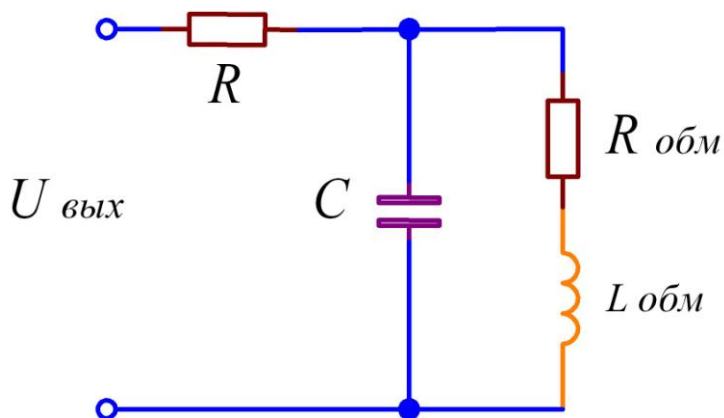


Институт  
Электроэнергетики и  
Информатики

РГПУ



АВР

Тельманова Е.Д.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

АПВ

Электронный учебник

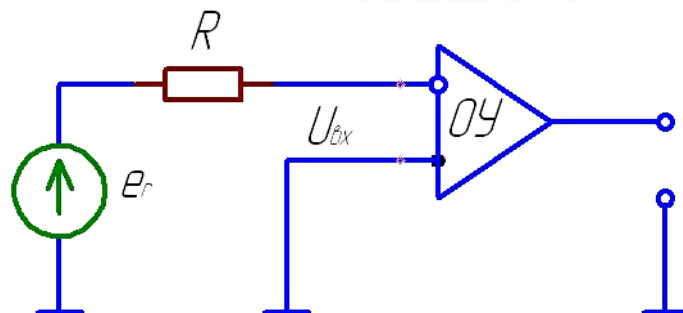
ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
СИНУСОИДАЛЬНЫХ  
ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА  
ТРАНСФОРМАТОРОВ, ДВИГАТЕЛЕЙ  
И ЛИНИЙ

АВТОМАТИКА В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

АЧР



Екатеринбург

2009

ЧАПВ

УДК  
ББК  
Т31

**Тельманова Е.Д.** Автоматизация управления системами электро-снабжения: электрон. учеб. /Е.Д.Тельманова. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2009. с.

ISBN

В электронном учебнике рассматривается релейная защита электрических сетей, оборудования электростанций и подстанций. Представлены основные виды автоматики в системах электроснабжения.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 050501.19 Профессиональное обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии).

Компьютерный дизайн Якимова Д.В.

© ГОУ ВПО «Российский государственный  
профессионально-педагогический  
университет», 2009  
© Тельманова Е.Д. 2009

# ВВЕДЕНИЕ

Повреждения в электрооборудовании энергосистем в большинстве случаев сопровождаются значительным увеличением тока и глубоким понижением напряжения в элементах энергосистемы. В действующих элементах системы электроснабжения различают *анормальные* и *аварийные* режимы. *Анормальные* режимы обычно приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений. При понижении частоты и напряжения создается опасность нарушения нормальной работы потребителей и устойчивости энергосистемы, а повышение напряжения и тока угрожает повреждением оборудования и линий электропередачи. Повреждения нарушают работу энергосистемы и потребителей электроэнергии, и, как правило, приводят к возникновению *аварийных* режимов.

Для обеспечения нормальной работы энергетической системы и потребителей электроэнергии необходимо возможно быстрее выявлять и отделять место повреждения от неповрежденной сети, восстанавливая таким путем нормальные условия работы энергосистемы и потребителей.

Опасные последствия ненормальных режимов также можно предотвратить, если своевременно обнаружить отклонение от нормального режима и принять меры к его устранению (например: снизить ток при его возрастании, повысить напряжение при его снижении и т. д.).

В связи с этим и возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции и защищающих систему и ее элементы от опасных последствий повреждений и ненормальных режимов.

Первоначально в качестве защитных устройств применялись плавкие предохранители. Однако по мере роста мощности, и напряжения электрических установок и усложнения их схем коммутации такой способ защиты стал недостаточным, в силу чего были созданы защитные устройства,

выполняемые при помощи специальных электромагнитных и полупроводниковых аппаратов — реле, получившие название *релейной защиты*.

Релейная защита является основным видом автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение аварийных и аномальных режимов. При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок. При возникновении аномальных режимов защита выявляет их и в зависимости от характера нарушения производит операции, необходимые для восстановления нормального режима, или подает сигнал дежурному персоналу.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с устройствами автоматики, предназначенными для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей.

**К устройствам автоматики, позволяющим автоматически управлять системами электроснабжения относится автоматическое повторное включение АПВ, автоматическое включение резерва АВР, автоматическая частотная разгрузка АЧР, автоматическая разгрузка по току АРТ, частотное автоматическое повторное включение ЧАПВ и пр.**

Рассмотрим наиболее характерные ненормальные режимы. Перегрузка оборудования, вызванная увеличением тока сверх номинального значения, наиболее часто встречаемый аномальный режим. Номинальным называется максимальный ток, допускаемый для данного оборудования в течение неограниченного времени. Если ток, проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемого им дополнительного тепла температура токоведущих частей и изоляции через

некоторое время превосходит допустимую величину, что приводит к быстрому износу изоляции и ее повреждению. Время, допустимое для прохождения повышенных токов, зависит от их величины. Характер этой зависимости определяется конструкцией оборудования и типом изоляционных материалов. Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке необходимо принять меры к разгрузке или отключению оборудования.

Другим часто встречающимся аномальным режимом является снижение частоты, вызываемое недостатком генераторной мощности, обычно возникает при внезапном отключении части работающих генераторов. При снижении частоты понижается производительность механизмов и нарушается технологический процесс тех агрегатов, для которых имеет значение постоянство скорости вращения электродвигателей.

Глубокое снижение частоты (ниже 47—45 Гц) ведет к тяжелым авариям с прекращением работы всей энергетической системы. Для предотвращения такой аварии необходимо восстановить баланс генерируемой и потребляемой мощностей путем быстрого (автоматического) включения резервных генераторов, или путем автоматического отключения части потребителей.

Повышение напряжения сверх допустимого значения возникает обычно на гидрогенераторах при внезапном отключении их нагрузки. Разгрузившийся гидрогенератор увеличивает скорость вращения, что вызывает возрастание ЭДС статора до опасных для его изоляции значений. Защита в таких случаях должна снизить ток возбуждения генератора или отключить его.

Опасное для изоляции оборудования повышение напряжения может возникнуть также при одностороннем отключении или включении длинных линий электропередачи с большой емкостной проводимостью.

Кроме отмеченных аномальных режимов, имеются и другие, ликвидация которых возможна при помощи релейной защите и средств автоматики.

**К релейной защите предъявляют следующие требования:**

- **Быстродействие.** Время срабатывания современных устройств составляет 0,02-0,1 с. Время отключения вычисляется по формуле:

$$t_{\text{откл}} = t_{\text{в}} + t_{\text{з}}; \quad (1)$$

где  $t_{\text{в}}$  – время срабатывания системы,  $t_{\text{з}}$  – время работы защиты.

- **Селективность.** Обеспечивает отключение поврежденного участка линии или элемента системы, что в свою очередь способствует надежной работе системы электроснабжения.

- **Чувствительность** – это способность релейной защиты реагировать на минимальные короткие замыкания, что особо важно для протяженных электрических сетей, где токи короткого замыкания в конце защищаемого участка соизмеримы с рабочими токами. Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности  $k_{\text{ч}}$ :

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{min.к.з.}}}{I_{\text{ср.р.з.}}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{min.к.з.}}$  – минимальное значение тока короткого замыкания,  $I_{\text{ср.р.з.}}$  – ток срабатывания релейной защиты.

Коэффициент чувствительности для дифференциальной защиты должен быть не менее 1,5.

- **Надежность** – это надежная работа релейной защиты в пределах защищаемой зоны без ложных срабатываний.

- **Минимальная стоимость.** Наиболее дорогостоящей является быстродействующая защита.

В схемах релейной защиты и электрической автоматики применяются электромеханические реле, реле на полупроводниковых приборах (диодах,

транзисторах, операционных усилителях) и реле с использованием насыщающихся магнитных систем. Существенными недостатками электромеханических реле являются их большие размеры, значительное потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения, трудности в обеспечении надежной работы контактов. Поэтому в настоящее время широкое распространение получили реле, выполненные на базе твердотельных микросхем, что позволило существенно улучшить параметры и характеристики реле и перейти на полностью бесконтактные схемы защит.

Помимо реле, реагирующих на электрические величины, для защиты электрических машин и аппаратов применяются реле, реагирующие на неэлектрические величины, косвенным образом характеризующие появления повреждений или ненормальных режимов в них. Например, имеются реле, реагирующие на появления газов или повышение давления в кожухах маслонаполненных трансформаторов и реакторов; реле, реагирующие на повышение температуры трансформаторов и электрических машин и т. д.

**Реле, реагирующие на электрические величины, можно подразделить на три группы:**

- реле, реагирующие на одну электрическую величину: ток, напряжение;
- реле, реагирующие на две электрические величины: ток и напряжение сети или два напряжения  $U$  и  $I$ , каждое из которых является линейной функцией тока и напряжения сети;
- реле, реагирующие на три или больше электрических величины, например: три тока и три напряжения сети, или несколько напряжений, представляющих линейные функции токов и напряжения сети.

*К первой группе* относятся **реле тока и реле напряжения**. *Ко второй* принадлежат **однофазные реле: мощности, сопротивления** и некоторые

другие. *К третьей* относятся *трехфазные реле мощности, многофазные реле сопротивления* и другие устройства.

### **Реле классифицируются по различным принципам.**

По способу включения катушки реле в защищаемую линию различают:

- *первичные реле*, которые подключаются непосредственно в силовую цепь;
- *вторичные реле*, которые включаются в защищаемую цепь через трансформатор тока или напряжения.

По способу воздействия на выключатели различают:

- *реле прямого действия*, которое своими контактами воздействует на выключатель. Применяется в установках до 1000В;
- *реле косвенного действия*, которое замыкает своими контактами цепь электромагнита отключения.

### **По назначению все реле можно разделить на следующие группы:**

- *Основные реле*. Эти реле осуществляют контроль за параметрами электрической цепи или электроустановки. К ним относятся: реле тока, реле напряжения, реле мощности, реле частоты, реле давления и т.п.
- *Вспомогательные реле*. Управляются основными реле, к ним относятся реле времени, промежуточное реле.
- *Сигнальные реле*. К этой категории относится указательное реле.



## Обозначение реле в схемах

№	Тип реле	Обозначение
1	Реле тока	<i>KA</i>
2	Реле напряжения	<i>KV</i>
3	Реле мощности	<i>KW</i>
4	Тепловые реле	<i>KK</i>
5	Реле времени	<i>KT</i>
6	Промежуточные реле	<i>KL</i>
7	Указательные реле	<i>KN</i>

**По состоянию реле, определяемому воздействием входной величины и воздействием на управляемый элемент, различают:**

- **одностабильные** – реле, которые самовозвращаются в исходное состояние после срабатывания;
- **двухстабильные** – реле, не осуществляющие самовозврата;
- **поляризованные** – реле постоянного тока, которые изменяют свое состояние с изменением полярности на входе реле.

# 1. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

## 1.1 Устройство и принцип действия реле максимального тока РТ-40, РТ-80

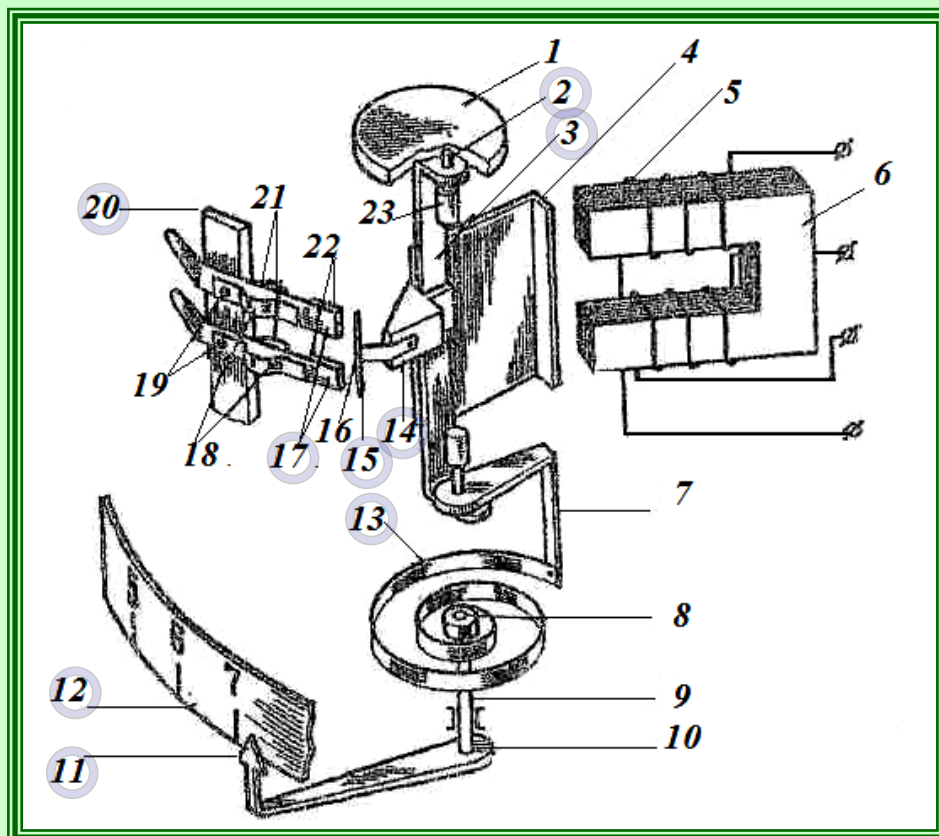
Реле максимального тока можно разделить на виды:

- реле косвенного действия типа РТ-40;
- индукционное реле косвенного действия типа РТ-80, РТ-90.

Реле тока **РТ-40** (рис. 1) состоит из шихтованного П-образного сердечника, на котором расположено две катушки, соединяющиеся параллельно или последовательно. При этом соотношение токов имеет вид:

$$I_{\text{ном. парал.}} = 2I_{\text{ном. послед}}$$

Поворотный якорь 3 устанавливается в цапфах 2, на нем расположена пластмассовая колодка 14 с подвижным контактным мостиком 15. Конец якоря соединен с пружиной, которая с другого конца соединена с указателем срабатывания реле 11. Перемещая указатель вдоль шкалы 12, воздействующий на пружину 13, которая создает противодействующий момент движению поворотного якоря. Тем самым ток срабатывания реле изменяется. Неподвижные контакты 17 в свою очередь крепятся на пластмассовой колодке 20.



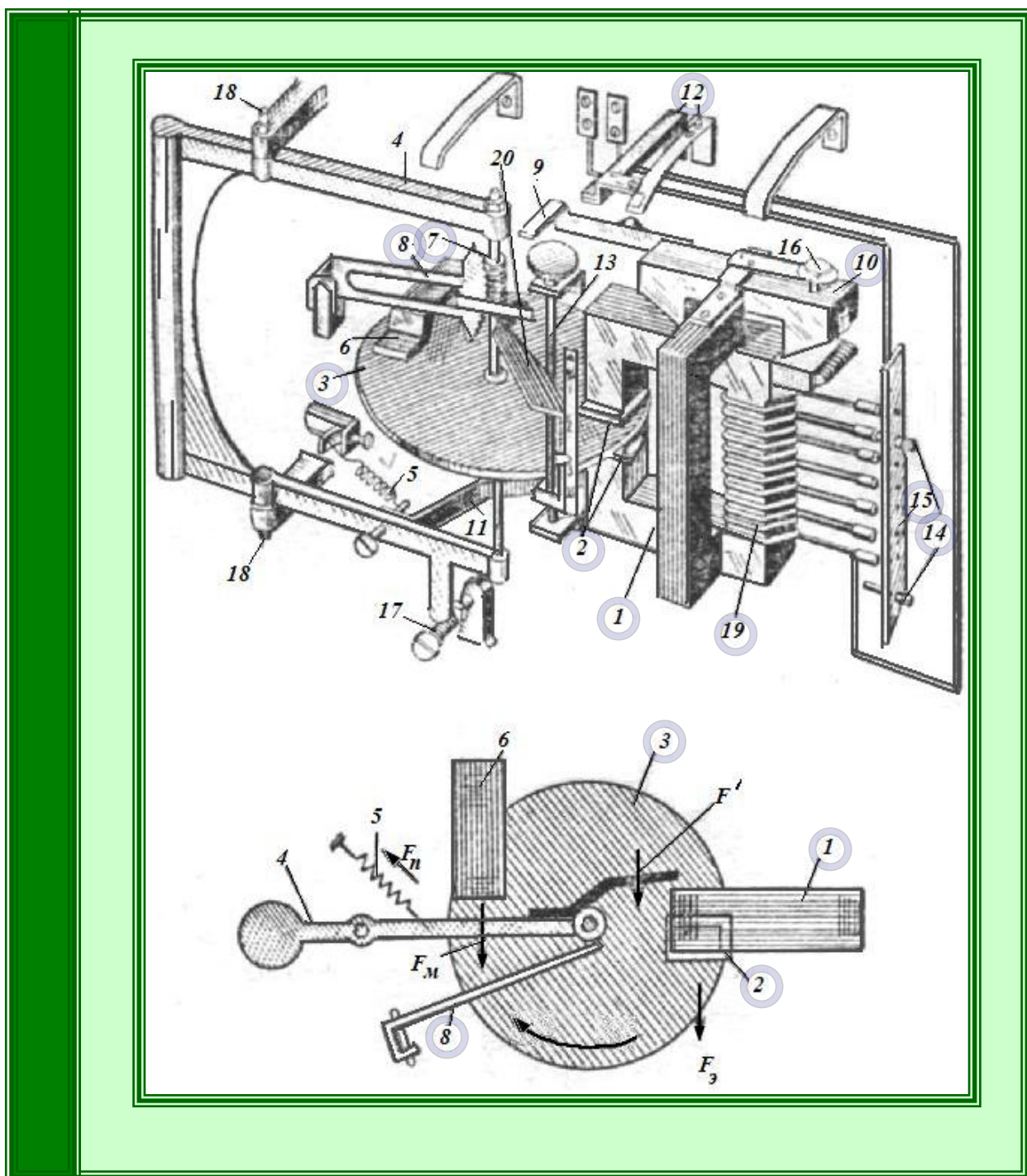
**Рис. 1. Устройство реле тока РТ-40**

Реле типа **РТ-80** (рис. 2) является индукционным и сочетает в себе две защиты:

- *токовую отсечку мгновенного действия, чувствительную к току короткого замыкания;*
- *токовую защиту с выдержкой времени, представляющую собой индукционный элемент, срабатывающий с выдержкой времени и чувствительный к токам перегрузки и токам, превышающим максимальные значения.*

Индукционная часть реле представляет собой разомкнутый магнитопровод 1, на котором расположена обмотка 19 с выводами и отпайками. Изменяя число витков обмотки путем перемещения винта 14 по шкале уставок 15, изменяем токовую уставку реле.

В разрыве магнитопровода 2 располагается алюминиевый диск 3. При вращении диска происходит перемещение зубчатого сектора 8 по червяку 7, который воздействует на замыкание контактов 12. Токовая отсечка выполнена в виде того же магнитопровода и якоря в виде ярма 10.



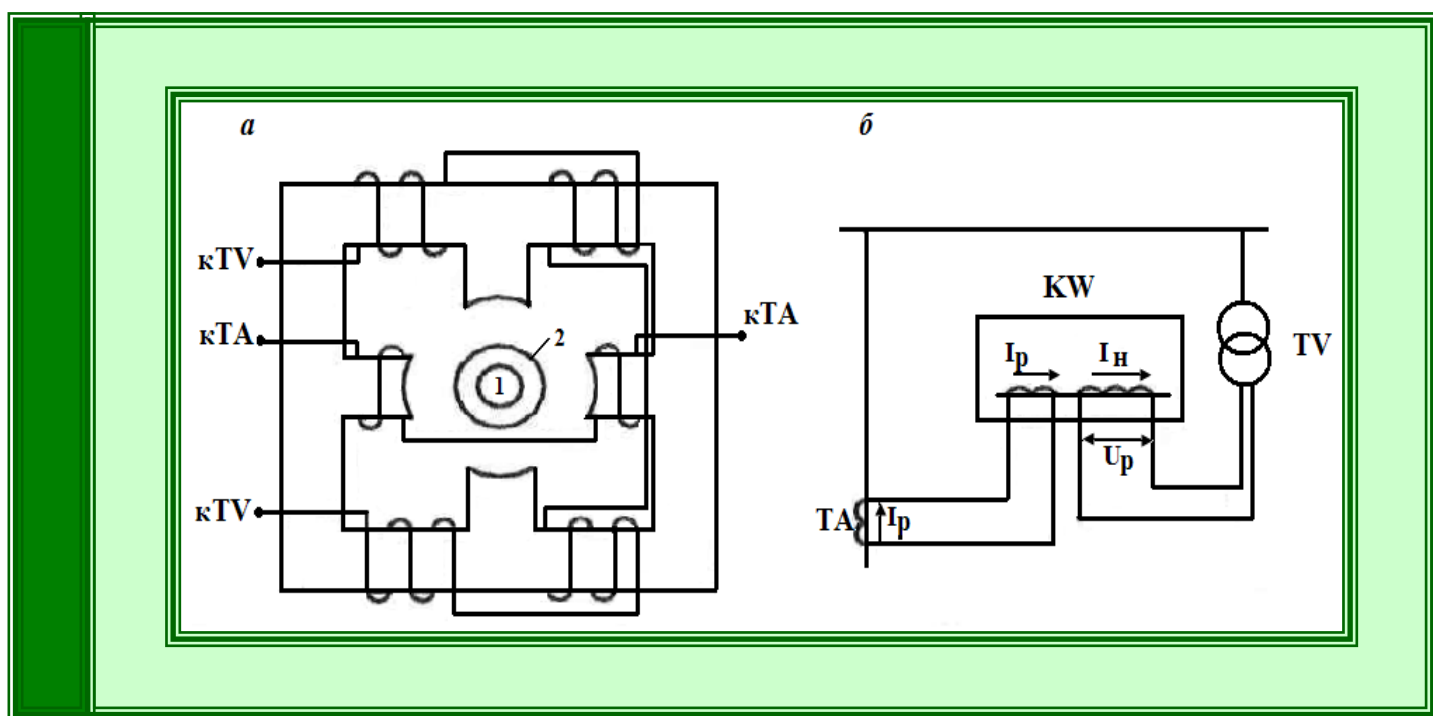
**Рис. 2. Устройство реле тока РТ – 80**

## 1.2 Устройство и принцип действия реле индукционного типа РБМ – 170, РНТ – 565

Реле мощности типа **РБМ – 170** имеет две обмотки: токовую и напряжения. Расположены они на магнитопроводе реле. Токовая обмотка разбита на две катушки, которые располагаются на противоположных полюсах. Обмотка напряжения разбита на четыре катушки, которые расположены на магнитопроводе (рис. 3, а). Токовая обмотка подключается через трансформатор тока в защищаемую линию, обмотка напряжения – через трансформатор напряжения к шинам подстанции (рис. 3, б).

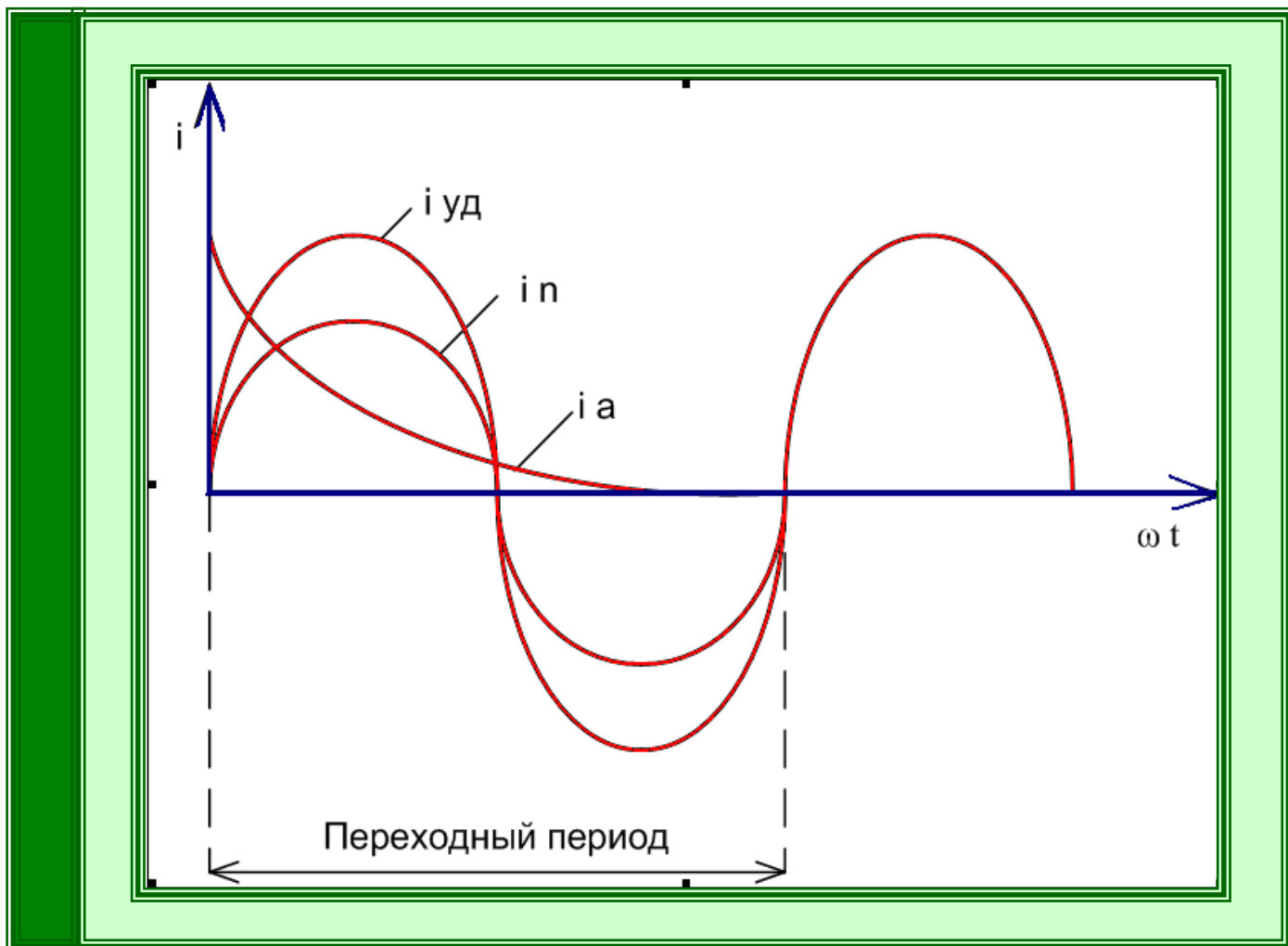
Контактный мостик расположен на оси, которая крепится на основании в центре магнитопровода. На этой же оси крепится стальной сердечник (ротор), поверх которого находится алюминиевый стаканчик.

При направлении мощности короткого замыкания от шин в линию, контактный мостик реле поворачивается в сторону замыкания с неподвижными контактами.



**Рис. 3. Реле мощности РБМ – 170:  
а – устройство реле; б – схема подключения**

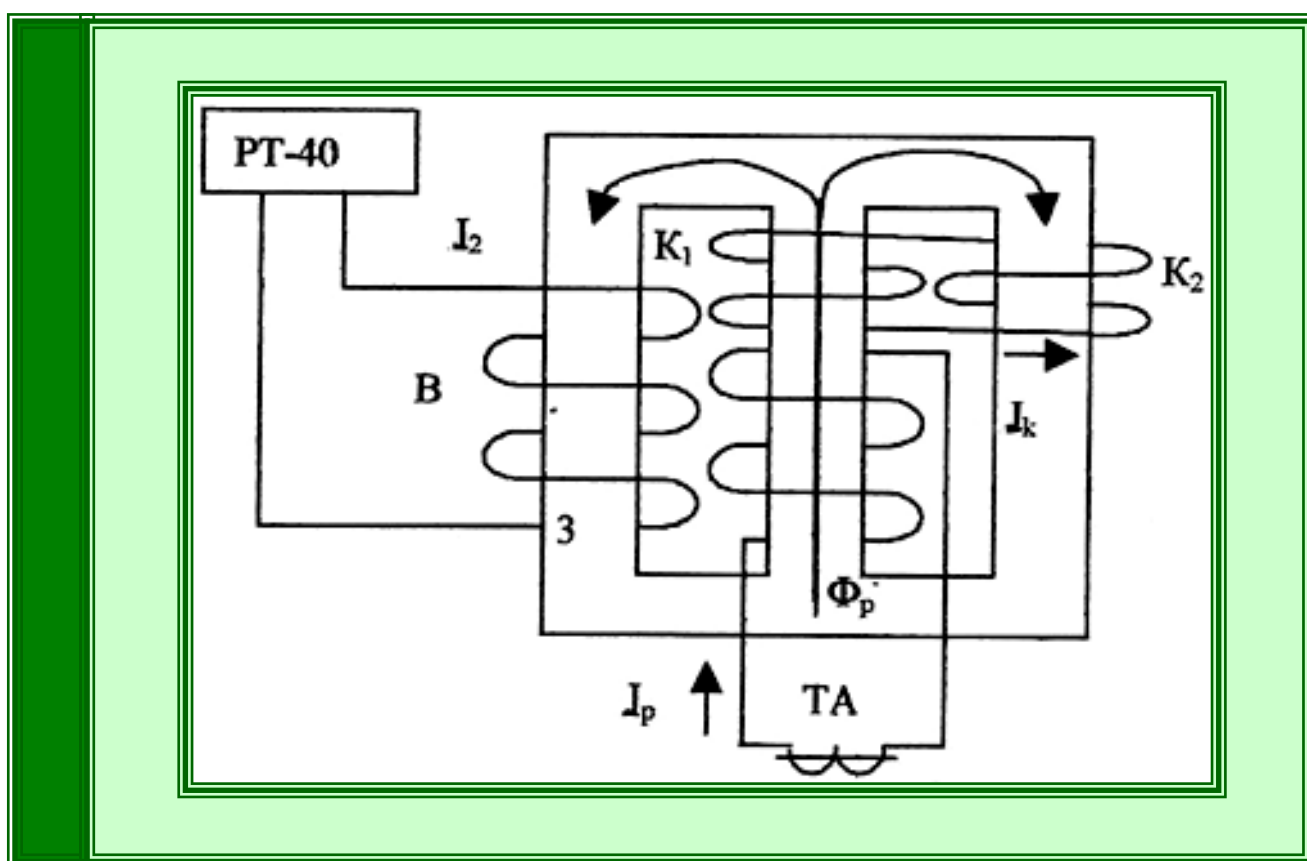
Дифференциальное реле типа **РНТ – 565** применяется для защиты силовых трансформаторов, так как оно позволяет отстроить релейную защиту от бросков намагничивающего тока при включении трансформаторов на холостом ходу и от апериодической составляющей тока короткого замыкания (рис. 4).



**Рис. 4. График переходного процесса в режиме короткого замыкания**

Реле состоит из быстронасыщающегося трансформатора тока **БНТ** и реле тока **РТ-40**, которые находятся в одном корпусе (рис. 5). БНТ имеет три стержня, на среднем располагается рабочая обмотка, которая через трансформатор тока включается в силовую цепь, на среднем и правом стержне располагается короткозамкнутая обмотка. К выводам вторичной обмотки подключается катушка реле РТ-40. При протекании по рабочей

обмотке симметричных токов (апериодическая составляющая тока короткого замыкания или намагничивающий ток) на выводах выходной обмотки индуцируется небольшая ЭДС, так как произошло быстрое насыщение сердечника трансформатора. В результате реле тока не срабатывает. При протекании симметричного тока по рабочей обмотке (периодическая составляющая тока короткого замыкания) в среднем стержне образуется магнитный поток, который пересекает витки короткозамкнутой обмотки, в результате в правом стержне образуется еще один поток. Потoki складываются в левом стержне и на клеммах выходной обмотки индуцируется ЭДС достаточная для срабатывания реле.



**Рис. 5. Устройство реле типа РНТ**

Дополнительно для улучшения отстройки реле по току на стержнях трансформатора располагают одну или несколько уравнивающих обмоток, переключая витки которых выполняют подстройку реле.

### ***1.3. Основные конструкции реле времени, промежуточных реле, сигнальных реле, газового реле, промежуточного реле на герконах***

Реле времени служит для создания выдержки времени в схемах релейной защиты, что позволяет выполнить защиту селективно, а также отстроить ее от кратковременных бросков тока.

Электромагнитные реле времени бывают двух видов:

- *с часовым механизмом;*
- *на микродвигателях (двигатель постоянного тока или синхронный двигатель).*

В основе реле с часовым механизмом лежит магнитопровод с катушкой и якорь. При подаче тока на катушку освобождается подвижный механизм, и контакты реле начинают движение по действию пружины по диаметру шкалы уставок до замыкания с неподвижными контактами, которые располагаются на пластмассовых колодках.

**Реле времени серии РВ 100, РВ 200** (рис. 6) применяется в схемах защиты и автоматики для получения регулируемой выдержки времени. Приведем краткую характеристику контактной системы реле.

**Реле типов РВ 114, РВ 124, РВ 134, РВ 144, РВ 217, РВ 227, РВ 237, РВ 247**, действующих при подаче напряжения, имеют один конечный замыкающий контакт с регулируемой выдержкой времени и один мгновенный переключающий. **Реле типов РВ 113, РВ 127, РВ 133, РВ 143**, действующих при подаче напряжения, — один конечный замыкающий с регулируемой выдержкой времени и один мгновенный переключающий контакты. **Реле типов РВ 112, РВ 128, РВ 132, РВ 142, РВ 218, РВ 228, РВ 238, РВ 248**, действующих при подаче напряжений, — один скользящий и один конечный замыкающий контакты с регулируемой выдержкой времени, а также один мгновенный переключающий. **Реле типов РВ 215, РВ 225, РВ 235, РВ 245**, действующих при исчезновении напряжения, — один



скользящий и один конечный (размыкающийся при подаче и замыкающийся при снятии напряжения) замыкающие контакты с регулируемой выдержкой времени, а также один мгновенный переключающийся контакт. Реле типов **PB 215K, PB 225K, PB 235K, PB 245K**, действующих при исчезновении напряжения, — один скользящий и один конечный (размыкающийся при подаче и замыкающийся при снятии напряжения) замыкающие контакты с регулируемой выдержкой времени.



**Рис. 6. Реле времени серии PB 100, PB 200**

При применении реле типа **PB 215K — 254K** в комплекте с ВУ 200 мгновенный размыкающий контакт используется для дешунтирования резистора, установленного в приставке типа ВУ 200 и необходимого для обеспечения термической устойчивости реле. Контакты реле (кроме скользящего) способны коммутировать цепь постоянного тока мощностью 100 Вт при токе не более 1 А при напряжении от 24 до 250 В; цепь переменного тока мощностью 400 ВА (коэффициент нагрузки не менее 0,4)

или 500 ВА (коэффициент нагрузки не менее 0,5) при токе не более 5 А или напряжении от 24 до 250 В.

Скользящие контакты замыкают цепь с указанной выше мощностью. Разрыв тока в цепях скользящих контактов должен осуществляться контактами других реле. Длительно допустимый ток через замкнутые контакты: 5 А — для замыкающих с выдержкой времени контактов, 3 А — для мгновенных.

**Реле промежуточное** (рис. 7) служит для размножения контактов в схемах релейной защиты, а также для коммутации цепей большой мощности, например, цепей питания электромагнитов отключения *УАТ*, которые воздействуют на отключение высоковольтных выключателей.

В основе реле – магнитопровод с катушкой и несколько контактных групп расположенных на подвижном якоре реле.



**Рис. 7. Реле промежуточное типа РП –25**

**Реле указательное** (рис. 8) предназначено для сигнализации о наступлении аварийного или ненормального режима или о произошедших переключениях в схемах.

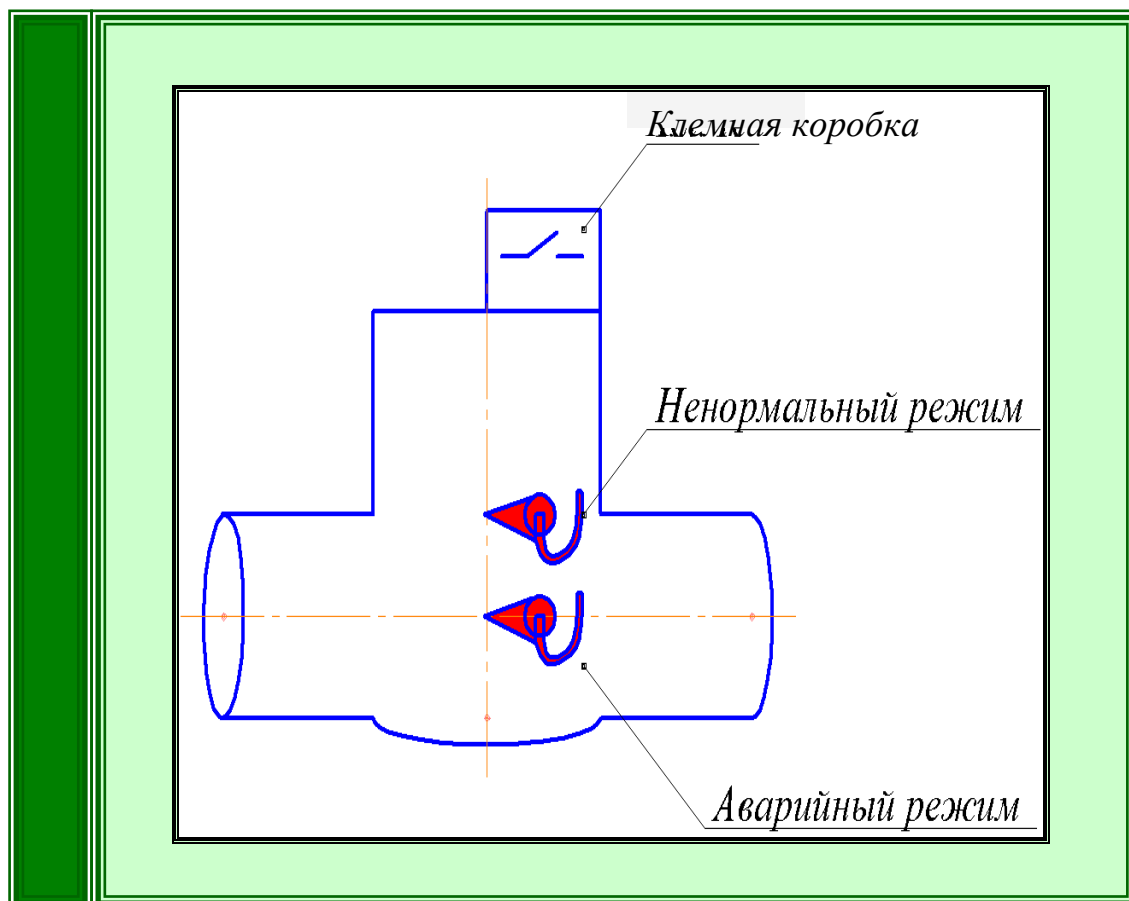


**Рис. 8. Указательное реле серии РУ -21**

Основным элементом реле является электромагнит с якорем. При подаче тока на катушку электромагнита либо освобождается барабанчик с выпадением блинкера (замена черного сектора на белый), либо срабатывает сигнальный флажок красного цвета. Реле могут иметь или не иметь выходные контакты.

**Газовое реле** представляет собой чугунный резервуар, который устанавливается в трубопроводе, соединяющим бак маслонаполненного трансформатора с расширителем (рис. 9). Внутри реле располагаются два поплавка, к которым прикреплены стеклянные колбы. В колбу впаяны два контакта. Замыкание контактов осуществляется капелькой ртути. В исходном положении реле заполнено маслом. При незначительном повреждении

внутри трансформатора (витковые замыкания) происходит разложение масла. Пары масла и газ накапливаются в верхней части реле, вытесняя масло. При этом верхний поплавок опрокидывается, контакты замыкаются ртутью, поступает сигнал о наступлении ненормального режима.



**Рис. 9. Газовое реле**

При коротком замыкании внутри бака трансформатора загорается электрическая дуга, под действием которой происходит бурный процесс разложения масла. Под большим давлением смесь масла, пара и газа устремляется в расширитель через газовое реле. Опрокидывается нижний поплавок реле, и подается сигнал для отключения трансформатора.

Газовая защита обязательно применяется для трансформаторов мощностью 6,3 МВА и более, а также для трансформаторов мощностью 1-4 МВА, не имеющих дифференциальной токовой защиты или токовой отсечки.

Применение газовой защиты обязательно для цеховых трансформаторов мощностью 630 кВА и более.

Рассмотрим устройство **промежуточного реле на герконах** (герметичных контактах).

Реле предназначено для работы в агрессивной окружающей среде (рис. 10) и представляет собой катушку, внутри которой располагается стеклянная колба, с впаянными в нее двумя электродами. Колба чаще всего заполнена инертным газом или вакуумирована. Электроды выполнены из магнитного материала, поэтому одновременно являются и контактами и магнитопроводом.

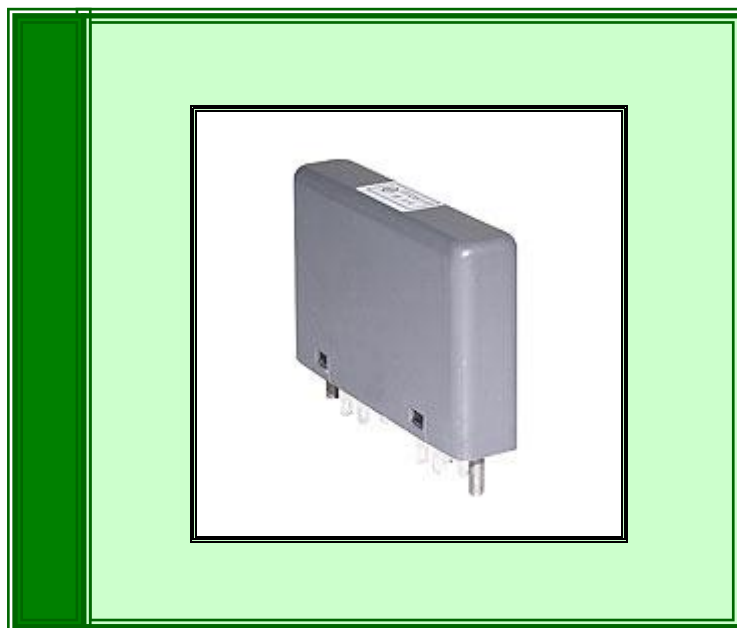
Электроды контактируют в двух местах. Основной контакт покрывается благородным металлом (золото, палладий, радий), а другой контакт является дугогасительным и располагается на конце одного из электродов.

#### **Положительные стороны герконов:**

- большой ресурс срабатывания  $10^7$ - $10^9$ ;
- частота включения до 100 Гц;
- высокая надежность, т.е. срабатывание при нескольких единицах мкА или мВ.
- возможность использования во взрывоопасных средах;
- работа в любом пространственном положении;
- широкий диапазон температуры: от  $-160\text{ C}^\circ$  до  $+125\text{ C}^\circ$ .

#### **Отрицательные стороны герконы:**

- маломощные контакты - 60 Вт;
- малоамперные - до 4 А;
- напряжение до 280 В.



**Рис. 10. Промежуточное реле на герконах**

#### ***1.4. Устройство и принцип действия статических и полупроводниковых реле***

Статические реле представляют собой усилители, обладающие столь высоким коэффициентом усиления, что на выходе при достижении управляющим сигналом порогового значения происходит скачкообразное усиление сигнала.

Различают два вида статического реле:

- *реле с выходным контактом;*
- *реле без выходного контакта.*

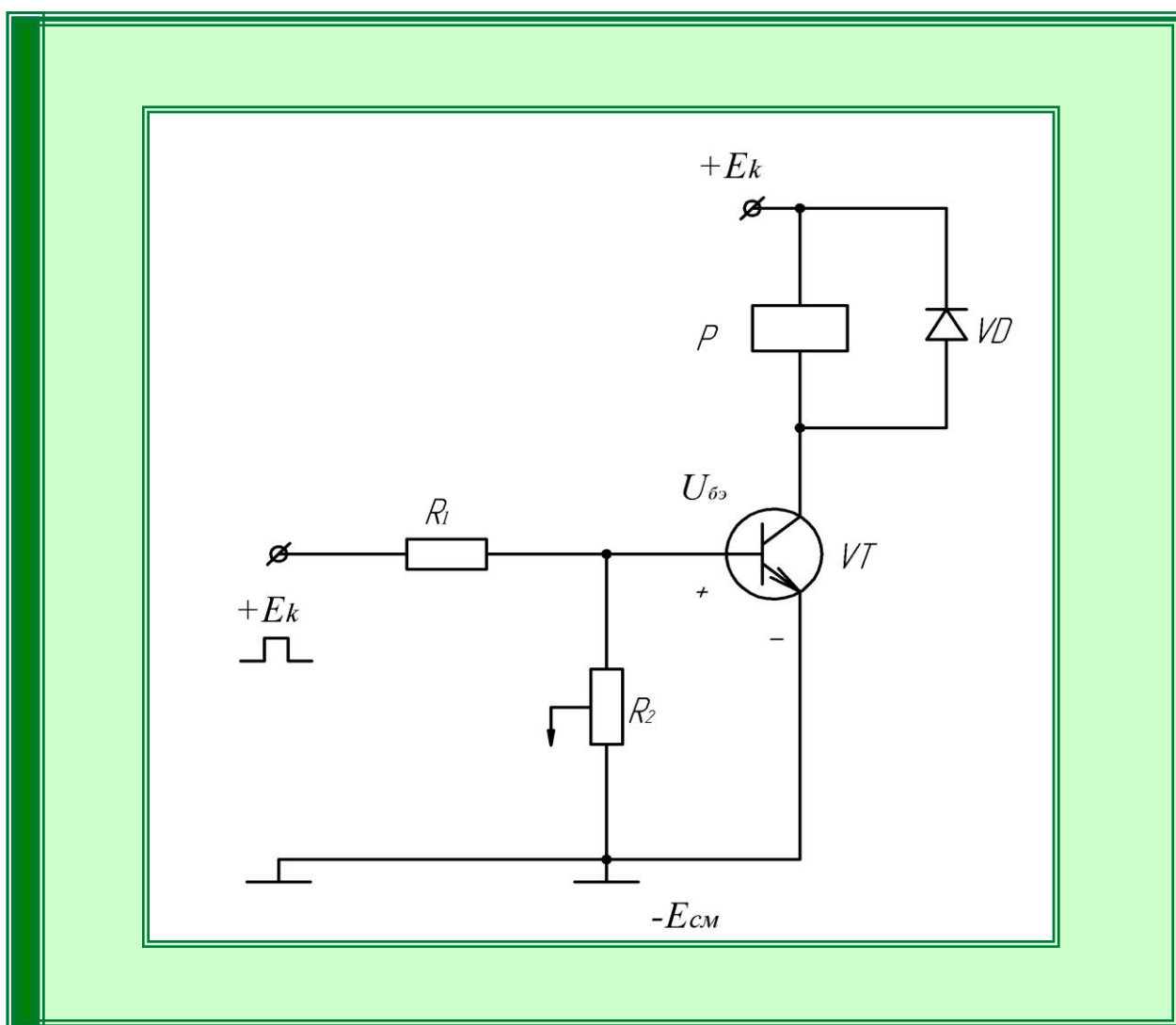
Реле первого вида на выходе имеет катушку с сердечником и якорем, а также коммутирующий механический контакт. Статическое реле без выходного контакта осуществляет коммутацию входной цепи с помощью полупроводникового элемента (тиристор). Существенным недостатком таких реле является наличие небольшого тока в нагрузке даже в отключенном положении реле. Поэтому имеется непрерывная связь источника с нагрузкой,

что не всегда удобно. Такие реле не могут использоваться для полного разрыва цепи.

### 1.4.1. Схемы простейших электронных реле

Рассмотрим схему реле на транзисторах (рис.11).

В исходном положении при отсутствии сигнала на базу транзистора поступает отрицательный сигнал от источника смещения. При подаче на вход сигнала  $+E$  транзистор отпирается, в нем появляется коллекторный ток, который из-за инерционности транзистора нарастает постепенно. Когда ток увеличивается до значения  $I_{ср\text{аб}}$  контакты электромагнитного реле  $P$  замыкаются.

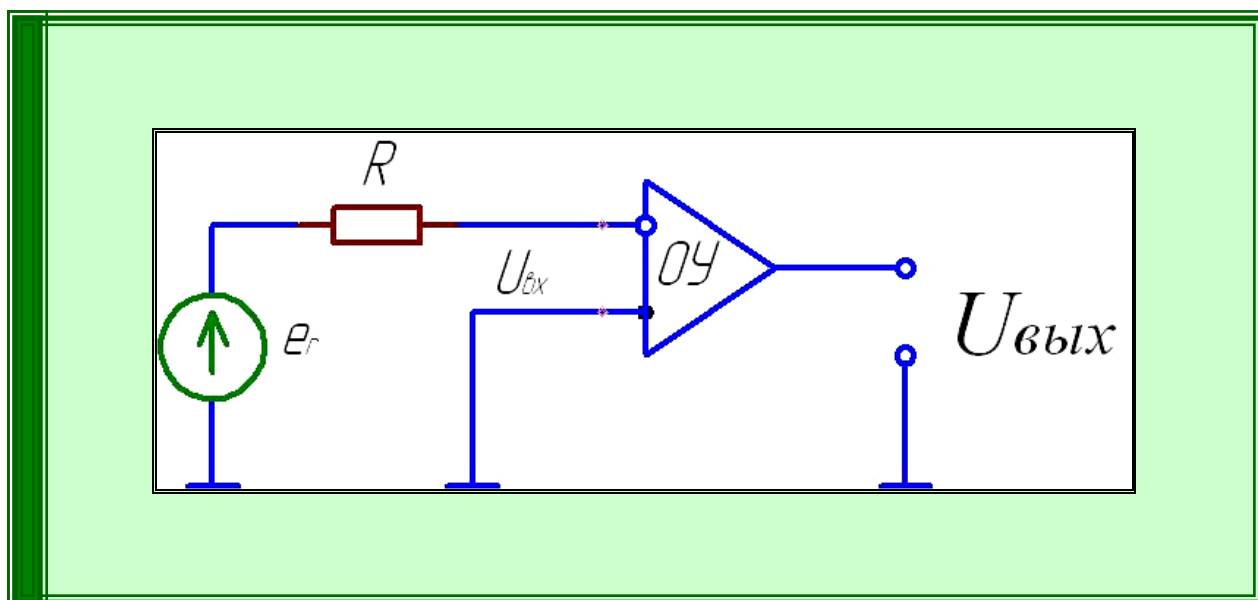


## Рис. 11. Схема реле на транзисторах

При отсутствии сигнала  $+E$  транзистор запирается обратным сигналом  $-E_{см}$ , коллекторный ток постепенно уменьшается, контакты размыкаются.

Поскольку такое реле обладает определенной инерционностью, оно не может использоваться для быстросействующей защиты. Быстросействующее реле выполняется на основе операционных усилителей.

Реле на операционном усилителе без обратной связи представлено на рисунке 12. Реле называется *детектором нуля*.

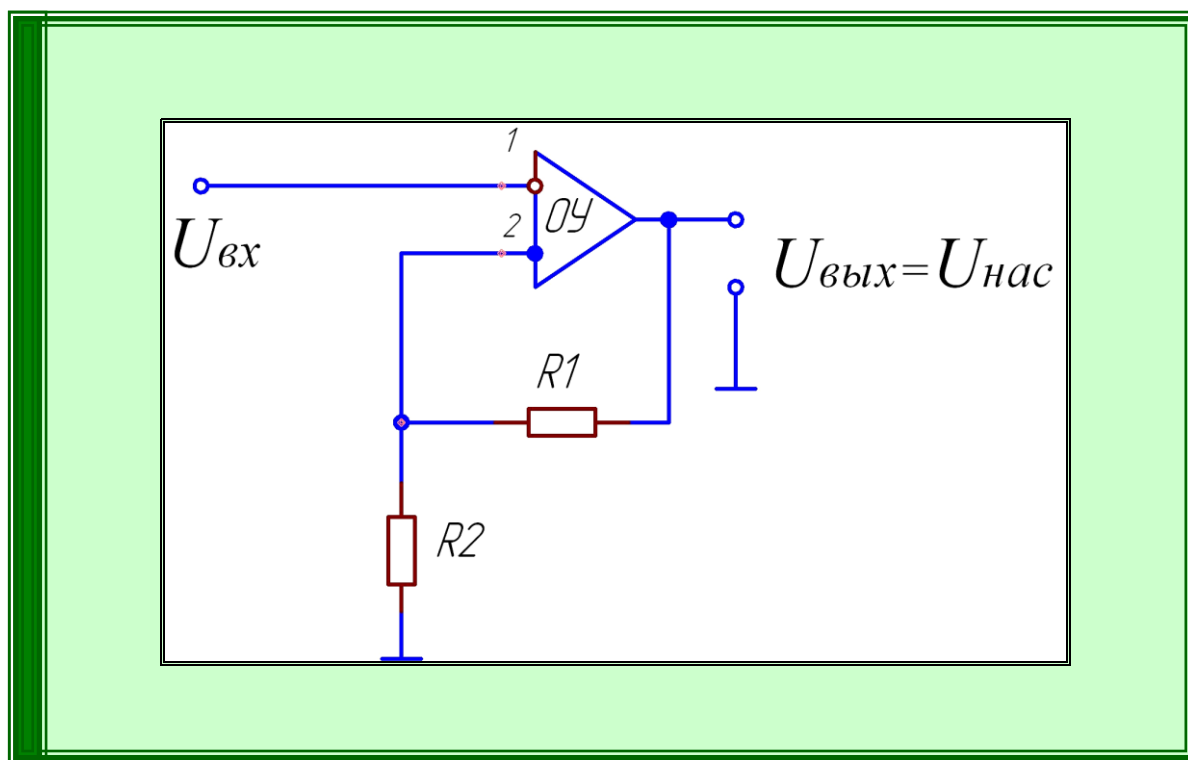


**Рис.12. Схема реле на операционном усилителе без обратной связи**

При подаче небольшого сигнала на вход операционного усилителя ОУ происходит скачкообразное изменение выходного сигнала, усиленное до определенного значения напряжения насыщения. В зависимости от знака входного сигнала происходит преобразование выходного сигнала, при минусе на входе, на выходе появляется плюс и наоборот.

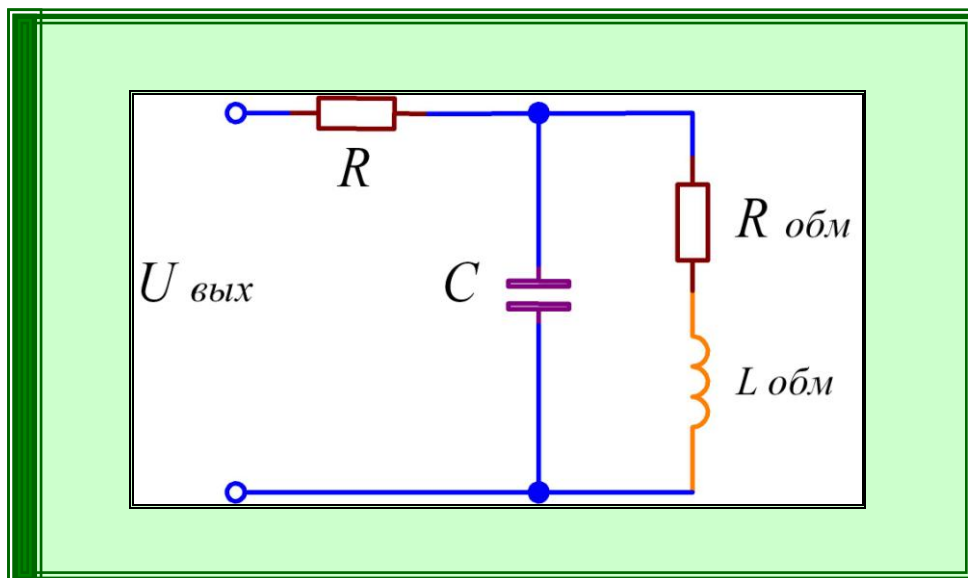


В отличие от детектора нуля **триггер Шмидта** (рис. 13) имеет обратную связь, поэтому при подаче на вход сигнала больше напряжения срабатывания, сигнал на выходе с плюса перебрасывается на минус, при подаче сигнала меньше значения срабатывания сигнал на выходе ОУ перебрасывается с минуса на плюс.



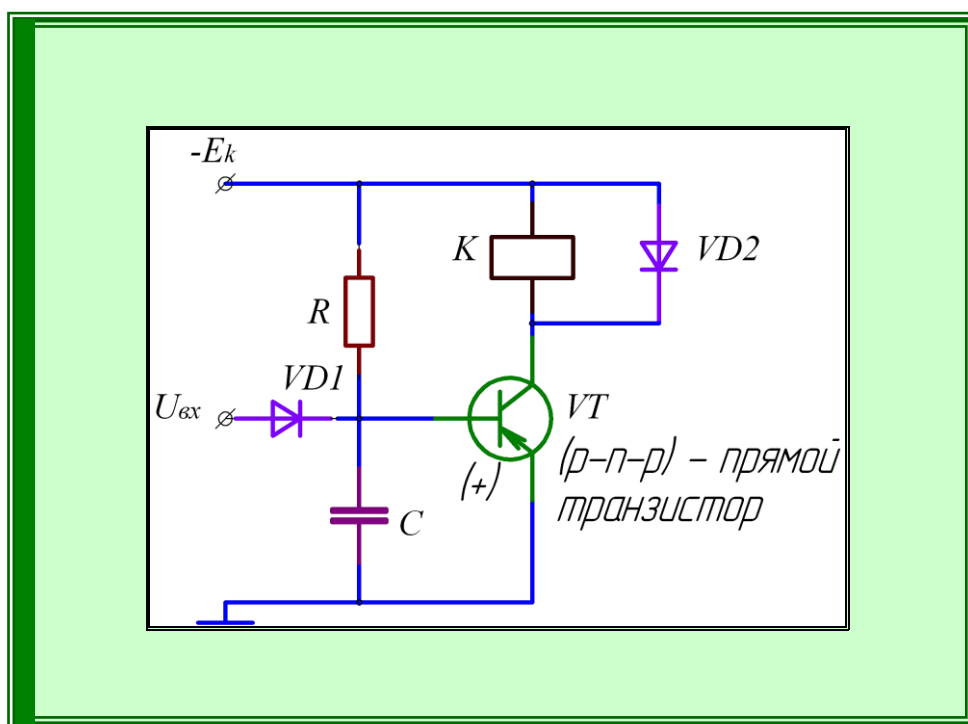
**Рис.13. Схема триггера Шмидта**

**Электронные реле времени.** Наибольшее распространение получили реле времени конденсаторного типа (рис. 14). Выдержка времени в схеме такого реле обеспечивается интегрирующими цепочками с большой постоянной времени.



**Рис. 14. Простейшая схема реле конденсаторного типа**

На схеме простейшего реле конденсатор включен параллельно обмотке электромагнитического реле. В результате возникает колебательный контур, что отрицательно сказывается на работе реле. Поэтому необходимо выполнить развязку  $RC$ -цепей и обмотки реле (рис.15). Время выдержки реле определяется процессом заряда и разряда конденсатора.



**Рис. 15. Схема реле конденсаторного типа**

Рассмотрим работу реле времени конденсаторного типа на транзисторе (рис. 15). В исходном состоянии на входе схемы положительный потенциал, поэтому диод  $VD1$  открыт, транзистор  $VT$  в запертом состоянии коллекторный ток через обмотку реле  $K$  не протекает. Конденсатор заряжается. При подаче отрицательного сигнала на вход диод запирается, и источник отключается от схемы. В это время конденсатор разряжается и в момент достижения на нем нулевого напряжения открывается эмиттерный переход транзистора, вызывая появление коллекторного тока в катушке реле. Контакты реле срабатывают. Для возвращения схемы в исходное состояние необходимо скачком изменить полярность входного напряжения. При этом ток базы также скачком уменьшится до нуля и транзистор быстро закроется. Контакты реле разомкнутся.

Для увеличения времени срабатывания реле времени конденсаторного типа можно увеличить параметры сопротивления и емкости, однако при этом увеличивается время возврата реле в исходное положение, что уменьшает быстродействие реле. Поэтому, как правило, регулируют параметры сопротивления  $R$ , при этом ток через коллектор будет уменьшаться.

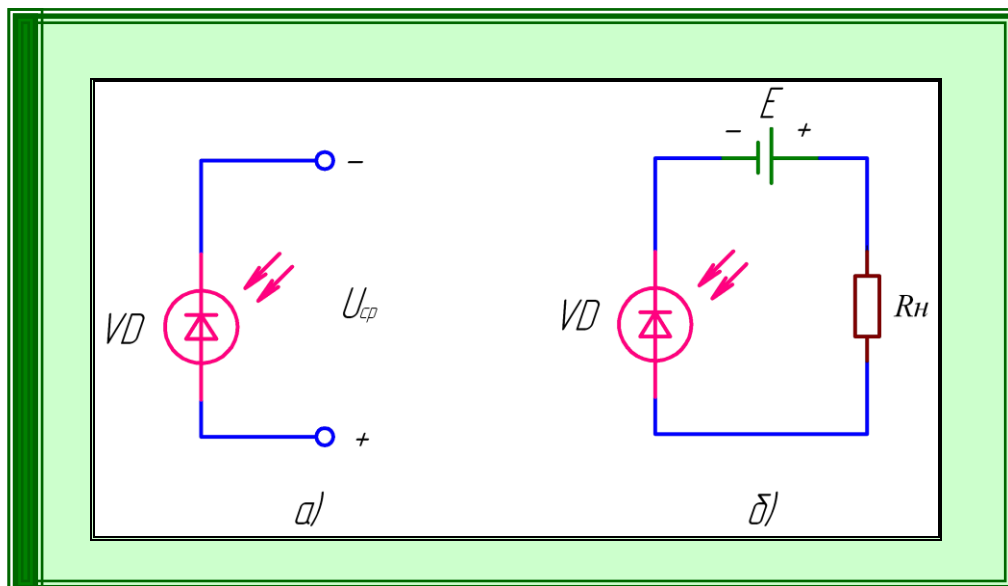
**Фотоэлектронные реле.** Если на входе схемы имеется элемент, изменяющий свою электропроводность под действием света, то такая схема называется фотоэлектронным реле. Элемент, осуществляющий преобразование оптического сигнала в электрический называется **фотоприемником**.

Наибольшее распространение получили полупроводниковые фотоприемники. Важнейшими параметрами фотоприемников являются:

1. **Темновое сопротивление** – это сопротивление фотоприемника при отсутствии светового воздействия (в пределах от 40 кОм до 10 Мом).
2. **Удельная интегральная чувствительность**. Этот параметр показывает изменение сопротивления фотоприемника под воздействием светового потока (в пределах 500 – 2000 мкА/лм·В).

Быстродействующее реле выполняется на основе фотодиодов и фототранзисторов.

Фотодиоды могут работать как в вентильном режиме, так и в фотодиодном режиме (рис. 16).



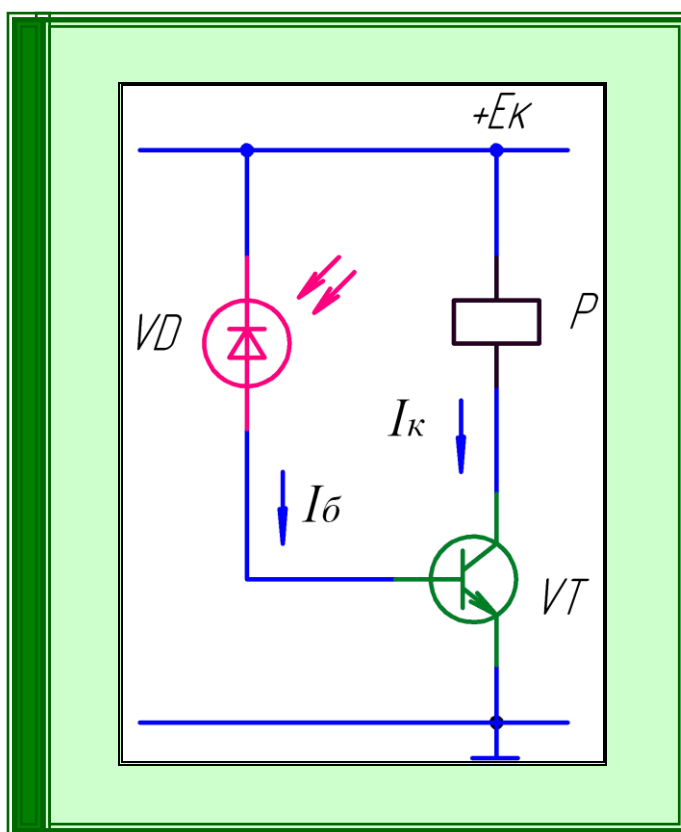
**Рис. 16. Схемы подключения фотодиодов:  
а – вентильный режим; б – фотодиодный режим**

В вентильном режиме достаточно осветить фотодиод, чтобы в его цепи появилась ЭДС. Поэтому фотодиод в вентильном режиме можно рассматривать как маломощный источник питания. Однако чаще используется фотодиодный режим, когда к фотодиоду прикладывается обратный потенциал. В результате при отсутствии освещения в цепи протекает ток, но почти все напряжение приложено к фотодиоду. При освещении светодиода ток в цепи возрастает до максимального значения, а все напряжение прикладывается к нагрузке  $R_H$ . На фотодиоде напряжение близко к нулю.

Интегральная чувствительность фотодиода определяется как отношение фототока к изменению светового потока:

$$K_{\Phi} = \frac{dI_{\Phi}}{d\Phi};$$

Интегральную чувствительность фотоприемника можно повысить с помощью фототранзистора, представляющего собой биполярный транзистор, база которого вместо электрического сигнала управляется световым потоком.

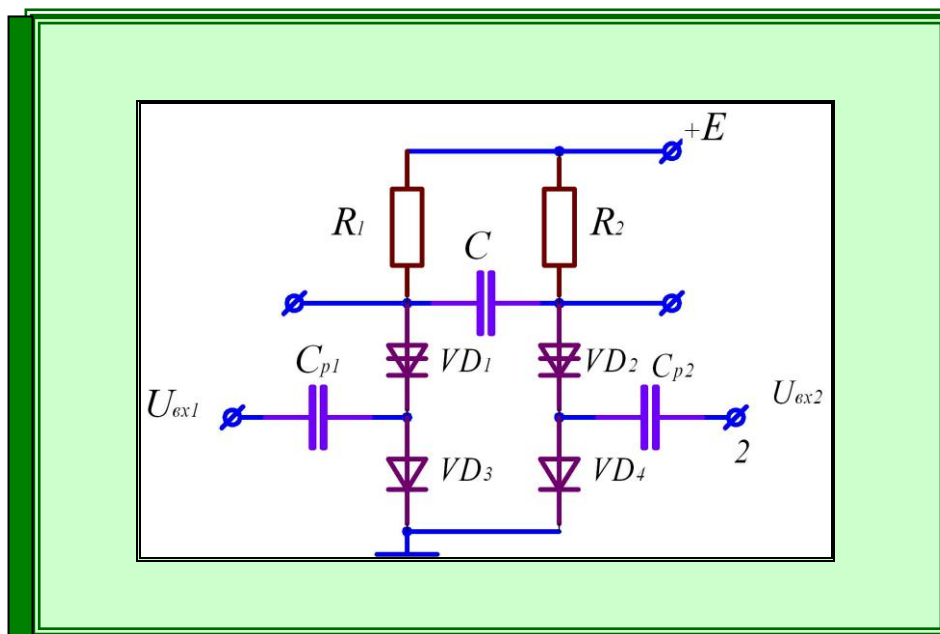


**Рис. 17. Схема фотореле на транзисторе**

Реле реагирует на уровень светового потока превышающий заданное значение. В исходном состоянии при недостаточном световом потоке ток протеканий через реле не превышает значения темнового тока. Транзистор закрыт. В момент достижения достаточного уровня освещенности фототок возрастает и достигает установленного значения – транзистор открывается, появляется коллекторный ток в катушке реле и его контакты срабатывают.

**Электронные реле на тиристорах.** В схемах на тиристорах не имеется выходных контактов, так как коммутация осуществляется тиристорами. В схемах применяется два вида тиристоров: **динисторы** (два электрода подключены к источнику) и **тринисторы** (два электрода подключены к источнику, а третий электрод управляющий).

Чаще схемы бесконтактных реле строятся как триггерные схемы на двух динисторах (рис. 18).

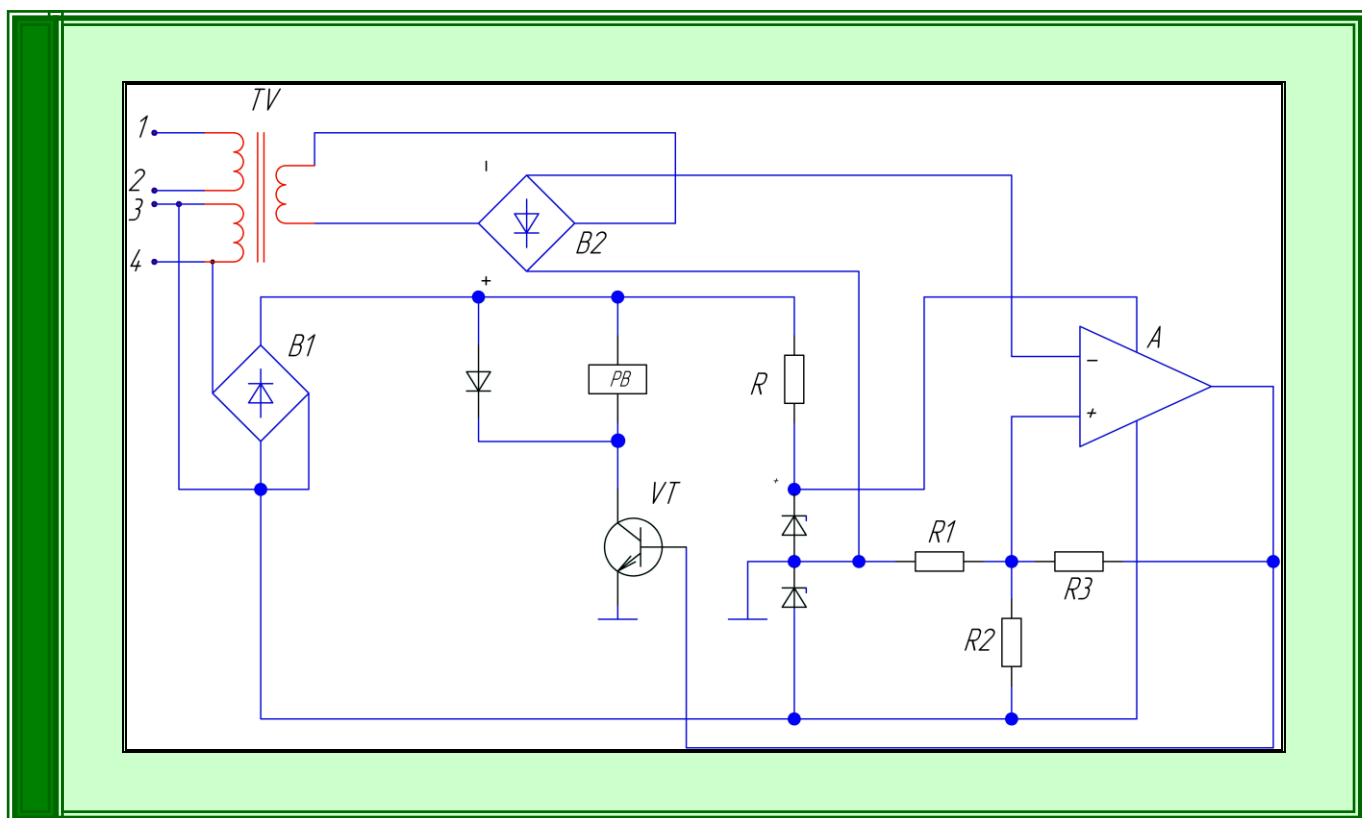


**Рис. 18. Схема электронного реле на динисторах**

После подключения питания к схеме динисторы  $VD_1$  и  $VD_2$  заперты. С подачей отрицательного импульса на первый вход  $U_{вх1}$  динистор  $VD_1$  отпирается и конденсатор  $C$  начинает заряжаться через резистор  $R_2$  и динистор  $VD_1$ . По окончании зарядки конденсатора схема приходит в рабочее состояние, при котором динистор  $VD_1$  открыт, а динистор  $VD_2$  закрыт.

Далее на второй вход  $U_{вх2}$  также подается отрицательный импульс и динистор  $VD_2$  отпирается. Конденсатор  $C$  разряжается на динистор  $VD_1$  и запирает его. Происходит перезарядка конденсатора  $C$  и наступает новое рабочее состояние, когда  $VD_1$  закрыт,  $VD_2$  открыт, а конденсатор заряжен.

**Статическое реле сдвига фаз РСФ – 11.** Реле применяется в устройствах автоматического повторного включения, предназначено для контроля наличия напряжения и сдвига фаз на шинах подстанции и линии электропередач (рис. 19).

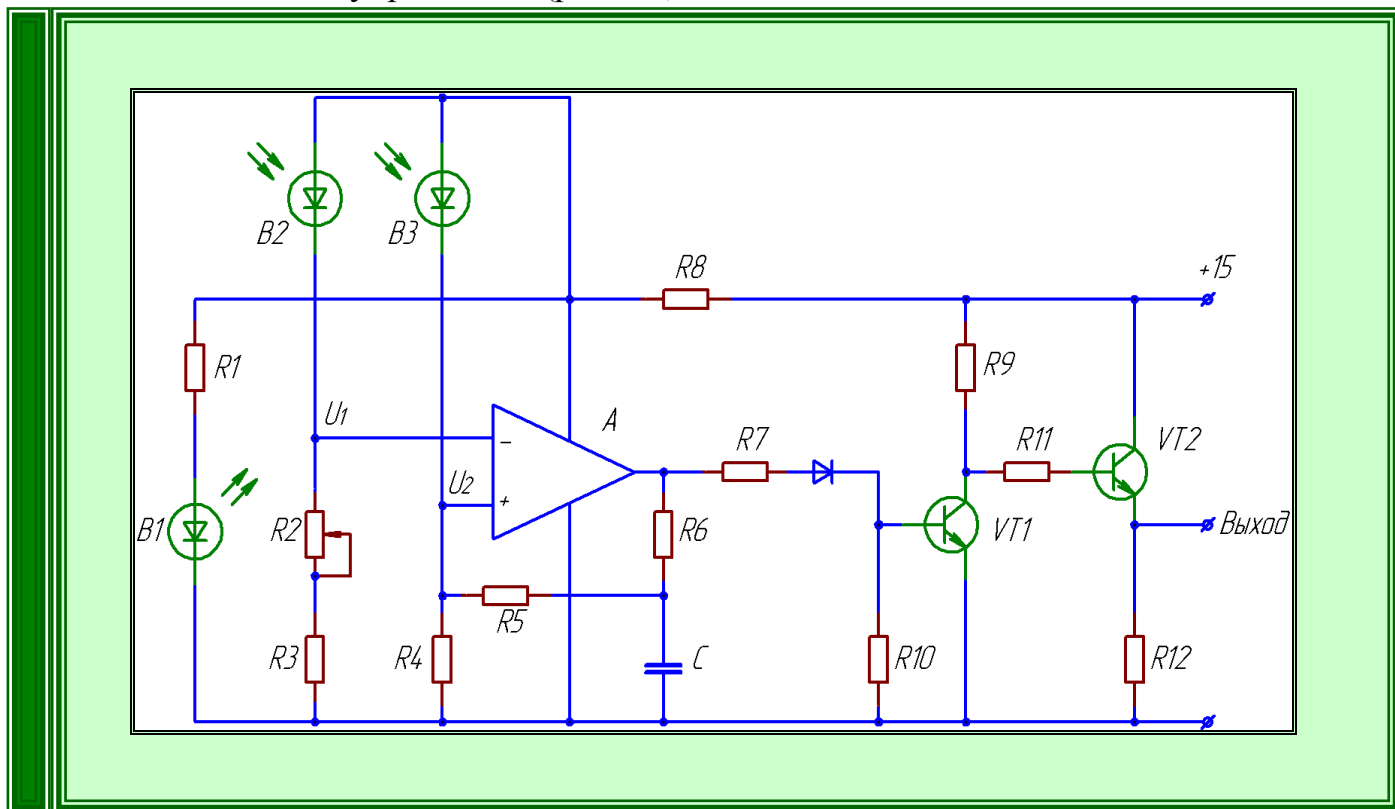


**Рис. 19. Схема статического реле сдвига фаз РСФ – 11**

Шины должны быть с двухсторонним питанием. Напряжение подается на входной трансформатор напряжения с выводами 1,2,3,4. Обмотки включены встречно, поэтому при появлении разности фаз или напряжения на шинах и в линии на вторичной обмотке появляется сигнал. Выпрямитель В1 питает усилительный каскад, выпрямитель В2 является датчиком входного сигнала. При небольшой разнице напряжений и фаз на выходе выпрямителя В2 появляется незначительный сигнал, минимум которого приходит на инвертирующий вход операционного усилителя, поскольку он меньше напряжения на «+», на выходе появляется отрицательный потенциал, который приходит на базу транзистора VT, запирая его. Выходное реле теряет возбуждение, контакты не срабатывают. При значительной разности фаз и напряжения на вход операционного усилителя приходит напряжение большее чем напряжение на «+» операционного усилителя, на выходе сигнал перебрасывается с минуса на плюс, который приходит на базу транзистора

VT. Транзистор отпирается и в катушке реле появляется ток. Реле срабатывает.

**Релейный элемент путевого выключателя.** В схеме реле два фотодиода, которые поочередно засвечиваются по мере перемещения какого-либо объекта управления (рис. 20).



**Рис. 20. Схема релейного элемента путевого выключателя**

Величина и полярность выходного сигнала операционного усилителя зависит от величины напряжения на его входе  $U_1$  и  $U_2$ . Значения этих напряжений зависят от засветки фотодиодов B2 и B3 светодионом B1.

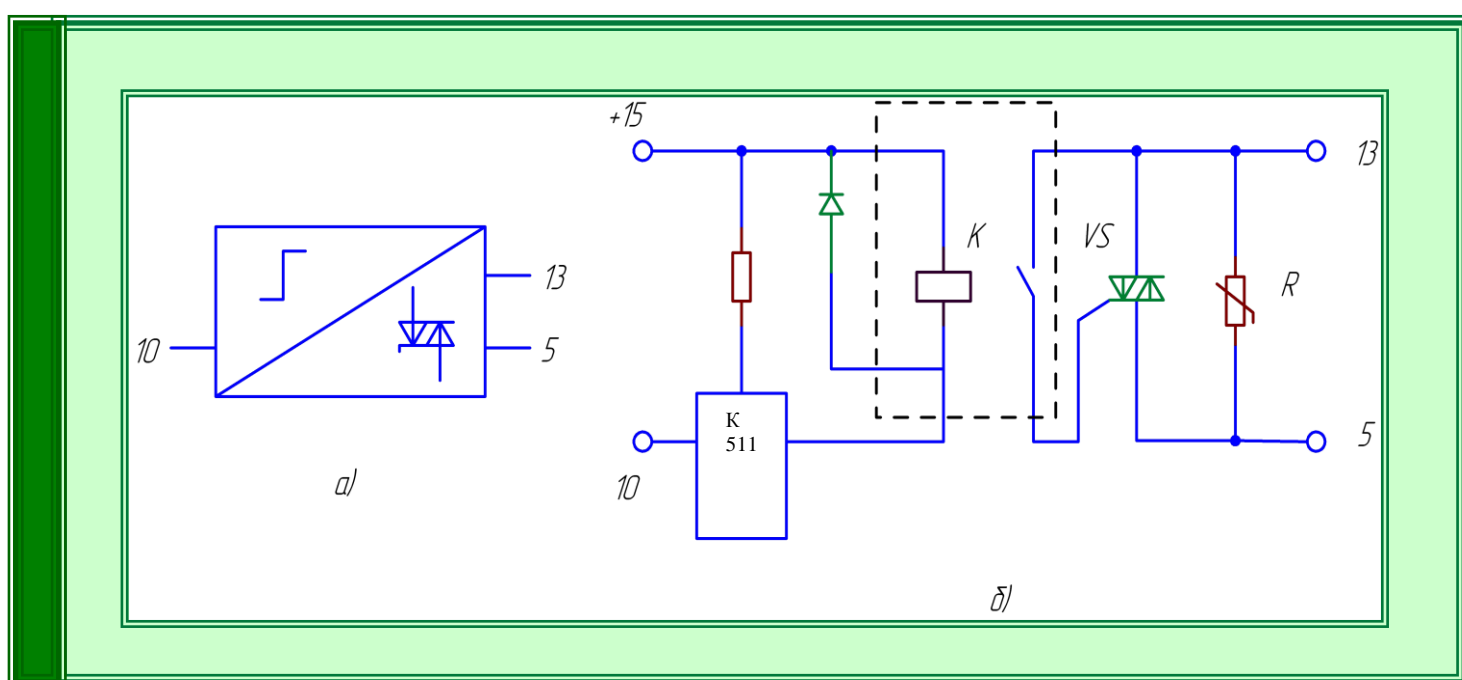
В исходном положении затемнен B2 и поэтому закрыт, B3 засвечен и открыт. Напряжение на входе усилителя  $U_1 < U_2$ . На выходе операционного усилителя сигнал «+», который приходит на базу транзистора VT1 и он открывается его небольшое напряжение приходит на базу транзистора VT2, на выходе которого появляется также небольшой сигнал.

При движении экрана путевого выключателя B2 открывается, B3 закрывается и на входе операционного усилителя напряжение  $U_1 > U_2$ , сигнал



на выходе усилителя перебрасывается на отрицательный максимум,  $VT1$  запирается,  $VT2$  открывается, на выходе появляется сигнал большого уровня, что и приводит к срабатыванию путевого выключателя.

**Промежуточное реле УВБ-11-19-3721.** Выходное устройство УВБ-11 служит для усиления выходных командных сигналов логических устройств и для коммутации цепей нагрузки постоянного (до 4А) и переменного (до 6А) тока. В качестве коммутирующего устройства служит симистор  $VS$ , зашунтированный варистором  $R$  для защиты от перенапряжения (рис. 21).



**Рис.21. Промежуточное реле УВБ-11-19-3721: а – условное обозначение; б – функциональная схема**

Симистор включается при подаче сигнала на управляющий электрод через контакт герконового реле  $K$ . Назначение этого реле – гальваническая разрядка между входной цепью и нагрузкой. При разомкнутом герметичном контакте симистор запирается при первом прохождении тока через нуль. Сигнал снимается с интегральной микросхемы К511, которая является источником логических сигналов, а также позволяет согласовать схему с другими элементами.

## 2. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

### 2.1. Устройство трансформаторов тока

**Трансформаторы тока** служат для подключения измерительных приборов и аппаратов релейной защиты в установках высокого напряжения, кроме того они могут использоваться как датчики тока. Трансформаторы имеют стандартные значения тока на выводах вторичной обмотки – 5 и 1 А.

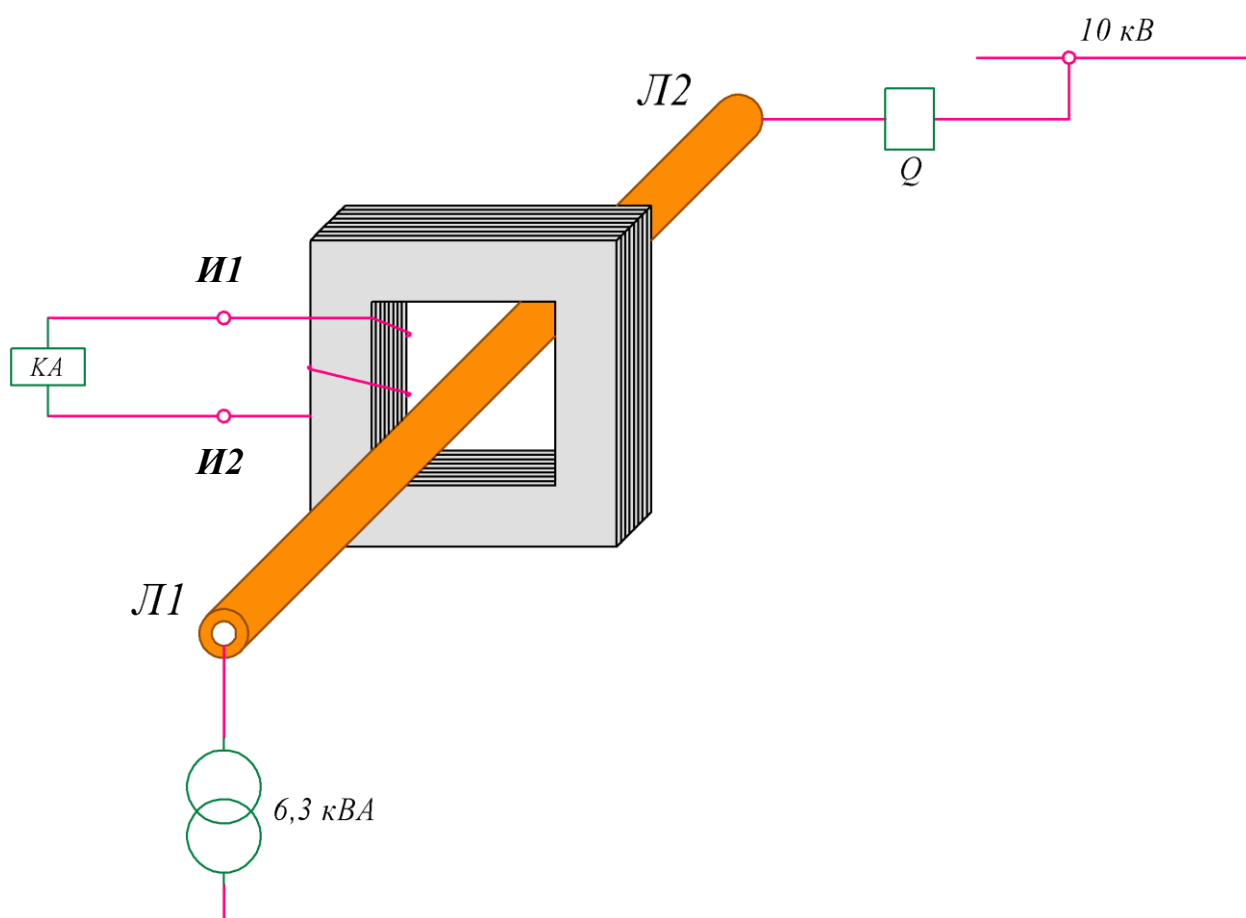


Рис. 22. Устройство трансформатора тока

Устройство трансформаторов тока напряжением до 10 кВ однотипное. Магнитопровод, как правило, замкнутый шихтованный. Через окно магнитопровода пропущена алюминиевая шина, представляющая собой первичную обмотку с выводами  $L_1$ ,  $L_2$  (рис. 22). Вторичная обмотка наматывается на магнитопровод, выполняется медным изолированным проводом и имеет маркировку  $I_1$ ,  $I_2$ . Для придания трансформатору электрической и механической прочности все обмотки вместе с магнитопроводом заливаются компаундом на основе эпоксидной смолы. Такие трансформаторы называются *литыми* и маркируются следующим образом: ТОЛ-10; ТПОЛ-6.

На рисунке 23 представлена новинка среди трансформаторов литого исполнения.



**Рис. 23. Трансформатор тока ТОЛ-20**

### Рассмотрим особенности конструкции трансформатора ТОЛ-20:

- первичные токи трансформатора от 5 до 2500 А.
- классы точности измерительных обмоток : 0.2, 0.2S, 0.5,0.5S.
- количество вторичных обмоток 2, 3 или 4.
- раздельное пломбирование вторичных обмоток.
- применение в качестве главной изоляции хорошо зарекомендовавший себя эпоксидный компаунд, залитый под вакуумом.
- уровень изоляции «б»;
- трансформаторы производятся в двух габаритах длиной 295 и 350 мм.
- возможно изготовление на металлической монтажной плите.
- унифицированы установочные и присоединительные размеры всех исполнений.
- наличие изолирующих барьеров позволяет уменьшить расстояние между фазами (при условии изолировки шин за габаритами трансформатора).
- возможно изготовление с горизонтально или вертикально расположенными шинами.

Трансформатор **ТОЛ-20** с вертикальными первичными шинами имеет в названии обозначение **ВВ**, после обозначения количества обмоток. Например, ТОЛ-20-3-0,5/10Р/10Р-2500/5 УХЛ2 ВВ.

Трансформаторы тока напряжением 35 кВ и выше выполняются с масляной изоляцией для наружной установки. Наибольшее распространение получили трансформаторы восьмерочного и каскадного типа. Магнитопровод с обмотками помещаются в фарфоровый кожух, который заполняется трансформаторным маслом (рис. 24). Линейные выводы расположены вверху изолятора, измерительные – в клеммной коробке внизу.



**Рис. 24. Трансформатор тока для наружной установки 35 кВ**

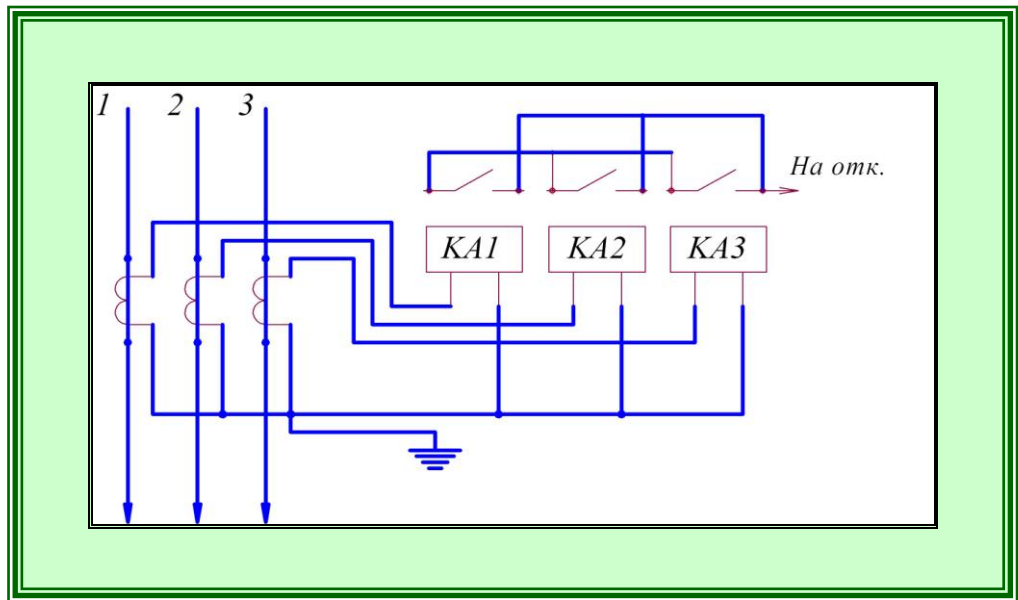
## ***2.2. Схемы соединения трансформаторов тока и токовых реле***

Показателем, характеризующим схему соединения трансформаторов тока является *коэффициент схемы*, который определяется как отношение тока в реле  $I_p$  к току в фазе  $I_\phi$ :

$$K_{CX} = \frac{I_p}{I_\phi}.$$

### **1. Схема полной звезды представлена на рисунке 25.**

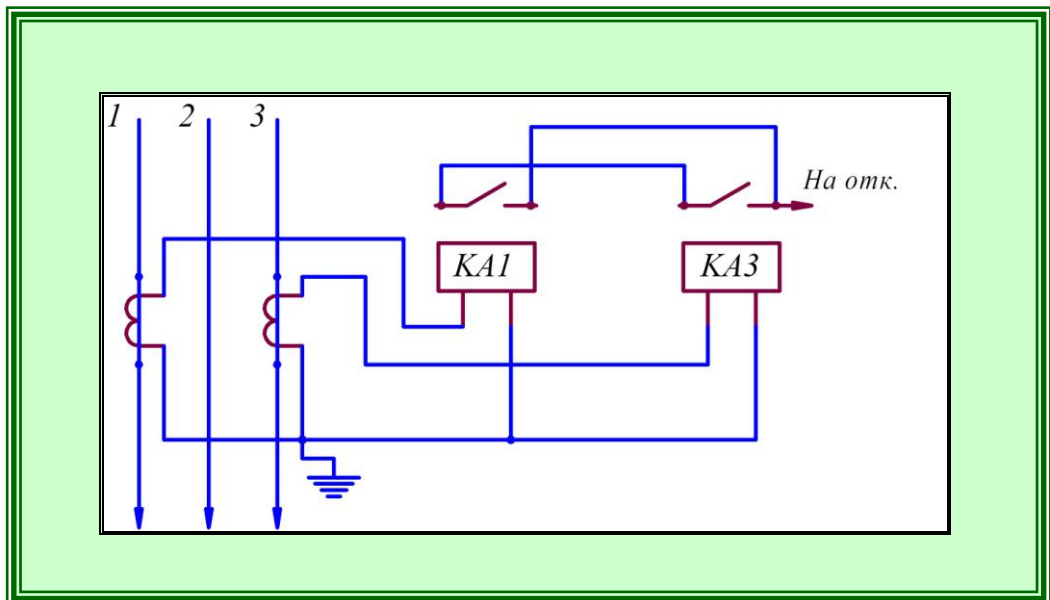
Схема надежна, чувствительна ко всем видам межфазных замыканий и каждой фазы на «землю», поскольку в каждой фазе установлен трансформатор тока. Рекомендуется использование в сетях на высокой стороне, а также в сетях с глухозаземленной нейтралью.



**Рис. 25. Схема полной звезды**

**2. Схема неполной звезды (рисунок 26).**

Схема не чувствительна ко всем однофазным замыканиям на землю – ее желательно применять в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью.



**Рис. 26. Схема неполной звезды**

### 3. Схема «Восьмерки» (рисунок 27).

Схема применяется для защиты от междуфазных замыканий в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью.

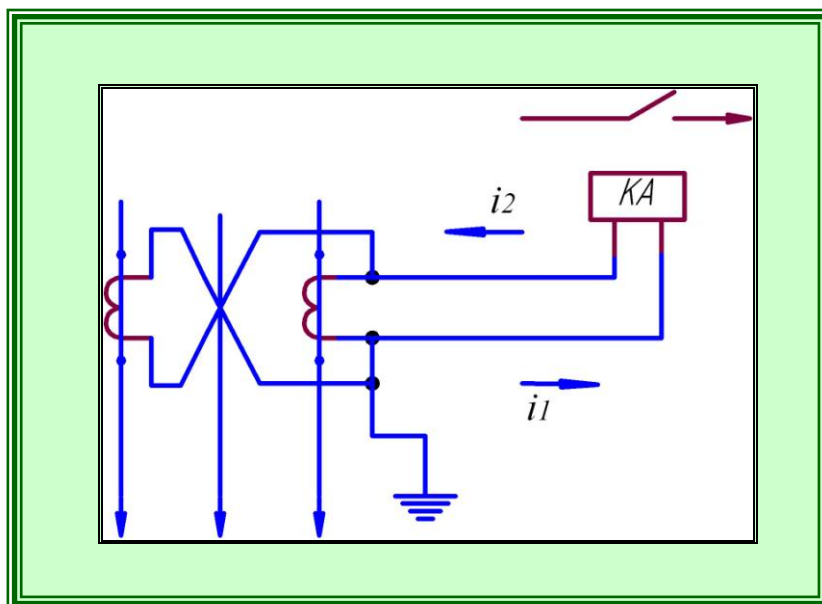


Рис. 27. Схема «Восьмерки»

### 4. Схема «Треугольника» (рисунок 28).

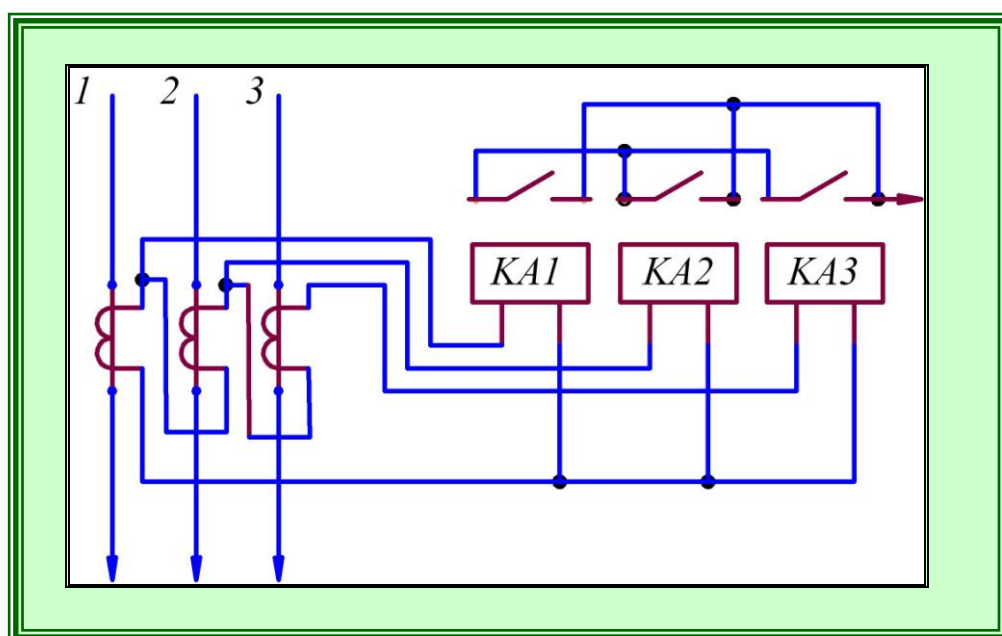


Рис. 28. Схема «Треугольника»

Применяется в основном в дифференциальной защите трансформаторов с той стороны трансформатора, где его обмотки соединены в «звезду». Вторичная обмотка в этом случае соединена в «треугольник», с этой стороны трансформаторы тока соединяются либо полной «звездой», либо неполной.

### ***2.3. Кабельные трансформаторы тока (земляная защита)***

В сетях с изолированной и компенсированной нейтралью при замыкании фазы на землю токи замыкания небольшие. Отстраивать релейную защиту для протяженных кабельных сетей в этом случае практически невозможно – кабельные линии защищаются земляной защитой. В основе защиты трансформаторы тока особой конструкции.

На рисунке 29 представлен трансформатор предназначенный для питания схем защиты от замыкания на землю отдельных жил трехфазного кабеля путем трансформации возникших при этом токов нулевой последовательности.



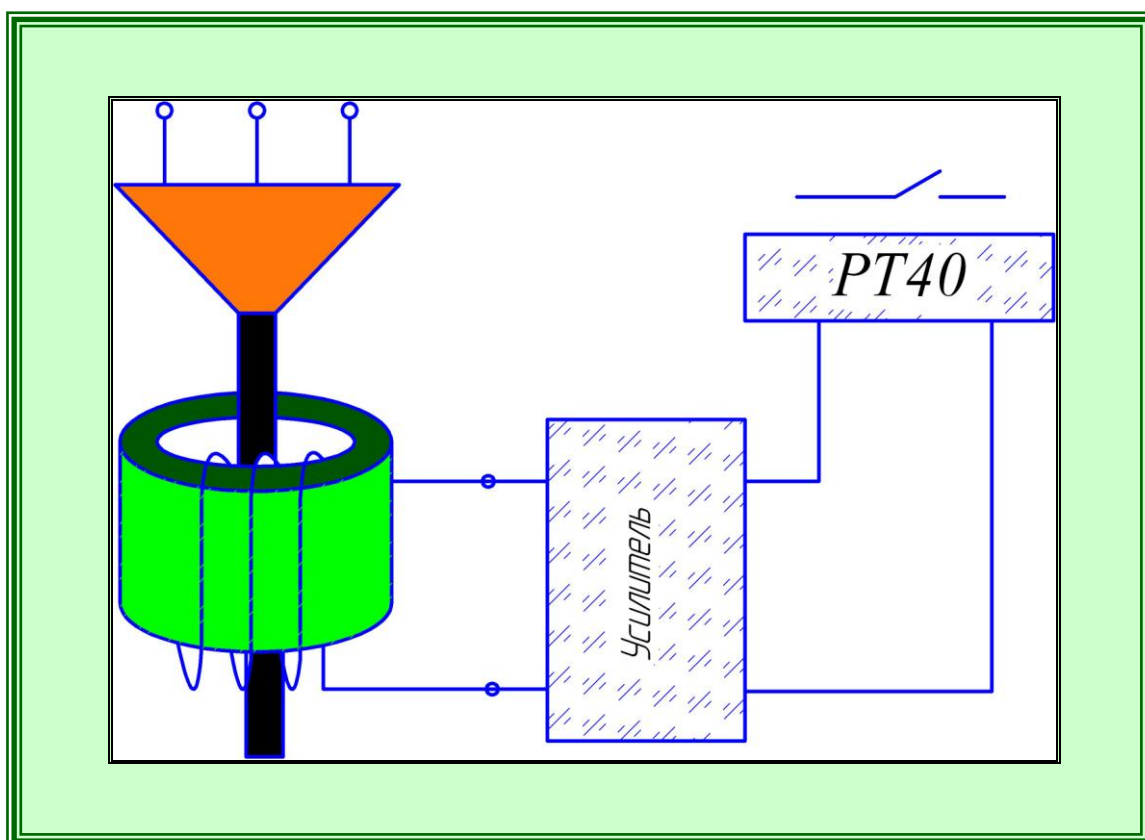
**Рис. 29. Трансформатор тока ТЗЛМ-110**



Трансформатор предназначен для работы с микропроцессорной защитой типа «SERAM 1000» при номинальном токе 2А с уставками в диапазоне от 0,2 до 30 А, при номинальном токе 20 А – с уставками от 2 до 300 А. Токовая погрешность 5%. Возможна работа трансформатора совместно с реле РТЗ-51.

Сердечник трансформатора тороидальной формы, на котором имеется одна вторичная обмотка, роль первичной обмотки выполняет сам кабель (рис. 30). Трансформатор размещается на кабеле сразу после кабельной воронки (кабельной муфты).

В нормальном режиме в трехжильном кабеле протекают симметричные токи, под действием которых в магнитопроводе трансформатора наводятся симметричные магнитные потоки. Во вторичной обмотке не наводится ЭДС – сигнала на выходе нет.



**Рис. 30. Схема кабельного трансформатора тока**

При однофазном замыкании на землю симметричность магнитных потоков нарушается, в результате во вторичной обмотке появляется небольшое ЭДС, небольшой сигнал усиливается в усилителе и поступает в катушку реле.

## ***2.4. Оперативный ток: источники постоянного и переменного оперативного тока***

**Оперативный ток** служит для питания устройств релейной защиты, автоматики, сигнализации, а также цепей дистанционного управления выключателями. Цепи, соединяющие источники оперативного тока **ИОТ** с этими устройствами называются **оперативными цепями**.

Питание оперативных цепей и особенно тех ее элементов, от которых зависит отключение поврежденных линий и оборудования, должно отличаться особой надежностью. Поэтому главное требование, которому должен отвечать источник оперативного тока, состоит в том, чтобы во время короткого замыкания и в аномальных режимах, напряжение источника оперативного тока и его мощность имели достаточную величину как для действия вспомогательных реле защиты и автоматики, так и для надежного отключения и включения соответствующих выключателей.

**Источники оперативного тока классифицируются следующим образом:**

- **ИОТ переменного и постоянного тока;**
- **ИОТ зависимые и независимые.**

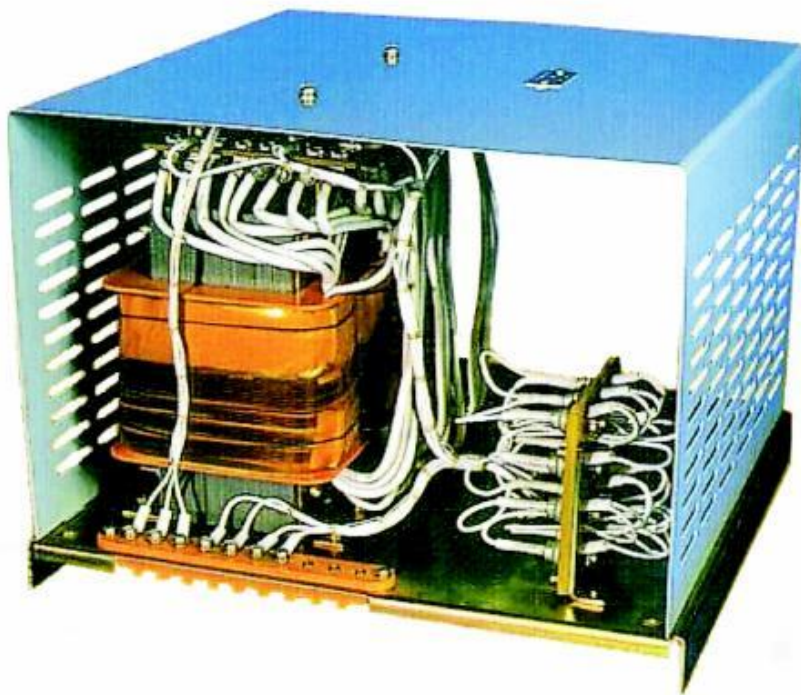
Наиболее надежными источниками оперативного тока являются независимые источники постоянного тока. К таким источникам относятся аккумуляторные батареи. Разрядный ток конденсатора, имеющий

необходимые величину и продолжительность, может питать оперативную цепь в момент действия защиты независимо от характера повреждения или ненормального режима в сети. Предварительный заряд конденсатора обычно осуществляется в нормальном режиме от напряжения сети. При исчезновении напряжения на подстанции запасенная конденсатором энергия сохраняется. Поэтому заряженный конденсатор может использоваться также для питания защит и автоматов, которые, должны работать при исчезновении напряжения на подстанции. Не смотря на их высокую надежность ИОТ такого типа имеют ряд недостатков: высокую стоимость, необходимость в специальном помещении и в подзарядных устройствах, сложность в эксплуатации.

Самыми **ответственными** участками считаются **цепи защиты, автоматики и питание катушек отключения**, которые запитываются с шин управления ШУ. Другим, очень важным участком в оперативных цепях, являются цепи катушек включения, которые питаются от отдельных шин ШВ из-за больших токов (400—500 А), потребляемых катушками включения высоковольтных выключателей. И, наконец, третьим, менее ответственным участком является цепи сигнализации, питающиеся от шин ШС. Остальные потребители постоянного тока (аварийное освещение, двигатели собственных нужд) питаются по отдельной сети. Защита оперативных цепей от коротких замыканий осуществляется предохранителями или специальными автоматами.

В настоящее время широко используются *источники выпрямленного оперативного тока* – так называемые блоки питания **БПТ** и **БПН**. Нестабилизированные блоки питания серии БПН-1002 и БПТ-1002 (рис. 31) применяются в системах автоматики, управления и защиты электротехнических устройств. Блоки питания БПТ-1002 предназначены для питания выпрямленным током аппаратуры релейной защиты, сигнализации управления, выполненной на номинальное напряжение 110 или 220V, имеют выходную мощность 800-1500 Вт в кратковременном режиме.

Подключаются к трансформаторам тока. Блоки питания БПН 1002 подключаются к измерительным трансформаторам напряжения или в сеть собственных нужд. БПН-1002 могут применяться как совместно с БПТ-1002, так и независимо от них.



**Рис. 31. Блоки питания БПН-1002 и БПТ-1002**

Для питания релейной защиты в сетях напряжением 6 кВ и выше используют зависимые источники переменного тока – трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, трансформаторы собственной нужды (ТСН).

Трансформаторы тока являются весьма надежным источником питания оперативных цепей для защит от коротких замыканий, так как ток и напряжение в аварийном режиме на зажимах трансформаторов тока увеличиваются, и в момент срабатывания защиты мощность трансформаторов тока возрастает, что и обеспечивает надежное питание оперативных цепей.

Однако трансформаторы тока не обеспечивают необходимой мощности при небольших повреждениях и аномальных режимах, не сопровождающихся увеличением тока на защищаемом присоединении. Поэтому их

нельзя использовать для питания защит от замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, защит от витковых замыканий в трансформаторах и генераторах или защит от таких ненормальных режимов, как повышение или понижение напряжения и частоты.

Трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд непригодны для питания оперативных цепей защит от коротких замыканий, так как при коротком замыкании напряжение в сети резко снижается и может в неблагоприятных случаях стать равным нулю. В то же время при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся глубокими понижениями напряжения в сети, трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд могут использоваться для питания таких защит, как, например, защиты от перегрузки, от замыканий на землю, повышения напряжения и т. д.

Дистанционное управление выключателями и их автоматическое включение от АПВ или АВР должно производиться при любых нагрузках и при отсутствии напряжения на шинах подстанции, чего не обеспечивают трансформаторы тока. Поэтому питание цепей дистанционного управления, АПВ и АВР производится от трансформаторов напряжения, трансформаторов собственных нужд и заряженных конденсаторов. Чтобы обеспечить производство операции по включению при отсутствии напряжения на шинах, трансформаторы, питающие цепи управления, подключаются к линиям, питающим подстанцию, или на выключателях устанавливаются механические приводы, действующие за счет энергии поднятого груза или сжатой пружины.

Таким образом, каждый источник переменного оперативного тока имеет свою, рассмотренную выше, область применения. При этом возможность использования того или иного источника определяется мощностью, которую он может дать в момент производства операций. Наибольшие затруднения из-за недостаточной мощности возникают при применении трансформаторов тока и трансформаторов напряжения.

**На практике встречаются две схемы питания от трансформаторов тока:**

- *с непосредственным питанием оперативных цепей током от основных трансформаторов тока;*
- *с питанием оперативных цепей от вспомогательных или промежуточных трансформаторов тока.*

## 3. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

### 3.1. Основные повреждения силовых трансформаторов

Различают следующие виды повреждений трансформаторов:

- междуфазные замыкания внутри бака и на выводах;
- витковое замыкание в обмотке одной фазы;
- однофазное замыкание на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью;
- увеличение тока в обмотках при внешних коротких замыканиях;
- увеличение тока в обмотках при перегрузках трансформаторов;
- понижение уровня масла в баке трансформатора или нагрев масла.

Для защиты трансформаторов используют четыре основных релейных защиты: **токовая отсечка** – является разновидностью максимальной токовой защиты; **максимальная токовая защита**; **дифференциальная токовая защита**; **газовая защита** – применяется только для маслонеполненных трансформаторов.

Для защиты трансформаторов малой и средней мощности от внутренних повреждений используется **токовая отсечка**, которая устанавливается со стороны питания. Защита от внешних коротких замыканий со стороны питания осуществляется **максимальной токовой защитой МТЗ**.

Для защиты трансформаторов большой мощности (более 1000 кВА) от перегрузок используется **МТЗ**. Защиту от междуфазных и витковых коротких замыканий на выводах и внутри трансформатора большой мощности

выполняет **дифференциальная токовая защита ДТЗ**, которую необходимо отстроить от внешних коротких замыканий.

## ***3.2. Назначение и основные типы защит трансформаторов***

### **3.2.1. Максимальная токовая защита**

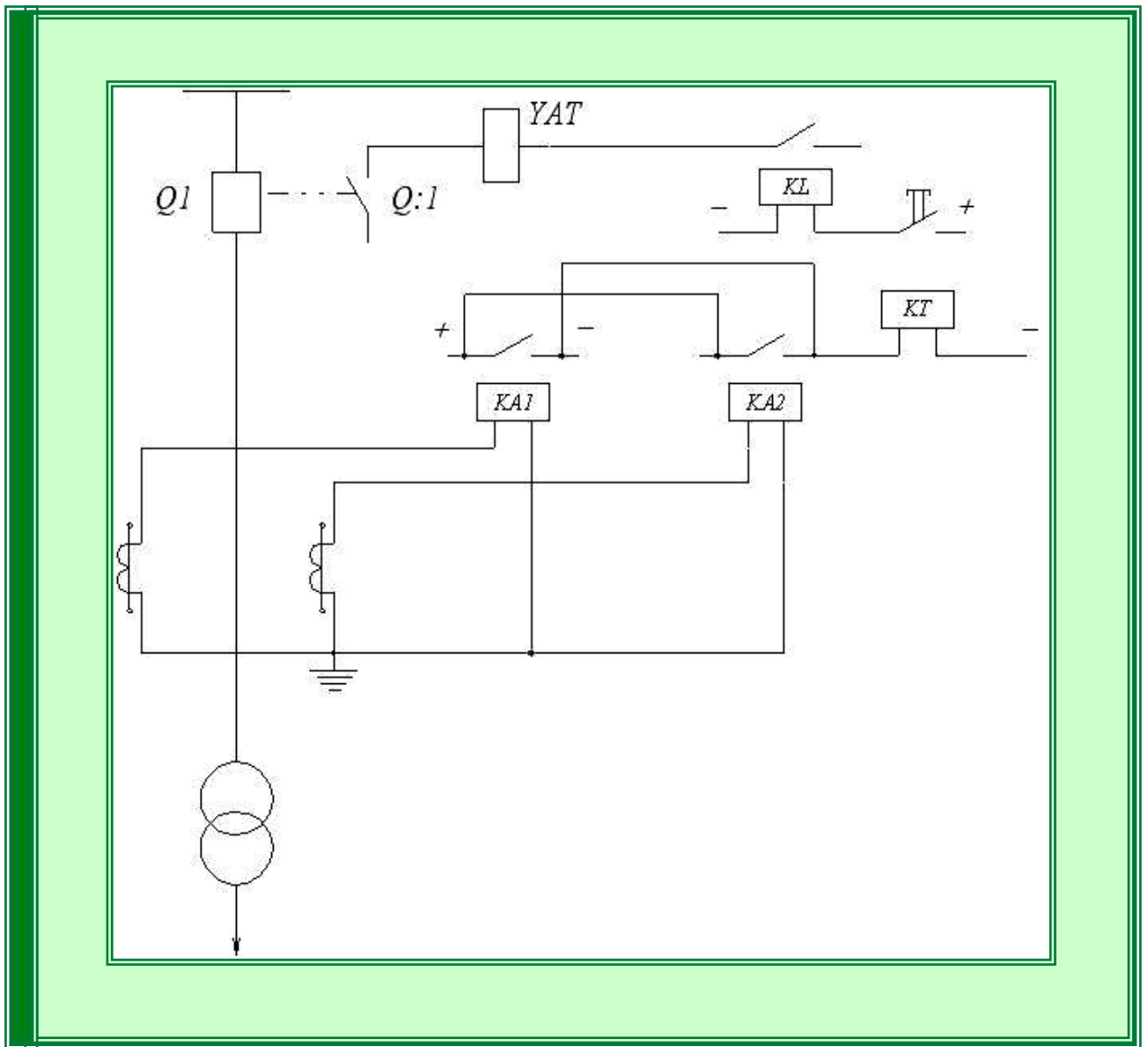
**Максимальная токовая защита МТЗ** должна действовать при токах, превышающих максимальные значения, и токах короткого замыкания. В тоже время эта защита должна быть не чувствительна к перегрузкам. Выполняется МТЗ по двум принципам: с временем срабатывания, зависящим от величины тока и с постоянной независимой уставкой времени срабатывания.

Схема со временем срабатывания, независимым от величины тока выполняется на основе реле тока РТ-40 и реле времени (рис. 32).

В цепи питания электромагнита отключения *УАТ* имеется блок контакт выключателя *Q:1*, который разрывает цепь питания электромагнита при отключении выключателя, так как он не предназначен для продолжительного протекания тока.

Максимальная токовая защита с временем срабатывания зависящим от величины тока выполняется на основе реле тока индукционного типа РТ-80.

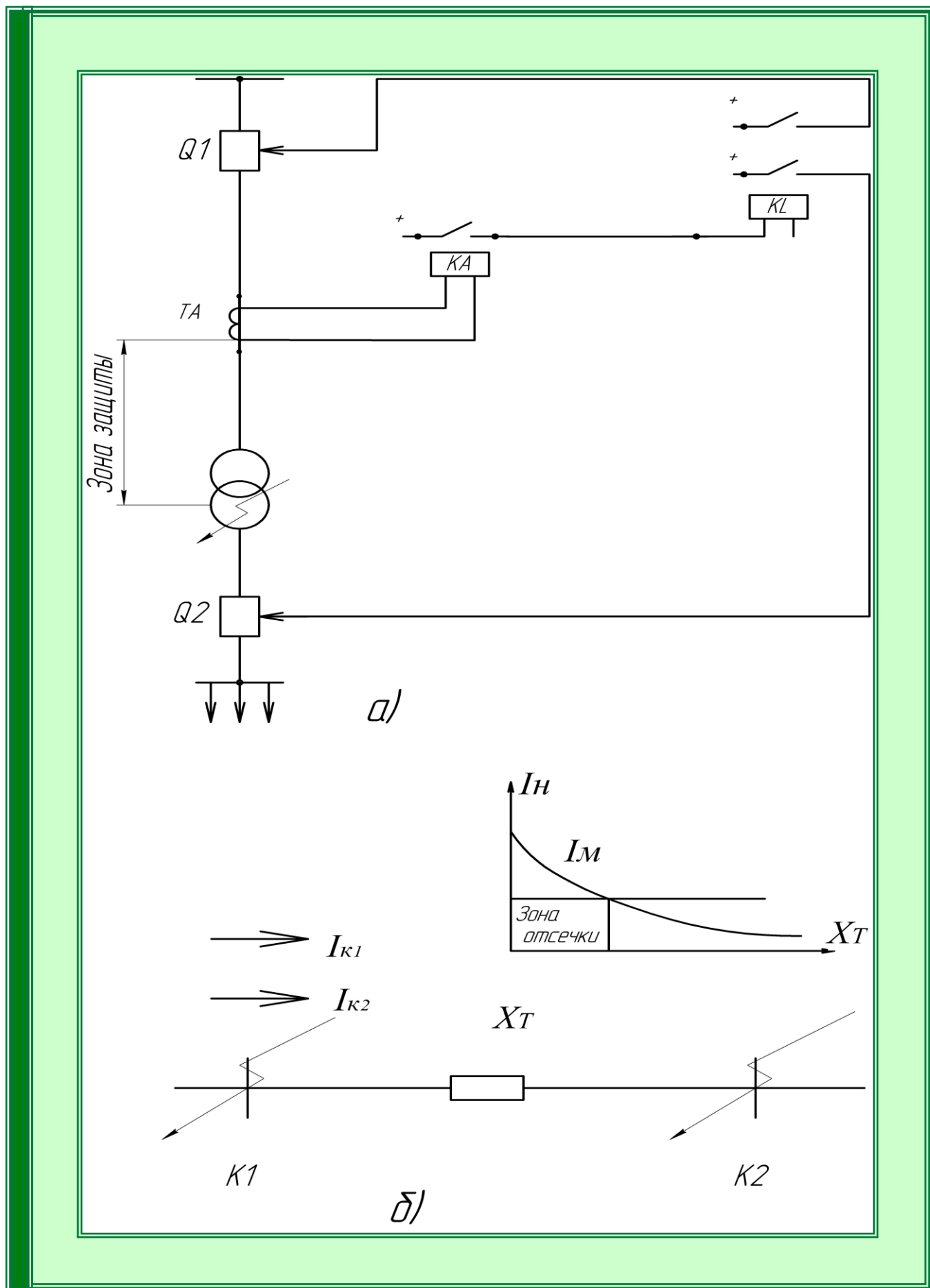




**Рис. 32. Схема МТЗ силового трансформатора с независимой уставкой времени срабатывания**

### **3.2.2. Токовая отсечка трансформатора**

В отличие от максимальной токовой защиты зона защиты токовой отсечки ограничена, так как она отстраивается только на ток короткого замыкания при повреждениях на выводах трансформатора со стороны источника питания. В зону защиты входят выводы трансформатора со стороны питания, вся первичная обмотка и часть вторичной обмотки (рис. 33).



**Рис. 33. Схема токовой отсечки трансформатора: а) однолинейная схема защиты, б) принцип действия**

Токовая отсечка устанавливается с питающей стороны трансформатора, выполняется на основе реле РТ-40, РТ-80. Ток срабатывания отсечки отстраивается на максимальный ток короткого замыкания при повреждении за трансформатором:

$$I_{с.з.} = k_{зап} \cdot I_{2maxк.з.},$$

где  $k_{зап}$  – коэффициент запаса. Коэффициент находится в пределах от 1,25 до 1,5 и зависит от точности реле.

Кроме того, уставку токовой отсечки отстраивают от бросков намагничивающего тока силового трансформатора, который появляется при его включении:  $I_{с.з.} > I_{нам}$ , при  $I_{нам} > (3-5)I_{ном. тр}$ , где  $I_{ном. тр}$  – номинальный ток трансформатора.

### 3.2.3. Дифференциальная защита трансформатора

Для выполнения дифференциальной защиты с двух сторон силового трансформатора устанавливаются трансформаторы тока, определяя зону защиты, в которую входят выводы трансформатора и его обмотки (рис. 34).

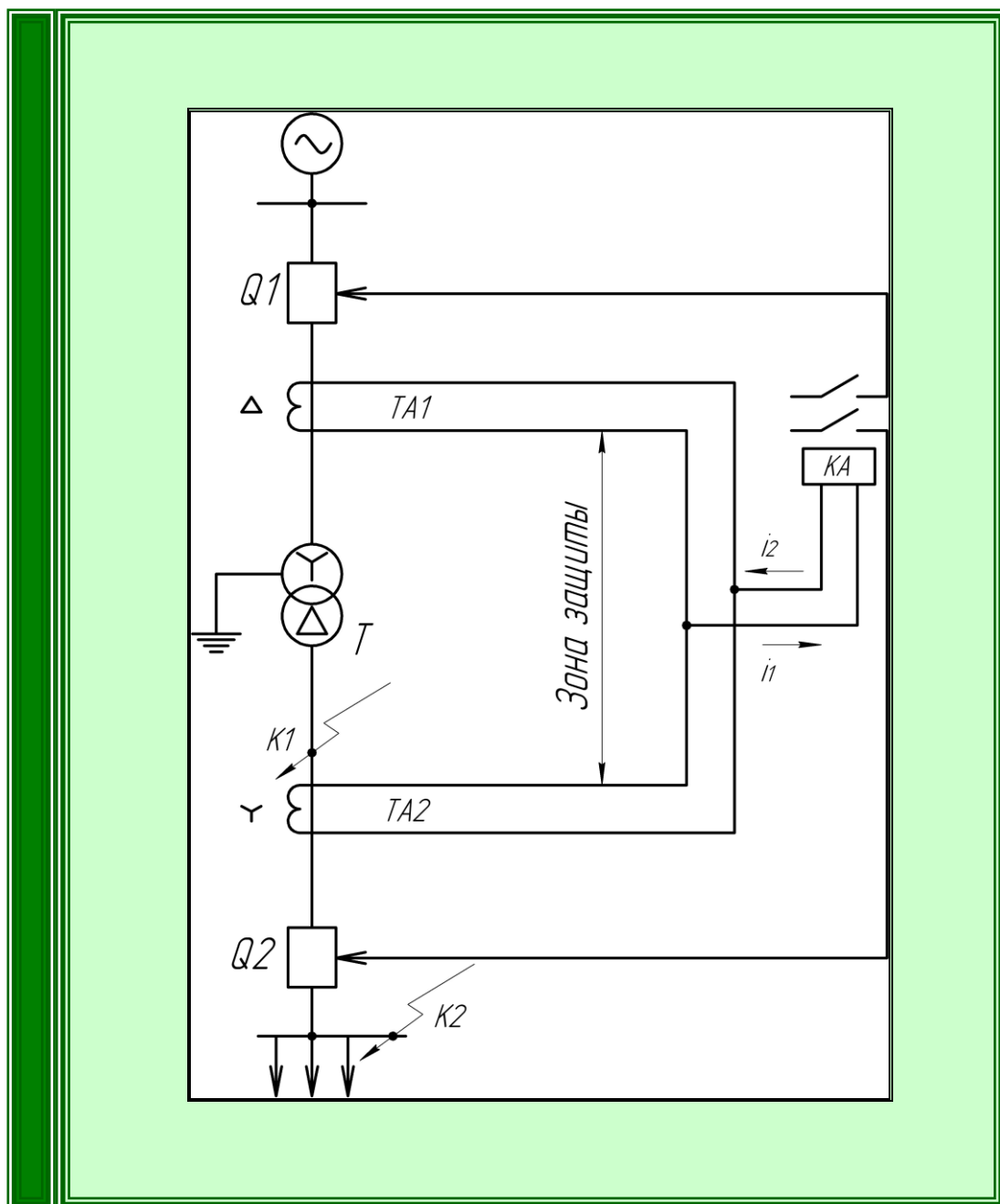


Рис. 34. Дифференциальная защита трансформатора

Особенностью дифференциальной защиты трансформаторов является то, что при соединении обмоток трансформатора по схеме **звезда – треугольник** мы получаем одиннадцатую группу соединения, т.е. сдвиг между ЭДС и токами первичной и вторичной обмоток в 330 градусов. В результате под действие разности ЭДС  $\Delta E$  появляется уравнивающий ток, который будет протекать через дифференциальное реле даже в нормальном режиме, что и приведет к срабатыванию защиты. Для компенсации сдвига токов по фазе обмотки трансформаторов тока со стороны **звезды** соединяются **треугольником**, а со стороны **треугольника** **звездой**. Такое соединение обмоток трансформатор тока обеспечивает компенсацию между первичными и вторичными токами силового трансформатора и при симметричной и при несимметричной нагрузке.

При коротком замыкании в не зоны защиты (точка К2) через реле *КА* протекает разность вторичных токов равная нулю. Защита не срабатывает. При коротком замыкании в зоне защиты (точка К1) через реле *КА* протекает сумма вторичных токов и дифференциальная защита срабатывает.

Для того, чтобы дифференциальную защиту можно было отстроить от бросков намагничивающего тока силового трансформатора, схемы защиты выполняются на основе дифференциального реле тока типа РНТ и ДЗТ, которые не чувствительны к апериодической составляющей тока короткого замыкания и к несимметричным токам намагничивания трансформаторов.

### ***3.3. Расчет релейной защиты трансформатора заводской подстанции***

По условию технического задания необходимо выполнить **расчет максимальной токовой защиты** и **дифференциальной токовой защиты** двухобмоточного трансформатора **мощностью 63 МВА** и **напряжением 110/10 кВ**. Источником питания является энергосистема мощностью 3000 МВА с

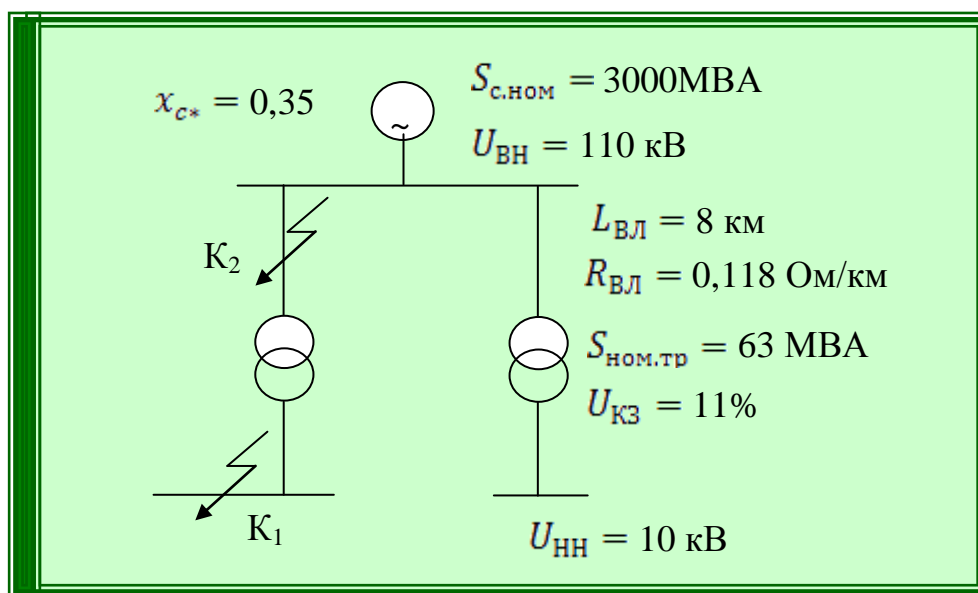
сопротивлением  $x_{c*} = 0,35$  о.е. Трансформатор связан с энергосистемой воздушной линией протяженностью 8 км. Линия выполнена проводом, сечение которого соответствует сопротивлению  $R_{ВЛ} = 0,118$  Ом/км.

Определяется **максимальный длительный ток** в первичной и вторичной обмотке трансформатора:

$$I_{\maxВН} = \frac{0,3-1,4 \cdot S_{\text{ном.тр.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{1,4 \cdot 63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 463,44 \text{ А};$$

$$I_{\maxНН} = \frac{0,3-1,4 \cdot S_{\text{ном.тр.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} = \frac{1,4 \cdot 63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5098,3 \text{ А}.$$

Составляется **расчетная схема** (рис. 35).



**Рис. 35. Расчетная схема**

Проставляем на расчетной схеме точки короткого замыкания  $K_1$  и  $K_2$ . Составляем схему замещения для каждой точки (рис. 36). Определяем индуктивное сопротивление всех элементов цепи, через которые протекает ток короткого замыкания. **Сопротивление воздушной линии** длиной 8 км составляет:

$$X_{ВЛ} = X_{0ВЛ} \cdot L \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{НОМ}^2} = 0,444 \cdot 8 \cdot \frac{3000}{110^2} = 0,881$$

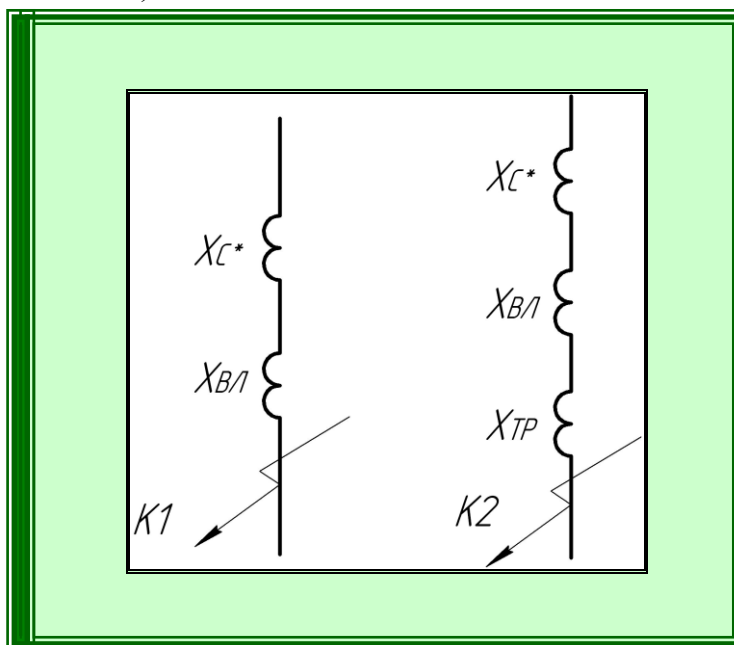
где  $X_{0ВЛ} = 0,444 \frac{Ом}{км}$  является индуктивным сопротивлением провода АС-240/

( $R_{ВЛ} = 0,118 \frac{Ом}{км}$ ).

**Сопротивление трансформатора** определяется по формуле:

$$X_{ТР} = \frac{U_{КЗ}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.ТР}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{3000}{63} = 5,2$$

где  $U_{КЗ}$  – напряжение короткого замыкания для трансформатора типа ТДН – 16000/110 (данные каталога).



**Рис. 36. Схемы замещения для точек К1 и К2**

**Результирующие сопротивления** для каждой точки определяется следующим образом.

$$X_{рез1} = X_{C*} + X_{ТР} = 0,35 + 0,881 = 1,23;$$

$$X_{рез2} = X_{C*} + X_{ВЛ} + X_{ТР} = 0,35 + 0,881 + 5,2 = 6,43.$$

За **базисное напряжение**  $U_{\sigma}$  принимаем напряжение той ступени системы электроснабжения, где находится точка короткого замыкания:

$$U_{\sigma 1} = 115 \text{ кВ};$$
$$U_{\sigma 2} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Определяем **базисный ток** на стороне высокого и низкого напряжения:

$$I_{\sigma 1} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma 1}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 15,06 \text{ кА};$$
$$I_{\sigma 2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma 2}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 165,2 \text{ кА}.$$

В системе неограниченной мощности периодическая составляющая тока в переходном режиме короткого замыкания остается практически неизменной.

Системой неограниченной мощности считается энергосистема, в которой при любых аварийных режимах напряжение на шинах энергосистемы остается практически неизменным. Находим **периодическую составляющую** тока короткого замыкания:

$$I_1'' = \frac{I_{\sigma 1}}{X_{рез1}} = \frac{15,06}{1,23} = 12,2 \text{ кА};$$
$$I_2'' = \frac{I_{\sigma 2}}{X_{рез2}} = \frac{165,2}{6,43} = 25,7 \text{ кА};$$

Определяем **ударный ток** короткого замыкания:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot k_{уд1} \cdot I_1'' = \sqrt{2} \cdot 1,608 \cdot 12,2 = 27,5 \text{ кА},$$
$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot k_{уд2} \cdot I_2'' = \sqrt{2} \cdot 1,369 \cdot 25,7 = 49,3 \text{ кА},$$

где  $k_{уд1}$  и  $k_{уд2}$  – ударные коэффициенты из справочных данных.

Находим **тепловой импульс** тока короткого замыкания:

$$B_{\kappa 1} = I_1''^2 \cdot (t_{отк} + T_a),$$



где  $t_{отк}$  – время, состоящее из времени отключения выключателя и времени срабатывания релейной защиты;  $T_a$  – время затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания. Определяется по справочным данным. Величина  $T_a$  зависит от места нахождения точки короткого замыкания в схеме электроснабжения. Если точка короткого замыкания находится за воздушной линией напряжением 110 кВ, то  $T_{a1} = 0,02$  с. При расположении точки короткого замыкания на распределительной сети напряжением 6 кВ время затухания аperiodической составляющей  $T_{a2} = 0,01$  с.

$$B_{к1} = I_1''^2 \cdot (t_{отк} + T_{a1}) = 12,2^2 \cdot (1,32 + 0,02) = 199,45 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$B_{к2} = I_2''^2 \cdot (t_{отк} + T_{a2}) = 25,7^2 \cdot (1,32 + 0,01) = 885 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

**Выбираем трансформаторы тока** напряжением 110 кВ и 6 кВ по четырем параметрам:  $U_{уст}$ ,  $I_{maxBH}$ ,  $i_{уд}$  и  $B_k$ .

**Тип трансформатора ТФЗМ 110Б-ПУ1.** Обоснование выбора сведено в таблицу:

Расчётные данные	Паспортные
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
$I_{maxBH} = 463,44 \text{ А}$	$I_{ном} = 600 \text{ А} / 5 \text{ А}$
$i_{уд1} = 27,5 \text{ кА}$	$i_{дин} = 126 \text{ кА}$
$B_{к1} = 199,45 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 26^2 \cdot 3 = 2028 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

**Тип трансформатора ТШВ - 15.** Обоснование выбора также сведено в таблицу:

Расчётные данные	Паспортные
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_{maxHH} = 5098,3 \text{ А}$	$I_{ном} = 6000 \text{ А} / 5 \text{ А}$
$i_{уд2} = 49,3 \text{ кА}$	$i_{дин} = 100 \text{ кА}$
$B_{к2} = 885 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Определяем **ток срабатывания максимальной токовой защиты** на стороне высокого и низкого напряжения трансформатора:

$$I_{срабВН} = \frac{k_{зап} \cdot k_n \cdot k_{сх} \cdot I_{\max ВН}}{k_B \cdot k_{ТТВН}};$$

$$I_{срабНН} = \frac{k_{зап} \cdot k_n \cdot k_{сх} \cdot I_{\max НН}}{k_B \cdot k_{ТТВН}};$$

где  $k_{зап}$  – коэффициент самозапуска двигателя, учитывающий бросок тока при пуске двигателей. Так как к линии не подключены двигатели, то  $k_{зап} = 1$ ;  $k_n$  – коэффициент надежности отстройки защиты, принимаем равным 1,5;  $k_{сх}$  – коэффициент схемы соединения трансформаторов тока. Обмотки трансформаторов тока на высокой и низкой стороне соединены по схемам полной и неполной звезды соответственно, поэтому  $k_{сх} = 1$  и в том и в другом случае;  $k_B$  – коэффициент возврата реле, принимаем равным 0,85;  $k_{ТТ}$  – коэффициент трансформации трансформатора тока.

$$I_{срабВН} = \frac{k_{зап} \cdot k_n \cdot k_{сх} \cdot I_{\max ВН}}{k_B \cdot k_{ТТВН}} = \frac{1 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 463,4}{0,85 \cdot 120} = 6,82 \text{ А};$$

$$I_{срабНН} = \frac{k_{зап} \cdot k_n \cdot k_{сх} \cdot I_{\max НН}}{k_B \cdot k_{ТТВН}} = \frac{1 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 5098,3}{0,85 \cdot 600} = 7,4 \text{ А}.$$

**Расчет дифференциальной токовой защиты** трансформатора начинаем с **определения тока силового трансформатора** на стороне высокого и низкого напряжения:

$$I_{ВН} = \frac{S_{ном.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 316,6 \text{ А};$$

$$I_{НН} = \frac{S_{ном.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 5517,6 \text{ А}.$$

Определяем **вторичный ток** в плечах дифференциальной токовой защиты:

$$I_{2BH} = \frac{I_{BH} \cdot k_{cx}}{k_{ТТВН}} = \frac{316,6 \cdot \sqrt{3}}{120} = 4,6A;$$

$$I_{2НН} = \frac{I_{НН} \cdot k_{cx}}{k_{ТТНН}} = \frac{5517,6 \cdot 1}{1200} = 4,6A.$$

Определяем **ток небаланса**:

$$I_{нб} = k_a \cdot k_{одн} \cdot f \cdot I_{КЗ\max},$$

где  $k_a$  – коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей тока короткого замыкания. Так как мы выбираем для ДТЗ дифференциальные реле типа РНТ-565 в основе которых быстронасыщающиеся трансформаторы, то принимаем  $k_a = 1$ .  $k_{одн}$  – коэффициент однотипности условий работы трансформаторов тока. Если трансформаторы тока обтекаются близкими по значению токами, то  $k_{одн} = 0.5$ , в остальных случаях – 1.  $f$  – погрешность трансформатора тока, удовлетворяющая десятипроцентной кратности, и соответственно равная 0,1.  $I_{КЗ\max}$  – наибольший трехфазный ток короткого замыкания при внешнем (сквозном) коротком замыкании. Выбираем наибольший ток среди рассчитанных периодических составляющих тока короткого замыкания и определяем ток небаланса:

$$I_{нб} = k_a \cdot k_{одн} \cdot f \cdot I_{КЗ\max} = 1 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 25700 = 1285 A.$$

Определяем **ток срабатывания реле** по условию отстройки от тока небаланса с коэффициентом надежности 1,3 и без учета коэффициента возврата реле:

$$I_{сраб.р} = k_{зан} \cdot k_n \cdot k_{cx} \cdot I_{нб} \cdot \frac{1}{k_{ТТ}}.$$

**Коэффициент схемы** и трансформации тока выбирается по условию выбора тока короткого замыкания максимума. На какой стороне выбирается ток, на той стороне и выбирается коэффициент.

$$I_{сраб.р} = k_{зан} \cdot k_n \cdot k_{cx} \cdot I_{нб} \cdot \frac{1}{k_{ТТ}} = \frac{1 \cdot 1,3 \cdot 1285}{1200} = 1,4 A.$$

Определяем **число витков основной** (дифференциальной) обмотки трансформатора БНТ реле РНТ-565:

$$W_{1расч} = \frac{F}{I_{сраб.р}} = \frac{100}{1,4} = 71,4 = 71 \text{ ВИТОК}$$

Находим **число витков вторичной** обмотки быстронасыщающегося трансформатора:

$$W_{2расч} = \frac{W_{1расч} \cdot I_{2BH}}{I_{2HH}} = \frac{71,4 \cdot 4,6}{4,6} = 71,4$$

Определяем **уточненный ток небаланса**:

$$I'_{нб.расч} = \frac{(W_{1расч} - W_1) \cdot I_{K3 \max}}{W_{1расч}} = \frac{(71,4 - 71) \cdot 1285}{71,4} = 7,2 \text{ A.}$$

**Суммарный ток небаланса:**

$$I_{нб \Sigma} = I_{нб} + I'_{нб.расч} = 1285 + 7,2 = 1292,2 \text{ A.}$$

Определяем **уточненный ток срабатывания** реле:

$$I'_{сраб.р} = \frac{k_{зан} \cdot k_n \cdot k_{сх} \cdot I_{нб \Sigma}}{k_{ТТ}} = \frac{1 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 1292,2}{1200} = 1,6 \text{ A.}$$

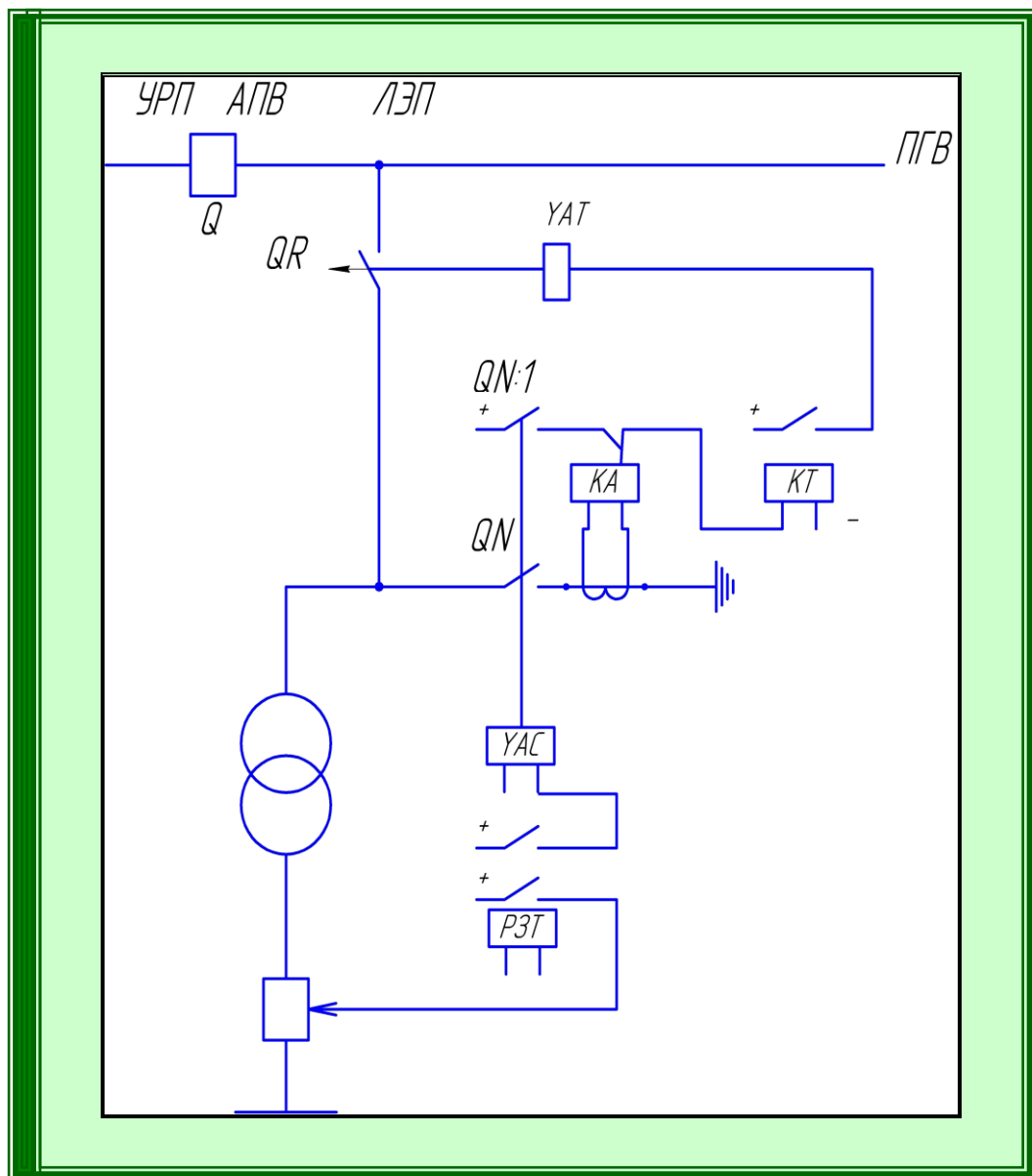
Определяем **коэффициент чувствительности**:

$$I_{K3 \min} = I_{K3 \max} - 0,03 \cdot I_{K3 \max} = 25700 - 771 = 24929 \text{ A.}$$

$$k_{\chi} = \frac{I_{K3 \min}}{I'_{сраб.р} \cdot k_{ТТ}} = \frac{24929}{1,6 \cdot 1200} = 13 > 1,5$$

### 3.4. Защита трансформаторов, включенных по упрощенной схеме коммутации

**Упрощенная схема коммутации** (на отделителях и короткозамыкателях) выполняется, как правило, на высокой стороне подстанций глубокого ввода ПГВ, а также на подстанциях, выполненных по блочной схеме. Защита трансформаторов включенных по упрощенной схеме приведена на рисунке 37.



**Рис. 37. Защита трансформатора по упрощенной схеме коммутации**

Рассмотрим **процесс отключения трансформатора**. По команде релейной защиты трансформатора РЗТ с помощью электромагнита  $YAC$  замыкается контакт короткозамыкателя  $QN$ , замыкая одну из фаз на землю. В сети начинает протекать ток короткого замыкания, к которому чувствительна защита на узловой подстанции УРП. Выключатель  $Q$  отключает всю транзитную линию электропередач ЛЭП. В эту бестоковую паузу автоматически срабатывает отделитель  $QR$ , отключая трансформатор от ЛЭП. Следом устройство АПВ повторно включает линию.

Реле тока  $KA$  необходимо для того, чтобы отделитель  $QR$  срабатывал только в том случае, если в линии нет тока короткого замыкания. В момент замыкания ножа короткозамыкателя  $QN$  срабатывают и его блок-контакты  $QN:1$ , и если контакты реле  $KA$  замкнуты, то питание поступает на электромагнит  $YAT$ , который отключит отделитель  $QR$ .

Для предотвращения отключения отделителя  $QR$  раньше, чем будет отключена линия, в схеме устанавливается реле времени  $KT$ , выдержка времени которого должно составлять от 0,2 до 0,3с. Теперь, если блок-контакты  $QN:1$  замкнутся раньше, чем сработает нож короткозамыкателя, (контакты реле  $KA$  замкнуты) импульс на срабатывание отделителя поступит с гарантированной задержкой.

Для срабатывания короткозамыкателя и отделителя необходимо использовать независимые источники питания, т.к. питающая линия отключена.

### ***3.5. Защита электрических двигателей***

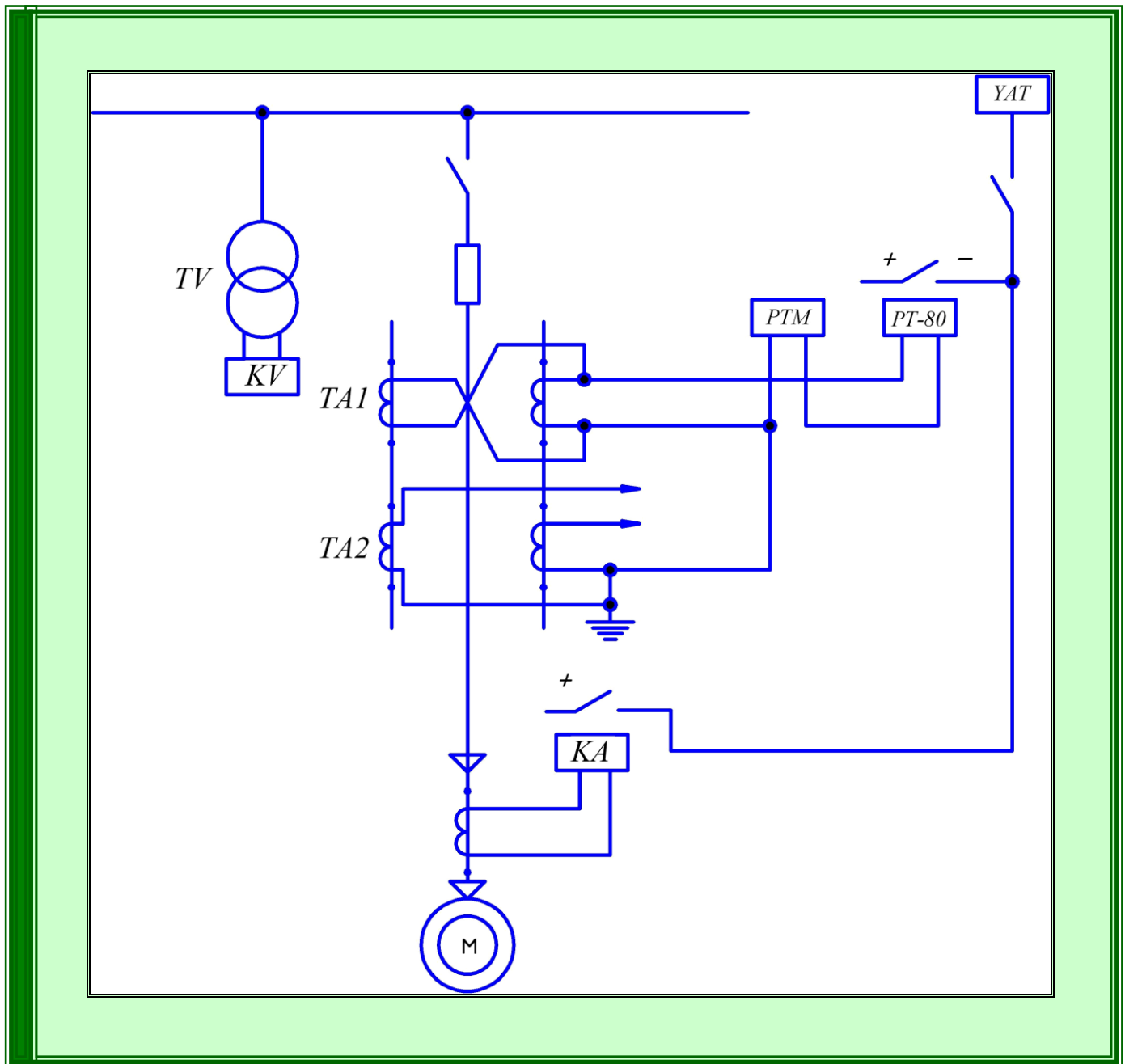
Защита электродвигателей должна быть чувствительна не только к внутренним повреждениям, но и к различным аномальным режимам. Рассмотрим основные повреждения в двигателях и способы защиты от них.

***Замыкание между фазами обмотки статора.*** Для защиты обычно используется токовая отсечка, которая отстраивает от пускового тока. Для двигателей мощностью 2000 кВт возможно использование дифференциальной токовой защиты ДТЗ. Для двигателей мощностью 5000 кВт и выше ДТЗ обязательна. Если двигатели выполнены на напряжение, меньшее 500 В, то защита от коротких замыканий осуществляется предохранителями.

***Снижение питающего напряжения.*** Двигатель отключается при снижении напряжения сети в диапазоне от 70 до 80% от номинального значения. Защита от снижения напряжения выполняется с помощью трансформатора напряжения и реле напряжения без выдержки времени. Схема защиты высоковольтного асинхронного двигателя представлена на рисунке 39.

***Замыкание одной из фаз на землю (на корпус).*** Защита выполняется с помощью индукционного реле типа РТ – 80, при условии, что ток замыкания на землю в двигателях до 2000 кВт больше 5 А, а у двигателей свыше 2000 кВт больше 10 А. Защита от замыканий на землю срабатывает без выдержки времени выполняется с помощью трансформаторов тока, причем трансформаторы соединяются по схеме «восьмерка».

***Перегрузка.*** Защита отстраивается по времени спада пускового тока.



**Рис. 38. Схема защиты высоковольтного асинхронного двигателя**

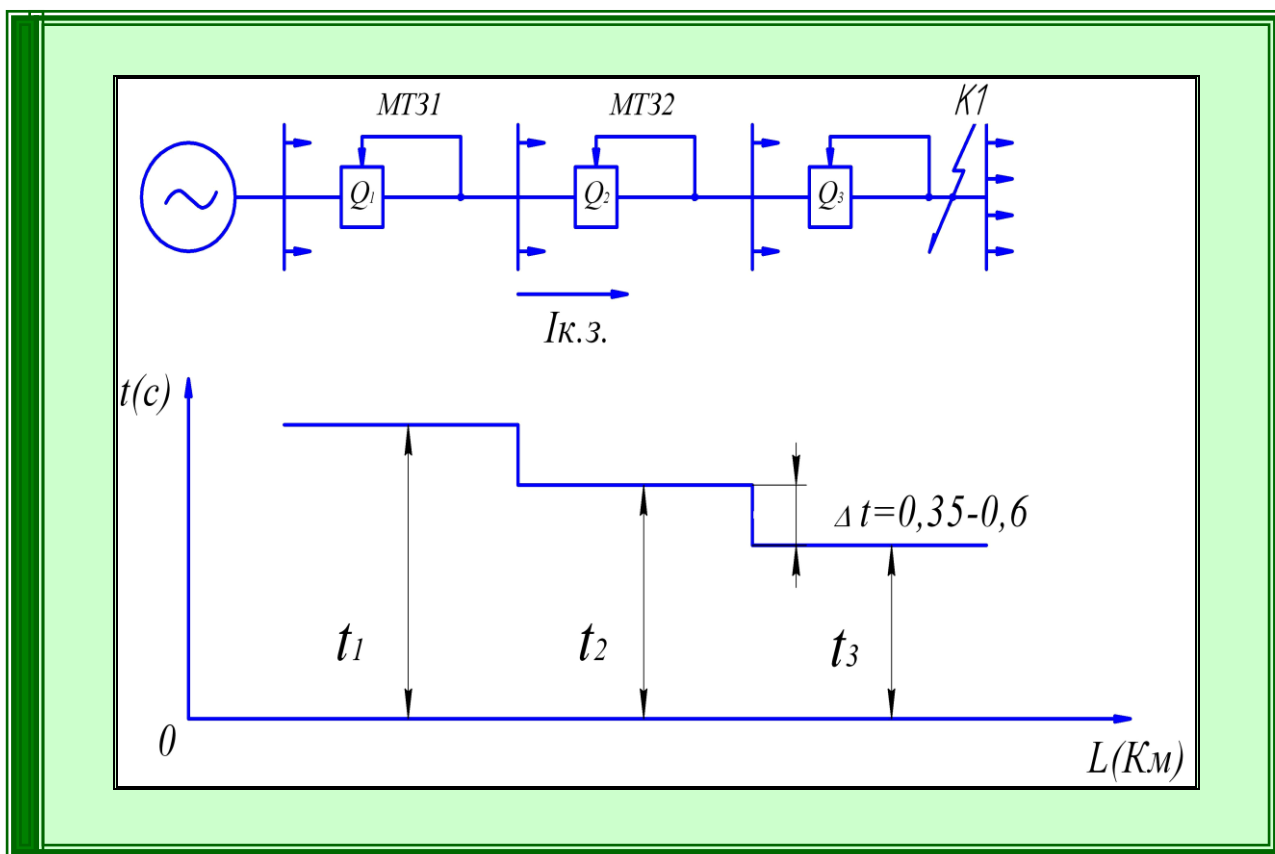


## 4. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ

### 4.1. Защита линий электропередач с односторонним питанием

Для защиты линий с односторонним питанием используют комплекты максимальной токовой защиты МТЗ с реле косвенного действия, которая **устанавливается в начале каждого участка линии.**

Поскольку МТЗ срабатывает с выдержкой времени, то каждая защита отстраивается по ступенчатому принципу согласно диаграмме (рис. 39).



**Рис. 39. Ступенчатый принцип определения выдержки времени**

При коротком замыкании в точке К1 срабатывают максимальные токовые защиты на всех трех участках, т.к. ток короткого замыкания притекает в точку

короткого замыкания от источника. Поскольку третья защита имеет наименьшую выдержку времени, то она срабатывает первой, отключая третий участок линии электропередач. Остальные защиты возвращаются в исходное положение, не успев воздействовать. Таким образом произошло селективное отключение третьего участка цепи.

Все защиты отстраиваются с учетом ступени селективности, которая должна составлять 0,35 – 0,6 с.

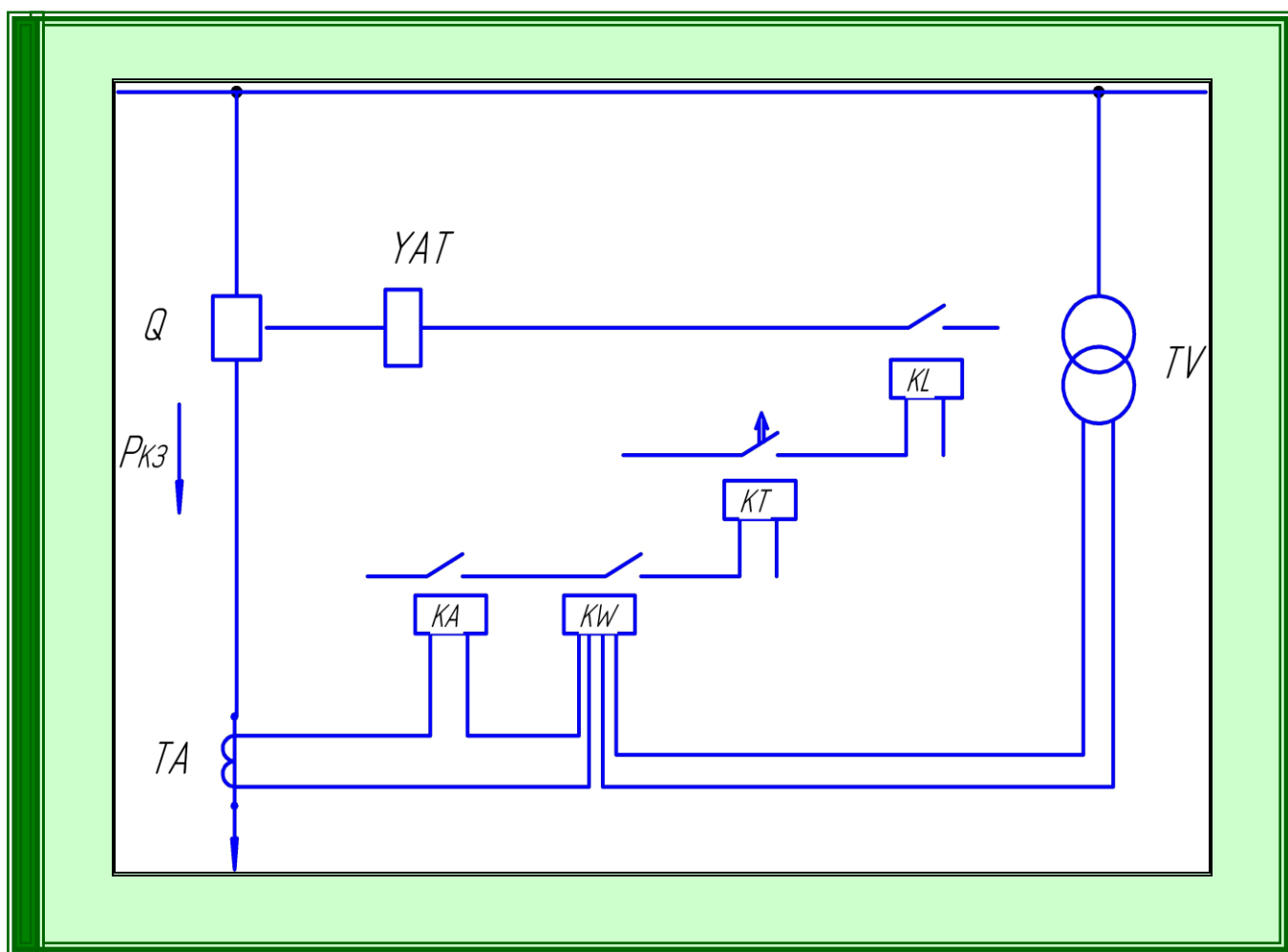
#### ***4.2. Защита линий электропередач с двухсторонним питанием (направленная защита)***

В электроэнергетических системах, как правило, все элементы сети оказываются закольцованными, при этом любой участок линии электропередач получает питание с двух сторон. При коротком замыкании в любой точке линии, ток короткого замыкания в эту точку притекает с двух сторон, поэтому обычная максимальная токовая защита оказывается не чувствительной. В таких сетях используется направленная МТЗ, которая действует только при определенном направлении мощности короткого замыкания и выполняется на основе реле направления мощности индукционного типа **РБМ – 170** (рис. 40).

Комплекты направленной МТЗ устанавливаются **в начале и в конце** каждого защищаемого участка, при этом реле РБМ отстраиваются на направление мощности тока короткого замыкания, т.е. каждое реле срабатывает при направлении мощности к.з. от шин подстанции в линию.

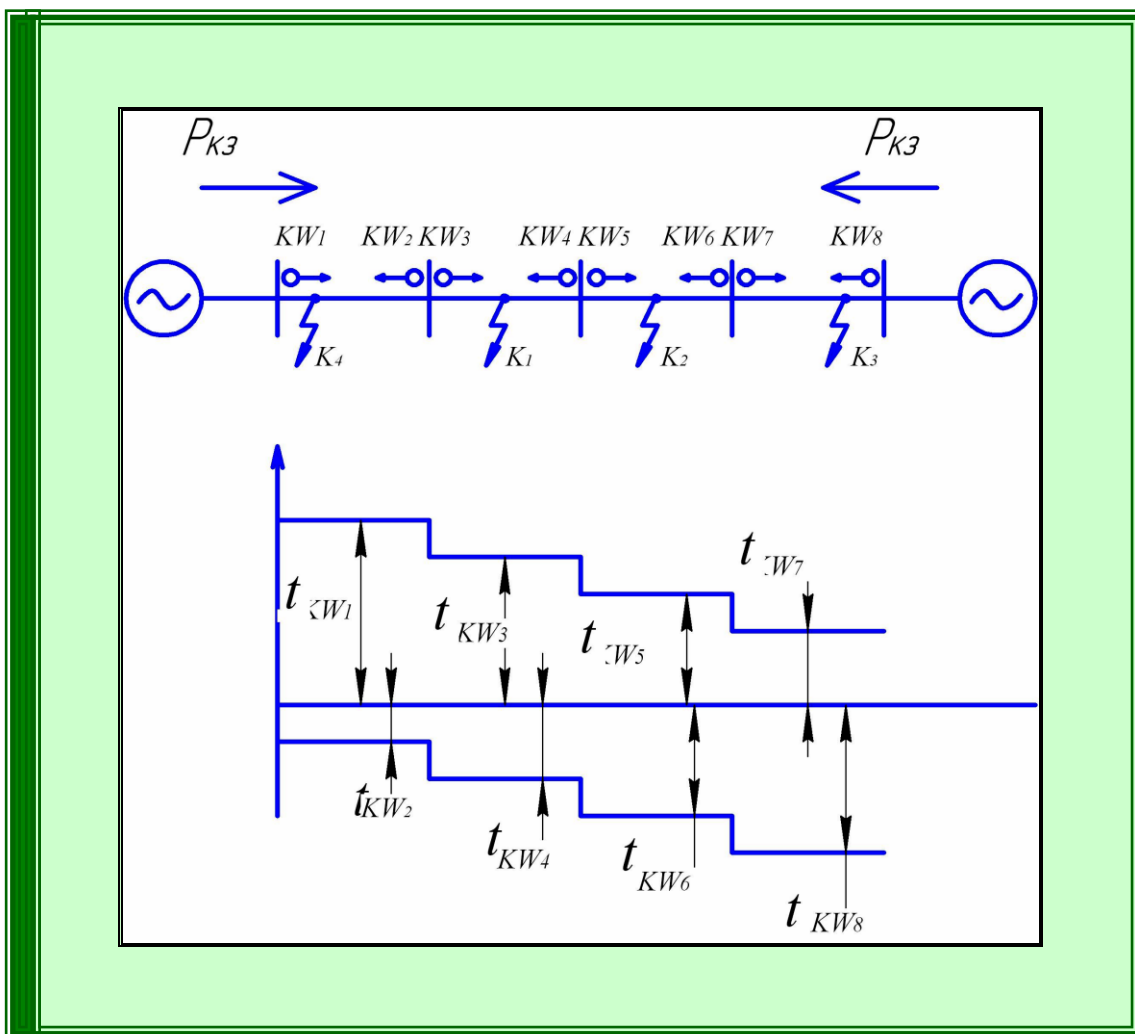
**Пусковым органом защиты**, разрешающим ее работу, является реле тока  $K_A$ , которое замыкает контакты при наличии тока короткого замыкания. Затем должно срабатывать реле мощности  $K_W$ , катушка напряжения которого подключается через трансформатор напряжения к шинам подстанции, а токовая катушка через трансформатор тока в защищаемую линию. Это реле замкнет контакты при условии направления мощности от шин подстанции в линию.

Сигнал с реле мощности поступает на реле времени. Затем срабатывает промежуточное реле *KL* и электромагнит отключения *YAT*.



**Рис. 40. Схема направленной защиты**

Выдержка времени для каждого реле отстраивается у каждого комплекта индивидуально из условия селективности. Диаграмма выдержек времени представлена на рисунке 42. При коротком замыкании в точке К1 срабатывают защиты *KW1*, *KW3*, *KW4*, *KW6*, *KW8*, но наименьшую отстройку по времени имеют защиты *KW3* и *KW4*, поэтому они срабатывают первыми, отключив второй участок линии. Остальные защиты вернуться в исходное положение.

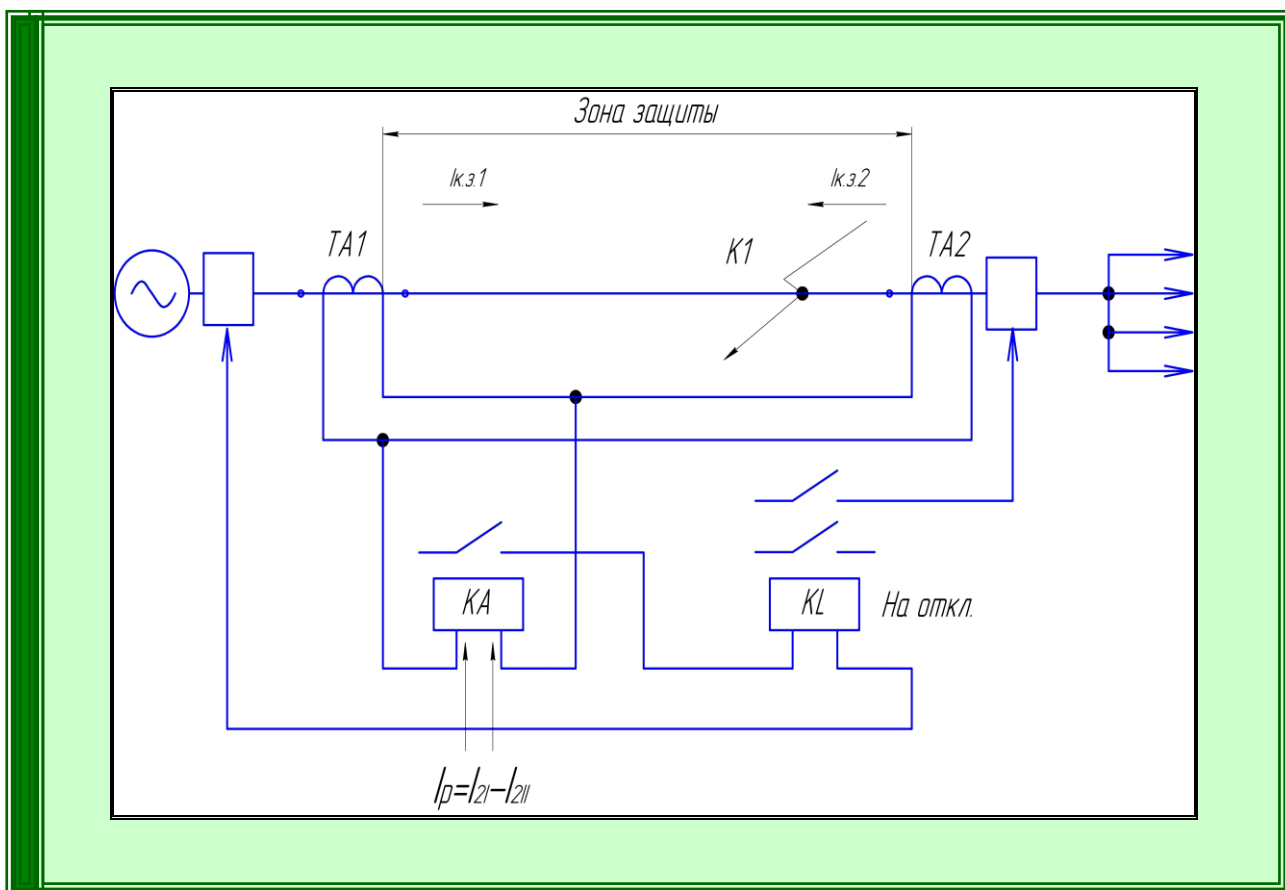


**Рис. 41. Диаграмма отстройки направленной защиты линии**

### **4.3. Продольная дифференциальная токовая защита линии с односторонним питанием**

Дифференциальная защита обеспечивает отключение короткого замыкания в зоне защиты без выдержки времени. **Существует два вида дифференциальных токовых защит ДТЗ – продольная и поперечная.**

Дифференциальная защита ДТЗ линий с односторонним и двухсторонним питанием выполняются по разным принципам. Для выполнения **продольной** ДТЗ в начале и конце линии устанавливаются трансформаторы тока  $TA1$  и  $TA2$  (рис. 42). Вторичные обмотки трансформаторов соединяются между собой специальными контрольными кабелями.



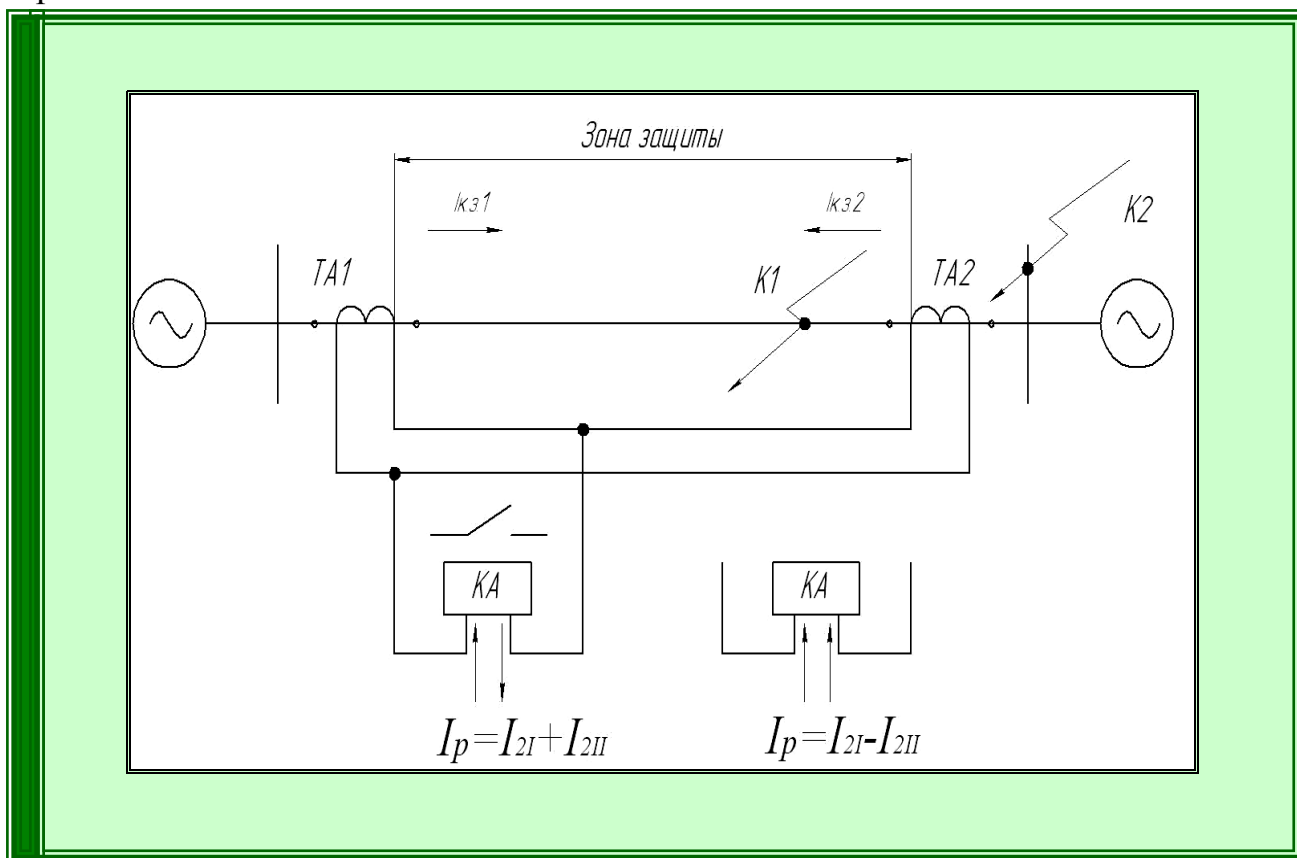
**Рис. 42. Схема продольной защиты линии с односторонним питанием**

При коротком замыкании в зоне защиты (точка  $K1$ ) ток в точку к.з. притекает с одной стороны, через реле тока  $KA$  или дифференциальное реле протекает разность токов вторичных обмоток трансформаторов  $TA$ , эта разность не равна нулю и защита срабатывает. При коротком замыкании вне зоны защиты (точка  $K2$ ) трансформаторы  $TA$  обтекаются практически одинаковыми токами, разность токов через реле равна нулю – защита к ним не чувствительна.

**К достоинствам** дифференциальной защиты относится быстродействие и надежность. К недостаткам можно отнести возможность ложного срабатывания при обрыве одного из контрольных кабелей и ее высокую стоимость.

#### 4.4. Продольная ДТЗ линии с двухсторонним питанием

В отличие от линий с односторонним питанием, при коротком замыкании в зоне защиты, **токи к.з. притекают в точку короткого замыкания с двух сторон**, вторичные токи трансформаторов  $TA$  протекают через обмотку реле тока  $KA$  в одном направлении, поэтому они складываются и защита срабатывает (рис. 43). При коротком замыкании вне зоны защиты (в точке  $K2$ ) вторичные токи трансформаторов  $TA$  протекающие через обмотку реле тока  $KA$  встречного направления, поэтому через реле равен их разности и защита не срабатывает.



**Рис. 43. Схема продольной ДТЗ линии с двухсторонним питанием**

Поскольку трансформаторы тока  $TA$  так или иначе отличаются друг от друга, то во вторичной цепи циркулируют токи небаланса от которых необходимо защиту отстраивать. Для уменьшения тока небаланса необходимо выбирать трансформаторы тока с идентичными характеристиками

намагничивания, а также специальные трансформаторы для дифференциальных защит класса Д.

#### 4.5. Поперечная дифференциальная защита линии

Поперечная дифференциальная защита устанавливается на **параллельных кабельных** или **воздушных** линиях, имеющих одинаковое сопротивление. В линиях с односторонним питанием защита устанавливается со стороны источника питания (рис. 44).

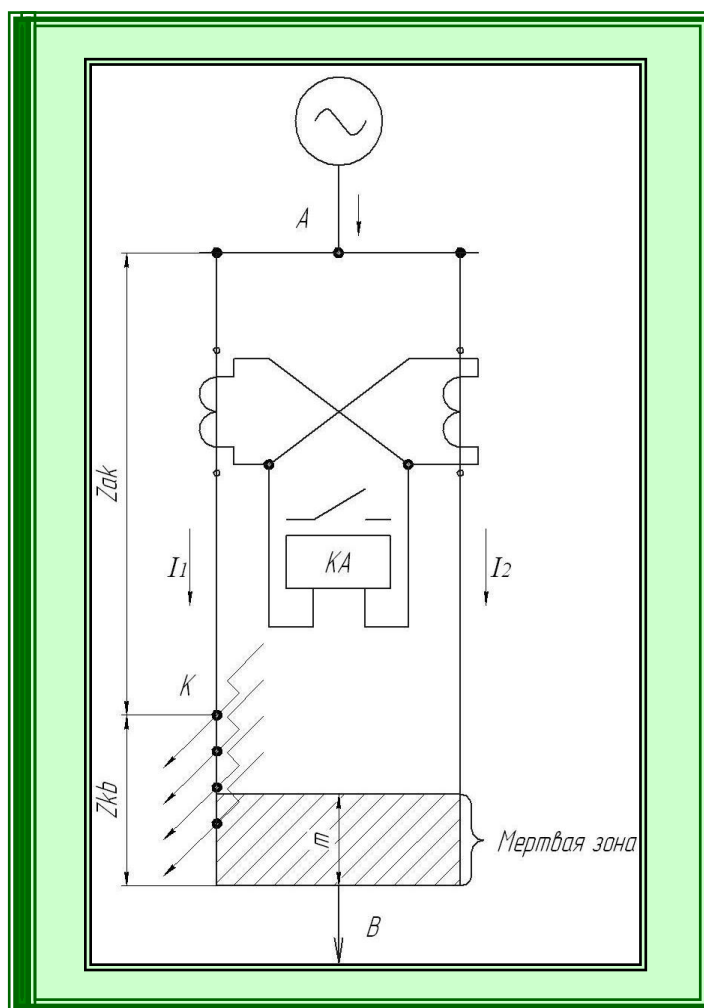


Рис. 44. Схема поперечной ДТЗ линии

Поперечная защита не реагирует на внешние короткие замыкания и токи нагрузки, поэтому ее выполняют без выдержки времени и не отстраивают от токов нагрузки.

При коротком замыкании в точке  $K$  токи  $I_1$  и  $I_2$  притекают в эту точку с двух сторон, причем соотношение токов и сопротивлений будет пропорционально:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{z_2}{z_1},$$

где  $Z_1 = Z_{\text{л}} - Z_{\text{кв}}$ ;  $Z_2 = Z_{\text{л}} + Z_{\text{кв}}$ ;  $Z_{\text{л}}$  – полное сопротивление линии.

С перемещением точки короткого замыкания к шинам подстанции  $B$  изменяются соотношение сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$ :  $Z_1$  растет, а  $Z_2$  уменьшается. Соответственно и изменяется соотношение токов  $I_1$  и  $I_2$ :  $I_1$  уменьшается,  $I_2$  – растет.

Ток через реле тока определяется  $I_p = I_1 - I_2$ , поэтому ближе к шинам подстанции  $B$  снижается до нуля. Ток срабатывания защиты оказывается больше, чем ток в реле защиты  $I_{\text{с.з.}} > I_p$ . Граница зоны защиты определяется участком шириной  $m$ . Эта **мертвая зона** является недостатком поперечной защиты, т.к. требуется установка дополнительной релейной защиты шин подстанции  $B$ .



## 5. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АВТОМАТИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

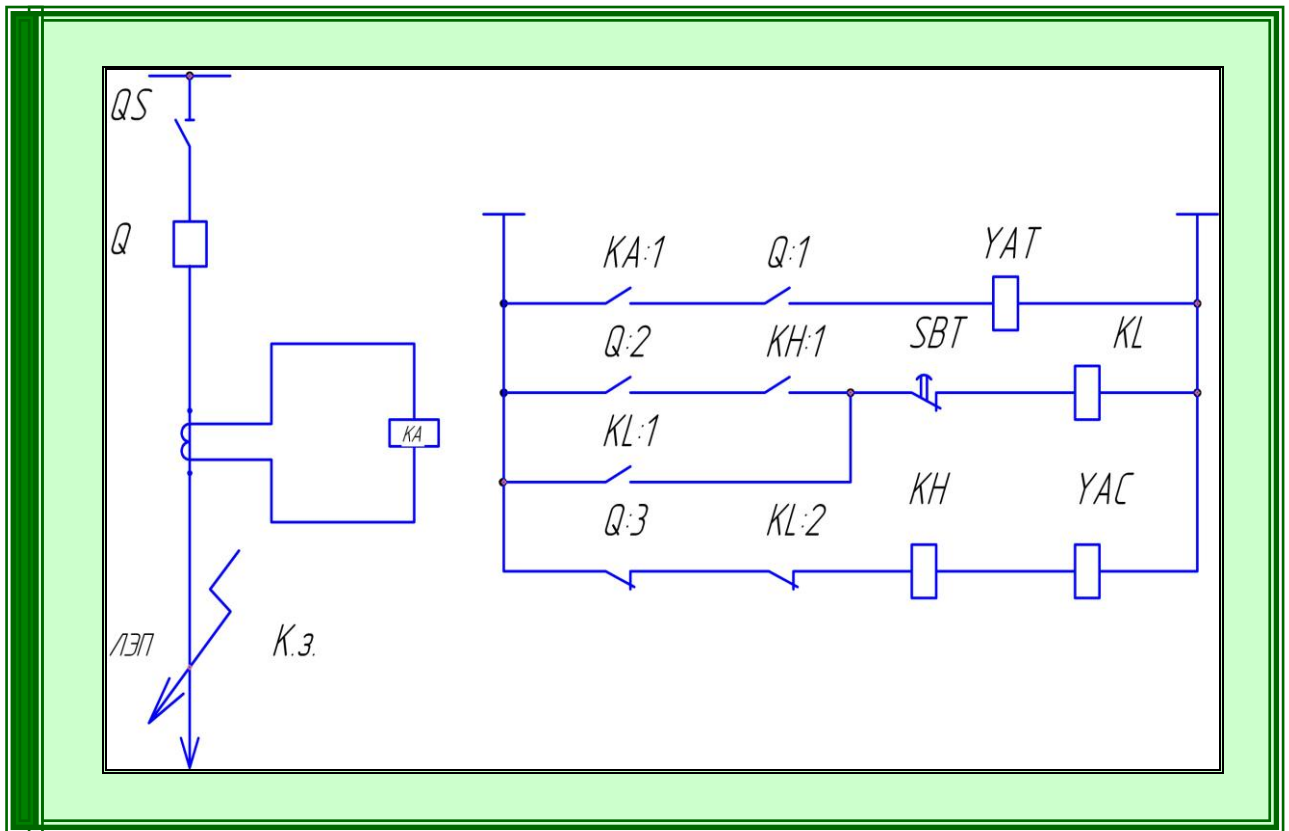
Наибольшее распространение в системах электроснабжения получили следующие виды автоматики:

- автоматическое включение резерва АВР,
- автоматическое повторное включение АПВ,
- автоматическая частотная разгрузка АЧР,
- автоматическая разгрузка по току АРТ,
- автоматика в схемах компенсирующих устройств.

### *5.1. Автоматическое повторное включение*

Автоматическое повторное включение **АПВ** служит для обеспечения надежности электроснабжения потребителей. В электрических сетях возможны **самоустраняющиеся короткие замыкания**, обусловленные схлестыванием воздушных проводов при ветре, различными набросами на провода, закорачиванием воздушных изоляционных промежутков, птицами, животными и пр. Автоматика повторно включает электроустановку, восстанавливая схему электроснабжения. АПВ используется в схемах упрощенной коммутации трансформаторов на подстанциях.

Автоматическое повторное включение делят на однократные, двукратные и многократные. Наименьшее время срабатывания АПВ 0,5 – 1,5 с. Схема однократного АПВ линии представлена на рисунке 45.



**Рис. 45. Схема однократного АПВ линии**

Контроль за током в линии осуществляет реле тока  $KA$ , подключаемое в линию через трансформатор тока  $TA$ . При коротком замыкании в линии катушка реле получает возбуждение и его контакты  $KA:1$  в цепи 1 замыкаются, электромагнит отключения  $YAT$  получает питание и выключатель  $Q$  срабатывает, отключая линию. Блок-контакты выключателя  $Q:3$  в цепи 4 замыкаются, питание приходит на указательное реле  $KH$ , которое замыкает свои контакты в цепи 2 и на электромагнит включения  $YAC$ , который включает выключатель. При этом размыкаются его блок-контакты  $Q:3$  и замыкаются  $Q:2$ . Питание получает катушка промежуточного реле  $KL$ , его контакты  $KL:1$  ставят себя на самопитание, а контакты  $KL:2$  разрывает цепь питания электромагнита отключения  $YAC$ . Сделано это для того, чтобы **в случае включения линии на устойчивое короткое замыкание** она была отключена защитой и повторного включения выключателя не произошло.

Для приведения схемы однократного АПВ в исходное положение, необходимо кнопкой  $SBT$  разорвать цепь питания катушки промежуточного реле  $KL$ .

## 5.2. Автоматическое включение резерва

Во всех случаях, когда перерыв в электроснабжении недопустим, должно предусматриваться автоматическое включение резервного питания (АВР). В электрических сетях и энергосистемах эффективность действия АВР составляет 90-95 %, что и обуславливает его широкое применение. Устройство АВР может выполняться как на оперативном переменном так и на оперативном постоянном.

Действие АВР **должно быть однократным**. Пусковым органом схемы является реле минимального напряжения, которое обеспечивает запуск схемы АВР при исчезновении напряжения на питающем источнике.

**Схема АВР выполняется в одном из двух вариантов:**

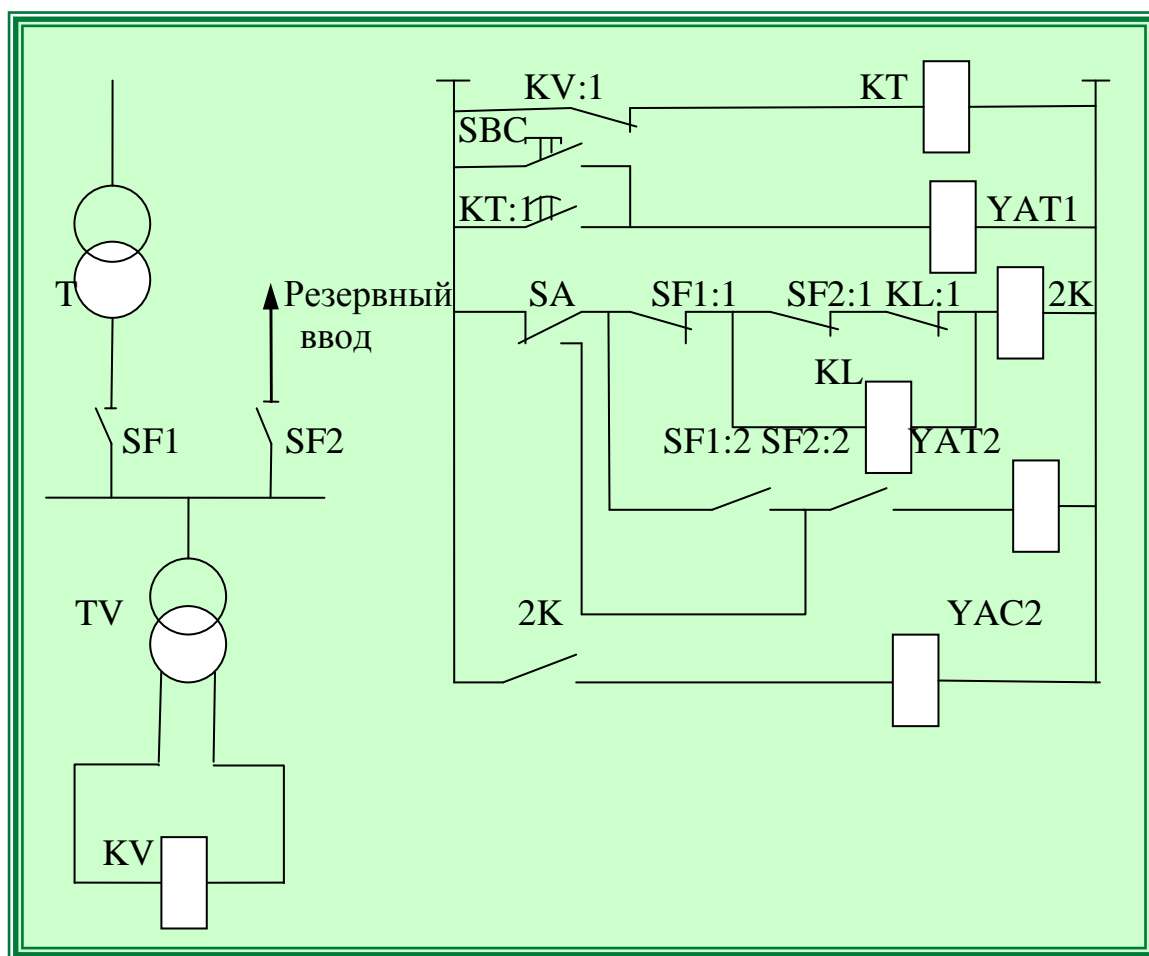
**1. В случае питания потребителей от двух независимых источников, когда шины низкого напряжения секционированы, переключение с одной секции шин на другую осуществляется с помощью секционного выключателя оснащенного устройством АВР.**

**2. Все электропотребители питаются от одного рабочего ввода. На резервном вводе от соседней подстанции устанавливается устройство АВР. Схема АВР не должна работать до отключения выключателя рабочего источника для предотвращения включения рабочего ввода на короткое замыкание.**

### 5.2.1. Схема АВР резервного ввода

Рассмотрим схему АВР, выполненную **на резервном вводе** (рис. 46). В нормальном режиме выключатель  $SF1$  включен,  $SF2$  – отключен, питание осуществляется от трансформатора  $T$ , контроль за напряжением на шинах осуществляет реле напряжения  $KV$ , включенное через трансформатор напряжения  $TV$ . При исчезновении напряжения на шинах, реле  $KV$  теряет

возбуждение и замыкает свои контакты в цепи 3, реле времени  $KT$  замыкает свои контакты  $KT:1$ , электромагнит отключения  $YAT1$  отключает автомат  $SF1$ . При этом блокконтакты  $SF1:1$  замыкаются. Питание получает блокировочное реле  $2K$ , которое замыкает свои контакты в цепи 7. Электромагнит включения  $YAC2$  включает выключатель  $SF2$  резервного ввода, при этом его блокконтакты  $SF2:1$  в цепи 4 размыкаются и блокировочная катушка реле  $2K$  оказывается включенной последовательно с высокоомной катушкой промежуточного реле  $KL$ .



**Рис. 46. Схема АВР резервного ввода**

Мощности для срабатывания контакта реле  $2K$  недостаточно. Выполнено это для того, чтобы **в случае включения резервного ввода на короткое замыкание** выключатель  $SF2$  был отключен защитой и повторного включения не произошло, т.к. цепь питания электромагнита включения  $YAC2$  разорвана

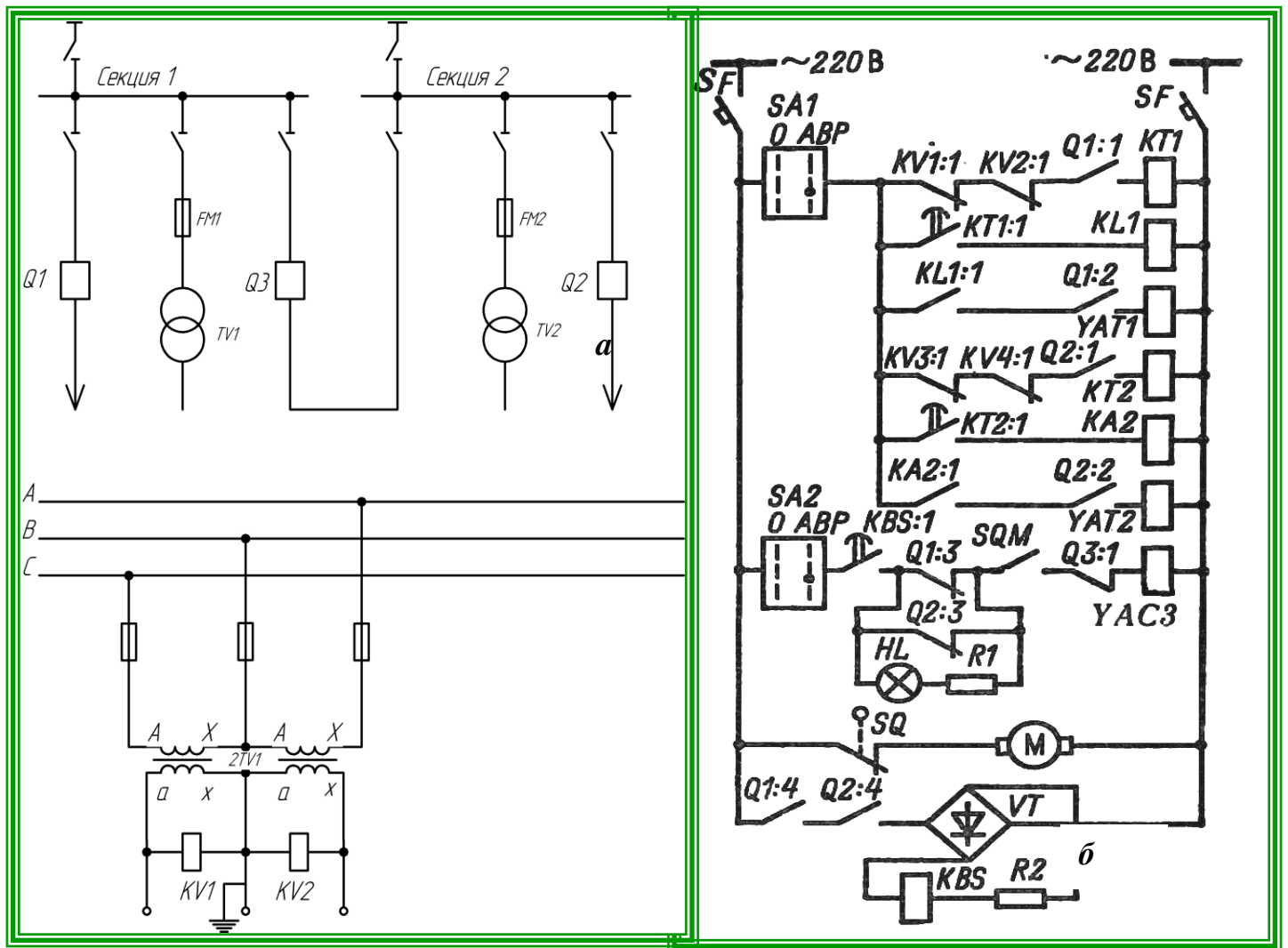
контактами реле  $2K$ . Переключатель  $SA$  служит для перевода схемы из ручного режима в автоматический. Для возвращения схемы в исходное положение так же служит переключатель  $SA$ , который обесточивает катушку промежуточного реле  $KL$ .

### 5.2.2. Схема АВР на секционном выключателе

Для приведения схемы автоматического включения резервы **на секционном выключателе в исходное положение** включается автоматический выключатель  $SF$ , переключатели  $SA1$ ;  $SA2$  устанавливаются в положение АВР (рис. 47).

При этом питание приходит в цепочки 10,11,12, запускается двигатель, который взводит пружину привода секционного выключателя  $Q3$ . По окончании взвода пружинного привода срабатывает конечный выключатель  $SQ$ , двигатель останавливается и в цепочке 7 замыкаются контакты  $SQM$ , кроме того питание приходит на реле блокировочное  $KBS$ , которое замыкает свои блок-контакты  $KBS:1$ . Питание получает электромагнит включения секционного выключателя  $YAC3$ , но поскольку включен он последовательно с высокоомной лампой  $HL$  и сопротивлением  $R1$ , мощности для его срабатывания недостаточно. Загорается сигнальная лампа готовности привода  $HL$ .

Рассмотрим работу схемы АВР **находящейся в исходном положении**. При исчезновении напряжения на первой секции шин, реле напряжения  $KV1$ ,  $KV2$  теряют возбуждение, замыкают свои контакты в цепи 1. Реле времени  $KT1$  с выдержкой времени замыкает контакты в цепи 2, реле промежуточное  $KL1$  – в цепи 3; электромагнит отключения  $YAT1$  выключает выключатель  $Q1$ . Его блок-контакты в цепи 7  $Q1:3$  замыкаются, шунтируют лампу  $HL$  с резистором  $R1$ . Катушка электромагнита  $YAC3$  получает полное питание и секционный выключатель  $Q3$  включается.



**Рис. 47. Схема АВР на секционном выключателе:**  
***a*** — упрощенная схема подстанции и схема подключения реле напряжения; ***б*** — схема АВР

Блок-контакты выключателя  $Q1$  в цепи 11 размыкаются, обесточивая реле  $KBS$ , которое с выдержкой времени размыкает свои контакты в цепи 7 (после срабатывания  $YAC3$ ). Это необходимо для того, чтобы в случае включения выключатель  $Q3$  на короткое замыкание, он отключился защитой, и повторного включения не произошло, так как контакты  $KBS:1$  разорвали цепь питания электромагнита  $YAC3$ .

### 5.3. Автоматическая частотная разгрузка

Одним из основных показателей качества электрической энергии является частота тока, равная 50 Гц. Снижение частоты тока происходит при перегрузке синхронных генераторов на электростанциях, поэтому для восстановления нормальной частоты предпринимаются мероприятия по их разгрузке. Ступенями и поочередно с помощью устройства автоматической частотной разгрузки АЧР отключается часть потребителей.

Для отстройки от снижения частоты вследствие короткого замыкания или в результате кратковременного перерыва питания потребителей при работе устройств АПВ, АВР автоматическая частотная разгрузка **начинает действовать после выдержки времени**. Выдержка времени позволяет исключить необоснованное отключение потребителей.

АЧР должна обеспечить быструю разгрузку для предотвращения лавинообразного снижения частоты. При частоте тока 48 – 49 Гц отключение потребителей производится с выдержкой времени (табл.2).

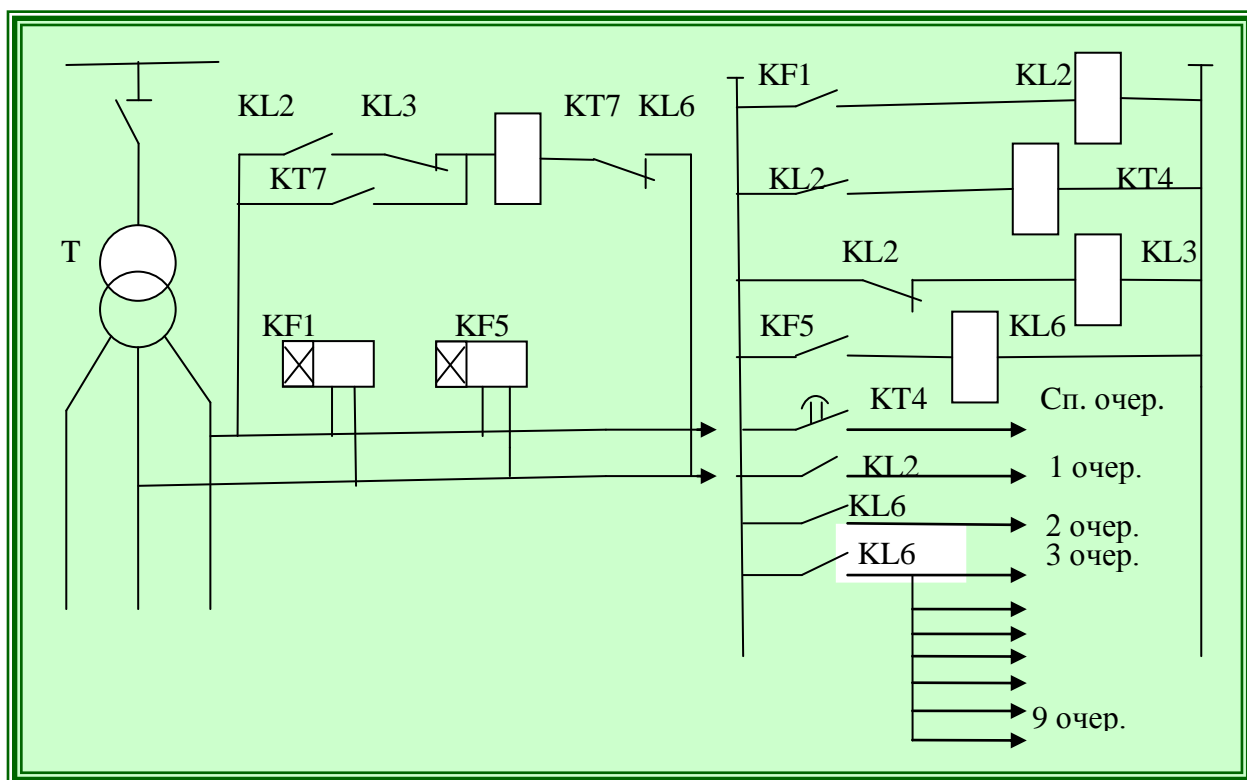
**Таблица 2.**

**Уставки частоты срабатывания по абсолютному значению частоты**

<b>№</b>	<b>Уставка, Гц</b>	<b>Выдержка времени, с</b>	<b>Отключаемая мощность; %</b>
<b>1</b>	<b>48</b>	<b>0</b>	<b>3 – 4</b>
<b>2</b>	<b>47,5</b>	<b>0</b>	<b>4 – 5</b>
<b>3</b>	<b>47</b>	<b>0</b>	<b>4,5 – 5,5</b>
<b>4</b>	<b>46,5</b>	<b>0</b>	<b>5,5 – 6</b>
<b>5</b>	<b>45,6</b>	<b>0</b>	<b>6 – 6,5</b>
<b>6</b>	<b>45,5</b>	<b>0</b>	<b>6 – 6,5</b>
<b>7</b>	<b>45</b>	<b>0</b>	<b>6,5 – 6,5</b>
<b>Спец.</b>	<b>47</b>	<b>25</b>	<b>3,5 – 4</b>
<b>Итого</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>39 – 44</b>

Контроль за частотой тока осуществляет индукционное реле частоты типа **ИВЧ** или полупроводниковое реле типа **РЧ**. Подключение потребителей производится в обратном порядке устройством автоматики — частотной АПВ. ЧАПВ начинает подключение потребителей к источнику при частоте 49,5 Гц. Время срабатывания первой ступени ЧАПВ составляет 10-20 секунд, следующей – 5с.

Схема АЧР по скорости изменения частоты представлена на рисунке 48.



**Рис. 48. Схема АЧР по скорости изменения частоты**

При снижении частоты срабатывает реле частоты *KF1*, которое замыкает свои контакты в цепи 1; промежуточное реле *KL2* получает питание и замыкает свои контакты, срабатывают реле времени *KT4* и *KT7*. Реле времени *KT4* начинает отсчет времени для отключения специальной очереди – 25 с. Реле *KT7* особой конструкции, электродвигательное. Контакты его, отключающие с третьей очереди по девятую, в нормальном состоянии замкнуты полуметаллическим кольцом. При срабатывании, контактное кольцо начинает вращаться, по очереди размыкая свои контакты. После отключения нагрузки по команде от реле *KT7* срабатывает реле частоты *KF5*, питание получает



промежуточное реле  $KL6$  и отключается вторая очередь. Если после отключения третьей очереди частота не достигла 49 – 50 Гц, то срабатывает реле  $KT4$  и отключается специальная очередь.

Время от подачи импульсов до замыкания контакта отключающего третью очередь определяется из соотношения

$$t = 0,5T_c - 0,7T_c,$$

где  $T_c$  – постоянная времени энергетической системы, находится в пределах от 4 до 10 секунд.

#### ***5.4. Автоматика в схемах компенсирующих устройств***

Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях обеспечивает экономичность работы системы электроснабжения и качество электроэнергии. Потребность в реактивной мощности, вырабатываемой конденсаторными установками, зависит от графика нагрузки отдельных потребителей. Если конденсаторная установка включена, а нагрузка на шинах уменьшилась, то возникает режим перекомпенсации, что приводит к увеличению емкостной составляющей тока нагрузки, возрастает напряжение на шинах и в линиях, увеличиваются электрические потери. С увеличением нагрузки на шинах напряжение уменьшается, возникает режим недокомпенсации, поэтому автоматика должна включить конденсаторную установку.

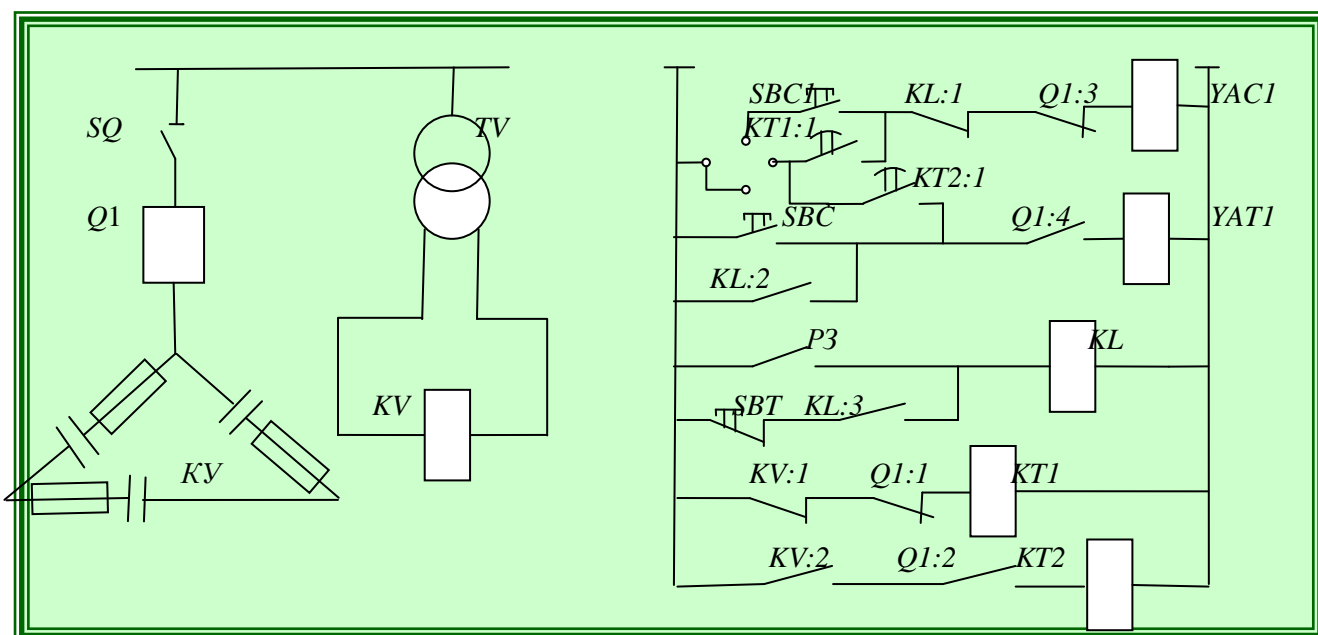
**Регулирование мощности конденсаторных установок производится в зависимости от одного из следующих факторов:**

- *напряжения в точке присоединения компенсирующих устройств;*
- *тока нагрузки данного объекта;*
- *направления реактивной мощности в линии;*
- *cos φ;*
- *времени суток.*

### 5.4.1. Схема регулирования мощности конденсаторной установки по напряжению на шинах подстанции

Схема используется в том случае, если требуется обеспечить минимальное отклонение рабочего напряжения от номинального. Регулирование мощности конденсаторной установки, а следовательно и напряжения производится ступенями. Схема одноступенчатого автоматического регулирования мощности конденсаторной установки представлена на рисунке 49.

Контроль за напряжением на шинах подстанции осуществляет реле напряжения  $KV$ . При снижении напряжения во время пиковых нагрузок, реле теряет возбуждение и замыкает свои контакты в цепи 8, срабатывает реле времени  $KT1$ , которое замыкает свои контакты в цепи 2 и электромагнит  $YAC1$  включает выключатель  $Q1$ . При повышении напряжения на шинах реле минимального напряжения получает питание и замыкает свои контакты в цепи 9, срабатывает реле времени  $KT2$  в результате  $YAT1$  отключает конденсаторную установку.



**Рис. 49. Схема одноступенчатого регулирования мощности конденсаторной установки по напряжению**

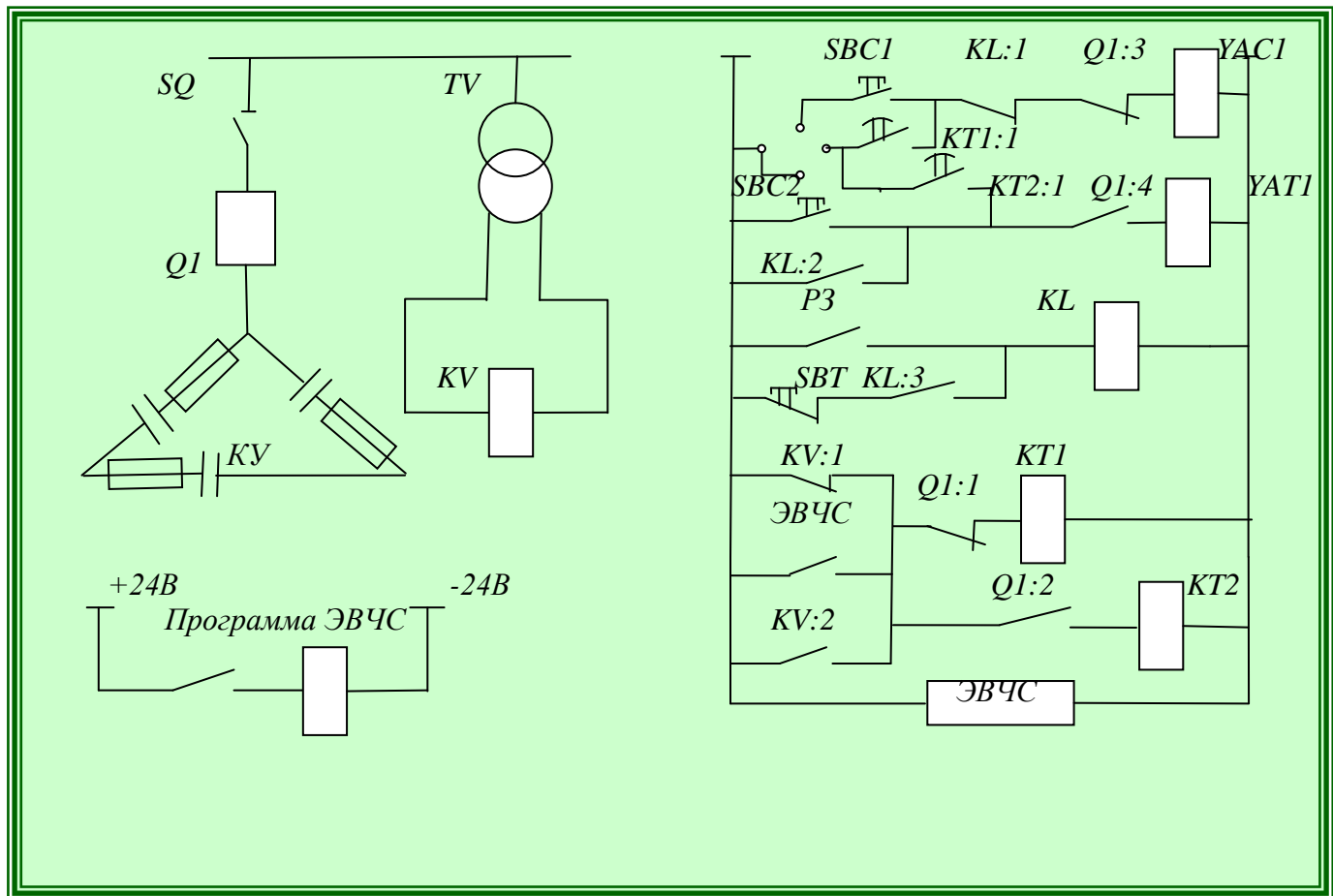
Если конденсаторная установка **включается на короткое замыкание**, ее отключит релейная защита, которая замыкает свои контакты РЗ в цепи 6. Промежуточное реле *KL* замыкает свои контакты *KL:3* и ставит себя на самопитание. Его блок контакты *KL:1* разрывают цепь питания электромагнита *УАС1*, запрещая повторное включение конденсаторной установки, а контакты *KL:2* подают сигнал на электромагнит отключения выключателя.

Кнопка *SBT* возвращает схему в исходное положение. Переключатель управления позволяет включать и отключать установку в ручном режиме.

#### **5.4.2. Схема автоматического одноступенчатого регулирования конденсаторной установки по времени суток с коррекцией по напряжению**

Наиболее широкое распространение получило автоматическое регулирование компенсирующих устройств по времени суток, поскольку суточный график нагрузок в производствах с установившейся технологией практически не меняется. В основе такой схемы автоматики – электрические сигнальные часы ЭВЧС и реле минимального напряжения (рис.50).

Включение и отключение конденсаторной установки КУ осуществляется по программе, заданной по времени суток. Если после включения конденсаторной установки по команде от ЭВЧС (цепь 10) напряжение на шинах подстанции окажется соответствующим номинальному значению, то сработают контакты реле напряжения *KV:2*, подадут сигнал на реле времени *KT2*, которое замкнет свои контакты в цепи 4 и электромагнит отключения *УАТ1* отключит КУ. Если же по команде от электронных часов КУ установка отключится, когда напряжение на шинах еще ниже номинального значения, то замкнутся контакты *KV:1* и и согласно схеме электромагнит включения *УАС1* вновь включит установку.



**Рис. 50. Схема автоматического одноступенчатого регулирования конденсаторной установки по времени суток с коррекцией по напряжению**

В настоящее время получили широкое распространение конденсаторные установки типа УКМ 58 (КРМ, АКУ, УКРМ, УКМ) изготавливаемые на напряжение 0,23 кВ; 0,4 кВ; 0,66 кВ; 0,69 кВ, которые предназначены для автоматического поддержания заданного коэффициента мощности (рис 51).

В качестве автоматических регуляторов используются устройства автоматики на микропроцессорной технике, которые имеют встроенные интерфейсы, а также дополнительно поставляемое программное обеспечение, позволяющее как на подстанции, так и удаленно с компьютера (до 1200 м, и даже далее — с помощью репитера) программировать, конфигурировать и контролировать параметры конденсаторной установки и соответственно всей сети.



**Рис. 51. Конденсаторные установки типа УКМ 58**

На дисплее таких регуляторов реактивной мощности отображаются практически все параметры контролируемой сети, в том числе и гармоники с 1-ой по 40-ю. Примером такого регулятора является автоматический регулятор реактивной мощности типа DCRJ 8...12 для сетей 0,4-35 кВ с выходом на ПК (рис. 52).



**Рис. 52. Автоматический регулятор реактивной мощности  
типа DCRJ 8...12**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Элементы релейной защиты</b> .....	10
1.1 Устройство и принцип действия реле максимального тока РТ-40, РТ-80.....	10
1.2 Устройство и принцип действия реле индукционного типа РБМ – 170, РНТ – 565 .....	13
1.3. Основные конструкции реле времени, промежуточных реле, сигнальных реле, газового реле, промежуточного реле на герконах .....	16
1.4. Устройство и принцип действия статических и полупроводниковых реле .....	22
1.4.1. Схемы простейших электронных реле .....	23
<b>2. Линейные и нелинейные измерительные преобразователи синусоидальных токов и напряжений</b> .....	34
2.1. Устройство трансформаторов тока .....	34
2.2. Схемы соединения трансформаторов тока и токовых реле .....	37
2.3. Кабельные трансформаторы тока (земляная защита).....	40
2.4. Оперативный ток: источники постоянного и переменного оперативного тока.	42
<b>3. Релейная защита трансформаторов и двигателей</b> .....	47
3.1. Основные повреждения силовых трансформаторов.....	47
3.2. Назначение и основные типы защит трансформаторов .....	48
3.2.1. Максимальная токовая защита.....	48
3.2.2. Токовая отсечка трансформатора.....	49
3.2.3. Дифференциальная защита трансформатора.....	52
3.3. Расчет релейной защиты трансформатора заводской подстанции .....	53
3.4. Защита трансформаторов, включенных по упрощенной схеме коммутации.....	61
3.5. Защита электрических двигателей .....	63
<b>4. Релейная защита линий</b> .....	65
4.1. Защита линий электропередач с односторонним питанием.....	65
4.2. Защита линий электропередач с двухсторонним питанием (направленная защита).....	66
4.3. Продольная дифференциальная токовая защита линии с односторонним питанием.....	68
4.4. Продольная ДТЗ линии с двухсторонним питанием .....	70

4.5. Поперечная дифференциальная защита линии .....	71
<b>5. основные виды автоматики в системах электроснабжения .....</b>	<b>73</b>
5.1. Автоматическое повторное включение .....	73
5.2. Автоматическое включение резерва .....	75
5.2.1. Схема АВР резервного ввода .....	75
5.2.2. Схема АВР на секционном выключателе .....	77
5.3. Автоматическая частотная разгрузка .....	79
5.4. Автоматика в схемах компенсирующих устройств .....	81
5.4.1. Схема регулирования мощности конденсаторной установки по напряжению на шинах подстанции .....	82
5.4.2. Схема автоматического одноступенчатого регулирования конденсаторной установки по времени суток с коррекцией по напряжению .....	83
<b>Оглавление .....</b>	<b>87</b>