

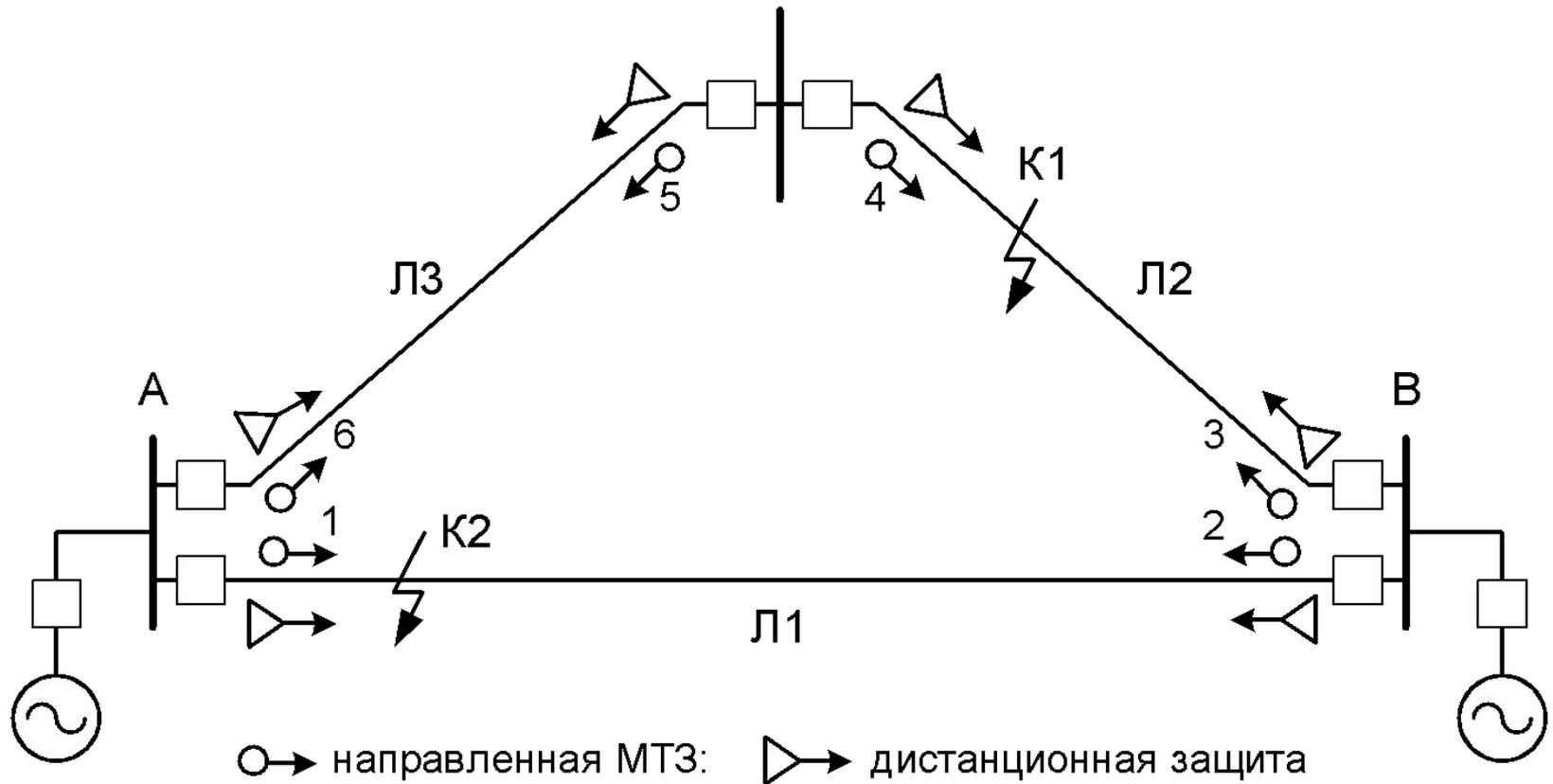


## ЛЕКЦИЯ 11-1

# Дистанционные защиты

## Назначение и принцип действия

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания максимальные и направленные защиты не могут обеспечить селективного отключения КЗ, например, в замкнутой (кольцевой) сети с двумя источниками питания.



При КЗ на линии Л2 направленная МТЗ 3 должна работать быстрее защиты 1, а при КЗ на линии Л1, наоборот защита 1 должна работать быстрее защиты 3. Эти противоречивые

- ° требования не могут быть выполнены с помощью направленной МТЗ. Токовые отсечки не всегда применимы, а продольные дифференциальные защиты могут быть установлены только на коротких линиях.

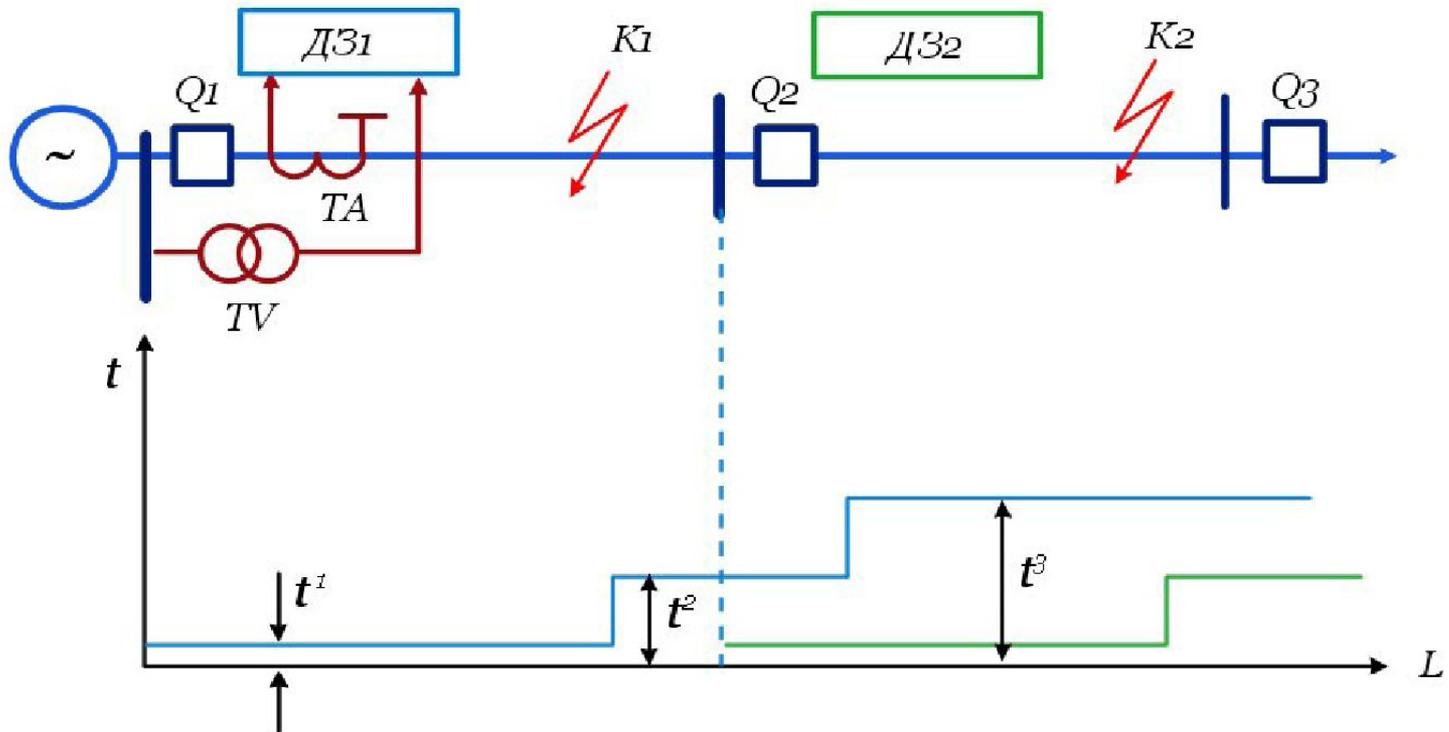
Указанные недостатки могут быть устранены с помощью дистанционной защиты.

**Принцип действия дистанционной защиты** основан на контроле изменения сопротивления защищаемого объекта. Если защищаемым объектом является линия электропередачи (рис. 1), то в нормальном режиме параметры напряжения на шинах и тока в линии близки к номинальным:

$U_{раб}, I_{раб}$  отношение

$$Z_n = \frac{U_{раб}}{I_{раб}}$$

соответствует нормальному режиму.



### Построение дистанционной защиты

При возникновении КЗ напряжение на шинах уменьшается,  
ток в линии увеличивается,  
контролируемое сопротивление уменьшается

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} < Z_n$$

В свою очередь,  $Z_k = Z_{noz} l_k$

где  $Z_{noz}$  – погонное сопротивление линии (сопротивление 1 км линии);

$l_k$  – длина линии, км.

Контролируя изменение сопротивления, можно определить факт возникновения КЗ и оценить удалённость места КЗ.

Обычно дистанционная защита выполняется в виде трёх ступеней, характеристика её времени срабатывания представлена на рис.1.

Первая ступень предназначена для работы при КЗ на защищаемой линии

$$Z_{сз} < Z_l$$

то есть сопротивление срабатывания защиты должно быть меньше сопротивления линии.

Как правило, первая ступень охватывает 85 % длины защищаемой

линии. При КЗ в зоне действия первой ступени защита работает без выдержки времени,  $t^1 = 0$

Вторая ступень предназначена для надёжной защиты всей линии.

Её зона действия попадает на смежную линию, поэтому для исключения неселективного срабатывания защиты при

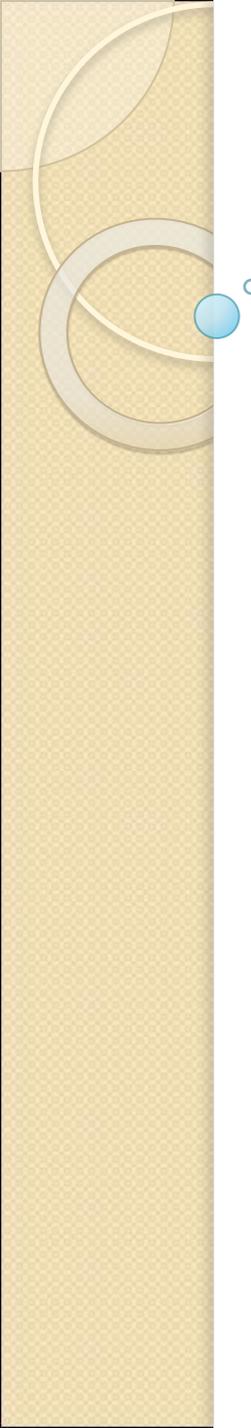
КЗ вводится задержка на время  $t^2 = (0,4 \div 0,5)с.$  срабатывание,

Третья ступень выполняет функции ближнего и дальнего резервирования.

Увеличение числа ступеней ведет к усложнению защит и не дает существенной пользы.

Таким образом, ВВ  $t$  дистанционной защиты зависит от расстояния (дистанции)  $l_{p.k}$  между местом установки защиты и точкой КЗ, т.е.  $t = f(l_{p.k})$ , и нарастает плавно или ступенчато с увеличением этого расстояния. С учетом этого ближайшая к месту повреждения дистанционная защита всегда имеет меньшую ВВ, чем более удаленные защиты.

Сравнение характеристик МТЗ и дистанционных защит показывает, что дистанционный принцип позволяет существенно уменьшить время отключения КЗ на ЛЭП, и, что важно, дает возможность отключать КЗ вблизи шин п/с быстрее, чем удаленные от шин КЗ.



В качестве измерительного органа дистанционной защиты используется реле сопротивления, которое в принципе может быть настроено реагирующим на полное, реактивное или активное сопротивление. Распространение получили дистанционные защиты, реагирующие на полное сопротивление участка линии от места установки до точки КЗ.

Для обеспечения селективности дистанционные защиты в сетях сложной конфигурации необходимо выполнять направленными, действующими только при направлении мощности от шин в линию. ВВ у защит, работающих при одинаковом направлении мощности, взаимно согласовывается так, чтобы при КЗ за пределами защищаемой линии каждая защита имела ВВ на ступень больше ВВ защит на следующем участке.

Направленность действия дистанционных защит реализуется с помощью обычных РНМ.



- 1) Пускового органа ПО 1 – реле сопротивления, питаемое током  $I_p$  и напряжением  $U_p$  сети.
- 2) Дистанционных органов ДО 2, определяющих удаленность места КЗ. В ступенчатых защитах выполняется с помощью реле минимального сопротивления. Оно срабатывает при условии

$$Z_p = U_p / I_p < Z_{c.p},$$

где  $Z_{c.p}$  – наибольшее сопротивление, при котором реле начинает действовать, т.е сопротивление срабатывания реле.

Сопротивление  $Z_p$  иногда называется *фиктивным*, т.к. в режимах нагрузки и качания оно не является сопротивлением линии хотя и имеет размерность сопротивления, но не имеющее физического смысла.

- 3) Органа ВВ 3, реле времени обычной конструкции.
- 4) Органа направления мощности ОМ 4, не позволяющего работать защите при направлении мощности КЗ к шинам п/с.
- 5) Блокировки БН 5 – выводит защиту из действия, когда защита может сработать неправильно при отсутствии КЗ. БН 5 срабатывает при отсутствии напряжения питающего защиту.
- 6) Блокировки БК 6 срабатывающей при качаниях в системе.

*Схема защиты работает следующим образом.*

При КЗ на линии работают ПО1 и ОМ4. Через их контакты подается плюс к контактам дистанционных органов ДО и на реле времени третьей зоны  $V_{III}$ . Если КЗ возникло в пределах первой зоны, то замыкает контакты  $ДО_I$ , образуя цепь на отключение линии. Если КЗ произошло во второй зоне, то  $ДО_I$  не работает, т.к. сопротивление на его зажимах больше уставки сопротивления срабатывания первой зоны ( $Z_p > Z_1$ ).

В этом случае приходит в действие дистанционный орган второй зоны  $ДО_{II}$ . Он замыкает контакты и пускает реле времени  $V_{II}$ . По истечении времени  $t_{II}$   $V_{II}$  замыкает контакт и посылает импульс на отключение.

При КЗ за пределами второй зоны  $ДО_I$  и  $ДО_{II}$  не работают, т.к. сопротивление на их зажимах превышает уставки сопротивления срабатывания. Защита не может действовать со временем первой и второй зон. Реле времени  $V_{III}$ , запущенное пусковым реле, срабатывает когда истечет его  $VV t_{III}$ , и посылает импульс на отключение АВ.

Специальных измерительных органов третьей зоны для упрощения защиты не ставят

При нарушении параллельной работы энергосистемы нарушается синхронная работа электростанций и возникает асинхронный ход, сопровождающийся периодическими изменениями (качаниями) тока и напряжения (Рис.2). В этих условиях реле сопротивления

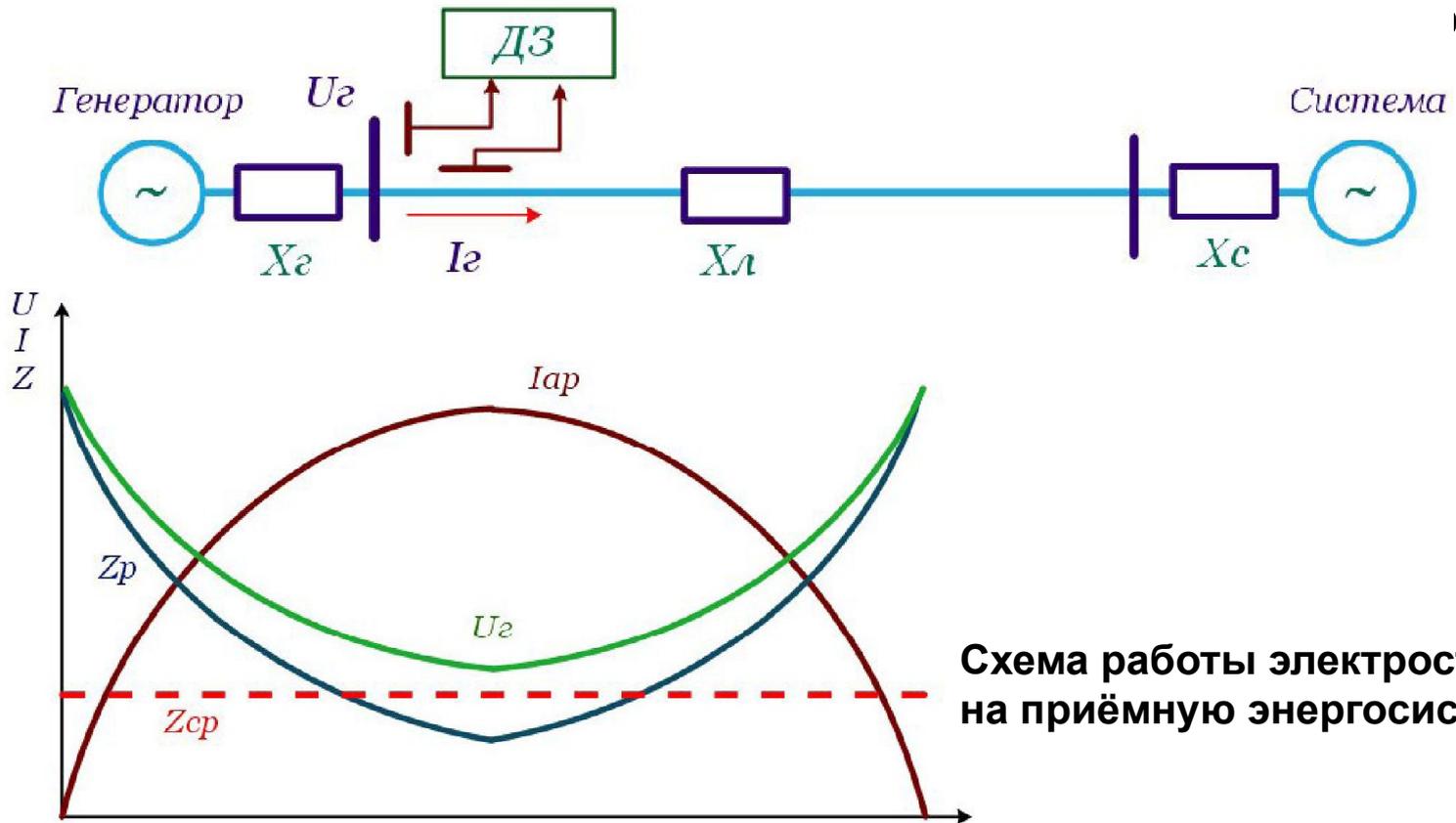


Схема работы электростанции на приёмную энергосистему:

$I_g$  - ток в линии;  $X_g$  - сопротивление генераторов электростанции;

$X_l$  - сопротивление линии связи;  $X_c$  - сопротивление системы:

•  $U_g$  - напряжение в месте установки защиты;

•  $I_{ar}$  - ток линии между ОДБ генератора и системы

По принципу действия устройства блокировки от качаний могут быть разделены на две группы:

- КЗ и качания различают по хотя бы кратковременному наличию аварийных составляющих, например, токов обратной последовательности;
- КЗ и качания различают по скорости изменения токов и напряжений.

## Принципы выполнения реле сопротивления

Получили распространение электромеханические конструкции на электромагнитном и индукционном принципах, а также на п/п.

- Принцип действия всех разновидностей реле сопротивления основан на сравнении по абсолютному значению или по фазе двух векторов напряжений  $U_I$  и  $U_{II}$ , являющихся функциями тока  $I_p$  и напряжением  $U_p$  сети в общем случае по выражению:

$$U_I = k_1 U_p + k_2 I_p;$$

$$U_{II} = k_3 U_p + k_4 I_p.$$

В электромеханических конструкциях сравнение  $U_I$  и  $U_{II}$  осуществляется тремя способами: механическим – путем сравнения электромагнитных моментов  $M_{ЭI}$  и  $M_{ЭII}$  пропорциональных соответственно  $U_I$  и  $U_{II}$ ; электрическим – непосредственным сравнением  $U_I$  и  $U_{II}$  и магнитным – путем сопоставления магнитного потока

$\Phi_1 \equiv U_I$  с потоком  $\Phi_2 \equiv U_{II}$ . Меняя коэффициенты  $k_1$ - $k_4$  можно получать реле сопротивления с различными характеристиками:

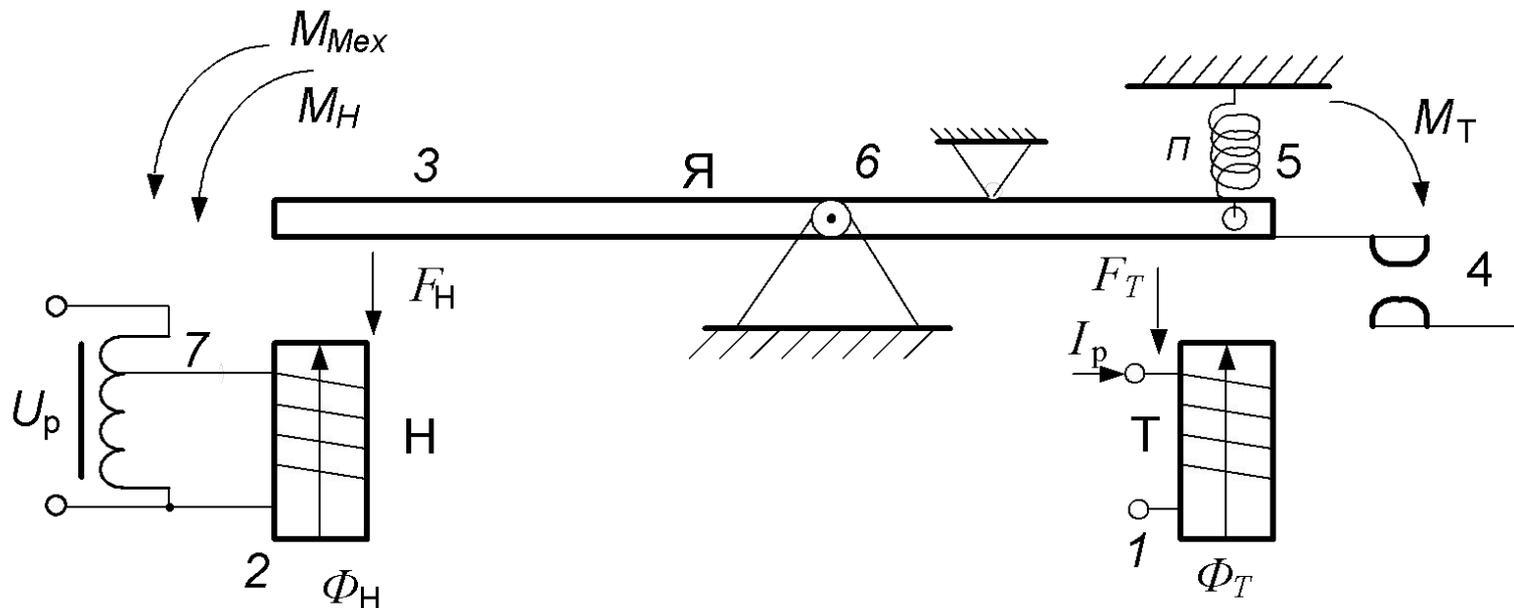
реле ненаправленного и направленного полного сопротивлений, реле со смещенной круговой характеристикой, реле реактивного сопротивления и др.

° Для получения реле с более сложными характеристиками и другими разновидностями используется сравнение трех и более электрических величин, так же являющихся функциями  $I_p$  и  $U_p$ .

Основные требования к параметрам реле сопротивления следующие:

1. Реле должны быть быстродействующими, чтобы обеспечить быстрое отключение КЗ в пределах первой зоны. В сетях 110-500 кВ необходимо иметь время срабатывания 20-50 мс, в сетях 35 кВ – 100 мс.
2. Реле должны иметь достаточную точность  $Z_{c.p}$ , с тем, чтобы зоны действия защит были стабильными. Погрешность отклонения  $Z_{c.p}$  от заданной уставки не должна превышать 10%.
3. Пусковые реле сопротивления должны иметь высокий коэффициент возврата  $k_B = Z_B / Z_{c.p} = 1,05 - 1,15$ .

# Электромагнитное реле полного сопротивления



1, 2 – электромагниты; 3 – подвижное стальное коромысло, закреплено на оси 6; 4 – контакты; 5 – противодействующая пружина. Обмотка Т питается током  $I_p$ , обмотка Н – напряжением сети  $U_p$ . На коромысло 3 действуют моменты от тока  $M_T = k_T I_p^2$  на замыкание контактов реле, от напряжения  $M_H = k_H U_p^2$  на их размыкание и механический момент  $M_{\text{мех}}$  (пружины 5 и трения), противодействующий замыканию контактов.

В нормальном режиме сети отношение  $U_p / I_p = Z_p$  таково, что

$M_T < (M_H + M_{\text{мех}})$ , при этом  $Z_p > Z_{\text{с.р}}$  и реле не действует. В случае КЗ напряжение  $U_p$  уменьшается, а ток  $I_p$  возрастает и соответственно уменьшается тормозной момент  $M_H$  и работает рабочий момент  $M_T$ . При  $Z_p < Z_{\text{с.р}}$  момент  $M_T > (M_H + M_{\text{мех}})$ , реле срабатывает, замыкая свои контакты.

Пограничным условием начала работы реле является равенство моментов  $M_T = (M_H + M_{\text{мех}})$ , при этом  $Z_p = Z_{\text{с.р}}$ . Пренебрегая моментом  $M_{\text{мех}}$  с учетом моментов от тока и напряжения  $M_T$  и  $M_H$  соответственно получим:

$$k_T I_p^2 = k_H U_p^2,$$

разделив обе части этого уравнения на  $k_H$  и  $I_p^2$ , найдем сопротивление, при котором происходит срабатывание реле

$$Z_{\text{с.р}} = U_p / I_p = \sqrt{(k_T/k_H)}.$$

Уравнение показывает, что  $Z_{\text{с.р}}$  имеет постоянную величину, не зависящую от  $\varphi_p$ . Характеристика такого реле изображается окружностью с радиусом  $\sqrt{k_T/k_H}$  и центром в начале координат.

Таким образом, рассмотренное реле является *ненаправленным реле сопротивления*.

Если в последнем уравнении учесть  $M_{\text{мех}}$ , то

$$Z_{\text{с.р}} = \sqrt{(k_{\text{T}}/k_{\text{H}}) - M_{\text{мех}}/k_{\text{H}} I_{\text{р}}^2}.$$

- Из этого выражения следует, что благодаря наличию механического момента  $Z_{\text{с.р}}$  зависит от  $I_{\text{р}}$ .

## Схемы и характеристики срабатывания реле сопротивления (РС)

Дистанционная защита реагирует на отношение подведенных к измерительному органу защиты напряжения и тока, т.е. на сопротивление. Режим КЗ отличается от нормального режима работы сети пониженным значением напряжения и повышенным значением тока. Следовательно, сопротивление на входе измерительного органа защиты – реле сопротивления (РС) при КЗ меньше, чем в нормальном режиме. Это обстоятельство и используется для выявления КЗ.

Таким образом, дистанционная защита представляет собой защиту минимального сопротивления. Если на вход измерительного органа минимального сопротивления подаётся напряжение замкнувшейся фазы и ток этой фазы, то сопротивление на входе измерительного органа оказывается равным сопротивлению линии от места установки защиты до места КЗ, т.к. удельное сопротивление линии  $Z_{уд}$  величина постоянная.

Сопrotивление на входе измерительного органа защиты представляет собой комплексную величину.

Сопrotивление на входе защиты (например, защиты 3 на рис.1)

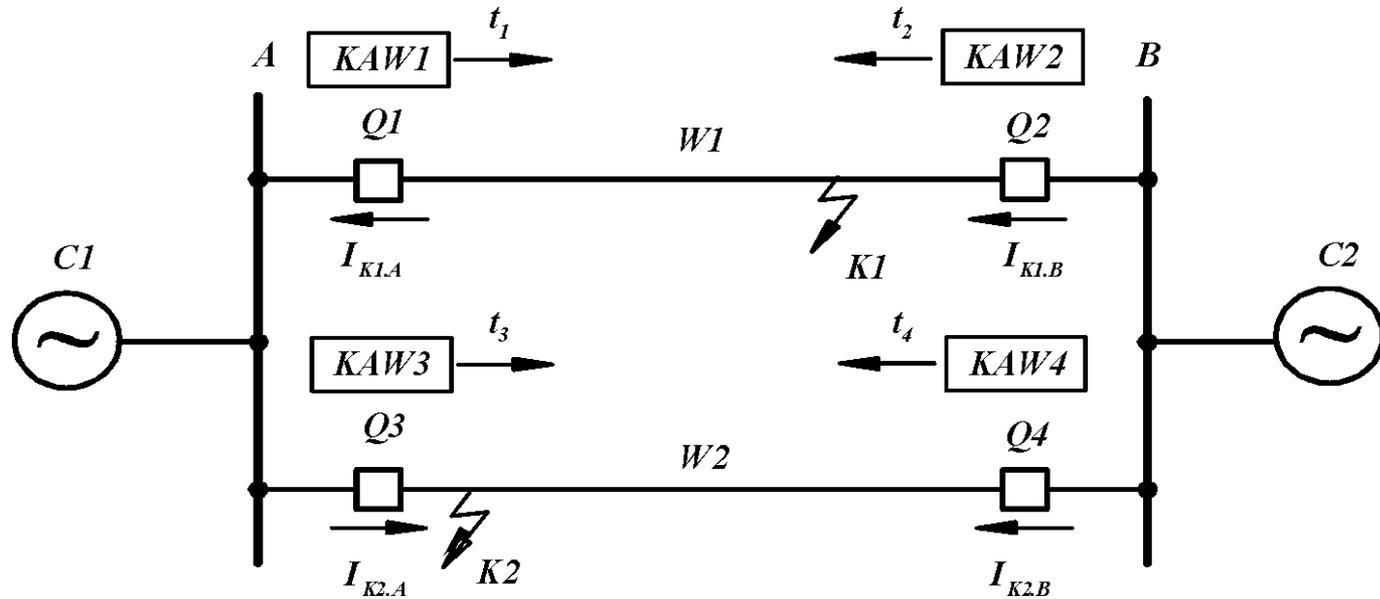
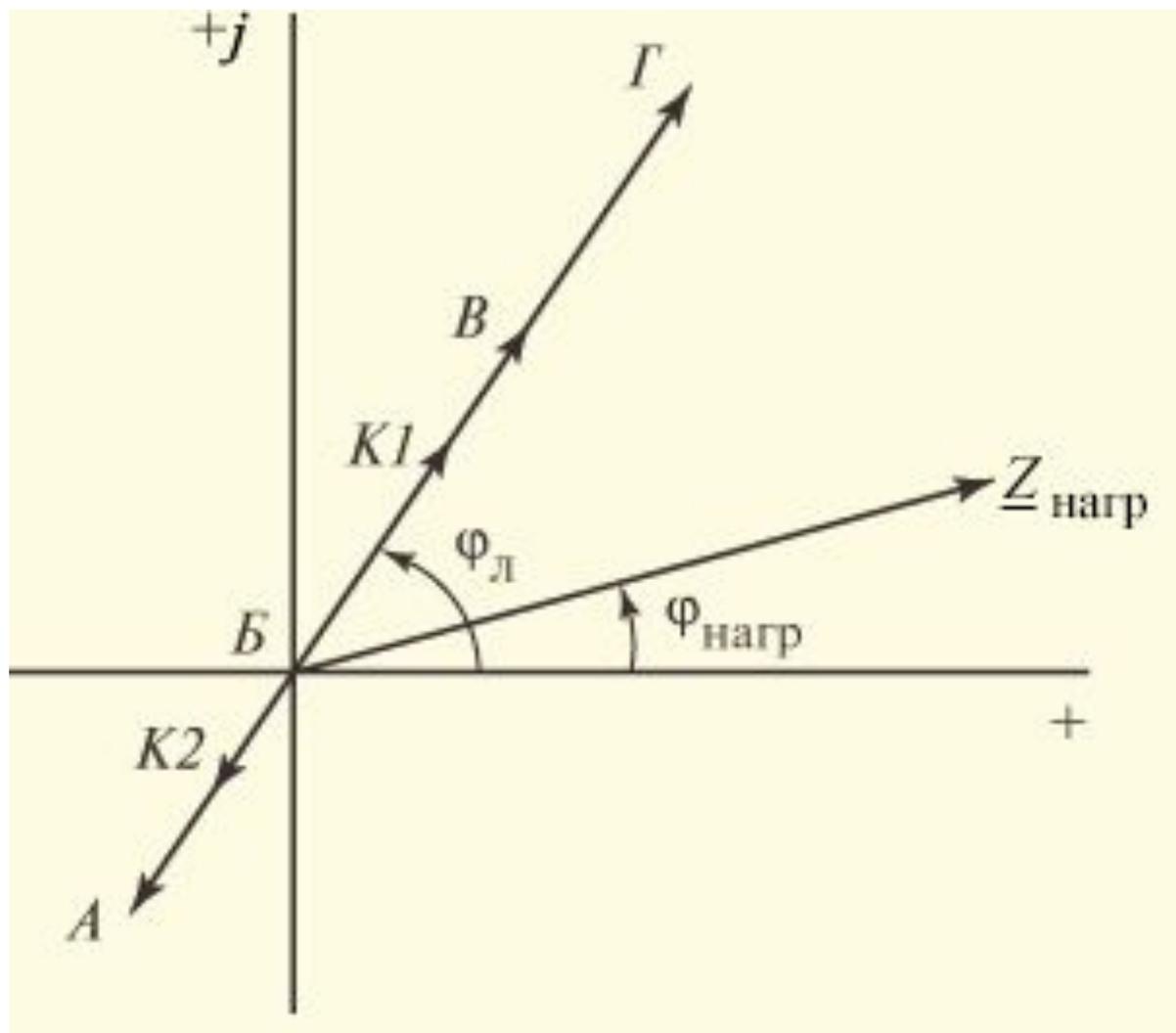


Рис. 1

в комплексной плоскости при К3 в точке  $K1$  есть вектор  $BK1$  (рис. 2), сопротивление линии  $BV$  и суммарное сопротивление линий  $BV$  и  $BГ$  - векторы  $BV$  и  $BГ$ , а сопротивление до точки  $K2$  и линии  $AB$  - векторы  $BK2$  и  $BA$ .



**Рис. 2. Векторы сопротивлений на входе измерительного органа минимального сопротивления дистанционной защиты**

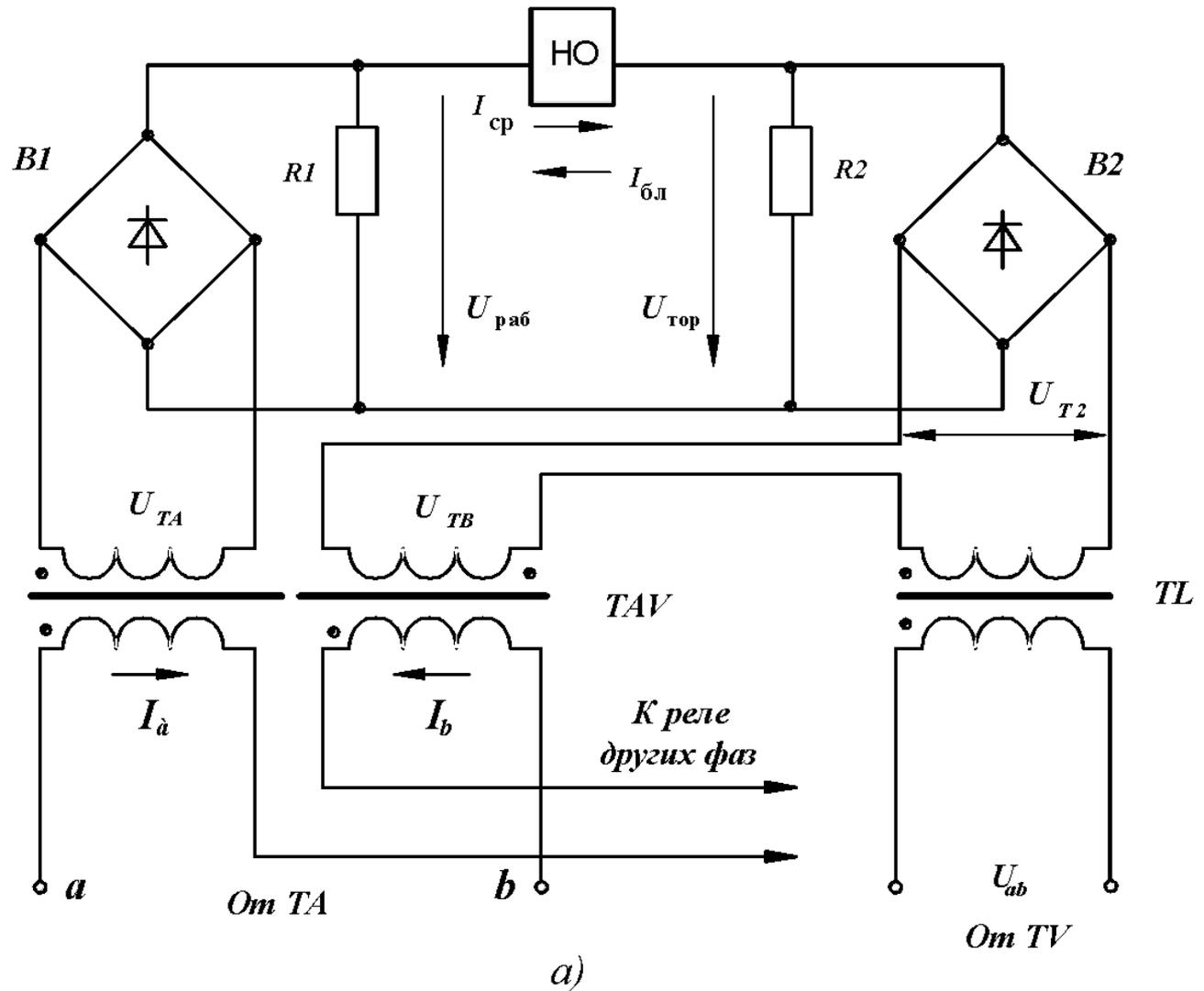
Угол наклона  $\varphi_{л}$  этих векторов сопротивления определяется активным и реактивным сопротивлением защищаемых линий.

Сопротивление на входе защиты в рабочем режиме работы электрической сети отображается вектором сопротивления  $Z_{нагр}$  нагрузки, получающей питание по защищаемой линии (на рис. 2). Этот вектор отличается от вектора сопротивления КЗ не только по величине, но и по фазе, так как коэффициент мощности нагрузки  $\cos \varphi_{нагр} = 0,8 - 0,95$

Схема п/п реле сопротивления, со схемой сравнения абсолютных значений двух электрических величин на равновесии напряжений, приведена на рис. 3,а.

Схема состоит из нуля – органа НО, включённого на разность выпрямленных напряжений  $U_{раб}$  и  $U_{торм}$ , образуемых с помощью балластных сопротивлений

**$R1$**  и  **$R2$** , на выходе полупроводниковых выпрямителей  **$B1$**  и  **$B2$** . Балластные сопротивления  **$R1$**  и  **$R2$**  необходимы для корректной работы рассматриваемой схемы сравнения. Нуль - индикатор  **$HO$**  выполняется на основе операционных усилителей.



К выпрямителям схемы сравнения подводятся напряжения от трансреактора TAV и промежуточного трансформатора TL.

К первичным обмоткам трансреактора TAV подводятся вторичные токи от ТТ защищаемой линии W1. Для случая КЗ1 это токи  $I_A$  и  $I_B$ , которые проходят по первичной обмотке TAV в противоположных направлениях. Поэтому напряжения на вторичных обмотках TAV пропорциональны разности этих токов  $I_T$ . Напряжение  $U_{T1}$  с первой вторичной обмотки TAV подводится к выпрямителю В1, а его выпрямленное значение обозначается  $U_{раб}$ . Индикатор НО включается таким образом, чтобы ток  $I_{ср}$ , создаваемый напряжением  $U_{раб}$ , действовал на его срабатывание.

К трансформатору TL подводится междуфазное напряжение (при включении реле сопротивления на разность токов  $I_A - I_B$  подводится напряжение  $U_{аб}$ ). Последовательно с вторичной обмоткой TL включена встречно вторая вторичная обмотка трансреактора TAV. Поэтому результирующее напряжение

$U_{T2} = K_U \cdot U_{аб} - K_I \cdot I_T$ , где  $K_U$  – коэффициент трансформации TL.

Напряжение  $U_{T2}$  подводится к выпрямителю В2, а его выпрямленное значение обозначается  $U_{Тор}$ . Последнее создает ток  $I_{ол}$ , действующий на его блокирование (несрабатывание). Напряжение  $U_{Тор}$  называется тормозным.

В нормальном режиме  $U_{Top} > U_{раб}$  и через НО проходит ток  $I_{ол}$ , действующий на его блокирование.

При КЗ в зоне защиты  $U_{Top} < U_{раб}$  и через НО проходит ток  $I_{сп}$ , что приводит к срабатыванию защиты и отключению линии.

Реле находится на грани срабатывания, когда  $|U_{T1}| = |U_{T2}|$  или

$$|K_I \cdot I_T| = |K_U \cdot U_{аб} - K_I \cdot I_T|;$$

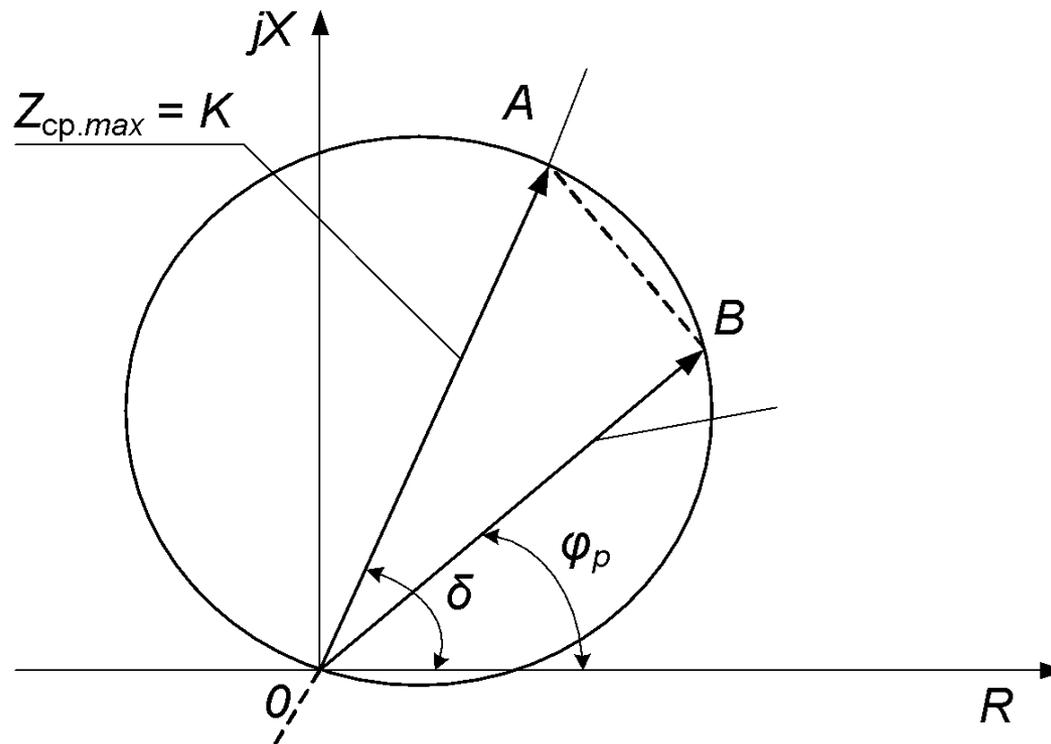
поделив оба члена этого уравнения на  $|K_U \cdot I_T|$ , получим

$$|Z_{сп} - (K_I/K_U)| = |(K_I/K_U)|, \quad (1)$$

где  $Z_{сп} = U_{аб} / I_T$ .

Выражение (1) является уравнением окружности с диаметром  $2 \cdot |K_I/K_U|$ , которое в осях  $R$  и  $jX$  проходит через начало координат.

С учетом этого, рассмотренное реле является **направленным реле полного сопротивления**, т.к. характеристика его срабатывания располагается в первом квадранте и оно действует только в одном направлении.



Сопротивление срабатывания этого реле не является постоянным и зависит от угла между током и напряжением  $\varphi_p$ . При  $\varphi_p = \delta$  сопротивление срабатывания имеет максимальное значение

$$Z_{cp} = Z_{cp.max} = 2(K_I / K_U) = K.$$

Угол  $\delta$  при этом называется **углом максимальной чувствительности** реле  $\varphi_{м.ч}$ .

При конструировании реле сопротивления этого угла принимается равным углу полного сопротивления защищаемой линии и, как правило, для ЛЭП 110 кВ он равен 65, а для ЛЭП 220 кВ – 80. При всех других значениях  $\varphi_p \neq \delta$  из треугольника OAB получим

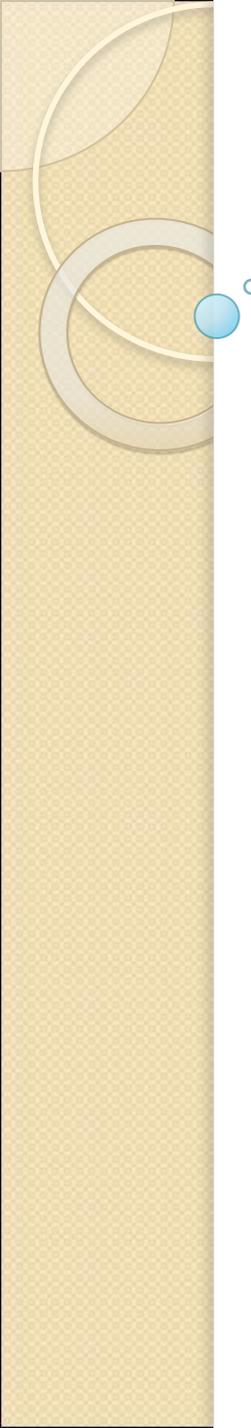
$$Z_{cp} = K \cos(\delta - \varphi_p).$$

В конструкции реле предусмотрено регулировка уставки  $Z_{уст}$  изменением значений  $K_U$  и модуля  $|K_I|$ . Это осуществляется изменением коэффициента трансформации TL (изменением числа вторичных витков) и числа витков первичной обмотки трансреактора TAV.

Зона, ограниченная окружностью, является зоной действия реле. Точка O соответствует началу защищаемой линии.

По рассмотренной выше схеме выполнены РС, входящие в комплект двухступенчатой дистанционной защиты ДЗ-2 панели типа ЭПЗ-1636, выпускаемой электротехнической промышленностью. Третья ступень ДЗ в панели ЭПЗ-1636 осуществляется с помощью РС типа КРС-1, схема которого аналогична схеме РС защиты ДЗ-2. Кроме того, с помощью РС третьей ступени КРС-1 может быть реализована круговая или эллиптическая характеристика срабатывания, обеспечивающая лучшую отстройку РС от токов нагрузки.

Промышленностью выпускается также ненаправленное РС, которое входит в комплект защиты ДЗ-1. В отличие от направленного РС ненаправленное реле полного сопротивления выполнено по схеме сравнения абсолютных значений двух электрических величин на циркуляции токов. Сопротивление срабатывания такого РС является величиной постоянной, не зависящей от угла между током и напряжением. Поэтому в осях  $R$  и  $jX$  его характеристика изображается окружностью с центром в начале координат и радиусом, равным  $K$ . Точка  $O$  соответствует началу защищаемой ЛЭП.



Т.к. характеристика располагается во всех четырех квадрантах, то РС действует при КЗ не только на защищаемой линии, но и на смежных линиях, т.е. является ненаправленным. Поэтому в ДЗ такое РС применяется в сочетании с РНМ и широко используется в сетях 35 кВ и ниже.

В настоящее время электротехническая промышленность выпускает комплекс УРЗ линий 110-330 кВ на микроэлектронной элементной базе типа ШДЭ 2801 и ШДЭ 2802. Реле сопротивления с многоугольными характеристиками срабатывания шкафов серии ШДЭ обладают улучшенной отстройкой от нагрузочных режимов и допускают срабатывание РС при значительном переходном сопротивлении дуги в случае удалённых КЗ.

отказов защит и выключателей смежных элементов электрической сети.

Сопротивление срабатывания третьей ступени определяется по условию

обеспечения чувствительности при КЗ в конце смежной линии и за трансформатором приёмной подстанции, а также по условию возврата

защиты в исходное состояние после отключения внешнего КЗ.

По рассмотренной выше схеме выполнены РС, входящие в комплект двухступенчатой дистанционной защиты ДЗ-2 панели типа ЭПЗ-1636, выпускаемой электротехнической промышленностью.

Третья ступень ДЗ в панели ЭПЗ-1636 осуществляется с помощью РС типа КРС-1, схема которого аналогична схеме РС защиты ДЗ-2.

Кроме того, с помощью РС третьей ступени КРС-1 может быть реализована круговая или эллиптическая характеристика срабатывания,

обеспечивающая лучшую отстройку РС от токов нагрузки.

Дистанционная защита по сравнению с токовыми защитами обладает большей чувствительностью, имеет стабильную зону действия, однако она значительно более дорогая и технически сложная.