

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»**

Кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий

Составитель  
Ф. С. Непша

## **РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА**

Методические указания к лабораторным занятиям (**часть 2**)  
по дисциплине для студентов направления подготовки 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника», образовательная  
программа «Электроснабжение» для всех форм обучения

Рекомендованы учебно-методической комиссией направления  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» в качестве  
электронного издания для использования в учебном процессе

Кемерово 2017

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Е. Г. Медведев** – доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий

**И. Ю. Семькина** – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**Непша Федор Сергеевич**

Релейная защита и автоматика: методические указания к лабораторным занятиям (**часть 2**) [Электронный ресурс]: для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», образовательная программа «Электроснабжение», всех форм обучения / сост.: Ф. С. Непша; КузГТУ – Кемерово, 2017. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Релейная защита и автоматика» и предназначено для проведения лабораторных занятий при изучении устройств релейной защиты и автоматики.

Для упрощения изучения материала лабораторных работ нумерация разделов, формул, таблиц и рисунков произведена в пределах каждой лабораторной работы.

© КузГТУ, 2017  
© Непша Ф. С.,  
составление, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 5. Реле направления мощности	3
Лабораторная работа № 6. Токовые защиты	33
Лабораторная работа № 7. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6...35 кВ	60
Лабораторная работа № 8. Устройство автоматического повторного включения	92
Лабораторная работа № 9. Устройство автоматического включения резерва	122
Список литературы	145

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

### ЦЕЛИ РАБОТЫ:

1. Изучение принципа работы и конструкции индукционных реле направления мощности (серии РБМ).
2. Изучение принципа работы и особенностей реле направления мощности на интегральных микросхемах серии РМ-11 (РМ-12).
3. Ознакомление с основными параметрами реле направления мощности.
4. Получение практических навыков по проверке и регулировке параметров реле направления мощности.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Реле направления мощности (РНМ) применяются в защитах от всех видов междуфазных коротких замыканий (КЗ), реагируя на направление (значение и знак) мощности прямой последовательности, подведенной к его зажимам, а так же в защитах от замыканий на землю, реагируя при этом на ток и напряжение нулевой последовательности. Они используются в схемах защит в качестве органа, который по направлению (знаку) мощности, протекающей по защищаемому элементу, определяет элемент (участок), в котором произошло повреждение (рис. 1, а).

В первом случае (при коротком замыкании в точке  $K1$ ) мощность  $S_{k1}$  короткого замыкания (КЗ) направлена от шин в линию и считается положительной. В этом случае РНМ должно срабатывать и замыкать свои контакты. Во втором случае (при КЗ в точке  $K2$ ) мощность КЗ  $S_{k2}$  направлена от линии в шину и считается отрицательной, а реле в этом случае не должно срабатывать.

Применяемые на практике РНМ делятся на две группы: индукционные и микроэлектронные. К индукционным РНМ относятся: реле серии РБМ-171 (РБМ-271) – для контроля направления мощности прямой последовательности; РБМ-178 (РБМ-278) – для контроля направления мощности нулевой последовательно-

сти. К РНМ, построенным на микросэлектронной элементной базе, относятся: реле серии РМ-11 – для контроля направления мощности прямой последовательности; РМ-12 – для контроля направления мощности нулевой последовательности.

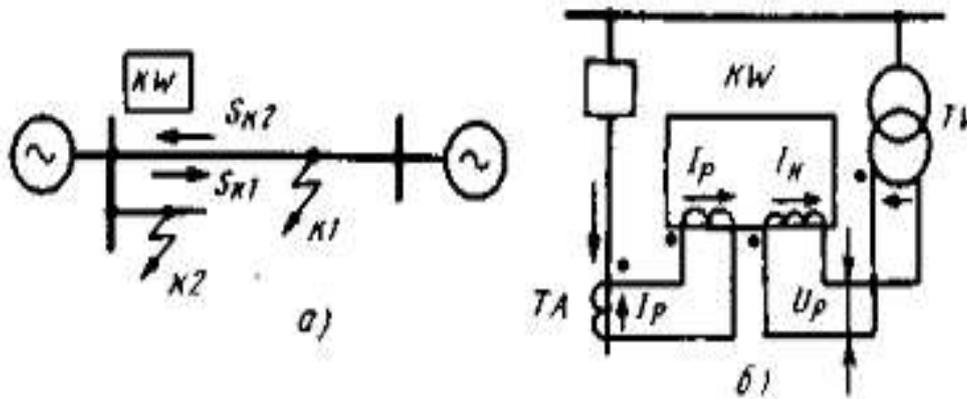


Рис. 1. Реле направления мощности: а – принцип действия; б – схема включения обмоток реле

Микросэлектронные РНМ внедрены в серийное производство и предназначены для замены индукционных РНМ.

Контролируемые (воздействующие) сигналы на РНМ поступают от первичных измерительных преобразователей тока (ТА) и напряжения (ТВ).

### 1.1. Принцип действия и конструкция индукционных реле направления мощности

В реле направления мощности индукционного типа (серии РБМ) производится сравнение по фазе двух воздействующих электрических величин: тока и напряжения. Реле этого типа выполнено на основе четырехполюсной магнитной системы и имеет два измерительных органа: измерительный орган (обмотка) напряжения (ИОН) и измерительный орган (обмотка) тока (ИОТ). К первой из них подводится напряжение  $U_p$ , ко второй – ток  $I_p$  (рис. 1, б). Каждая из обмоток выполнена на двух противоположных полюсах.

Ток  $I_p$ , проходящий по обмотке тока, создает рабочий магнитный поток  $\Phi_T$ , а ток  $I_n$ , проходящий по обмотке напряжения

(к которой подведено напряжение  $U_p$ ), формирует поляризующий магнитный поток  $\Phi_H$ . Обмотки в реле сдвинуты друг относительно друга в пространстве на угол  $\pi/2$ . В результате взаимодействия этих магнитных потоков образуется электромагнитный (вращающий) момент, значение и знак которого зависят от величин: напряжения  $U_p$ , тока  $I_p$  и угла сдвига  $\varphi_p$  между ними.

Реле направления мощности (в отличие от индукционных реле тока), выполняются, как правило, мгновенными. Время их действия (срабатывания) должно быть минимальным и практически составляет примерно 0,04 с.

Индукционные РНМ выполняются с подвижной системой в виде цилиндрического ротора (рис. 2, а).

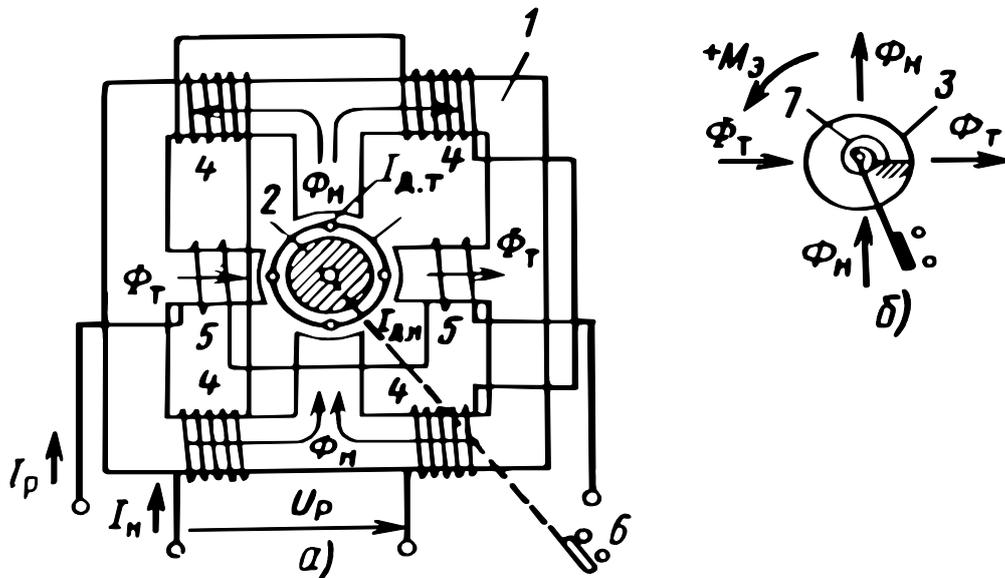


Рис. 2. Реле направления мощности: а – с цилиндрическим ротором; б – ротор реле и направление положительного момента  $M_3$

Они имеют замкнутый четырехполюсный магнитопровод 1 с выступающими внутрь полюсами. Между полюсами установлен стальной цилиндр (сердечник) 2, предназначенный для повышения магнитной проницаемости междуполюсного пространства. Алюминиевый цилиндр (ротор) 3 может поворачиваться в зазоре между стальным сердечником и полюсами. При повороте ротора 3 происходит замыкание контактов реле 6.



падающими с создающими их токами  $I_H$  и  $I_P$ , так как потерями в стали, в виду их малости, можно пренебречь.

Из векторной диаграммы следует, что потоки  $\Phi_H$  и  $\Phi_T$  (а также токи  $I_H$  и  $I_P$ ) сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол  $\psi$ , равный,  $\psi = \alpha - \varphi_p$ .

Вращающий (электромагнитный) момент в этом случае равен  $M_\vartheta = k\Phi_H\Phi_T \sin \psi$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Выражая  $\Phi_H$  и  $\Phi_T$  через создающие их ток и напряжение (и учитывая, что магнитная система не насыщена), получим:

$$M_\vartheta = \kappa_1 U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p) = \kappa_1 S_p, \quad (1)$$

где  $S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p)$  – мощность, подводимая к реле.

Из выражения (1) следует:

– электромагнитный момент (вращения) реле пропорционален мощности  $S_p$  на его зажимах;

– знак электромагнитного момента реле определяется знаком сомножителя  $\sin(\alpha - \varphi_p)$  и зависит от значений угла  $\varphi_p$  (а также от угла  $\alpha$  внутреннего сдвига реле). Этот факт иллюстрируется на рис. 3, где зона отрицательных моментов заштрихована (зона заклинивания). Незаштрихованная часть диаграммы (зона работы) соответствует области положительных моментов (где вектор потока  $\Phi_T$  опережает вектор потока  $\Phi_H$ ), а угол  $\psi$  и его синус имеют положительный знак.

За положительное направление электромагнитного момента принимается действие его по часовой стрелке (на замыкании контактов).

Линия АВ называется линией изменения знака момента. Она всегда расположена под углом  $\alpha$  к вектору  $U_p$ , т. е. совпадает с направлением вектора тока  $I_H$  в обмотке напряжения и потока, создаваемого этим током.

Линия CD (перпендикулярная линии АВ) называется линией максимальных моментов. Электромагнитный момент  $M_\vartheta$  достигает максимума при  $\alpha - \varphi_p = 90^\circ$ , т. е. когда вектор  $I_P$  опережает вектор  $I_H$  на  $90^\circ$ . Угол  $\varphi_p$ , при котором  $M_\vartheta$  достигает максимального значения, называется углом максимальной чувствительности.

сти  $\varphi_{\text{мч}}$ . Он образуется линией максимальных моментов и вектором подведенного к реле напряжения.

Следует иметь в виду, что углы  $\alpha$  и  $\varphi_{\text{мч}}$  откладываются от вектора напряжения в противоположные стороны. Поэтому  $\alpha + (-\varphi_{\text{мч}}) = 90^\circ$ , откуда  $\varphi_{\text{мч}} = \alpha - 90^\circ$ . Реле не срабатывает, если в нем отсутствует напряжение или ток, а также при  $\sin(\alpha - \varphi_p) = 0$ . Последнее условие имеет место при  $\varphi_p = \alpha$  или  $\varphi_p = \alpha + 180^\circ$ .

Таким образом, выражение (1) и рис. 3 показывают, что реле рассматриваемой конструкции реагирует на знак мощности короткого замыкания  $S_k$  или, иными словами, – на угол сдвига  $\varphi_p$  между векторами напряжения и тока.

Если выразить угол  $\alpha$  через дополняющий его угол  $\beta = -\varphi_{\text{мч}}$  (т. е.  $\alpha = 90^\circ - \beta$ ), то выражение (1) примет вид

$$\begin{aligned} M_\varepsilon &= \kappa_1 U_p I_p \sin(90^\circ - \alpha - \varphi_p) = \kappa_1 U_p I_p \cos(\varphi_p + \beta) = \\ &= \kappa_1 U_p I_p \cos(\varphi_p - \varphi_{\text{мч}}). \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) определяет вращающий момент реле смешанного типа. Из него следует, что при  $\cos(\varphi_p + \beta) > 0$  – момент положительный, а при  $\cos(\varphi_p + \beta) < 0$  – отрицательный. Максимальное значение положительного момента наступает при  $\cos(\varphi_p + \beta) = 1$ , т. е. при условии  $\varphi_p = -\beta$ . Угол  $\varphi_p$ , при котором положительный вращающий момент максимален, называется углом максимальной чувствительности  $\varphi_{p \text{ мч}}$ . Таким образом, угол  $\varphi_{p \text{ мч}}$  всегда равен и противоположен по знаку углу  $\beta$ , т. е.  $\varphi_{p \text{ мч}} = -\beta$ .

Реле с различными углами  $\beta$  и соответственно с различными углами максимальной чувствительности получают путем изменения угла  $\alpha$ . Для этого последовательно с обмоткой напряжения реле включаются добавочные активное и емкостное сопротивления.

При угле  $\alpha = \pi/2$  угол  $\beta = 0$ , и вращающий момент будет равен  $M_\varepsilon = \kappa_1 U_p I_p \cos(\varphi_p)$ . Такое реле называют косинусным.

Если угол  $\alpha = 0$ , то угол  $\beta = \pi/2$  и вращающий момент будет равен  $M_{\vartheta} = \kappa_1 U_p I_p \sin(\varphi_p)$ . Реле с таким выражением для вращающего момента называется синусным.

## 1.2. Основные характеристики индукционного реле направления мощности

Срабатывание реле происходит при условии, что электромагнитный момент преодолевает сопротивление удерживающей пружины и силы трения. Для их преодоления и срабатывания реле необходим минимальный вращающий момент (минимальная подведенная к реле мощность), при которой оно срабатывает (закрывает свои контакты), т. е. минимальная мощность срабатывания реле  $S_{cp \min}$ . Зависимость мощности срабатывания реле от угла сдвига фаз  $\varphi_p$  и тока  $I_p$  оценивают угловой характеристикой и характеристикой чувствительности.

Угловая характеристика (рис. 4) представляет собой зависимость мощности срабатывания ( $S_{cp} = U_{cp} I_{cp}$ ) от угла  $\varphi_p$ , т. е.  $S_{cp} = f(\varphi_p)$  или напряжения срабатывания  $U_{cp}$  от угла  $\varphi_p$  при заданном токе  $I_{cp}$ , т. е.  $U_{cp} = f(\varphi_p)$ , где  $U_{cp}$  – это наименьшее напряжение, необходимое для действия реле (при данных значениях  $I_{cp}$  и  $\varphi_p$ ). Эти зависимости можно получить из выражения (1, 2), подставив в него соответствующие значения  $I_p$  и  $\alpha$ .

Можно показать, что

$$S_{cp} = S_{cp \min} / \cos(\varphi_p + \beta) \quad (3)$$

Мощность срабатывания  $S_{cp}$  в выражении (3) принимает минимальное значение  $S_{cp \min}$  при угле  $\varphi_{p \text{ мч}}$ . По мере уменьшения  $\cos(\varphi_p + \beta)$  мощность  $S_{cp}$  возрастает и становится бесконечной (рис. 4, а) при условии  $\cos(\varphi_p + \beta) = 0$ . Это наблюдается при углах  $\varphi_p = -(\pi/2 + \beta)$  и  $\varphi_p = (\pi/2 - \beta)$ . Мощность срабатывания принимает минимальное значение при угле  $S_{cp \min}$ , если угол  $\varphi_{p \text{ мч}} = -\beta$ .

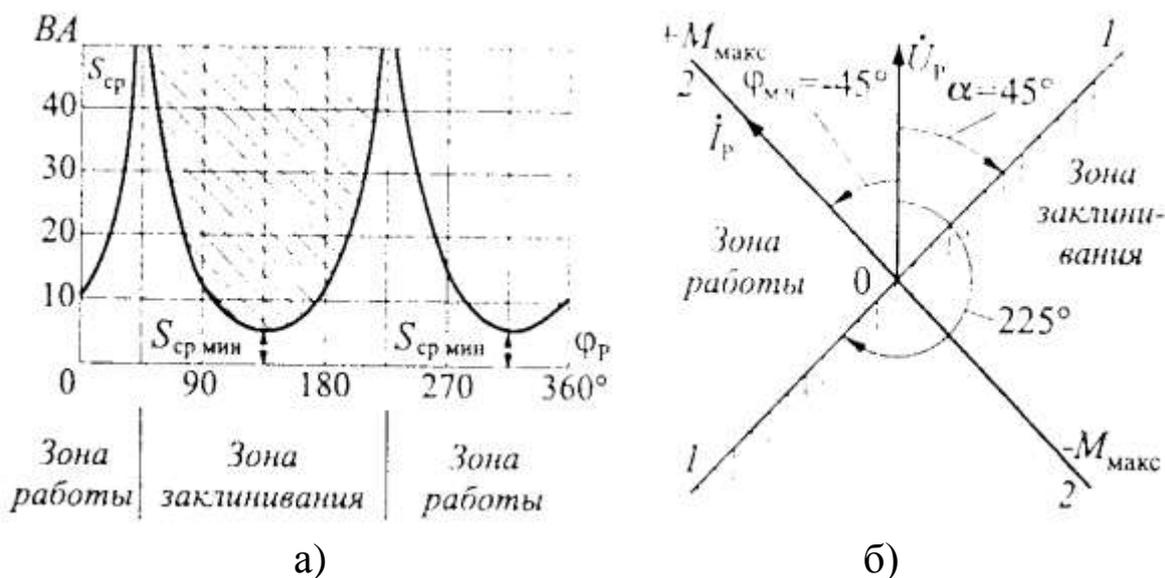


Рис. 4. Угловые характеристики реле мощности РБМ-171: а – в прямоугольной системе координат; б – в полярных координатах

Угловую характеристику можно построить в прямоугольной системе координат (рис. 4, а) либо в полярной системе координат (рис. 4, б).

Угловая характеристика позволяет определить:

- изменение чувствительности реле (величину  $U_{cp}$ ) при разных значениях угла  $\varphi_p$ ;
- минимальное значение напряжения  $U_{cp\ min}$  и наиболее выгодную зону углов  $\varphi_p$ , в пределах которой  $U_{cp}$  близко к  $U_{cp\ min}$ ;
- при каких углах  $\varphi_p$  меняется знак электромагнитного момента;
- пределы углов  $\varphi_p$ , которым соответствуют положительные и отрицательные моменты.

Угол  $\varphi_p$  считается положительным, если направление отсчета от вектора напряжения совпадает с направлением вращения часовой стрелки.

На рис. 4 показаны угловые характеристики для реле смешанного типа РБМ-171 ( $\alpha = +45^\circ$ ,  $\varphi_{мч} = -45^\circ$ ), для которого выражение (2) имеет вид  $M_{э} = \kappa_1 U_p I_p \cos(\varphi_p + 45^\circ)$

Область угловой характеристики, в пределах которой вращающий момент реле положителен и обеспечивает срабатывание реле, называют зоной работы. Область угловой характеристики, где вращающий момент на реле имеет отрицательное значение, что препятствует его срабатыванию, называют зоной заклинивания.

Зоны работы и заклинивания разделяются проходящей через начало координат (точка 0) прямой 1-1, которую принято называть линией изменения знака вращающего момента, а угол наклона этой линии к вектору напряжения – углом изменения знака вращающего момента ( $\alpha$ ).

Если направление вектора тока совпадает с линией 1-1, то вращающий момент реле равен нулю. Для рассматриваемого реле типа РБМ-171 это имеет место при углах между током и напряжением  $\varphi_p$ , равных  $+45^\circ$  и  $+225^\circ$ . Максимальный вращающий момент в сторону срабатывания реле имеет место при  $\varphi_p = -45^\circ$  ( $+315^\circ$ ), а в сторону заклинивания – при  $\varphi_p = +135^\circ$ . В обоих случаях направление вектора тока совпадает с линией 2-2.

Характеристика реле направления мощности РБМ-178 ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $\varphi_{мч} = +70^\circ$ ), применяемого в схемах защит от замыканий на землю, приведена на рис. 5.

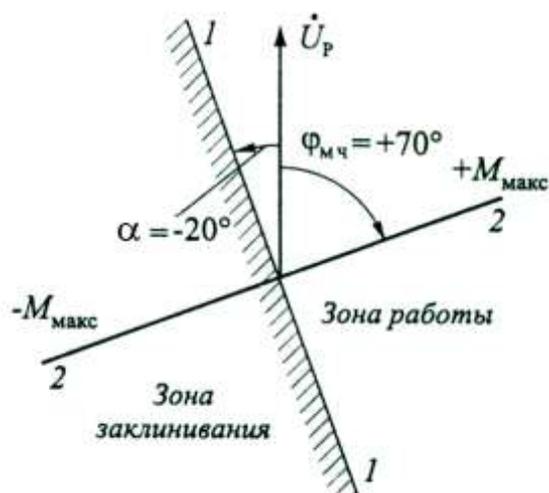


Рис. 5. Угловая характеристика в полярных координатах реле мощности РБМ-178

У идеальных реле силы трения и удерживающей пружины отсутствуют, поэтому  $S_{cp \min} = 0$ . Поэтому их идеальные угловые характеристики отличаются от рассмотренных тем, что касаются горизонтальной оси  $\varphi_p$ , либо проходят через начало координат. При анализе работы реле направления мощности часто пользуются его идеальной угловой характеристикой.

Характеристика чувствительности (вольт-амперная) представляет собой (рис. 6) зависимость напряжения срабатывания от тока:  $U_{cp} = f(I_p)$  при неизменном  $\varphi_p$ . Обычно эту характеристику получают при  $\varphi_p$ , равном углу максимальной чувствительности, т. е. для случая, когда  $\sin(\alpha - \varphi_p) = 1$ . Теоретически характеристика чувствительности изображается гиперболой (линия 1). Фактически (за счет насыщения стали магнитопровода) при больших токах напряжение остается неизменными и кривая чувствительности проходит параллельно оси токов (линия 2). Она показывает, что начиная с некоторого значения тока  $I_p$  напряжение  $U_p$  перестает уменьшаться. Это объясняется насыщением магнитной системы реле. Таким образом, экспериментальная вольт-амперная характеристика дает возможность определить минимальное напряжение  $U_{cp \min}$ , необходимое для срабатывания реле. Насыщение магнитной системы снижает чувствительность реле, так как при  $U_{cp \min}$  и росте тока увеличивается мощность  $S_{cp \min} = U_{cp \min} I_p$ .

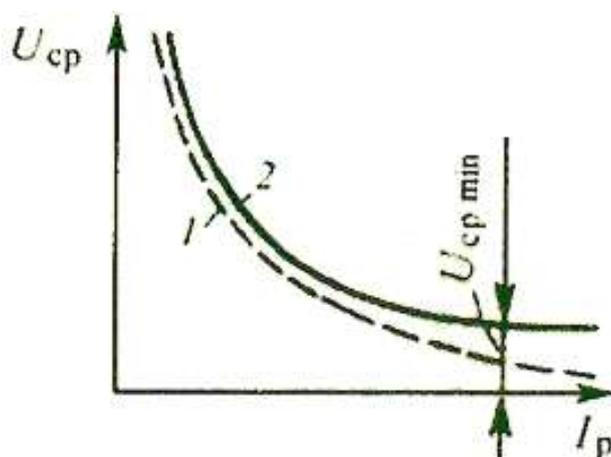


Рис. 6. Характеристика чувствительности реле РБМ-171

Если при коротком замыкании к реле подводится напряжение  $U_p < U_{cp}$ , то оно не сможет сработать. В таких случаях считают, что реле имеет мертвую зону.

Заметим, что знак электромагнитного момента реле зависит от относительного направления токов  $I_p$  и  $I_H$  в его обмотках. Принято изготавливать РНМ так, чтобы реле замыкало свои контакты при одинаковом направлении токов в обмотках напряжения и тока. Одинаковым называется направление тока в обеих обмотках от начала к концу обмотки или наоборот. При изготовлении реле указывают однополярные зажимы обмоток, отмечая их начало условным знаком (точкой).

Самоходом РНМ называют срабатывание его при прохождении тока только в одной его обмотке – токовой или напряжения. Реле, имеющее самоход от тока, может неправильно срабатывать при обратном направлении мощности, когда повреждение возникает в непосредственной близости от реле в зоне его несрабатывания.

Причиной самохода обычно является несимметрия магнитных систем реле относительно цилиндрического ротора. Для устранения самохода на стальном сердечнике РНМ предусмотрен срез. Изменяя положения сердечника, можно компенсировать неравномерность потоков в воздушном зазоре.

### 1.3. Индукционные реле мощности типа РБМ

В настоящее время находят широкое применение быстродействующие реле направления мощности типа РБМ-170. Электромагнитный момент этих реле описывается уравнением (2).

Имеются два основных варианта исполнения реле этой серии: РБМ-171 и РБМ-271. Их обычно используют для включения на фазный ток и междуфазное напряжение. Угол максимальной чувствительности у этих реле может изменяться и имеет два значения:  $\varphi_{p\text{ мч}} = -45^\circ\text{C}$  и  $\varphi_{p\text{ мч}} = -30^\circ\text{C}$ .

Реле РБМ-178 (РБМ-278) и РБМ-177 (РБМ-277) включаются на ток и напряжение нулевой последовательности. Угол их максимальной чувствительности  $\varphi_{p\text{ мч}} = +70^\circ\text{C}$ . Мощность срабатывания  $S_{cp}$  для реле РБМ-178 и РБМ-278 составляет

$S_{cp} = 0,2...4$  ВА; для реле РБМ-177 и РБМ-277  $S_{cp} = 0,6...3$  ВА.

Реле РБМ-271, РБМ-277, РБМ-278 – двустороннего действия и имеют два замыкающих контакта.

Промышленностью освоен выпуск РНМ на интегральных микросхемах серий РМ-11 (с угловой характеристикой, аналогичной РБМ-171) и РМ-12 (с угловой характеристикой, аналогичной РБМ-178).

Воздействующими на них величинами также являются две входных величины: напряжение и ток защищаемого элемента.

При построении РНМ на интегральных микросхемах (ИМС) используется принцип сравнения фаз двух входных величин, позволяющий получить большее быстродействие, чем у реле, построенных на сравнении абсолютных значений напряжений. Эти РНМ выполняются из отдельных электронных элементов, операционных усилителей (ОУ) и ИМС. В основе их работы лежит принцип раздельного сравнения времени совпадения мгновенных значений двух электрических величин (напряжений) с временем их несовпадения в положительном полупериоде с аналогичными величинами в отрицательном полупериоде. Этим достигается отстройка реле от апериодических составляющих во входных сравниваемых величинах.

Структурная схема реле представлена на рис. 7. Ее основными элементами являются: узел измерения (УИ), узел формирования (УФ), узел сравнения (УС), узел выхода (УВ), узел питания (УП). Узлы 1 и 2 включают в себя блоки (узлы) измерения и преобразования. Блоки измерения являются промежуточными преобразователями (датчиками) напряжения (ДН) и тока (ДТ) соответственно. Они обеспечивают гальваническую развязку полупроводниковой части реле от вторичных цепей первичных измерительных преобразователей. Входные сигналы (напряжение  $U_p$  и ток  $I_p$ ) на их входы поступают от измерительных трансформаторов напряжения ТН (ТВ) и тока ТТ (ТА) защищаемого объекта. В узлах измерения входные сигналы преобразуются в пропорциональные им напряжения  $\dot{U}_U = \kappa_U U_p$  и  $\dot{U}_I = \kappa_I I_p$ . Затем они поступают в узлы формирования. В узле формирования эти сигналы приводятся к виду, удобному для работы узла сравнения (УС) для реализации требуемой характеристики срабатывания реле.

В узле формирования блока 1 напряжение  $U_U$  с помощью фазоповоротной схемы (фазоповоротного устройства) сдвигается по фазе относительно вектора  $U_P$  на некоторый постоянный угол  $\alpha$ .

В этом же блоке с помощью переключателей SB1...SB4 может подключаться одна из двух фазоповоротных схем для получения угла максимальной чувствительности (минус  $30^\circ$  или минус  $45^\circ$  для РМ-11). Сдвиг по фазе напряжения  $U_U$  относительно напряжения  $U_P$  обеспечивает получение требуемого угла максимальной чувствительности  $\varphi_{p\text{ мч}}$  и угловой характеристики срабатывания реле.

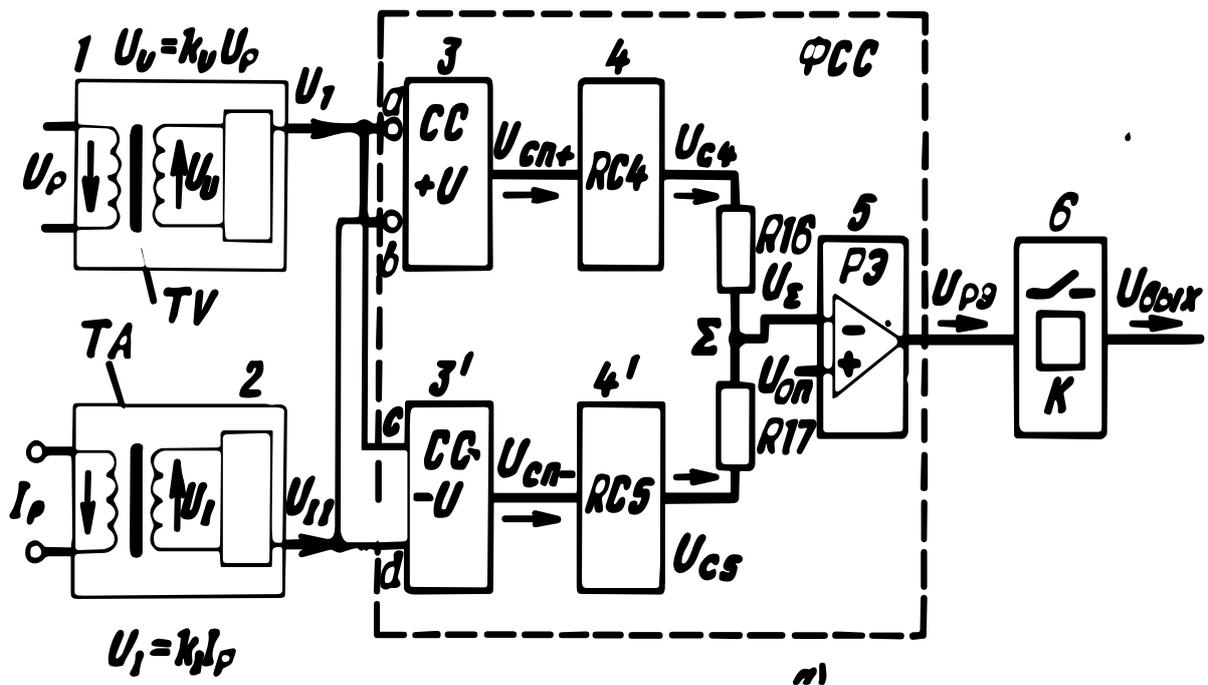


Рис. 7. Структурная схема реле направления мощности РМ-11 (РМ-12)

В узле формирования блока 2 напряжение  $U_I$  проходит через фильтр, снижающий уровень высших гармоник в нем.

В результате указанных преобразований на выходе блока 1 появляется напряжение  $U_I$ , а на выходе блока 2 – напряжение  $U_{II}$ .

Выходные напряжения  $\dot{U}_I = \dot{U}_U \exp(j\alpha) = k_1 \dot{U}_P$  и  $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_P$  блоков 1 и 2 поступают на блоки 3 и 3' фазосравнивающей схемы (ФСС), входящей в состав узла сравнения. В ФСС производятся преобразования сравниваемых напряжений в удобную для срав-

нения форму и образуется управляющий сигнал, соответствующий условиям сравнения.

Управляющий сигнал на выходе ФСС появляется при условии, что напряжения оказываются сдвинутыми на угол не более чем  $90^\circ$ . Величиной этого угла определяется зона срабатывания реле. Работа этого узла основана на принципе сопоставления (фаз) времени совпадения  $t_{cn}$  знаков однополярных мгновенных значений сравниваемых синусоидальных напряжений  $u_{1t} = \kappa_1 U_{pm} \sin(\omega t + \varphi)$  и  $u_{2t} = \kappa_2 I_{pm} \sin \omega t$  со временем несовпадения  $t_n$  знаков этих же напряжений. При этом время несовпадения фаз  $t_n$  определяется сдвигом фаз между сравниваемыми величинами и определяется уставкой  $t_y$ , которая для данного реле составляет четверть периода промышленной частоты. Если время совпадения знаков превышает четверть периода промышленной частоты, т. е. если  $t_{cn} \geq t_y$ , то реле срабатывает. Если оно меньше этого значения, то реле не срабатывает.

Особенностью фазосравнивающей схемы является раздельное сравнение интервалов совпадения и несовпадения мгновенных значений положительного и отрицательного знаков. Для этого она разделена на две параллельные части – два канала прохождения сигналов сравниваемых напряжений. В одном канале (верхнем) измеряется время совпадения положительных значений  $U_I$  и  $U_{II}$ , а в другом (нижнем) – отрицательных мгновенных значений этих же напряжений. Такое разделение с последующим суммированием выходных сигналов обоих каналов устраняет влияние апериодической составляющей.

Схема совпадения (СС) 3 выявляет и фиксирует совпадение мгновенных значений  $U_I$  и  $U_{II}$  положительного знака, а схема совпадения (СС) 3' – тех же напряжений отрицательного знака. В интервале времени совпадения мгновенных значений  $U_I$  и  $U_{II}$  положительной полярности на выходе узла 3 появляется напряжение  $U_{СП+}$  прямоугольной формы, а при совпадении отрицательных значений такое же по форме и амплитуде напряжение  $U_{СП-}$  появляется на выходе узла 3' (см. рис. 7).

Каждый из сигналов ( $U_{СП+}$  и  $U_{СП-}$ ) поступает на интеграторы 4 и 4', фиксирующие длительность совпадения знаков сравни-

ваемых величин. Они выполняются в виде цепей  $RC4$  и  $RC5$  с одинаковыми значениями  $R$  и  $C$ . По мере заряда конденсаторов  $C4$  и  $C5$  на выходе соответствующего интегратора появляются напряжения  $U_{C4}$  и  $U_{C5}$ , значения которых пропорциональны длительности положительных и отрицательных сигналов совпадения.

Каждое из этих напряжений нарастает на обкладках конденсаторов интеграторов 4 и 4' по экспоненте, имеющей в начальной части линейный характер.

После исчезновения совпадающих по знаку напряжений конденсатор интегратора разряжается. С интеграторов оба напряжения подводятся на вход аналогового сумматора ( $R16$ ,  $R17$ ), где происходит их сложение.

Результирующее пилообразное напряжение  $U_{\Sigma} = 0,5(U_{C4} + U_{C5})$  с выхода сумматора подводится к реагирующему элементу ( $PЭ$ ) 5, который выполнен в виде порогового компаратора релейного действия (триггера Шмитта) на базе операционного усилителя. Суммарное (положительное) напряжение  $U_{\Sigma}$  подводится на его инвертирующий вход, а опорное (пороговое)  $U_{оп}$  – на неинвертирующий вход. Триггер срабатывает при появлении на его входе напряжения  $U_{\Sigma} = U_{оп}$ , значение которого соответствует продолжительности времени совпадения  $t_{cn} \geq 0,005$  с (для случая, когда сдвиг фаз равен  $90^\circ$ ). Если суммарное напряжение превысит пороговое напряжение триггера, то он переключается, и на его выходе появляется сигнал отрицательного знака.

Под действием этого напряжения срабатывает узел выхода 6, в качестве которого используется транзисторный каскад и промежуточное электромагнитное РП-13 или герконовое реле  $KL$  (РПГ-5), которое срабатывает и своими контактами подает сигнал в цепь управления коммутационным аппаратом.

Если время совпадения (следовательно, и продолжительность импульсов) меньше допустимого значения, то конденсаторы  $C4$  и  $C5$  не успевают зарядиться до требуемых значений, а напряжение  $U_{\Sigma}$  не достигает значения напряжения срабатывания  $U_{ср}$ . В этом случае реле также не срабатывает (рис. 8).

Фазосравнивающая схема и схема выходного блока питаются от стабилизированного делителя, включенного между плюсом и минусом напряжения постоянного тока 220 или 110 В (на делите-

ле имеются ответвления +28, +10, -5 и 0 В).

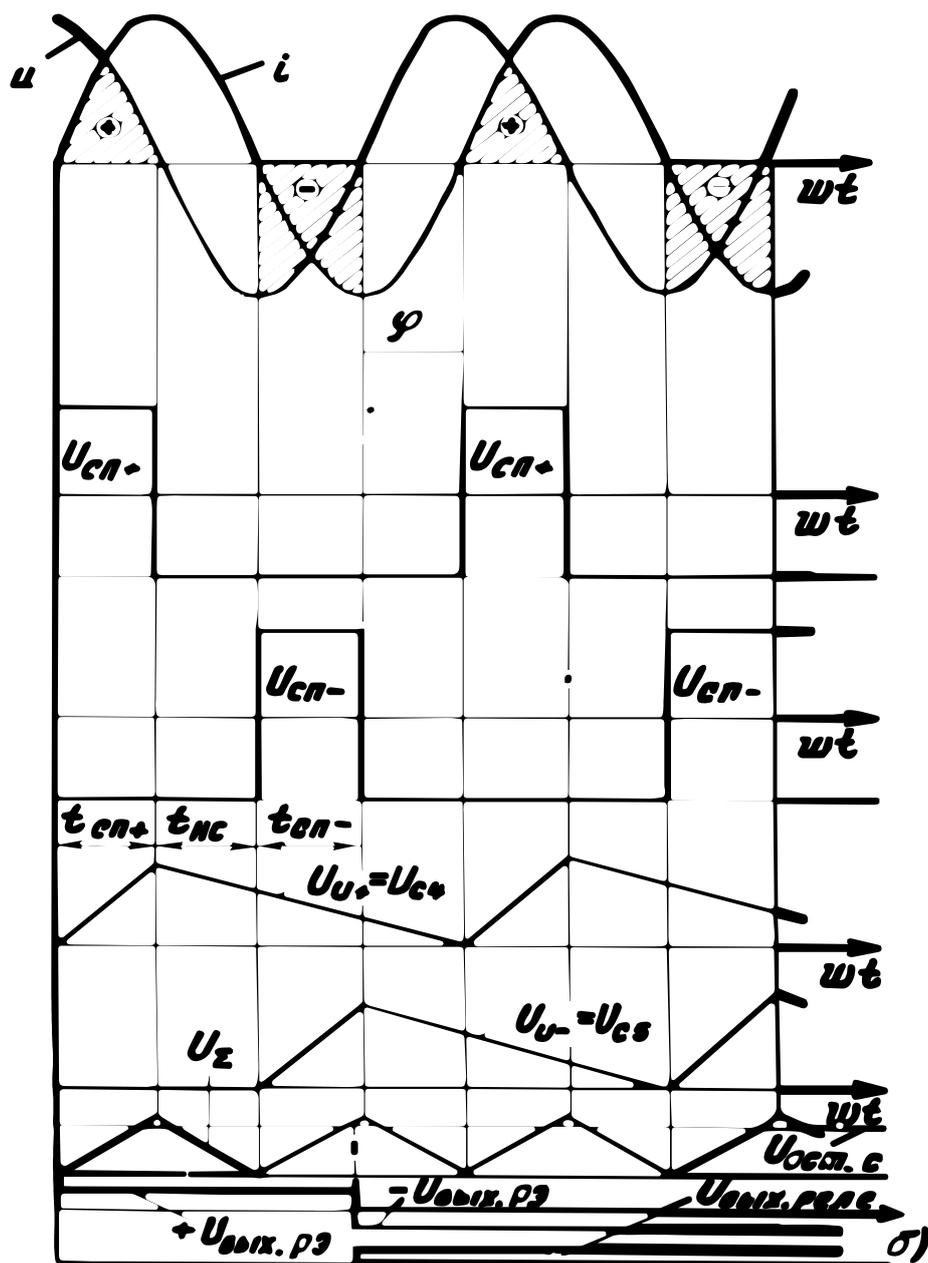


Рис. 8. Диаграммы работы схемы ФСС реле серии РМ-11 (РМ-12)

Предусмотрена возможность использования в качестве источника питания выпрямленного напряжения, получаемого с помощью комбинированного блока питания, включаемого на напряжение и ток сети.

Узел питания предназначен для получения от источника оперативного тока защищаемого объекта стабилизированных

напряжений постоянного тока, необходимых для работы интегральных микросхем и исполнительного выходного реле.

Основные параметрами реле РМ-11: время срабатывания – 30 мс (при  $\varphi_p = \varphi_{p \text{ мч}}$ ); чувствительность  $U_{cp} = 0,25 \text{ В}$ ; ток срабатывания  $I_{cp} = 0,25 I_{ном}$ ; потребление в цепи переменного тока – 0,15 ВА, в цепи переменного напряжения – 0,1 ВА, в цепях оперативного тока – 10 Вт.

#### 1.4. Направленная защита в сети с двусторонним питанием

Направленной называется релейная защита, действующая только при определенном направлении (знаке) мощности КЗ. Необходимость применения направленных защит возникает в сетях с двусторонним питанием и в кольцевых сетях с одним источником питания. При двустороннем питании места КЗ для ликвидации повреждения релейная защита должна устанавливаться с обеих сторон защищаемой ЛЭП.

Самым простым способом защиты от КЗ в сетях с двусторонним питанием, как и в сетях с односторонним питанием, может служить защита, реагирующая на амплитуду тока КЗ. Однако обычная МТЗ, реагирующая только на значение тока, в подобных сетях не может обеспечить селективного отключения повреждения. Для селективного действия ее необходимо дополнить реле направления мощности, реагирующим на знак мощности, протекающей по защищаемому присоединению. При этом защита должна действовать, если мощность КЗ будет положительна (направлена из шины в линию). При построении селективной защиты в сетях с двусторонним питанием реализуются следующие положения:

- защита должна устанавливаться с обеих сторон каждой ЛЭП и действовать на отключение при появлении тока КЗ, если мощность КЗ положительна (направлена от шин в линию);

- выдержки времени защит, срабатывающих при одном направлении мощности, должны согласовываться по встречно-ступенчатому принципу, нарастая по направлению к источнику питания.

#### 1.5. Функциональная схема и принцип действия токовой

## направленной защиты

Токовой направленной защитой называют защиту, которая реагирует на ток, проходящий в защищаемом элементе, и фазу (направление) тока относительно напряжения в месте установки защиты. Условное положительное направление тока принято от шины (где установлена защита) вглубь защищаемой зоны.

Направленная токовая защита (НТЗ) при КЗ должна реагировать на значение тока и направление мощности в поврежденных фазах защищаемой ЛЭП. Структурная схема направленной МТЗ показана на рис. 9. Она включает в себя три основных элемента (органа):

- два пусковых реле тока КА (измерительные органы тока – ИОТ), которые срабатывают при появлении тока КЗ и выдают сигнал, разрешающий действовать защите;

- два реле направления мощности КМ (органы направления мощности – ОНМ), которые срабатывают при положительном направлении мощности (от шин в линию) и подают сигнал, разрешающий действовать (срабатывать) защите;

- логическую схему (которая действует по заданной программе: получив сигнал о срабатывании ИОТ, ОНМ формирует сигнал о срабатывании РЗ, который с заданной выдержкой времени поступает на электромагнит отключения (ЭО) выключателя (УАТ) и производит его отключение).

Пусковое реле тока (КА) включают на полный ток фазы ЛЭП, а реле направления мощности (РНМ) – на ток той же фазы и соответствующее междуфазное напряжение. Поведение РНМ определяется знаком мощности, подведенной к его зажимам

$$S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p).$$

При КЗ на защищаемой ЛЭП подводимая к реле мощность положительна ( $+S_p$ ), и РНМ разрешает НТЗ действовать на отключение. В этом случае реле КА и КМ, приходя в действие, подают сигналы на вход логического элемента *И* (рис. 9). На выходе элемента *И* появляется сигнал, который приводит в действие реле времени *КТ*. Через заданное время на выходе *КТ* появляется сигнал, действующий на исполнительный элемент *КЛ*, который подает команду на отключение выключателя.

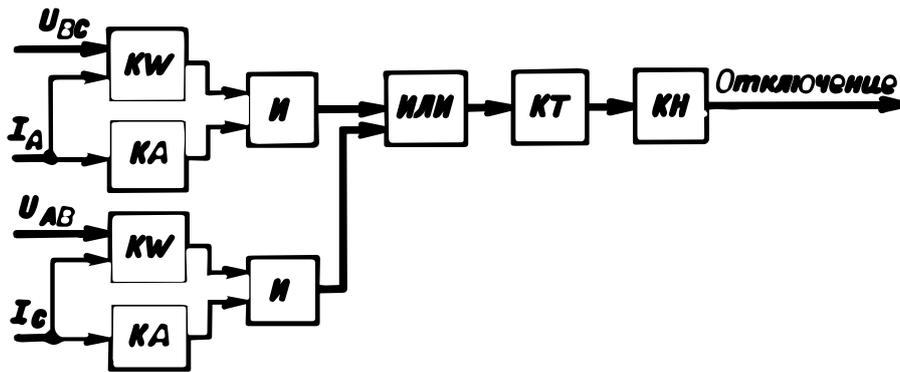


Рис. 9. Структурная схема направленной МТЗ

При КЗ на других присоединениях данной подстанции реле  $KA$  срабатывает, если  $I_K > I_{c.з.}$ , но так как реле  $KW$  не работает, элемент  $И$ , а следовательно, и НТЗ в целом не действуют.

Рассматриваемая структурная схема может быть реализована с помощью как контактных, так и бесконтактных (микроэлектронных) реле направления мощности в виде принципиальной схемы, представленной на рис. 10.

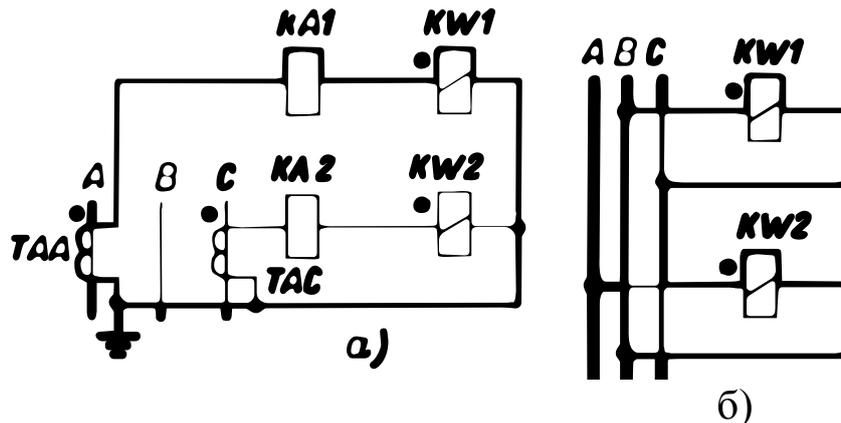


Рис. 10. Схема принципиальная (двухфазная) направленной МТЗ: а – цепи тока; б – цепи напряжения

В нормальном режиме, если мощность нагрузки направлена от шин в ЛЭП, РНМ может также сработать (ложно). Для исключения ложного срабатывания НТЗ ее пусковой орган  $KA$  необходимо отстраивать от тока нагрузки ( $I_{cз} > I_{н \max}$ ).

При качаниях в энергосистеме НТЗ может также сработать

ложно, если ток качания окажется больше  $I_{сз}$ . Мощность  $S_p$  на зажимах реле  $KW$  будет направлена от шин в ЛЭП, а период качаний будет больше выдержки времени НТЗ. Для исключения действия НТЗ при качаниях ее время действия должно быть больше 1 с.

В кольцевой сети НТЗ может срабатывать каскадно, т. е. последовательно срабатывают защиты и отключаются выключатели, установленные по концам защищаемой ЛЭП.

### 1.6. Схемы включения реле направления мощности

Под схемой включения измерительного органа мощности (реле направления мощности) понимают такую схему, которая обеспечивает определенное сочетание подводимых к нему полных фазных токов и напряжений (или их симметричных составляющих).

Реле направления мощности включаются, как правило, на фазный ток и фазное или междуфазное напряжение. Сочетание фаз тока и напряжения реле, называемое его схемой включения, должно быть таким, чтобы реле правильно определяло знак мощности КЗ при всех возможных случаях и видах повреждений. При этом к реле должна подводиться возможно большая мощность  $S_p$ .

Фактическая мощность, подводимая к реле, в общем случае может иметь значение, которое недостаточно (т. е. мало) для действия (срабатывания) РНМ. Такая ситуация возникает при КЗ, близких к месту установки реле. Этот факт может быть обусловлен: снижением напряжения  $U_p$ ; значением угла  $\varphi_p$ , при котором  $\sin(\alpha - \varphi_p)$  равен нулю (или близок к нему).

Практически в схемах НТЗ применяется включение РНМ по так называемой 90-градусной схеме. Название схемы (90-градусная) носит условный характер. В нем отражается величина угла  $\varphi_p$  между напряжением и током, подведенным к РНМ в симметричном трехфазном режиме при условии, что ток в фазе совпадает с одноименными фазным напряжением.

Векторные диаграммы РНМ типа РБМ-171 с углом максимальной чувствительности  $\varphi_{мч} = -30^\circ$ , включенного по 90-

градусной схеме, показаны на рис. 11.

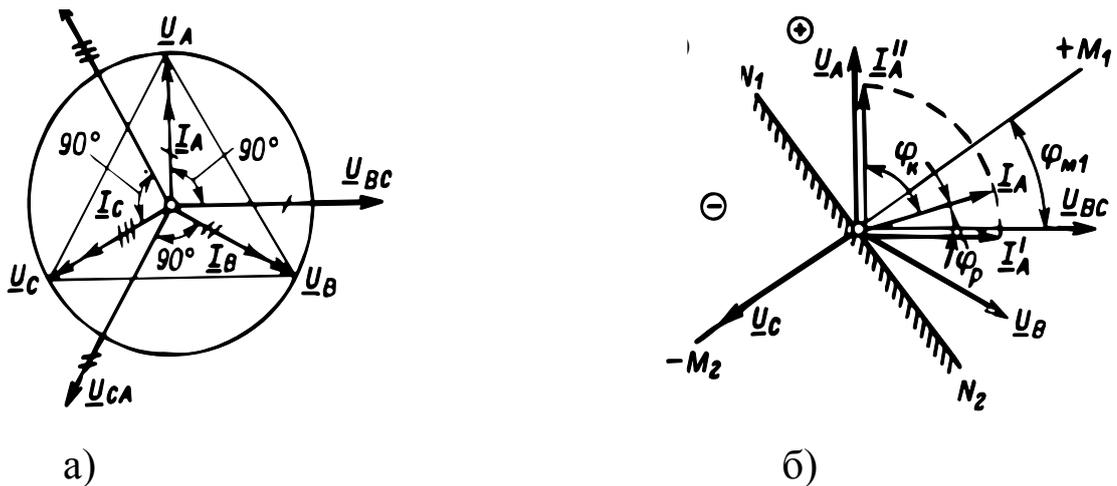


Рис. 11. Векторные диаграммы токов и напряжений для реле мощности при 90-градусной схеме включения

Угол внутреннего сдвига этого реле можно представить в виде  $\alpha = 90^\circ \text{C} + \varphi_{\text{мч}} = 90^\circ \text{C} - 30^\circ \text{C} = 60^\circ \text{C}$ . Мощность на зажимах такого реле равна  $S_p = \kappa_1 U_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ \text{C})$ . РНМ включено на ток  $I_p = I_A$  и напряжение  $U_p = U_{BC}$ .

На рис. 11, б изображена векторная диаграмма напряжений и тока  $I_A$  при трехфазном КЗ на ЛЭП. Ток  $I_A$  отстает от напряжения  $U_A$  на угол  $\varphi_k$ .

Вектор  $I_A$  имеет два предельных положения:  $I'_A$  – при КЗ за чисто реактивным сопротивлением, когда  $\varphi_k = 90^\circ \text{C}$ ;  $I''_A$  – при КЗ через дугу в начале ЛЭП, когда  $\varphi_k \approx 0^\circ \text{C}$ .

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Работа проводится на специальном лабораторном стенде, структурная схема которого представлена на рис. 12. Основными элементами стенда являются: испытуемые образцы реле направления мощности, фазовращатель, трансформаторы Т1, Т2 и Т3, измерительные приборы РВ и РА, осциллограф, органы коммутации.

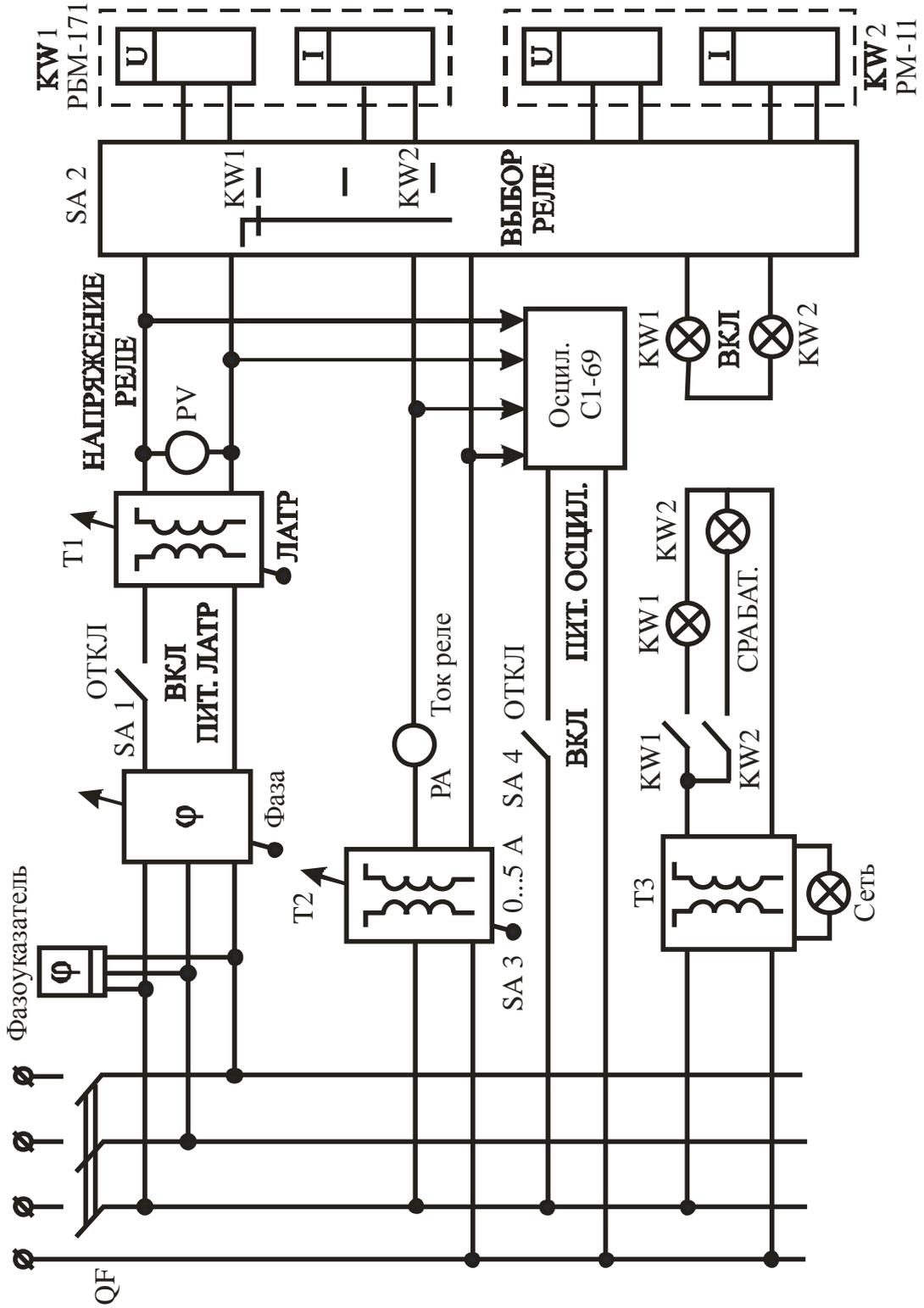


Рис. 12. Структурная схема лабораторного стенда

Фазовращатель (ф ) «ФАЗА» обеспечивает смещение фазы напряжения, подводимого к одной из обмоток (напряжения) испытуемого реле (с помощью ручки, размещенной на верхней вертикальной панели стенда).

Трансформатор Т1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), позволяет регулировать уровень напряжения, подводимого к обмотке напряжения реле.

Трансформатор Т2 – трансформатор тока («ТОК РЕЛЕ»), обеспечивает дискретную регулировку тока в обмотке реле.

Испытуемые образцы реле (РНТ-171, РМ-11) – вмонтированы в стенд (видны их лицевые панели).

Трансформатор Т3 – вспомогательный трансформатор, обеспечивает питание сигнальных ламп.

Измерительные приборы: вольтметр (РV) – обеспечивает контроль величины напряжения на обмотке напряжения реле, амперметр (РА) – обеспечивает контроль величины тока в токовой обмотке реле.

Переключатели: SA1 – обеспечивает подачу напряжения на вход трансформатора Т1; SA2 – обеспечивает коммутацию цепей тока и напряжения к выбранному реле; SA3 – обеспечивает дискретную регулировку амплитуды тока в токовой обмотке испытываемого реле.

Двухканальный осциллограф (С1-69) обеспечивает оперативный контроль тока и напряжения в обмотках испытываемого реле.

При проверке параметров РНМ производится: внешний осмотр; проверка (регулировка) механической части и контактов; проверка (регулировка) электрических характеристик.

## 2.1. Проверка (регулировка) механической части и контактов

Снять кожух с реле, удалить пыль и грязь с деталей. Проверить надежность паек, затяжку винтов и гаек, крепежные проводники и детали реле, исправность и состояние нижнего и верхнего подпятников и концов оси барабанчика. Вертикальный люфт по-

движной системы не должен превышать 0,3...0,5 мм. Горизонтальный люфт зависит от диаметра камней подпятников.

Проверить ход барабанчика при полностью ослабленной пружине. Подвижная система отклоняется в крайнее положение (на 90°). Зазор между барабанчиком и полюсами должен быть равномерным и иметь величину 0,9...1,0 мм.

Отрегулировать взаимное положение подвижного и неподвижного контактов. Расстояние между ними должно быть 1,0...1,5 мм. Регулировка неподвижного контакта производится специальным винтом и поворотом колодки в отверстиях платы, имеющей предназначенные для этого прорези. Вследствие малого зазора в магнитной цепи подвижная система реле подвержена значительной вибрации при большой кратности подведенной мощности.

## 2.2. Регулировка (измерение) электрических характеристик

Проверка и регулировка электрических характеристик (параметров) реле производится при помощи специальных комплектов аппаратуры (У-5053) либо на лабораторном стенде.

### 2.2.1. Определение потребляемой мощности

Для определения мощности, потребляемой обмоткой напряжения, измеряют ток в ней при номинальном напряжении 100 В. Потребляемая мощность определяется по формуле  $P_n = U_p I_n$ .

Для определения мощности, потребляемой обмоткой тока, измеряют напряжение на ней при номинальном токе реле 5 или 1 А. Потребляемая мощность определяется аналогично по формуле  $P_m = I_p I_m$ . Полученные значения не должны отличаться более чем на 10–12 % от паспортных данных реле.

### 2.2.2. Проверка и устранение «самохода»

Самоходом называют вращение подвижной системы реле в ту или иную сторону под действием либо только тока или только

напряжения, т.е. самопроизвольный ход подвижной системы, вызываемый только током или только напряжением. Проверка и устранение «самохода» производится затяжкой возвратной пружины на рабочий угол, исключая самопроизвольное движение подвижной системы в сторону замыкания контактов. Вращающий момент при самоходе появляется в результате несимметрии магнитной системы и может быть направлен в сторону замыкания контактов или в сторону их заклинивания. Он может менять знак при изменении величины тока или напряжения.

Вращающий момент самохода в сторону заклинивания «загрубляет» реле и может привести к отказу защиты. Вращающий момент самохода в сторону замыкания контактов может привести к ложному действию защиты. Поэтому он должен быть полностью устранен или уменьшен до величины, при которой затяжка возвратной пружины на рабочий угол исключает самоход подвижной системы в сторону замыкания контактов.

Устранение самохода, вызываемого током, должно производиться при токах в диапазоне от номинального тока реле до максимального тока КЗ, протекающего по защищаемому присоединению при КЗ на шинах подстанции, где установлена защита.

Устранение самохода, вызываемого напряжением, должно производиться при изменении напряжения в диапазоне 0...110 В.

Устранение вращающих моментов от самохода рекомендуется начинать с устранения самохода от тока. Значение тока при этом должно быть разным для защит от междуфазных КЗ и защит от замыкания на землю. В первом случае этот ток должен быть равен току КЗ в присоединении, на котором установлена проверяемая защита. Для защит от замыкания на землю этот ток должен быть равен току срабатывания наиболее чувствительной направленной защиты от замыкания на землю на проверяемом присоединении.

Проверку и устранение вращающего момента самохода производят при полностью ослабленной возвратной пружине реле. Самоход, вызываемый током, проверяют при замкнутой коротко обмотке напряжения. Самоход, вызываемый напряжением, проверяют при разомкнутой токовой обмотке. Устранение вращающего момента самохода производят путем поворота стального сердечника вокруг своей оси. Для этого ключом (накидным,

диаманитным) ослабляют большую гайку, крепящую сердечник, настолько, чтобы его можно было повернуть на небольшой угол.

При проверке реле необходимо следить за температурой обмоток реле, не допуская их перегрева.

Если самоход, вызываемый током, не удастся устранить указанным способом, то рекомендуется произвести незначительный сдвиг вправо или влево полюсов системы напряжения. С этой целью необходимо ослабить полюсные болты, сдвинуть полюсы и снова закрепить болты, следя за равномерностью зазора между барабанчиком и полюсами.

Устранение самохода путем сдвига полюсов является весьма ответственной операцией и может выполняться лишь опытным, квалифицированным персоналом.

### 2.2.3. Проверка зоны действия РНМ

Проверка зоны действия реле заключается в построении угловой характеристики и определении угла максимальной чувствительности (рис. 4). Проверку зоны действия реле производят при: номинальных значениях тока и напряжения; рабочей затяжке возвратной пружины реле.

В реле серии РБМ нормальный заводской угол затяжки составляет  $120^\circ$ . В большинстве реле этого типа, установленных в схемах защит, этот угол колеблется в пределах от  $90^\circ$  до  $180^\circ$ .

При проверке зоны действия реле (при неизменных номинальных величинах тока и напряжения на реле) фазорегулятором  $\varphi$  изменяют угол сдвига между током и напряжением от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  (затем в обратную сторону – от  $360^\circ$  до  $0^\circ$ ). При этом измеряют величины углов, при которых реле замыкает и размыкает контакты.

Угол максимальной чувствительности реле определяют подсчетом или графически. Для этого на диаграмму наносят исходный вектор  $U_p$  и линии замыкания (или размыкания) в соответствии с полученными результатами измерений.

Угол, в пределах которого срабатывает реле, делят пополам (проводят биссектрису). Биссектриса образует линию максималь-

ных моментов, а угол между линией максимальных моментов и вектором  $U_p$  образует угол максимальной чувствительности.

Если фазометр и реле соединены между собой правильно (в отношении полярных зажимов), то при совпадении полученной зоны действия реле с зонами, показанными на рис. 4, угловая характеристика реле считается удовлетворительной, а заводская маркировка однополярных зажимов реле правильной.

Расхождение полученных результатов с номинальными (паспортными) данными допускается не более чем на 5 %.

#### 2.2.4. Проверка чувствительности реле

Проверку чувствительности реле, т.е. мощности срабатывания реле, производят (см. рис. 6) также при рабочей затяжке возвратной пружины, номинальном токе. При этом угол между током и напряжением устанавливают равным углу максимальной чувствительности. Коэффициент возврата реле должен быть не менее 0,6. Мощность срабатывания не должна превышать номинальное значение.

При отсутствии вольтметра со шкалой на малые пределы измерений допустимо измерять мощность срабатывания при токе, равном 20...40 % от номинального.

При токах, превышающих номинальный, реле загрубляется из-за насыщения магнитопровода. Чувствительность реле определяется углом затяжки возвратной пружины.

У реле серии РНМ двустороннего действия чувствительность должна быть проверена на замыкание левого и правого контактов отдельно.

#### 2.2.5. Проверка работы контактов реле

Контакты реле должны замыкаться без вибрации, искрения и отскакиваний. При размыкании контактов не должно быть искрения, вызывающего их подгорание. Проверка поведения контактов реле при подаче и сбросе обратной мощности производится для устранения возможного ложного срабатывания защиты.

### 2.3. Содержание отчета по лабораторной работе

В отчете по лабораторной работе должны быть представлены:

- основные теоретические положения (принцип работы, определения, конечные математические выражения, практические выводы);
- типы (модификации) реле, их основные паспортные характеристики (данные);
- схема и результаты измерений (в табличной и графической форме);
- выводы по результатам опытов и расчетов.

## 3. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Ознакомиться с принципом построения и конструкцией реле направления мощности, а также с оборудованием и приборами, необходимыми для проведения работы (лабораторным стендом для проверки реле).
3. Проверить (отрегулировать) механическую часть и контакты реле.
4. Уяснить функциональную схему стенда и назначение его органов управления.
5. Установить органы управления в первоначальное положение, обеспечивающее минимальные напряжения и минимальные токи в соответствующих цепях.
6. Проверить (и устранить при необходимости) самоход реле (по току и по напряжению). Устанавливать ток в пределах от 0 до 20 А и подавать его кратковременно для того, чтобы убедиться в наличии или отсутствии самохода. Для устранения самохода поворачивают сердечник, расположенный внутри барабанчика, а также смещают обмотки напряжения вдоль их оси. Если самоход полностью устранить не удастся, можно допустить незначительный самоход, но только в сторону замыкания контактов.
7. Проверить зону действия реле (снять угловую характеристику).

Установив величину тока 5 А, изменять угол между током и напряжением от 0 до 360 °С. Поведение реле фиксируется через каждые 30 °С. Ток устанавливать в пределах от 1 до 5 А, а в момент изменения состояния контактной системы соответствующие углы зафиксировать с точностью до 1 °С (знак «+» – контакты замкнуты, знак «-» – контакты разомкнуты). При снятии угловой характеристики проверить правильность маркировки начальных зажимов обмоток тока и напряжения.

8. При угле между током и напряжением, равном углу максимальной чувствительности (ток 1 А) проверить чувствительность реле (мощность срабатывания и коэффициент возврата). Для этого плавно изменять напряжение с помощью ручки управления ЛАТР.

9. Начертить угловую характеристику, круговую и векторную диаграммы для реле РБМ-171 с углом максимальной чувствительности минус 30 °С.

10. Разобрать схему, привести в порядок рабочее место.

#### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Принцип работы индукционных РНМ и основные элементы их конструкции

2. Векторная диаграмма токов и напряжений индукционных РНМ.

3. Углы внутреннего сдвига и максимальной чувствительности РНМ.

4. Момент вращения, мощность, подведенная к реле, и мощность срабатывания РНМ.

5. Линии нулевого и максимального моментов РНМ.

6. Характеристика чувствительности и угловая характеристика РНМ.

7. Основные параметры РНМ типа РБМ-171 (271, 178, 278).

8. Принцип работы микроэлектронных РНМ. Особенности построения этих реле, назначение элементов структурной схемы, основные параметры.

9. Место и роль РНМ в направленной защите (на примере МТЗ). Особенности построения функциональной и принципиальной схем с применением РНМ.

10. Схемы включения реле направления мощности (определение, векторные диаграммы).

11. Явление «самохода» в РНМ (причины и способы устранения).

12. Порядок проверки зоны действия РНМ, практическое определение угла максимальной чувствительности.

13. Порядок проверки чувствительности РНМ, практическое определение минимального напряжения и мощности срабатывания РНМ.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

### ЦЕЛИ РАБОТЫ:

1. Ознакомление студентов с принципами действия, особенностями построения и схемными решениями трехступенчатой токовой защиты ЛЭП (с односторонним питанием).
2. Уяснение алгоритма расчета параметров (уставок) трехступенчатой токовой защиты ЛЭП.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из признаков возникновения короткого замыкания (КЗ) является увеличение тока в линии (защищаемом объекте). Этот признак используется для выполнения защит, называемых токовыми. Токовые защиты срабатывают при увеличении тока в фазе (фазах) сверх определенного (допустимого, порогового) значения.

Комплект трехступенчатой токовой защиты ЛЭП обычно представляется в виде совокупности трех видов защит:

- мгновенной токовой отсечки (МТО) – 1 степень;
- токовой отсечки с выдержкой времени (ТОВВ) – 2 степень;
- максимальной токовой защиты (МТЗ) – 3 степень.

Рассмотрим принцип действия и порядок расчета (выбора уставок) каждой из этих защит применительно к комплексу защит (МТО<sub>1</sub>, ТОВВ<sub>1</sub>, МТЗ<sub>1</sub>), установленному на подстанции ПС-1 для защиты ЛЭП (W1). Все эти защиты воздействуют на выключатель Q1 (рис. 1, а). На расчетной схеме приняты защиты показывать четырехугольниками с соответствующими номерами (А1...А8), расположенными рядом с выключателями, на которые они должны воздействовать.

#### 1.1. Мгновенная токовая отсечка

Мгновенная токовая отсечка (защита) является первой ступенью трехступенчатой токовой защиты. Она предназначена для отключения защищаемого элемента (объекта) без выдержки вре-

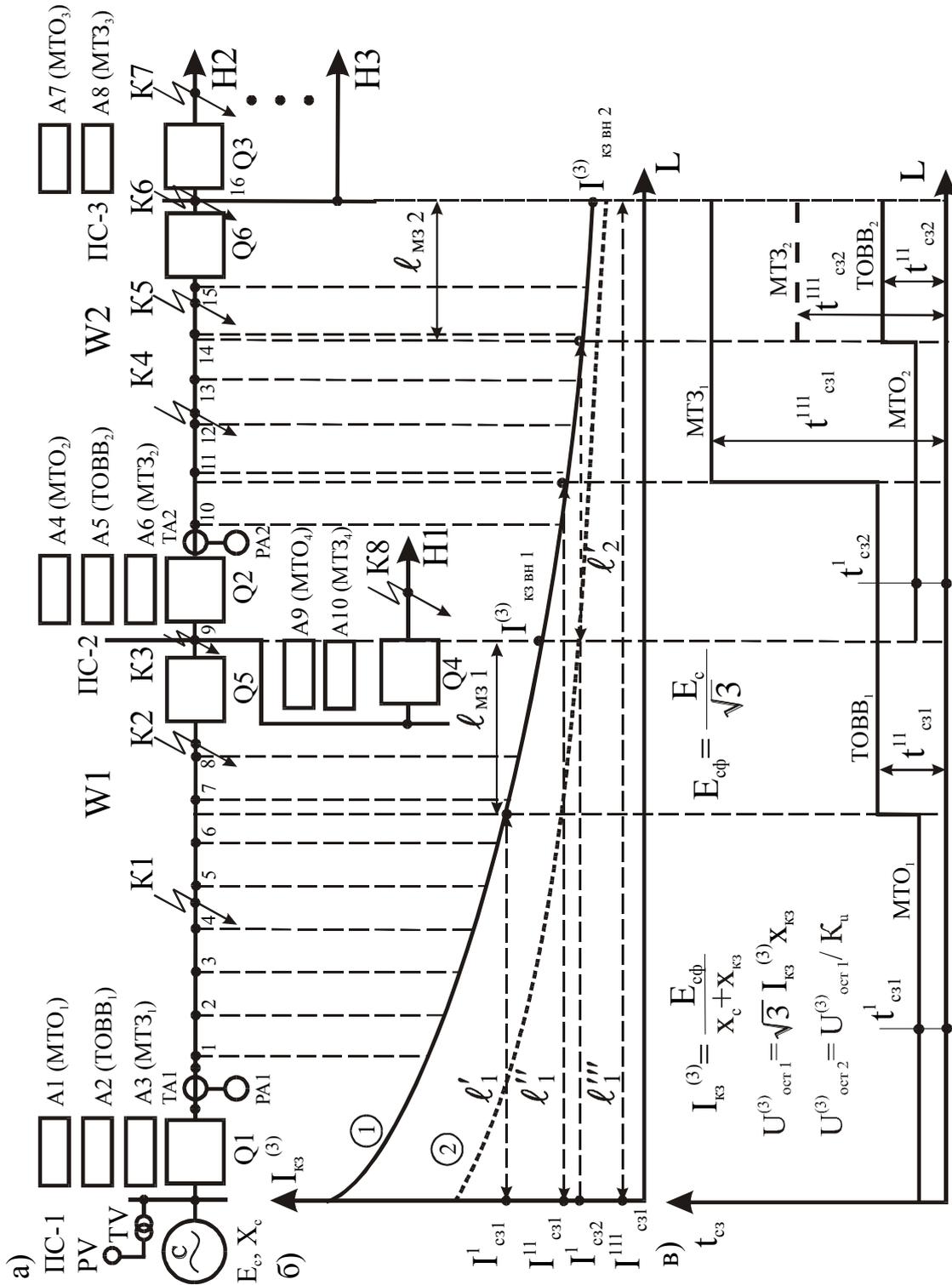


Рис. 1. Схема сети: а – расчетная схема; б – токи КЗ; в – диаграмма селективности

мени при превышении током, протекающим по защищаемому элементу, величины, равной току срабатывания защиты.

На рис. 1, а показана схема фрагмента сети с радиальным питанием. Каждый элемент этой схемы (линии W1 и W2, нагрузки Н1, Н2, Н3) имеет свой комплект защит. Рассмотрим, например, линию W1. Левый конец этой линии присоединен к шинам подстанции ПС-1 (с этой стороны вся схема получает питание). С правой стороны линия присоединена к шинам подстанции ПС-2, от которой питаются соответствующие элементы СЭС.

На обоих концах линии W1 установлены выключатели (Q1 и Q5), которые предназначены для включения (отключения) этой линии. При КЗ на линии W1 (например, в точках К1, К2, К3) по ней протекает ток, величина которого зависит от места расположения точки КЗ, т. е. от расстояния  $L_{кз}$  от места установки защиты до точки короткого замыкания. Следует иметь в виду, что величина тока КЗ зависит также от режима работы питающей системы и вида короткого замыкания.

При работе системы в максимальном режиме сопротивление системы минимально и равно  $X_{c \min}$  (на ПС-1 включено максимальное количество генераторов). В этом случае при трехфазном КЗ по ЛЭП протекает максимальный ток  $I_{кз \max}^{(3)}$  (рис. 1, б – сплошная линия 1).

При работе системы в минимальном режиме сопротивление системы максимально и равно  $X_{c \max}$  (на ПС-2 включено минимальное количество генераторов). В этом случае при этом же виде КЗ по ЛЭП протекает минимальный ток  $I_{кз \min}^{(3)}$  (рис. 1, б – пунктирная линия 2). Монотонно убывающая линия 1 (зависимость тока КЗ для максимального режима) проходит выше аналогичной линии 2 (зависимости тока КЗ для минимального режима).

Линию 1 (кривую тока КЗ для максимального режима) обычно используют для расчета (выбора) тока срабатывания защиты, а линию 2 (кривую тока КЗ для минимального режима) – для проверки чувствительности защиты.

Из названия мгновенной токовой отсечки следует, что эта защита не имеет специального органа выдержки времени, а время ее действия (срабатывания) фактически зависит только от соб-

ственного времени срабатывания измерительного органа (реле) этой защиты. Селективность действия МТО обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания ее измерительного органа (реле).

Рассмотрим мгновенную токовую отсечку (защиту) МТО<sub>1</sub> (А1), установленную на ЛЭП (W1). Расчет этой защиты заключается в определении тока срабатывания защиты  $I_{сз1}^I$ . В принятом обозначении тока цифра в нижнем индексе указывает номер комплекта защиты (выключателя), а верхний индекс – номер ступени защиты данного комплекта.

Предположим, что на ЛЭП (W2) также установлена мгновенная токовая отсечка МТО<sub>2</sub> (А4). Допустим, что КЗ произошло, например, в точке К4, т. е. в начале линии W2 (рис. 1, а). Если мгновенная токовая отсечка А1 (МТО<sub>1</sub>) среагирует на это КЗ и сработает, то она отключит выключатель Q1. Одновременно с этим токовая отсечка А4 (МТО<sub>2</sub>) также среагирует на это КЗ и отключит выключатель Q2. Следовательно, отключение выключателя Q1 при этом будет происходить неселективно, так как линия W1 исправна (КЗ произошло на линии W2) и должна питать других потребителей (нагрузку Н1), подключенных к шинам подстанции ПС-2.

Обеспечение селективности срабатывания защиты А1 в таких случаях достигается путем ограничения зоны действия МТО<sub>1</sub>, то есть этой защите запрещается действовать (срабатывать) при КЗ на смежном элементе СЭС (на линии W2).

С этой целью выбор (расчет) тока срабатывания МТО производят по формуле

$$I_{сз1}^I = \kappa_{отс} I_{кз вн \max 1}^3, \quad (1)$$

где  $\kappa_{отс} = 1,2 \dots 1,3$  – коэффициент отстройки, который учитывает: неточность расчета периодической составляющей полного тока КЗ, отклонение фактической уставки реле от расчетной величины, наличие апериодической составляющей в составе полного тока КЗ;  $I_{кз вн \max 1}^3$  – ток КЗ, протекающий в месте установки защиты при максимальный режиме работы системы и металлическом КЗ на шинах подстанции ПС-2 (в точке КЗ).

Если выбрать ток срабатывания МТО<sub>1</sub> согласно формуле (1), то (как видно из рис. 1, б) при КЗ в любой точке линии W2 (или в нагрузке Н1) будет возникать ток КЗ, величина которого недостаточна для срабатывания МТО<sub>1</sub>. Следовательно, она не будет срабатывать, а рассматриваемая токовая отсечка А1 будет работать селективно.

Для обеспечения селективности защиты расчет тока срабатывания защиты должен сопровождаться проверкой ее чувствительности. Чувствительность мгновенной токовой отсечки определяют коэффициентом чувствительности  $k_{\text{ч}}$ .

Зона действия МТО<sub>1</sub> определяется (ограничивается) точкой пересечения линий: тока КЗ (линия 1) и характеристики тока срабатывания (горизонтальная прямая с ординатой  $I_{\text{сз1}}^I$  на рис. 1, б). Ей в принципе присуща «мертвая зона»  $\ell_{\text{мз}}$  – участок, при КЗ в пределах которого защита не срабатывает.

Действительно, если ток КЗ, протекающий по линии (защите), больше тока срабатывания защиты А1, то эта защита срабатывает, если же он меньше тока срабатывания защиты, то она не срабатывает. Расчет тока срабатывания (1) защиты МТО<sub>1</sub> производят для «наихудшего случая», т. е. для максимального тока КЗ, а чувствительность защиты проверяют для режима наиболее неблагоприятного для действия защиты КЗ на защищаемом объекте, т. е. для минимального тока КЗ. Поэтому, при определении чувствительности в качестве расчетного принимают минимальный режим работы системы, при котором и ток КЗ, и зона действия защиты – минимальны (см. рис. 1, б).

В соответствии с ПУЭ, чувствительность защиты считается удовлетворительной, если защищаемая зона составляет не менее (10...20) % от длины ЛЭП, а коэффициент чувствительности  $k_{\text{ч}} \geq 2$ .

Основными достоинствами защиты МТО являются ее простота и быстрдействие, а основным недостатком – наличие «мертвой зоны», т. е. участка в конце линии  $\ell_{\text{мз}}$ , при КЗ на котором защита не срабатывает (см. рис. 1, б).

## 1.2. Токовая отсечка с выдержкой времени

Токовая отсечка с выдержкой времени (ТОВВ) является второй ступенью трехступенчатой токовой защиты. Она дополняет мгновенную токовую отсечку и обеспечивает полноценную защиту линии от коротких замыканий в конце линии, где МТО имеет мертвую зону.

Для обеспечения селективности действия ТОВВ она может срабатывать на отключение лишь только с выдержкой времени, которая для всех ТОВВ в сети обычно равна ступени селективности – наименьшей выдержке времени, надежно обеспечивающей селективное действие защиты. Обычно ее принимают равной 0,4...0,6 с. Селективность ее обеспечивается также соответствующим выбором (расчетом) тока срабатывания защиты.

Для определения тока срабатывания ТОВВ<sub>1</sub>, установленной на выключателе Q1, необходимо знать параметры защит, установленных на смежных с защищаемой линией элементах и питающихся от шин подстанции ПС-2 (т. е. на W2 и Н1). Предположим, что на ПС-2 установлен аналогичный второй комплект защит: А4 (МТО<sub>2</sub>), А5 (ТОВВ<sub>2</sub>), А6 (МТЗ<sub>2</sub>) и выключатель Q2. Предположим, что выдержки времени защит ТОВВ<sub>1</sub> и ТОВВ<sub>2</sub> приняты одинаковыми, а для защиты нагрузки Н1 используется А9 (МТО<sub>4</sub>) или продольная дифференциальная защита, которая отключает нагрузку Н1 без выдержки времени при ее повреждении.

Ток срабатывания ТОВВ<sub>1</sub> можно принять меньшим, чем ток короткого замыкания при КЗ в точке К4 (в самом начале линии W2), и меньшим, чем ток короткого замыкания при КЗ в точке К8. Действительно, даже если ТОВВ<sub>1</sub> будет реагировать на эти короткие замыкания (в точках К4 и К8), то это не приведет к неселективному отключению W1 (к отключению выключателя Q1), так как при КЗ в указанных точках сработают свои мгновенные защиты (А4 и А9 соответственно), которые отключат соответственно выключатели Q2 или Q4, а А2 (ТОВВ<sub>1</sub>) не успеет сработать из-за имеющейся у нее выдержки времени (задержки на срабатывания)  $t_{сз1}^{II}$ .

Для повышения чувствительности токовой отсечки с выдержкой времени А2 (ТОВВ<sub>1</sub>) целесообразно уменьшать ее ток

срабатывания  $t_{сз1}^{II}$ . Вопрос лишь в том, до какого значения можно снижать этот ток, не опасаясь при этом неселективного действия защиты.

Рассмотрим, как будут вести себя комплекты защит, установленные на линиях W1 и W2, при перемещении точки КЗ по линии W2 от ПС-2 к ПС-3 (слева – направо). На рис. 1, б показано изменение при этом тока короткого замыкания, протекающего по защитах А1 (А2), А4 (А5) и выключателям Q1 и Q2.

Из рис. 1, б видно, что А2 (ТОВВ<sub>1</sub>) будет действовать неселективно, если ее ток срабатывания станет меньше, чем ток срабатывания А4 (МТО<sub>2</sub>). В этом случае ТОВВ<sub>1</sub> будет «чувствовать» короткие замыкания на правом конце линии W2 и в «мертвой зоне» МТО<sub>2</sub>. Если же ТОВВ<sub>1</sub> будет «чувствовать» эти короткие замыкания, а МТО<sub>2</sub> – нет (так как они находятся в мертвой зоне для МТО<sub>2</sub>), то при таких КЗ на отключение одновременно подействуют ТОВВ<sub>1</sub> (эта защита отключит выключатель Q1) и ТОВВ<sub>2</sub> (эта защита отключит выключатель Q2). В этом случае выключатель Q1 отключит линию W1 неселективно. Такое неселективное действие защиты ТОВВ<sub>1</sub> будет исключено, если ее ток срабатывания выбрать следующим образом:

$$t_{сз1}^{II} = k_{отс} I_{сз2}^I, \quad (2)$$

где  $k_{отс} = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент отстройки;  $I_{сз2}^I$  – ток срабатывания защиты А4 (МТО<sub>2</sub>).

Если выбрать ток срабатывания ТОВВ<sub>1</sub> в соответствии с выражением (2), то зона действия этой защиты всегда будет «заканчиваться» раньше, чем зона действия МТО<sub>2</sub> (рис. 1, в). При этом будет обеспечиваться селективное действие защит ТОВВ<sub>1</sub> и МТО<sub>2</sub> при коротких замыканиях в любой точке линии W2.

Рассмотрим взаимодействие защит при коротком замыкании в точке К8. При наличии мгновенно действующей защиты А9 (МТО<sub>4</sub>) неселективного действия защиты ТОВВ<sub>1</sub> не произойдет. Более сложная ситуация может возникнуть, если за выключателем Q4 будет установлен трансформатор с приключенными к нему присоединениями (нагрузками). В этом случае для предотвращения неселективного (ложного) срабатывания защиты ТОВВ<sub>1</sub> (и, следовательно, неселективного срабатывания выключателя Q4) необходимо установить трансформатор с приключенными к нему присоединениями (нагрузками) и выбрать ток срабатывания ТОВВ<sub>1</sub> в соответствии с выражением (2).

чателя Q1 и отключения линии W1) защиту ТОВВ1 необходимо отстроить от тока КЗ, протекающего через этот трансформатор при КЗ за ним. Для исключения действия ТОВВ<sub>1</sub> при КЗ в точке К8 ток ее срабатывания должен удовлетворять следующему условию:

$$t_{c31}^{II} = \kappa_{отс} I_{кз \max \kappa 8}, \quad (3)$$

где  $\kappa_{отс} = 1,1..1,2$  – коэффициент отстройки;  $I_{кз \max \kappa 8}$  – максимальный ток КЗ при КЗ за трансформатором (в точке К8).

Окончательно в качестве тока срабатывания ТОВВ<sub>1</sub> следует принимать больший из токов, полученных условиями (2) и (3).

Поскольку ТОВВ предназначена в основном для действия при КЗ в пределах «мертвой зоны» мгновенной токовой отсечки, то ее чувствительность проверяют при условии возникновения КЗ в конце этой «мертвой зоны», т. е. практически при КЗ на шинах подстанции, питающейся от защищаемой линии (W2).

Коэффициент чувствительности ТОВВ<sub>1</sub> определяют следующим образом:

$$\kappa_{ч} = I_{кз \min \kappa 3} / I_{c31}^{II}, \quad (4)$$

где  $I_{кз \min \kappa 3}$  – минимальный ток КЗ, протекающий по защите при коротком замыкании на шинах подстанции (ПС-2), питающейся от защищаемой линии (при коротком замыкании в точке КЗ);  $I_{c31}^{II}$  – ток срабатывания защиты ТОВВ<sub>1</sub>.

Норма на этот коэффициент чувствительности указывается в ПУЭ и составляет 1,3. Если он окажется меньше этой величины, то можно увеличить выдержку времени рассматриваемой ТОВВ<sub>1</sub> до двух ступеней селективности. Это позволяет отстроить ее от ТОВВ<sub>2</sub> (следующего участка). В этом случае можно отказаться от выбора тока срабатывания ТОВВ<sub>1</sub> по условию (2). При этом ее ток срабатывания уменьшится, а коэффициент чувствительности увеличится (повысится).

Аналогично поступают с выдержкой времени ТОВВ<sub>1</sub>, если на следующем участке (например, на линии W2) по какой-либо причине отсутствует МТО<sub>2</sub>, а обеспечить селективность ТОВВ<sub>1</sub> при прежней выдержке времени не представляется возможным.

### 1.3. Максимальная токовая защита

Третьей ступенью трехступенчатой токовой защиты является максимальная токовая защита (МТЗ), предназначенная для ближнего и дальнего резервирования. Под ближним резервированием понимают действие этой защиты на отключение при отказе первой и второй ступени своего комплекта защиты, если КЗ произошло на защищаемой линии. Если короткое замыкание произошло в точке К1, а МТО<sub>1</sub> и ТОВВ<sub>1</sub> не сработали (например из-за повреждений в их цепях или вследствие отказа выключателя Q1), то должна срабатывать МТЗ<sub>1</sub> и подавать управляющий сигнал на отключение выключателя Q1. Таким образом, она резервирует отказавшие защиты МТО<sub>1</sub> и ТОВВ<sub>1</sub>. При коротком замыкании в точке К3 (в конце линии W1, т. е. в «мертвой зоне» защиты А1) защита МТО<sub>1</sub> в принципе не может срабатывать. В этом случае на отключение линии W1 (выключателя Q1) должна действовать защита ТОВВ<sub>1</sub>. Ее действие при отказе резервирует защита МТЗ<sub>1</sub>, выполняя при этом функцию ближнего резервирования.

Если МТЗ<sub>1</sub> выполняет функцию дальнего резервирования, то она действует на отключение выключателя Q1 при КЗ в точке К4 (в том случае, когда отказал весь второй комплект защит А4, А5, А6 или по какой-либо причине не сработал на отключение выключатель Q2). Такие случаи иногда имеют место на практике, например, вследствие возможных повреждений механической части выключателя, ошибок персонала и т. д. Ближнее и дальнее резервирование защит повышает надежность релейной защиты и электрической системы в целом. Для надежного обеспечения дальнего резервирования МТЗ должна иметь достаточно высокую чувствительность при КЗ не только на защищаемом, но и на всем последующем (смежном) элементе. Для этого она должна иметь высокую чувствительность при коротких замыканиях не только при КЗ на всей линии W1, но и при КЗ на линии W2 и в нагрузке Н1. По этой причине ее ток срабатывания отстраивают не от токов коротких замыканий, как это делалось для отсечек, а от токов нормальных режимов, которые по величине гораздо меньше токов КЗ. Этот факт обеспечивает более высокую чувствительность МТЗ по сравнению с отсечками (МТО и ТОВВ). Селективность же максимальной токовой защиты обеспечивается соответству-

ющим выбором ее выдержки времени ( $I_{c31}^{III}$ ) и тока срабатывания.

Выдержка времени максимальных токовых защит нарастает по мере приближения к источнику питания. Предположим, что известны выдержки времени защит МТЗ, установленных на потребителях (нагрузках Н1, Н2, Н3). Пусть они равны 0,5 с, 1 с и 1 с соответственно. Определим выдержки времени МТЗ<sub>1</sub> (т. е. защит А6, А8, А10). Для этого необходимо предварительно рассмотреть понятие ступени селективности. Под ним понимают минимальную разность между выдержками времени защит смежных участков, при которой обеспечивается селективность действия этих защит.

Рассмотрим взаимодействие первого и второго комплектов защит. Для того, чтобы защита первого комплекта срабатывала не раньше, чем соответствующая защита второго комплекта, ее выдержка времени должна быть больше выдержки времени защиты второго комплекта, по крайней мере, на ступень селективности, которую определяют по выражению:

$$\Delta t = t_{n2} + t_{n1} + t_{ov} + t_{зан}, \quad (5)$$

где  $t_{n2}$  – погрешность в сторону замедления реле времени защиты 2;  $t_{n1}$  – погрешность в сторону уменьшения выдержки времени защиты 1;  $t_{ov}$  – время отключения выключателя Q2 с момента подачи сигнала в его цепь управления до момента разрыва тока КЗ контактами выключателя;  $t_{зан}$  – время запаса.

Обычно полагают, что  $\Delta t = 0,3...0,6$  с.

На основе изложенного выше определим применительно к рассматриваемой схеме выдержку времени МТЗ<sub>2</sub>. Она должна быть на ступень селективности (примем  $\Delta t = 0,5$  с) больше самой большой из выдержек времени защит, установленных на потребителях нагрузок Н2, Н3. С учетом (5) принимаем ее равной  $t_2 = t_3 + 0,5$  с. Выдержку времени МТЗ<sub>2</sub> второго комплекта отстраивают от выдержки времени защиты, установленной на потребителях, питающихся от шин подстанции ПС-3. Полагая  $t_3 = 2$  с, получим  $t_2 = t_3 + 0,5 = 2 + 0,5 = 2,5$  с.

Определим выдержку времени защиты МТЗ<sub>1</sub> из условия отстройки ее от защит, установленных на потребителях нагрузки

Н1, Н2, Н3. Пусть выдержка времени МТЗ<sub>4</sub> составляет  $t_4 = 1,2$  с. Тогда  $t_1 = \max\{t_2; t_4\} + 0,5 = \max\{2,5; 1,2\} + 0,5 = 2,5 + 0,5 = 3,0$  с.

В этом случае короткое замыкание на каждом последующем элементе (например, на линии W2) будет отключаться защитой предыдущего элемента (например МТЗ<sub>1</sub>) только в том случае, если защита последующего элемента (ТОВВ<sub>2</sub>, МТЗ<sub>2</sub>) отказала в действии или отказал выключатель Q2. Если же, например, защита МТЗ<sub>2</sub> исправна, то она успевает отключить выключатель Q2 и разорвать цепь тока КЗ еще до того, как защита МТЗ<sub>1</sub> могла бы подействовать на отключение выключателя Q1. После отключения выключателя Q2 ток в сети резко уменьшается, и защита МТЗ<sub>1</sub> уже не срабатывает.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты определяют следующим образом:

$$I_{c31}^{III} = (\kappa_{отс} / \kappa_{в}) I_{c3n} = (\kappa_{отс} / \kappa_{в}) \kappa_{c3n} I_{раб\ max}, \quad (6)$$

$$I_{c31}^{III} = \kappa_{отс} I_{c3n\ авс} = \kappa_{отс} \kappa_{c3n\ авс} I_{раб\ max}, \quad (7)$$

$$I_{c31}^{III} = \kappa_{отс} I_{c32}^{III}, \quad (8)$$

$$\kappa_{c3n} = I_{c3n} / I_{раб\ max}, \quad \kappa_{c3n\ авс} = I_{c3n\ авс} / I_{раб\ max}, \quad (9)$$

где  $\kappa_{отс} = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент отстройки;  $\kappa_{в}$  – коэффициент возврата токовых реле, который принимают равным 0,85 – для реле серии РТ-40; 0,9 – для реле серии РСТ;  $\kappa_{c3n} = 2,0 \dots 3,5$  – коэффициент самозапуска;  $I_{c3n}$  – ток самозапуска, протекающий по защищаемой ЛЭП при самозапуске электродвигателей после отключения КЗ на последующих участках сети;  $I_{раб\ max}$  – максимальный рабочий ток, проходящий по защищаемой ЛЭП (без учета самозапуска электродвигателей);  $I_{c3n\ авс}$  – ток, протекающий по защищаемой ЛЭП в процессе самозапуска электродвигателей (при автоматическом повторном включении защищаемой ЛЭП);  $\kappa_{c3n\ авс} = 4,0 \dots 6,0$  – коэффициент самозапуска при наличии АПВ;  $I_{c31}^{III}, I_{c32}^{III}$  – токи срабатывания МТЗ<sub>1</sub> и МТЗ<sub>2</sub> соответственно.

Рассмотрим подробно расчетные выражения (6, 7, 8).

Эти выражения следует использовать для соответствующего расчетного режима, в котором необходимо обеспечить правильное действие защиты.

Предположим, что в начале линии W2 произошло короткое замыкание. В этом случае должны одновременно сработать токовые измерительные реле защит МТЗ<sub>1</sub> и МТЗ<sub>2</sub>. Эти реле одновременно подадут питание в обмотки своих реле времени. При этом произойдет одновременный запуск этих реле времени. Начиная с момента возникновения КЗ напряжение на шинах подстанции ПС-2 резко снижается, и электродвигатели (нагрузка Н1), питающиеся от этой подстанции (через выключатель Q4), начинают затормаживаться. После истечения выдержки времени МТЗ второго комплекта защиты  $t_2$  сработает защита МТЗ<sub>2</sub>. Она отключит выключатель Q2. Напряжение на шинах ПС-2 начнет восстанавливаться, затормозившиеся электродвигатели (нагрузка Н1) начнут потреблять повышенный ток, увеличивая свою скорость вращения до номинальной. При этом токовые реле защиты МТЗ<sub>1</sub> должны вернуться в исходное состояние. В противном случае (по истечении своей выдержки времени  $t_1$ ) защита МТЗ<sub>1</sub> неселективно отключит выключатель Q1.

Для возвращения токового реле (защиты МТЗ<sub>1</sub>) в исходное состояние (и разрыва цепи питания своего реле времени) необходимо обеспечить выполнение условия возврата:

$$I_{возвр1}^{III} = \kappa_{отс} I_{сзн}, \quad (10)$$

где  $I_{возвр1}^{III}$  – ток возврата МТЗ<sub>1</sub> в исходное состояние.

Рассмотрим режим, соответствующий выражению (7). Предположим, что КЗ произошло на линии W1, и она была отключена своей защитой (например, МТО<sub>1</sub> или ТОВВ<sub>1</sub>). Известно, что возникающие на ЛЭП повреждения (КЗ) с большой вероятностью самоустраиваются во время бестоковой паузы, т. е. в течение промежутка времени, при котором ЛЭП обесточена (отключено питание). Через некоторое время, которое обычно составляет доли секунды, такую ЛЭП с помощью устройства автоматического повторного включения (АПВ) вновь включают под напряжение. При этом короткое замыкание самоликвидируется, а на линии (после подключения источника питания) восстанавливается нор-

мальное напряжение и обеспечивается ее нормальное функционирование (снабжение потребителей электрической энергией).

В этом случае за время бестоковой паузы электродвигатели потребителей (нагрузка Н1) успевают затормозиться в большей степени, чем это было в описанном выше режиме. Поэтому, после бестоковой паузы и повторного включения ЛЭП, они будут потреблять больший ток самозапуска  $I_{\text{сзн авт}}$ , чем аналогичный ток при отсутствии АПВ. Поскольку при отключении линии W1 ее защита автоматически возвращается в исходное состояние (так как ток в цепи становился равным нулю), то возврата токовых реле в исходное состояние в рассматриваемом случае не требуется. Для того, чтобы МТЗ<sub>1</sub> в этом случае не срабатывала, не требуется учета коэффициента возврата реле, а необходимо лишь, чтобы при протекании по линии W1 (и по защите) тока самозапуска  $I_{\text{сзн авт}}$  обеспечивалось условие (7).

Условие (8) выполняет согласование защит смежных участков по чувствительности. Если при каком-либо удаленном коротком замыкании в сети МТЗ<sub>2</sub> не реагирует на это КЗ, то на него не должна реагировать и МТЗ<sub>1</sub>, т. е. ток срабатывания МТЗ<sub>1</sub> должен быть больше, чем ток срабатывания МТЗ<sub>2</sub>. В противном случае МТЗ<sub>1</sub> будет действовать неселективно.

В зависимости от режима работы сети в расчетах используют соответствующие выражения (6), (7) или (8). В конечном итоге принимают большее из полученных по этим выражениям значение, которое обеспечивает селективность срабатывания защиты во всех возможных режимах работы сети.

Для проверки чувствительности защиты МТЗ используют коэффициент чувствительности

$$K_{\text{ч}}^{\text{III}} = I_{\text{кз min}} / I_{\text{сз}}^{\text{III}}, \quad (11)$$

где  $I_{\text{кз min}}$  – минимальный ток КЗ, протекающий в месте установки защиты при КЗ в расчетной точке.

Заметим, что МТЗ выполняет резервные функции:

– по отношению к другим ступеням защиты своего комплекта (при КЗ на защищаемой линии – ближнее резервирование);

– по отношению к защита́м и выключателя́м смежных (предыдущих) участков сети (при КЗ на соответствующих элементах сети – дальнейшее резервирование).

В соответствии с этим производят расчет коэффициента чувствительности для двух указанных случаев:

– при металлическом КЗ в конце защищаемой ЛЭП (в точке КЗ для МТЗ<sub>1</sub> и работе системы в минимальном режиме), при этом  $k_{\text{ч}}$  должен быть не менее 1,5;

– при металлическом КЗ в конце смежного элемента сети (в точке К8 – в конце присоединения, подключенного выключателем Q4), при этом  $k_{\text{ч}}$  должен быть не менее 1,2.

Если коэффициент чувствительности хотя бы в одном из расчетных режимов окажется меньше допустимого, то следует применить защиты технически более совершенные, чем МТЗ (например, МТЗ с блокировкой по напряжению, дистанционную защиту и т. д.).

Для нормального функционирования защиты необходимо правильно установить расчетные параметры реле (уставки по току и по напряжению). В рассматриваемой защите ими являются: ток срабатывания измерительного токового реле каждой ступени (т. е. уставки по току); время срабатывания реле времени (соответствующих ступеней).

Ток срабатывания реле определяют следующим образом

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{сз}} k_{\text{сх}} / k_{\text{I}}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{сз}}$  – ток срабатывания защиты (соответствующей ступени);  $k_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы, равный отношению тока в реле к току во вторичной обмотке соответствующего трансформатора тока (для схемы соединения трансформаторов тока в полную или неполную звезду  $k_{\text{сх}} = 1$ );  $k_{\text{I}}$  – коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока.

#### 1.4. Диаграмма селективности трехступенчатой токовой защиты

На диаграмме селективности трехступенчатой токовой защиты (рис. 1, в) по оси абсцисс отложено расстояние (удаление)

элементов защищаемой сети, а по оси ординат – выдержки времени соответствующих защит. Например, при КЗ в начале линии W1 должна сработать защита МТО<sub>1</sub> и отключить выключатель Q1 практически без выдержки времени. При КЗ в конце линии W1 должна срабатывать ТОВВ<sub>1</sub> и отключить ее с выдержкой времени, равной ступени селективности. ТОВВ<sub>1</sub> может срабатывать и при КЗ в начале линии W2, если это КЗ не отключится своей защитой. Из диаграммы селективности видно, что при КЗ в начале линии W2 основной защитой является МТО<sub>2</sub>, так как она имеет наименьшую выдержку времени.

Из рис. 1, в видно, что выдержка времени МТЗ<sub>1</sub> отстраивается от выдержек времени МТЗ, установленных на W2 и Н1, а МТЗ<sub>2</sub>, в свою очередь, отстраивается от выдержки времени защиты, установленной на Н2.

Выдержки времени соответствующих ступеней одного и того же комплекта защит на диаграмме селективности объединяют в одну ломаную линию. При этом каждое скачкообразное увеличение выдержки времени на этой линии соответствует концу зоны действия предыдущей ступени и началу следующей ступени защиты данного комплекта. Поскольку при изменении режима работы схемы от максимального до минимального зона действия ступеней защиты сокращается, то соответствующие скачки выдержек времени на диаграмме селективности перемещаются справа налево. Однако, например, характеристика выдержек времени первого комплекта защит (во избежание возможного неселективного действия этих защит) ни в коем случае не должна пересекаться с аналогичной характеристикой второго комплекта защит.

### 1.5. Принципиальная схема защиты

На рис. 2 приведена одна из возможных принципиальных схем одного комплекта трехступенчатой токовой защиты ЛЭП. На нем (рис. 2, а) показаны токовые цепи (переменного тока), цепи оперативного тока и цепи сигнализации одного комплекта защит. Реле КА1 и КА4 входят в состав МТО<sub>1</sub>, реле КА2 и КА5 – в состав ТОВВ<sub>1</sub>, а реле КА3 и КА6 – в состав МТЗ<sub>1</sub>. Поскольку рассматриваемая защита предназначена для действия при между-

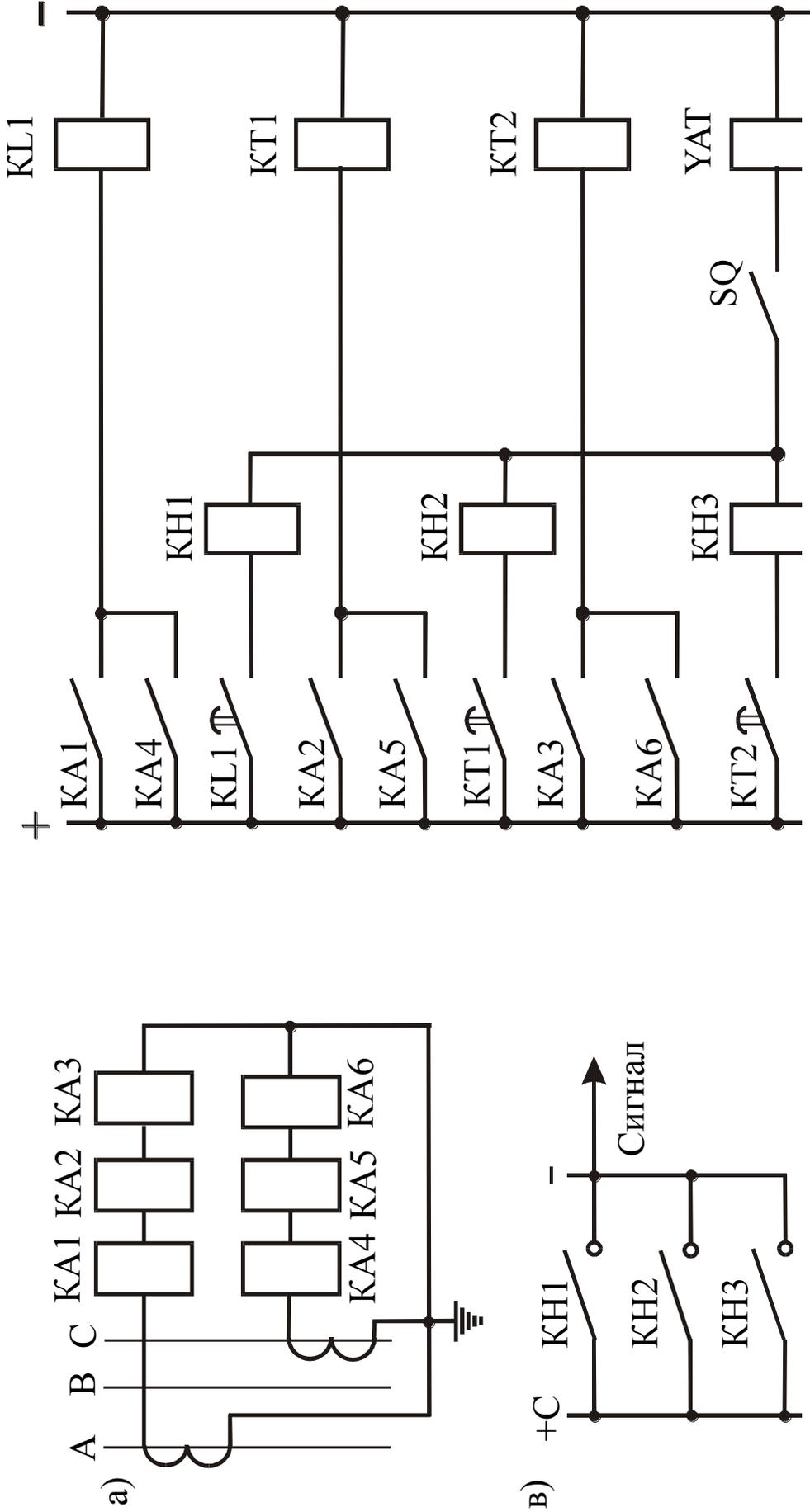


Рис. 2. Принципиальная схема комплекта токовых защит: а – токовые цепи; б – цепи оперативного тока; в – цепи сигнализации

фазных КЗ, трансформаторы тока соединяют по схеме «неполная звезда» с включением измерительных токовых реле в фазы А и С.

Цепи оперативного тока защиты показаны на рис. 2, б. Принято цепи оперативного тока показывать в обесточенном состоянии реле. При появлении междуфазного КЗ в пределах зоны действия первой ступени защиты (МТО<sub>1</sub>) срабатывают реле КА1, КА4 (одно из этих реле или оба – в зависимости от вида КЗ). Своими контактами эти реле запитывают обмотку промежуточного реле КЛ1. Реле КЛ1 имеет небольшую задержку на срабатывание (в пределах 0,1 с), необходимую для отстройки МТО от пробоя трубчатых разрядников, защищающих линию от перенапряжений. Эта задержка необходима в связи с тем, что пробой трубчатых разрядников эквивалентен короткому замыканию, которое исчезает после гашения дуги в разрядниках.

Реле КЛ1 запитывает электромагнит отключения УАТ своего выключателя по цепи: (+), контакты КЛ1, обмотка указательного реле КН1, блок-контакт SQ выключателя Q1, электромагнит отключения выключателя УАТ, (-). В результате выключатель Q1 выключается. Блок-контакты выключателя SQ замкнуты при включенном положении выключателя и размыкаются незадолго до завершения операции его отключения. При этом цепь УАТ разрывается раньше, чем обесточатся обмотки токовых реле. Такая регулировка блок-контактов SQ выключателя предотвращает обгорание сравнительно маломощных контактов реле КЛ1, КТ1, КТ2, которые могли бы выйти из строя, если бы им пришлось разрывать ток в цепи УАТ после завершения операции отключения выключателя.

Действие первой ступени защиты на отключение регистрируется указательным реле КН, которое, замыкая свой контакт в цепи сигнализации (рис. 2, в), выдает сигнал о срабатывании соответствующей защиты.

Если короткое замыкание произошло в конце защищаемой линии (в зоне действия ТОВВ<sub>1</sub>), то срабатывает реле КА2 (КА5) и своими контактами запитывает реле времени КТ1, обеспечивающее выдержку времени второй ступени защиты. После срабатывания реле КТ1 через его контакты и указательное реле второй ступени КН2 получает питание электромагнит отключения выключателя УАТ.

Если короткое замыкание произошло в зоне действия максимальной токовой защиты, то срабатывает реле КАЗ (КА6) и своими контактами запитывает реле времени КТ2, обеспечивающее выдержку времени третьей ступени защиты. После срабатывания реле КТ2 его контакты через обмотку указательного реле КНЗ аналогично обеспечивают питание электромагнита отключения выключателя УАТ. При этом выключатель отключается. Указательное реле КНЗ фиксирует срабатывание третьей ступени защиты выпадением сигнального флажка и своими контактами выдает сигнал о срабатывании защиты.

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд выполнен в виде трех панелей: вертикальной, наклонной и горизонтальной. На вертикальной панели стенда изображена схема, представленная на рис. 1. Во всех защитах и выключателях установлены (вмонтированы) светодиоды, отражающие состояние соответствующих защит и выключателей.

На горизонтальной (верхней) панели установлен автомат-выключатель, обеспечивающий коммутацию источника питания для работы стенда. При его включении в схему стенда подается переменное напряжение 220 В, о чем свидетельствует свечение красного светодиода «Сеть». Светодиоды, установленные в выключателях, несут информацию об их состоянии: красное свечение – выключатель находится в замкнутом рабочем положении, его контакты замкнуты, на элемент (объект) подано напряжение (35, 10, 6 кВ); зеленое свечение – выключатель находится в отключенном положении (сработал под воздействием соответствующей защиты), коммутируемый им элемент СЭС обесточен (напряжение отключено).

Светодиоды, установленные в соответствующих защитах, несут информацию о состоянии защиты. Светодиод не светится – защита введена в действие, состояние защищаемого объекта – нормальное, КЗ отсутствует.

Свечение светодиода означает срабатывание соответствующей защиты вследствие возникновения КЗ в зоне ее действия защиты.

Светодиод основной защиты элемента имеет постоянное (ровное) свечение, цвет свечения – красный. Запуск измерительного реле резервной защиты ближнего резервирования (БР) отображается миганием соответствующего диода (цвет свечения – красный).

Запуск измерительного реле резервной защиты дальнего резервирования (ДР) отображается миганием соответствующего диода, цвет свечения – синий, частота мигания – повышенная.

Для создания КЗ в заданной точке (К1...К7) установлены соответствующие кнопки, расположенные непосредственно в данной точке КЗ. При нажатии на любую из этих кнопок светится соответствующий светодиод (ровно, цвет – красный), указывающий на наличие КЗ в данной точке. При нажатии на выбранную кнопку (точки КЗ с номерами К1...К8) происходит переключение защит и отображаются новые состояния защит и выключателей (переключения светодиодов) в соответствии с прилагаемой табл. 1.

На наклонной панели установлены измерительные приборы (амперметр и вольтметр) и элементы защит МТО<sub>2</sub> (А4), МТЗ<sub>2</sub> (А6). Амперметр РА2 включен через измерительный трансформатор тока ТА2 и предназначен для измерения вторичного фазного тока  $I_{кз2}^{(3)}$ . Он подключается к измеряемой цепи при нажатии любой из кнопок, установленных на линиях W1 и W2 в контрольных точках (с шагом 1 км). Вольтметр РV включен через измерительный трансформатор напряжения TV на шине ПС-1. Он контролирует остаточное вторичное напряжение  $U_{ост2}^{(3)}$  на шине при нажатии любой из кнопок, установленных в контрольных точках (по аналогии с подключением амперметра при измерении токов КЗ). Вольтметр имеет цифровое табло (шкалу).

Элементы защит А4 и А6 реализованы в однофазном исполнении, вторая ступень второго комплекта защит отсутствует. Принципиальная упрощенная схема этой части стенда представлена на рис. 3. Реле, соответствующие этой части стенда, расположены на наклонной панели в следующем порядке. Верхний ряд: КА1, КЛ1, КН1 – реле защиты МТО<sub>2</sub>. Нижний ряд: КА2, КТ1, КЛ2, КН2 – реле защиты МТЗ<sub>2</sub>. Рядом с каждым из реле установлены два светодиода, отражающие состояние их контак-

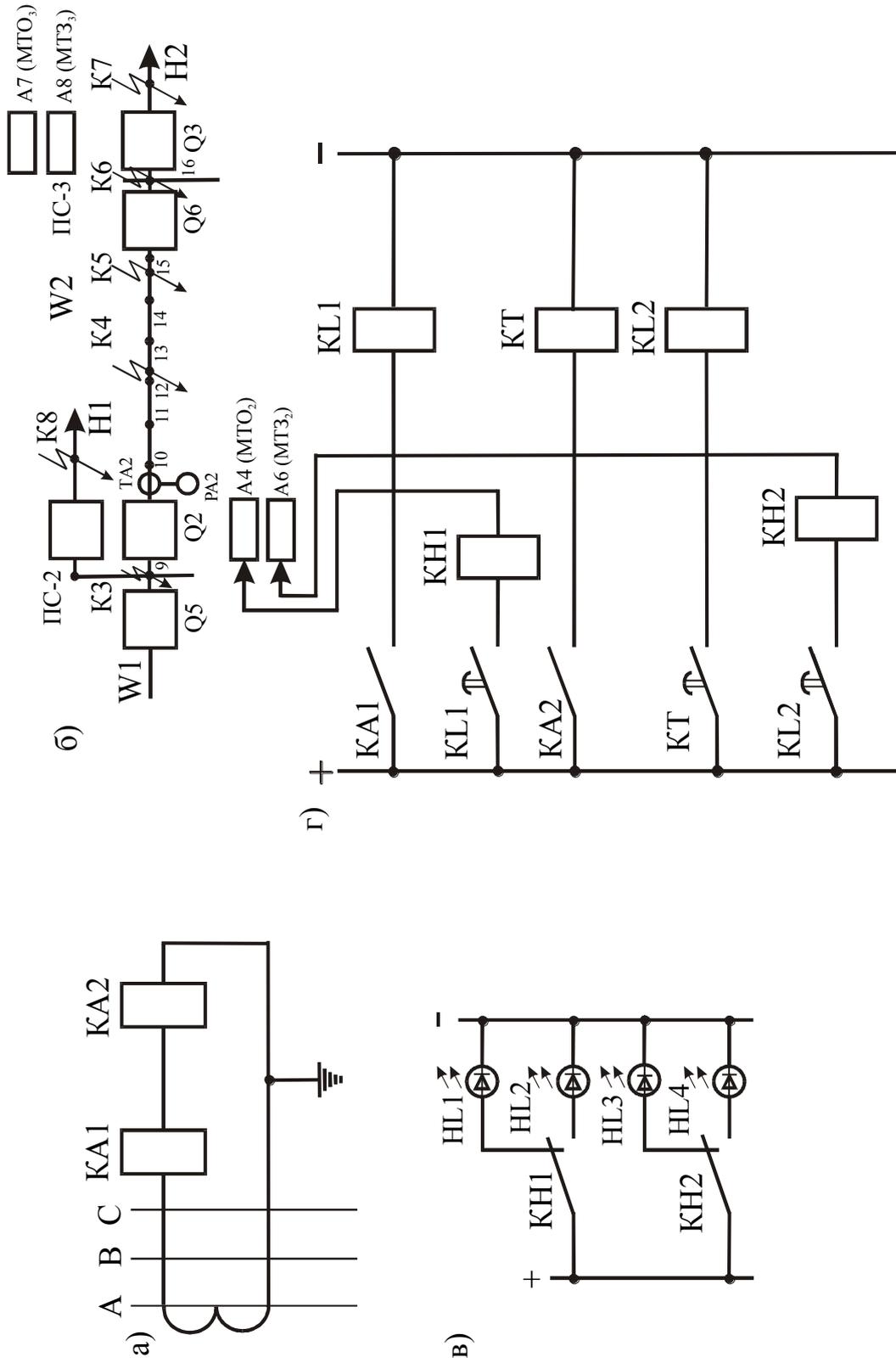


Рис. 3. Принципиальная схема токовых защит лабораторного стенда: а – токовые цепи; б – расчетная схема; в – цепи сигнализации; г – цепи оперативного тока

тов: свечение зеленым цветом – контакты данного реле разомкнуты, свечение красным цветом – замкнуты.

Источник питания, установленный в стенде, обеспечивает реальные токи используемых реле в заданном диапазоне. Регулировка тока в обмотках реле осуществляется с помощью ручки «Ток», а измерение тока – прибором РА2 (амперметром), расположенным на наклонной панели рядом с реле.

Регулировка уставок (по току срабатывания и выдержке времени) выполняется реально на соответствующих реле (при снятом кожухе).

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями настоящих методических указаний, разобраться с принципом действия и выбором уставок трехступенчатой токовой защиты.

2. Подготовить лабораторный стенд к работе (включить питание стенда).

3. Уяснить порядок взаимодействия защит, установленных на ЛЭП, при возникновении КЗ в различных точках (табл. 1). Для этого последовательно нажимать на кнопки КЗ (К1...К8). При этом происходит переключение светодиодов, отражающих состояние соответствующих защит.

4. В зависимости от заданной (в соответствии с вариантом) нагрузкой (см. табл. 2 и 3), потребляемой сетью, определить номинальные фазные токи в линиях W1, W2 и нагрузках Н1, Н2, Н3.

5. Произвести выбор трансформаторов тока (ТА1 и ТА2), определить их коэффициенты трансформации. Результаты расчетов отразить в табл. 4. Параметры трансформаторов тока для сети 35 кВ указаны в табл. 5.

6. Произвести расчеты зависимостей периодической составляющей полного тока КЗ и остаточного напряжения (на шинах ПС-1 для контрольных точек 1...16) от удаленности этих точек от источника питания (для максимального и минимального режимов работы сети). Расчеты производить по следующим выражениям:

$$I_{кз1} = E_{\phi} / (X_c + X_{кз}) = E_{\phi} / (X_c + X_0 l_{кз}), \quad (13)$$

Таблица 1

## Взаимодействие защит

Точка КЗ	К1		К2 (К3)		К4		К5 (К6)		К7		К8	
	защита	выкл.	защита	выкл.	защита	выкл.	защита	выкл.	защита	выкл.	защита	выкл.
Срабатывает защита	A1	Q1(Q5)	A2	Q1(Q5)	A4	Q2(Q6)	A5	Q2(Q6)	A7	Q3	A9	Q4
Резервная защита (БР)	A2, A3	Q1(Q5)	A3	Q1(Q5)	A5, A6	Q2(Q6)	A6	Q2(Q6)	A8	Q3	A10	Q4
Резервная защита (ДР)	–	–	–	–	A3	Q1(Q5)	A3	Q1(Q5)	A6	Q2(Q6)	A3	Q1

Таблица 2

## Исходные данные

№ п/п	Параметры	Варианты									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Номинальное напряжение, кВ	35	10	6	10	35	35	10	6	10	35
2.	Мощность нагрузки Н1, кВА	1000	2000	2200	1700	1900	2000	2300	2500	2400	2500
3.	Мощность нагрузки Н2, кВА	1000	1900	1700	2000	2100	2000	1800	1400	1700	1400
4.	Мощность нагрузки Н3, кВА	1000	1700	1500	1600	1500	1900	1500	1600	1800	1000
5.	Длина линии W1, км	10	20	18	15	10	20	15	17	10	20
6.	Длина линии W2, км	16	10	16	10	20	10	17	20	20	10
7.	Сопрот. системы в макс. режиме $X_{c \min}$ , Ом	1,1	1,2	0,9	0,7	0,8	1,1	1,13	1,15	1,3	1,4
8.	Сопрот. системы в мин. режиме $X_{c \max}$ , Ом	1,3	1,4	1,1	1,3	1,2	1,4	1,2	1,22	1,4	1,6
9.	Время срабатывания защиты А8, с	2,0	1,6	3,0	2,3	2,0	2,1	2,0	1,7	1,7	2,1
10.	Время срабатывания защиты А10, с	2,2	1,8	2,0	1,5	1,7	2,3	1,7	2,0	2,0	2,5

Таблица 3

Параметры нормального режима сети 35 кВ

Номинальная мощность нагрузки $S$ , кВА	630	1000	2000	3000	4000	5000	9000	20000	50000
Номинальный первичный ток, А	10,5	16,6	33,3	50	66,6	90	150	333	833
Коэф-т трансформации трансформатора тока	2	3	6	10	13	18	30	66	166
Примечание: $I_{ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} U_{ном}) = S_{ном} / (1,73 \cdot 35) = S_{ном} / 60,55$									

Таблица 4

Исходные параметры (вариант № )

Мощность нагрузок, кВА			Номинальный ток, А				Коэффициент трансформации	
			первичный		вторичный			
Н1	Н2	Н3	W1	W2	W1	W2	ТА1	ТА2

Таблица 5

Параметры трансформаторов тока сети 35 кВ

Тип трансформатора тока	Номинал. напряж., кВ	Номинальный ток, А		Класс точности	Номинальная нагрузка, Ом	Ток эл.динам. стойкости, кА	Термическая стойкость (допустимые величины)		Ном.пред. кратность тока втор. обмотки
		первичный	вторичный				ток, кА	время, с	
ТПОЛ-35	35	400	5	1; 10P	0,8	100	16	3	13
		600		0,5; 10P		100	24		18
		800		0,5; 10P		100	32		24
		1000		0,5; 10P		100	40		24
		1500		0,5; 10P		100	52		26
ТФ3М – 35 А	35	15	5	0,5; 10P	0,8	3	0,6	3	28
		20		0,5; 10P		4	0,7		
		30		0,5; 10P		6	1,1		
		40		0,5; 10P		8	1,5		
		50		0,5; 10P		10	1,9		
		75		0,5; 10P		15	2,3		
		150		0,5; 10P		21	3,5		
		100		0,5; 10P		31	5,8		
		200		0,5; 10P		42	7,0		
		300		0,5; 10P		63	11,6		
		400		0,5; 10P		84	15		
		600		0,5; 10P		107	22		
		800		0,5; 10P		127	30		
		1000		0,5; 10P		134	37		

$$I_{кз2} = I_{кз1} / \kappa_I, \quad U_{осм1} = \sqrt{3} I_{кз1} X_{кз}, \quad (14)$$

$$U_{осм2} = U_{осм1} / \kappa_U, \quad E_\phi = E_c / \sqrt{3}, \quad (15)$$

где  $E_\phi$  – фазное напряжение сети;  $X_c$  – сопротивление системы;  $X_{кз}$  – сопротивление КЗ участка линии;  $X_0$  – погонное сопротивление линии;  $I_{кз1}$  – ток КЗ в первичной цепи;  $I_{кз2}$  – ток КЗ во вторичной цепи;  $\kappa_I$  – коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока;  $U_{осм1}$  – остаточное напряжение в первичной цепи;  $U_{осм2}$  – остаточное напряжение во вторичной цепи трансформатора напряжения;  $\kappa_U$  – коэффициент трансформации трансформатора напряжения;  $E_c$  – междуфазное напряжение сети. Результаты расчетов в качестве примера представлены в табл. 6. Полученные результаты представить в табл. 7.

7. Произвести измерения тока КЗ и остаточного напряжения (на ПС-1). С этой целью последовательно нажимать кнопки (1...16) на стенде, соответствующие контрольным точкам (шаг 1 км) на линиях W1, W2. Регистрировать показания амперметра PA1 и вольтметра PV (цифровая шкала). Построить соответствующие зависимости (см. рис. 1, б).

8. Выполнить чертеж принципиальной схемы трехступенчатой защиты. Описать назначение ее элементов и составить спецификацию.

9. Произвести расчет токов срабатывания защит А1, А2, А3 в соответствии с выражениями (6), (7), (8). Коэффициент самозапуска принимать по заданию руководителя занятия (ориентировочные цифры приведены в разделе 1.5).

10. Определить токи срабатывания реле (12) и выдержки времени всех защит (см. исходные данные в табл. 1).

11. Построить диаграмму селективности трехступенчатой токовой защиты (см. рис. 1, б) в соответствии с расчетными данными (для заданного варианта).

12. Произвести расчет защит А4, А6. В соответствии с расчетными параметрами набрать уставки (по току и времени) на реле, установленных на наклонной панели. Убедиться в селективности и правильности работы этих защит.

Таблица 6

Токи короткого замыкания и остаточное напряжение в сети 35 кВ

Номер контр. точки	Удаление точки от шины, $L_{кз}$ , км	Сопрот. участка линии, $X_{кз}$ , Ом	Сопروتвление петли КЗ, $X_{рез}$ , Ом		Первичный ток, кА		Вторичный ток, кА		Остаточное напряжение	
			$X_{c=min}$	$X_{c=max}$	$I_{1кз}^{(3)}$ max	$I_{1кз}^{(3)}$ min	$I_{2кз}^{(3)}$ max	$I_{2кз}^{(3)}$ min	первичное	вторичное
					$X_{c=max}$	$X_{c=min}$	$X_{c=max}$	$X_{c=min}$	$U_{locт}^{(3)}$ , кВ	$U_{2ocт}^{(3)}$ , В
0	0	0	1,094	1,36	18,47	14,86			0,00	0,000
1	1	0,4	1,494	1,76	13,53	11,48	0,451	0,383	9,37	26,774
2	2	0,8	1,894	2,16	10,67	9,36	0,356	0,312	14,78	42,239
3	3	1,2	2,294	2,56	8,81	7,89	0,294	0,263	18,31	52,310
4	4	1,6	2,694	2,96	7,50	6,83	0,250	0,228	20,79	59,391
5	5	2,0	3,094	3,36	6,53	6,01	0,218	0,200	22,62	64,641
6	6	2,4	3,494	3,76	5,78	5,37	0,193	0,179	24,04	68,689
7	7	2,8	3,894	4,16	5,19	4,86	0,173	0,162	25,17	71,905
8	8	3,2	4,294	4,56	4,71	4,43	0,157	0,148	26,08	74,523
9	9	3,6	4,694	4,96	4,30	4,07	0,143	0,136	26,84	76,694
10	10	4,0	5,094	5,36	3,97	3,77	0,132	0,126	27,48	78,524
11	11	4,4	5,494	5,76	3,68	3,51	0,123	0,117	28,03	80,087
12	12	4,8	5,894	6,16	3,43	3,28	0,114	0,109	28,50	81,439
13	13	5,2	6,294	6,56	3,21	3,08	0,107	0,103	28,92	82,618
14	14	5,6	6,694	6,96	3,02	2,90	0,101	0,097	29,28	83,657
15	15	6,0	7,094	7,36	2,85	2,75	0,095	0,092	29,60	84,579
16	16	6,4	7,494	7,76	2,70	2,60	0,090	0,087	29,89	85,402

Примечание:  $E_c=35$  кВ;  $X_{c=min}=1,094$  Ом;  $X_{c=max}=1,36$  Ом;  $\kappa_I=30$ ;  $\kappa_U=350$ ;  $X_0=0,4$  Ом/км

Таблица 7

Расчетные значения токов КЗ  
и остаточного напряжения (вариант № )

Ток КЗ, А	Точка КЗ								
	1	3	5	7	9	11	13	15	16
$I_{кз \max 1}, А$									
$I_{кз \max 2}, А$									
$I_{кз \min 1}, А$									
$I_{кз \min 2}, А$									
$U_{ост \min 1}, В$									
$U_{ост \min 2}, В$									

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Состав трехступенчатой токовой защиты ЛЭП, назначение и функции каждой ступени.

2. Принцип действия МТО и способ обеспечения ее селективности.

3. Выбор (расчет) тока срабатывания МТО и проверка ее чувствительности.

4. Назначение ТОВВ, принципы ее действия и обеспечения селективности.

5. Выбор (расчет) тока срабатывания ТОВВ, проверка ее чувствительности.

6. Способы повышения чувствительности ТОВВ.

7. Факторы (способы), обеспечивающие селективность МТЗ.

8. Степень селективности (определение, компоненты, величина).

9. Выбор (расчет) тока срабатывания МТЗ.

10. Проверка (расчет) чувствительности МТЗ.

11. Определение (расчет) тока срабатывания токового реле по известному значению тока срабатывания защиты.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 кВ**

### **ЦЕЛИ РАБОТЫ:**

1. Уяснение параметров сетей 6-35 кВ при работе в нормальном режиме и при возникновении в них однофазных замыканий на землю.
2. Изучение принципов работы и области применения защит, применяемых в сетях 6–35 кВ.

### **1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

#### **1.1. Общая характеристика электрических сетей 6 (10, 35) кВ**

Сети с изолированной нейтралью в зависимости от значения установившегося емкостного тока замыкания на землю, выполняются с изолированной или с компенсированной нейтралью. Находят применение также сети с резистивным заземлением нейтрали.

Преимуществами рассматриваемых сетей является возможность их длительной работы без отключения однофазных замыканий на землю, доля которых достигает (60...90) % общего числа повреждений.

В сетях с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110 кВ и выше, а также в сетях 0,23–0,4 кВ) однофазные короткие замыкания (ОКЗ) сопровождаются весьма большими токами. Эти однофазные КЗ должны безусловно отключаться автоматически и как можно быстрее.

В отличие от сетей с глухозаземленной нейтралью в электрических сетях 6–35 кВ, работающих, как правило, с изолированной или компенсированной нейтралью, значения токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) сравнительно малы (порядка 20...30 А), так как емкостные токи замыкаются через достаточно большие сопротивления емкостей фаз сети относительно земли. Поэтому сети

этих классов напряжения называют сетями с малым током замыкания на землю.

Создание универсальной селективной (избирательной) защиты от ОЗЗ с высокой чувствительностью и надежно функционирующей в любых сетях с малыми токами замыкания на землю представляет собой достаточно трудоемкую задачу, которая предполагает сложную (разветвленную) сеть при наличии в ней разных типов электроустановок (воздушные и кабельные линии, генераторы и электродвигатели), работающих с различными режимами заземления нейтральных точек (изолированная, резонансно заземленная или частично заземленная нейтрали).

Особые трудности при выполнении селективных защит от ОЗЗ возникают в сетях 6(10) кВ с резонансно заземленной нейтралью, где ток повреждения промышленной частоты полностью (частично) компенсируется током дугогасящего реактора (ДГР). Дополнительные трудности возникают при необходимости селективного отключения (определения) присоединения с ОЗЗ в электрических сетях сложной конфигурации при отсутствии на присоединении кабельной вставки, необходимой для установки трансформатора тока нулевой последовательности и при часто меняющейся первичной схеме защищаемой сети.

ОЗЗ имеют некоторые особенности, которые затрудняют выявление поврежденного элемента. Они могут быть: металлическими, через переходное (активное) сопротивление, дуговыми (устойчивыми или перемежающимися). Вследствие значительных перенапряжений в этих сетях могут возникать междуфазные КЗ и двойные замыкания на землю. Это характерно прежде всего для сетей с изолированной нейтралью, имеющих значительные емкостные токи. Поэтому в [2] нормируются значения емкостных токов: до 10 А – в сетях напряжением 35 кВ; до 20 А – в сетях напряжением 10 кВ и до 30 А в сетях напряжением 6 кВ. При указанных значениях (уровнях) токов работа в таких сетях считается допустимой. В противном случае следует принимать меры по их компенсации, т. е. уменьшению, например, путем включения в нейтраль дугогасящего реактора.

В настоящее время в системах электроснабжения эксплуатируются различные устройства защиты от ОЗЗ. В них в качестве воздействующих величин обычно используют установившиеся значения тока и напряжения нулевой последовательности (ненаправленные защиты нулевой последовательности). На практике находят применение защиты, реагирующие на высшие гармонические составляющие (содержащиеся в установившемся токе замыкания на землю), направленные защиты (действующие в зависимости от тока и направления мощности переходного процесса) и устройства защиты, использующие при замыканиях на землю искусственно созданные токи определенной частоты (100 или 25 Гц).

## 1.2. Установившийся (нормальный) режим работы линии

Рассмотрим линию электропередачи с изолированной нейтралью. Для упрощения анализа будем считать, что она работает в режиме холостого хода (токи нагрузки отсутствуют), а падения напряжений на линии от емкостных токов очень малы (активные и реактивные сопротивления линии близки к нулю) и ими можно пренебречь. Емкости фаз источников питания также не будем учитывать в виду их малости.

Можно полагать, что фазы линии (сети) симметричны по отношению к земле (а также между собой) и имеют равномерно распределенные емкости, которые условно можно заменить эквивалентными сосредоточенными емкостями:  $C_A = C_B = C_C = C$ .

Можно считать, что при принятых ограничениях напряжения фаз относительно земли в любой точке линии (в том числе и в точке подключения эквивалентных конденсаторов) равны соответствующим фазным напряжениям и ЭДС источника питания.

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A, \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B, \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C. \quad (1)$$

При принятых предположениях фазные напряжения в любой точке линии образуют симметричную звезду векторов, сумма которых равна нулю.

Под воздействием фазных ЭДС  $E_\phi$  во всех фазах линии про-

ходят емкостные токи, опережающие соответствующие ЭДС на  $90^\circ$ :

$$\dot{I}_A = j\omega C \dot{U}_A, \quad \dot{I}_B = j\omega C \dot{U}_B, \quad \dot{I}_C = j\omega C \dot{U}_C. \quad (2)$$

Схема линии и векторная диаграмма в нормальном режиме работы линии показаны на рис. 1.

Система емкостных токов также является симметричной, а ток нулевой последовательности отсутствует:

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)/3 = 0. \quad (3)$$

Напряжение нулевой последовательности также равно нулю:

$$\dot{U}_0 = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)/3 = 0. \quad (4)$$

Напряжение нейтрали системы относительно земли  $U_N$  с учетом симметрии токов равно потенциалу нулевой точки трех емкостей, т. е. равно потенциалу земли и равно нулю  $\dot{U}_N = 0$  (рис. 1).

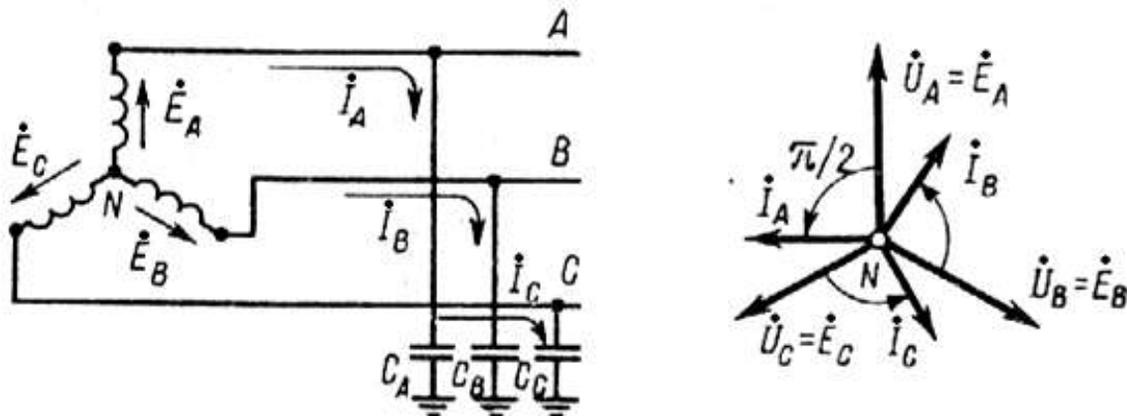


Рис. 1. Схема линии и векторная диаграмма в нормальном режиме работы

Место присоединения конденсаторов на емкостные токи практически не влияет, так как индуктивное и активное сопротивления линии ничтожно малы по сравнению с сопротивлением емкости фазы относительно земли.

### 1.3. Режим металлического ОЗЗ в линии

Пусть в произвольной точке К1 линии происходит металлическое ОЗЗ (на фазе А). В этом случае эта точка приобретает потенциал земли, т. е. напряжение поврежденной фазы становится равным нулю. Нейтраль системы при этом получает (по отношению к земле) смещение  $\dot{U}_N^{(1)} = \dot{U}_A^{(1)} - \dot{E}_A = -\dot{E}_A$ , т. е. напряжение нейтрали становится равным по значению и обратным по знаку напряжению (ЭДС) заземленной фазы (рис. 2).

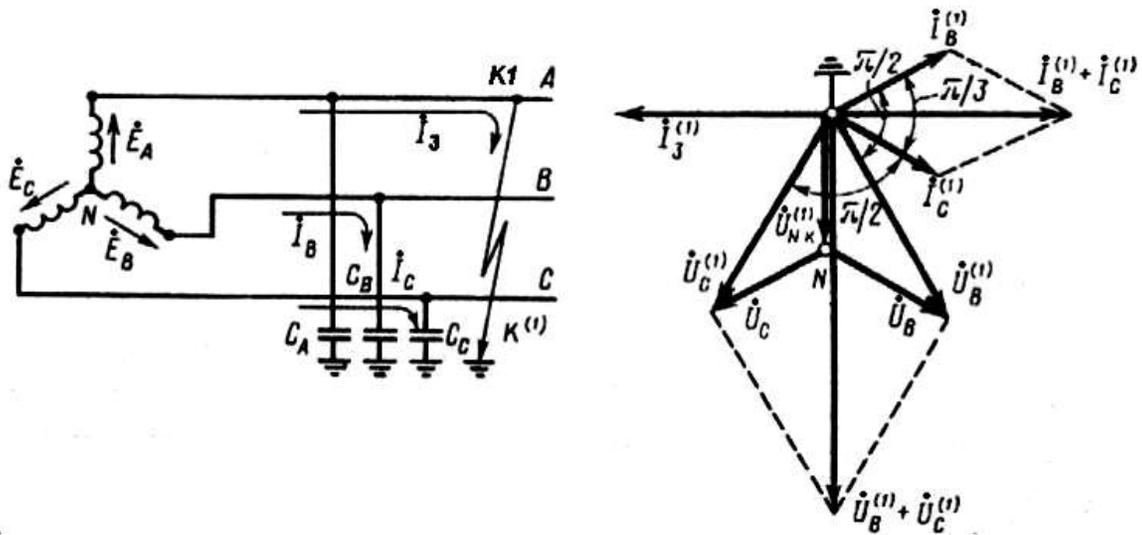


Рис. 2. Схема линии и векторная диаграмма при ОЗЗ на линии

Напряжения неповрежденных фаз (относительно земли за счет полученного при ОЗЗ смещения) становятся напряжениями относительно замкнувшейся фазы на землю и равны:

$$\begin{aligned} \dot{U}_B^{(1)} &= \dot{U}_B + \dot{U}_N^{(1)} = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \dot{U}_{BA}; & \dot{U}_C^{(1)} &= \dot{U}_C + \dot{U}_N^{(1)} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_{CA}; \\ \left| \dot{U}_B^{(1)} \right| &= \sqrt{3}U_\phi; & \left| \dot{U}_C^{(1)} \right| &= \sqrt{3}U_\phi; & \dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)} &= 3\dot{U}_N^{(1)} = -3\dot{E}_A. \end{aligned}$$

Таким образом, напряжения неповрежденных фаз относительно земли увеличились в  $\sqrt{3}$  раз, а междуфазные напряжения остались неизменными (рис. 2). Напряжение нулевой последовательности будет равно:

$$\dot{U}_0^{(1)} = (\dot{U}_A^{(1)} + \dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)})/3 = -\dot{E}_A = \dot{U}_N^{(1)}. \quad (5)$$

Следовательно, появляется напряжение нулевой последовательности, которое по модулю и фазе оказывается равным напряжению нейтрали.

Определим токи в режиме металлического ОЗЗ.

Ток через емкость поврежденной фазы равен нулю, так как напряжение этой фазы относительно земли равно нулю (емкость фазы зашунтирована).

Токи неповрежденных фаз зависят от напряжений этих фаз относительно земли:

$$\dot{i}_B^{(1)} = Y_B \cdot \dot{U}_B^{(1)} = j\omega C \dot{U}_B^{(1)} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_B \exp(j^{\pi/3}); \quad (6)$$

$$\dot{i}_C^{(1)} = Y_C \cdot \dot{U}_C^{(1)} = j\omega C \dot{U}_C^{(1)} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_C \exp(j^{2\pi/3}). \quad (7)$$

Эти токи замыкаются через точку повреждения К1 и поврежденную фазу, образуя в земле ток  $\dot{i}_3^{(1)}$ .

При принятом условном положительном направлении этих токов (рис. 2), ток в земле с учетом (6, 7) равен:

$$\begin{aligned} \dot{i}_3^{(1)} &= 3\dot{i}_0^{(1)} = -(\dot{i}_B^{(1)} + \dot{i}_C^{(1)}) = -(j\omega C \dot{U}_B^{(1)} + j\omega C \dot{U}_C^{(1)}) = \\ &= -j\omega C (\dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)}) = +j\omega C 3E_A = 3\dot{i}_A. \end{aligned} \quad (8)$$

Этот ток опережает напряжение  $U_A$  по фазе на  $90^\circ$  и не зависит от положения точки повреждения на линии.

Таким образом, при возникновении металлического ОЗЗ можно констатировать факторы, которые следует учитывать при построении защиты от этих повреждений:

- напряжение поврежденной фазы становится равным нулю;
- напряжения неповрежденных фаз относительно земли увеличиваются в  $\sqrt{3}$  раз, междуфазные напряжения остаются неизменными;
- появляется напряжение нулевой последовательности (6), равное по модулю и фазе напряжения смещения;
- токи через емкости неповрежденных фаз увеличиваются в  $\sqrt{3}$  раз (6, 7);
- возникает ток нулевой последовательности (8);

– токи  $I_B^{(1)}$ ,  $I_C^{(1)}$ ,  $I_3^{(1)}$  проходят в фазах поврежденной линии между источником питания и местом присоединения конденсаторов эквивалентной схемы и представляют собой уравновешенную систему трех векторов  $\dot{I}_3^{(1)} + \dot{I}_B^{(1)} + \dot{I}_C^{(1)} = 0$ ;

– на участке между точкой повреждения К1 и местом подключения конденсаторов (рис. 2) проходит только ток  $I_3^{(1)}$  по поврежденной фазе (т. е. на этом участке кроме токов прямой и обратной последовательности проходит ток нулевой последовательности).

Распределение токов нулевой последовательности в случае одиночной линии показано на рис. 3.

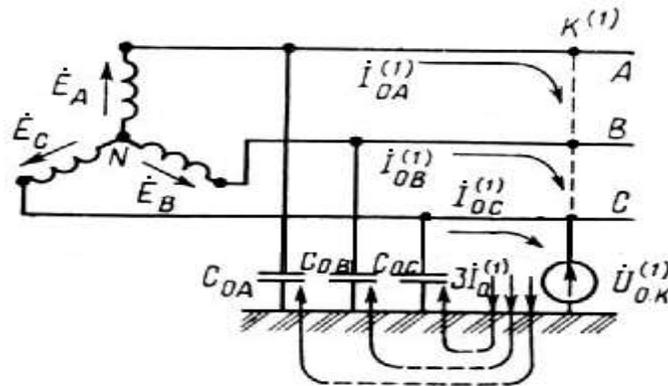


Рис. 3. Распределение токов нулевой последовательности при ОЗЗ на линии

Заметим, что ток нулевой последовательности представляет собой по существу однофазный ток, который разветвляется между тремя проводом (фазами) и возвращается в источник напряжения нулевой последовательности через землю и параллельные ей цепи. Токи нулевой последовательности имеют одинаковую величину и направление во всех фазах, а для циркуляции их в трехфазной цепи требуется дополнительный обратный провод. При ОЗЗ им обычно служит земля (заземляющие проводники, металлические оболочки).

На практике ОЗЗ обычно происходят через активные переходные сопротивления ( $R_{пер} \neq 0$ ). При этом напряжение поврежденной фазы относительно земли снижается не до нуля (как это было пока-

зано выше), а напряжение неповрежденных фаз относительно земли становится больше фазного, но меньше межфазного. Поэтому напряжение смещения нейтрали и напряжение нулевой последовательности оказываются меньше фазного. Это уменьшение оценивают коэффициентом полноты замыкания на землю:  $\beta = U_{OK}^{(1)} / U_{\Phi} \leq 1$ .

#### 1.4. Распределение токов нулевой последовательности в сети

Рассмотрим сеть, состоящую из трех линий W1, W2, W3, подключенных к шинам генераторного напряжения (рис. 4).

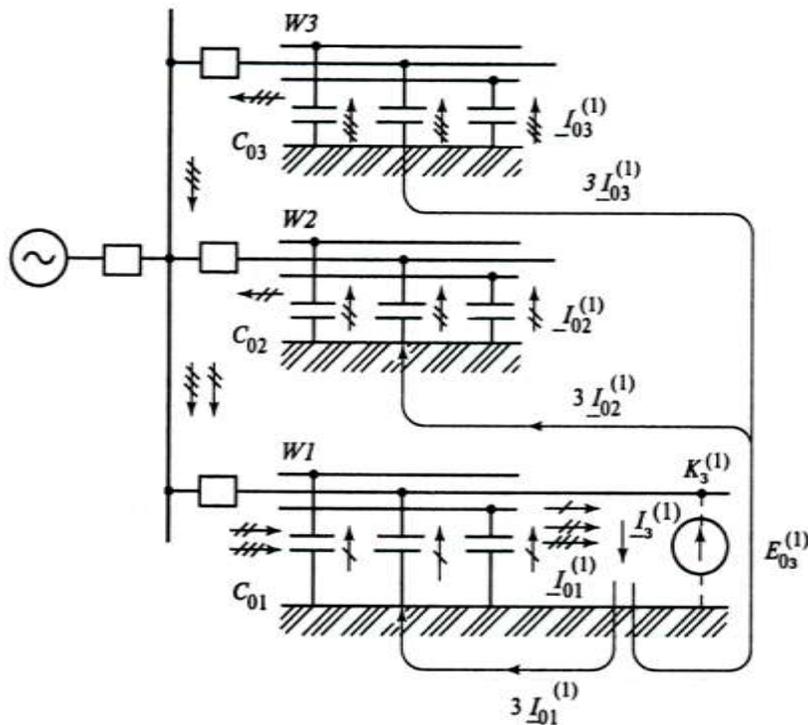


Рис. 4. Распределение токов нулевой последовательности при ОЗЗ в сети

Пусть на линии W1 в точке K1 произошло ОЗЗ. Через место повреждения проходит ток  $i_3^{(1)}$ . Он обусловлен как емкостью  $C_{01}$  поврежденной линии W1, так и емкостями неповрежденных линий  $C_{02}$ ,  $C_{03}$ , и равен сумме токов нулевой последовательности всех трех линий:

$$\dot{i}_3^{(1)} = \sum_{i=1}^N 3\dot{I}_{0i}^{(1)} = 3\dot{I}_{01}^{(1)} + 3\dot{I}_{02}^{(1)} + 3\dot{I}_{03}^{(1)}$$

$$\dot{i}_3^{(1)} = \sum_{i=1}^3 3\dot{i}_{oi}^{(1)} = 3\dot{i}_{01}^{(1)} + 3\dot{i}_{02}^{(1)} + 3\dot{i}_{03}^{(1)},$$

где  $\dot{i}_{0i}^{(1)} = j\omega C_{0i} U_\phi$  ( $i = 1, 3$ ). В общем случае количество линий может быть произвольное. Токи нулевой последовательности (НП) распределяются следующим образом (рис. 4). При выбранном условном положительном направлении тока  $\dot{i}_3^{(1)}$  (к месту повреждения) токи НП неповрежденных линий  $3\dot{i}_{02}^{(1)}$  и  $3\dot{i}_{03}^{(1)}$  проходят через емкости  $C_{02}$  и  $C_{03}$  к шинам подстанции и далее по поврежденной линии W1 от шин (через защиту линии) к месту ОЗЗ (к точке K1).

Ток  $3\dot{i}_{01}^{(1)}$ , как и в случае одиночной линии проходит только на участке между местом повреждения K1 и точкой присоединения конденсаторов  $C_{01}$ .

Следовательно, от шин по поврежденной линии проходит результирующий (эквивалентный) ток, который определяется суммарной емкостью всех неповрежденных линий:

$$\dot{i}_{0эkv}^{(1)} = 3\dot{i}_{02}^{(1)} + 3\dot{i}_{03}^{(1)} = j3\omega \dot{U}_\phi (C_{02} + C_{03}) = j\omega C_{0эkv} \dot{U}_\phi, \quad (9)$$

где  $C_{0эkv} = C_{02} + C_{03}$  – эквивалентная емкость трех фаз всей электрически связанной сети (без учета в ней емкостей поврежденной линии).

Если замыкание происходит на другой линии (W2 или W3), то по неповрежденной линии W1 к шинам будет проходить ток  $3\dot{i}_{01}^{(1)}$ , т. е. собственный емкостной ток линии. Важно иметь в виду тот факт, что в неповрежденной линии ток нулевой последовательности проходит из линии в шину, а в поврежденной – наоборот (из шины в линию).

### 1.5. Расчет емкостных токов

Значение емкостного тока линии и, соответственно, суммарного емкостного тока линий всей сети можно ориентировочно определить

по эмпирическим формулам:  $I_C = I_3^{(1)} = U\ell/350$  – для воздушных сетей,  $I_C = I_3^{(1)} = U\ell/10$  – для кабельных сетей, где  $U$  – номинальное напряжение сети 6, 10 кВ,  $\ell$  – длина линий, км.

Для более точной оценки значения емкостного тока линий следует использовать данные табл. 1, 2, в которых приведены удельные значения емкостных токов.

Таблица 1

Удельные средние значения емкостного тока металлического однофазного замыкания на землю для кабельных линий

Сечение жилы кабеля, мм <sup>2</sup>	Ток, А/км (при номинальном напряжении сети, кВ)		
	6	10	35
16	0,31	0,43	
25	0,43	0,56	
35	0,49	0,63	
50	0,56	0,73	
70	0,73	0,87	
95	0,89	1,02	3,81
120	1,0	1,16	4,57
150	1,19	1,3	4,95

Таблица 2

Удельные средние значения емкостного тока металлического однофазного замыкания на землю одной фазы ВЛ

Тип линии	Ток, А/км (при номинальном напряжении сети, кВ)		
	6	10	35
Одноцепная линия без троса	0,013	0,025	0,1
с тросом	–	0,032	0,12
Двухцепная линия без троса	0,017	0,035	0,14
с тросом	–	–	0,15

Если в сети имеются крупные электродвигатели напряжением 6 или 10 кВ, то следует учитывать их собственные емкостные токи. Собственный емкостной ток электродвигателя (при внешнем ОЗЗ и соответствующем уровне напряжения) можно ориентировочно определить по эмпирической формулам:

$$I_{c.дв.} \approx 0,017 \cdot S_{н.дв.} \text{ – при } U_{н.дв.} = 6 \text{ кВ};$$

$$I_{c.дв.} \approx 0,03 \cdot S_{н.дв.} \text{ – при } U_{н.дв.} = 10 \text{ кВ},$$

где  $I_{c.дв.} = \frac{P_{н.дв.}}{\cos \varphi \eta}$ .

Например, у двигателя мощностью  $P = 5$  МВт напряжением 10 кВ собственный емкостной ток примерно равен  $I_{c.дв.} = 0,17$  А.

## 2. ЗАЩИТА ОТ ОЗЗ В СЕТЯХ 6-35 кВ

### 2.1. Общие положения

Защита от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ согласно [3] может выполняться в виде: селективной защиты, действующей на отключение поврежденного присоединения (когда это необходимо по требованиям безопасности); селективной защиты, действующей на сигнал; устройства контроля изоляции.

В сетях 20–35 кВ защита от однофазных замыканий на землю выполняется, как правило, с действием на сигнал [3].

В сетях с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, рекомендуется применять устройства сигнализации замыканий на землю типов УСЗ-2/2 и УСЗ-3М, реагирующие на сумму высших гармоник в токе замыкания на землю.

В сетях с изолированной нейтралью целесообразно применять защиту на основе реле типа РТЗ-51 (если обеспечивается необходимая чувствительность защиты) в сочетании с устройствами типа УСЗ-3М.

Токовое реле РТЗ-51 рекомендуется устанавливать на одиночных линиях.

Для защиты линий, отходящих от шин РП и ГПП, следует предусматривать направленную токовую защиту нулевой последовательности типа ЗЗП-1М.

ОЗЗ представляют большую опасность для оборудования электрических сетей и находящихся вблизи места их возникновения людей и животных. В связи с этим необходимо либо быстрое автоматическое отключение ОЗЗ, либо незамедлительное определение дежурным персоналом поврежденного присоединения с ОЗЗ с последующим его отключением [3]. В последнем случае (при неселективной защите) выполняется поочередное кратковременное отключение линий (фидеров) и измерение (фиксация) напряжения нулевой последовательности. При наличии селективной защиты определение поврежденного присоединения выполняется по показаниям сигнальных элементов.

При построении защиты (или сигнализации) от ОЗЗ, в зависимости от режима работы нейтрали, используются принципы контроля (измерения) следующих параметров: тока нулевой последовательности (НП) промышленной частоты, напряжения НП, мощности НП промышленной частоты, гармонических составляющих в токе ОЗЗ всех присоединений, переходных токов и напряжений НП при возникновении ОЗЗ. Во всех этих случаях в защитах от ОЗЗ воздействующий сигнал получается от первичных измерительных преобразователя, в качестве которых выступает фильтр напряжения НП (ФННП) и фильтр тока НП (ФТНП).

## 2.2. Особенности построения фильтров нулевой последовательности

ФННП обычно выполняется в виде трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения, имеющего дополнительные обмотки, включенные по схеме разомкнутого треугольника. ФТНП может выполняться в двух вариантах: классическим способом (в виде трех трансформаторов тока, включенных на фазные токи) или в виде специального трансформатора тока нулевой последовательности типа ТНП (ТАЗ).

Токовые цепи защит подключаются к сети через ФТНП, а цепи напряжения – через ФННП (для защиты ЗЗП-1М – дополнительно через вспомогательное устройство типа ВУ-1).

ФТНП выделяет действующее значение полного тока нулевой последовательности промышленной частоты ( $3I_0$ ). Принцип его работы заключается в геометрическом суммировании вторичных токов трех фаз защищаемого присоединения. Такой фильтр имеет существенные недостатки. К ним относятся: большой ток небаланса (как следствие наличия токов намагничивания), достигающий значений, соизмеримых с уровнем полезного сигнала в условиях ОЗЗ; сложность выделения малого тока замыкания на землю (так как используемые трансформаторы тока имеют относительно большой коэффициент трансформации). Кроме того, значительная часть вторичного тока поврежденной фазы рассеивается во вторичных обмотках трансформаторов тока неповрежденных фаз. Поэтому ФТНП практически не применяются в сетях с малыми токами замыкания на землю. В этих сетях находят применение в основном трансформаторы тока нулевой последовательности ТНП.

Принцип работы ТНП заключается в геометрическом суммировании магнитных потоков, образованных первичными токами трех фаз. При этом результирующая магнитодвижущая сила первичной обмотки пропорциональна сумме токов трех фаз.

Первичной обмоткой данных трансформаторов тока являются токопроводы трех фаз защищаемого присоединения (кабеля). Вторичная обмотка их располагается на ферромагнитном сердечнике, имеющем тороидальную (кольцевую), прямоугольную или квадратную формы. Сердечник (ленточный или шихтованный) изготавливается из стали, феррита или пермаллоя.

В нормальном режиме геометрическая сумма первичных токов (и соответствующих магнитных потоков) равна нулю, и ЭДС во вторичной обмотке отсутствует. При ОЗЗ образуется ток НП (5), и в сердечнике ТНП появляется результирующий поток  $\Phi_{рез}$ , который во вторичной обмотке наводит ЭДС, пропорциональную первичному току  $3I_0$ . Под воздействием наведенной ЭДС вторичный ток ТНП поступает в измерительный орган защиты.

Вследствие неидеальности конструкции ТНП и неточности его расположения на кабеле во вторичной обмотке реального ТНП может наводиться ЭДС и в нормальных условиях (даже при равенстве первичных токов и при отсутствии  $3I_0$ ).

Неодинаковость потоков рассеяния для разных фаз приводит к появлению несимметрии потоков, замыкающихся по сердечнику и, соответственно, к появлению ЭДС во вторичной обмотке ТНП при отсутствии токов нулевой последовательности в защищаемом кабеле.

При отсутствии тока нулевой последовательности во вторичной цепи ТНП образуется ток небаланса, который зависит в данном режиме от наличия симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей данного присоединения.

ЭДС и токи небаланса во вторичных обмотках ТНП могут появляться также вследствие влияния различных наводок, источниками которых могут быть: внешние магнитные поля (от близко расположенных токоведущих частей), блуждающие и сварочные токи и др. Небаланс может возникать при коммутационных переключениях в сети, при отключениях трехфазных КЗ, связанных с землей, и т. д. Действие перечисленных факторов обуславливает появление в нагрузке (реле) вторичной обмотки ТНП ЭДС и тока небаланса.

По броне и металлической оболочке кабеля могут проходить токи утечки  $I_{ут}$ , которые не связаны с замыканием на данном кабеле. Они вызывают ложное срабатывание защиты. Для исключения трансформации токов брони участок кабеля от ТНП до муфты (и сама муфта) изолируется от земли. При этом заземляющий проводник, соединяющий оболочку (броню) и муфту с заземлителем, пропускается через окно магнитопровода в направлении конца кабеля. При таком способе заземления кабеля (рис. 5) токи утечки, проходящие через ТНП в прямом и обратном направлениях, создают два одинаковых по величине, но противоположных по знаку магнитных потока. Поэтому ток брони не трансформируется во вторичную обмотку ТНП. Основные технические характеристики применяемых ТНП приведены в табл. 3.

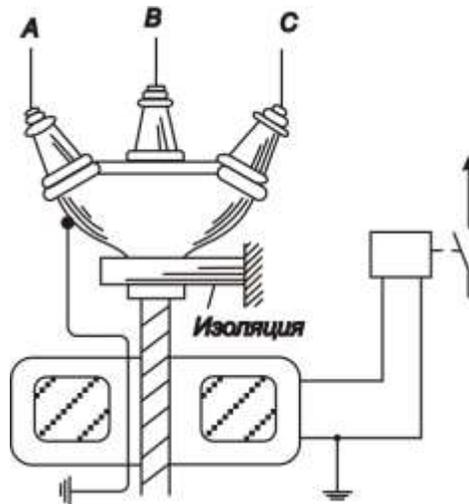


Рис. 5. Принцип подключения заземляющего провода к воронке кабеля при использовании ТНП

Таблица 3

### Основные технические характеристики ТНП

Параметры	ТЗЛК-05.1	ТЗЛ-1	ТЗЛ-200	ТЗРЛ	ТЗЗ-2	ТЗЗ-4
Номинальная частота, Гц	50	50 (60)	50 (60)	50(60)	50 (60)	
Коэффициент трансформации	25/1	25/1	60/1	30/1	20/1	
Число охватываемых кабелей	1	1	1	1	2	4
Диаметр охватываемых кабелей, мм	до 65	до 65	до 200	до 70	до 50	
Климатическое исполнение	0	0	У2, Т2	У3	У3	
Масса, кг	2,4	3,3±0,2	9,8	6,8	60	

### 2.3. Токовая ненаправленная защита нулевой последовательности

Принципы работы и особенности построения защиты от замыкания на землю определяются воздействующей величиной (величи-

нами), на которую она реагирует. Степень сложности и функциональные возможности (свойства) защиты зависят от степени точности определения параметров воздействующих величин и диапазонов их изменения (существования).

Для построения защиты от ОЗЗ линии (в сети) можно использовать токовую ненаправленную защиту нулевой последовательности, если суммарный емкостной ток (при минимальной конфигурации сети) существенно превышает собственный емкостной ток линии (фидера) при внешнем ОЗЗ ( $I_{0эжв}^{(1)} \gg I_{01}^{(1)}$ ). На практике это превышение принимают равным 8...10. При этом важно учитывать, что эта защита не должна срабатывать при внешнем ОЗЗ (т. е. при повреждении на другом присоединении сети, когда через защищаемую линию проходит ток НП, обусловленный собственной емкостью этой линии  $3I_{01}^{(1)} = 3I_{0Л}^{(1)}$ ). Предполагается выполнять защиту без выдержки времени.

С этой целью первичный ток срабатывания защиты выбирают из условия несрабатывания защиты от броска собственного емкостного тока линии при внешнем перемежающемся замыкании на землю по выражению:

$$I_{СЗ} = K_{отс} K_{бр} 3I_{0Л}^{(1)} = K_{отс} K_{бр} I_{сфид}, \quad (10)$$

где  $K_{отс} = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент отстройки;  $I_{0Л}^{(1)}$  – собственный емкостной ток фидера;  $K_{бр}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ (принимается равным: 3...5 – для реле РТ-40; 2..3 – для реле РТЗ-51; 1...1,5 – для современных цифровых реле (терминалов) серии SPACOM);  $I_{с фид}$  – емкостной ток фидера (см. табл. 1, 2).

Основные параметры реле РТЗ-51: номинальное напряжение питания постоянного тока – 220 В, переменного тока – 100 В; номинальный ток – 0,1 А; номинальная частота – 50 или 60 Гц; пределы регулирования тока срабатывания 0,02...0,12 А, шаг уставки – 6 мА.

В воздушных сетях 6–10 кВ токовые ненаправленные защиты нулевой последовательности используются сравнительно редко, т. к. для включения измерительного органа защиты требуется ка-

большая «вставка» для включения кабельного ТНП (Ферранти). В этом случае следует учитывать, что в воздушных сетях емкостные токи (и, следовательно, токи НП) при ОЗЗ сравнительно малы, но значительно большее значение имеет ток небаланса фильтра тока нулевой последовательности ТТНП.

Для защит воздушных ЛЭП ток срабатывания следует выбирать по формуле:

$$I_{сз} \geq K_{отс} \cdot (K_{бр} \cdot I_{с\text{ фид. макс}} + I_{нб}), \quad (11)$$

где  $I_{нб}$  – ток небаланса ФТНП.

Чувствительность защиты от ОЗЗ оценивают коэффициентом чувствительности

$$K_{ч} = 3I_{0\text{ экв}}^{(1)} / I_{сз}, \quad (12)$$

где  $K_{ч} \geq 1,5$  – для воздушной линии;  $K_{ч} \geq 1,25$  – для кабельной линии. Следует иметь в виду, что ток  $I_{0\text{ экв}}^{(1)}$  определяется по режиму с минимально возможным числом присоединений в сети.

#### 2.4. Направленная защита нулевой последовательности

Токовая направленная защита нулевой последовательности применяется в сетях с изолированной нейтралью в тех случаях, когда в установившемся режиме собственный емкостный ток линии соизмерим с полным током замыкания на землю, т. е. когда ненаправленная токовая защита (реагирующая на установившееся значение емкостного тока) не работает в принципе.

Из анализа векторных диаграмм напряжения и тока нулевой последовательности (рис. 3) следует, что максимальной чувствительностью обладает реле направления мощности с внутренним углом  $\alpha = \pi/2$ . Поэтому для выполнения защиты требуется реле, подключаемое к фильтрам напряжения и тока нулевой последовательности.

Такую защиту можно применять в сетях с нейтральями, заземленными через дугогасящие реакторы. В этом случае для ее действия (при возникновении ОЗЗ) необходимо автоматически отклю-

чать дугогасящие реакторы или изменять на них ответвления так, чтобы емкостный ток, проходящий по поврежденной линии, оказался достаточным для срабатывания защиты.

Отключение дугогасящих реакторов не требуется, если для действия защиты используется не емкостный ток, а активная составляющая тока замыкания на землю, обусловленная потерями в дугогасящем реакторе и активной проводимостью фаз сети.

В схемах направленных защит можно использовать индукционные реле направления мощности, имеющие высокую чувствительность. Однако такие реле потребляют очень большую мощность, а защита в целом, как показывает опыт эксплуатации, работает ненадежно.

В настоящее время широкое применение находят следующие типы направленной защиты нулевой последовательности от замыкания на землю: ЗЗП-1, ЗЗП-1М, ЗЗН.

Рассмотрим защиту ЗЗП-1. Она выполнена на полупроводниковой элементной базе и предназначена для селективного отключения защищаемого присоединения при однофазных замыканиях на землю (в сетях торфяных разработок, карьеров, шахтных и тяговых сетях электрифицированного транспорта напряжением 2–10 кВ) с током замыкания на землю от 0,2 до 20 А.

Чувствительность этой защиты определяется минимальным первичным током замыкания на землю. Защита имеет малую потребляемую мощность, реагирует на первичный ток замыкания, находящийся в пределах 0,07...2 А и имеет три уставки первичного тока срабатывания: 1-0,07 А; 2-0,5 А; 3-2,0 А. Для выполнения требования по чувствительности ( $K_{\text{ч}} \geq 2$ ) первичный ток срабатывания определяют по условию:  $I_{\text{сз}} \leq 3I_{0\text{ЭКВ}}^{(1)} / K_{\text{ч}}$ .

Защита выполнена в виде реле, подключаемого к защищаемому присоединению через фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. Она не имеет измерительного органа тока, а для исключения ее неправильного срабатывания входящее в нее реле направления мощности отстраивается от мощности небаланса, обусловленной погрешностями фильтров.

Принципиальная схема защиты представлена на рис. 6.

Она включает в себя: вторичный измерительный преобразователь тока нулевой последовательности (промежуточный трансформатор  $TAL$ ), нагрузкой которого является согласующее устройство (конденсатор  $C6$ ); двухкаскадный избирательный усилитель переменного тока (транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ ); схему сравнения фаз (транзисторы  $VT3$  и  $VT4$ ), в которой производится сравнение двух электрических величин (пропорциональных току  $3I_0$  и напряжению нулевой последовательности  $3U_0$ ) и реагирующего (исполнительного) элемента  $EA$ .

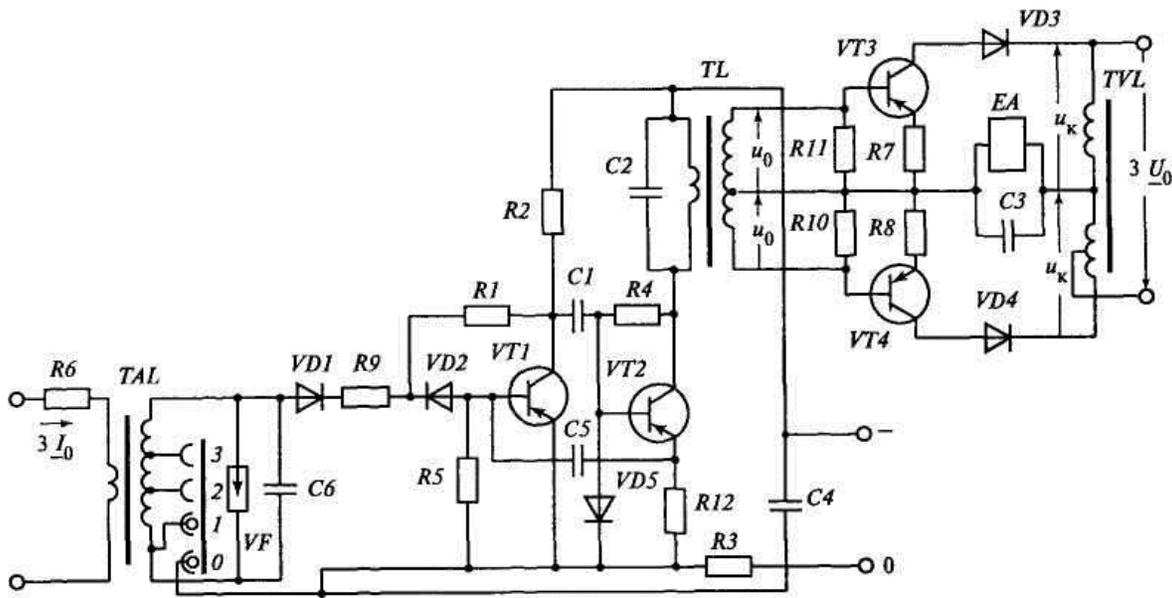


Рис. 6. Схема принципиальная защиты ЗЗП-1М

Согласующее устройство преобразует ток  $3I_0$  в напряжение (на конденсаторе  $C6$ ), смещенное по фазе на угол  $\pi/2$  относительно тока нулевой последовательности. Оно позволяет изменять ток срабатывания защиты (переключением количества витков обмотки трансформатора) и обеспечивает термическую стойкость защиты при двойных замыканиях на землю (разрядник  $VF$ ).

Двухкаскадный усилитель переменного тока выделяет и усиливает составляющую промышленной частоты выходного напря-

жения согласующего устройства. Для этой цели на выходе усилителя включен резонансный контур  $C2-TL$ , настроенный на частоту  $f_0 = 50$  Гц.

Схема сравнения осуществляет сравнение фаз двух синусоидальных величин: напряжения  $U_6$  вторичной обмотки трансформатора  $TL$ , пропорционального току нулевой последовательности  $3I_0$  и смещенного по фазе относительно него на угол  $\pi/2$ , и напряжения  $U_K$  автотрансформатора  $TVL$ , пропорционального напряжению нулевой последовательности  $3U_0$ . В ней производится сравнение времени совпадения  $t_c$  их мгновенных значений по знаку с установленным временем  $t_y$ . Реагирующий элемент  $EA$  срабатывает при  $t_c > t_y$ .

Из векторных диаграмм для тока  $3I_0$  и напряжения  $3U_0$  (рис. 7, а) следует, что при замыкании на защищаемой линии (через защиту к точке замыкания) проходит ток  $3I_{0экв}$ , обусловленный емкостями неповрежденных линий, а сравниваемые напряжения  $U_6$  и  $U_K$  совпадают по фазе (рис. 7, б). На неповрежденной линии ток  $3I_{0л}$ , обусловленный собственной емкостью линии, направлен к шинам, а сравниваемые ее защитой напряжения смещены по фазе на угол  $\pi$  (рис. 7, б). Из этого следует, что защита срабатывает, имея максимальную чувствительность, если угол сдвига фаз между  $U_6$  и  $U_K$  равен нулю, и не действует при  $\varphi = \pi$ . Таким образом, зона срабатывания защиты определяется углом сдвига фаз  $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ . На рис. 7, а, б она ограничена линией нулевой чувствительности, совпадающей с вещественной осью.

При ОЗЗ на защищаемом присоединении первая гармоника основной частоты токового сигнала на выходе усилителя переменного тока совпадает по фазе с сигналом на выходе автотрансформатора  $TV2$ , соответствующем напряжению нулевой последовательности. В этом случае транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  фазочувствительного усилителя работают попеременно в режиме усиления, обеспечивая срабатывание исполнительного реле  $KL$ . При внешних замыканиях напряжение на выходе усилителя переменного тока находится в противофазе с напряжением нулевой последовательности, и тран-

зисторы  $VT3$  и  $VT4$  находятся в закрытом состоянии, реле не срабатывает.

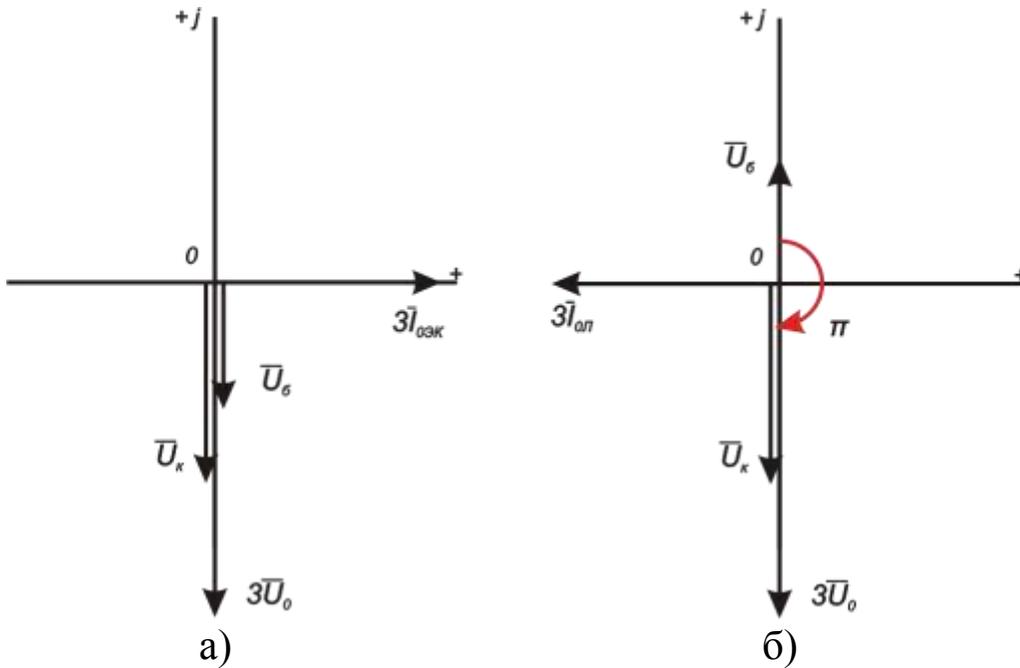


Рис. 7. Векторные диаграммы токов и напряжений в нормальном режиме (а) и при замыкании на землю (б)

Ток срабатывания направленных защит от ОЗЗ следует определять по выражению:

$$I_{сз} \geq K_n (I_{н.б.расч.} + I_{н.б.нес.} + I_{н.б.смещ.}), \quad (13)$$

где  $I_{н.б.расч.}$  – ток небаланса фильтра токов нулевой последовательности;  $I_{н.б.нес.}$  – ток небаланса, вызванный несимметрией сопротивлений фаз относительно земли;  $I_{н.б.смещ.}$  – ток, условно названный током небаланса из-за смещения нейтрали, вызванного влиянием параллельных линий.

Для защиты элементов ЗЗП-1М от высших гармоник, имеющих в напряжении  $3U_0$ , устройство следует подключать к ФННП через фильтр с резонансной частотой 50 Гц. Он подавляет высшие гармонические составляющие с частотой выше 50 Гц и выполняется в виде вспомогательного устройства ВУ-1, в которое входят дроссель

с регулируемым воздушным зазором и последовательно включенный конденсатор. На одно устройство ВУ-1 может быть включено до 10 устройств ЗЗП-1М.

Для исключения опасного воздействия на устройства ЗЗП-1М перенапряжений, возникающих в первый момент замыкания на землю в сети 10 кВ, предусматривают небольшую задержку в подаче напряжения  $3U_0$  на устройство ЗЗП-1М (с помощью максимального реле напряжения типа РН-53/60Д с уставкой 15 В).

Учитывая, что среднее удельное значение емкостного тока для воздушных сетей 10 кВ составляет на 1 км примерно 0,028 А, то для надежного срабатывания защиты ЗЗП-1(ЗЗП-1М) при минимальной ее уставке 0,2 А (первичных) необходимо, чтобы суммарная протяженность всех неповрежденных линий 10 кВ этой сети была бы не менее 20...25 км и, соответственно, суммарный емкостный ток  $I_{C\Sigma} \geq 0,5...0,6$  А.

Вместо защиты ЗЗП-1М Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ) выпускает усовершенствованную направленную защиту нулевой последовательности ЗЗН.

Эта защита предназначена для селективного отключения защищаемого присоединения при ОЗЗ в некомпенсированных сетях 3-10 кВ с первичным током замыкания на землю от 0,2 А (что соответствует минимальной суммарной длине неповрежденных кабельных линий сети 10 кВ – 0,2 км или воздушных линий – 7 км), при использовании кабельных ТНП.

Защита ЗЗН имеет два пусковых органа (ПО) (по току и напряжению) и фазочувствительный орган, которые работают по схеме "И". Она имеет три уставки по току (0,07 А; 0,25 А; 2,5 А) и три уставки по напряжению (10 В; 15 В; 20 В), встроенный блок питания, встроенное устройство экспресс-контроля и устройство сигнализации, указывающее на недопустимые небалансы в цепях тока и напряжения защиты, на наличие ОЗЗ в зоне действия защиты и на срабатывание выходного реле.

Защита ЗЗН имеет более широкую область применения, чем ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) и не обладает ее недостатками.

## 2.6. Устройства сигнализации замыканий на землю

Устройства сигнализации замыканий на землю работают на принципе измерения (и, соответственно, реагирования) высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ [3]. Эти составляющие имеются и в токах нормального режима. Они обусловлены несинусоидальным характером ЭДС генераторов, токами намагничивания силовых трансформаторов и нагрузки. При ОЗЗ их содержание в сети резко увеличивается (и особенно в токе нулевой последовательности поврежденной линии). Это справедливо как для сети с изолированной, так и для сети с нейтралью, заземленной через ДГР.

В принципе устройства сигнализации могут реагировать либо на одну (определенную) гармонику, либо на все гармонические составляющие в токе ОЗЗ. На практике находят применение следующие устройства сигнализации замыканий на землю: УСЗ-2/2, УСЗ-3М (УСЗ-3), предназначенные для селективной сигнализации ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР.

УСЗ-2/2 – индивидуальное устройство, которое включается через ТНП кабельного типа (Ферранти), основанное на принципе абсолютного замера.

УСЗ-3М – групповое устройство, состоящее из прибора, который поочередно подключается к ТНП каждого из кабелей (присоединений). Это дает возможность персоналу однозначно определить фидер с ОЗЗ по относительно большему показанию прибора (принцип относительного замера).

Устройство УСЗ-2/2 не нашло широкого применения из-за относительно большой стоимости, трудности выбора уставок, возможности неселективного срабатывания при дуговых ОЗЗ и других существенных недостатков.

Групповое устройство УСЗ-3М основано на измерении высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ (от 150 до 650 Гц). Оно нашло широкое применение в основном в кабельных сетях городов и промышленных предприятий.

Устройство УСЗ-3М (рис. 8) позволяет обнаружить только устойчивое замыкание на землю, но это не считается недостатком и не препятствует широкому применению этих устройств.

В настоящее время имеются устройства для одновременного измерения сумм высших гармоник на всех отходящих линиях, сравнения этих значений между собой и выявления поврежденной линии. Например, в цифровом терминале защиты линии для сетей с резонансно заземленной нейтралью SPAC 801.013 имеется токовая ненаправленная защита от замыканий на землю – аналог УСЗ, измеряющая высшие гармоники тока.

Следует иметь в виду, что эти устройства сигнализации не имеют элемента направления мощности. Поэтому на подстанциях с малым числом линий (причем, неидентичных) затруднительно обеспечить их селективную работу при ОЗЗ на какой-то из линий.

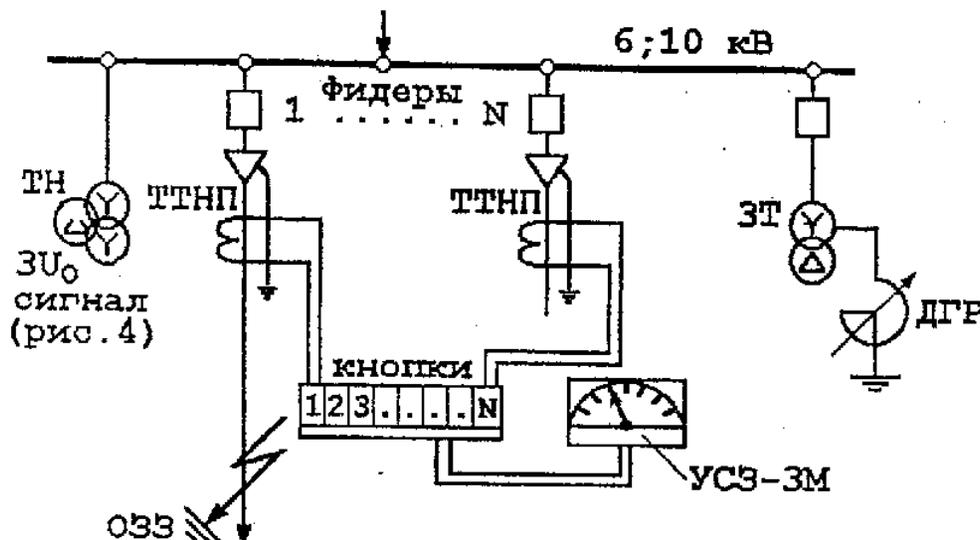


Рис. 8. Схема включения прибора УСЗ-3М. Кнопки с переключением без разрыва цепей

## 2.7. Общая неселективная сигнализация о замыкании на землю (устройство контроля изоляции)

Неселективная сигнализация о замыкании на землю обычно представляет собой устройство контроля изоляции. Она является

простейшей (ненаправленной) защитой, которая не позволяет точно определить поврежденный участок (элемент СЭС) и действует, как правило, на сигнал (рис. 9).

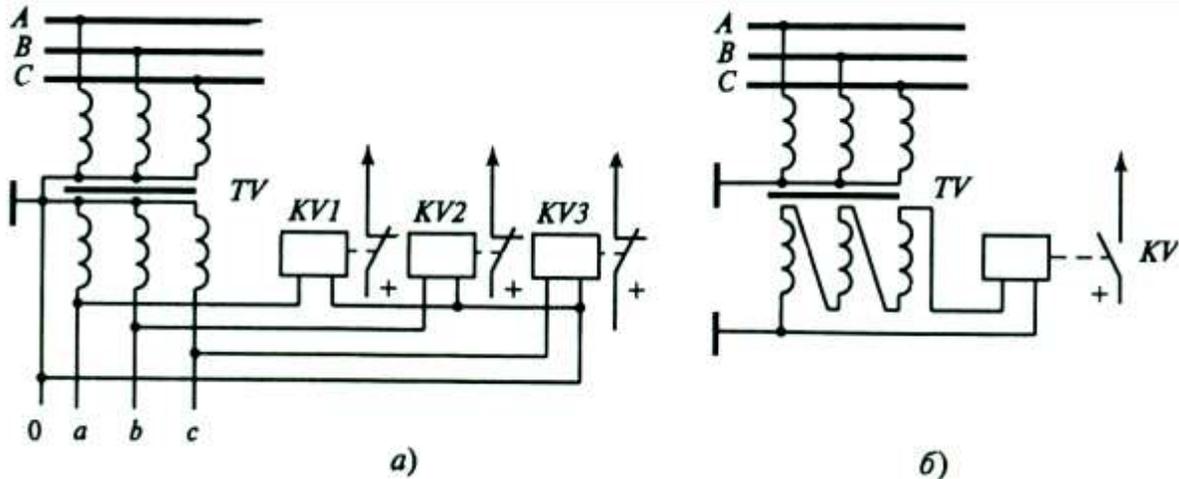


Рис. 9. Схемы устройств контроля изоляции: а – на основе трех минимальных реле напряжения; б – на основе напряжения нулевой последовательности (одно максимальное реле напряжения)

Защита этого класса реагирует на изменения напряжения фаз относительно земли. Работа их основана на том факте, что во всех точках электрически связанной сети при замыкании одной из фаз на землю напряжение фаз относительно земли будет изменяться примерно одинаково во всех точках сети. Поэтому в них отсутствует возможность определения поврежденного объекта, и они действуют неселективно (на сигнал).

Фактически в таких защитах осуществляется контроль состояния изоляции в системе. Появление «земли» на фазе приводит к резкому увеличению проводимости изоляции, что приводит, соответственно, к увеличению тока проводимости. При этом появляется напряжение нейтрали относительно земли и уменьшается (до нуля при металлическом замыкании) напряжение поврежденной фазы.

Для определения места повреждения при срабатывании такой защиты дежурный персонал производит поочередное отключение присоединений до пропадания «земли» на фазе и восстановления

величины напряжения до нормального значения. Такой способ определения повреждения.

Устройство контроля изоляции фиксирует факт возникновения ОЗЗ по напряжению нулевой последовательности. Практически все устройства контроля изоляции выполняются с использованием трансформаторов напряжения (либо трехфазных пятистержневых, либо – трех однофазных, соединенных по схеме «разомкнутого треугольника»).

Устройство контроля изоляции может быть выполнено несколькими способами. Например, с помощью трех вольтметров, включенных на фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора напряжения, или трех реле напряжения минимального действия (рис. 9, а). В нормальном симметричном режиме все три вольтметра показывают одинаковые фазные напряжения. При замыкании одной фазы на землю показания вольтметра этой фазы резко понизятся вплоть до нуля при металлическом замыкании. Показания вольтметров других фаз увеличатся, вплоть до 1,73 фазного (при металлическом замыкании). Для получения звукового сигнала при замыкании на землю в схему устройства может быть включено сигнальное реле.

Другим распространенным способом выполнения сигнализации замыканий на землю является использование дополнительной (третьей) обмотки трансформатора напряжения, соединенной по схеме разомкнутого треугольника, которая является фильтром напряжения нулевой последовательности  $3U_0$  (рис. 9, б). В нормальном режиме сети при симметричных напряжениях фаз на выводах этой обмотки и на реле  $KV$  напряжение практически отсутствует (имеется только напряжение небаланса, значение которого обычно не превышает 1 В). Наличие этого напряжения свидетельствует об исправности трансформатора напряжения, отсутствии обрывов и замыканий в его вторичных цепях.

При однофазном металлическом замыкании на землю, например, провода фазы А напряжение этой фазы относительно земли становится равным нулю, напряжения неповрежденных фаз В и С увеличиваются в 1,73 раза, а их геометрическая сумма становится равной утроенному значению фазного напряжения. Для того, чтобы

напряжение на реле  $KV$  в этих случаях не превышало стандартного номинального значения 100 В, трансформаторы напряжения с обмотками, соединенными по схеме «разомкнутый треугольник», имеют повышенный в 3 раза коэффициент трансформации.

Под воздействием напряжения нулевой последовательности, которое при металлическом замыкании достигает 100 В, максимальное реле напряжения  $KV$  срабатывает на сигнал или на отключение. Последнее выполняется на подстанциях, откуда питаются линии, отключаемые при замыканиях на землю по условиям техники безопасности. Защита по напряжению нулевой последовательности обычно является резервной по отношению к основным селективным защитах присоединений и действует на отключение подстанции или секции с выдержкой времени 0,5...0,7 с для отстройки от основной защиты.

В устройстве применяется реле  $KV$ , например, типа РН-53/60Д с минимальной уставкой 15 В.

### 3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ

3.1. Векторная диаграмма токов и напряжений для линии в нормальном режиме работы.

3.2. Векторная диаграмма токов и напряжений для линии в режиме ОЗЗ.

3.3. Распределение токов нулевой последовательности в одиночной линии при ОЗЗ.

3.4. Составляющие токов на землю и путь их прохождения.

3.5. Распределение токов нулевой последовательности в сети при ОЗЗ.

3.6. Особенности построения и монтажа кабельного фильтра тока нулевой последовательности.

3.7. Принцип работы ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности. Ток срабатывания и коэффициент чувствительности защиты.

3.8. Принцип работы направленной защиты нулевой последовательности. Назначение функциональных узлов защиты ЗЗП-1М.

3.9. Принцип работы устройства сигнализации замыкания на землю.

3.10. Принцип работы устройства общей сигнализации о замыкании на землю.

3.11. Определение величины емкостного тока линии.

3.12. Назначение заземляющего провода при монтаже кабельного трансформатора нулевой последовательности.

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

4.1. Уяснить основные теоретические положения и кратко законспектировать их.

4.2. Ознакомиться со стендом, на котором проводится лабораторная работа.

4.3. Произвести расчет собственного и эквивалентного емкостных токов для заданной конфигурации сети (заполнить табл. 4).

4.4. Произвести расчет тока срабатывания реле РТЗ-51 и коэффициента чувствительности.

Таблица 4

#### Исходные и расчетные данные

Линия	Длина линии $L$ , км	Сечение жилы кабеля, $\text{мм}^2$	Удельный емкостной ток $I_{уд}$ , А/км	Собственный емкостной ток линии $I_c$ , А	Эквивалентный емкостной ток сети $I_c$ , А	Ток срабатывания защиты $I_{сз}$ , А	Коэф. чувствительности $K_\chi$
W1							
W2							
W3							
W4							
W5							
W6							
W7							
W8							
W9							

4.5. Произвести проверку срабатывания реле РТЗ-51 на заданной уставке.

4.6. Выполнить принципиальную схему защиты присоединения.

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторная работа проводится на специальном лабораторном стенде, который содержит (рис. 10):

- схему (модель) электроснабжения, изображенную на лицевой панели стенда с указанием номеров линий, мест установки защит и контуров циркуляции токов нулевой последовательностей;
- измерительные приборы и устройства защиты;
- панель для проверки тока срабатывания реле РТЗ-51;
- фрагмент СЭС с использованием защиты ЗЗП-1М.

Перед проведением работы необходимо подготовить исходные данные (табл. 4).

Для проверки срабатывания реле РТЗ-51 (на заданной уставке) следует:

- включить питание реле (тумблером РТЗ-51 на панели);
- установить оцифрованную уставку (набором тумблеров);
- по амперметру РА установить требуемую величину тока ручкой «РЕГУЛИРОВКА ТОКА  $3 I_0$ ».

Факт срабатывания реле подтверждается загоранием лампы «СРАБАТЫВАНИЕ РЕЛЕ».

В отчете по лабораторной работе следует представить:

- краткое описание основных теоретических положений, принципы действия защит и их схемы;
- исходные и расчетные данные в виде таблиц;
- результаты измерения параметров реле РТЗ-51;
- выводы по результатам работы.

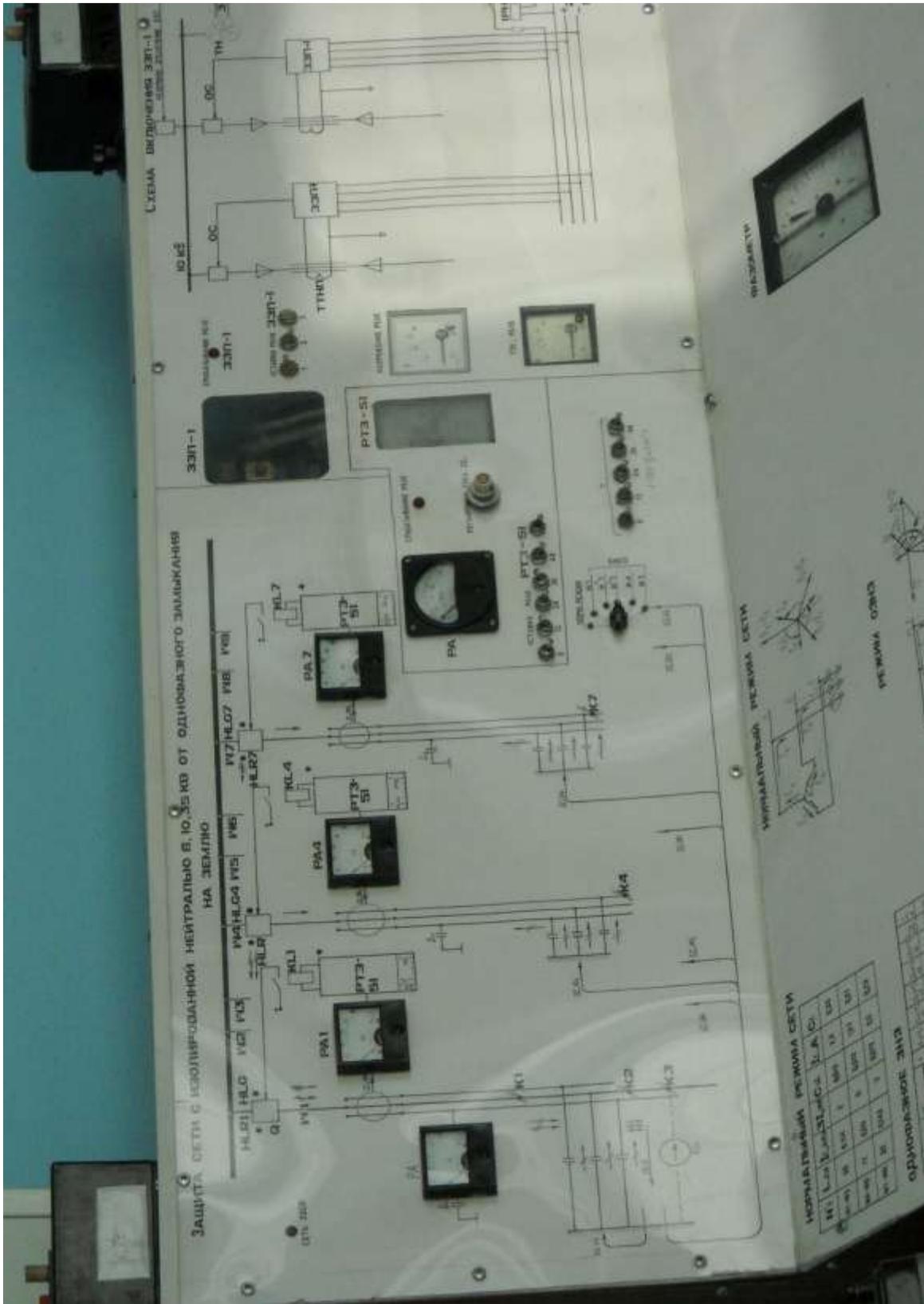


Рис. 10. Схема лабораторного стенда

## 6. ТЕСТОВЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ

1. Значение коэффициента  $K_{бр}$ , учитывающего бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ и принимаемого при расчете тока срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю: а – 2...3; б – 1; в – 5...6; г – < 1.

2. Величина броска емкостного тока определяется: а – емкостью присоединения и индуктивностью источника; б – наличием дугогасящего реактора; в – наличием резистора, включенного в нейтраль маломощного трансформатора; г – потерями напряжения в сети.

3. Однофазное замыкание на землю приводит к появлению токов: а – прямой последовательности; б – обратной последовательности; г – нулевой последовательности; в – сверхтоков.

4. Чувствительность защиты ВЛ является достаточной при коэффициенте чувствительности  $K_{\chi}$ : а –  $\geq 1,5$ ; б – 1,25...1,5; в – 1,1...1,25; г – < 1.

5. Чувствительность защиты характеризует: а – устойчивость срабатывания защиты при аварийном режиме в защищаемой зоне; б – надежность срабатывания защиты; в – возможность отключения выключателя; г – быстроту срабатывания защиты.

6. Защита линии от однофазных замыканий на землю устанавливается: а – в начале линии; б – в конце линии; в – в начале и в конце линии; г – на каждой опоре.

7. Направленная защита нулевой последовательности от замыкания на землю: а – ЗЗП; б – УСЗ; в – ОЗЗ; г – УЗО.

8. Направленная защита от замыканий на землю отличается от токовой защиты наличием: а – реле направления мощности; б – реле времени; в – трансформатора тока нулевой последовательности; г – промежуточного реле.

9. Ток срабатывания защиты – это: а – минимальный первичный ток в фазах линии, при котором защита срабатывает; б – расчетное значение тока однофазного замыкания на землю; в – макси-

мальный первичный ток в фазах линии, при котором защита срабатывает; г – ток, равный значению уставки реле защиты.

10. Значение однофазного тока замыкания на землю  $I_3^{(1)}$ , при котором работа в сетях с изолированной нейтралью является допустимой: а – 20 А; б – 30 А; в – 10 А; г – < 5 А.

11. Достоинства специального (кабельного) трансформатора тока нулевой последовательности по сравнению с классическим фильтром тока нулевой последовательности: а – большие габариты; б – малые токи небаланса; в – отсутствие электромагнитных излучений; г – высокий коэффициент трансформации.

12. Принцип работы трехтрансформаторного фильтра тока нулевой последовательности: а – геометрическое суммирование вторичных токов трех фаз; б – разделение вторичных токов на симметричные составляющие; в – суммирование первичных токов трех фаз; г – сравнение первичных и вторичных токов.

13. Параметр, определяющий техническое совершенство защиты: а – габариты и вес; б – селективность защиты; в – периодичность срабатывания; г – непрерывное сохранение работоспособного состояния.

14. Ток нулевой последовательности, протекающий от шин подстанции по поврежденной линии, определяется емкостью: а – поврежденной линии; б – всех неповрежденных линий; в – наиболее удаленной от места повреждения линии; г – отключенных линий.

15. При возникновении однофазных замыканий на землю содержание высших гармоник в сети: а – увеличивается; б – уменьшается; в – остается неизменным; г – увеличивается только в поврежденной линии.

16. Токовая защита, срабатывающая от гармонических составляющих тока нулевой последовательности, называется: а – ЗЗП; б – ЗЗГШ; в – УСЗ; г – УЗО.

17. Высшие гармоники, возникающие в токе при однофазном замыкании на землю, обусловлены: а – срабатыванием защиты от однофазных замыканий на землю; б – емкостным сопротивлением

линии; в – токами намагничивания силовых трансформаторов; г – потерями напряжения в сети.

18. Первая уставка защиты ЗЗП-1М находится в диапазоне: а –  $< 00,7$  А; б –  $0,07 \dots 2$  А; в –  $4,3$  А.

19. Защита УСЗ используется в сетях с нейтралью: а – заземленной через дугогасящий реактор; б – изолированной; в – глухозаземленной; г – эффективно заземленной.

20. Чувствительность защиты определяется: а – минимальным первичным током замыкания на землю; б – максимальным током замыкания на землю; в – током нулевой последовательности, проходящим по поврежденному участку; г – током утечки через ТТНП.

21. Зона срабатывания ЗЗП-1 определяется углом сдвига фаз: а –  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ ; б –  $0 \leq \varphi \leq \pi$ ; в –  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi$ ; г –  $-\pi/2 \leq \varphi \leq 0$ .

22. Чувствительность защиты от однофазных замыканий на землю для кабельной линии является достаточной при  $K_{\varphi}$ : а –  $\geq 1,25$ ; б –  $1,15 \dots 1,25$ ; в –  $1,1 \dots 1,15$ ; г –  $1 \dots 1,1$ .

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРОГО ВКЛЮЧЕНИЯ**

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

Целью работы является изучение принципов построения и особенностей реализации устройств автоматического повторного включения.

### **1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1.1. Назначение и принцип работы устройства автоматического повторного включения

Автоматическое повторное включение (АПВ) служит для быстрого восстановления электроснабжения потребителей, отключенных устройствами защиты при возникновении электрических самоликвидирующихся повреждений и ненормальных режимов в

высоковольтных сетях и электроустановках. Устройства автоматического повторного включения (УАПВ) восстанавливают нормальную схему питания также в тех случаях, когда отключение выключателей отдельных участков сети или источников питания происходит вследствие либо ошибочных действий оперативного персонала, либо ложных срабатываний релейных защит.

Опыт эксплуатации показывает, что многие повреждения в системах электроснабжения являются неустойчивыми и самоустраняются (самоликвидируются) после кратковременного снятия напряжения. К наиболее частым причинам, вызывающим неустойчивые повреждения элементов системы электроснабжения, относятся: перекрытие изоляции линий при атмосферных перенапряжениях; схлестывание проводов при сильном ветре; замыкание линий различными предметами; отключение линий или трансформаторов вследствие кратковременных перегрузок или неизбирательного срабатывания релейной защиты; ошибочных действий дежурного персонала и т. д.

Применение устройств АПВ различных элементов систем электроснабжения повышает надежность электроснабжения даже при одном источнике питания.

Сущность АПВ состоит в том, что элемент системы электроснабжения, отключившийся под действием релейной защиты (РЗ), вновь включается под напряжение (если нет запрета на его повторное включение). Если при этом причина, вызвавшая отключение элемента, исчезла, то этот элемент остается в работе. Благодаря АПВ потребители получают питание практически без перерыва. Таким образом, устройства АПВ предназначены для автоматического подключения отключившегося элемента энергосистемы для восстановления работы потребителей или схемы их электропитания.

Большая часть аварийных отключений электроустановок не связана с разрушением изоляции, а является следствием неустойчивых замыканий и самоликвидируется после кратковременного снятия напряжения. Если поврежденную сеть, отключенную защитой (по истечении некоторого времени, необходимого для деионизации среды, ионизированной дугой в месте короткого замыкания), снова

включить, то такое включение часто оказывается успешным и восстанавливает исходную схему электроснабжения.

Например, если короткое замыкание за время бестоковой паузы самоустранилось, то линия, на которой произошло неустойчивое повреждение, при повторном включении остается в работе. Поэтому повторные включения при неустойчивых повреждениях называют успешными, а самоустраняющиеся повреждения называют неустойчивыми.

Операция по автоматическому восстановлению напряжения в сетях после его отключения соответствующими защитами называется автоматическим повторным включением (АПВ). Если первое АПВ оказалось unsuccessfulным, то иногда его повторяют.

На воздушных линиях (ВЛ) успешность повторного включения зависит от номинального напряжения линий. На линиях напряжением 110 кВ и более успешность повторного включения значительно выше, чем на ВЛ напряжением 6...35 кВ. Значительный процент успешных повторных включений в сетях высокого и сверхвысокого напряжений объясняется быстроедействием РЗ (как правило, не более 0,10...0,15 с), большим сечением проводов и расстояний между ними, высокой механической прочностью опор.

Устройства АПВ в системах электроснабжения обеспечивают повышение надежности электроснабжения, уменьшение перерывов электрической энергии, сокращение простоев электрооборудования, повышение производительности труда и в ряде случаев способствуют снижению капитальных затрат на устройство систем электроснабжения.

Данные о повреждаемости воздушных линий электропередачи за многолетний период эксплуатации показывают, что доля неустойчивых повреждений весьма высока и составляет 50...90 %.

При ликвидации аварии обычно оперативный персонал производит опробование линии путем включения ее под напряжение, так как отыскание места повреждения на линии электропередачи путем ее обхода требует длительного времени, а многие повреждения носят неустойчивый характер. Эту операцию называют повторным включением.

Реже на воздушных линиях возникают такие повреждения, как обрывы проводов, тросов или гирлянд изоляторов, падение или поломка опор. В кабельных сетях повреждения обуславливаются как особенностями конструкции кабелей, так и причинами их повреждений – механическим разрушением кабелей при земляных и строительных работах. Такие повреждения не могут самоустраниваться, поэтому их называют устойчивыми.

При устойчивом повреждении повторно включенная линия будет вновь отключена защитой. Поэтому повторные включения линий при устойчивых повреждениях называют неуспешными.

На подстанциях с постоянным оперативным персоналом или на телеуправляемых объектах повторное включение линий занимает несколько минут, а на нетелемеханизированных подстанциях и без постоянного оперативного персонала 0,5...1 ч и более. Поэтому для ускорения повторного включения линий и уменьшения времени перерыва электроснабжения потребителей широко используются специальные УАПВ.

Время действия АПВ обычно не превышает нескольких секунд, поэтому устройства АПВ при успешном включении быстро подают напряжение потребителям. Экономическое значение внедрения АПВ весьма существенно, поскольку стоимость устройств АПВ несоизмеримо мала по сравнению с тем экономическим эффектом, который они дают.

Наиболее эффективно применение АПВ на линиях с односторонним питанием, так как в этих случаях каждое успешное действие АПВ восстанавливает питание потребителей и предотвращает аварию.

В кольцевых сетях отключение одной из линий не приводит к перерыву питания потребителей. Однако и в этом случае применение АПВ целесообразно, так как это ускоряет ликвидацию ненормального режима и восстановление схемы сети, при которой обеспечивается наиболее надежная и экономичная работа.

Согласно ПУЭ применение АПВ обязательно на всех воздушных и смешанных (кабельно-воздушных) линиях напряжением выше 1 кВ.

Короткие замыкания часто бывают неустойчивыми не только на воздушных линиях, но и на сборных шинах подстанций. При этом АПВ шин с номинальным напряжением 35 кВ и выше обычно бывает успешным, что связано с малым временем работы релейной защиты шин, большими расстояниями между проводами и повышенной механической прочностью конструкций шин. Автоматическое повторное включение шин имеет высокую эффективность, поскольку каждый случай успешного действия предотвращает аварийное отключение целой подстанции или ее части.

В трансформаторах большинство повреждений (коротких замыканий) носит устойчивый характер. Однако, устройствами АПВ оснащаются все одиночно работающие трансформаторы мощностью 1000 кВА и более, а также трансформаторы меньшей мощности, питающие ответственную нагрузку.

Так как процент неустойчивых повреждений трансформаторов ничтожно мал, то устройства АПВ на трансформаторах выполняются так, чтобы их действие происходило только при отключении трансформатора резервной защитой. Резервные защиты трансформаторов действуют на их отключение в большинстве своем при отказах устройств защиты или выключателей, питающихся от этих трансформаторов линий. При этом успешность действия АПВ трансформаторов так же высока, как и АПВ воздушных линий, и составляет 70...90 %.

При действии защит от внутренних повреждений АПВ трансформатора, как правило, не производится. Например, при применении АПВ трансформаторов предусматривают запрет АПВ при внутренних повреждениях трансформатора, т. е. при отключении трансформаторов под действием газовой или дифференциальной защиты.

Автоматическое повторное включение весьма эффективно при ложных и неселективных действиях релейной защиты, при ошибочных действиях персонала, при нарушениях изоляции оперативных цепей, вызывающих «самопроизвольное» (без воздействия персонала, защиты и автоматики) отключение выключателей. Применение

АПВ позволяет в ряде случаев применить упрощенные схемы релейной защиты и ускорить отключение КЗ.

С увеличением кратности действия АПВ его эффективность уменьшается. Так, эффективность применения однократного АПВ для воздушных линий в энергосистемах России составляет 60...75 %, двукратного – 30...35 %, трехкратного – всего лишь 1...5 %.

В распределительных сетях широкое внедрение АПВ, наряду с другими устройствами электроавтоматики, является одним из основных средств, позволяющих отказаться от постоянного дежурного персонала на большинстве подстанций и перевести их на обслуживание оперативно-выездными бригадами (ОВБ).

Применение АПВ в распределительных сетях позволило также широко использовать подстанции 35...110 кВ без выключателей на стороне высшего напряжения. В этих случаях выключатели и АПВ устанавливаются только на питающих линиях со стороны головного участка сети.

## 1.2. Требования, предъявляемые к устройствам АПВ

Факторы, определяющие условия эксплуатации устройств АПВ в энергосистемах, обуславливают технические требования, предъявляемые к ним при разработке схем, выборе рабочих уставок и при наладке АПВ.

С точки зрения сохранения устойчивой работы электрической системы желательно иметь максимальное быстродействие АПВ. Однако быстродействие ограничивается опасностью повторного зажигания дуги после подачи напряжения. Перерыв в подаче напряжения должен быть больше времени деионизации среды, при котором гасится дуга. Поэтому приходится учитывать более тяжелые условия работы выключателей совместно с АПВ. Особенно это относится к масляным выключателям, в которых масло, окружающее место разрыва контактов, при отключении КЗ разлагается и обугливается под действием дуги, теряя изоляционные свойства.

Возможность работы в цикле АПВ воздушных выключателей определяется практически только количеством и давлением сжатого воздуха в резервуарах выключателя.

На быстродействие АПВ влияют время готовности привода выключателя к работе на включение, а также время возврата в исходное положение реле защиты, действовавшей при коротком замыкании.

При выполнении устройств АПВ соблюдают еще ряд обязательных условий кроме тех, которые указаны выше.

Повреждения, появившиеся на присоединениях, отключенных по режиму, в ремонт и т. п., практически всегда носят устойчивый характер. Автоматическое повторное включение в указанных ситуациях приводило бы к развитию повреждения оборудования, необходимости более частых ревизий выключателей.

Поэтому при автоматическом выключении выключателя, последовавшем сразу же после его оперативного включения дежурным персоналом, пуск АПВ производиться не должен.

Многократные включения выключателя на КЗ могут привести к тяжелым повреждениям выключателя. Недопустимы многократные повторные включения на КЗ и по условиям устойчивости работы энергосистемы. Поэтому схемы АПВ не должны допускать возможности многократных включений на короткое замыкание.

Несмотря на большое разнообразие существующих в настоящее время схем АПВ, определяемое конкретными условиями их установки и эксплуатации, все они должны удовлетворять следующим основным требованиям.

1.2.1. Устройства АПВ должны находиться в состоянии постоянной готовности к действию и срабатывать при всех случаях аварийного отключения выключателя (кроме случаев отключения выключателя релейной защитой после включения его дежурным персоналом).

Они не должны приходить в действие при оперативных отключениях выключателя дежурным персоналом (что обеспечивается пуском устройств от несоответствия положений выключателя и его ключа управления). Устройства АПВ не должны действовать

при отключении выключателя персоналом дистанционно или с помощью телеуправления, при автоматическом отключении выключателя защитой непосредственно после включения его персоналом, при отключении выключателя защитой от внутренних повреждений трансформаторов и вращающихся машин устройствами противоаварийной автоматики, а также в других случаях отключений выключателя, когда действие АПВ недопустимо.

1.2.2. Устройства АПВ должны иметь минимальное возможное время срабатывания для того, чтобы сократить продолжительность перерыва питания потребителей. На практике оно ограничивается рядом условий (готовностью привода выключателя к работе, временем деионизации среды в точке повреждения, временем готовности выключателя). АПВ должно происходить со специально установленной выдержкой времени, выбранной из такого расчета, чтобы обеспечить максимально быстрое восстановление нормального режима работы линии или электроустановки.

1.2.3. Устройства АПВ должны автоматически с заданной выдержкой времени возвращаться в состояние готовности к новому действию после включения в работу выключателя: схема должна автоматически (с некоторой выдержкой) возвратиться в состояние готовности к новому действию.

1.2.4. Устройства АПВ не должны производить многократные включения выключателя на неустранившееся короткое замыкание.

1.2.5. Схемы АПВ должны предусматривать возможность запрета действия АПВ при срабатывании некоторых устройств релейной защиты (например, газовой или дифференциальной защит трансформаторов, действующих при внутренних повреждениях), а также при действии ряда устройств противоаварийной автоматики (частотная разгрузка, автоматика отделения местных электростанций).

Кроме выполнения указанных выше основных требований в устройствах АПВ должны быть предусмотрены цепи ускорения действия релейной защиты, а также переключающие устройства, обеспечивающие ввод устройств в работу и вывод их из работы оперативным персоналом.

1.2.6. При применении АПВ необходимо предусматривать ускорение действия защиты на случай неуспешного АПВ. Ускорение действия защиты после включения выключателя устройствами АПВ выполняют с помощью устройства ускорения, которое используют и при включении выключателя другими способами (ключом управления, с помощью телеуправления или устройства автоматического включения резерва).

1.2.7. Устройства трехфазного АПВ (ТАПВ) необходимо выполнять с пуском, происходящим в результате несоответствия между ранее поданной оперативной командой и отключенным положением выключателя (допускается также пуск устройства АПВ от защиты).

Устройства АПВ предусматривают на выключателях всех воздушных и кабельно-воздушных линий электропередачи, сборных шин подстанций, если эти шины не являются элементом комплектного или закрытого распределительного устройства (КРУ или ЗРУ), понижающих трансформаторов однострансформаторных главных понизительных подстанций (ГПП). Эффективно сочетание АПВ линий электропередачи с неселективными быстродействующими защитами линий и устройствами автоматической частотной разгрузки (АЧР).

Автоматическое повторное включение выключателя должно осуществляться после неоперативного отключения выключателя (за исключением случаев отключения в результате срабатывания РЗ присоединения, на котором установлено устройство АПВ), непосредственно после включения выключателя оперативным персоналом или средствами телеуправления, после действия защит от внутренних повреждений трансформаторов или устройств противоаварийной системной автоматики.

Время действия устройства АПВ  $t_{АПВ}$  должно быть не меньше времени, необходимого для полной деионизации среды в месте КЗ и подготовки привода выключателя к повторному включению. Оно должно быть согласовано с временем работы других устройств автоматики и защиты, учитывать возможности источников оперативного тока для питания электромагнитов включения выключателей,

одновременно включаемых от устройства АПВ. Характеристики выходного импульса устройства АПВ должны обеспечивать надежное одно- или двукратное (в зависимости от требований) включение выключателя. Устройства АПВ должны допускать блокирование их действия во всех необходимых случаях.

### 1.3. Классификация устройств АПВ

В настоящее время находят применение различные типы и схемы АПВ. Их классифицируют по следующим признакам.

#### 1.3.1. По количеству циклов (кратности действия включения).

АПВ делят на одно-, двух- и трехкратные. Они могут до двух и трех раз делать попытки включить отключившуюся линию с целью восстановления электроснабжения.

Успешность устройств АПВ однократного действия составляет 60...80 %, а АПВ двукратного действия (второго повторного включения) – 10...15 %. Первое АПВ успешно для кабельных линий в 45...55 % случаев, а для оборудования – в 65...75 %. Заметим, что однократные АПВ более просты и эффективны и применяются на практике в большинстве случаев.

Трехкратные АПВ применяются на одиночных тупиковых линиях весьма редко ввиду их низкой эффективности (успешность третьего повторного включения составляет 1,5...3 %) и значительных затрат на ремонт выключателей. Третье повторное включение (после неуспешного действия второго цикла АПВ) производится через интервал 1...2 минуты после возникновения короткого замыкания (КЗ).

#### 1.3.2. По способу воздействия на привод выключателя.

АПВ делят на механические и электрические.

Механические АПВ встраиваются в пружинный или грузовой привод выключателя. На практике в настоящее время они не находят применения.

Механические АПВ не требуют оперативного тока и действуют при срабатывании встроенных в привод реле прямого действия. Они включают отключившийся выключатель без выдержки време-

ни за счет использования механической энергии предварительно заведенной пружины или поднятого груза. Низкая надежность является их большим недостатком.

Электрические АПВ воздействуют на электромагнит включения выключателя (с заданной выдержкой времени). Они являются более надежными и широко применяются на практике.

*1.3.3. По числу фаз выключателей, на которые воздействует защита и АПВ.*

АПВ делят на трехфазные (ТАПВ), однофазные (ОАПВ) и комбинированные.

Однофазные АПВ применяются только в сетях с глухозаземленной нейтралью 110 кВ и выше, в которых доля однофазных коротких замыканий составляет 70...90 % от общего числа коротких замыканий. При этом для ликвидации неустойчивого повреждения на линии достаточно отключить только одну поврежденную фазу с последующим ее повторным включением.

Трехфазные АПВ применяются для одновременного включения трех фаз выключателя после отключения его релейной защитой.

Комбинированные АПВ применяются для включения одной фазы при однофазных КЗ и включения трех фаз при трехфазных КЗ.

*1.3.4. По виду включаемого оборудования.*

АПВ делят на: АПВ линий, АПВ трансформаторов, АПВ электродвигателей (в том числе для группы электродвигателей), АПВ шин.

*1.3.5. По времени действия АПВ делят на:* быстродействующие АПВ (БАПВ), обеспечивающие бестоковую паузу 0,5 с и менее; нормальные – с бестоковой паузой более 0,5 с.

*1.3.6. По способу контроля в цепях пуска АПВ.*

По способам контроля, определяемым условиями устойчивости параллельной работы генераторов и СД энергосистем, а также условиями допустимой кратности токов несинхронного включения оборудования, устройства трехфазных АПВ подразделяются на следующие типы:

– без проверки синхронизма и контроля напряжения (тока), когда нарушение синхронизма исключено, – простое ТАПВ;

- без проверки синхронизма в условиях, когда расчетом подтверждена допустимость несинхронных включений, – несинхронное ТАПВ (НАПВ);

- без проверки синхронизма при наличии быстродействующих выключателей и быстродействующей РЗ в условиях, когда разделившиеся части энергосистемы не успевают перейти на несинхронную работу, – быстродействующее ТАПВ (БАПВ);

- с проверкой наличия напряжения (АПВНН) на включаемом под нагрузку оборудовании, например, линии;

- с проверкой отсутствия напряжения (АПВОН) на линии – применяется, в частности, в распределительных сетях на линиях с выделенной нагрузкой;

- с ожиданием синхронизма (АПВОС);

- с улавливанием синхронизма (АПВУС);

- в сочетании с самосинхронизацией генераторов и синхронных компенсаторов (АПВС).

1.3.7. *По способу сочетания АПВ с устройствами релейной защиты и различных видов автоматики.* Под способами сочетания АПВ с устройствами РЗ понимают:

- ускорение действия РЗ при АПВ;

- поочередное действие устройств АПВ, установленных на разных (обычно последовательно включенных) линиях;

- АПВ после АЧР;

- использование неселективной отсечки в сочетании с АПВ для снижения токов КЗ;

- сочетание АПВ с АВР;

- сочетание АПВ с действием автоматических секционирующих отделителей и ряд других способов взаимодействия АПВ с РЗ и другими автоматическими устройствами, повышающими надежность работы энергосистем.

1.3.8. *По виду оперативного тока.*

На подстанциях с постоянным оперативным током энергия, необходимая для работы реле, входящих в схему АПВ, поступает от аккумуляторной батареи. При переменном оперативном токе в качестве источников энергии используются трансформаторы соб-

ственных нужд, трансформаторы тока и напряжения. Это обуславливает особенности построения схем АПВ, конструктивных параметров реле, применение специальных блоков питания и др.

Длительный опыт эксплуатации устройств АПВ в энергосистемах России позволил свести большое разнообразие схем и конструкций, применявшихся на начальных этапах, к ряду унифицированных решений, обеспечивших внедрение типового проектирования и промышленного выпуска унифицированных панелей АПВ, готовых к установке, наладке и включению в эксплуатацию.

Одной из важнейших характеристик устройства АПВ является время его действия  $t_{АПВ}$ , под которым принимается время с момента пуска устройства АПВ до момента подачи импульса на включение выключателя. Это время должно быть достаточным, чтобы выключатель после отключения участка с КЗ был готов для повторного включения.

Время действия устройства АПВ не надо смешивать с временем АПВ, которое складывается из времени действия устройства АПВ и времени действия выключателя от момента получения команды на включение до момента соприкосновения токоведущих контактов.

На практике наиболее часто используют следующие виды АПВ: несинхронное АПВ и АПВ с улавливанием синхронизма.

*Несинхронное АПВ (НАПВ)* является наиболее простым устройством, допускающим включение разделившихся частей энергосистемы независимо от разности их напряжений.

*АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС)* применяют на одиночных транзитных линиях, а также на транзитных линиях, имеющих шунтирующие связи недостаточной пропускной способности, если применение НАПВ или БАПВ невозможно.

*Пуск устройства АПВ осуществляется:*

– при несоответствии положения неоперативно (аварийно) отключившегося выключателя и зафиксированного ранее его включенного положения (в качестве фиксирующего устройства может быть использован ключ управления с соответствующим образом

подобранными вспомогательными контактами или двухпозиционными реле);

– от релейной защиты (этот способ менее универсален, более сложен и применяется реже, например, в схемах АПВ шин напряжением 6...35 кВ).

Для выполнения наиболее распространенного в системах электроснабжения однократного АПВ используют комплектные реле повторного включения однократного действия (РПВ-58, РПВ-358, РПВ-01). Для построения схемы АПВ двукратного действия используются комплектные устройства типа РПВ-02 (РПВ-258 – для линий с масляными выключателями).

Минимальное время срабатывания устройства АПВ составляет обычно 0,5...0,7 с. Время готовности АПВ (исходя из опыта эксплуатации) должно составлять 20...25 с.

В конкретных условиях могут применяться различные устройства АПВ, выбор наиболее рационального варианта является задачей инженерного проектирования. Преимущество следует отдавать устройствам, обеспечивающим наибольшую надежность действия, простоту исполнения и эксплуатации.

Работу устройств АПВ следует увязывать с работой устройств РЗ, устанавливаемой на объектах. В частности, при наличии на подстанции дифференциальной защиты шин следует рассмотреть вопрос о выполнении АПВ шин с предварительным их опробованием напряжением от одной какой-либо линии электропередачи и последующим автоматическим восстановлением конфигурации сети при исправном состоянии шин.

#### 1.4. Релейно-контактное устройство АПВ однократного действия

Схемы устройств АПВ однократного действия могут выполняться на постоянном (РПВ-58, РПВ-01), выпрямленном (РПВ-358) и переменном оперативном токе.

В состав типового реле РПВ входят основные элементы:

– реле времени ( $KT$ ), формирующее выдержку времени  $t_{АПВ1}$

(от момента пуска АПВ до момента замыкания контакта в устройстве включения выключателя);

- промежуточное реле ( $KL1$ ) с двумя обмотками (последовательной и параллельной), управляющее цепью включения выключателя.

Кроме основных в реле РПВ входят следующие дополнительные элементы:

- ограничивающий резистор ( $R1$ ), обеспечивающий термическую стойкость реле времени;

- конденсатор  $C$  (20 мкФ), который разряжается на параллельную обмотку реле ( $KL1$ ) и приводит к срабатыванию этого реле, а также обеспечивает однократность действия УАПВ;

- зарядный резистор ( $R2$ ), формирующий постоянную времени заряда конденсатора  $C$  и определяющий скорость его заряда;

- разрядный резистор  $R3$ , формирующий постоянную времени разряда конденсатора  $C$  и определяющий скорость его разряда.

В схеме управления АПВ имеются также следующие элементы:

- пусковое промежуточное реле ( $KL2$ ), обеспечивающее ускорение защиты;

- указательное реле  $KH$  и накладка  $SX$  для включения и отключения АПВ;

- ключ  $SA$  для управления состоянием выключателя (с фиксацией положения последней операции);

- промежуточное реле  $KQC$  положения выключателя «Включено» для фиксации положения выключателя;

- промежуточное реле  $KQT$  положения выключателя «Отключено» для фиксации положения выключателя;

- промежуточное двухобмоточное реле блокировки  $KBS$ , предназначенное для предотвращения многократных включений выключателя при неисправностях в оперативных цепях (например, при сваривании контактов промежуточного реле).

Рассмотрим принципиальную схему устройства электрического однократного АПВ линии с масляным выключателем и автоматическим возвратом, приведенную на рис. 1.

Она представлена в типовом варианте, указанном выше. В этой схеме дистанционное управление выключателем  $Q$  производится ключом  $SA$ , у которого предусмотрена фиксация положения последней операции.

В нормальном состоянии линии выключатель  $Q$  включен, ключ  $SA$  после операции включения находится в положении «Включено»  $B2$  (после операции отключения он будет находиться в положении «Отключено»  $O2$ ). К конденсатору  $C$  через контакты ключа  $SA$  подводится «плюс» оперативного напряжения, а «минус» – через замкнутые контакты  $KQC.1$  промежуточного реле  $KQC$  положения выключателя «Включено» и резистор  $R2$ . При этом конденсатор  $C$  заряжен, и схема АПВ находится в состоянии готовности к действию.

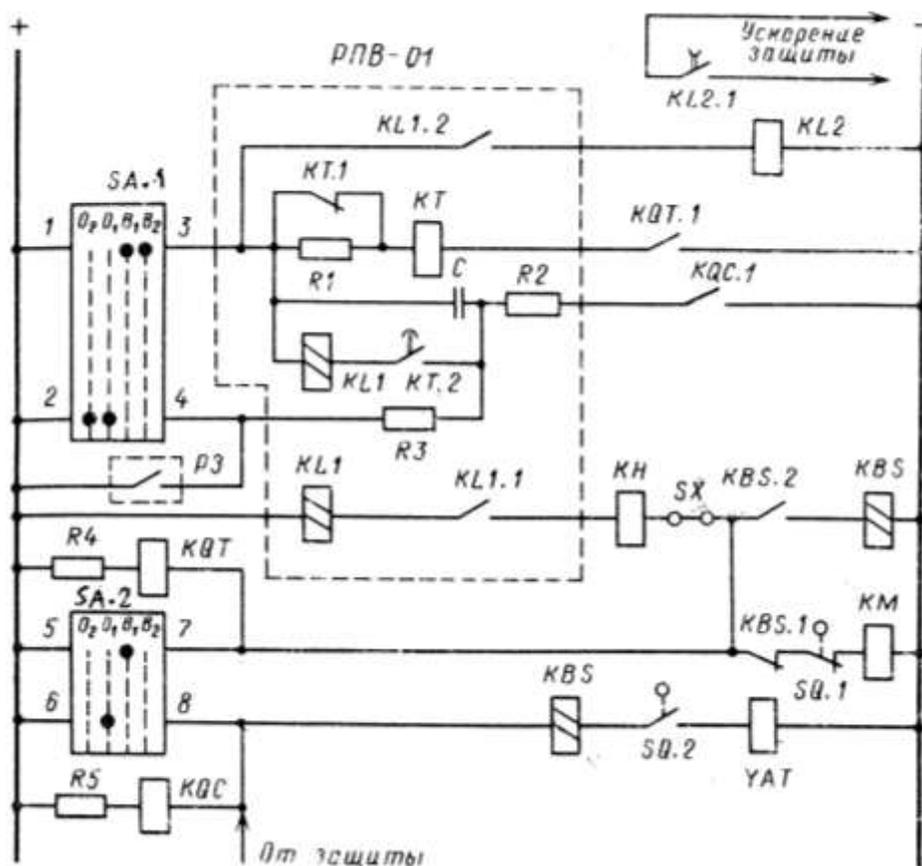


Рис. 1. Схема электрического АПВ однократного действия для линии с масляным выключателем

Промежуточное реле  $KQT$  положения выключателя «Отключено», осуществляющее контроль исправности цепей включения, обесточено (так как контакты  $SQ.1$  включенного выключателя  $Q$  разомкнуты) и его контакты  $KQT.1$  в цепи пуска АПВ (реле  $KT$ ) разомкнуты. Заметим, что контакты  $SQ.2$  выключателя в цепи питания электромагнита отключения выключателя замкнуты.

При срабатывании релейной защиты «плюс» оперативного напряжения через замкнутые контакты  $SQ.2$  выключателя подводится к электромагниту отключения выключателя  $YAT$ , который срабатывает и выключает выключатель  $Q$ . В результате размыкаются контакты  $SQ.2$ , замыкаются контакты  $SQ.1$  и возникает несоответствие между положением ключа (которое не изменилось) и положением выключателя (который теперь отключен).

Несоответствие положений ключа управления и выключателя проявляется в том, что через контакты ключа управления на схему АПВ по-прежнему подается «плюс» оперативного напряжения, а ранее разомкнутые вспомогательные контакты выключателя  $SQ.1$  переключились и замкнули цепь обмотки реле  $KQT$ , которое, срабатывая, подает «минус» на обмотку реле времени  $KT$ . Вследствие этого несоответствия происходит пуск схемы АПВ (реле времени). Заметим, что цепь питания реле  $KQT$  замыкается через достаточно большое сопротивление  $R4$ , и величина протекающего в этой цепи тока в данном случае недостаточна для срабатывания контактора  $KM$ .

Реле времени срабатывает, размыкаются его мгновенные контакты  $KT.1$ . При этом в цепь питания обмотки этого реле включается дополнительное сопротивление (резистор  $R1$ ). Это приводит к уменьшению тока в обмотке реле, и тем самым обеспечивается его термическая стойкость при длительном прохождении тока.

По истечении установленной на реле  $KT$  выдержки времени замыкаются (с задержкой на срабатывание) контакты  $KT.2$ , которые подключают параллельную обмотку реле  $KL1$  к предварительно заряженному конденсатору  $C$ .

В результате это реле срабатывает (от тока разряда конденсатора), замыкает свои контакты  $KL1.1$  и, тем самым, замыкает цепь

питания контактора  $KM$ , формирующего команду на включение выключателя на реле  $KT$ .

Наличие у реле  $KL1$  второй обмотки, последовательно включенной с обмоткой контактора  $KM$  электромагнита включения выключателя  $YAC$ , обеспечивает самоудержание этого реле и формирование импульса достаточной длительности для надежного включения выключателя  $Q$ , так как параллельная обмотка этого реле обтекается током кратковременно при разряде конденсатора.

*При успешном действии АПВ* (если повреждение на линии было неустойчивым) выключатель включается и линия остается в работе. При этом размыкаются его вспомогательные контакты  $SQ.1$  и в исходное положение (состояние) возвращаются реле  $KQT$ ,  $KL1$  и  $KT$ .

После размыкания контактов реле времени  $KT.2$  конденсатор  $C$  начнет заряжаться через зарядный резистор  $R2$ . Сопротивление этого резистора выбирается таким, чтобы время заряда составляло 20...25 с. Таким образом, спустя указанное время схема АПВ будет автоматически подготовлена к новому действию.

*При неуспешном действии АПВ* (если повреждение было устойчивым) выключатель  $Q$ , включившись, вновь отключится релейной защитой и вновь сработают реле  $KQT$  и  $KT$ . Однако, реле  $KL1$  при этом второй раз не сможет сработать, так как конденсатор  $C$  разряжается при первом действии АПВ и повторно зарядиться не успевает. Таким образом, рассмотренная схема обеспечивает однократное действие при устойчивом КЗ на линии.

При оперативном отключении выключателя ключом управления  $SA$  несоответствия между положением ключа управления и выключателя не возникает, и АПВ не действует, так как одновременно с подачей импульса на отключение выключателя контактами ключа 6, 8 размыкаются контакты 1, 3. При этом отключается «плюс» оперативного напряжения со схемы АПВ. Поэтому срабатывает только реле  $KQT$ , а реле  $KT$  и  $KL1$  не сработают. Одновременно со снятием оперативного напряжения контактами 1, 3 ключа  $SA$  замыкаются его контакты 2, 4, и конденсатор  $C$  разряжается через резистор  $R3$ . В результате падение напряжения на нем резко снижается, а затем

он полностью разряжается по цепи: резистор  $R_2$ , контакты  $KT.1$ , обмотка реле времени  $KT$ , контакты  $KQT.1$ .

При оперативном включении выключателя ключом управления готовность АПВ к действию наступает после заряда конденсатора  $C$  (через 20...25 с). Поэтому при оперативном включении выключателя отключать АПВ не требуется.

При отключении линии релейной защитой в случаях, когда действие АПВ не требуется, через резистор  $R_3$  производится разряд конденсатора  $C$ .

Для предотвращения многократного включения выключателя на устойчивое КЗ (что могло бы иметь место в случае залипания контактов реле  $KL1$  в замкнутом состоянии) в схеме управления устанавливается специальное промежуточное реле блокировки  $KBS$  типа (РП-232), имеющее две обмотки (рабочую – последовательную и удерживающую – параллельную). Оно срабатывает при прохождении тока по катушке электромагнита отключения выключателя  $УАТ$  и удерживается в сработавшем положении до снятия команды на включение. При этом цепь питания обмотки контактора  $KM$  (включения электромагнита выключателя) размыкается контактом  $KBS.1$ , предотвращая при этом включение выключателя.

Заметим, что на практике находят применение электрические АПВ однократного действия для масляных выключателей, схема управления которых выполняется с использованием ключа управления без фиксации своего положения. В ней дополнительно устанавливается двухпозиционное промежуточное реле фиксации положения выключателя  $KQQ$ . Такая схема строится и работает аналогично рассмотренной и может применяться на подстанциях как с телеуправлением, так и без него.

На практике также широко применяются воздушные выключатели. Нормальная работа их обеспечивается при выполнении условия, что сжатый воздух в их резервуарах находится под определенном давлением. Поэтому в процессе эксплуатации таких выключателей требуется осуществлять контроль за давлением сжатого воздуха и блокировку цепей управления при снижении давления до недопустимого значения.

Необходимый запас сжатого воздуха и его давление должны обеспечиваться также и в цикле неуспешного АПВ (для сохранения номинальной мощности отключения). Контроль за давлением сжатого воздуха и блокировка цепей управления выключателем производится с помощью электроконтактных манометров, настроенных на соответствующие уставки. Поэтому АПВ для воздушных выключателей имеют особенности построения, связанные в первую очередь с наличием в схеме АПВ дополнительных контактов реле *KLP* – повторителя положения контакта манометра. В остальном схемы построения таких АПВ аналогичны.

### 1.5. Особенности построения устройств АПВ двукратного действия

Применение двукратного АПВ позволяет повысить эффективность действия автоматики. Успешность действия АПВ при втором включении составляет 10...20 %, что повышает общий процент успешности АПВ до 75...95 %. Двукратное АПВ применяют, как правило, на линиях с односторонним питанием на головных участках кольцевой сети, где возможна работа в режиме одностороннего питания.

В АПВ двукратного действия применяют комплектное устройство типа РПВ-02 (РПВ-258) для линий с масляными выключателями. В отличие от устройства РПВ-01 (РПВ-58), рассмотренного выше, в нем имеется два конденсатора (*C1* и *C2*) и реле времени (*KT*) с тремя или двумя контактами.

Пуск схемы этого АПВ осуществляется так же, как и схемы однократного АПВ (контактом *KQT.1* реле *KQT*), которое срабатывает при отключении выключателя.

Проскальзывающий контакт реле времени замыкается через заданную выдержку времени и создает цепь для разряда конденсатора *C1* на обмотку промежуточного реле *KLI*, которое, сработав, включает выключатель.

В случае успешного АПВ работа схемы прекращается. Если же АПВ было неуспешным (выключатель опять отключился), то

вновь срабатывает реле *KQT* и запускается реле времени *KT*. В этом случае при замыкании контактов реле времени (*KT.2*) промежуточное реле *KL1* не сработает, так как конденсатор *C1* к этому времени не успеет зарядиться. Реле времени, продолжая работать, замкнет контакты *KT.3*. При этом под действием разряда конденсатора *C2* вновь сработает реле *KL1* и произойдет второй цикл АПВ.

Выдержка времени первого цикла АПВ определяется так же, как и для АПВ однократного действия. Второй цикл должен происходить спустя 10...20 с после вторичного отключения выключателя. Такая большая выдержка АПВ во втором цикле диктуется необходимостью подготовки выключателя к отключению третьего КЗ в случае включения на устойчивое повреждение.

В комплекте РПВ-02 (РПВ-258) время готовности к последующим действиям схемы АПВ после второго цикла составляет 60...100 с.

### 1.6. Ускорение действия релейной защиты при АПВ

Автоматическое повторное включение при наличии устойчивого КЗ на линии, не имеющей быстродействующей защиты, существенно утяжеляет послеаварийный режим энергосистемы, увеличивает размеры повреждения оборудования и ущерб потребителю по сравнению со случаями АПВ на линиях, оснащенных быстродействующими защитами. Поэтому получило широкое распространение ускорение действия защит при АПВ. При этом по условиям повышения надежности электроснабжения ускорение защит, имеющих выдержки времени, осуществляется и на тех линиях, для которых в качестве основных используются быстродействующие защиты.

Автоматическое ускорение действия релейной защиты при АПВ применяется для ускорения ликвидации КЗ и повышения надежности работы энергосистемы и потребителей.

В настоящее время применяются два основных вида ускорения действия устройств релейной защиты: после АПВ и до АПВ.

Обязательным условием для АПВ почти всех типов является ускорение действия релейной защиты после АПВ. Оно может выполняться двумя основными способами. У защит с независимой характеристикой предусматриваются две выдержки времени: одна работает во всех режимах и согласована с выдержками времени смежных защит (селективная), вторая (меньшая, чем первая) вводится в действие на небольшое время при работе АПВ. Так, например, ускоряются вторые ступени дистанционных и токовых защит. Основным требованием к ускорению действия защиты является охват ею всей линии с необходимой чувствительностью. Выдержка времени этих защит обычно принимается около 0,3...0,5 с для обеспечения селективности со смежными мгновенными защитами.

#### 1.6.1. Ускорение защиты после АПВ

Ускорение защиты после АПВ предусматривается в качестве меры повышения надежности защиты линии в целом (как правило, на всех линиях).

Ускорение защиты после АПВ применяют на участках сети, имеющих несколько ступеней избирательной защиты, так как вывод из действия выдержки времени (уменьшение выдержки времени защиты) может привести к ложному срабатыванию защиты. Отключение выключателя после неуспешного АПВ производится мгновенно, для чего к этому моменту выдержка времени МТЗ автоматически выводится из действия.

На рис. 2, а показана схема максимальной токовой защиты, ускоряемой после АПВ (за счет использования мгновенных контактов  $KT1.1$  реле времени  $KT$ ).

Цепь ускоренного действия нормально разомкнута контактами ( $KL1.2$ , см. рис. 1) промежуточного реле ускорения  $KL$ , которое срабатывает перед повторным включением выключателя. Оно имеет замедление на возврат (удерживает свои контакты замкнутыми в течение 0,7...1 с). Поэтому если повторное включение происходит на устойчивое КЗ, то защита второй раз подействует без выдержки времени по цепи ускорения через контакты ( $KL2.1$ , см. рис. 2, а) реле  $KL$ . В качестве реле ускорения обычно используется реле типа РП18-1 (РП-252).

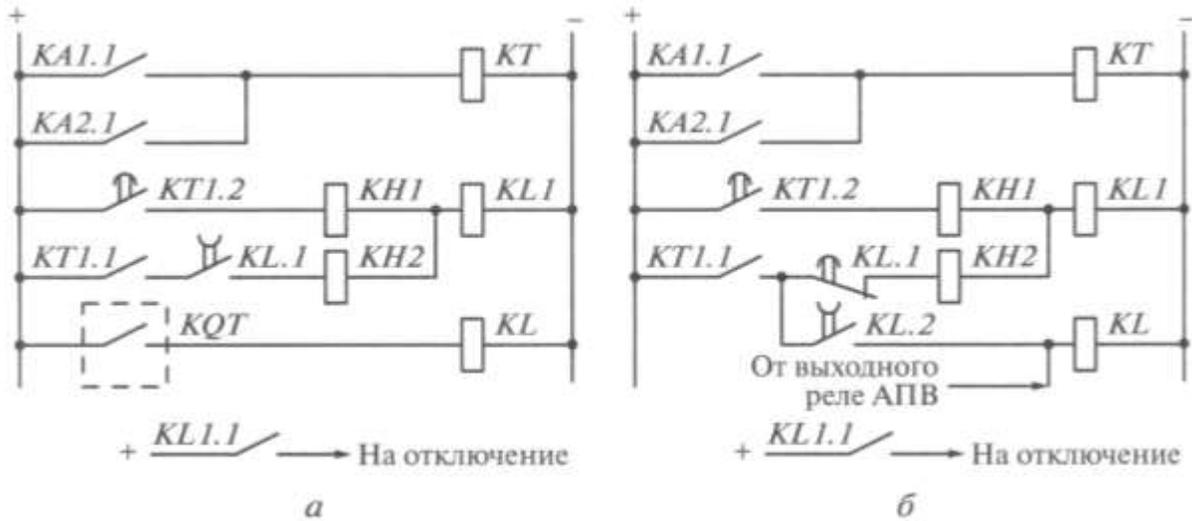


Рис. 2. Схемы ускорения защиты в цикле АПВ: а – после АПВ; б – до АПВ

Для запуска промежуточного реле ускорения  $KL$  используются контакты реле  $KQT$  положения «Отключено» выключателя.

Реле  $KL$ , сработав после отключения выключателя селективной защитой, замыкает своими контактами  $KL.1$  цепь ускорения. При подаче команды на включение реле  $KQT$  возвращается в исходное положение не сразу, а с замедлением 0,7...1,0 с. Поэтому «плюс» оперативного напряжения с обмотки реле ускорения  $KL$  снимается через время, достаточное для срабатывания защиты по цепи ускорения в цикле неуспешного АПВ. Для ускорения защиты в рассмотренном случае могут быть непосредственно использованы контакты реле положения  $KQT$ . При этом специальное реле  $KL$  не устанавливается, а в качестве реле  $KQT$  применяется реле РП-252, имеющее замедление на возврат.

### 1.6.2. Ускорение защиты до АПВ

Ускорение защиты до АПВ сокращает до минимума время протекания тока КЗ. Благодаря этому уменьшаются вызываемые током КЗ разрушения и увеличивается вероятность успешного АПВ. Суть его заключается в том, что выдержка времени МТЗ выводится из действия, и первое отключение выключателя производится мгновенно.

венно. Второе отключение выключателя после неуспешного АПВ выполняется избирательно с выдержкой времени, которая к этому моменту автоматически вводится в действие.

Цепи ускорения защиты до АПВ выполняются аналогично цепям ускорения после АПВ. Пуск реле  $KL$  для ускорения защиты до АПВ осуществляется при срабатывании выходного реле АПВ (рис. 2, б). У реле  $KL$  при этом используются размыкающие контакты. Цепь ускорения будет замкнута до АПВ и разомкнется при действии АПВ на включение выключателя. Реле  $KL$  при этом будет удерживаться в сработавшем положении до тех пор, пока не отключится участок, где произошло КЗ, и не разомкнутся контакты реле защиты.

### 1.7. Выбор уставок однократных АПВ линий

Для обеспечения правильной работы АПВ (линий с односторонним питанием) выдержка времени на повторное включение выключателя и время автоматического возврата схемы АПВ в исходное положение выбираются по следующим условиям.

Выдержка времени АПВ на повторное включение выключателя определяется двумя условиями.

1. Повторное включение отключившегося (например, релейной защитой) выключателя становится возможным после того, как привод установится в положение готовности для включения. Для этого необходимо определенное время, различное для выключателей разных типов. Следовательно, выдержка времени АПВ на повторное включение должна быть больше времени готовности привода, т. е.

$$t_{АПВ1} \geq t_{г.н} + t_{зан}, \quad (1)$$

где  $t_{г.н}$  – время готовности привода, которое может изменяться для приводов разных типов в пределах  $0,2 \dots 1,0$  с;  $t_{зан}$  – время запаса, учитывающее непостоянство времени  $t_{г.н}$  и погрешность реле времени устройства АПВ (принимается равным  $0,3 \dots 0,5$  с).

2. Для успешного повторного включения необходимо, чтобы за время от момента отключения линии до момента повторного включения и подачи напряжения не только погасла электрическая дуга в месте КЗ, но и восстановились изоляционные свойства воздуха. Следовательно, выдержка времени АПВ на повторное включение должна быть больше времени деионизации, т. е.

$$t_{АПВ1} \geq t_{\delta} + t_{зан}, \quad (2)$$

где  $t_{\delta}$  – время деионизации, составляющее 0,1...0,3 с.

Второе условие, как правило, обеспечивается тем, что время включения выключателя больше времени, необходимого для деионизации среды в месте возникновения КЗ.

При выборе уставок АПВ принимается большее из значений  $t_{АПВ1}$ , полученных по формулам (1) и (2).

На практике в некоторых случаях выдержки времени принимают большими, чем определенные по формулам (1) и (2) – около 2...3 с. Это бывает целесообразно для повышения успешности действия АПВ на линиях, где повреждения наиболее часты (вследствие набросов на провода, падений деревьев и касаний проводов передвижными механизмами).

Время автоматического возврата АПВ в исходное положение выбирается из условия обеспечения однократности действия. Для этого при повторном включении в случае наличия устойчивого КЗ возврат АПВ в исходное положение должен происходить только после того, как выключатель, повторно включенный от АПВ, вновь отключится релейной защитой, имеющей наибольшую выдержку времени.

В рассмотренных ранее схемах АПВ с использованием комплектных устройств типа РПВ-58 время возврата схемы в исходное положение должно удовлетворять следующему неравенству:

$$t_{АПВ2} \geq t_{защ} + t_{отк} + t_{зан}, \quad (3)$$

где  $t_{защ}$  – наибольшая выдержка времени защиты;  $t_{отк}$  – время отключения выключателя.

Обычно время заряда конденсатора устройства РПВ-58 составляет 20...25 с, поэтому, как правило, неравенство (3) соблюдается.

В схемах АПВ, возврат которых в исходное положение производит реле времени, запускаемое в момент отключения выключателя, выдержка времени автоматического возврата определяется выражением

$$t_{АПВ2} = t_{АПВ1} + t_{вкл} + t_{защ} + t_{отк} + t_{зан},$$

где  $t_{АПВ1}$  определяется на основании формул (1), (2);  $t_{вкл}$  – наибольшее время включения выключателя.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторная работа проводится на специальном стенде, предназначенном для изучения устройств автоматики. На вертикальной панели левой половины этого стенда приведена схема трансформаторной подстанции (рис. 3), оборудованной устройствами АПВ на выключателях присоединений, и принципиальная схема устройства АПВ (рис. 1). Эти схемы имитируются на лабораторном стенде.

Шины низшего напряжения ТП получают питание от трансформатора  $T1$  через выключатели  $Q1, Q2$ .

Отходящие присоединения (линии  $W1, W2$  и  $W3$ ), оборудованные защитами (МТО, МТЗ) и устройствами автоматики (УАПВ), получают питание от шины низшего напряжения трансформатора через выключатели  $Q6, Q7$  и  $Q8$  соответственно.

Для исследования принципа работы устройства АПВ следует:

- установить нормальный режим работы подстанции (все выключатели включены – работают светодиоды красного цвета);
- выбрать вариант работы УАВР и развития восстановления работоспособности сети после возникновения короткого замыкания;
- искусственно создать (имитировать) короткое замыкание (КЗ) на линии  $W1$ ;
- уяснить взаимодействие УАВР с соответствующими элементами схемы подстанции.

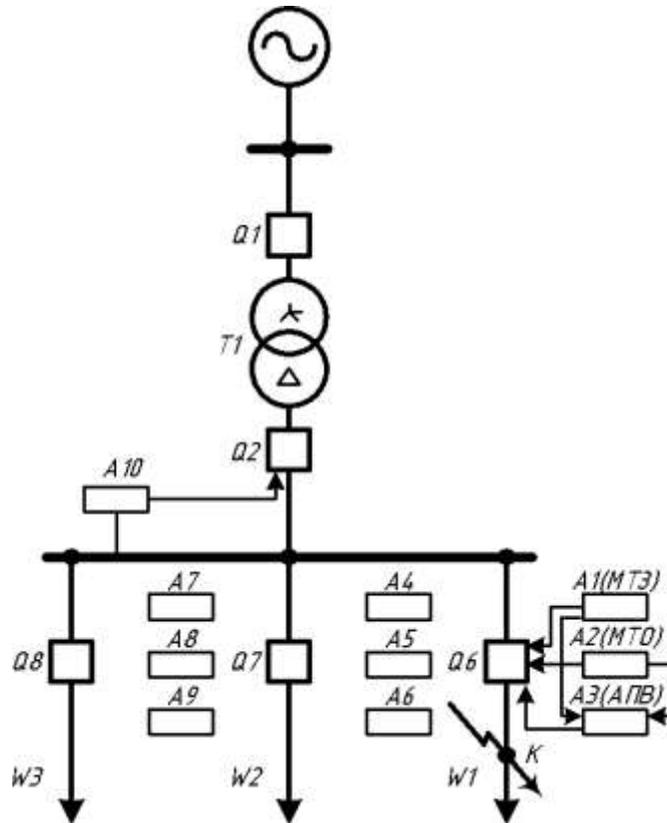


Рис. 3. Структурная схема стенда

При возникновении КЗ на линии  $W1$  выключатель  $Q6$  отключается с помощью соответствующей защиты (МТО или МТЗ) и происходит запуск АПВ. При этом в зависимости от исходных данных (от предварительно выбранного соответствующим переключателем режима КЗ) возможны два варианта (сценария) развития событий:

- при «АПВ успешном» после возникновения КЗ релейная защита (МТО, МТЗ) срабатывает и отключает выключатель  $Q6$ ; КЗ самоустранивается; происходит запуск АПВ и формируется команда на включение выключателя  $Q6$ , который включается и питание линии  $W1$  восстанавливается;

- при «АПВ неуспешном» аналогично включается выключатель  $Q6$ , но КЗ на линии оказывается устойчивым, и выключатель  $Q6$  вновь отключается соответствующей защитой (повторного пуска АПВ не происходит в виду его однократности действия).

Для реализации АПВ на выключателе  $Q6$  в принципиальной схеме стенда использовано реле  $AKS$  типа РПВ-01 (аналог реле РПВ-58, устройство и принцип действия описан в разделе 1.4). Это реле установлено на наклонной панели стенда. На ней размещены также следующие вспомогательные элементы.

Автоматический выключатель (АП-50) для подачи питания на стенд (в левом углу горизонтальной панели).

Тумблер «СЕТЬ» – для подключения (отключения) напряжения к схеме устройства АПВ (лампа с аналогичным названием – для отображения соответствующего состояния схемы).

Ключ управления  $SA$  – для коммутации режима работы АПВ. Он имеет четыре положения  $O1$  – «Отключить»,  $O2$  – «Отключено»,  $B1$  – «Включить»,  $B2$  – «Включено» (из них положения  $B2$  и  $O2$  фиксируются).

Кнопка «КЗ  $W1$ » – для создания искусственного короткого замыкания на отходящей линии  $W1$ .

Переключатель вида КЗ, имеющий два положения: «АПВ успешное» (т. е. КЗ самоустраняющееся), «АПВ неуспешное» (т. е. КЗ установившееся).

Переключатель уставок времени формирования бестоковой паузы АПВ: 0,5 с; 1 с; 2 с.

Реле  $KBS$  (типа РП-16) – промежуточное реле, блокирующее выключатель  $Q6$  от многократных включений. Реле  $KQT$  (типа РП-252) – промежуточное реле, фиксирующее отключенное состояние выключателя  $Q6$ . Реле  $KQC$  (типа РП-18) – промежуточное реле, фиксирующее включенное состояние выключателя  $Q6$ . Реле указательное  $KH$  – для фиксации факта срабатывания АПВ.

Для проведения лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия.

1. Подать питание на стенд (включить автоматический выключатель). Убедиться в том, что элементы подстанции работают в нормальном режиме (работают красные светодиоды на всех выключателях, зеленые светодиоды включаются при отключении соответствующего элемента схемы).

2. Подать питание на устройство АПВ (переключатель «СЕТЬ» поставить в положение «ВКЛ»). Загорается красная лампочка с аналогичным названием; срабатывает реле *KQC*, фиксирующее факт включенного состояния выключателя *Q6*.

3. Произвести ручную включение выключателя *Q6* (установить ключ управления *SA* в положение *B2*).

4. Подготовить вариант успешного срабатывания АПВ (установить переключатель вида *K3* в положение «АПВ успешное»).

5. Выбрать уставку по времени срабатывания АПВ (0,5 с).

6. Создать искусственное самоустраняющееся *K3* на отходящей линии *W1* (нажать кнопку «*K3 W1*»).

7. Зафиксировать срабатывание выключателя *Q6* и устройства АПВ (реле РПВ-01 и других элементов схемы). Объяснить работу АПВ в данном режиме в течение всего цикла.

8. Выдержать необходимое время заряда конденсатора *C* (20...30 с) для проведения следующего опыта запуска УАПВ.

9. Подготовить вариант неуспешного срабатывания АПВ (установить переключатель вида *K3* в положение «АПВ неуспешное»).

10. Создать искусственное устойчивое *K3* на отходящей линии *W1* (нажать кнопку «*K3 W1*»).

11. Зафиксировать действия выключателя *Q6* и устройства АПВ (реле РПВ-01 и других элементов схемы). Объяснить работу АПВ в данном режиме в течение всего цикла и отсутствие многократности его действия.

12. Отключить стенд от сети.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Уяснить основные теоретические положения и кратко законспектировать их.

2. Ознакомиться со стендом, на котором проводится лабораторная работа.

3. Уяснить принцип работы устройства АПВ (по принципиальной схеме).

4. Выполнить действия, указанные в методических указаниях.
5. Подготовить отчет по лабораторной работе.

#### **4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ**

1. Назначение устройств АПВ.
2. Требования, предъявляемые к устройствам АПВ.
3. Классификация АПВ (по заданному критерию).
4. Работа схемы устройства АПВ линии с односторонним питанием.
5. Работа схемы ускорения защиты в цикле АПВ (после АПВ и до АПВ).
6. Успешное действие АПВ.
7. Способы пуска АПВ.
8. Неуспешное действие АПВ.
9. Выдержка времени срабатывания устройства АПВ (на повторное включение).
10. Время готовности привода коммутационного аппарата.
11. Время деионизации среды.
12. Время автоматического возврата АПВ.
13. Особенности построения многократных АПВ.
14. Типы ускорений действия релейной защиты при АПВ и их сущность.

#### **5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

В отчете по лабораторной работе следует представить следующие основные компоненты.

1. Краткое описание основных теоретических положений.
2. Принципиальная схема АПВ и порядок ее работы.
3. Расчет параметров АПВ.
4. Выводы по результатам опытов и расчетов.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА**

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

Целью работы является изучение принципов построения и особенностей реализации устройств автоматического включения резерва.

### **1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1.1. Назначение и принцип работы устройств автоматического включения резерва

В современных системах электроснабжения используется, как правило, несколько (два и более) источника питания, которые работают по разомкнутой схеме. При этом все источники включены, и каждый из них обеспечивает питание выделенных потребителей, но они не связаны между собой. Такие сети имеют ряд преимуществ перед замкнутыми сетями, но имеют низкую надежность электроснабжения, так как отключение единственного источника питания приводит к прекращению питания всех его потребителей.

В таких сетях эффективно работают устройства автоматического включения резерва (УАВР), предназначенные для автоматического восстановления питания потребителей первой (второй) категории путем переключения их на резервные источники питания, т. е. для автоматической замены отключенных по тем или иным причинам (в результате аварийного повреждения или вследствие самопроизвольного отключения) рабочих источников резервными.

УАВР устанавливают на подстанциях или распределительных пунктах, в которых предусмотрены два источника питания, работающих в нормальном режиме раздельно.

АВР обеспечивают поддержание высокой степени надежности электроснабжения потребителей, питающихся одновременно от двух и более источников (линий, трансформаторов), при аварийном отключении одного из них за счет автоматического подключения этих

потребителей к другому источнику питания. Успешность действия АВР составляет 90...95 %.

Одним из основных требований, предъявляемых потребителями электрической энергии, является требование надежности электроснабжения. Подключение потребителей к одному источнику питания через одиночную линию этой надежности не обеспечивает. В случае выхода из строя генератора или линии электроснабжение прекращается. Это приводит к нарушению нормального режима работы потребителей и сопровождается большим материальным ущербом.

Надежность питания может быть повышена за счет резервирования как источника питания, так и линии. Основные типовые схемы резервирования показаны на рис. 1. В схеме на рис. 1, а питание потребителей в нормальном режиме осуществляется от генератора *A* через рабочую линию *WI*. Линия *WII* является резервной: она находится под напряжением (выключатель *Q3* включен), но ток по ней не проходит (выключатель *Q4* отключен).

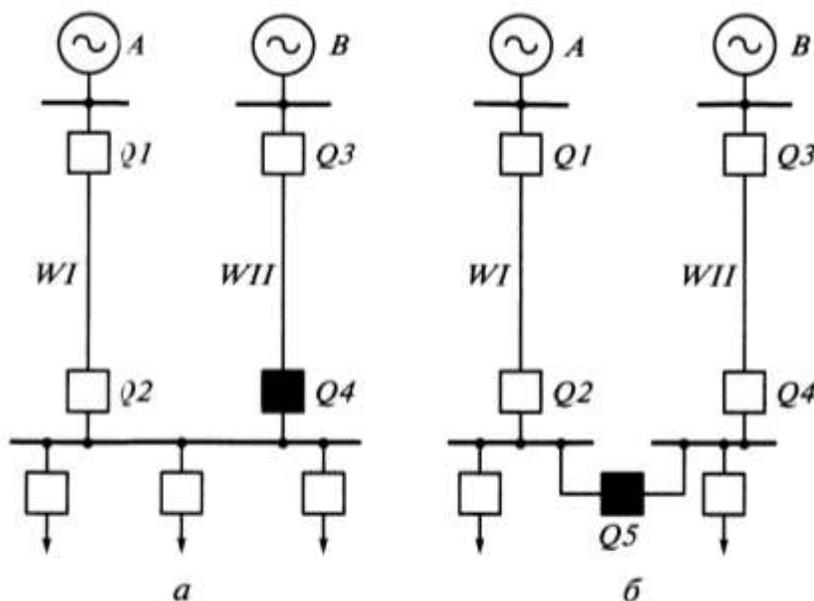


Рис. 1. Схемы резервирования линий: а – в явном виде; б – в неявном виде

При выходе из строя рабочей линии  $WI$  питание потребителей переводится на резервную. Для этого поврежденная рабочая линия отключается, а выключатель  $Q4$  на резервной линии включается. Перерыв в питании получается незначительным (вполне допустимым для многих потребителей).

В рассмотренной схеме резерв рабочей линии представлен в явном виде, т. е. в нормальном режиме резервная линия не работает.

В схеме на рис. 1, б резервирование выполнено в неявном виде.

Здесь обе линии являются рабочими. В нормальном режиме выключатель  $Q5$  отключен, так как каждая линия обеспечивает питание потребителей, подключенных к соответствующей секции.

При коротком замыкании на одной линии, например первой, она отключается. После этого включается выключатель  $Q5$ , установленный на перемычке между секциями. В результате такого переключения потребители левой секции начинают получать питание по второй линии. Для того, чтобы оставшаяся в работе вторая линия могла дополнительно обеспечить питанием потребителей левой секции, она должна быть рассчитана на суммарную нагрузку потребителей обеих секций. В таком случае она в нормальном режиме недогружена, т. е. при отключенном выключателе  $Q5$  содержит в себе скрытый (неявный) резерв, который и используется в аварийном режиме.

В обеих схемах потребители, питающиеся в нормальном режиме от источника  $A$ , в аварийном режиме подключаются к источнику  $B$ . Для этого источник  $B$  должен быть рассчитан на дополнительную нагрузку. В нормальном режиме источник  $B$  уже несет определенную нагрузку, так что имеющийся у него резерв для покрытия дополнительной нагрузки является скрытым.

Из приведенных схем видно, что повышение надежности здесь обеспечивается только за счет явного или неявного резерва.

Эффективность введения резерва тем выше, чем меньше перерыв в питании с момента отключения рабочего элемента до момента включения резервного. Быстрое включение резервного элемента возможно только с помощью средств автоматики. Устройства, которые осуществляют такое включение, называются устройствами

автоматического включения резерва (АВР). В современных энергосистемах они получили широкое распространение. В большинстве случаев они действуют успешно, обеспечивая бесперебойное электроснабжение потребителей.

Для большинства электрических сетей характерна отдельная работа линий и трансформаторов. В данном случае шины подстанции разделены на две секции, каждая из которых получает питание по самостоятельной линии. УАВР выполняют при этом на секционном выключателе. При выходе из строя линии или трансформатора они восстанавливают питание технологического оборудования, значительно сокращая его простой, и позволяют упростить и удешевить схемы электроснабжения объектов предприятия.

Автоматическое включение резервного питания или оборудования предусматривают во всех случаях, когда перерыв в электроснабжении вызывает ущерб, значительно превышающий стоимость установки устройства АВР. Устройства АВР применяют для оборудования, которое в нормальном режиме работает, но используется не полностью. Например, наибольшее значение коэффициент полезного действия трансформатор имеет при нагрузке, составляющей 60...80 % от номинальной. При таком значении нагрузки в случае отключения одного рабочего источника второй под действием УАВР принимает на себя всю нагрузку и, перегружаясь (в допустимых пределах), обеспечивает бесперебойное электроснабжение установки.

АВР питания (и оборудования) линий, силовых трансформаторов, генераторов, электродвигателей, электрического освещения, как правило, происходит после их отключения любыми видами защит, а также при ошибочных действиях обслуживающего персонала или самопроизвольном отключении выключателей.

Устройство АВР состоит из пускового органа и узла автоматики включения. Пуск УАВР и подача команды на включение резервного источника производится:

– контактами соответствующего выключателя рабочей цепи (после отключения выключателя происходит немедленное включение резервного источника);

– специальным пусковым органом (если питание потребителей исчезает) и при включенном выключателе на вводе от рабочего источника (так происходит при повреждениях в питающей сети за пределами резервируемого объекта).

Основная задача пускового органа напряжения (ПОН) состоит в отключении выключателя рабочего источника при исчезновении напряжения на линиях потребителей.

Пусковые органы АВР не должны отключать выключатель рабочего источника:

– при повреждениях во вторичных цепях трансформаторов напряжения;

– при внешних КЗ, не приводящих к потере рабочего источника питания, но не вызывающих его отключение, ликвидируемое путем АПВ;

– при отсутствии напряжения на резервном источнике питания.

Однократность действия устройств АВР обеспечивается различными способами. Например, при помощи специального реле однократности действия (РОД), в качестве которого используется промежуточное реле с задержкой на возврат, или в качестве реле (РПВ) положения «Включено» выключателя рабочей цепи.

Для правильной работы устройства АВР необходимо произвести расчет нескольких уставок.

На подстанциях (ПС) и распределительных пунктах (РП) УАВР устанавливаются при наличии в них двух источников питания, которые в нормальном режиме работают раздельно.

Основная задача УАВР заключается в быстром автоматическом переключении на резервное питание потребителей, обесточенных в результате повреждения или самопроизвольного отключения рабочего источника электроснабжения. При этом обеспечиваются минимальные нарушения и потери в технологическом процессе.

Включение резервного источника питания на поврежденную секцию сборных шин КРУ, как правило, не допускается, так как при этом резко возрастает вероятность увеличения объема разрушений, вызванных КЗ, и аварийного снижения напряжения потребителей, электрически связанных с резервным источником.

Действие УАВР не должно приводить к недопустимой перегрузке резервного источника, как в последующем установившемся режиме, так и в процессе самозапуска потерявших питание электродвигателей потребителя.

Схемы устройства АВР должны:

- обеспечивать как можно более раннее выявление отказа рабочего источника питания;
- действовать согласованно с другими устройствами автоматики (АПВ, АЧР) для сведения к минимуму нарушений технологического процесса;
- не допускать, как правило, включение резервного источника при наличии КЗ;
- исключать недопустимое несинхронное включение потерявших питание синхронных электродвигателей на питание от резервного источника;
- не допускать подключение потребителей к резервному источнику, напряжение на котором понижено.

УАВР выполняют на оперативном переменном или постоянном токе. Источниками оперативного переменного тока служат трансформаторы напряжения (собственных нужд) ТН, установленные на рабочем или резервном вводе, либо на шинах подстанции (в зависимости от схемы УАВР).

Для выполнения УАВР используют различные пусковые органы: реле минимального напряжения; реле понижения частоты; комбинированные реле; орган для контроля угла между векторами напряжений рабочего и резервного источников питания; орган для контроля направления активной (реактивной) мощности прямой последовательности на вводе резервируемой секции шин; орган для контроля напряжения обратной последовательности.

## 1.2. Требования, предъявляемые к устройствам АВР

Устройства АВР должны удовлетворять следующим основным требованиям.

1.2.1. Схема АВР должна находиться в постоянной готовности и приходить в действие при исчезновении напряжения на шинах потребителя (от рабочего источника) по любой причине (в том числе при аварийном, ошибочном или самопроизвольном отключении выключателей рабочего источника питания), а также при исчезновении напряжения на шинах, от которых производится питание рабочего источника.

1.2.2. Иметь минимально возможное время срабатывания  $t_{ABP1}$  (для уменьшения длительности перерыва питания потребителей и обеспечения самозапуска электродвигателей). Включение резервного источника питания должно производиться сразу же после отключения рабочего источника.

1.2.3. Действие АВР должно быть однократным (для предотвращения многократного включения резервного источника на устойчивое КЗ).

1.2.4. Схема АВР должна дополняться специальным пусковым органом минимального напряжения (чтобы АВР действовало при исчезновении напряжения на шинах, питающих рабочий источник), когда выключатель рабочего источника остается включенным.

1.2.5. Для ускорения отключения резервного источника (при включении его на неустранившееся КЗ) должно предусматриваться ускорение защиты резервного источника после АВР. Включенный от УАВР выключатель должен иметь защиту, действующую с ускорением после АВР. Такое ускорение необходимо для отключения секционного выключателя, если он будет включен на устойчивое КЗ (например, на резервируемой секции шин).

Если произошло успешное действие АВР, но резервный источник питания перегружается и не обеспечивает самозапуск электродвигателей, то следует отключить часть (неответственной) нагрузки, например, минимальной защитой напряжения или с помощью пускового органа понижения частоты (устройства автоматической частотной разгрузки АЧР).

### 1.3. Классификация устройств АВР

Устройства АВР классифицируют по следующим основным признакам.

1.3.1. *По типу оборудования*, на которое действуют устройства автоматики: АВР линий; АВР трансформаторов, секций шин, агрегатов собственных нужд; АВР технологических установок.

1.3.2. *По направленности действия* АВР могут быть одностороннего и двухстороннего действия. Если АВР – одностороннего действия, то один источник всегда является рабочим, а другой – резервным. Переход с рабочего источника на резервный осуществляется автоматически посредством АВР, а обратный переход с резервного источника на рабочий, как правило, осуществляется оперативным персоналом (не автоматически). Если АВР – двухстороннего действия, то любой из источников может быть как рабочим, так и резервным.

1.3.3. *По виду источника питания* АВР могут быть на постоянном или на переменном оперативном токе.

1.3.4. *По виду включаемого резерва* АВР могут быть явного и неявного резерва. Явный резервный источник находится либо под напряжением, но без нагрузки, либо в отключенном состоянии. Неявная резервная нагрузка распределена между всеми источниками, которые осуществляют взаимное резервирование при отключении одного из них.

### 1.4. Автоматическое включение резерва на подстанциях

Рассмотрим принцип действия схемы АВР на секционном выключателе двухтрансформаторной подстанции, приведенной на рис. 2. В нормальном режиме оба трансформатора  $T1$  и  $T2$  включены и осуществляют питание потребителей секций шин низшего напряжения. Все выключатели (кроме выключателя  $Q5$ ) включены.

При этом выполняется следующее:

– реле минимального напряжения  $KV1$ ,  $KV2$  включены (их размыкающие контакты  $KV1.1$ ,  $KV2.1$  разомкнуты);

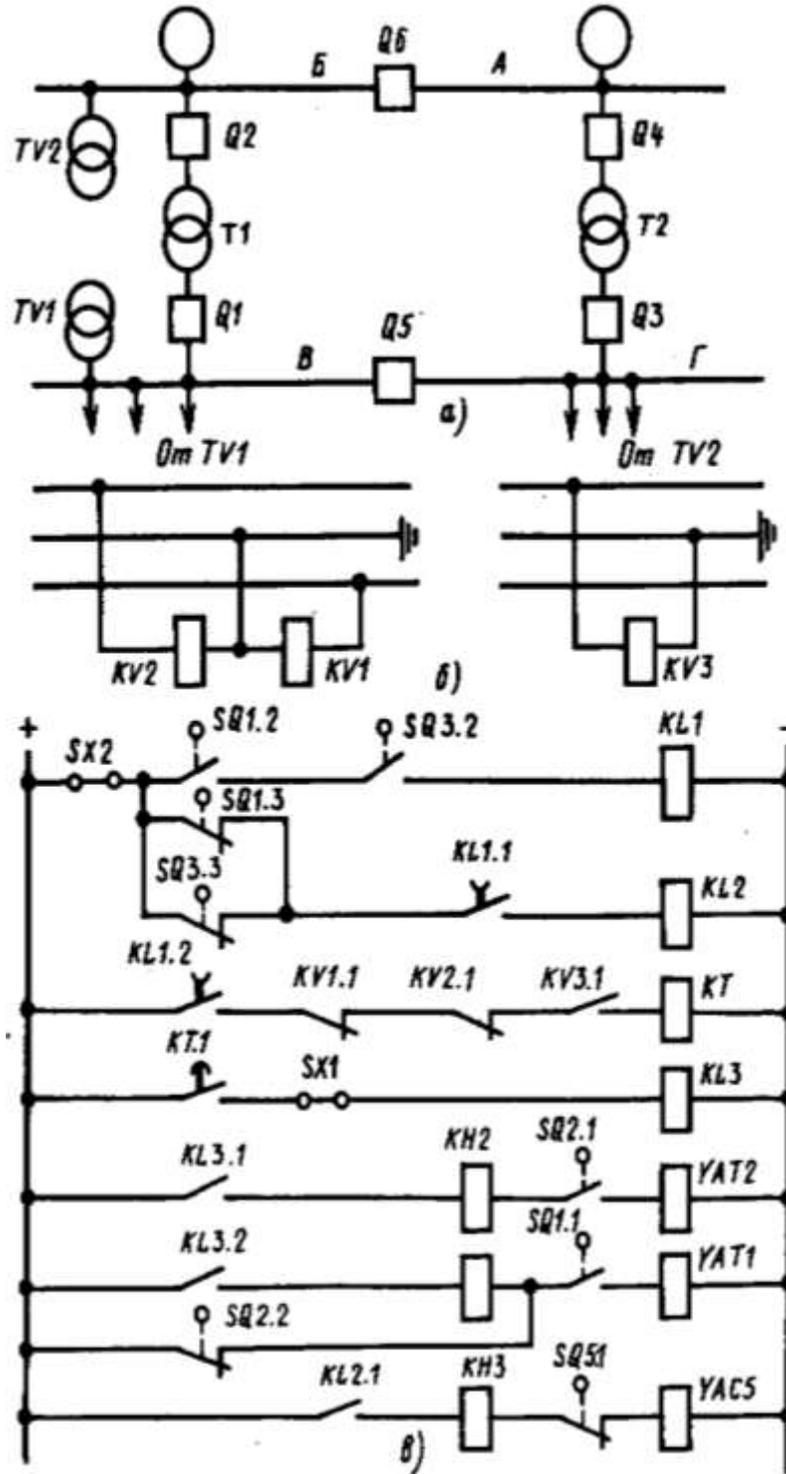


Рис. 2. Схема АВР секционного выключателя на подстанции:  
 а – схема первичных соединений; б – цепи переменного напряжения; в – цепи оперативного тока

- вспомогательные контакты  $SQ1.2$  выключателя  $Q1$  и  $SQ3.2$  выключателя  $Q3$  замкнуты;
- вспомогательные контакты  $SQ1.3$  выключателя  $Q1$  и  $SQ3.3$  выключателя  $Q3$  замкнуты;
- вспомогательные контакты  $SQ5.1$  выключателя  $Q5$  замкнуты;
- вспомогательные контакты  $SQ2.2$  выключателя  $Q2$  разомкнуты;
- к обмотке промежуточного реле  $KL1$  (через накладку  $SX2$ ) подведено напряжение и его контакты  $KL1.1$  замкнуты;
- контакты максимального реле напряжения  $KV3$ , контролирующего наличие напряжения на резервном источнике питания (на шинах секции 2), замкнуты.

При отключении выключателя  $Q1$  (по любой причине, например, в результате срабатывания релейной защиты трансформатора  $T1$ ) размыкаются его вспомогательные контакты  $SQ1.2$ , и обесточивается цепь питания обмотки промежуточного реле  $KL1$ . В результате якорь реле  $KL1$  (притянутый при включенном положении выключателя) при снятии напряжения отпадает (с заданной выдержкой времени).

Второй вспомогательный контакт  $SQ1.3$  выключателя  $Q1$  замыкается и подает плюс (через еще замкнутый контакт  $KL1.1$ ) на обмотку промежуточного реле  $KL2$ , которое своими контактами  $KL2.1$  замыкает цепь питания электромагнита включения выключателя  $YAC.5$ . В результате происходит включение секционного выключателя  $Q5$  и нагрузка шины  $B$  получает питание от трансформатора  $T2$ .

По истечении установленной на реле  $KL1$  выдержки времени его контакты  $KL1.1$  размыкаются, и цепь питания обмотки промежуточного реле  $KL2$  разрывается.

Если секционный выключатель  $Q5$  под действием схемы АВР включится на неустранившееся КЗ, то он вновь отключится релейной защитой, и его повторного включения не произойдет (так как цепь питания реле  $KL1$  обесточена). Таким образом, реле  $KL1$  обеспечивает однократность срабатывания АВР. Поэтому оно называется реле однократности действия (РОД). Заметим, что реле  $KL1$

вновь замкнет свои контакты и подготовит схему АВР к новому действию лишь после того, как будет восстановлена нормальная схема питания подстанции и будет включен выключатель  $Q1$ .

Выдержка времени на размыкание контактов реле  $KL1$  должна быть больше времени включения выключателя  $Q5$  (для того чтобы он успел надежно включиться). Это необходимо для того, чтобы он успел надежно включиться.

При отключении выключателя  $Q2$  замыкаются его вспомогательные контакты  $SQ2.2$  и подается питание (команда) на катушку электромагнита отключения  $YAT1$  выключателя  $Q1$ . После отключения выключателя  $Q1$  схема АВР запускается и действует аналогично.

При отключении трансформатора  $T2$  схема АВР секционного выключателя  $Q5$  работает аналогично.

Кроме рассмотренных выше случаев отключения одного из трансформаторов потребители также потеряют питание, если по какой-либо причине останутся без напряжения шины высшего напряжения  $B$  (или  $A$ ). Схема АВР при этом не будет срабатывать, так как оба выключателя трансформатора  $T1$  ( $Q1$  и  $Q2$ ) или трансформатора  $T2$  ( $Q3$  и  $Q4$ ) останутся включенными.

Для обеспечения действия схемы АВР в этом случае предусмотрен специальный пусковой орган минимального напряжения. В его состав входят реле минимального напряжения  $KV1$ ,  $KV2$  и  $KV3$ . При исчезновении напряжения на шинах подстанции  $B$ , а следовательно, и на шинах подстанции  $B$  минимальные реле напряжения, подключенные к трансформатору напряжения  $TV1$ , замкнут свои контакты и подадут плюс оперативного тока (через контакты  $KL1.2$  и  $KV3.1$ ) на обмотку реле времени  $KT$ . Реле  $KT$  при этом запустится и (по истечении установленной выдержки времени) подаст плюс на обмотку выходного промежуточного реле  $KL3$ , которое произведет отключение обоих выключателей ( $Q1$  и  $Q2$ ) трансформатора  $T1$ . После отключения выключателя  $Q1$  произойдет запуск схемы автоматики АВР (как рассмотрено выше).

Реле напряжения  $KV3$  предусмотрено для того, чтобы предотвратить отключение трансформатора  $T1$  от пускового органа ми-

нимального напряжения в случае отсутствия напряжения на шинах высшего напряжения *A* резервного трансформатора, так как в этом случае действие схемы АВР будет заведомо бесполезным. Реле *KV3*, подключенное к трансформатору напряжения *TV2* шин *A*, при отсутствии напряжения на этих шинах разомкнет свои контакты *KV3.1*. В результате разорвется цепь питания обмотки реле времени *KT* (через замкнутые контакты *KV1.1* и *KV2.1*).

Для вывода УАВР из работы предусмотрены накладки *SX*. Указательные реле *КН* обеспечивают сигнализацию о работе устройства.

### 1.5. УАВР на секционном выключателе

Рассмотрим принципиальную схему устройства АВР на секционном выключателе (рис. 3.). Она находит применение в системах электроснабжения действующих промышленных предприятий.

В исходном положении выключатели *Q1* и *Q3* включены, *Q2* отключен, ключ управления *SA* находится в положении АВР, реле минимального напряжения *KV1...KV4* и блокировочное реле *KB* включены.

При исчезновении напряжения на первой секции шин реле *KV1*, *KV2* теряют питание, их размыкающие контакты *KV1.1*, *KV2.1* замыкаются и обеспечивают подачу питания на катушку реле времени *KT*, которое сработав, создает цепь питания промежуточного реле *KL1*. Реле *KL1* срабатывает, замыкает цепь питания электромагнита отключения *YAT1* выключателя *Q1* и отключает его (*Q1*). При этом замыкаются вспомогательные контакты *SQ1.3* выключателя *Q1*, которые замыкают цепь питания катушки электромагнита *YAC2* включения выключателя *Q2*. Таким образом, секционный выключатель *Q2* включается и восстанавливается питание потребителей электроэнергии, присоединенных к первой секции шин. *HL* – лампа готовности устройства АВР.

Однократность действия устройства АВР в данном случае обеспечивается с помощью блокировочного реле *KB*. При отключении выключателя *Q1* или *Q3* реле *KB* теряет питание, его замыкаю-

щие контакты  $KB.1$  с выдержкой времени на размыкание в цепи катушки  $YAC2$  размыкаются и  $YAC2$  теряет питание.

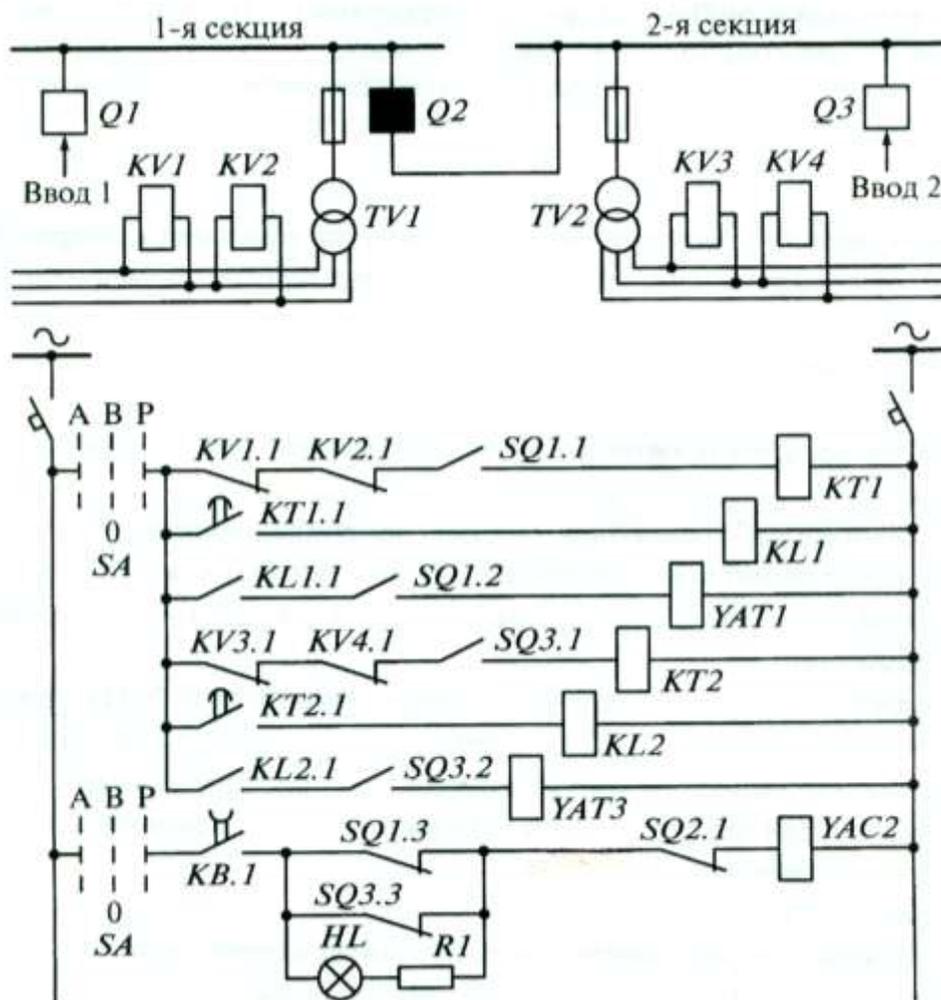


Рис. 3. Принципиальная схема устройства АВР на секционном выключателе

Выдержку времени контактов на размыкание  $KB.1$  выбирают такой, чтобы обеспечить только одноразовое включение выключателя  $Q2$ .

При исчезновении напряжения на второй секции шин данная схема работает аналогично.

Если действие устройства АВР оказывается unsuccessful (при устойчивом КЗ на первой секции шин), то выключатель  $Q2$  отклю-

чается под действием своей защиты и эта секция шин выводится в ремонт.

### 1.6. Особенности выполнения АВР при наличии синхронной нагрузки

При наличии в системе электроснабжения синхронных электродвигателей время действия устройства АВР может затянуться. Например, при потере питания одной секцией шин (шины секционированы выключателем) присоединенные к ней синхронные двигатели, продолжая вращаться по инерции, переходят в генераторный режим и некоторое время (3...8 с) поддерживают на данной секции шин достаточно высокое напряжение. В этом случае пусковые органы устройств АВР сразу не сработают и АВР затянется. В таких случаях значительно быстрее на шинах снижается частота напряжения. Поэтому на практике широко применяют схему комбинированного пуска устройств АВР (по частоте и напряжению).

При этом факт потери питания такой схемой фиксируется через 0,3...0,5 с.

Еще более высокую чувствительность к потере питания имеют устройства, основанные на сравнении фаз векторов напряжений двух секций шин. В этом случае фиксация прекращения питания осуществляется за 0,2...0,3 с. Перспективными в этом смысле считаются устройства синхронного синфазного АВР.

Успешность работы АВР определяется тем, как быстро после восстановления питания от резервного источника будут достигнуты нормальные параметры производственного процесса. Скорость достижения этих параметров зависит от времени, на которое прекращается электроснабжение, а также от того, происходит или нет после данного перерыва самозапуск электродвигателей (если таковые имеются).

Самозапуск двигателей зависит от множества следующих факторов: степени загрузки двигателей; характера приводимых ими в работу механизмов (т. е. зависимости момента сопротивления механизма от частоты вращения); механических постоянных двигате-

лей и агрегатов; формы асинхронных моментных характеристик двигателей; положения роторов двигателей в момент подачи напряжения; типов возбудительных устройств и характера устройств гашения поля; характера зависимости потребляемой мощности от напряжения на зажимах прочей (недвигательной) нагрузки; уставок по контролируемым параметрам релейной защиты и др.

АВР двигателей применяют для ответственных потребителей I категории, перерыв в электроснабжении которых является недопустимым. АВР двигателей может происходить не только при отключении двигателя рабочего агрегата, но и при изменении технологических параметров агрегата (изменении режима его работы).

Для повышения надежности электроснабжения синхронных двигателей напряжением 6 или 10 кВ и обеспечения их устойчивости при кратковременных нарушениях электроснабжения разработан комплекс устройств быстродействующего АВР (БАВР). Он включает в себя быстродействующие вакуумные выключатели с электродинамическим устройством управления приводом и быстродействующее пусковое устройство АВР (ПУ АВР). Они размещаются в шкафах КРУ и комплектного сборного оборудования (КСО) распределительного устройства напряжением 6 или 10 кВ.

Суммарное время переключения аварийной секции на резервную при применении таких БАВР составляет 0,12...0,06 с (при всех видах нарушения электроснабжения на подстанциях с двигательной нагрузкой).

### 1.7. Выбор параметров УАВР

Схемы АВР различаются в основном их пусковыми органами. При этом в качестве воздействующих величин могут выступать: значение напряжения на контролируемой секции шин, частота этого напряжения, угол между векторами напряжения рабочего и резервного источников питания и некоторые другие электрические величины.

Рассмотрим УАВР с минимальным пусковым органом напря-

жения, установленном на секционном выключателе сети.

В этой схеме (рис. 4, а) шины секционированы, секционный выключатель  $Q5$  отключен. Каждая секция питается от отдельного источника. Схему УАВР можно выполнить так, что устройство будет действовать на включение секционного выключателя  $Q5$  при отключении любого из источников питания и исчезновении напряжения на любой секции шин. В этом случае будет осуществляться взаимное резервирование питания с помощью УАВР двустороннего действия.

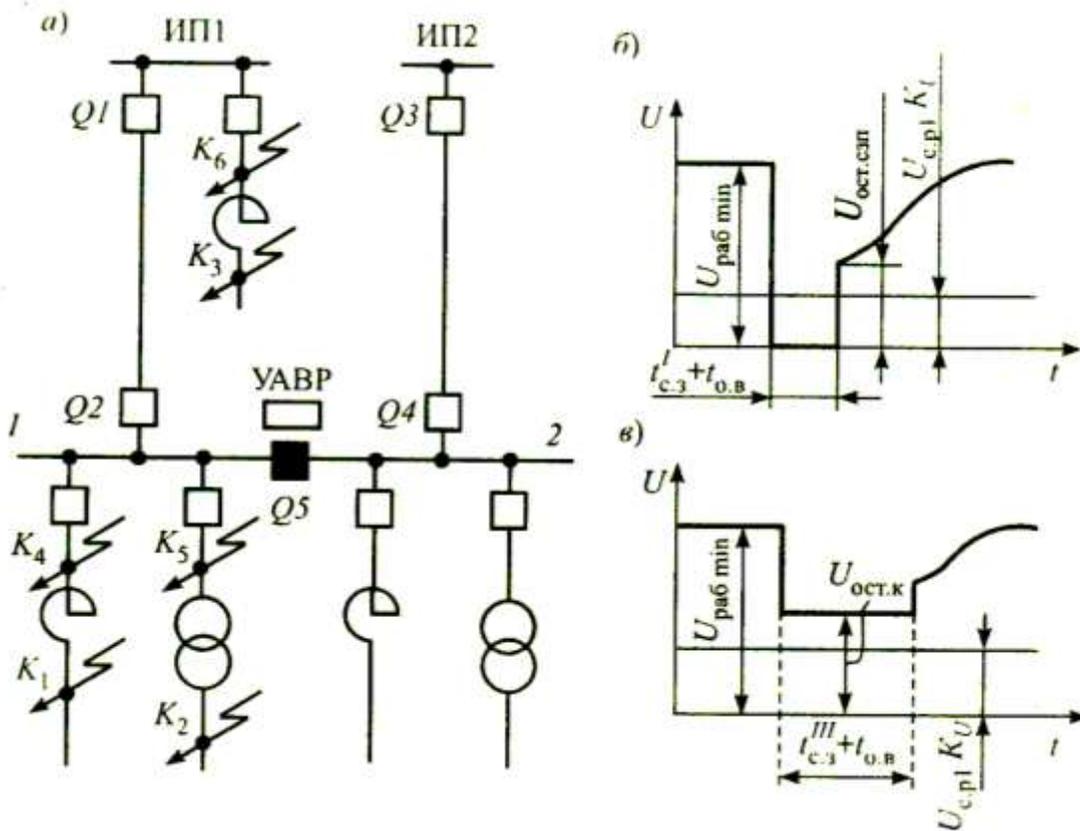


Рис. 4. Схема сети с УАВР на секционном выключателе (а) и графики изменения напряжения на резервируемой секции шин при возникновении  $K3$  (б, в)

Прежде чем включить выключатель  $Q5$ , устройство АВР должно отключить выключатель  $Q2$  или  $Q4$  (при условии, что он остался включенным при исчезновении напряжения на соответ-

ствующей секции шин). С этой целью в схему УАВР вводят пусковой орган, в котором обычно используют минимальные реле напряжения. В общем случае УАВР содержит также орган выдержки времени. Если резервируемой является одна из секций (например, секция 1), то УАВР включает выключатель  $Q5$  только при исчезновении напряжения на этой секции, предварительно отключив выключатель  $Q2$  (т. е. осуществляет одностороннее действие). Для удовлетворения основных требований, предъявляемых к УАВР, параметры пускового органа и органа выдержки времени выбирают исходя из следующих положений.

Минимальный пусковой орган напряжения ПОН (т. е. реле  $KV1, KV2$ ) не должен срабатывать при снижении напряжения на шинах до величин  $U_{ост.к}$ , полученных при коротком замыкании в точках  $K_1...K_3$  (за элементами с сосредоточенными параметрами). Эти повреждения обычно отключаются релейной защитой с выдержкой времени (третьей ступени)  $t_{сз}^{III}$ .

Напряжение срабатывания реле напряжений  $KV1, KV2$  при КЗ в этих точках рассчитывают по выражению:

$$U_{ср1} \leq U_{ост.к} / (k_{отс} k_U), \quad (1)$$

где  $U_{ост.к}$  – остаточное напряжение на шинах при КЗ за реакторами и трансформатором на присоединениях, отходящих от шин подстанции,  $k_U$  – коэффициент трансформации трансформатора напряжения  $TV1$ , коэффициент отстройки принимают равным  $k_{отс} = 1,1...1,2$ .

Характер изменения напряжения на шинах секции 1 и напряжение срабатывания показаны на рис. 4, в.

При КЗ в точках  $K4...K6$  устройство АВР (ПОН) также не должно срабатывать. В этих случаях напряжение на шинах секции 1 может снизиться до нуля (рис. 4, б), и минимальные реле напряжения срабатывают.

Короткие замыкания в точках  $K4...K6$  ликвидируются быстродействующими защитами с выдержкой времени  $t_{сз}^1 + t_{об}$ , где  $t_{сз}^1$  –

время срабатывания защиты присоединения (первой ступени);  $t_{ов}$  – время отключения выключателя присоединения (см. рис. 4, б).

После отключения поврежденного элемента напряжение на шинах секции 1 начинает восстанавливаться и осуществляется самозапуск электродвигателей. Для того чтобы исключить действие УАВР, в этом случае необходимо соответствующим образом выбрать выдержку времени  $t_{ABP1}$  и обеспечить возврат минимальных реле напряжения в исходное состояние при напряжениях, не больших значения  $U_{ост.сзн}$ . Это второе условие выбора напряжения срабатывания производят по выражению:

$$U_{cp1} \leq U_{ост.сзн} / (\kappa_{\epsilon} \kappa_{отс} \kappa_U), \quad (2)$$

где  $U_{ост.сзн}$  – напряжение на шинах при самозапуске двигателей после отключения участка, на котором произошло КЗ,  $\kappa_{\epsilon}$  – коэффициент возврата реле, который принимают равным  $\kappa_{\epsilon} = 1,25$ .

Окончательно принимают меньшее значение напряжения срабатывания, полученное из выражений (1) и (2). На практике при расчетах часто принимают:

$$U_{cp1} = (0,25 \dots 0,4)(U_{ном} / \kappa_U). \quad (3)$$

Такой выбор обычно удовлетворяет условиям (1) и (2).

Выдержка времени срабатывания АПВ  $t_{ABP1}$  должна быть больше времени  $t_{сз}^1 + t_{ов}$ .

Обычно при расчетах принимают наибольшую выдержку времени защит присоединений, отходящих от шин источника питания ИП1 и от шин секции 1, т. е.

$$t_{ABP1} \geq t_{с.з\max} + \Delta t = t_{км},$$

где  $t_{с.з\max}$  – наибольшая выдержка времени защиты присоединений, отходящих от шин секции 1;  $\Delta t = 2 \dots 3$  с – запас надежности по времени (зависит от типа выключателя).

Надежное включение выключателя  $Q5$  и требование однократности действия УАВР удовлетворяется выбором продолжительности воздействия на включение выключателя  $Q5$ , формируемое промежуточным реле  $KL1$ . Эту выдержку определяют по выражению:

$$t_{ABP2} \geq t_{\text{вв}} + \Delta t = t_{KL1},$$

где  $t_{\text{вв}}$  – полное время включения выключателя  $Q5$  с учетом времени действия привода;  $\Delta t = 0,3 \dots 0,5$  с – запас надежности по времени.

Устройство АВР должно срабатывать лишь при наличии напряжения на резервном источнике питания. Поэтому в состав его ПОН входит максимальное реле напряжения  $KV3$ , которое контролирует наличие напряжения на резервном источнике питания (т. е. на шинах секции 2). При минимальном рабочем напряжении  $U_{\text{раб. min}}$  это реле должно находиться в состоянии после срабатывания и должно разрешать действие пускового органа АВР.

Выбор его напряжения срабатывания производят по выражению:

$$U_{\text{сп2}} \leq U_{\text{раб. min}} / (\kappa_{\text{в}} \kappa_{\text{отс}} \kappa_U),$$

где  $\kappa_{\text{в}} = 0,8$ ;  $\kappa_{\text{отс}} = 1,5 \dots 1,7$ .

При расчетах обычно принимают:

$$U_{\text{сп2}} = (0,65 \dots 0,7)(U_{\text{ном}} / \kappa_U).$$

Следует иметь в виду, что включенный от АВР выключатель должен иметь защиту, действующую с ускорением после АВР. Оно необходимо для быстрого отключения секционного выключателя, если он будет включен устройством АВР на КЗ (например, на резервируемой секции шин).

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Исследование устройства АВР проводят на специальном лабораторном стенде, на котором смоделирована упрощенная схема двухтрансформаторной подстанции с секционным выключателем и устройством АВР.

Схема выполнена с двумя секциями шин, соединенных секционным выключателем  $Q5$ . Секции получают питание от трансформаторов  $T1$ ,  $T2$  и выключателей  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$ ,  $Q4$ . Секционный

выключатель оборудован устройством АВР. При нормальном режиме работы секционный выключатель  $Q5$  разомкнут.

При отключении любого из трансформаторов происходит автоматическое включение секционного выключателя  $Q5$ . Однократность действия АВР обеспечивается при помощи реле однократности действия РОД1, РОД2.

При включенных выключателях  $Q1$  и  $Q3$  обмотки промежуточных реле РОД1 и РОД2 находятся под напряжением, их якоря притянуты. В случае отключения выключателей  $Q1$  или  $Q3$ , через которые осуществляется питание соответствующих секций, замыкаются контакты этих выключателей и через замкнутые контакты реле РОД1 и РОД2 подается импульс на включение выключателя  $Q5$ .

Схема лабораторного стенда (выполнена по рис. 2) работает следующим образом. При отключении по любой причине выключателя  $Q1$  трансформатора  $T1$  (КЗ №1) его вспомогательный контакт  $SQ1.2$  размыкает цепь обмотки промежуточного реле  $KL1$ . В результате якорь реле  $KL1$  при снятии напряжения отпадает с некоторой выдержкой времени и размыкает контакты. Второй вспомогательный контакт  $SQ1.3$  выключателя  $Q1$ , замкнувшись, подает плюс через еще замкнутый контакт  $KL1.1$  на обмотку промежуточного реле  $KL2$ , которое своими контактами производит включение секционного выключателя  $Q5$ , воздействуя на его привод  $VAC5$ .

По истечении установленной выдержки времени реле  $KL1$  размыкает свои контакты и размыкает цепь обмотки промежуточного реле  $KL2$ . Если секционный выключатель  $Q5$  включится под действием схемы АВР на неустранившееся КЗ и отключится соответствующей релейной защитой, то его повторного включения не произойдет, так как реле  $KL1$  обеспечивает однократность действия АВР и называется реле однократности включения (РОВ). Реле  $KL1$  вновь замкнет свои контакты и подготовит схему АВР к новому действию лишь после того, как будет восстановлена нормальная схема питания подстанции и включен выключатель  $Q1$ .

Аналогично рассмотренному выше, АВР секционного выключателя будет действовать и при КЗ в точке  $K2$ .

На вертикальной панели стенда показана схема первичных (а) соединений (расчетная схема), схема цепей переменного напряжения (б) и схема оперативных цепей (в).

В элементах схемы (реле, контактах, выключателях, защитах), вмонтированы светодиоды (зеленого и красного цвета). Своим свечением они отображают состояние контактов данного объекта (а так же его изменение). Например, в нормальном положении контакты выключателя  $Q1$  замкнуты (горит красный светодиод). При возникновении КЗ в точке  $K1$  выключатель  $Q1$  отключается релейной защитой, его контакты размыкаются, и в нем загорается зеленый светодиод. Таким образом, на схеме отображаются все элементы, и обеспечивается наглядность работы элементов схемы (и их различные состояния).

На наклонной панели стенда расположены элементы управления схемой УАВР. К ним относятся:

- кнопка «Вкл» – для включения питания стенда;
- лампочка «Сеть» – для индикации наличия питания стенда;
- кнопка «Откл» – для выключения питания стенда;
- кнопки «Вкл  $Q1$ », «Вкл  $Q2$ » – для включения выключателей  $Q1$  и  $Q2$  соответственно;
- кнопка «Выкл  $Q5$ » – для выключения выключателя  $Q5$ ;
- измерительные приборы – для индикации наличия напряжения на соответствующей секции;
- реле однократности действия РОД1 и РОД2, обеспечивающие однократность включения секционного выключателя на установившееся КЗ;
- секундомер – для фиксации времени срабатывания АВР;
- ключ управления (КУ) – для установки режима управления схемой («Р» – ручное управление, «А» – автоматическое управление схемой);
- ключ установки режима работы схемы (НР) – для установки режима работы схемы («НР» – нормальный режим, «К1» – возникновение КЗ в точке  $K1$ , «К2» – возникновение КЗ в точке  $K2$ ).

Для работы на стенде следует выполнить следующие операции:

– установить ключ режима работы схемы (НР) в положение «НР» (нормальный режим);

– установить ключ управления (КУ) – в положение «Р» (ручное управление);

– включить питание стенда кнопкой «Вкл», убедиться в появлении питания по загоревшейся лампочке «Сеть»;

– проверить состояние индикаторов выключателей (при необходимости привести их в нормальный режим посредством нажатия соответствующих кнопок «Вкл  $Q1$ », «Вкл  $Q2$ » – цвет светодиодов выключателей – красный, цвет светодиода выключателя  $Q5$  – зеленый), т.е. световые индикаторы схемы светятся тем цветом, который соответствует положению элемента для нормального режима работы;

– поставить ключ режима работы схемы в режим короткого замыкания в точке  $K1$ , визуально проследить за работой АВР (изменяются цвета свечения светодиодов) и зафиксировать время срабатывания секундомером;

– вернуть схему в нормальный режим: для этого следует отключить выключатель  $Q5$ , включить выключатели  $Q1$  и  $Q2$ , (ключ режима работы вернуть в нормальный режим;

– произвести короткое замыкание в точке  $K2$  (повернуть ключ режима в положение  $K2$ ;

– по изменившимся состояниям светодиодов визуально проследить за работой АВР (зафиксировать время срабатывания по секундомеру).

По окончанию работы со стендом выключить его питание кнопкой «Откл».

### 3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ

1. Назначение устройств АВР.
2. Обоснование понятий явного и неявного резерва.
3. Состав устройства АВР.
4. Назначение пускового органа и узла автоматики включения УАВР.

5. Требования, предъявляемые к устройствам АВР.
6. Классификация устройств АВР.
7. Обеспечение однократности действия АВР.
8. Типы пусковых органов АВР.
9. Принцип работы принципиальной схемы устройств АВР.
10. Способы осуществления запуска устройства АВР.
11. Назначение и принцип организации ускорения и запрета АВР.
12. Особенности выполнения устройств АВР при наличии синхронных двигателей.
13. Основные параметры устройств АВР и их расчет.

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Уяснить основные теоретические положения и кратко законспектировать их.
2. Ознакомиться со стендом, на котором проводится лабораторная работа.
3. Уяснить принцип работы АВР (по принципиальной схеме).
4. Произвести расчет параметров АВР.
5. Произвести действия по установке исходного (нормального) режима работы стенда и переводу его в другие режимы (в соответствии с методическими указаниями, приведенными в описании работы стенда).
5. Подготовить отчет по лабораторной работе.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете по лабораторной работе следует представить следующие основные компоненты:

- краткое описание основных теоретических положений;
- принципиальная схема АВР и порядок ее работы (взаимодействие элементов);
- расчет параметров АВР;
- выводы по результатам опытов и расчетов.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев, А. В. Релейная защита в распределительных сетях [Электронный ресурс]: пособие для практических расчетов / А. В. Булычев, А. А. Наволочный. – М.: ЭНАС, 2011. – 206 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/58493> (15.06.2017).

2. Юндин, М. А. Токовая защита электроустановок [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М. А. Юндин. – СПб.: Лань, 2011. – 288 с. – Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=1802](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1802) (15.06.2017).

3. Плащанский, Л. А. Основы электроснабжения. Раздел «Релейная защита электроустановок» [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л. А. Плащанский. – М.: Моск. гос. горный ун-т, 2008. – 143 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/99348> (15.06.2017).

4. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов / В. А. Андреев. – М.: Высш. шк., 2007. – 639 с.

5. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем: учеб. для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.