

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 9

Сетевая автоматика

Автоматическое повторное включение (АПВ)

Если поврежденную **ЛЭП быстро отключить**, т. е. снять с нее напряжение, то в большинстве случаев **повреждение ликвидируется**. При этом электрическая дуга, возникшая в месте короткого замыкания (КЗ), **не успевает вызвать существенных разрушений** оборудования, препятствующих обратному включению линии под напряжение.

Автоматическое повторное включение (АПВ) предназначено для быстрого восстановления питания потребителей путем автоматического включения элементов сети, отключенных устройствами РЗ.

Примеры самоустраняющихся повреждений

Примеры самоустраняющихся повреждений (70–80% от общего числа)



«Пляска» проводов
при сильном ветре



Удар молнии



Ветка, заброшенная
ветром

Успешные АПВ – аварийно отключившийся элемент остается в работе после однократного действия АПВ приблизительно в 70% случаев, после двукратного – в 20–30%

Область применения АПВ



ЛЭП 500 кВ

ЛЭП $U \geq 1$ кВ
(воздушные и смешанные
кабельно-воздушные линии)



Сборные шины 110 кВ

Сборные шины,
оборудованные дифф. защитой



Трансформаторы
(понижающие) $S \geq 1$ МВА.



Генераторы



Двигатели,
отключенные АЧР



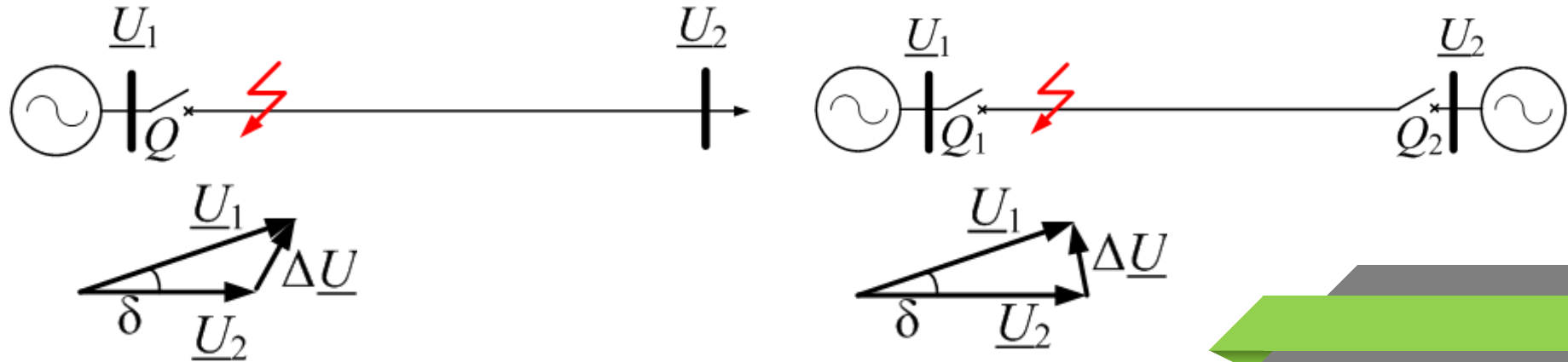
Трансформатор
блока

Для линий с односторонним питанием:

- простое трехфазное АПВ

Для линий с двухсторонним питанием:

- несинхронные (НАПВ)
- быстродействующие (БАПВ)
- с ожиданием синхронизма (АПВОС) и контролем отсутствия-наличия напряжения (КОН, КНН)
- с улавливанием синхронизма (АПВУС) и КОН, КНН



К устройствам АПВ предъявляются следующие требования:

- постоянная готовность к действию
- срабатывание при всех случаях аварийного отключения выключателя (кроме случаев отключения действием РЗ после включения выключателя дежурным персоналом)
- схемы АПВ должны допускать возможность автоматического вывода их из действия при срабатывании тех или иных защит
- действие АПВ должно быть согласовано с действием других устройств автоматики

Общие требования к АПВ

- не должны приходить в действие при отключении выключателя дежурным персоналом (пуск УАПВ от несоответствия положения выключателя и его ключа управления)

Ограниченно применяется также пуск УАПВ при срабатывании РЗ, однако это не обеспечивает действие АПВ при аварийном отключении ЛЭП без срабатывания РЗ.



Общие требования к АПВ

- УАПВ должны иметь минимально возможное время срабатывания для сокращения времени перерыва в питании потребителя, но при этом не менее, чем:
 - время восстановления готовности привода выключателя к включению ($t_{гп}$ обычно 0,1–0,3 с);
 - время деионизации среды в точке повреждения (0,08–0,4 с);
 - время восстановления отключающей способности выключателя ($t_{гв} < t_{гп} + t_{вв}$, $t_{вв}$ – время включения выключателя);
 - плюс время запаса $t_{зап} = 0,4–0,5$ с.

Время деионизации $t_{дс}$ среды в месте повреждения зависит от $U_{ном}$ сети



35 кВ – **0,08** с

220 кВ – **0,25** с

110 кВ – **0,17** с

500 кВ – **0,3-0,4** с

Суммарное время срабатывания УАПВ $t_{АПВ1}=0,5-0,8$ с.

В случае повышенной вероятности повреждения от падения дерева целесообразно увеличивать время срабатывания до нескольких секунд (для снижения вероятности неселективного перегорания предохранителей).

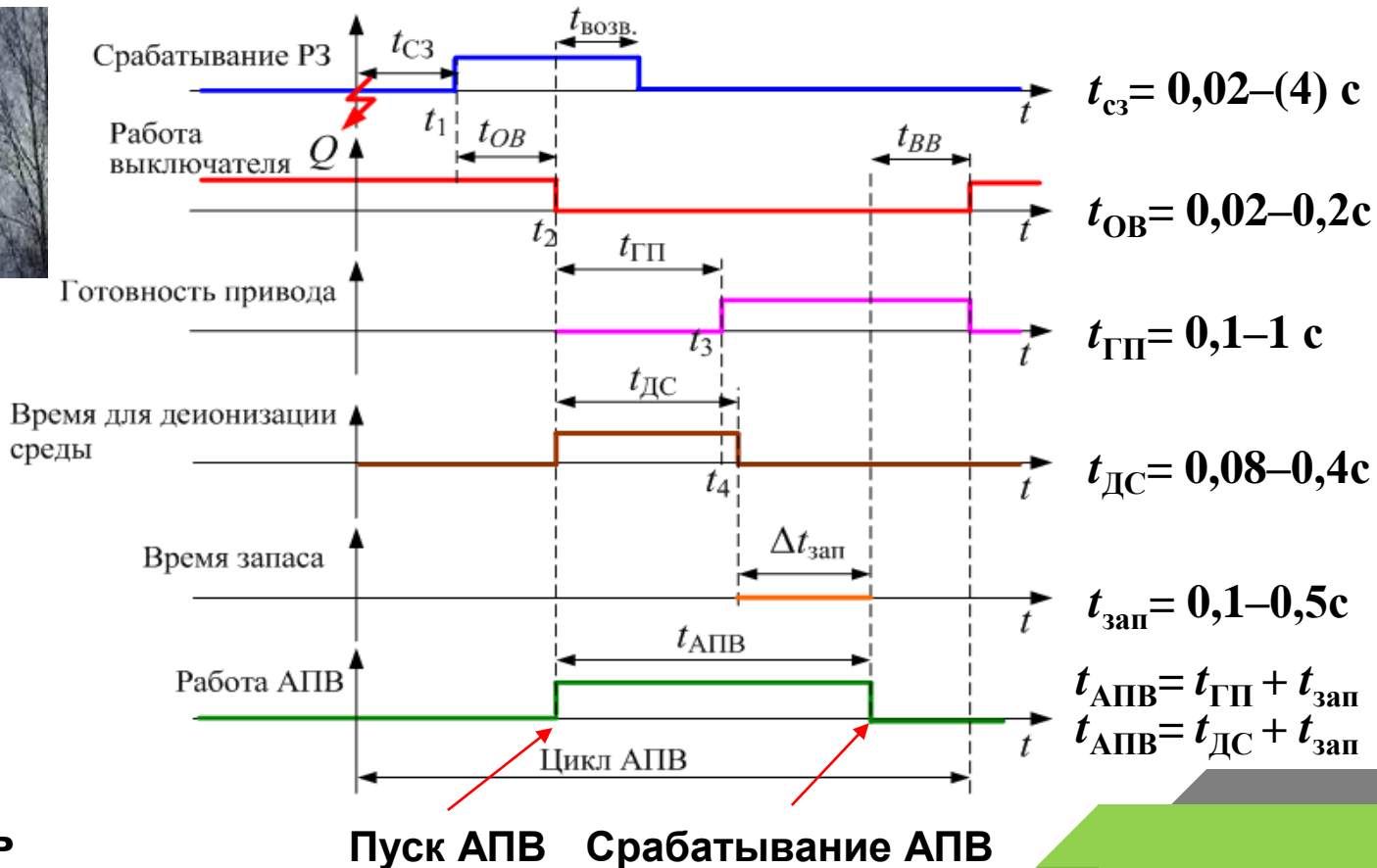
- УАПВ должны, как правило, предусматривать ускорение действия РЗ
- УАПВ должны возвращаться в состояние готовности к срабатыванию после включения выключателя

- При выборе выдержки времени $t_{\text{АПВ2}}$ на возврат УАПВ в состояние готовности к срабатыванию должны выполняться следующие требования:
 - УАПВ не должны многократно включать выключатель на неустановившиеся КЗ (обеспечивается при условии если РЗ с максимальной выдержкой времени успеет отключить выключатель, включенный на КЗ, раньше, чем УАПВ вернется в состояние готовности);
 - УАПВ должно быть готово к действию не раньше, чем это допускается по условию работы выключателя после успешного включения его в работу устройством АПВ.

Временная диаграмма цикла АПВ трехфазное АПВ (ТАПВ)



**Масляный
выключатель**



Простое трехфазное АПВ (ТАПВ)



SA – ключ управления,
 SQ.1, SQ.2 – вспомогательные контакты выключателя,
 KT – реле времени,
 KL1 – исполнительное реле с двумя обмотками,
 C – конденсатор, время заряда которого обеспечивает
 однократность действия АПВ

(15–25 с),

R_1, R_4 – токоограничивающие резисторы,

R_2 – зарядный резистор, изменение величины которого
 изменяет время заряда конденсатора C,

KQT – реле положения,

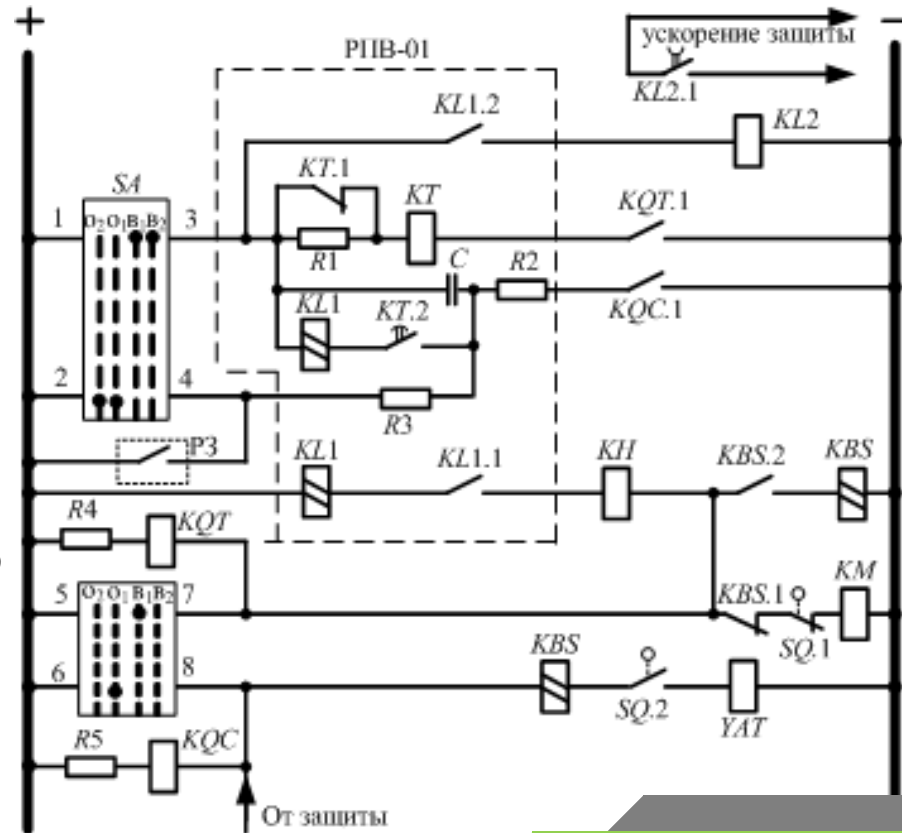
KQC – контроль исправности цепей включения,

KM – контактор

KBS – специальное исполнительное реле с двумя
 обмотками,

KH – указательное реле.

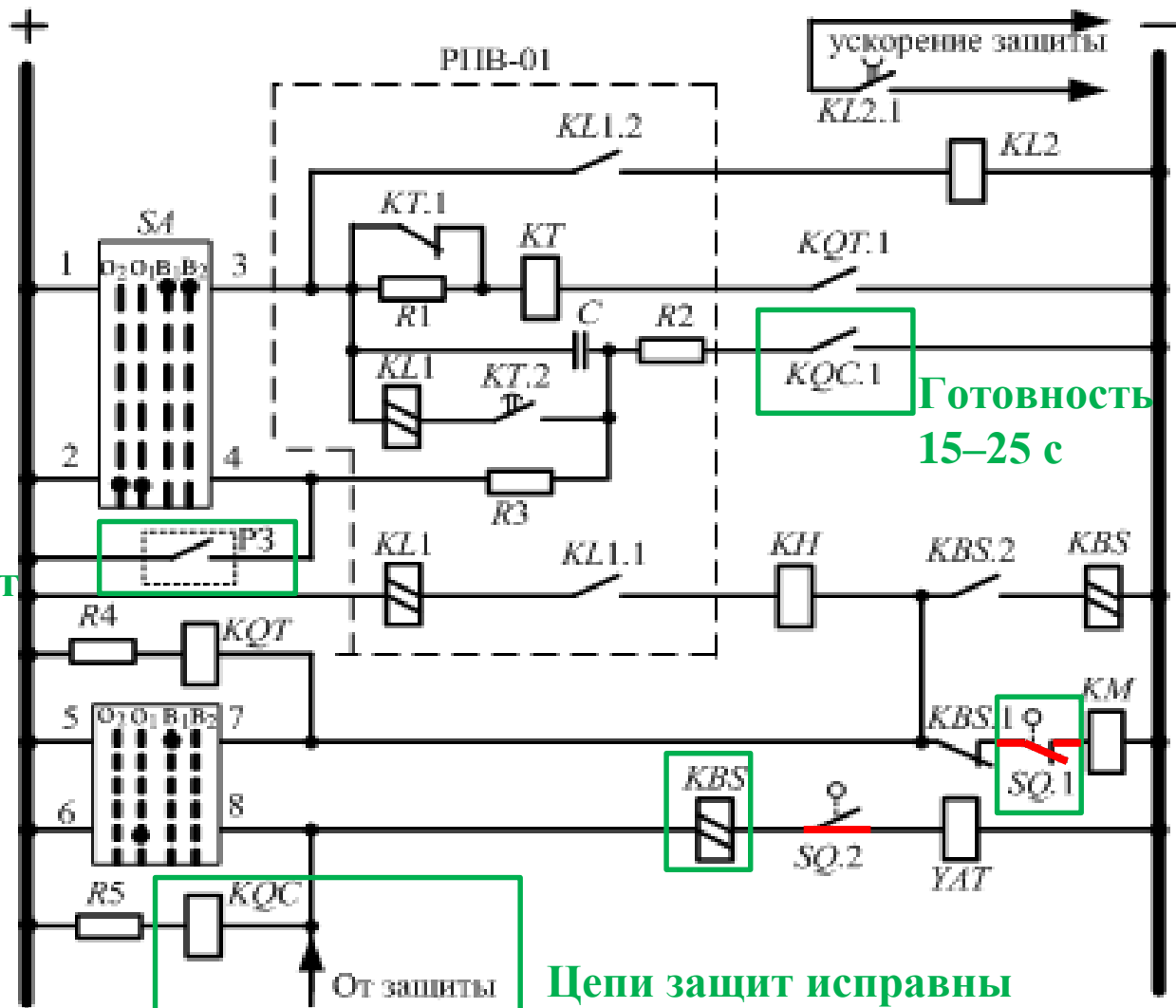
Схема АПВ однократного действия для линии с масляным выключателем



Простое ТАПВ

SA – ключ управления,
SQ.1, SQ.2 – вспомогательные
контакты выключателя,
KT – реле времени,
KL1 – исполнительное реле с двумя
обмотками,
C – конденсатор, время заряда
которого обеспечивает
однократность действия АПВ (15–
25 с),
R₁, R₄ – токоограничивающие
резисторы,
R₂ – зарядный резистор, изменение
величины которого изменяет время
заряда конденсатора C,
KQT – реле положения,
KQC – контроль исправности цепей
включения,
KM – контактор
KBS – специальное исполнительное
реле с двумя обмотками,
KH – указательное реле.

Запрета
от РЗ нет



Простое ТАПВ

SA – ключ управления,

★ SQ – несоответствие

KT – положения выключателя
KL – и ключа управления

C – конденсатор, время заряда которого обеспечивает однократность действия АПВ (15–25 с),

R₁, R₄ – токоограничивающие резисторы,

R₂ – зарядный резистор, изменение величины которого изменяет время заряда конденсатора C,

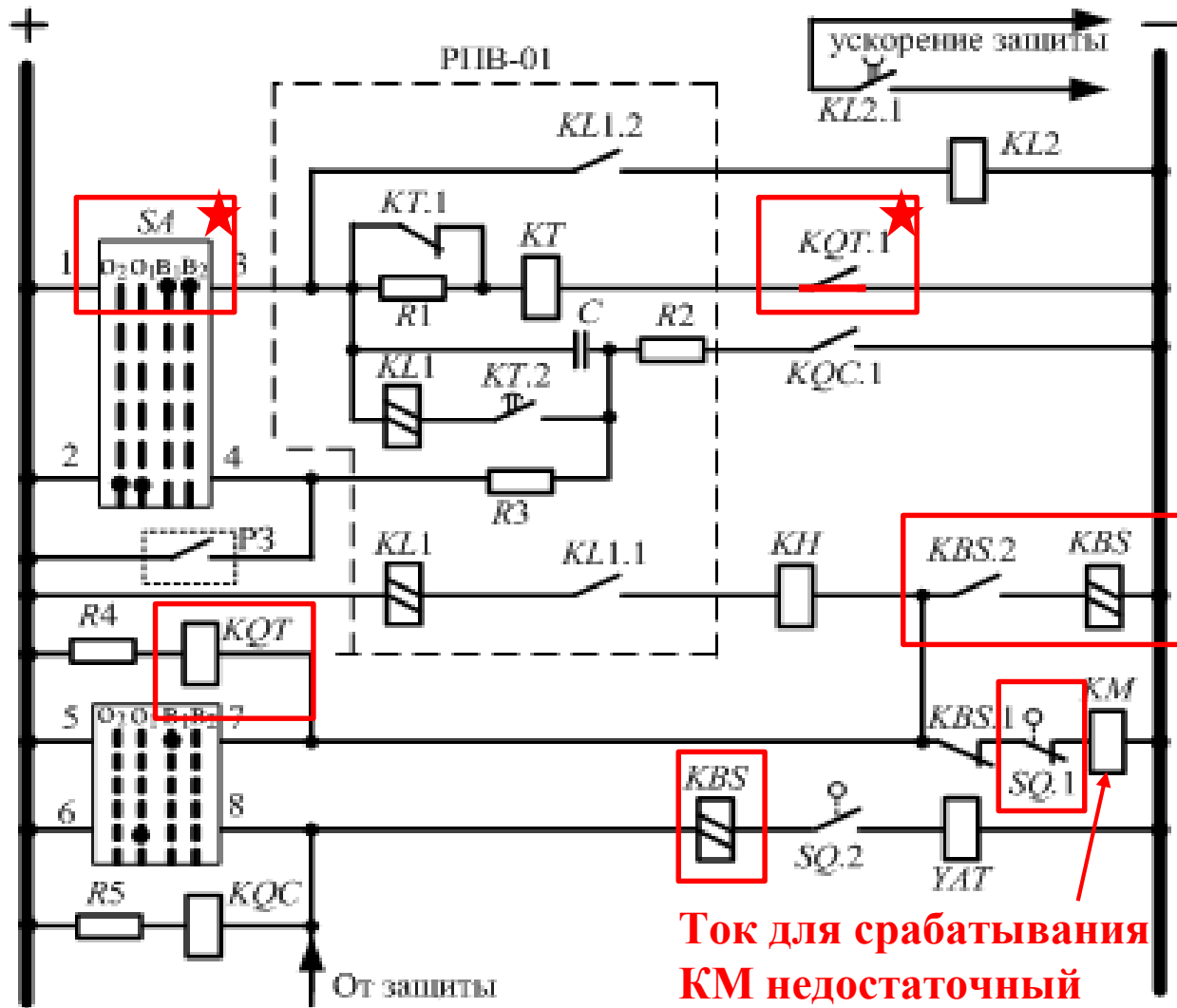
KQT – реле положения,

KQC – контроль исправности цепей включения,

KM – контактор

KBS – специальное исполнительное реле с двумя обмотками,

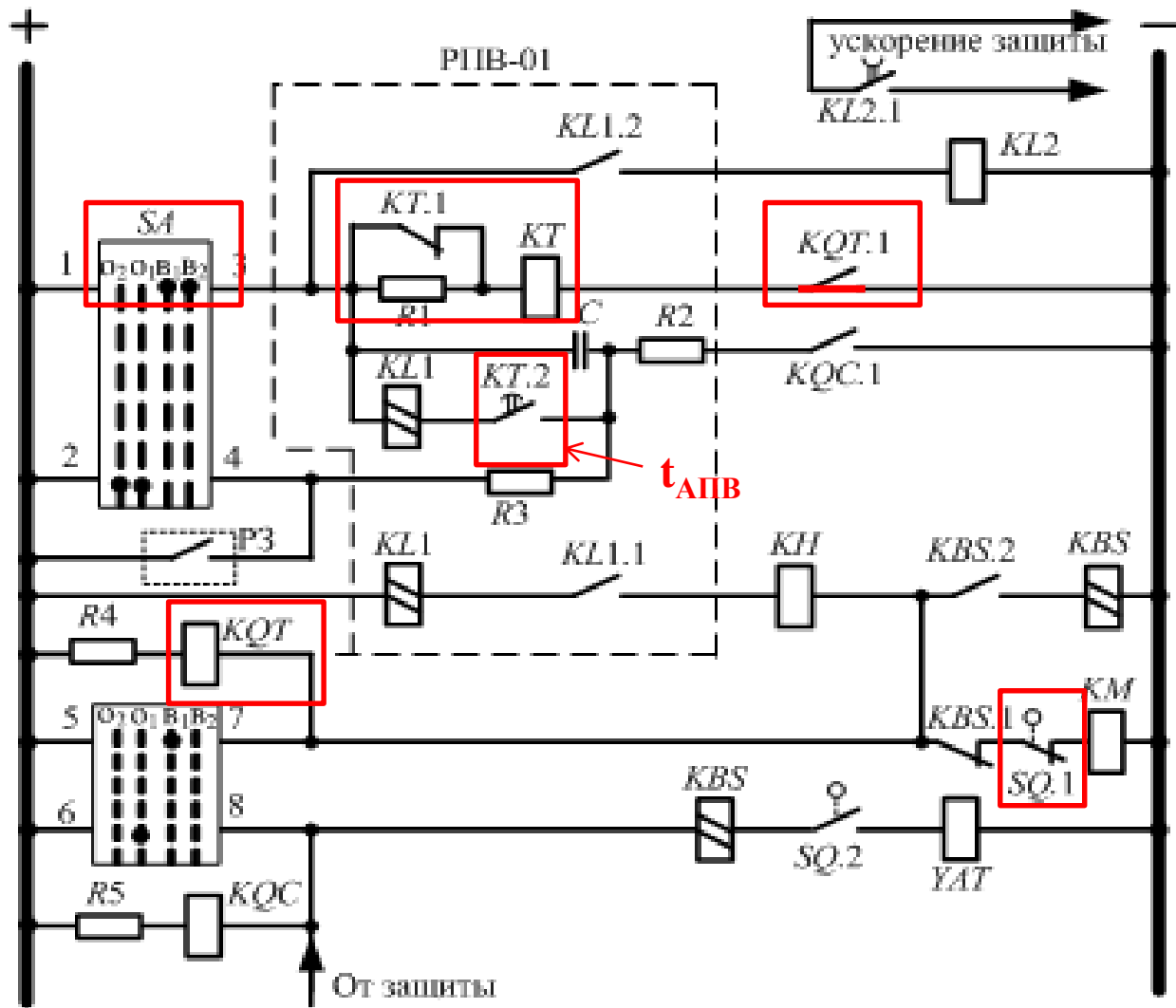
KH – указательное реле.



**Ток для срабатывания
КМ недостаточный**

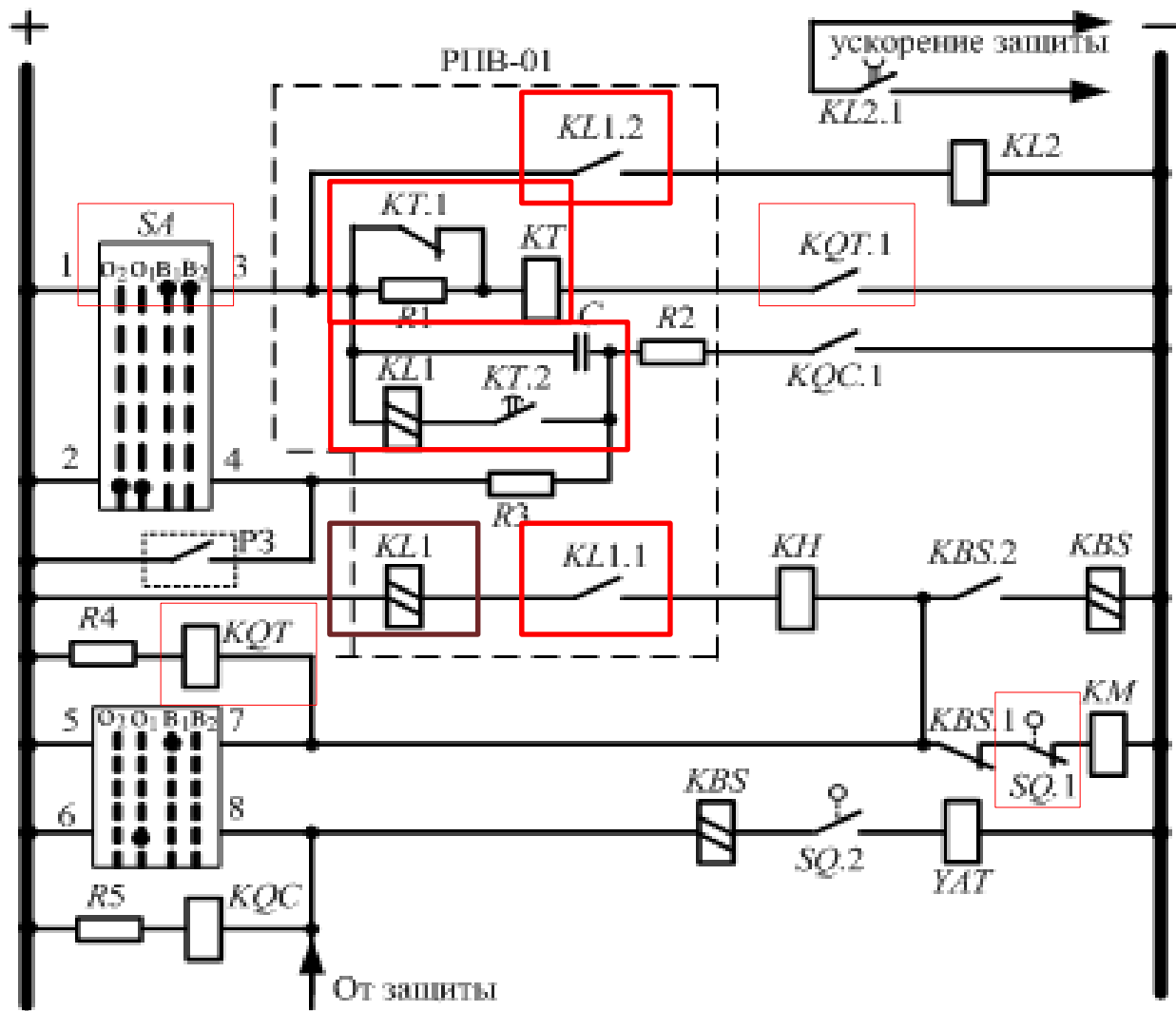
Простое ТАПВ

SA – ключ управления,
SQ.1, SQ.2 – вспомогательные контакты выключателя,
KT – реле времени,
KL1 – исполнительное реле с двумя обмотками,
C – конденсатор, время заряда которого обеспечивает однократность действия АПВ (15–25 с),
R₁, R₄ – токоограничивающие резисторы,
R₂ – зарядный резистор, изменение величины которого изменяет время заряда конденсатора *C*,
KQT – реле положения,
KQC – контроль исправности цепей включения,
KM – контактор
KBS – специальное исполнительное реле с двумя обмотками,
KH – указательное реле.



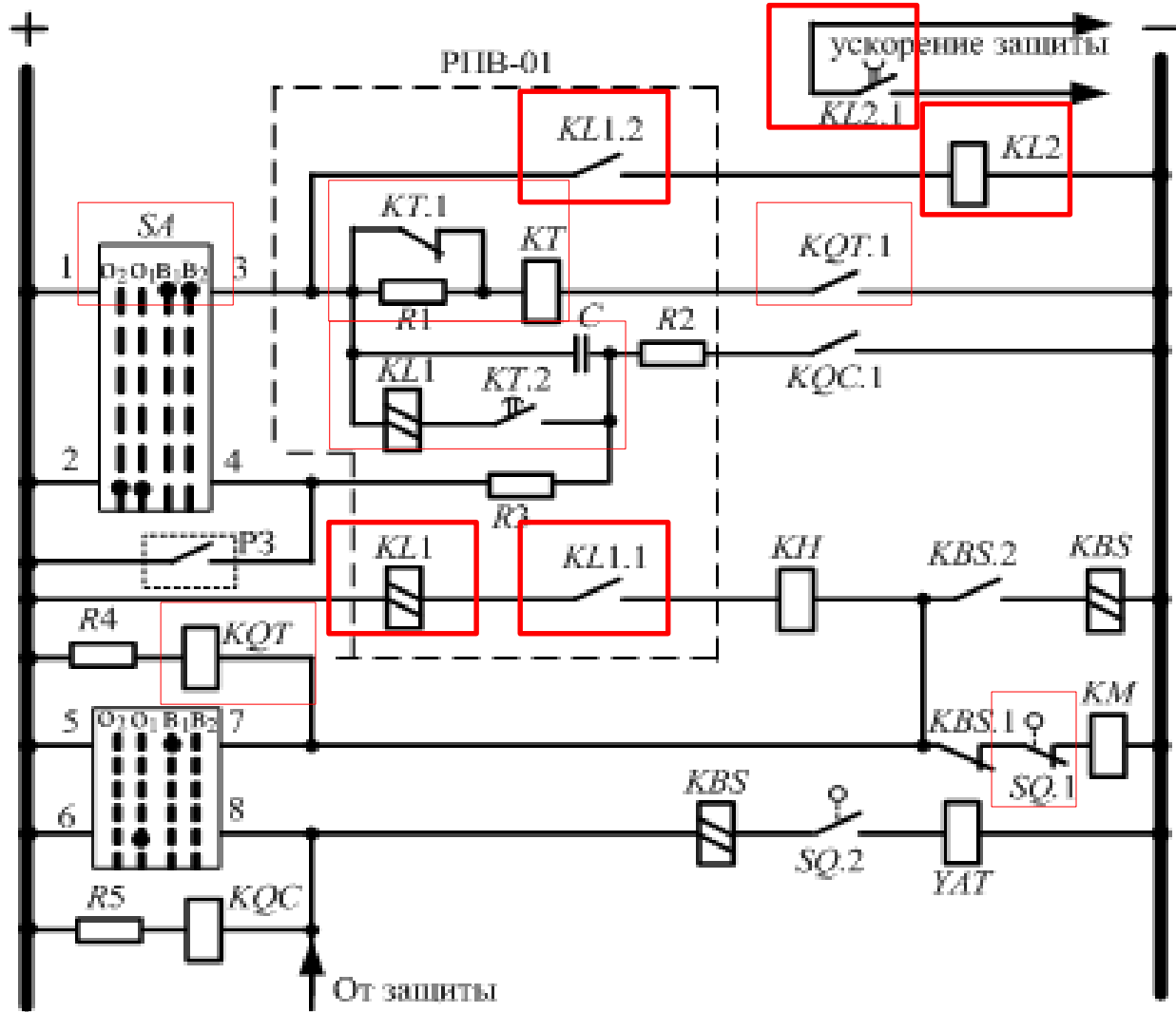
Простое ТАПВ

SA – ключ управления,
SQ.1, SQ.2 – вспомогательные контакты выключателя,
KT – реле времени,
KL1 – исполнительное реле с двумя обмотками,
C – конденсатор, время заряда которого обеспечивает однократность действия АПВ (15–25 с),
R₁, R₄ – токоограничивающие резисторы,
R₂ – зарядный резистор, изменение величины которого изменяет время заряда конденсатора *C*,
KQT – реле положения,
KQC – контроль исправности цепей включения,
KM – контактор
KBS – специальное исполнительное реле с двумя обмотками,
KH – указательное реле.



Простое ТАПВ

SA – ключ управления,
SQ.1, SQ.2 – вспомогательные
контакты выключателя,
KT – реле времени,
KL1 – исполнительное реле с двумя
обмотками,
C – конденсатор, время заряда
которого обеспечивает
однократность действия АПВ (15–
25 с),
R₁, R₄ – токоограничивающие
резисторы,
R₂ – зарядный резистор, изменение
величины которого изменяет время
заряда конденсатора C,
KQT – реле положения,
KQC – контроль исправности цепей
включения,
KM – контактор
KBS – специальное исполнительное
реле с двумя обмотками,
KH – указательное реле.



Последствия несинхронного АПВ для линий с двусторонним питанием:

- включение линии сопровождается большими толчками тока и активной мощности, а также длительными качаниями;
- появляются токи и напряжения обратной последовательности;
- снижаются напряжения.

Вследствие переходных процессов могут избыточно срабатывать все защиты ЛЭП кроме дифференциальной.

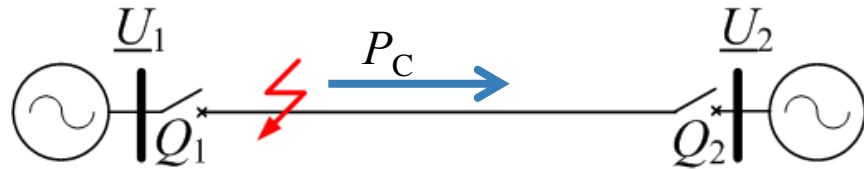
ТАПВ для линий с двухсторонним питанием

$$T_{и1} \frac{df_1}{dt} = P_{Г1} - P_{Н1}$$
$$P_{Г1} > P_{Н1}$$

$$\frac{df_1}{dt} > 0 \Rightarrow f_1 \uparrow$$

$P_C = P_{Г1} - P_{Н1} = P_{Г2} - P_{Н2}$ – сальдо перетока до КЗ

$T_{и}$ – постоянная инерции соответствующей ЭС



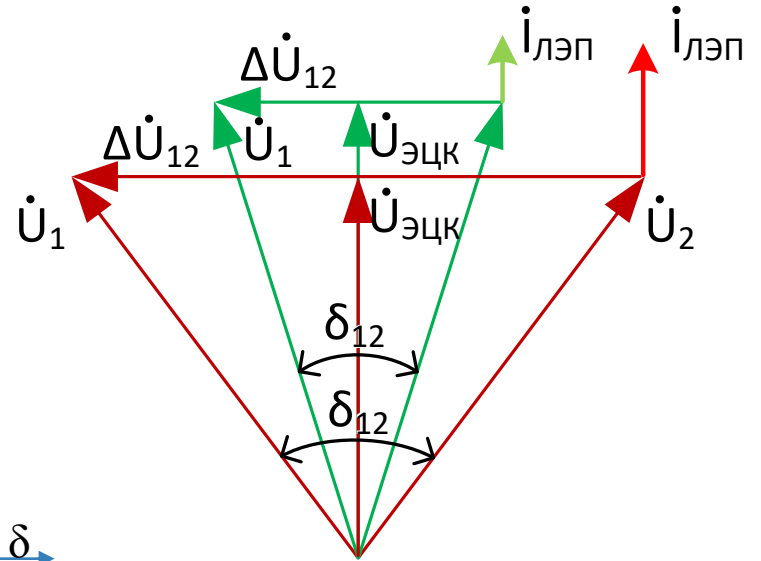
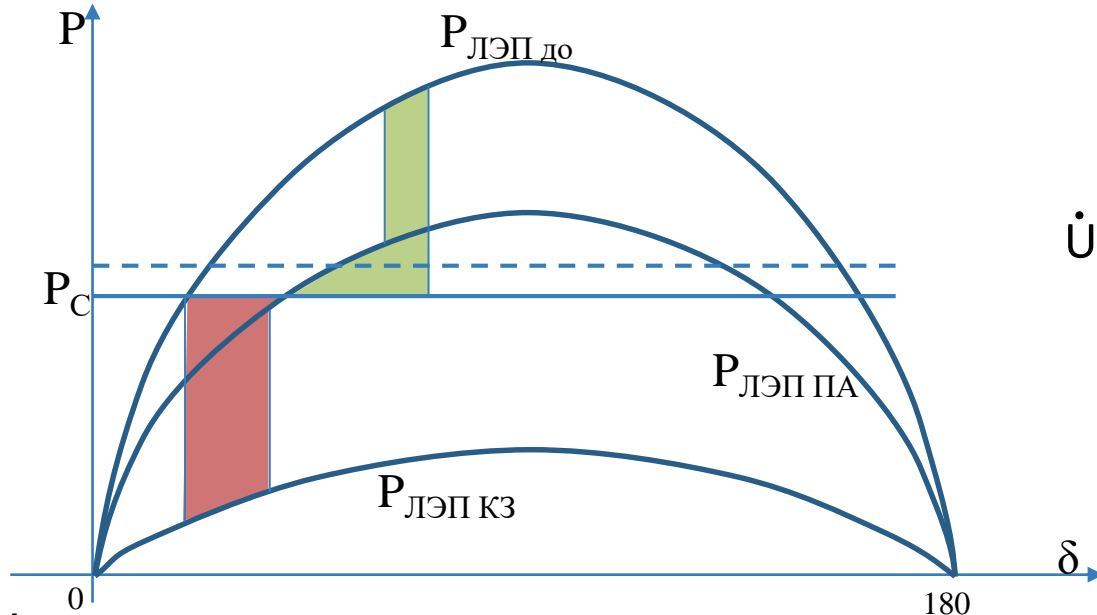
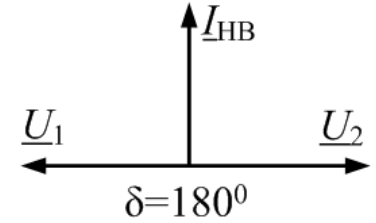
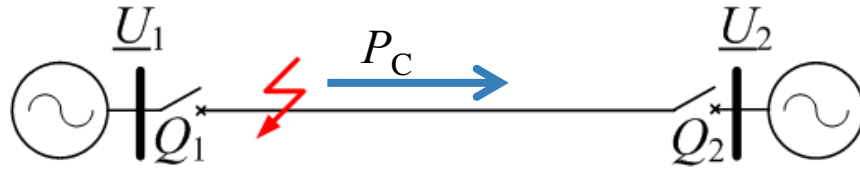
δ увеличивается

$$T_{и2} \frac{df_2}{dt} = P_{Г2} - P_{Н2}$$
$$P_{Г2} < P_{Н2}$$

$$\frac{df_2}{dt} > 0 \Rightarrow f_2 \downarrow$$

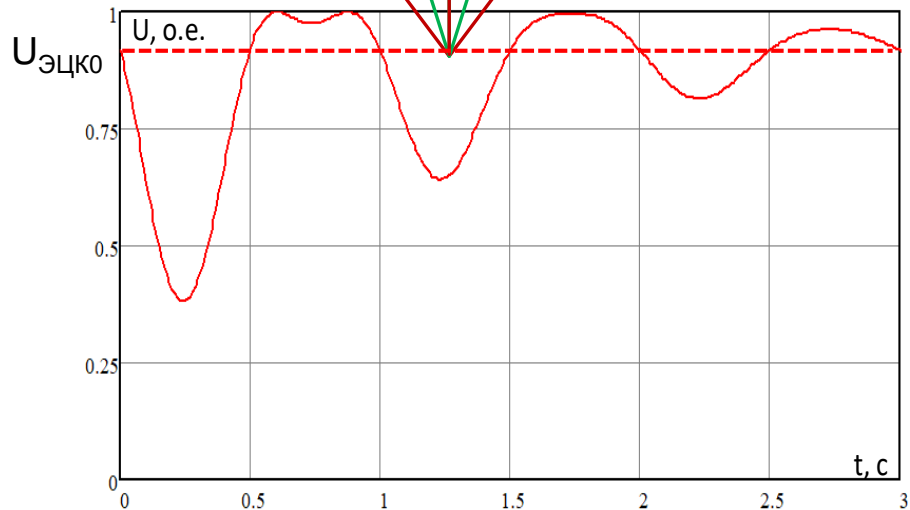
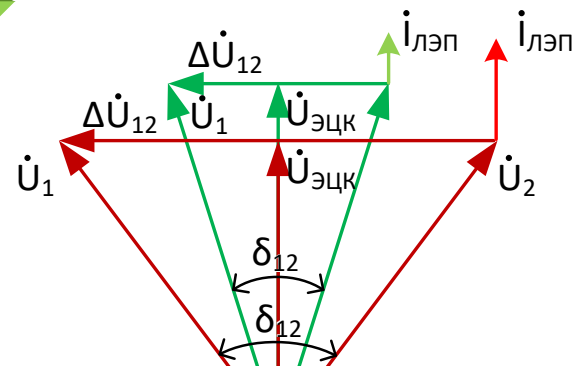
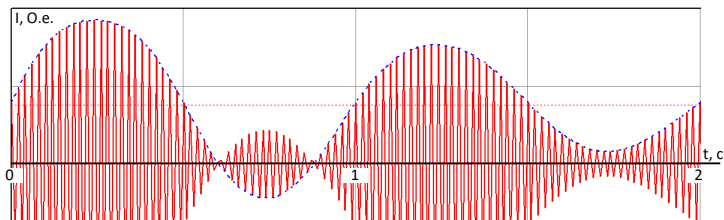
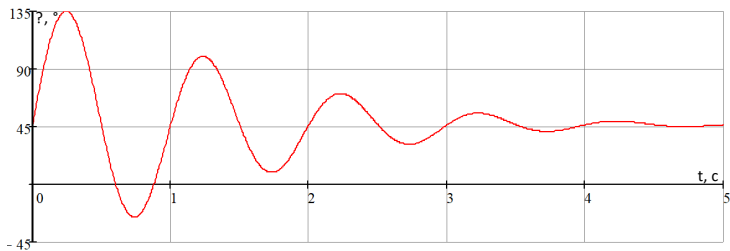
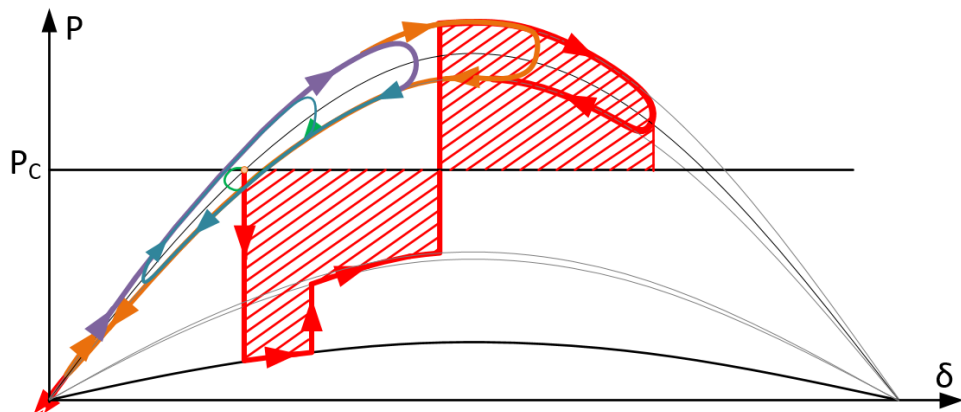
ТАПВ для линий с двухсторонним питанием

δ увеличивается



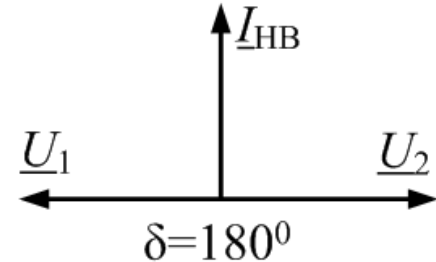
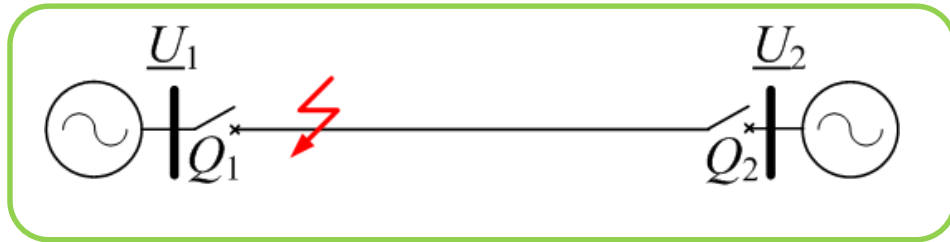
Угловая характеристика электропередачи в различных режимах работы сети и процесс развития аварии

ТАПВ для линий с двухсторонним питанием

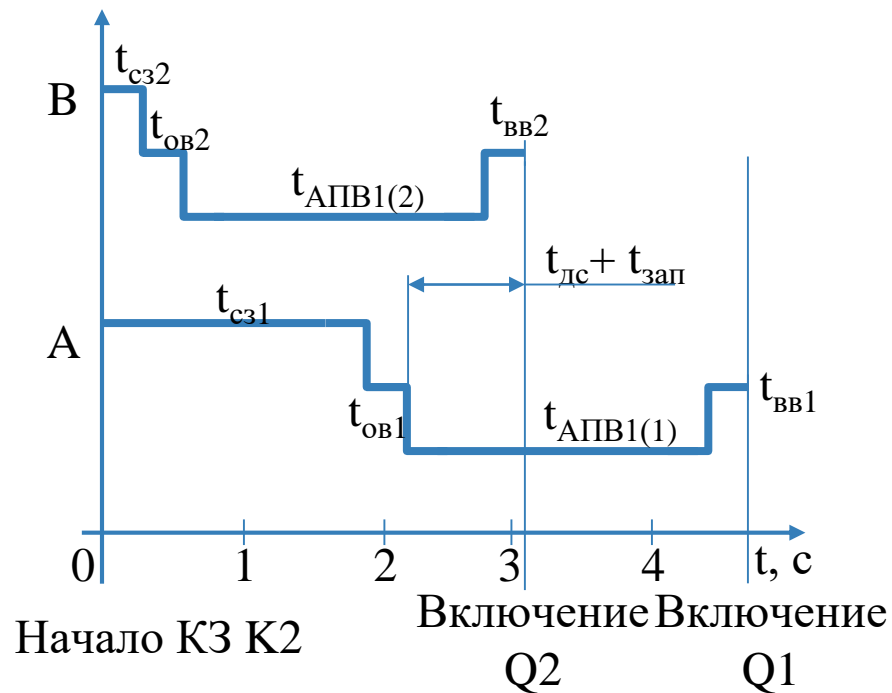
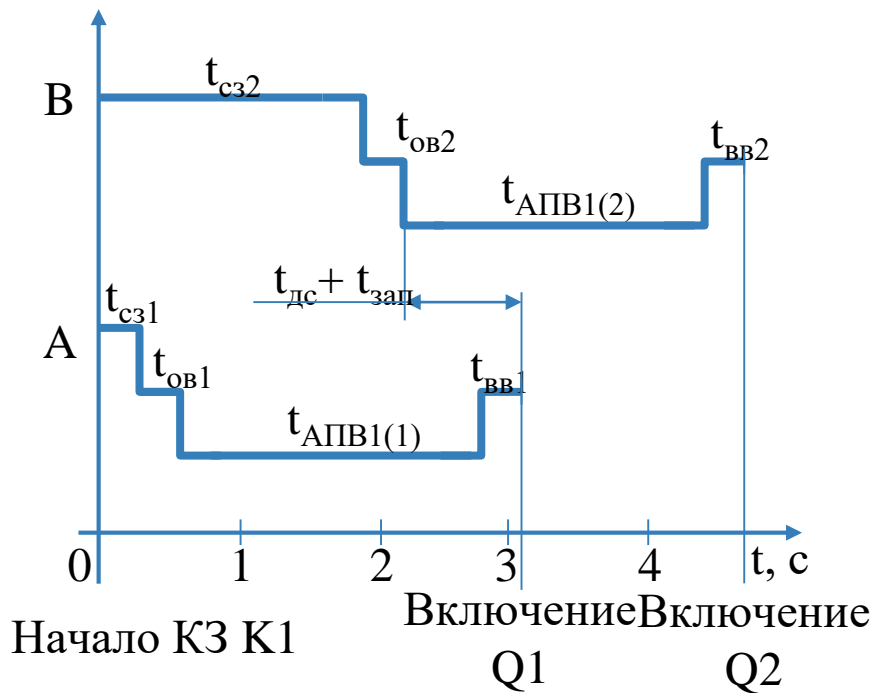
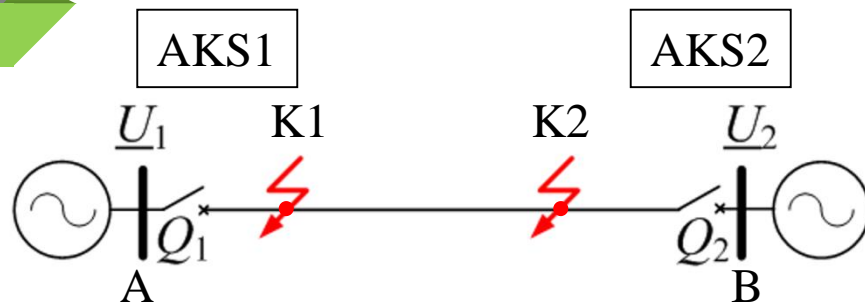


Несинхронное (НАПВ) допускается, если включение на несинхронную работу при любом угле между напряжениями:

- не опасно для оборудования;
- не приводит к неправильной работе РЗ;
- не приводит к длительному асинхронному ходу;
- при наличии трех и более связей между частями ЭС.

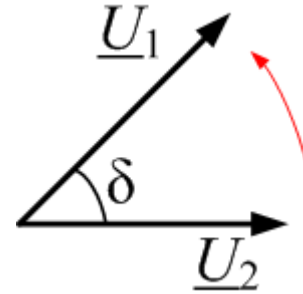
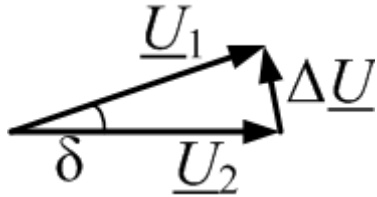


Выбор уставок устройств ТАПВ



- Целесообразно включать поочередно, второе УАПВ срабатывает только при успешном АПВ на противоположном конце линии.
- Контроль успешного АПВ с помощью реле максимального напряжения.
- При неуспешном АПВ и срабатывании РЗ на одном конце линии время действия второго АПВ должно быть больше времени действия защиты для исключения его срабатывания.

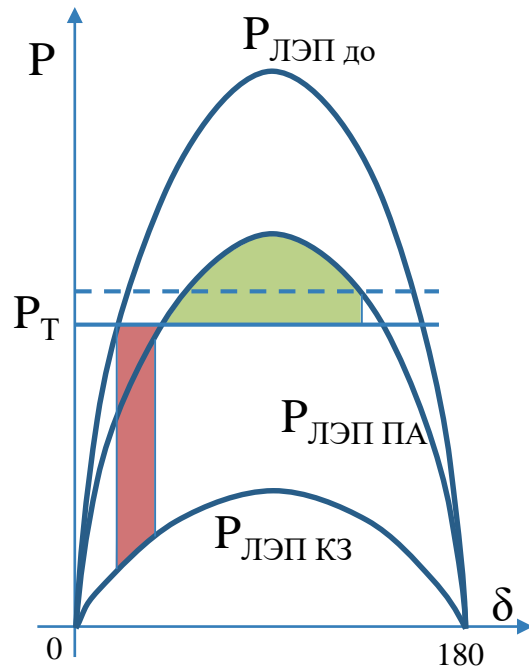
Быстродействующие (БАПВ) – допускается при наличии быстродействующих выключателей и РЗ без выдержки времени с обоих концов (цикл АПВ 0,25–0,5 с).



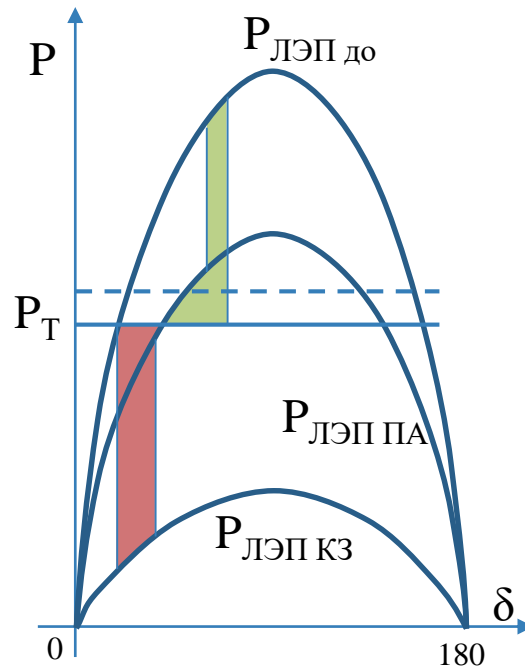
БАПВ способны повышать устойчивость энергосистемы (в том числе динамическую), однако неуспешное АПВ приводит к обратному эффекту.

Влияние АПВ на устойчивость ЭС

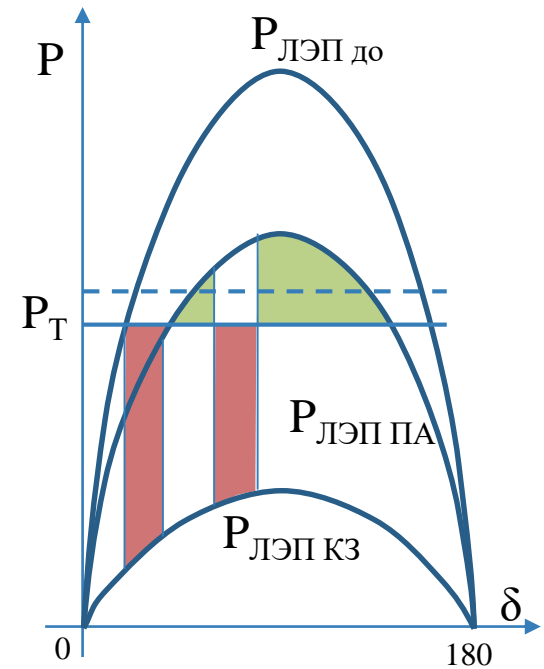
Устойчивость зависит от величины передаваемой мощности в доаварийном режиме, быстродействия РЗ и АПВ, а также успешности АПВ.



На границе устойчивости



Устойчива с запасом



Неустойчива

- с контролем наличия и отсутствия напряжения – КНН, КОН;
- с ожиданием синхронизма (АПВОС) – ожидает, когда Δf (δ) уменьшится до приемлемых значений, включает линию после $t_{\text{АПВ}}$;
- с улавливанием синхронизма (АПВУС) – действует в определенном диапазоне Δf , подает команду на включение (с учетом времени включения выключателя) с опережением момента совпадения фаз напряжений $t_{\text{оп}}$.

За счет учета времени включения выключателя у АПВУС обеспечивается больший диапазон допустимых разностей частот Δf (скольжений), чем у АПВОС.

ТАПВ для линий с двухсторонним питанием

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{заш2}} - t_{\text{заш1}} + t_{\text{ОВ2}} - t_{\text{ОВ1}} + t_{\text{ДС}} - t_{\text{ВВ1}} + t_{\text{зап}}$$

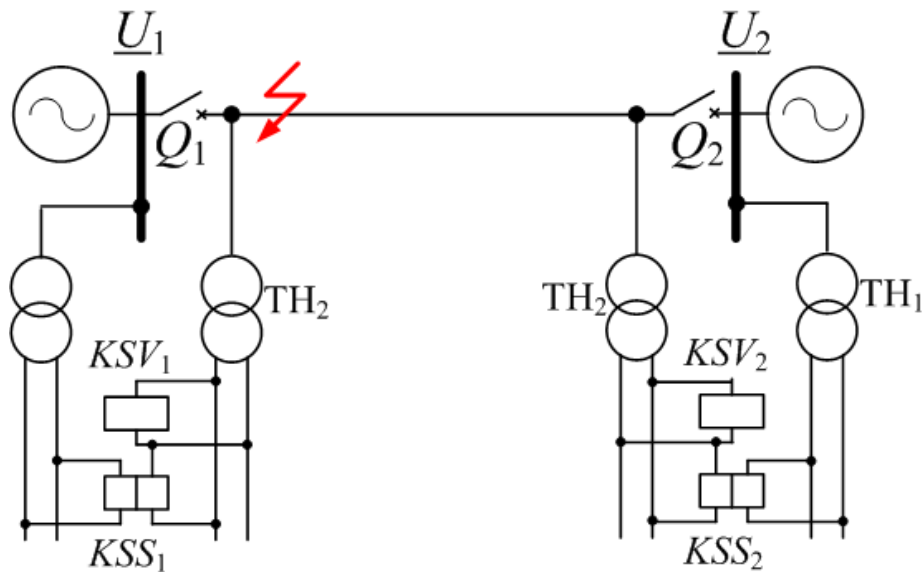
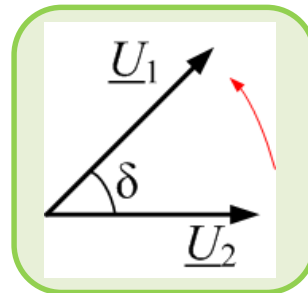
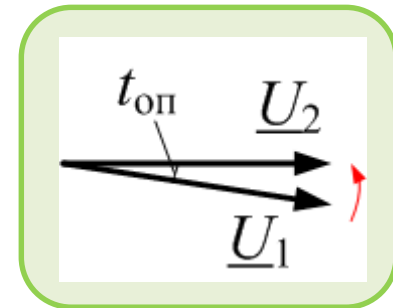


Схема включения реле КНН (KSV) и реле контроля синхронизма (KSS)



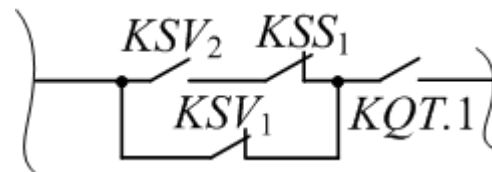
АПВОС



АПВУС

$$t_{\text{оп}} = t_{\text{ВВ}}$$

Фрагмент схемы ТАПВ



Требования к устройству ТАПВ

Стандарт ПАО «ФСК ЕЭС». Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. СТО 29.120.70.241-2017. Дата введения 28.02.2017, стр. 64

Кратность ТАПВ

Выключателей 330 кВ и выше

1

Выключателей 220 кВ и ниже

2

Выдержка времени - первого цикла $t_{АПВ1}$
- второго цикла

0.2-10 с, шаг 0.1с

0.2-100 с, шаг 0.1с

Пуск ТАПВ

-от защит или по цепи несоответствия положения выключателя (**Q отключен**) к положению ключа управления (**SA включен**) (110-500кВ)

+

-только по цепи несоответствия (6-35 кВ)

+

ТАПВ с контролем наличия, отсутствия напряжения (КНН, КОН)

+

ТАПВ с контролем синхронизма (КС), контроль разности частот между напряжениями шин и линии

$\Delta f = 0.05-2$ Гц

$\Delta f < 0.4$ Гц (АПВОС)

$\Delta f > 0.4$ Гц (АПВУС)

Диапазон уставок по углу разности фаз между напряжениями шин и линии, градус

$\delta = 20 - 90^\circ$

Лекция 9

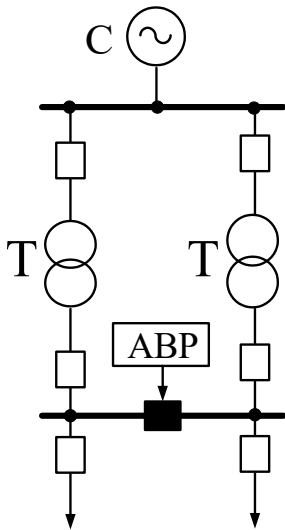
Сетевая автоматика

Автоматическое включение резерва (АВР)

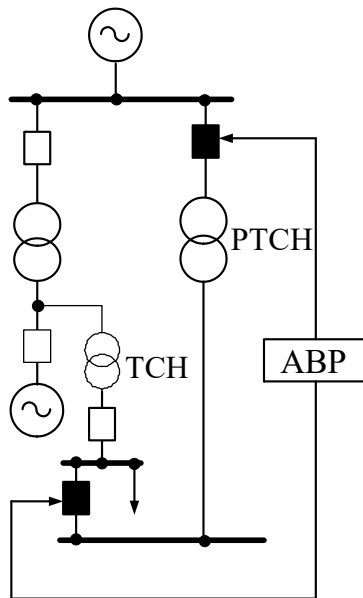
Автоматическое включение резерва

Назначение АВР – восстановление электроснабжения потребителей путем автоматического подключения их к другим источникам питания

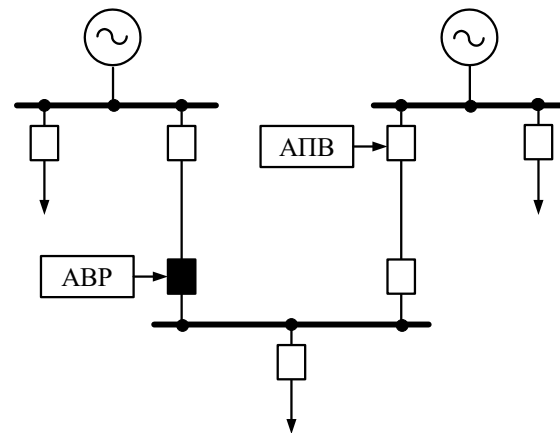
Секционирование РУНН подстанций



Резервирование питания собственных нужд ЭСТ



Радиальные сети



- Срабатывание при понижении напряжения на шинах потребителя ниже напряжения уставки.
- Минимально возможное время срабатывания.
- Однократность действия.
- Ускорение защиты после АВР.
- Исключение возможности опасных несинхронных включений СД.

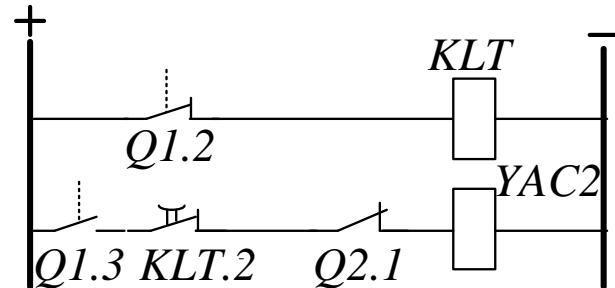
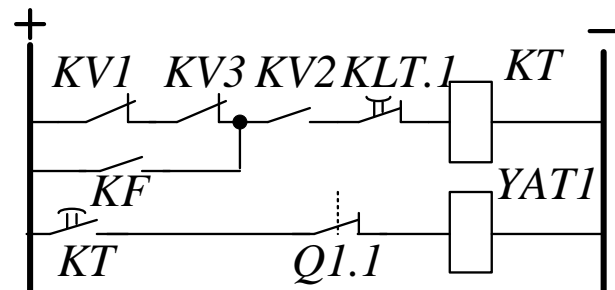
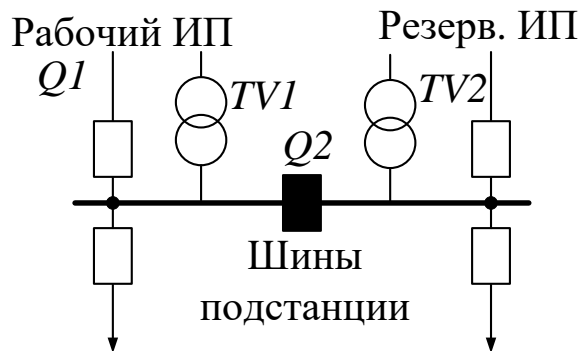
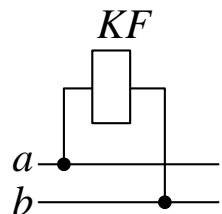
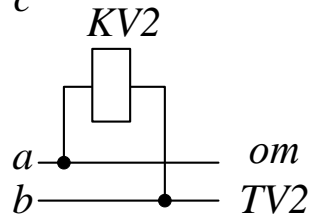
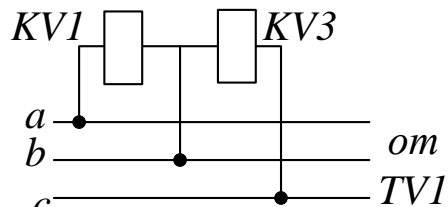
Наиболее распространенные причины ложных действий АВР

- Перегорание предохранителей,
- Неисправности в цепях трансформаторов напряжений.

Способы предотвращения ложных действий АВР

- Использование в пусковом органе **двух минимальных реле напряжений**.
- В пусковой орган дополнительно вводят: **реле минимальной частоты КФ** с уставкой 48-49 Гц, **реле максимального напряжения**, контролирующее наличие напряжения на резервном ИП.

Схема УАВР на постоянном токе



KV1, KV3 – реле минимального напряжения;

KV2 – реле максимального напряжения;

KF – реле минимальной частоты;

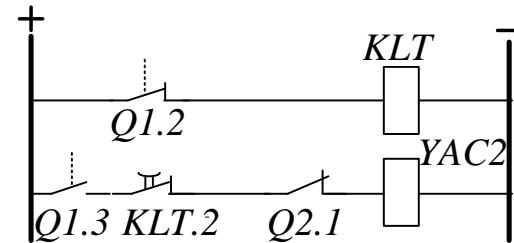
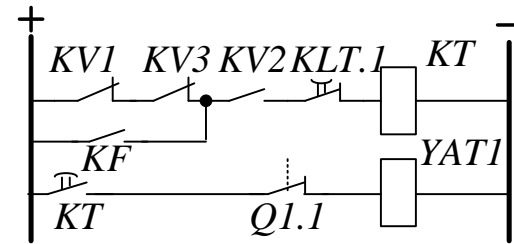
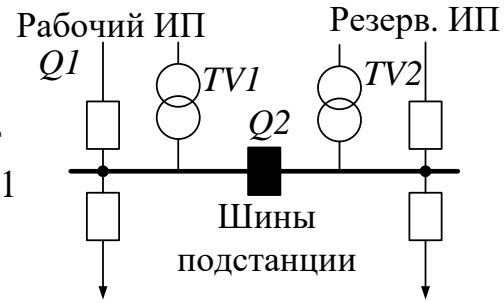
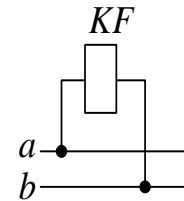
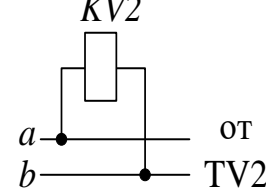
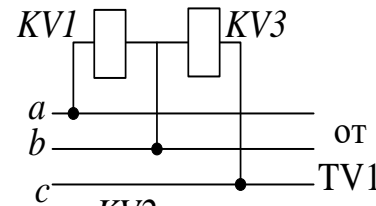
KLT – исполнительное реле, обеспечивающее однократность действия УАВР. Имеет выдержку времени $t_{\text{АВР2}}$;

Q1.1, Q1.2, Q1.3 – вспомогательные контакты Q1;

Q2.1 – вспомогательный контакт Q2.

Работа устройства АВР

- При глубоком снижении U на шинах ПС срабатывают $KV1$, $KV3$, KF .
- Если напряжение на шинах резервного источника питания больше $U_{\text{ср}}$ $KV2$, то контакт $KV2$ остается замкнутым.
- Запускается реле времени KT .
- Через $t_{\text{АВР}}$ замыкается контакт в цепи $YAT1$.
- $Q1$ – отключается, $Q1.1$, $Q1.2$ размыкаются, $Q1.3$ замыкается, $YAC2$ производит включение $Q2$.
- Если включение произошло на поврежденные шины, защита отключит линию с ускорением.
- Повторного включения не произойдет, так как KLT разомкнет контакты $KLT.1$ и $KLT.2$.



Основные условия расчета АВР

Напряжение срабатывания **минимального** реле напряжения $U_{CP} = (0,25 - 0,4)U_{НОМ}$

Частота срабатывания реле частоты $f_{CP} = 48 - 49$ Гц

Напряжение срабатывания **максимального** реле напряжения $U_{CP} = (0,6 - 0,65)U_{НОМ}$

Выбор выдержки времени реле KLT, обеспечивающего однократность АВР

$t_{KLT} = t_{BB} + t_{зап}$ где t_{BB} - время включения выключателя резервного питания.

Замедление по условию 1 может быть недостаточно при необходимости ожидания срабатывания других автоматик (ДЗ, АПВ...).

В этом случае применяют схему АВР с ожиданием (без ограничения времени) снижения напряжения ниже

$$(0,25 - 0,4)U_{НОМ}$$

Время срабатывания УАВР

1. Обеспечение срабатывания АBR₁ после неуспешного АПВ линий 1 и 2.
2. По условию отстройки от времени срабатывания тех защит, в зоне действия которых КЗ могут вызывать снижения напряжения ниже U_{CP} минимальных реле напряжения $U_{CP} = (0,25 - 0,4) U_{ном}$.

$$t_{ABP1} = (t_{C3} + t_{АПВ} + t_{C3})_{Л1(2)} + t_{зап1} =$$

$$= 1 + 2 + 0.04 + 3 = 6 \text{ с}$$

или

$$t_{ABP1} = t_{C3 \text{ Л3(4)}} + \Delta t = 1.5 + 0.6 = 2.1 \text{ с}$$

$$t_{ABP2} = t_{ABP1} + t_{зап2} = 6 + 2.5 = 8.5 \text{ с}$$

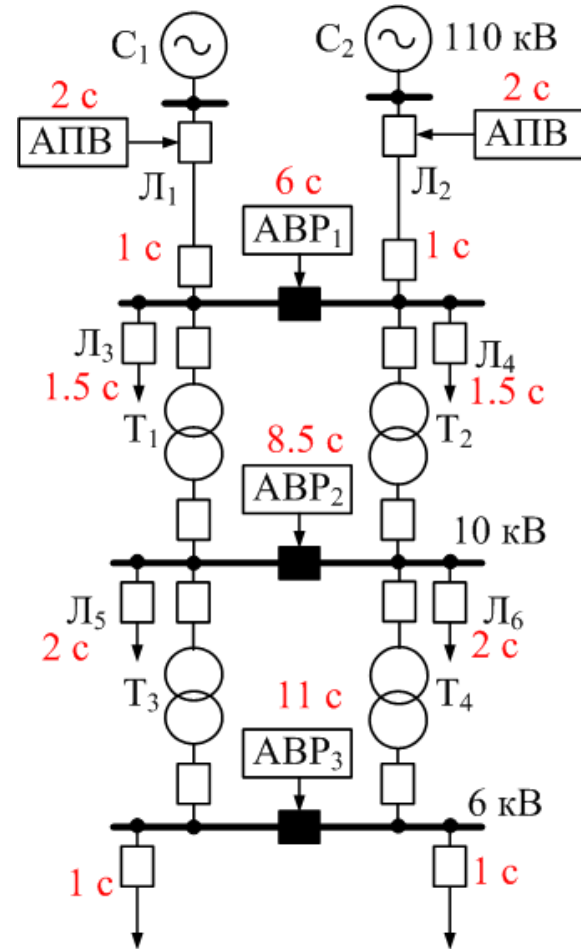
или

$$t_{ABP2} = t_{C3 \text{ Л5(6)}} + \Delta t = 2 + 0.6 = 2.6 \text{ с}$$

$$t_{ABP3} = t_{ABP2} + t_{зап2} = 8.5 + 2.5 = 11 \text{ с}$$

или

$$t_{ABP3} = t_{C3 \text{ Л7(8)}} + \Delta t = 1 + 0.6 = 1.6 \text{ с}$$



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Васильев Алексей Сергеевич
vasilevas@tpu.ru

ТПУ – Томск 2022 г.



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ