

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Минцаев Магомед Шавалович

Должность: Ректор

Дата подписания: 23.11.2023 14:58:07

Уникальный программный ключ:

236bcc35c296f119d6aafdc22836b21db52dbc07971a86865a5825f9fa4304cc

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Кафедра электротехники и электрооборудования предприятий

Учебно-методическое пособие

по практическим занятиям дисциплины

«Интеллектуальные системы управления, защиты и автоматики  
электрических сетей»

Методические указания по практическим занятиям дисциплины «Интеллектуальные системы управления, защиты и автоматики электрических сетей» предназначены для магистров направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, направленность «Интеллектуальное управление режимами работы сетей и систем электроснабжения» и раскрывают содержание практических занятий.

*Публикуется в авторской редакции.*

Составитель: Хакимьянов М.И., доц., д-р техн. наук

Рецензенты: Рябишина Л.А., доц., канд. техн. наук  
Калимгулов А.Р., доц., канд. физ.-мат. наук

**Содержание**

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Введение.....                           | 4  |
| 1.Основные теоретические положения..... | 4  |
| 2.Методические указания.....            | 26 |
| 3.Содержание работы.....                | 33 |
| 4. Контрольные вопросы.....             | 34 |
| Заключение.....                         | 35 |
| Список рекомендуемой литературы.....    | 35 |

## ВВЕДЕНИЕ

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 также 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 последовательности. К РНМ, построенным на микроэлектронной элементной базе, относятся:

реле серии РМ-11 – для контроля направления мощности прямой последовательности; РМ-12 – для контроля направления мощности нулевой последовательности.

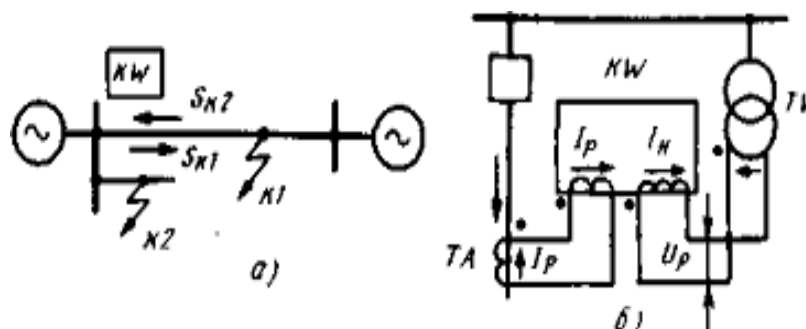


Рис. 1. Реле направления мощности: а – принцип действия; б – схема включения обмоток реле

Микроэлектронные 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  $\Phi_N$ . 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).

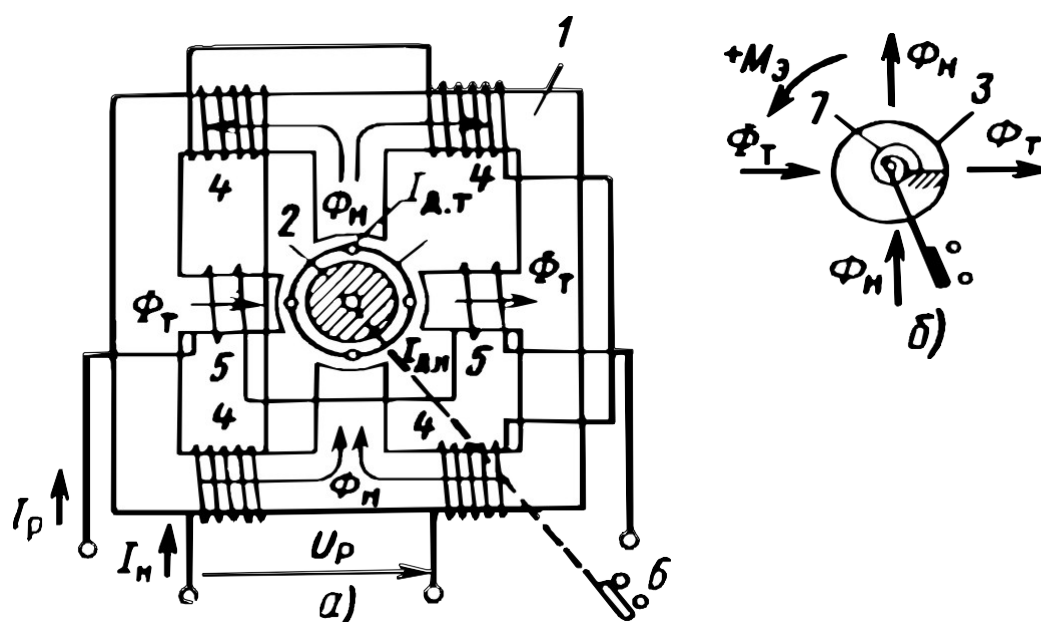


Рис. 2. Реле направления мощности: а – с цилиндрическим ротором; б – ротор реле и направление положительного момента  $M_э$

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.



Магнитные потоки  $\Phi_H$  и  $\Phi_T$  изображены на диаграмме совпадающими 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  $M_3 = k \Phi_H \Phi_T \sin \psi$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

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

$$M_3 = k_1 U_p I \sin(\alpha - \varphi_p) = k_p S_p,$$

где  $S_p = U_p I \sin(\alpha - \varphi_p)$  – 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  $M_3$  достигает максимума при  $\alpha - \varphi_p = 90^\circ$ , т.е. когда вектор  $I_p$  опережает вектор  $I_n$  на  $90^\circ$ . Угол  $\varphi_p$ , при котором  $M_3$  достигает максимального значения, называется углом максимальной чувствительности  $\varphi_{m+}$ . Он образуется линией максимальных моментов и вектором подведенного к реле напряжения.

Следует иметь в виду, что углы  $\alpha$  и  $\varphi_{m+}$  откладываются от вектора напряжения в противоположные стороны. Поэтому  $\alpha + (-\varphi_{m+}) = 90^\circ$ , откуда  $\varphi_{m+} = \alpha - 90^\circ$ . 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  $\beta = -\varphi_m$ , (т. е.  $\alpha = 90^\circ - \beta$ ), то выражение (1) примет вид

$$\begin{aligned} M_3 &= \kappa_I U_p I_p \sin(90^\circ - \alpha - \varphi_p) = \kappa_I U_p I_p \cos(\varphi_p + \beta) = \\ &= \kappa_I U_p I_p \cos(\varphi_p - \varphi_{mч}) \end{aligned} \quad (2)$$

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  $M_{\text{э}} = k_1 U_p I_p \cos(\varphi_p)$ . Такое реле называют косинусным. Если угол  $\alpha = 0$ , то угол  $\beta = \pi / 2$  и вращающий момент будет равен  $M_{\text{э}} = k_1 U_p I_p \sin(\varphi_p)$ . 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 преодолет 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 (замыкает свои контакты), т. е. минимальная мощность срабатывания реле  $S_{cp \text{ min}}$ .

Зависимость мощности срабатывания реле от угла сдвига фаз  $\varphi$  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  $U_{cp}$  — 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

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

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  $\varphi_{p \text{ мч}} = -\beta$ .

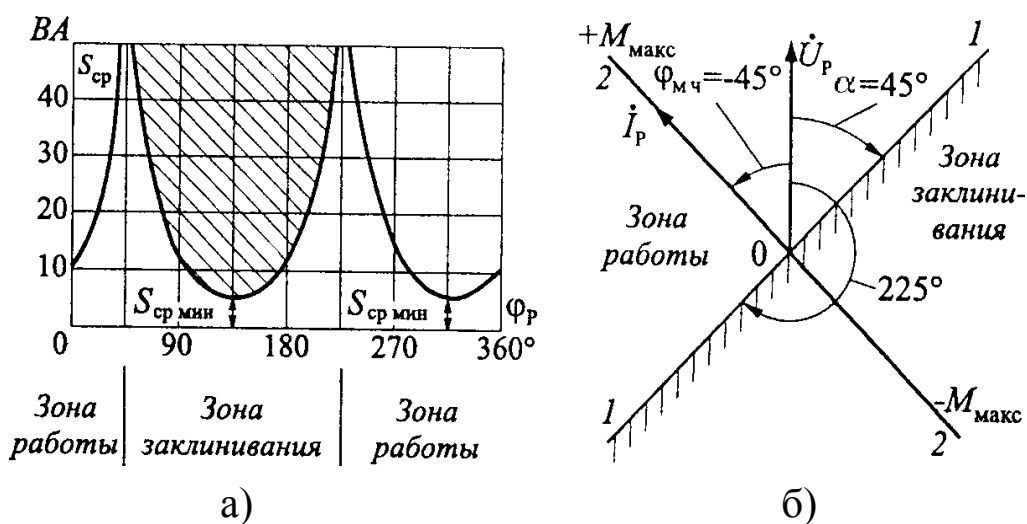


Рис. 4. Угловые характеристики реле мощности РБМ-171: а – в прямоугольной системе координат, б – в полярных координатах

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  $\varphi_p$ ;
- 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 ( $\alpha=+45^\circ$ ,  $\varphi_{m+}=-45^\circ$ ), для которого выражение (2) имеет вид  $M_{\varepsilon}=\kappa I U_p I_p \cos(\varphi_p+45^\circ)$ .

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 ( $\alpha=-20^\circ$ ,  $\varphi_{mч}=+70^\circ$ ), применяемого в схемах защит от замыканий на землю, приведена на рис.5.

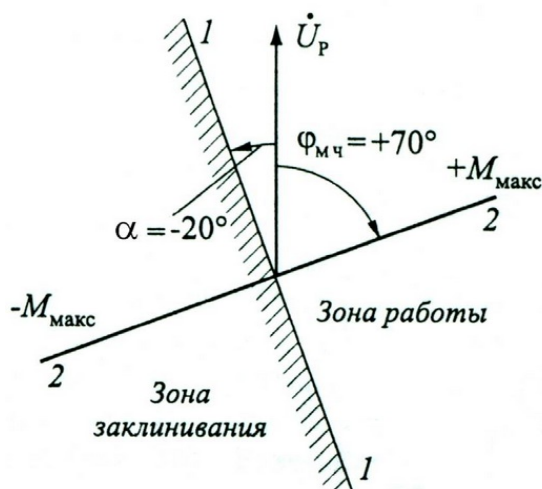


Рис. 5. Угловая характеристика в полярных координатах реле мощности РБМ-178

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  $\sin(\alpha - \varphi) = 1$ . 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 вольтамперная 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  $S_{cp} = U_{cp \min} I_p$ .

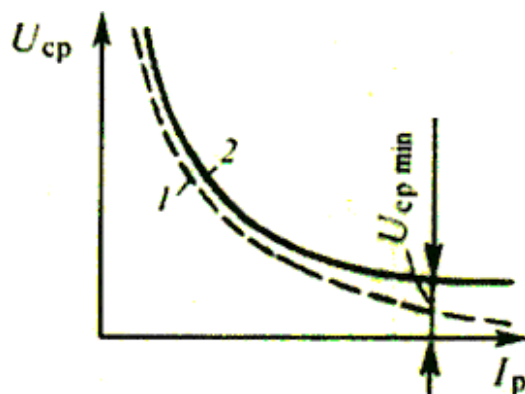


Рис. 6. Характеристика чувствительности реле РБМ-171

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:

$$\varphi_{p \text{ мч}} = -45^\circ \text{ и } \varphi_{p \text{ мч}} = -30^\circ.$$

Реле РБМ-178 (РБМ-278) и РБМ-177 (РБМ-277) включаются на ток и напряжение нулевой последовательности. Угол их максимальной чувствительности  $\varphi_{\delta \text{ м}}^+ = +70^\circ$ . Мощность срабатывания  $S_{\text{ср}}$  для реле РБМ-178 и РБМ-278 составляет  $S_{\text{ср}} = 0,2 \dots 4 \text{ ВА}$ ; для реле РБМ-177 и РБМ-277  $S_{\text{ср}} = 0,6 \dots 3 \text{ ВА}$ .

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 раз-



дельного 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  $U'_U = \kappa_U U_p$  и  $U'_I = \kappa_I I_p$ . 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  $\varphi_{рмч}$  и угловой характеристики срабатывания реле.

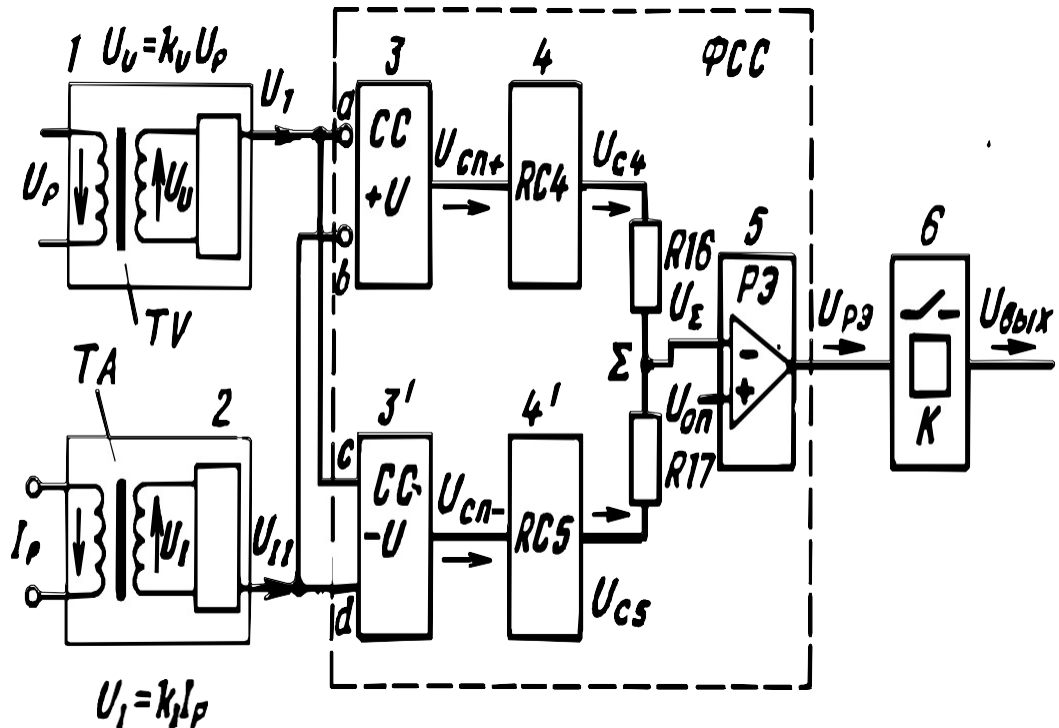


Рис. 7. Структурная схема реле направления мощности РМ-11 (РМ-12)

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  $U_U$ , а на выходе блока 2 – напряжение  $U_{II}$ .

Выходные напряжения  $U^I = U^I \exp(j\alpha) = k_1$  и  $U^{II} = k_2$  блоков  
 $I \quad U^I$   $II \quad I_p$

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 сравнения 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

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 отдельное 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 сравниваемых 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 (РЭ) 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 стабилитронного делителя, включенного между плюсом и минусом напряжения постоянного тока 220 или 110 В (на делителе имеются ответвления + 28, + 10, – 5 и 0 В).

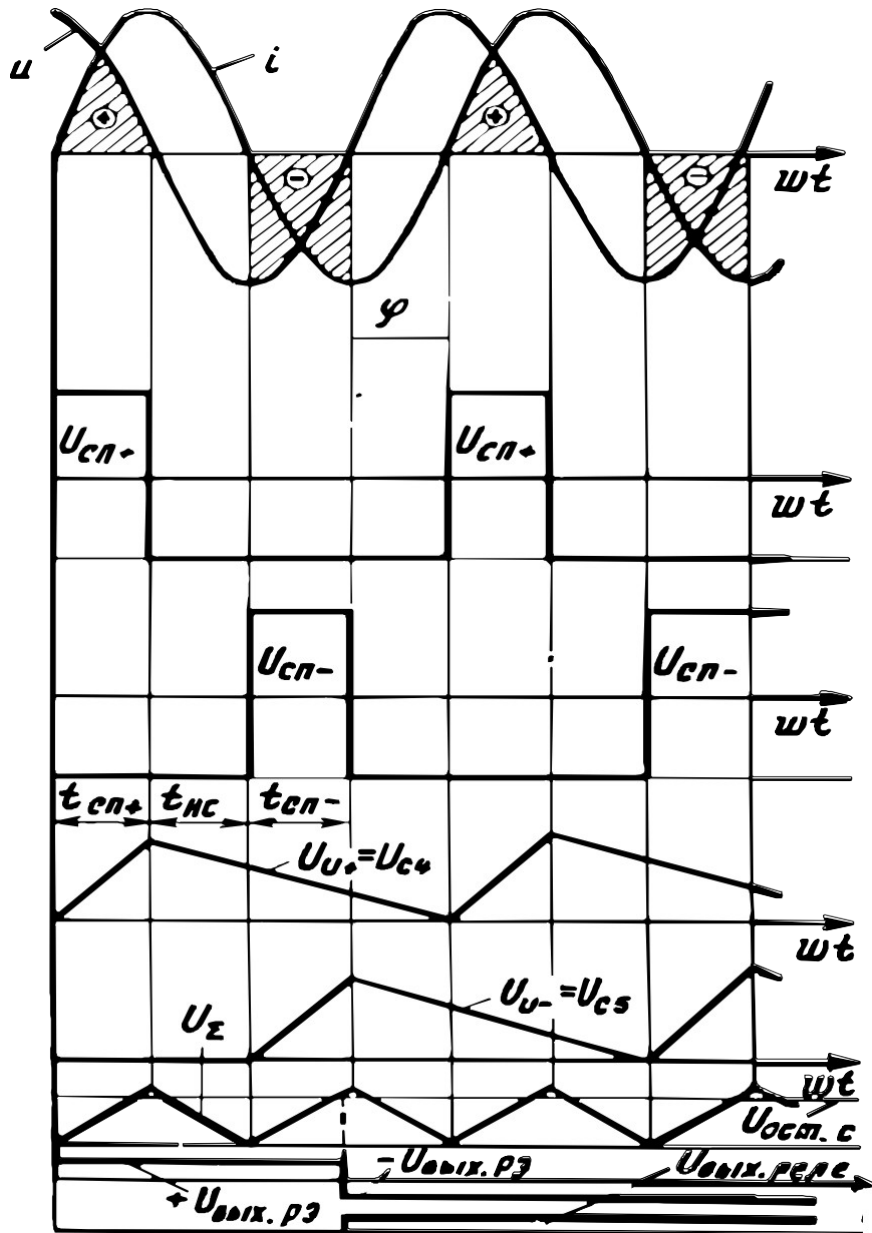


Рис. 8. Диаграммы работы схемы ФСС реле серии РМ-11 (РМ-12)

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  $\varphi_p = \varphi_{p \text{ тч}}$ ); чувствительность  $U_{cp} = 0,25 \text{ В}$ ; ток срабатывания  $I_{cp} = 0,25I_{ном}$ ; 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 КВ (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

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

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 КВ, 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 КН, который подает команду на отключение выключателя.

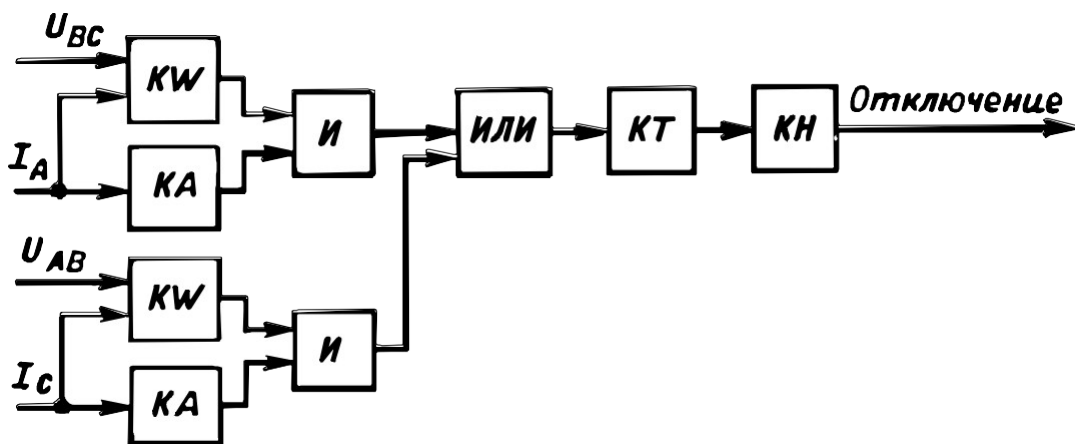


Рис. 9. Структурная схема направленной МТЗ

При КЗ на других присоединениях данной подстанции реле КА срабатывает, если  $I_k > I_{c.з.}$ , но так как реле КВ 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.



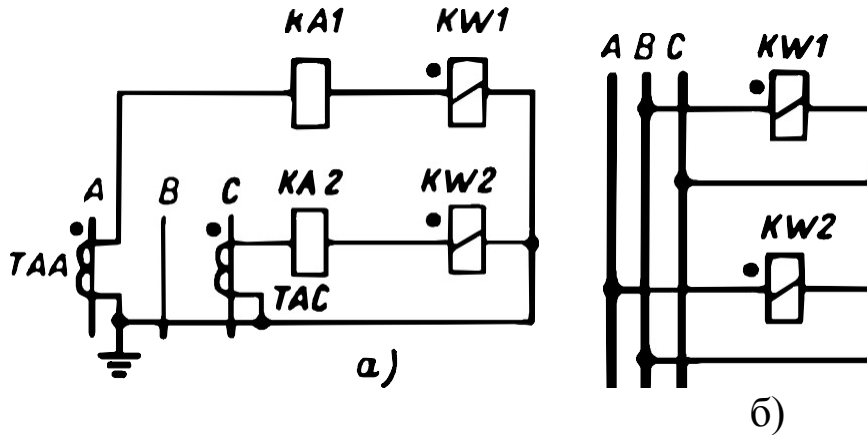


Рис. 10. Схема принципиальная (двухфазная) направленной МТЗ: а – цепи тока; б – цепи напряжения

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 ( $I_{сз} > I_{н \max}$ ).

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.

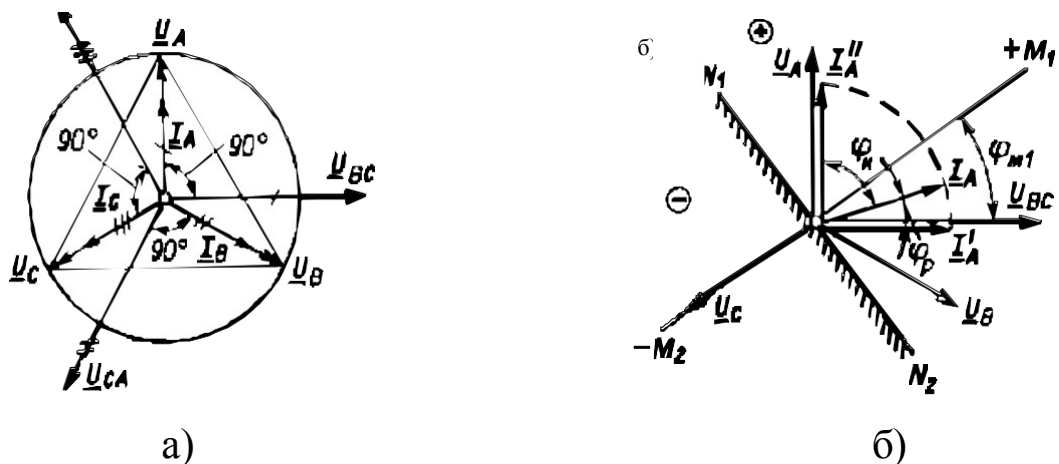


Рис. 11. Векторные диаграммы токов и напряжений для реле мощности при 90-градусной схеме включения

Угол внутреннего сдвига этого реле можно представить в виде  $\alpha = 90^\circ + \varphi_{\text{мч}} = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$ . Мощность на зажимах такого реле равна  $S_p = \kappa_1 U_p I_p \cos(\varphi + 30^\circ)$ . РНМ включено на ток  $I_p = I_A$  и на 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  $\varphi_k = 90^\circ$ ;  $I''_A$  – при КЗ через дугу в начале ЛЭП, когда  $\varphi_k \approx 0^\circ$ .

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

Фазовращатель ( $\varphi$ ) «ФАЗА» обеспечивает смещение фазы напряжения, подводимого к одной из обмоток (напряжения) испытываемого 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).

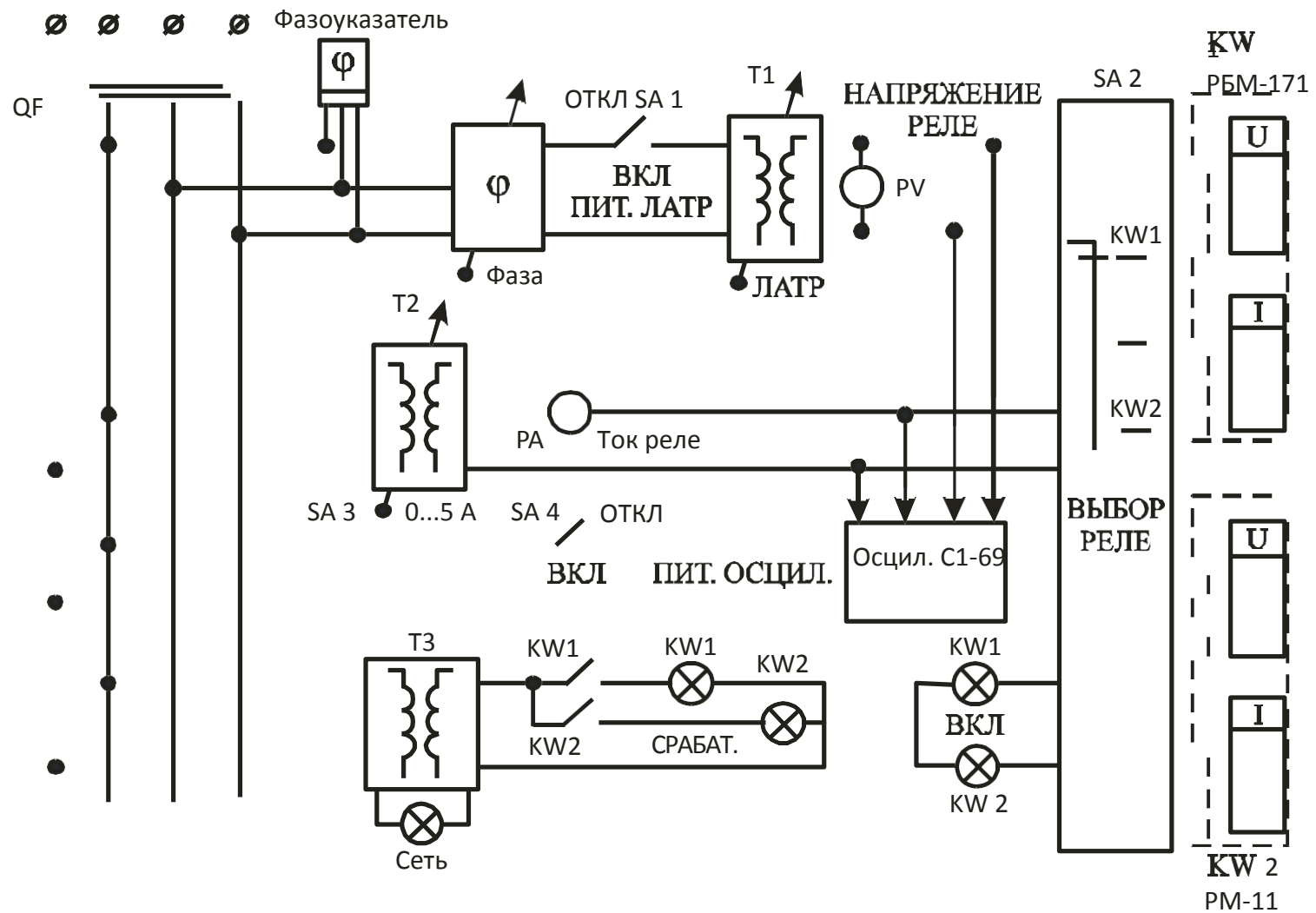


Рис. 12. Структурная схема стенда

Трансформатор ТЗ – вспомогательный трансформатор, обеспечивает питание сигнальных ламп.

Измерительные приборы: вольтметр (PV) – обеспечивает контроль величины напряжения на обмотке напряжения реле, амперметр (PA) – 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 подвижной 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 накоротко 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, диамагнитным) 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 (см. рис. 4, 11). 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  $0$  до  $360^\circ$  (затем в обратную сторону – от  $360$  до  $0^\circ$ ). При этом измеряют величины углов, при которых реле замыкает и размыкает контакты.

Угол максимальной чувствительности реле определяют подсчетом или графически (см. рис. 4). 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 максимальных 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 нагрузке 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 загроубляется из-за насыщения магнитопровода. Чувствительность реле определяется углом нагрузки 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 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 размыкания контактов.

7. Проверить зону действия реле (снять угловую характеристику).

Установив величину тока 5 А, изменять угол между током и напряжением от 0 до 360°. Поведение реле фиксируется через каждые 30°. Ток устанавливать в пределах от 1 до 5 А, а в момент изменения состояния контактной системы соответствующие углы за- фиксировать с точностью до 1° (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°.

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.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом при выполнении данной работы студент изучит принцип работы и конструкции индукционных реле направления мощности (серии РБМ); принцип работы и особенности реле направления мощности на интегральных микросхемах серии РМ-11 (РМ-12); ознакомится с основными параметрами реле направления мощности; получит практические навыки по проверке и регулировке параметров реле направления мощности.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов / В. А. Андреев. – М.: Высш. шк., 2007. – 639 с.

2. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем: учеб. для техн. / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

3. Линт, Г. Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах / Г. Э. Линт. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

4. Темкина, Р. В. Измерительные органы релейной защиты на интегральных микросхемах / Р. В. Темкина. – М.: Энергоатомиздат, 1985.