

## Расчет токов трехфазных и междуфазных КЗ

Расчет токов трехфазного КЗ, протекающих через защиту 1 в программном комплексе (например Мустанг) или по формулам

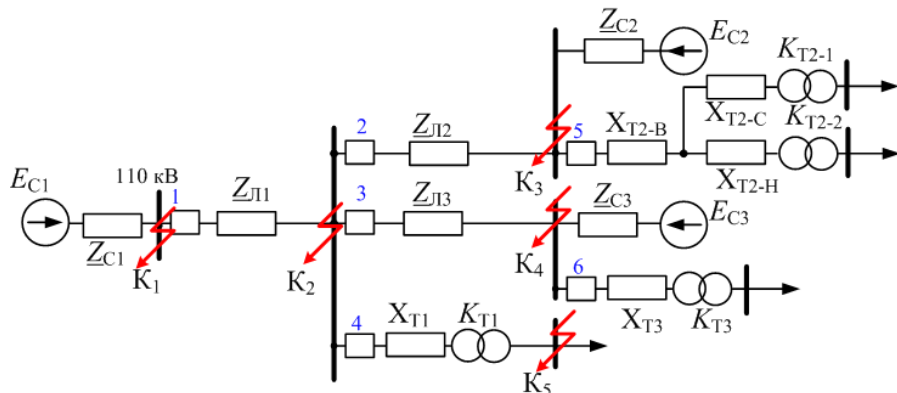


Схема замещения (СЗ)

относительно защиты 1 с точками КЗ

Токи междуфазного КЗ рассчитываются по упрощенной методике

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}$$

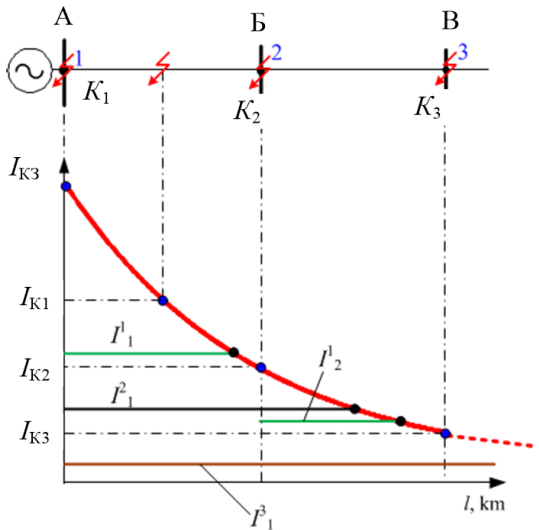
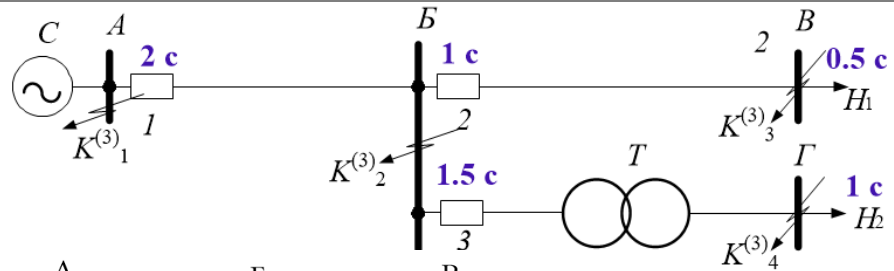
$$I_1^{(3)} = \frac{E_{C1}}{\sqrt{3} \dot{Z}_{C1}} \text{ при } K_1$$

$$I_1^{(3)} = \frac{E_{C1}}{\sqrt{3} (\dot{Z}_{C1} + \dot{Z}_{L1})} \text{ при } K_2$$

$$I_1^{(3)} = \frac{E_{C1}}{\sqrt{3} (\dot{Z}_{C1} + \dot{Z}_{L1} + \dot{Z}_{L2})} \text{ при } K_3$$

$$I_1^{(3)} = \frac{E_{C1}}{\sqrt{3} (\dot{Z}_{C1} + \dot{Z}_{L1} + \dot{Z}_{L3})} \text{ при } K_4$$

$$I_1^{(3)} = \frac{E_{C1}}{\sqrt{3} (\dot{Z}_{C1} + \dot{Z}_{L1} + X_{T1})} \text{ при } K_5$$



Графический способ выбора уставок ТСЗ для защиты 1

Токовая отсечка без выдержки времени

$$I^1_1 = K_H I_{K2}, \quad I^1_2 = K_H I_{K3}$$

$$t^1_1 = t^1_2 = t^1_3 = 0,02-0,04 \text{ с}$$

Токовая отсечка с выдержкой времени

$$I^2_1 = K_H I^1_2, \quad t^2_1 = 0,3-0,5 \text{ с}$$

Максимальная токовая защита

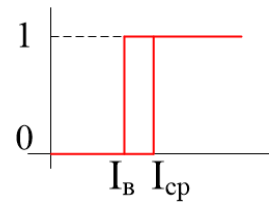
$$I^3_1 = \frac{K_H K_{C3}}{K_B} (I_{H1} + I_{H2})$$

Степень селективности  $\Delta t = 0,5 \text{ с}$

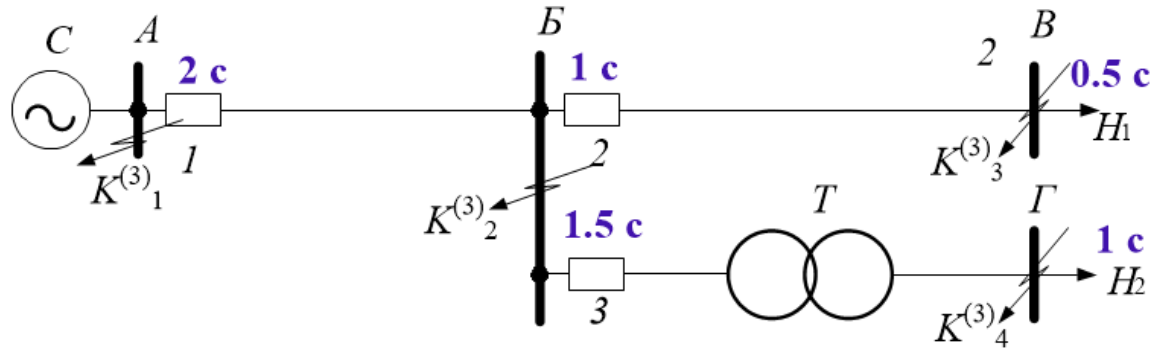
$K_H = 1,2$  – коэффициент надежности

$K_{C3} = 1,4$  – коэффициент самозапуска, учитывает возрастание тока при самозапуске асинхронных двигателей,

$K_B = I_B / I_{CP} = 0,85$  – коэффициент возврата



# Проверка чувствительности ТЗ



## 1-ая ступень

(допускается не проверять)

$$K_{\text{Ч1}}^1 = \frac{I_{K1}^{(2)}}{I_{C31}^1}$$

## 2-ая ступень

$$K_{\text{Ч1}}^2 = \frac{I_{K2}^{(2)}}{I_{C31}^2} > 2$$

В режиме ближнего резервирования

## 3-я ступень

В режиме дальнего резервирования меньше из значений

$$K_{\text{Ч1}}^3 = \frac{I_{K3}^{(2)}}{I_{C31}^3} > 1.5 \quad \text{или} \quad K_{\text{Ч1}}^3 = \frac{I_{K4}^{(2)}}{I_{C31}^3} > 1.5$$



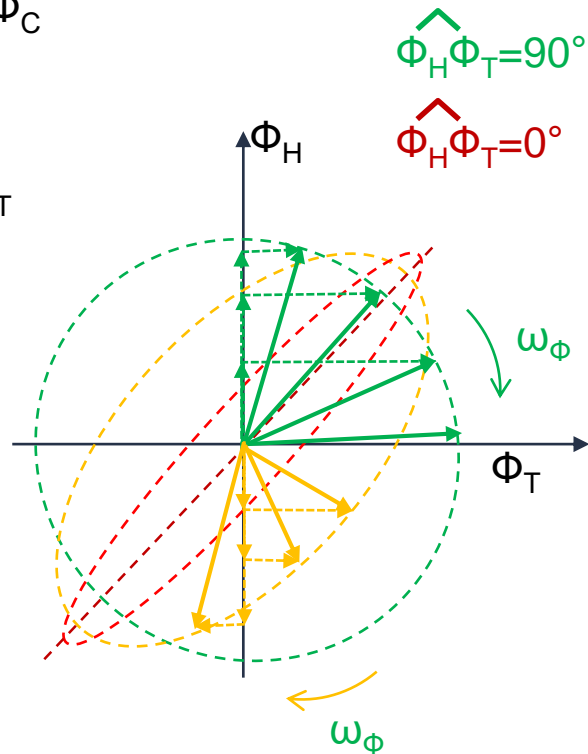
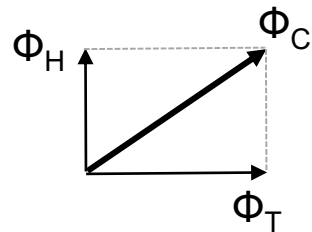
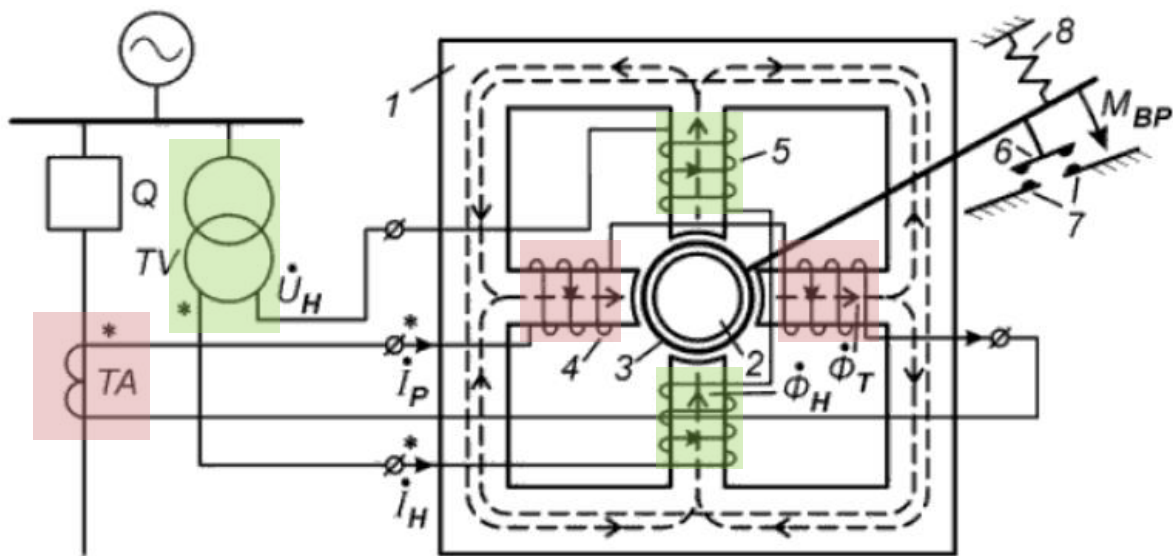
## Лекция 3

### Токовые ступенчатые защиты (ТСЗ)

## Направленные токовые отсечки (ТО)

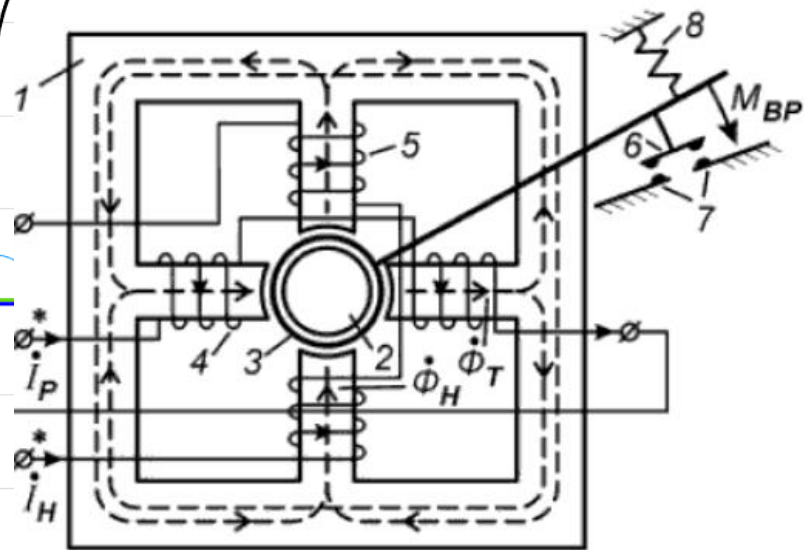
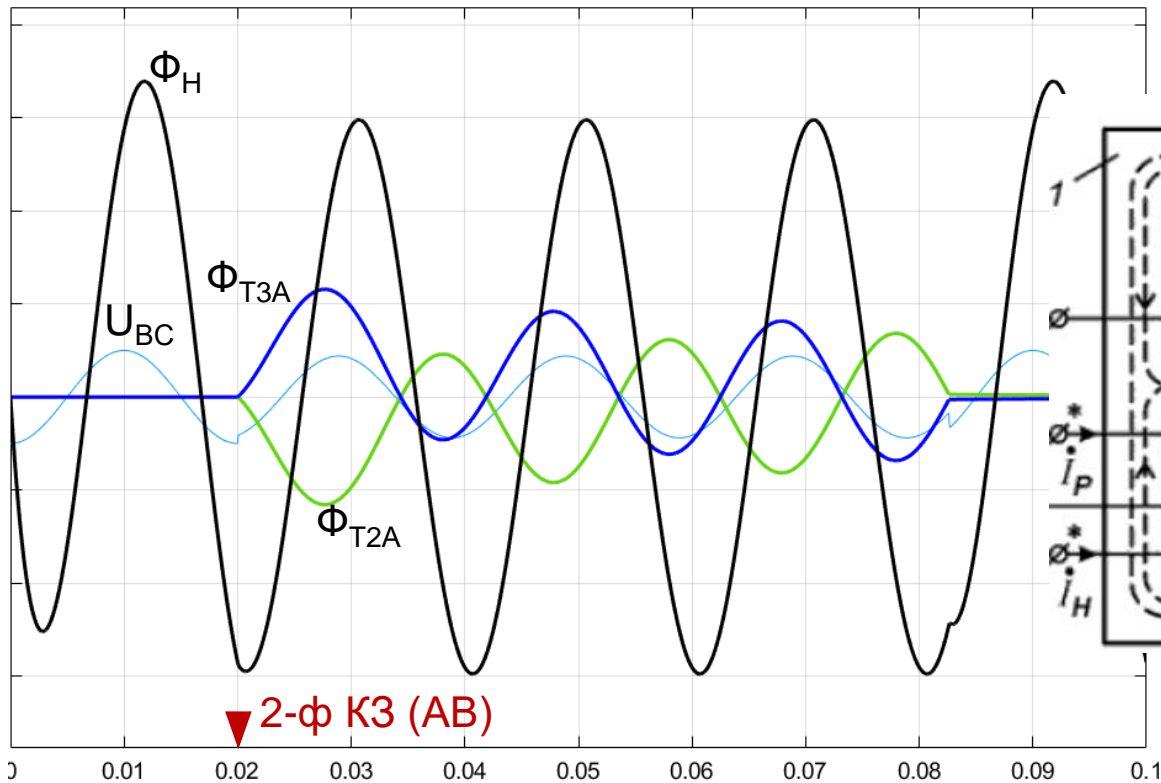
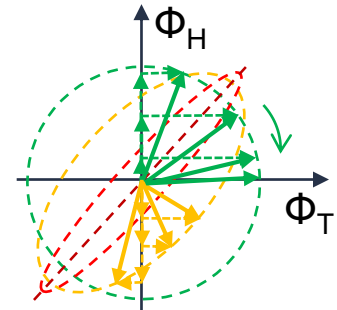
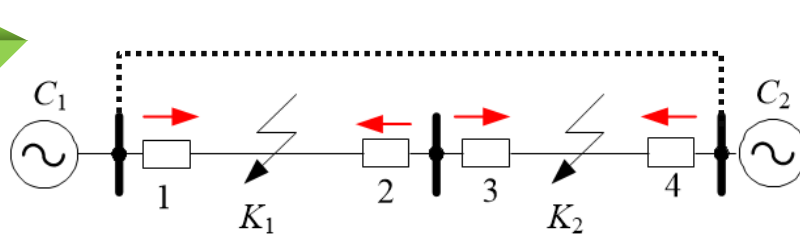
# Принцип действия

Направленное действие защиты обеспечивается за счет реле направления мощности



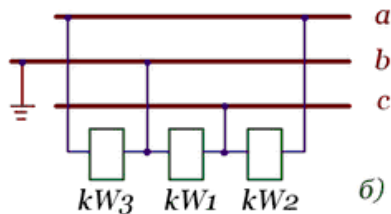
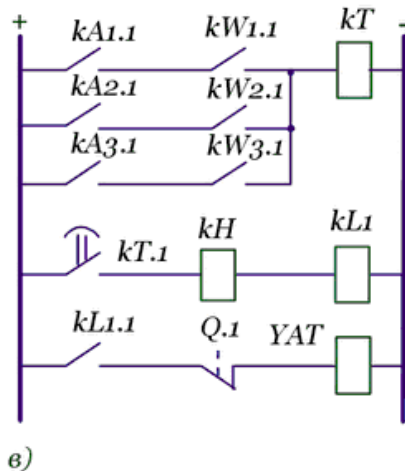
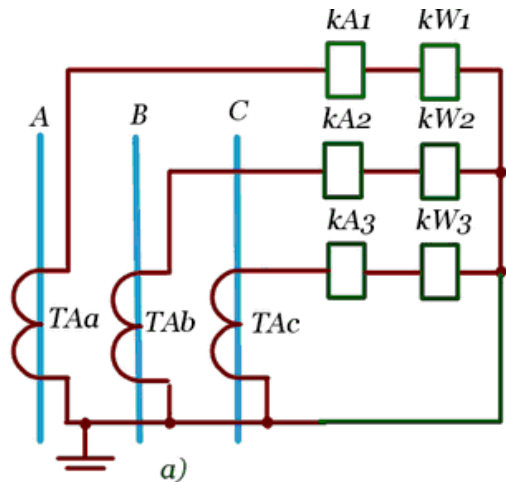
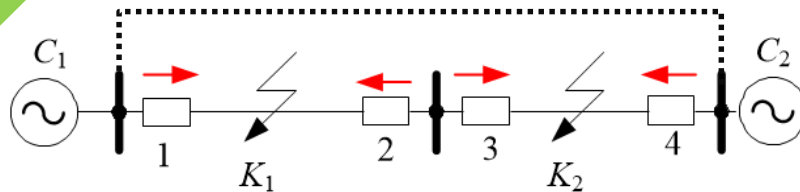
Реле направления мощности  
индукционное

# Принцип действия





# Принцип действия



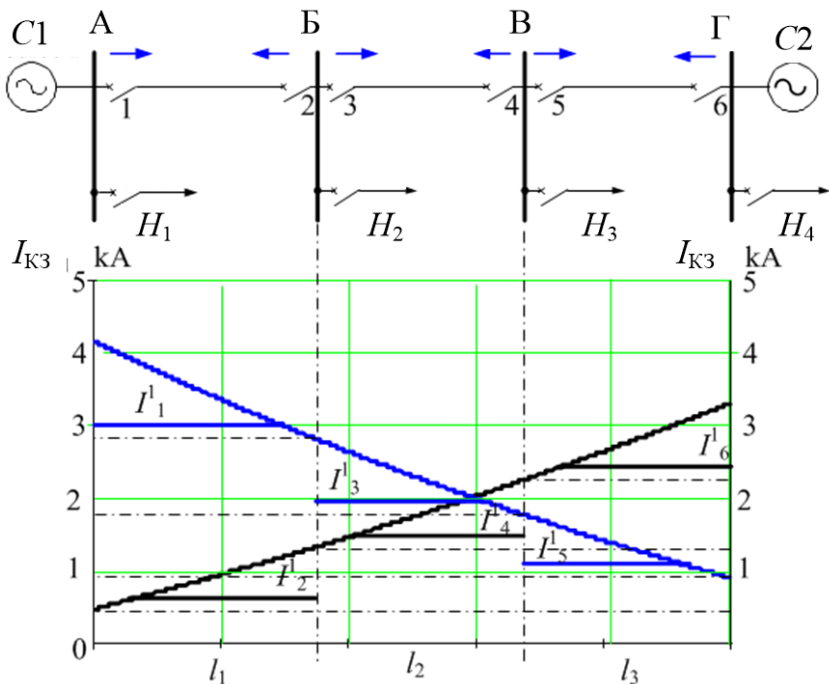
При возникновении КЗ в точке К1 происходит срабатывание

1. токовых реле:
  - первых ступеней защит 1-3
  - вторых ступеней защит 1-4
2. реле мощности
  - первых ступеней защит 1, 2, 4
3. реле времени в порядке
  - вторых ступеней защит 1, 2
  - вторых ступеней защит 4

Таким образом направленные токовые защиты нечувствительны к КЗ «за спиной»

# Расчет уставок направленных токовых отсечек

для сети с двусторонним питанием



Уставки мгновенной токовой отсечки  
для защит 5, 3, 1 (синие прямые)  
2, 4, 6 (черные прямые)

## Задание 1

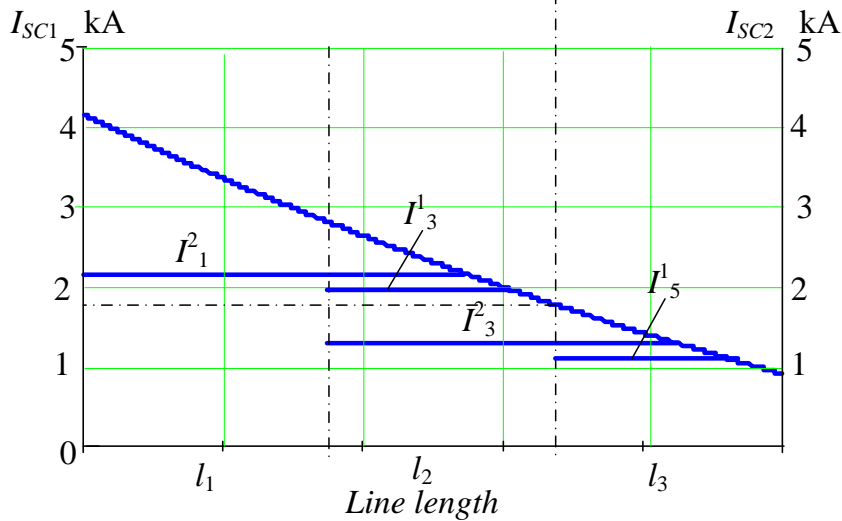
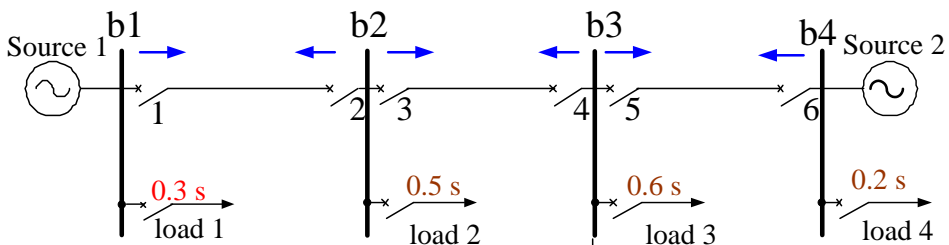
1. Приблизленно, по графику, определить уставки токовой отсечки с выдержкой времени для всех защит, для которых она необходима.
2. Определить в % от длины линии зоны, при КЗ в которых будет срабатывать токовая отсечка с выдержкой времени.

$$K_H = 1.1$$

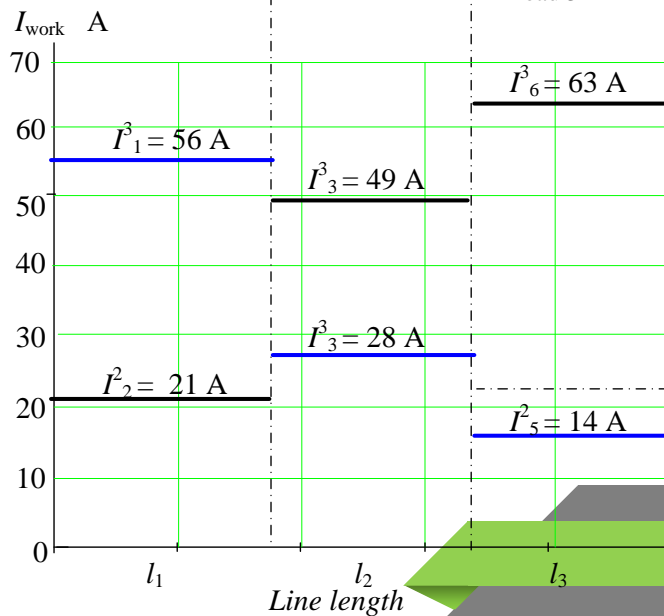
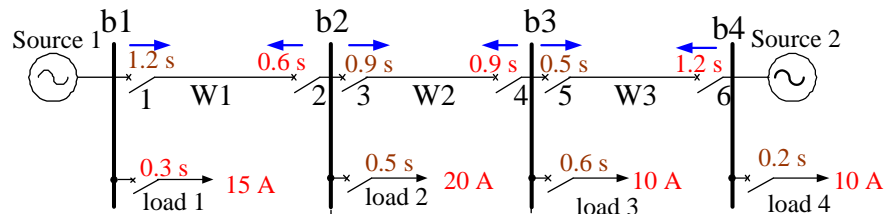
# Расчет уставок направленных токовых отсеков

для сети с двусторонним питанием

## Выбор уставок ТО с выдержкой времени

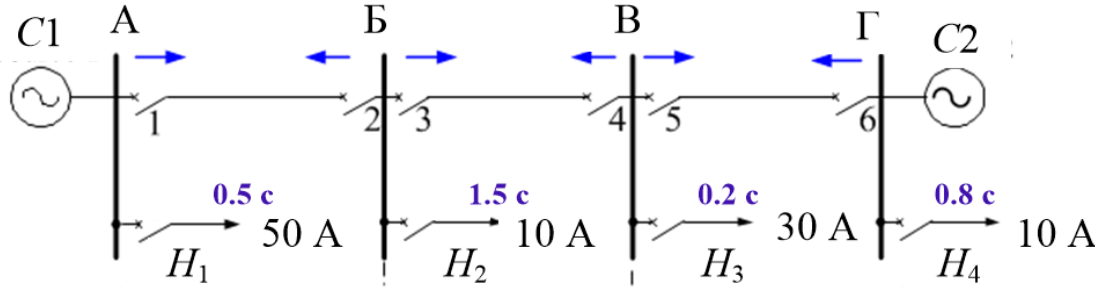


## Выбор уставок МТЗ



# Расчет уставок направленных МТЗ

для сети с двусторонним питанием



Максимальные рабочие токи нагрузок и выдержки времени МТЗ нагрузок указаны на схеме.

## Пример для защиты 2

$$t_2 = t_{H1} + \Delta t = 0,5 + 0,3 = 0,8 \text{ с}$$

Выдержка времени защиты 2 согласуется с выдержкой времени нагрузки  $H_1$

$$I_2 = (K_H \cdot K_{C3} / K_B) I_{H1} = (1.1 \cdot 1.2 / 0.9) 50 = 73 \text{ А}$$

Уставка защиты 2 согласуется с током нагрузки  $H_1$

## Задание 2

Рассчитать уставки МТЗ и выдержки времени для защит 1, 3, 5.

Результат расчета округлить до целых.

Коэффициенты

$K_H = 1.1$  – надежности

$K_{C3} = 1.2$  – самозапуска

$K_B = 0.9$  – возврата

$\Delta t = 0.3 \text{ с}$  – степень селективности

# Расчет уставок направленных ТО

для кольцевой сети

## Задание 3

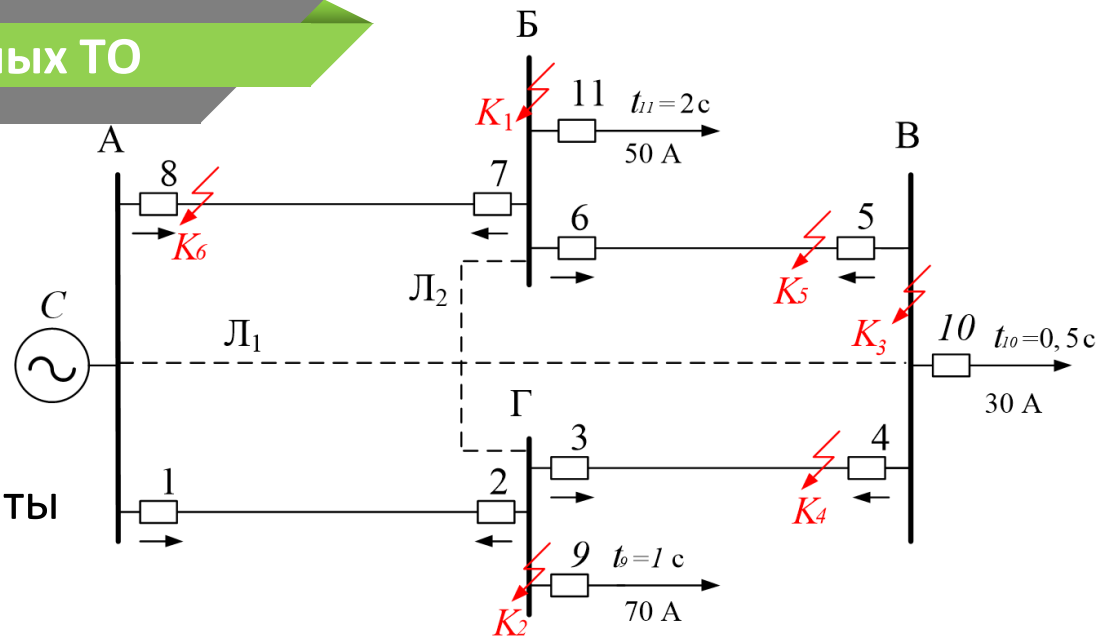
Рассчитать уставку мгновенной токовой отсечки и токовой отсечки с выдержкой времени для защиты 3.

Ток  $K_3$ , протекающий через защиты

1, 3, 5 при  $K_1$  – 500 А

1, 3 при  $K_3$  – 1000 А

1 при  $K_2$  – 2000 А



$K_H = 1.1$  – коэффициент надежности

## ПРИМЕР ДЛЯ ЗАЩИТЫ 8

Токовая отсечка без выдержки времени  $I^1_8 = K_H / K_1$ ,  $I^1_6 = K_H / K_3$

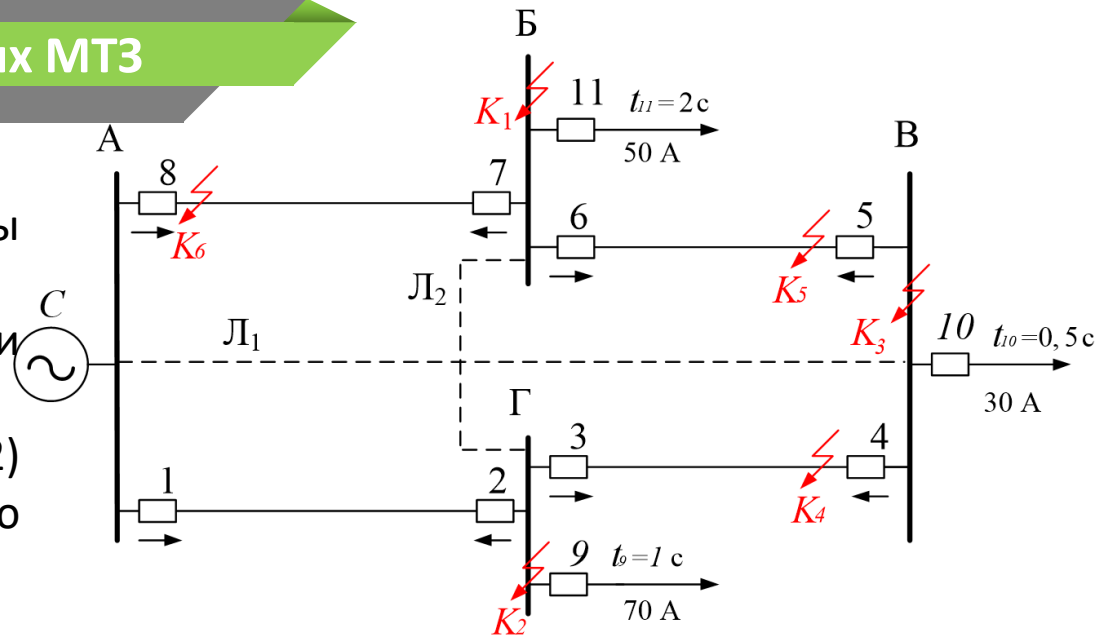
Токовая отсечка с выдержкой времени  $I^2_8 = K_H / I^1_6$

# Расчет уставок направленных МТЗ

для кольцевой сети

## Задание 4

1. Рассчитать уставку МТЗ для защиты 3 в режиме максимального тока.
2. Рассчитать выдержки времени защит 1, 3, 5, 7.
3. Для какой линии (Л1 или Л2) возможно выполнить селективную МТЗ?



## Недостатки МТЗН

-Каскадное действие – одновременное срабатывание комплектов защиты по концам линии («накапливаемые» выдержки времени).

-«Мертвая зона» – участок линии, в пределах которого защита не работает при трехфазном КЗ.

- Недостаточная чувствительность для ближнего и дальнего резервирования

$K_H = 1.1$  – надежности  
 $K_{C3} = 1.2$  – самозапуска  
 $K_B = 0.9$  – возврата  
 $\Delta t = 0.5$  с – степень селективности

# Проверка чувствительности токовых защит

для кольцевой сети

## Способ повышения чувствительности МТЗ

Блокировка по напряжению – защиты блокируется реле напряжения минимального действия, если остаточное напряжение при КЗ на шинах противоположной подстанции больше заданной уставки

$$U_{сз} = U_{ном} / K_H K_B$$

Чувствительность мгновенной токовой отсечки – **не проверяется**

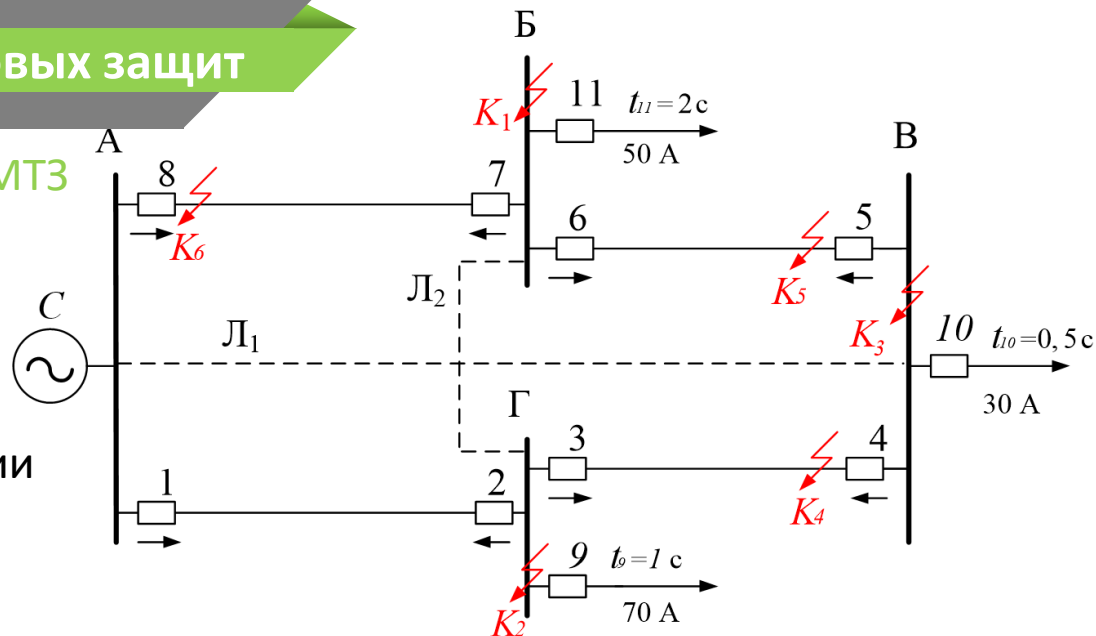
Чувствительность токовой отсечки с выдержкой времени

$$K_{ч8} = I_{кБ}^{(2)} / I_{8}^{ТО} > 2$$

Чувствительность МТЗ

$$K_{ч8} = I_{к1}^{(2)} / I_{8}^{МТЗ} > 2 \text{ – в режиме ближнего резервирования}$$

$$K_{ч8} = I_{к3}^{(2)} / I_{8}^{МТЗ} > 1,5 \text{ – в режиме дальнего резервирования}$$



$$I_{13}^3 = \frac{K_H K_{C3}}{K_B} (I_{H1} + I_{H2})$$

Блокировка по напряжению – действие защиты блокируется реле напряжения минимального действия, если остаточное напряжение на шинах больше заданной уставки.

$$U_{C3} = \frac{U_{НОМ}}{K_H K_B}$$

$$K_{ч} = \frac{U_{C3}}{U_{Kmax}}$$

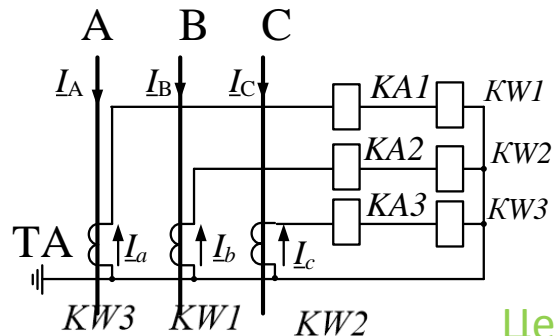
$U_{Kmax}$  - максимальное значение остаточного напряжения в месте установки защиты при КЗ в конце защищаемого или резервируемого участка.

**KW** включается на разноименные фазы тока и напряжения в таких сочетаниях, чтобы обеспечить в условиях КЗ правильное определение направления мощности и возможно большее ее значение.



# Схема МТЗН с блокировкой минимального напряжения

и однофазными реле направления мощности



Токовые цепи

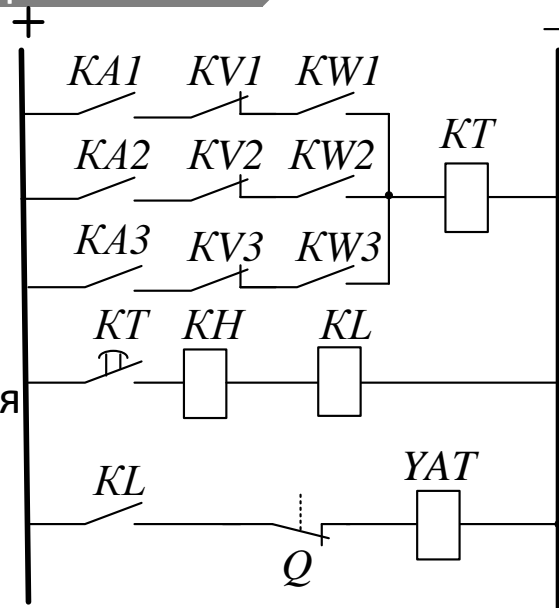
KA – реле тока,  
KW – токовая  
обмотка реле  
мощности

Цепь напряжения

KW – обмотка напряжения  
реле мощности  
KV – реле минимального  
напряжения

Сочетание фаз токов и напряжений  
подводимое к реле мощности в 90°  
схеме включения:

$$I_A - U_{BC}, I_B - U_{CA}, I_C - U_{AB}$$



Цепь оперативного постоянного тока

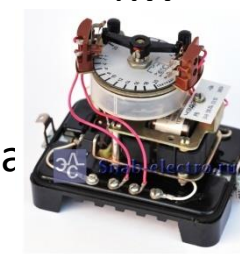
KT – реле времени,  
KH – сигнальное реле,  
KL – усилительное реле,  
YAT – электромагнит  
отключения



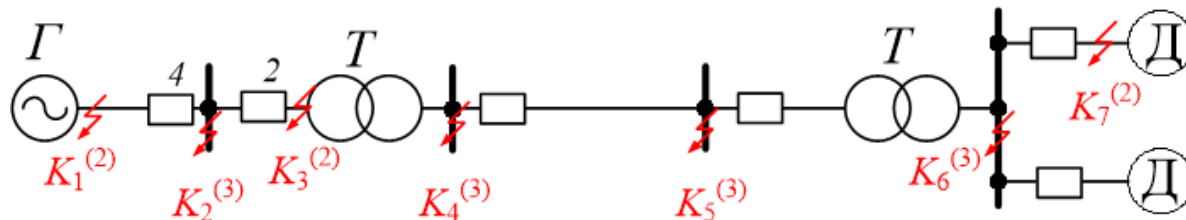
KA



KW



KT



Токовая отсечка без выдержки времени

$$I_{\Gamma}^1 = K_H I_{K2}^{(3)}, \quad I_T^1 = K_H I_{K4}^{(3)}, \quad I_D^1 = K_H I_{K6}^{(3)}$$

Максимальная токовая защита

$$I_{\text{МТЗ}} = (K_H \cdot K_{\text{СЗ}} / K_B) n \cdot I_{\text{Дном}} \quad n - \text{число двигателей}$$

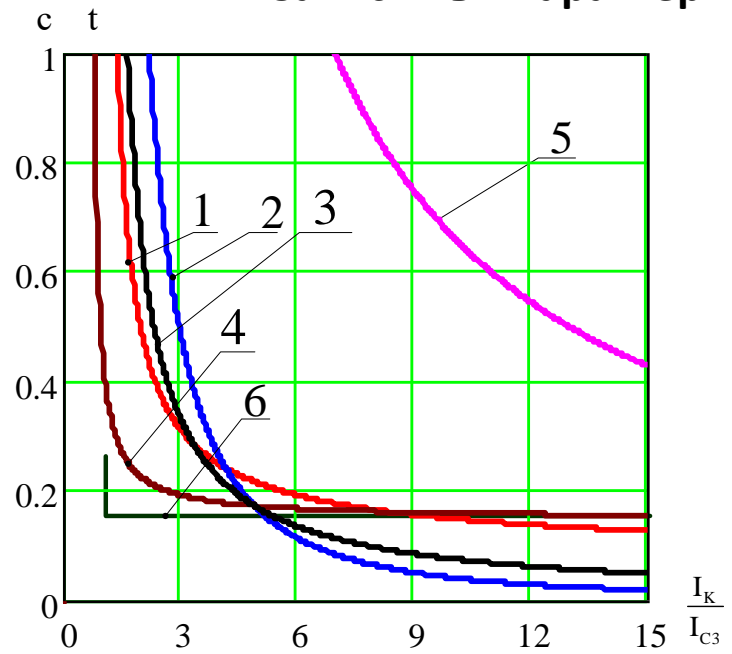
Проверка чувствительности токовой отсечки

$$K_{\text{чГ}} = I_{K1}^{(2)} / I_{\Gamma}^1 \quad K_{\text{чТ}} = I_{K3}^{(2)} / I_T^1 \quad K_{\text{чД}} = I_{K7}^{(2)} / I_D^1$$

Проверка чувствительности МТЗ (режим дальнего резервирования)


$$K_{\text{чГ}} = I_{K4}^{(2)} / I_{\text{МТЗ}} \quad K_{\text{чТ}} = I_{K5}^{(2)} / I_{\text{МТЗ}} \quad K_{\text{чД}} = I_{K5}^{(2)} / I_D$$

Уменьшение выдержек времени МТЗ на головных участках с помощью обратно-зависимых характеристик (микропроцессорные защиты)



Типы время-токовых обратно-зависимых характеристик (ОЗХ)

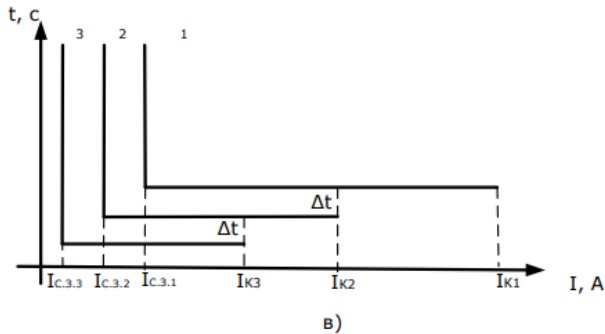
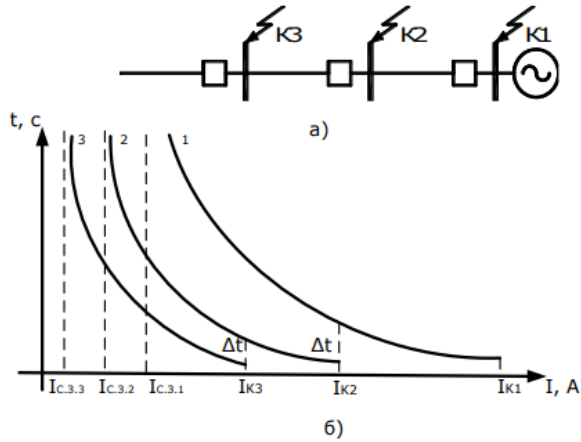
## УГО защит с ОЗХ

ABB  Россия Т/В

- 1 – нормальная (N),
- 2 – экстремальная (Ex),
- 3 – очень зависимая (V),
- 4 – RI характеристика (для согласования с хар-ми эл. мех. реле),
- 5 – с очень продолжительным временем срабатывания (L),
- 6 – независимая.

$$t = \frac{k\beta}{I_*^\alpha - 1}$$

## МТЗ с зависимой характеристикой срабатывания



Сравнение согласования МТЗ с зависимой и независимой времятоковой характеристикой на примере участка сети

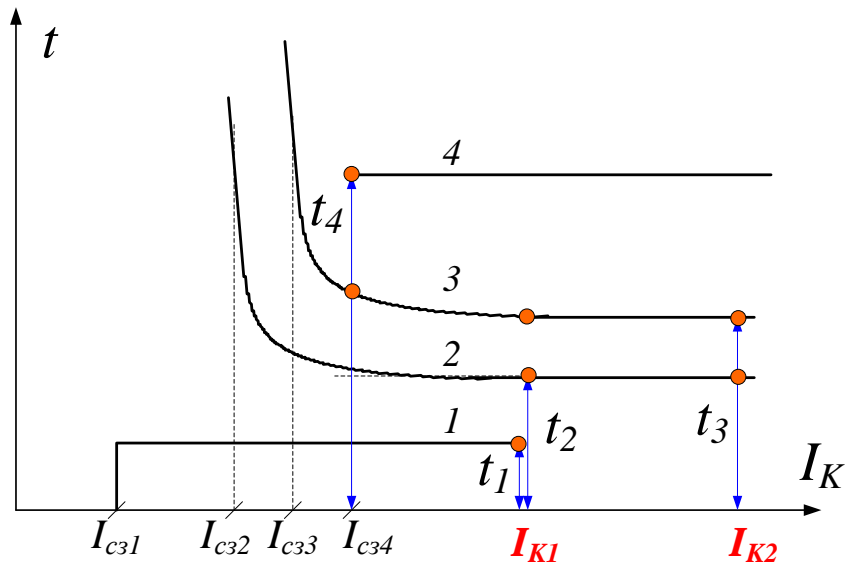
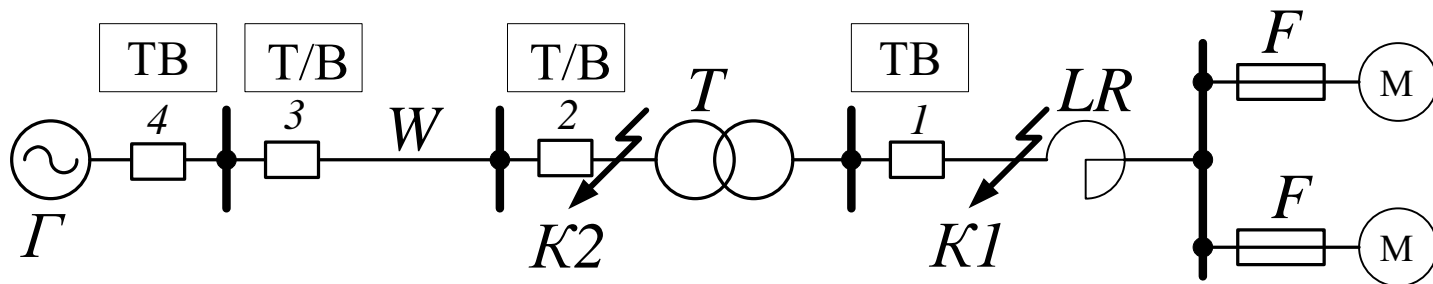
- а) первичная схема участка сети;
- б) согласование МТЗ с зависимыми характеристиками;
- в) согласование МТЗ с независимыми характеристиками

При токе КЗ равном  $I_{сз}$  (и меньше) время срабатывания защиты стремится в бесконечность.

Фактическое срабатывание защиты 1,1-1,3  $I_{сз}$ .

# Согласование времен срабатывания МТЗ

с зависимой и независимой выдержками времени



$$t_1 = t_F + \Delta t$$

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad I_{K1} \quad I_{K2}$$

$$t_3 = t_2 + \Delta t \quad I_{K2} \quad I_{K1} \quad I_{c34}$$

$$t_4 = t_3 + 2\Delta t \quad I_{c34}$$

- 1 Андреев В.А.. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник для вузов. —Москва: Высшая школа, 2012. — 639 с.
2. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие для вузов – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 296 с.
3. Копьев В.Н. Релейная защита: учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2011 (для подготовки к ЛР).
4. Юдин С. М. [и др.] Испытательные системы серии "РЕТОМ" и их применение для проверки устройств релейной защиты и автоматики: учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. (для подготовки к ЛР).
5. Беркович М..А., Молчанов В.В., Семенов В.А. Основы техники релейной защиты. – 1984.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Васильев Алексей Сергеевич  
*vasilevas@tpu.ru*

ТПУ – Томск 2022 г.



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ