
Н. Ф. ШИШКИН

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ
ЗАЩИТА
ШАХТНЫХ СЕТЕЙ
ОТ ЗАМЫКАНИЯ
НА ЗЕМЛЮ**

44 - 65

ГОСГОРТЕХИЗДАТ 1960

Канд. техн. наук Н. Ф. ШИШКИН

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ
ЗАЩИТА
ШАХТНЫХ СЕТЕЙ
ОТ ЗАМЫКАНИЯ
НА ЗЕМЛЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ

Москва 1960

АННОТАЦИЯ

В брошюре приведено описание новых систем на полупроводниках быстродействующих защит низковольтных сетей с изолированной нейтралью от замыкания на землю. Описаны принципы работы схем защиты, выбор и расчет их элементов, а также приведены теоретические основы расчета как элементов, так и схемы в целом.

Рассмотрены конструкции аппаратуры, уже изготовленной и прошедшей промышленные испытания.

Брошюра рассчитана на инженерно-технических работников горной и других отраслей промышленности, эксплуатирующих электрические сети, а также может быть использована работниками соответствующих научно-исследовательских институтов.



3490 $\frac{5}{60}$

$\frac{01}{21111}$

~~K 313~~

~~60-~~

Ш 655

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение мощности электродвигателей приводов промышленных машин вызывает необходимость повышения напряжения низковольтных сетей с 380 до 660 в. Это обстоятельство требует уделить вопросам безопасности еще большее внимание.

Несмотря на ряд мер предосторожности и защиты от поражения электрическим током, случаи электротравматизма как на предприятиях, так и на шахтах все еще имеют место [1.] Другой задачей защиты сетей от замыкания на землю является частичное предупреждение пожаров и взрывов на предприятиях, имеющих пожаровзрывоопасную окружающую среду. В этом случае защита должна срабатывать при небольших токах утечки на землю, не способных воспламенить окружающую среду.

Следует отметить, что применение защиты от замыкания на землю несомненно повышает безопасность электроснабжения, но не может обеспечить ее полностью. Полная безопасность электроснабжения обеспечивается применением опережающего отключения электрических сетей [2].

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

Действие электрического тока на организм человека проявляется в сложных и многообразных формах. В этом отношении поражения электрическим током существенно отличаются от прочих производственных травм. Несмотря на многообразие форм поражения человека электрическим током, их обычно сводят к двум основным группам — внутреннее и внешнее поражения [3].

Соответственно с этим различают электрические удары, т. е. случаи, когда при прохождении тока поражается весь организм, и электротравмы, т. е. внешние местные поражения (ожог, металлизация кожи, электрический знак).

Научными исследованиями и изучением данных по электро-

травматизму установлено, что важнейшими факторами, определяющими исход поражения электрическим током, являются:

- 1) величина тока;
- 2) продолжительность воздействия тока;
- 3) частота и род тока;
- 4) путь тока;
- 5) индивидуальные свойства организма человека;
- 6) «неожиданность» прикосновения к токоведущим частям.

Величина тока. До сих пор между учеными нет единого мнения о величине тока поражения человека. Применяя термин «безопасный ток», часто имеют в виду отпускающий ток, при котором возможен самостоятельный отрыв от электродов.

Однако предел опасной величины силы тока изучен недостаточно, так как он находится в сложной зависимости от состояния здоровья человека, его утомленности (или возбужденности), физиологической особенности и поэтому в каждом случае может быть разным.

Многочисленные литературные данные дают весьма различные величины этих токов. Так, например, пределом безопасных токов для постоянных токов некоторые ученые считают ток, равный в среднем 60—70 *ма* [3].

Что касается безопасных токов при промышленной частоте, то по данным Н. А. Вигродика токи менее 25 *ма* являются безопасными, токи 25—50 *ма* представляют большую опасность, а 50—100 *ма* — смертельны.

Для шахтных условий в СССР при расчетах принимается за безопасный ток 30 *ма*. Во Франции для подземных условий декретом в 1935 г. установлена величина безопасного тока 25 *ма*. В Англии же для шахтных условий принимают за безопасный ток 50 *ма*.

Из перечисленных основных факторов нетрудно усмотреть, что при разработке защиты сетей можно учесть только три первых фактора. Причем третий фактор — частота и род тока — задан технологией производства и является постоянным. Путь тока, индивидуальные свойства и «неожиданность» являются случайными факторами, которые не могут быть заранее учтены. Таким образом, при разработке защиты можно оперировать только величиной тока и продолжительностью его воздействия.

Продолжительность воздействия тока. Исследования последних лет показывают, что при непродолжительном воздействии тока опасность смертельного поражения во многом зависит от того, с какой фазой сокращения сердца совпадает момент прохождения тока. Известно, что ритм сердечной деятельности складывается из последовательных сокращений и расширений предсердий и желудочков; так как расслабление предсердий продолжается несколько дольше сжатия желудочков, то некоторое время (0,1 сек.) сердце находится в стадии расслабления.

Оказывается, что именно в это время сердце обладает наибольшей чувствительностью к электрическому току, и при времени воздействия тока продолжительностью в 1 сек. прохождение тока не может не совпадать с чувствительной фазой, представляющей наибольшую опасность поражения. В случае несовпадения момента прохождения тока с расслабленной фазой (сокращение предсердий и желудочков) даже токи порядка 10 а не вызывают паралича.

Время действия является весьма важным фактором, и поэтому не удивительно, что в этой области было проведено много опытов и наблюдений (Вебер, Петров, Фрайбергер и другие). Весьма ценным является работа Дальцила, который на основании многочисленных опытов получил эмпирическую формулу [4]

$$I = \frac{2,168W + 12,8}{\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где t — время воздействия электрического тока;
 W — вес подопытного организма.

Принимая для человека средний вес 70 кг, получим

$$I = \frac{165}{\sqrt{t}}. \quad (2)$$

Опыты производились при длительности воздействия 0,03—3 сек., однако Дальцил считает возможным расширить шкалу. Он построил кривую безопасного тока, протекающего через человека, в зависимости от времени в диапазоне 0,005—5 сек. (рис. 1).

Необходимо отметить, что кривую Дальцила следует рассматривать только как качественную зависимость величины безопасного тока от времени его прохождения через тело человека.

Абсолютная же величина безопасного тока, видимо, может колебаться в некоторых пределах в зависимости от конкретного состояния организма человека в момент прикосновения его к токоведущим частям.

Из изложенного следует, что поражение человека током можно предупредить, идя двумя основными путями:

1) поддержание параметров сети в таких пределах, чтобы прикосновение к токоведущим частям не вызывало протекания через тело человека тока более установленной длительно безопасной величины. Для осуществления этого необходима компенсация емкости сети и поддержание высокого уровня изоляции, что практически трудно осуществимо;

2) поддержание параметров сети в таких пределах, чтобы прикосновение к токоведущим частям не вызывало протекания

через тело человека тока более безопасной величины по времени действия его, равного полному времени снятия напряжения с сети.

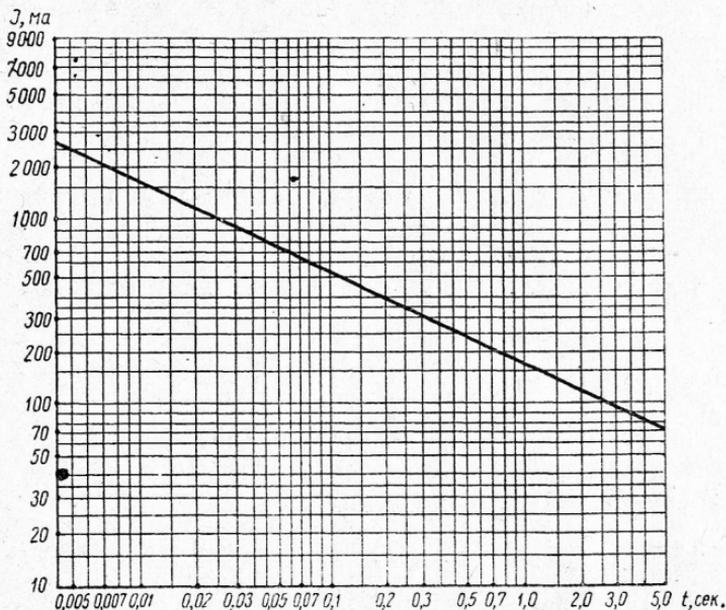


Рис. 1. Зависимость величины безопасного тока от времени протекания его через тело человека

Рассмотрим возможности предупреждения электротравматизма, используя указанные выше направления. Для этого необходимо прежде всего рассмотреть вопрос о токах утечки на землю.

ТОКИ УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ

Исследование токов утечки на землю имеет своей главной целью установить взаимосвязь между токами утечки и сопротивлением изоляции сети [2]. Решение этого вопроса дает критерии для оценки оптимальных свойств защиты от утечек на землю.

Ток утечки, т. е. ток, ответвляющийся через сопротивление изоляции в землю по всей длине провода, определяется как активной, так и емкостной составляющими сопротивления изоляции.

Утечки тока разделяются на сосредоточенные и распределенные. Емкостные утечки всегда являются распределенными. Активные утечки могут быть и сосредоточенными и распределенными. Картина линий тока вне фазовых проводов определяется конкретными данными о состоянии изоляции системы, распределением емкостей, конфигурацией сети заземления и

свойствами грунтов. Так как токи утечки на землю, как правило, невелики, то опасность для человека представляют главным образом токи сосредоточенных утечек. Распределенные утечки создают в земле токи очень малой плотности, а следовательно, и разности потенциалов, возникающие при этом, также малы и менее опасны.

Наиболее опасным является случай, когда в какой-либо из фаз системы имеется лишь одна сосредоточенная активная утечка. При неблагоприятных условиях этот ток может проходить через человека или вызвать электрическую искру.

Проведенные исследования показали, что между токами утечки и величиной общего сопротивления относительно земли в трехфазной сети нет прямой зависимости [2].

Величина тока, проходящего через человека при его прикосновении к поврежденному участку изоляции, может быть различной при одной и той же величине общего сопротивления изоляции сети относительно земли. Это объясняется тем, что величина тока утечки зависит не только от общей величины сопротивления, но и от величины асимметрии фаз относительно земли. Кроме того, наличие в сетях емкости существенно меняет условия электробезопасности при прикосновении человека к одной из фаз сети. На рис. 2, 3 и 4 приведены кривые зависимости между критическим сопротивлением изоляции и емкостью сети при разных значениях величины напряжения сети [1].

Из проведенных кривых видно, что при емкости сети относительно земли выше критического значения (для определенного значения напряжения сети и принятой величины безопасного тока) условия безопасности прикосновения к токоведущим частям отсутствуют. Так, например, величина критической емкости сети для напряжения сети 660 в и величины безопасного

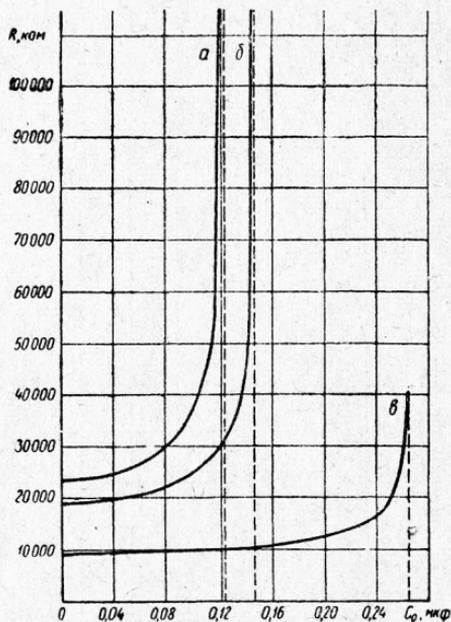


Рис. 2. Кривые зависимости между критическим сопротивлением изоляции и емкостью сети, обеспечивающими безопасность прикосновения к токоведущим частям при напряжении 380/220 в:

a — кривая для безопасного тока, равного 25 ма, *б* — кривая для безопасного тока, равного 30 ма, *в* — то же, при токе 50 ма

При построении кривых сопротивление тела человека принято равным $R_{\text{чел}} = 1300$ ом. Кривые построены в предположении равенства сопротивлений изоляции всех трех фаз между собой

тока 30 ма составляет всего 0,085 мкф. Отметим, что в участковых шахтных сетях Подмосковного бассейна емкость сети относительно земли доходит до 5 мкф.

Можно было бы предполагать, что при наличии емкости в сети безопасность прикосновения к токоведущим частям может быть достигнута поддержанием высокого уровня изоляции сети.

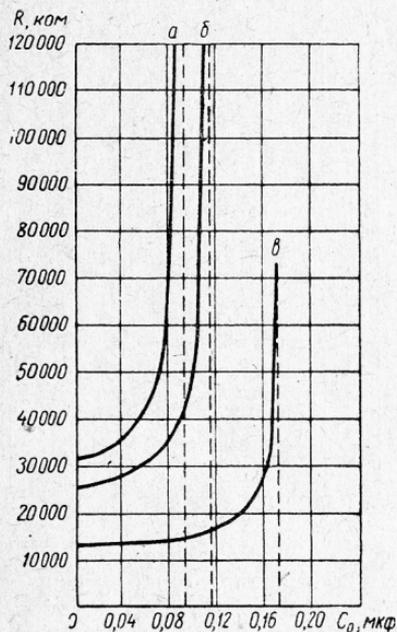


Рис. 3. Кривые зависимости между критическим сопротивлением изоляции и емкостью сети при напряжении 500 в: а — кривая для безопасного тока 25 ма, б — кривая для безопасного тока 30 ма, в — кривая для безопасного тока 50 ма $R_{чел} = 1300$ ом. Сопротивления изоляции фаз приняты равными между собой

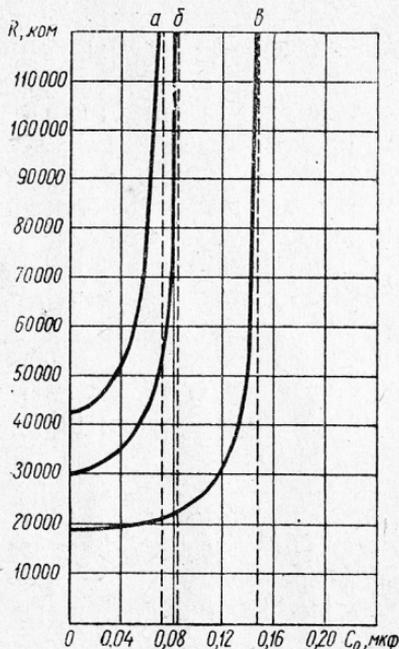


Рис. 4. Кривые зависимости между критическим сопротивлением изоляции и емкостью сети при напряжении 660/380 в $R_{чел} = 1300$ ом. Сопротивления изоляции фаз сети приняты равными между собой

Однако проведенные исследования показали, что при некоторой величине емкости повышение сопротивления изоляции в системе с изолированной нейтралью уменьшает токи, проходящие через человека, только в том случае, если емкость сети не превышает некоторого критического значения, что иллюстрируется кривыми рис. 5 (где критическое значение емкости не превышает 0,5 мкф).

При наличии же емкости в сети относительно земли больше 0,5 мкф увеличение сопротивления изоляции не уменьшает, а увеличивает ток, проходящий через человека [5].

Приведенные на рис. 5 кривые построены исходя из условий, что сопротивление тела человека равно 1000 ом. Если сопротивление будет порядка 10 000 ом, то увеличение тока, проходящего через тело человека, с повышением сопротивления изоляции сети, начинается при емкости сети $\approx 0,1$ мкф.

Известно, что емкость кабельных сетей участков шахт в большинстве случаев превышает 0,5 мкф. Следовательно, в се-

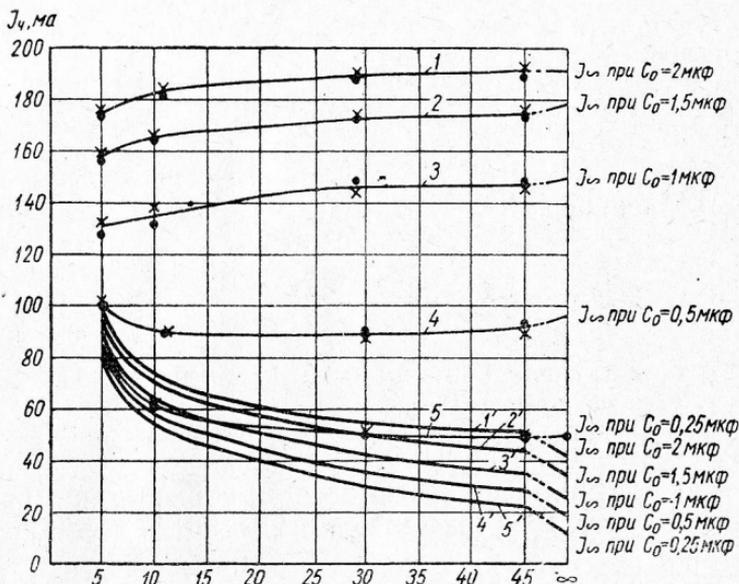


Рис. 5. Кривые зависимости величины тока, протекающего через тело человека, и сопротивления изоляции сети при определенной величине емкости сети относительно земли в системе с изолированной нейтралью (1—5) и в системе, заземленной через индуктивное (компенсация) сопротивление (1'—5').

Точками показаны результаты эксперимента, крестиками — результаты теоретических подсчетов

тях с емкостью настройка реле на срабатывание по активному сопротивлению не может обеспечить безопасности от поражения электрическим током.

Ниже приводятся формулы для вычисления токов, протекающих через человека при его прикосновении к токоведущим частям.

Напряжение, под которое попадает человек, коснувшийся фазы, независимо от способа выполнения нейтрали, в общем виде можно выразить следующим соотношением

$$\dot{U}_{\text{чел}} = U_{\text{ф}} \frac{y_2(1-a^2) + y_3(1-a) + y_0}{y_1 + y_2 + y_3 + y_{\text{чел}} + y_0}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ф}}$ — фазовые напряжения сети;
 y_1, y_2, y_3 — полные приводимости изоляции фаз сети относительно земли;

$y_{\text{чел}}$ — полная проводимость тела человека;
 y_0 — полная проводимость рабочего заземления;
 a — фазный множитель, учитывающий сдвиг фаз на 120° .

Ток, проходящий через человека, в этом случае будет равен

$$I_{\text{чел}} = U_{\phi} y_{\text{чел}} \frac{y_2(1-a^2) + y_3(1-a) + y_0}{y_1 + y_2 + y_3 + y_{\text{чел}} + y_0}, \quad (4)$$

или

$$I_{\text{чел}} = U_{\phi} y_{\text{чел}} \frac{y_2 + y_3 + y_0 + a(ay_2 - y_3)}{y_1 + y_2 + y_3 + y_{\text{чел}} + y_0}. \quad (5)$$

В системе с изолированной нейтралью при отсутствии емкости сети относительно земли $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ ток, проходящий через человека, определяется по формуле

$$I_{\text{чел}} = U_{\phi} g_{\text{чел}} \frac{g_2(1-a^2) + g_3(1-a)}{g_1 + g_2 + g_3 + g_{\text{чел}}}, \quad (6)$$

где g_1, g_2, g_3 — активные проводимости изоляции фаз относительно земли;

$g_{\text{чел}}$ — активная проводимость тела человека.

Выражая активные проводимости g через сопротивления изоляции фаз сети r , выражение (6) в действительной форме примет вид

$$I_{\text{чел}} = \frac{\sqrt{3} U_{\phi} r_1 \sqrt{r_2^2 + r_2 \cdot r_3 + r_3^2}}{R_{\text{чел}} (r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3) + r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}. \quad (7)$$

Если $r_1 = r_2 = r_3 = r$, то формула (7) примет вид

$$I_{\text{чел}} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{\text{чел}} + r} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{чел}} + \frac{r}{3}}, \quad (8)$$

где r — активное сопротивление изоляции фазы сети;

$R_{\text{чел}}$ — сопротивление тела человека.

В наиболее тяжелом случае, когда человек касается фазы I , сопротивление изоляции которой равно бесконечности $r_1 = \infty$, а сопротивления изоляции двух других фаз равны $r_2 = r_3$, безопасное прикосновение можно обеспечить (при отсутствии емкости сети относительно земли), если величина сопротивления изоляции двух других фаз будет не меньше критического значения

$$r_k = \frac{3U_{\phi}}{I_{\text{чел}}(6)} - 3R_{\text{чел}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{чел}}(6)$ — величина тока, принятого за безопасный.

Прикосновение человека к корпусу оборудования, случайно оказавшемуся под напряжением, будет безопасным, если соблюдается условие

$$I_3 \leq \frac{U_{\text{пр}}}{R_3} \quad (10)$$

или

$$r \geq \frac{\bar{R}_3 (3U_{\text{ф}} - 2U_{\text{гр}})}{U_{\text{пр}}}, \quad (11)$$

где $U_{\text{пр}}$ — безопасное напряжение прикосновения;
 R_3 — сопротивление заземления.

Ток, проходящий через тело человека при касании его к токоведущей части фазы в системе с изолированной нейтралью, при равенстве емкостей в фазах ($C_1 = C_2 = C_3 = C$) и неравенстве проводимостей изоляций фаз ($g_1 \neq g_2 \neq g_3 \neq g$) определится из формулы

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{ф}} \sqrt{3} g_{\text{чел}}}{2} \sqrt{\frac{3(g_2 + g_3)^2 + [2\sqrt{3}\omega C_0 - (g_2 - g_3)]^2}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_{\text{чел}})^2 + 9\omega^2 C^2}}. \quad (12)$$

В случае равенства емкостей ($C_1 = C_2 = C_3 = C$) и изоляции фаз относительно земли ($g_1 = g_2 = g_3 = g$) формула (12) примет вид

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{чел}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r + 6R_{\text{чел}})}{g(1 + r^2\omega^2 C^2)R_{\text{чел}}^2}}}. \quad (13)$$

В общем случае, когда $C_1 \neq C_2 \neq C_3 \neq C \neq 0$ и $g_1 \neq g_2 \neq g_3 \neq g \neq 0$, ток, проходящий через человека, определяется из формулы

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{ф}} g_{\text{чел}}}{2} \sqrt{\frac{[3(g_2 + g_3) + \sqrt{3}\omega(C_3 - C_2)]^2 + (g_1 + g_2 + g_3 + g_{\text{чел}})^2 + \omega^2(C_1 + C_2 + C_3)^2 + [\sqrt{3}(g_2 - g_3) + 3\omega(C_2 + C_3)]^2}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_{\text{чел}})^2 + \omega^2(C_1 + C_2 + C_3)^2}}}. \quad (14)$$

При прикосновении к фазе с глухим заземлением нейтрали ток, протекающий через тело человека, определяется по формуле (при $C_1 = C_2 = C_3 = C$ и $g_1 \neq g_2 \neq g_3 \neq g \neq 0$)

$$I_{\text{чел}} = U_{\text{ф}} g_{\text{чел}} \sqrt{\frac{\left[g_0 + \frac{3}{2}(g_2 + g_3)\right]^2 + \left[3\omega C - \frac{\sqrt{3}}{2}(g_2 - g_3)\right]^2}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_0 + g_{\text{чел}})^2 + 9\omega^2 C^2}}, \quad (15)$$

где g_0 — активная проводимость рабочего заземления;
 ω — круговая частота тока (для сети с $f = 50$ пер/сек
 $\omega = 314$).

При системе нейтрали, заземленной через индуктивное сопротивление, ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к фазе, можно выразить уравнением (при $C_1 = C_2 = C_3 = C$ и $g_1 \neq g_2 \neq g_3 \neq 0$)

$$I_{\text{чел}} = U_{\phi} g_{\text{чел}} \sqrt{\frac{\left(\frac{3}{2} g_2 + \frac{3}{2} g_3 + g_0\right)^2 + \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L_{\kappa}}\right)^2 + (g_1 + g_2 + g_3 + g_0 + g_{\text{чел}})^2}{\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L_{\kappa}} + \frac{\sqrt{3}}{2} g_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} g_3\right)^2}} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \frac{\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L_{\kappa}}\right)^2 + (g_1 + g_2 + g_3 + g_0 + g_{\text{чел}})^2}{\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L_{\kappa}}\right)^2 + (g_1 + g_2 + g_3 + g_0 + g_{\text{чел}})^2} \quad (16)$$

Перейдем теперь к рассмотрению вопросов безопасности с учетом фактора времени.

Из приведенной на рис. 1 кривой видно, что при времени действия тока на организм человека, равном 5 мсек, величина безопасного тока равна 2,3 а. Следовательно, снижения опасности можно достичь увеличением скорости срабатывания защиты. Из всего комплекса вопросов мы рассмотрим только быстродействующие схемы защиты от замыкания на землю.

Известно, что время срабатывания защитных устройств РУВ и РУН весьма велико и равно около 0,25 сек. Поэтому снижение времени срабатывания защитного устройства является крайне необходимым.

Разработку защиты от токов утечек в сетях с изолированной нейтралью и напряжением до 1000 в целесообразно вести в двух направлениях — для использования защиты в сетях с обычными фидерными автоматами и для сетей с быстродействующими фидерными автоматами.

Назовем первую схему защиты быстродействующей, а вторую — сверхбыстродействующей защитой от замыкания на землю.

Защита от замыкания на землю может быть осуществлена при следующих принципах питания схемы:

а) наложением постоянного тока на переменный (защищаемой сети);

б) наложением тока высокой частоты на переменный ток защищаемой сети;

в) использованием токов и напряжений защищаемой сети.

Наложение тока высокой частоты существенно усложняет схему защиты, поэтому этот вариант питания схемы защиты не исследовался.

Поскольку время срабатывания защиты должно быть порядка одной миллисекунды, применение реактивных элементов в схемах защиты является нежелательным. Поэтому исследовались схемы защиты с активными элементами с применением полупроводников.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА СХЕМ С ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

За последнее время в релейной защите находят применение полупроводники, что позволяет во многих случаях существенно улучшить защитные характеристики реле, а также создать новые защитные устройства с малым потреблением мощности и небольшими внешними размерами.

Полупроводниковые приборы являются типичными нелинейными элементами, что затрудняет их расчет и определение общих взаимосвязей.

Анализ электрических цепей с полупроводниковыми элементами показывает, что принцип наложения может быть применен и для расчета схем с полупроводниками, если каждый нелинейный элемент схемы (полупроводник) взять с тем сопротивлением, которое он будет иметь в суммарном режиме, или же если принять полупроводники с идеальными характеристиками.

Обычно зависимость сопротивления вентиля от величины и направления протекающего тока дается в виде графика. При этом достаточно простых аналитических выражений, отображающих эту зависимость, нет. Поэтому более или менее точный расчет может быть произведен лишь графически и то только для простейших схем.

Следует иметь в виду при этом, что выбор оптимальных схем и решение многих других вопросов не требует большой точности. Наиболее важно установить характер взаимной зависимости основных величин. Уточнение полученных данных производится на основании экспериментов или же графическим расчетом. По этим соображениям при расчете схем с полупроводниками часто принимают приближенные характеристики вентиля, которые называют идеальными. Это означает, что вентиль имеет бесконечно малое прямое и бесконечно большое обратное сопротивление. Если в расчетной схеме сопротивление полупроводников составляет относительно небольшую долю от общего сопротивления, то при выводе общих соотношений и определений характера взаимной зависимости входящих в схему величин замена реальных полупроводников идеальными дает вполне удовлетворительные по точности результаты.

В литературе отсутствуют указания о методе расчета схем с вентилями в общем случае. Приводятся только частные решения для конкретных схем.

В настоящее время для расчета схем с идеальными вентилями даются следующие рекомендации:

а) следует задаться режимом каждого из вентилях, т. е. принять, какие из вентилях схемы открыты и какие закрыты;

б) при сделанном предположении следует определить токи и напряжения на элементах схемы;

в) если через все вентили, которые приняты открытыми, протекает ток в прямом направлении, а на всех вентилях, которые

приняты закрытыми, имеется обратное напряжение, то сделанное предположение является правильным и расчет может считаться законченным;

г) если даже через один вентиль, который был принят открытым, ток, согласно расчету, протекает в обратном направлении или хотя бы на одном вентиле, который был принят закрытым, имеется, согласно расчету, прямое напряжение, сделанное предположение является неправильным. В этом случае следует принять другой режим работы вентилях.

В схемах защиты с выпрямителями в трех фазах имеют место несимметричные режимы, поэтому необходимо рассмотреть несимметричные режимы в сети и их влияние на работу выпрямительного моста. Для кратко-

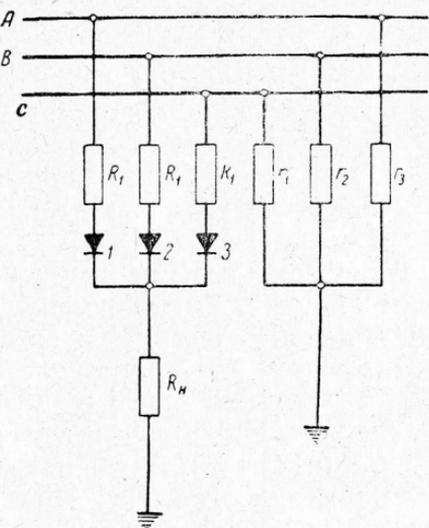


Рис. 6. Схема защиты ЗВ:

R_1 — ограничительные сопротивления,
 R_N — сопротивление нагрузки, 1, 2 и 3 — полупроводниковые элементы — вентили, r_1, r_2, r_3 — сопротивления изоляции фаз сети

сти написания схему защиты, показанную на рис. 6, назовем схемой ЗВ (по числу включенных выпрямителей) и рассмотрим на ее примере основные режимы работы схем с полупроводниками.

При расчете схемы с полупроводниками необходимо прежде всего знать, в каком режиме нагрузки работают полупроводники.

Для любого вида нагрузки выпрямительных мостов существуют два вида граничных режимов:

а) напряжение на входе моста близко к синусоидальному;

б) ток на входе моста близок к синусоидальному.

С физической точки зрения такое разделение режимов характеризует источник питания мостовой схемы.

Практически первый режим характеризуется подключением мостовой схемы к сети через малые сопротивления R_1 ; падение напряжения на них невелико и почти все напряжение приложено к входу моста.

Второй режим означает подключение мостовой схемы

к источнику тока, при этом большую долю напряжения воспринимает сопротивление R_1 , и так как оно линейно, то ток в цепи мало отличается от синусоидального. В реальных схемах могут встречаться как граничные режимы работы, так и промежуточные, между двумя названными граничными режимами.

Из теории расчета схем с полупроводниками известно, что расчет таких схем должен производиться с учетом действительного режима работы данной конкретной схемы.

При расчете схемы выбор одного из граничных режимов зависит от того, где больше сопротивление — на выходе или на входе моста. При равенстве этих сопротивлений ошибка в расчете параметров получается небольшой, если вести расчет по любому из указанных режимов.

При разработке схем защиты с полупроводниками режим работы ее можно создать соответствующим выбором параметров. Поэтому следует выяснить, какой из режимов работы схемы для защиты с тремя вентилями является предпочтительным.

В схемах защиты с тремя вентилями могут быть применены любые полупроводниковые приборы. Из теории этих приборов известно, что при малых нагрузках на полупроводники (против их номинального тока) относительное выпрямляющее действие вентиля существенно снижается, и выпрямленный ток может оказаться одного порядка с обратным током. Величина токов в полупроводниках, включенных в схему защиты, составляет несколько миллиампер, что диктуется условиями безопасности. Поэтому желательно иметь такой режим работы схемы, который при одинаковых эффективных значениях тока на выходе выпрямительного моста имеет наибольшее амплитудное значение тока на его входе.

Как было указано выше, при синусоидальном напряжении на входе (когда R_1 мало) каждый из вентилях пропускает поочередно ток в цепь нагрузки в течение одной трети периода, измеряемой углом $\frac{2\pi}{3}$. В эту треть периода ток проходит только через тот вентиль, который связан с фазой наивысшего напряжения. Через два других вентиля ток в эту треть периода проходить не может. Работа вентилях иллюстрируется диаграммами напряжений и токов, приведенными на рис. 7.

Эффективное значение тока $I_{нэф}$ для схемы с синусоидальным напряжением на входе выпрямительного моста определяется из уравнения

$$I_{нэф}^2 = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} I_m^2 \cos^2 \alpha \, d\alpha \approx 0,704 I_m^2; \quad (17)$$

$$I_{нэф} = 0,84 I_m,$$

где I_m — амплитудное значение переменного тока.

Для режима работы схемы при синусоидальном токе на входе выпрямителя характер кривой выпрямленного тока на выходе выпрямителя будет иным (рис. 8).

Это обусловлено тем, что через каждый вентиль прямой ток будет проходить половину, а не треть периода, как это имело место при предыдущем режиме работы схемы.

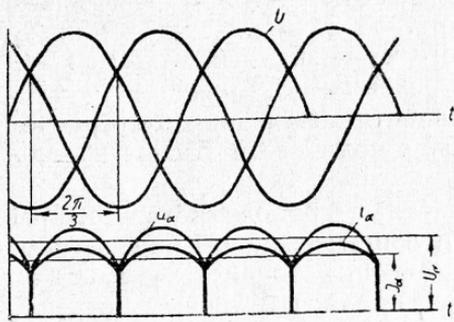


Рис. 7. Диаграммы напряжений и токов выпрямительного моста, работающего на активное сопротивление, при синусоидальном напряжении на входе моста:

U — синусоидальное подводимое напряжение, u_α — мгновенное значение выпрямленного напряжения, i_α — мгновенное значение выпрямленного тока, I_α — среднее значение выпрямленного тока, U_α — среднее значение выпрямленного напряжения

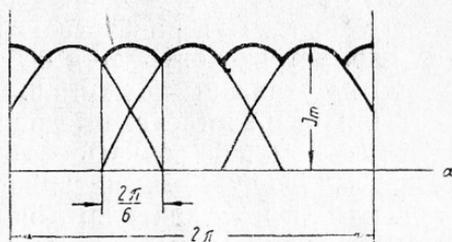


Рис. 8. Диаграмма токов выпрямительного моста, работающего на активное сопротивление, при синусоидальном токе на входе моста: I_m — амплитудное значение выпрямленного тока

Для режима с синусоидальным током на входе выпрямителя эффективное значение тока определяется из уравнения

$$I_{T_{эф}}^2 = \frac{6}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} I_m^2 \cos^2 \alpha \, d\alpha \approx 0,913 I_m^2; \quad (18)$$

$$I_{T_{эф}} = 0,95 I_m.$$

Сопоставляя эффективные значения токов для режима с синусоидальным напряжением и синусоидальным током на входе выпрямителя, получим

$$\frac{I_{T_{эф}}}{I_{вэф}} = \frac{0,95}{0,84} = 1,14. \quad (19)$$

Отсюда следует, что при синусоидальном напряжении на входе выпрямителя амплитудное значение тока в 1,14 раза больше, чем для режима с синусоидальным током на входе выпрямителя.

Следовательно, если в схеме применены полупроводниковые приборы, через которые протекает небольшой ток по сравнению с номинальным, то режиму работы с синусоидальным напряжением на входе выпрямителя следует отдать предпочтение перед режимом работы с синусоидальным током.

Однако следует иметь в виду, что этот вывод сделан только с учетом улучшения выпрямляющего действия полупроводниковых приборов. При разработке схемы следует учитывать также и другие не менее важные факторы, влияющие на выбор параметров схемы. Прежде всего отметим, что увеличение амплитудного значения тока в режиме синусоидального напряжения на 14% по сравнению с режимом синусоидального тока в большинстве случаев может оказаться несущественным. Так, например, при применении диодов Д7Ж с номинальным током 300 *ма* и их нагрузке в схеме защиты до 5 *ма* будет совершенно несущественно, если увеличить амплитуду тока на 14%, т. е. до 5,7 *ма*. В обоих режимах выпрямляющее действие диода будет практически одинаково. Кроме того, не следует упускать из виду и того, что в режиме с синусоидальным напряжением пульсация выпрямленного тока больше, чем в режиме синусоидального тока. Укажем еще на весьма важный фактор, оказывающий решающее влияние на работу полупроводниковых приборов — температурную зависимость их характеристик. При небольших величинах сопротивлений R_1 неизбежно повышается нагрев окружающей среды, что отрицательно сказывается на работе диодов.

Поэтому при разработке схем с полупроводниками следует учитывать все факторы, оказывающие влияние на работу диодов; в большинстве случаев режим синусоидального тока на входе выпрямителя будет предпочтительней режима синусоидального напряжения. В большинстве реальных схем защиты полупроводники работают в промежуточном режиме; расчет можно вести по режиму синусоидального напряжения на входе выпрямителя.

Отметим, что включение ограничительного сопротивления R_1 совершенно необходимо, так как при его отсутствии пробой одного из диодов приведет к междофазовому короткому замыканию, что является недопустимым.

Применение в этом случае плавких предохранителей является нецелесообразным.

СХЕМА ЗАЩИТЫ ЗВ

Схема защиты от замыканий на землю с применением полупроводников, показанная на рис. 6, была предложена еще в 1938 г.

Проведем анализ схемы при работе в стационарном режиме и питании ее синусоидальным напряжением. Кроме того, примем,

что сопротивления изоляции сети r_1, r_2, r_3 , нагрузки R_n и ограничительные сопротивления R_1 являются активными.

Из теории трехфазного выпрямления известно, что при подведении к схеме симметричного синусоидального напряжения в течение трети периода напряжение одной из фаз будет выше напряжения двух других фаз. В эту треть периода ток будет проходить только через тот вентиль, который связан с фазой наивысшего напряжения. Два остальных вентиля будут закрыты и на них будет действовать обратное напряжение. Это положение относительно одного открытого вентиля и наличия двух закрытых (кроме моментов перехода тока с одного вентиля на другой) является для данного режима работы вентилях общим для трехфазных сетей, так как при двух открытых вентилях возникло бы короткое замыкание между фазами.

Поскольку общая точка вентилях при открытом вентиле 1 (см. рис. 6) будет иметь в рассматриваемом случае потенциал фазы A , обратные напряжения на вентилях 2 и 3 равны соответственно мгновенным значениям напряжения U_{AB} и U_{AC} . Значение выпрямленного напряжения, приложенного к схеме, равно в данном случае мгновенному значению напряжения фазы A .

Выпрямленное напряжение при симметричном подведенном напряжении. Известно, что величина потенциалов фаз в трехфазной системе по отношению к заземленной точке схемы защиты равна фазовому напряжению. Следовательно, векторы напряжений, которые обуславливают ток через вентили 1, 2 и 3, будут определяться геометрической суммой линейных напряжений, т. е. будут равны фазовым напряжениям.

Векторы напряжений всех фаз по абсолютной величине будут равны и сдвинуты друг относительно друга на 120° , как это показано на рис. 7.

Продолжительность выпрямления напряжения одной фазы равна $\frac{2\pi}{3}$, т. е. 120° .

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется интегрированием огибающей кривой выпрямленных напряжений за один период

$$U_{cp} = \frac{3}{2\pi} \int_{30}^{150} \sqrt{2} U_{\phi} \sin \alpha d\alpha = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{2\pi} U_{\phi} \approx 1,17U_{\phi}; \quad (20)$$

$$U_{cp} = 1,17U_{\phi}.$$

Величина тока в реле при режиме синусоидального тока на входе выпрямителя может быть вычислена, исходя из следующих соображений.

Действующее значение синусоидального фазового тока можно вычислить по формуле

$$I = \frac{U_{\phi}}{R + R_{\text{из}}}, \quad (21)$$

где R — общее сопротивление схемы защиты;
 $R_{\text{из}}$ — сопротивление изоляции сети.

Среднее значение тока на выходе выпрямителя

$$I_{\text{ср}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \approx 1,35I. \quad (22)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя

$$U_{\text{ср}} = 1,35I_{\text{ср}} \cdot R_{\text{н}}, \quad (23)$$

где $R_{\text{н}}$ — суммарное значение сопротивления нагрузки.

Постоянная составляющая мощность нагрузки

$$S = U_{\phi} I_{\text{ср}} = \frac{18}{\pi^2} I^2 R_{\text{н}} \approx 1,82I^2 R_{\text{н}}. \quad (24)$$

Расчет параметров схемы в режиме синусоидального тока следует применять только при $R_1 \geq R_{\text{н}}$.

Выпрямленное напряжение при несимметричном подведенном напряжении. При несимметричном снижении сопротивлений фазовой изоляции сети напряжение, подведенное к схеме ЗВ, будет несимметричным. Поэтому представляет интерес рассмотрение изменения величины среднего выпрямленного напряжения в зависимости от несимметрии подведенного к схеме напряжения.

Практический интерес в трехфазных сетях с изолированной нейтралью представляет предельный случай несимметрии напряжения — однофазное замыкание одной из фаз на землю. В этом случае величина потенциалов двух других фаз по отношению к заземленной точке схемы увеличится до линейного напряжения, как это показано на рис. 9, а.

Вектор напряжения $U_{\text{ВА}}$ будет опережать вектор $U_{\text{СА}}$ на угол 60° , как это показано на рис. 9, а. На рис. 9, б показана кривая выпрямленного напряжения, которая обуславливает протекание постоянного тока в схеме защиты. Из рис. 9, а видно, что вектор напряжения $U_{\text{ВА}}$ будет создавать ток через

вентиль B в пределах от 0 до 120° , а вектор напряжения U_{CA} через вентиль C — в пределах от 120 до 240° . Из рис. 9, б также видно, что в пределах от 240 до 360° ток в схеме защиты будет отсутствовать.

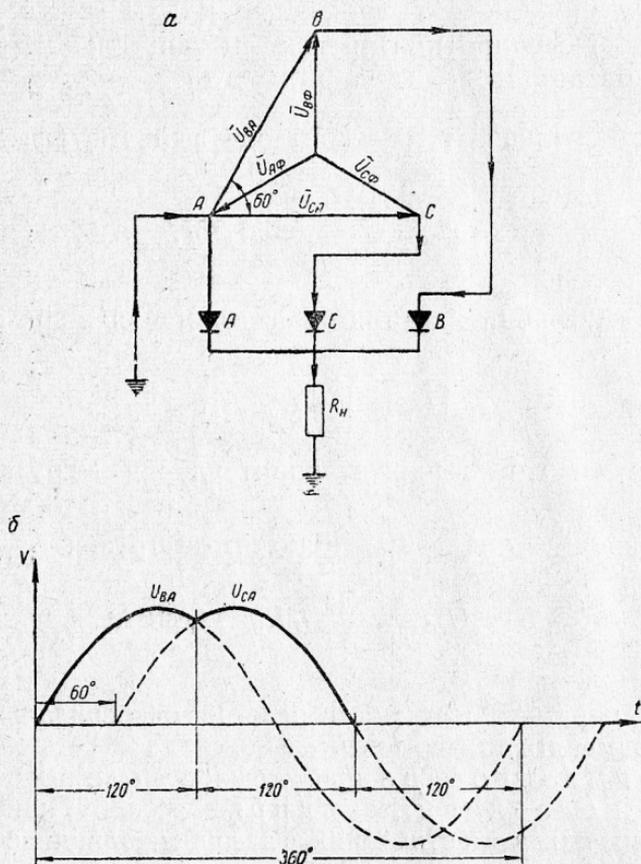


Рис. 9. Диаграмма напряжений при замыкании одной из фаз сети на землю:

a — диаграмма полноволновых напряжений к выпрямительному мосту, b — диаграмма выпрямленных напряжений

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется интегрированием кривой выпрямленного напряжения

$$U'_{\text{ср}} = \frac{3}{2\pi} \int_0^{120} U_{ABm} \sin \alpha \, d\alpha = 1,17U_{\text{ср}}; \quad (25)$$

$$U_{\Phi_1} = 1,17U_{\Phi}.$$

Из сопоставления (20) с (25) видно, что средние выпрямленные напряжения равны. Следовательно, величина среднего вы-

прямоугольного напряжения не зависит от однофазной утечки на землю. На основании этих расчетов можно сделать весьма важный практический вывод: схема защиты ЗВ будет реагировать на общую величину сопротивления изоляции. Полученный теоретический вывод хорошо согласуется с экспериментальными данными. В табл. 1 приведены данные замеров токов в реле при различной величине сопротивления изоляции фаз.

Таблица 1

Сопротивление изоляции, ком				Ток в реле, ма
r_1	r_2	r_3	$R_{из}$	
10,5	10,5	10,5	3,5	31,0
100	13,2	5,0	3,5	31,0
100	38,4	4,0	3,5	31,0

Из приведенных в таблице данных видно, что ток в реле зависит от величины общего сопротивления и не зависит от асимметрии сопротивлений изоляции фаз.

На основании изложенного можно написать расчетную формулу для вычисления тока в реле

$$I_p = \frac{U_{cp}}{R_{общ}}, \quad (26)$$

где

$$R_{общ} = R + R_{из}.$$

Для схемы, показанной на рис. 6, сопротивления

$$R = R_1 + R_n \quad (27)$$

и

$$R_{из} = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}, \quad (28)$$

где R_1 — ограничительное сопротивление, включенное перед вентиляем;

R_n — добавочное сопротивление для ограничения тока замыкания на землю за счет включения защитного устройства и сопротивления приборов (реле, омметра и т. д.);

r_1, r_2, r_3 — сопротивления изоляции фаз.

Выбор величины тока, потребляемого схемой защиты. Любое защитное устройство, включенное между сетью и землей, создает дополнительные токи утечки на землю. Из этого факта, конечно, нельзя делать вывода, что подключение

к сети защитного устройства будет всегда сопровождаться увеличением электроопасности. Некоторое увеличение токов утечки на землю за счет подключения защитного устройства не имеет существенного влияния, в то время как применение защиты от замыкания на землю существенно повышает безопасность.

Сопротивление схемы ЗВ, включенной между сетью и «землей», необходимо выбирать достаточно большим для уменьшения влияния реле на первоначальное распределение токов утечки. Во всяком случае величина тока утечки при включении защитного устройства не должна возрастать более чем на 10—20% от величины тока, принятого за безопасный.

Средний выпрямленный ток, необходимый для срабатывания реле в схеме ЗВ, можно определить из следующего соотношения:

$$I_p = I_{cp} = \frac{1,17U_{\phi}}{R + R_{из}} \quad (29)$$

Следовательно, для определения величины сопротивления схемы R необходимо выбрать величину тока срабатывания реле.

Величина сопротивления изоляции сети $R_{из}$ выбирается по соображениям электробезопасности. Безопасный ток в расчетах принято считать равным 30 ма. Из этой величины необходимо вычесть ток срабатывания реле.

В схемах защиты с полупроводниками реле работает на постоянном токе. Величина безопасного тока в месте повреждения изоляции будет состоять из суммы токов

$$I_6 = \sqrt{I_{ут}^2 + I_p^2}, \quad (30)$$

откуда

$$I_{ут} = \sqrt{I_6^2 - I_p^2}, \quad (31)$$

где $I_{ут}$ — допустимая величина тока утечки.

Поскольку схема ЗВ реагирует на общее сопротивление изоляции сети, при определении сопротивления схемы R можно исходить из равенства сопротивлений фаз сети $r_1 = r_2 = r_3 = r$.

Величину сопротивления изоляции сети можно определить из формулы (8)

$$I_6 = \frac{U_{\phi}}{R_{чел} + \frac{r}{3}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{R_{чел} + R_{из}}, \quad (32)$$

где $R_{чел}$ — сопротивление тела человека;

$$\frac{r}{3} = R_{из}.$$

Решая совместно оба уравнения, получим

$$R_{из} = \frac{U_{\phi} - I_{ут} R_{чел}}{\sqrt{I_0^2 - I_p^2}}. \quad (33)$$

Решая совместно уравнения (29) и (33), получим формулу для определения величины сопротивления схемы

$$R = U_{\phi} \left(\frac{1,17 \sqrt{I_0^2 - I_p^2} - I_p}{I_p \sqrt{I_0^2 - I_p^2}} \right) + R_{чел}. \quad (34)$$

Для определения величины сопротивления схемы защиты R необходимо задаться:

а) величиной сопротивления тела человека (величину сопротивления тела человека в расчетах принято считать равной $R_{чел} = 1000 \text{ ом}$);

б) величиной безопасного тока, который в расчетах принимают равным 30 ма ;

в) величиной тока срабатывания реле, зависящей от типа принятого реле; реле можно выбирать с током срабатывания $5\text{--}10 \text{ ма}$.

Определение величины сопротивления R_1 . Решающим фактором при выборе величины сопротивления R_1 является тепловой режим элементов защиты. Известно, что полупроводниковые диоды допускают нагрев до 60° , поэтому величина сопротивлений должна выбираться с учетом наименьшего выделения тепла в окружающую среду.

Сопротивление R_1 подбирается по двум режимам его работы — нормальному и аварийному.

Максимальная величина тока через сопротивление в нормальном режиме определяется током срабатывания реле I_p . Выделяемая мощность на сопротивлении R_1 будет равна

$$P_1 = \frac{R_1 I_p^2}{3}. \quad (35)$$

Аварийный режим для сопротивления R_1 создается при пробое вентилях в одной из фаз выпрямительного моста. В этом случае через сопротивление R_1 длительное время будет проходить ток, эффективное значение которого приближенно можно определить из соотношения

$$I \approx \frac{\sqrt{3} U_{\phi}}{2R_1}. \quad (36)$$

Мощность, выделяемая на сопротивлении R_1 , будет равна

$$P = R_1 I^2 \quad (37)$$

или

$$R_1 = \frac{3U_\Phi^2}{4P_1}. \quad (38)$$

Сопротивление должно быть выбрано с мощностью рассеяния большей, чем выделяемая мощность при нормальном и аварийном режимах его работы, т. е. $P_{\text{рас}} > P_1$.

Выбор полупроводниковых диодов. Полупроводниковые диоды выбираются по величине допустимого обратного напряжения и тока нагрузки на них. Величина обратного напряжения на диоды в схеме ЗВ равна

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{2}U_\lambda = \sqrt{6}U_\Phi. \quad (39)$$

Величина тока нагрузки на диоды определяется, с одной стороны, током срабатывания выбранного реле, а с другой, — аварийным режимом при пробое диодов в одной из фаз выпрямительного моста. В этом случае через диоды в других фазах будет протекать суммарный ток, состоящий из тока, протекающего через поврежденный клапан, и тока нагрузки.

Примем приближенно, что продолжительность работы диода равна одному полупериоду (фактически будет 150° вместо 180°). Величину эффективного тока через диоды в других фазах можно приближенно определить из соотношения

$$I_d = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}U_\Phi}{4R_1}\right)^2 + I_p^2}, \quad (40)$$

где I_p — ток срабатывания реле.

Пример расчета схемы ЗВ на линейное напряжение сети 380 в.

Выбор реле. Выбираем быстродействующее реле типа РКН с током срабатывания $I_{\text{ср}} = 5 \text{ ма}$; сопротивление обмотки реле $R_p = 2000 \text{ ом}$.

Определение общего сопротивления схемы. Величину безопасного тока примем равной $I_6 = 30 \text{ ма}$; сопротивление тела человека $R_{\text{чел}} = 1000 \text{ ом}$.

По формуле (34) вычисляем общее сопротивление схемы

$$\begin{aligned} R &= U_\Phi \left(\frac{1,17 \sqrt{I_6^2 - I_p^2} - I_p}{I_p \sqrt{I_6^2 - I_p^2}} \right) + R_{\text{чел}} = \\ &= 220 \left(\frac{1,17 \sqrt{(30 \cdot 10^{-3})^2 - (5 \cdot 10^{-3})^2} - 5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3} \sqrt{(30 \cdot 10^{-3})^2 - (5 \cdot 10^{-3})^2}} \right) + \\ &\quad + 1000 = 45\,000 \text{ ом}. \end{aligned}$$

Сопротивление R_1 . Выбираем сопротивление типа МЛТ-2. Мощность, рассеиваемая на сопротивлении, не должна превышать 2 вт.

Величина сопротивления по условиям нормального режима

$$R_1 = \frac{3P_1}{I_p^2} = \frac{3 \cdot 2}{(5 \cdot 10^{-3})^2} = 240\,000 \text{ ом};$$

по условиям аварийного режима

$$R_1 = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{4R_1} = \frac{3 \cdot 220^2}{4 \cdot 2} = 18\,150 \text{ ом}.$$

В данном конкретном случае сопротивление в нормальном режиме находится в более легких условиях, так как для этого режима величина сопротивления получается больше.

Примем величину сопротивления с некоторым запасом по тепловому режиму $R_1 = 25\,000 \text{ ом}$.

Мощность, расходуемая на выделение тепла, в этом случае будет

$$P_1 = \frac{3U_{\Phi}^2}{4R_1} = \frac{3 \cdot 220^2}{4 \cdot 25 \cdot 10^3} = 1,45 \text{ вт}.$$

Для измерения сопротивления сети выбираем вольтметр постоянного тока типа М63 с внутренним сопротивлением $R_{\text{ом}} = 300 \text{ ом}$ (шкала вольтметра градуируется по сопротивлению).

Общая величина добавочного сопротивления

$$R_d = R - R_1 - R_p - R_{\text{ом}} = 45\,000 - 25\,000 - 2\,000 - 300 = 17\,700 \text{ ом}.$$

Для настройки реле выбираем регулируемое сопротивление типа ППЗ-11 (рассеиваемая мощность 3 вт), на 20 000 ом.

Выбор полупроводниковых диодов. Величина обратного напряжения на диодах определяется по формуле (39)

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{6}U_{\Phi} = \sqrt{6} \cdot 220 = 540 \text{ в}.$$

Выбираем диоды типа Д7Ж с величиной допустимого обратного напряжения 400 в и номинальным током 300 ма. Поскольку величина обратного напряжения равна 540 в, принимаем два последовательно включенных диода.

Величина тока через диоды в аварийном режиме определяется по формуле (40)

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}U_{\text{ф}}}{4R_1}\right)^2 + I_{\text{р}}^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1,73 \cdot 220}{4 \cdot 25\,000}\right)^2 + (5 \cdot 10^{-3})^2} = 6,3 \text{ ма},$$

что значительно меньше номинального тока диода.

Защитные характеристики схемы ЗВ. Выше было показано, что величина напряжения, выпрямленного трехфазным мостом тока, не зависит от асимметрии сопротивления изоляции сети. Это позволяет построить защитные характеристики схемы ЗВ. Под защитными характеристиками схемы подразумевается изменение тока в реле в зависимости от сопротивления изоляции сети.

Расчет защитных характеристик для различных напряжений сети выполнен по приведенным выше формулам. Для возможности сопоставления полученных результатов ток срабатывания реле, безопасный ток и сопротивление тела человека приняты равными для всех напряжений: $R_{\text{чел}} = 1000 \text{ ом}$; $I_{\text{р}} = 5 \text{ ма}$ и $I_{\text{б}} = 30 \text{ ма}$.

Общую величину сопротивления схемы определяем по формуле (34). Значения R для различных напряжений сети приведены в табл. 2.

Таблица 2

Напряжение сети, в . . .	127	220	330	500	660	1000
Сопротивление схемы R , ком .	15,7	26	45,0	59,0	77,0	116,5

Величина тока в реле в зависимости от напряжения и сопротивления изоляции сети вычислялись по формуле

$$I_{\text{р}} = \frac{1,17U_{\text{ф}}}{R + R_{\text{из}}}.$$

На рис. 10 показаны защитные характеристики схемы ЗВ для различных напряжений сети.

Из приведенных на рис. 10 кривых видно, что при изменении сопротивления изоляции сети от критического его значения, когда ток, проходящий через человека, не превышает 30 ма, до нуля (однофазное замыкание на землю), ток в реле изменяется в пределах от 5 до 5,8 ма для всех напряжений сети.

Такое незначительное изменение тока в реле (равное примерно 8—16% от номинального тока срабатывания реле) показывает, что чувствительность защиты в этом диапазоне изменения сопротивлений является недостаточной для всех величин напряжения сети.

В технике релейной защиты принято отстройку реле по току срабатывания производить по соотношению

$$I_{\text{ср}} = KI_{\text{р}}. \quad (41)$$

Коэффициент K принимается равным 1,2—1,4.

Из приведенных на рис. 10 кривых видно, что этому требованию не удовлетворяют защитные характеристики схемы ЗВ для

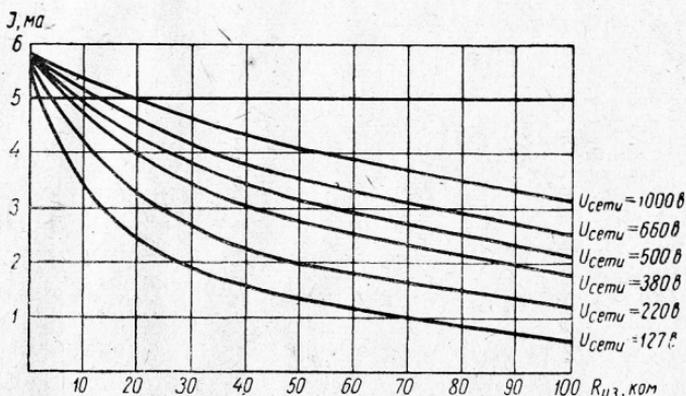


Рис. 10. Защитные характеристики схемы ЗВ при различных значениях напряжения сети

всех напряжений сети. Так, например, при напряжении сети 127 в и изменении сопротивления изоляции от критического значения до нуля ток возрастает на 8% от номинального тока срабатывания реле.

Отсюда следует, что применение защиты по схеме ЗВ для низковольтных сетей будет приводить к неоправданным отключениям: защита будет отключать сети при сопротивлении их изоляции выше критического значения.

Абсолютная же величина изменения сопротивлений от критического значения до нуля будет, конечно, зависеть от величины напряжения сети (что видно из пересечения кривых с прямой тока срабатывания реле).

Из анализа кривых зависимости тока реле от сопротивления изоляции также видно, что с увеличением напряжения сети чувствительность защиты снижается (выполживание кривых).

КОМБИНИРОВАННЫЕ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Схема защиты 4В

Известно, что симметричное снижение сопротивления изоляции сети, как правило, является распределенным. Такое снижение происходит, например, под влиянием влажности. Поднять симметричное сопротивление изоляции практически невозможно. Поскольку распределенные утечки имеют малую плотность,

опасность их меньше, чем сосредоточенных утечек. Кроме того, величина симметричного сопротивления изоляции зависит от общей длины сети. Чем разветвленное и длиннее электрическая сеть, тем меньше при прочих равных условиях величина общего симметричного сопротивления.

Поэтому сети с пониженным симметричным сопротивлением не следует отключать, так как, с одной стороны, в условиях производства не имеется никаких средств для увеличения уровня сопротивления изоляции таких сетей, а с другой — повышением величины сопротивления изоляции можно при большой емкости увеличить опасность.

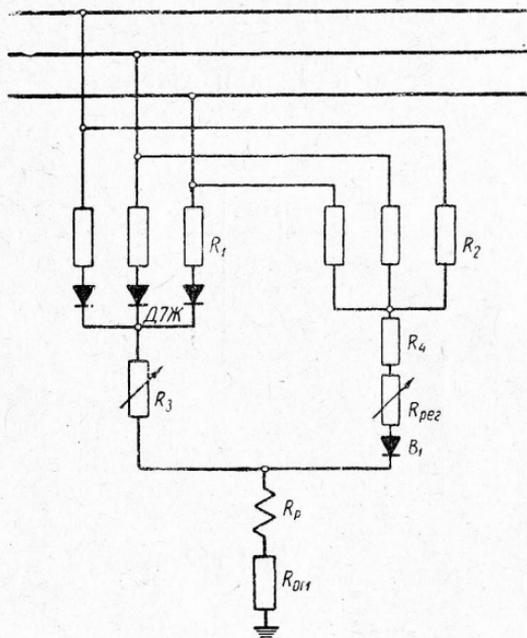


Рис. 11. Схема защиты 4В:

$R_п$ и $R_{ом}$ — сопротивления обмоток реле и омметра

Как показал опыт эксплуатации сетей Подмоскownого, Печорского и других угольных бассейнов, пробой изоляции на землю, как правило, происходит в одной из фаз сети. Однофазные утечки можно устранить, так как они всегда являются результатом сосредоточенных утечек, которые легко обнаружить. Таким образом, условия эксплуатации сетей требуют, чтобы защита от токов утечки реагировала не только на симметричные утечки, которые в большинстве случаев практически неустраняемы, но и на несимметричные утечки, которые можно обнаружить и устранить.

Такая защита позволит эксплуатировать сети с пониженным симметричным сопротивлением изоляции и обнаружить сосредоточенные утечки, представляющие главную опасность.

Теоретические основы защиты, реагирующей как на симметричные, так и на несимметричные утечки, были разработаны ВУГИ еще в 1954 г. [2].

На рис. 11 показана схема комбинированной защиты на полупроводниках. Схема имеет четыре выпрямителя и названа нами схемой защиты 4В.

Из рис. 11 видно, что трехфазный выпрямительный мост 3В и вентиль B_1 включены параллельно. Работа вентиля B_1 идентична работе выпрямителя на согласную э. д. с. и активное сопротивление на выходе выпрямителя. Работа выпрямителя B_1 , как и однофазного выпрямительного моста на согласную э. д. с. и активное сопротивление, может иметь два основных режима: синусоидальное напряжение и синусоидальный ток на входе выпрямителя. Практически в рассматриваемой схеме выпрямитель будет работать в смешанном режиме.

Максимальное обратное напряжение на выпрямителе B_1 будет равно амплитуде напряжения нулевой последовательности, т. е.

$$U_{обр} = \sqrt{2}U_{\phi}. \quad (42)$$

По существу схема 4В, состоит из двух частей: выпрямительного моста, подключенного к трем фазам сети, и параллельно подключенного ему фильтра нулевой последовательности.

Обе части схемы к реле подключены согласно, поэтому ток в реле будет равен сумме токов, протекающих через реле в схеме 3В и фильтр тока нулевой последовательности с вентилем B_1

$$I_p = I_{3_{ср}} + I_{0_{ср}}, \quad (43)$$

где $I_{3_{ср}}$ — среднее значение тока, протекающего через схему 3В;

$I_{0_{ср}}$ — среднее значение тока, протекающего через фильтр нулевой последовательности.

На рис. 12 приведена типичная осциллограмма токов в схеме защиты и фазовых напряжений сети при однофазном замыкании одной из фаз на землю. На осциллограмме показано двухполупериодное выпрямление тока нулевой последовательности.

Схема с однополупериодным выпрямлением получается проще (для ее осуществления требуется только один диод вместо четырех), поэтому защиту предпочтительнее осуществлять с однополупериодным выпрямлением тока, как показано на рис. 11.

Проведем анализ схем комбинированной защиты, применяя принцип наложения и допустив, что полупроводники имеют идеальную характеристику. Анализ схемы 3В, которая является составной частью комбинированной схемы защиты, был рассмот-

рен выше, поэтому проанализируем только вторую часть схемы с фильтром нулевой последовательности.

Принцип работы схемы 4В, сводится к следующему.

Первая часть комбинированной схемы с трехфазным выпрямительным мостом реагирует на общее сопротивление изоляции сети, как это было указано выше.

Вторая часть схемы будет реагировать на несимметричные снижения изоляции сети, что существенно улучшает защитные характеристики такого устройства. Реле будет срабатывать от суммарного тока, поступающего из обеих частей схемы.

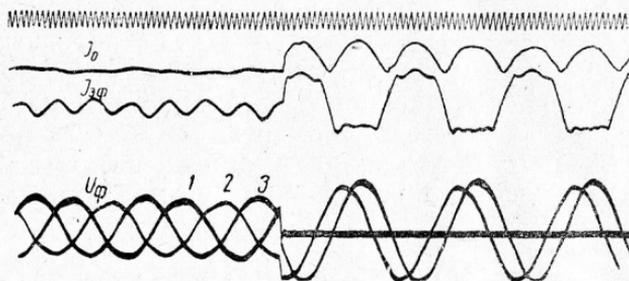


Рис. 12. Осциллограмма токов и напряжений в схеме 4В при однофазном замыкании одной из фаз сети на землю:

I_0 — выпрямленный ток через фильтр нулевой последовательности, $I_{3\phi}$ — выпрямленный ток через трехфазный выпрямительный мост, $U_{\phi 1,2,3}$ — напряжения фаз сети относительно

земли

Величина тока в реле при симметричном сопротивлении фаз не будет зависеть от емкости фаз сети относительно земли, так как через реле протекает постоянный ток, для которого емкость представляет бесконечно большое сопротивление. Однако величина смещения нейтрали будет зависеть от величины емкости сети и, следовательно, величина тока нулевой последовательности, выпрямляемого диодом B_1 , будет зависеть от параметров схемы и величины приложенного напряжения нулевой последовательности. Поэтому необходимо прежде всего определить напряжение смещения нейтрали.

Рассмотрим вопрос о смещении нейтрали трансформатора для случая, когда сеть имеет равные емкости фаз относительно земли $C_1 = C_2 = C_3 = C$, неодинаковые активные проводимости фаз $g_1 \neq g_2 \neq g_3 \neq 0$ и когда в схеме защиты (см. рис. 11) имеется как активная, так и реактивная проводимости g_0 и b_0 .

Обозначим:

1) активное и емкостное сопротивления и проводимости схемы и фильтра нулевой последовательности через R_0 и g_0 ; x_0 и b_0 ;

2) емкостную проводимость сети через $b_1 = b_2 = b_3 = b$;

3) активные проводимости относительно земли через g_1 , g_2 и g_3 ;

4) общую проводимость схемы через y_0 , а общую проводимость фаз относительно земли через y_1 , y_2 и y_3 .

Величина смещения нулевой точки в сети может быть определена из общей формулы

$$\dot{U}_0 = U_{\phi} \frac{\dot{y}_1 + \dot{y}_2 a^2 + \dot{y}_3 a}{\dot{y}_1 + \dot{y}_2 + \dot{y}_3 + \dot{y}_0}, \quad (44)$$

где a — фазный множитель, учитывающий сдвиг фаз.

Учитывая, что

$$a = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

и

$$a^2 = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2},$$

формула (44) примет вид

$$\dot{U}_0 = U_{\phi} \frac{\dot{y}_1 - 0,5(\dot{y}_2 + \dot{y}_3) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(\dot{y}_3 - \dot{y}_2)}{\dot{y}_1 + \dot{y}_2 + \dot{y}_3 + \dot{y}_0}. \quad (45)$$

Подставив в (45) значения проводимостей, будем иметь

$$U_0 = U_{\phi} \frac{g_1 - 0,5(g_2 + g_3) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(g_3 - g_2)}{g_1 + g_2 + g_3 + g_0 + j3b + jb_0}. \quad (46)$$

Обозначим:

$$m = g_1 - 0,5(g_2 + g_3); \quad (47)$$

$$n = \frac{\sqrt{2}}{2}(g_3 - g_2); \quad (48)$$

$$p = g_1 + g_2 + g_3 + g_0; \quad (49)$$

$$k = 3b + b_0. \quad (50)$$

Величину дроби в правой части уравнения (46) обозначим через B .

Тогда

$$B = \frac{m + jn}{p + jk} = \frac{mp + nk}{p^2 + k^2} + j \frac{np - mk}{p^2 + k^2} \quad (51)$$

или модуль B

$$B = \sqrt{\left(\frac{mp + nk}{p^2 + k^2}\right)^2 + \left(\frac{np - mk}{p^2 + k^2}\right)^2}. \quad (52)$$

Подставляя значение B в (46), получим

$$\dot{U}_0 = U_\phi \sqrt{\left(\frac{mp + nk}{p^2 + k^2}\right)^2 + \left(\frac{np - mk}{p^2 + k^2}\right)^2} = U_\phi \sqrt{\frac{m^2 + n^2}{p^2 + k^2}}. \quad (53)$$

Подставляя в (53) значения m, n, p и k , получим выражение для определения напряжения нулевой последовательности

$$U_0 = U_\phi \sqrt{\frac{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 (g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3)}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_0)^2 + (3b + b_0)^2}}. \quad (54)$$

При емкости схемы защиты $C_0 = 0$ формула (54) примет вид

$$U_0 = U_\phi \sqrt{\frac{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 - (g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3)}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_0)^2 + 9b^2}}. \quad (55)$$

Если емкость в сети отсутствует, то напряжение нулевой последовательности определяется по формуле

$$U_0 = \frac{U_\phi}{g_1 + g_2 + g_3 + g_0} \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 - (g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3)}. \quad (56)$$

Обозначим величину корня в формуле (55) через A

$$A = \sqrt{\frac{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 - (g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3)}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_0)^2 + 9b^2}}, \quad (57)$$

тогда

$$U_0 = AU_\phi. \quad (58)$$

При однополупериодном выпрямлении однофазного тока среднее значение выпрямленного напряжения определяется интегрированием переменного напряжения в пределах полупериода

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \sin \alpha \, d\alpha = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_0 = 0,45 U_0. \quad (59)$$

Среднее выпрямленное значение тока в реле, обусловленного напряжением нулевой последовательности, будет равно

$$I_{0p} = \frac{U_{cp}}{R_{06}} = \frac{0,45U_0}{R_{06}} = \frac{0,45AU_{\Phi}}{R_0 + R_{из}}, \quad (60)$$

или

$$I_{0p}' = 0,45U_0g_{06}, \quad (61)$$

$$I_{0p} = 0,45AU_{\Phi}g_{06}, \quad (62)$$

где

$$R_{06} = R_0 + R_{из} \quad (63)$$

и

$$g_{06} = \frac{1}{R_{06}} = \frac{1}{R_0 + R_{из}}. \quad (64)$$

В схеме защиты 4В через реле будет протекать суммарный ток

$$I_p = I_{3p} + I_{0p}, \quad (65)$$

где I_{3p} — средний выпрямленный ток от трехфазной мостовой схемы.

Подставляя в уравнение (65) значения токов, получим общий ток в реле

$$I_p = U_{\Phi} \left(\frac{1,17}{R + R_{из}} + \frac{0,45A}{R_0 + R_{из}} \right), \quad (66)$$

где A — определяется по формуле (57).

Выражая в (66) сопротивления через проводимости, будем иметь

$$I_p = U_{\Phi} \left[\frac{1,17g(g_1 + g_2 + g_3)}{g_1 + g_2 + g_3 + g} + \frac{0,45Ag_0(g_1 + g_2 + g_3)}{g_1 + g_2 + g_3 + g_0} \right]. \quad (67)$$

Формула (67) позволяет построить защитные характеристики схемы 4В.

Для уяснения метода расчета приведем конкретный пример.

Пример расчета схемы 4В. Требуется рассчитать схему защиты 4В для сети 380 в. Дополнительный ток в реле от напряжения нулевой последовательности должен быть равным 1 ма (что составляет 20% от тока срабатывания реле) при глухом замыкании одной из фаз сети.

Расчетные значения элементов части схемы защиты с трехфазным мостом примем из предыдущего примера.

Емкость в схеме защиты примем равной нулю. Все сопротивления в схеме и обмоток реле считаем активными.

Выбор общего сопротивления схемы. При замыкании одной фазы на землю сопротивление изоляции будет равно нулю.

Из формулы (60)

$$I_{\text{оп}} = \frac{0,45U_{\Phi}}{R_{\text{оп}} + R_{\text{из}}} = \frac{0,45U_{\Phi}}{R_0};$$

$$R_0 = \frac{0,45 \cdot 220}{1 \cdot 10^{-3}} = 99\,000 \text{ ом.}$$

Выбор сопротивления R_2 . Примем, что выделенное на сопротивлении тепло не должно превышать 2 вт. Ток в фильтре нулевой последовательности через сопротивления R_2 приближенно можно определить по формуле

$$I = \frac{\sqrt{3}U_{\Phi}}{2R_2}.$$

Рабочий выпрямленный ток составляет только 1 ма и им можно пренебречь.

Тогда

$$R_2 = \frac{3U_{\Phi}^2}{4P} = \frac{3 \cdot 220^2}{4 \cdot 2} = 18\,100 \text{ ом.}$$

Примем величину сопротивления фильтра с запасом по тепловому режиму $R_2 = 60\,000 \text{ ом}$.

Такое увеличение сопротивления R_2 допустимо, поскольку общее сопротивление схемы велико.

Величина добавочного сопротивления R_d определится из формулы

$$R_d = R_0 - \frac{1}{3}R_2 - R_p - R_{\text{ом}},$$

$$R_d = 99\,000 - \frac{1}{3} \cdot 60\,000 - 2000 - 300 = 76\,700 \text{ ом.}$$

где R_p - сопротивление реле;

$R_{\text{ом}}$ - сопротивление омметра.

Примем величину нерегулируемого сопротивления R_4 равной 70 000 ом, а величину регулируемого сопротивления $R_{\text{пер}} = 20\,000 \text{ ом}$ (ППЗ-11). Сопротивление R_1 , R_2 , R_4 принимаем типа МЛТ-2.

Выбор диодов B_1 . Величина обратного напряжения

$$U_{\text{об}} = \sqrt{2}U_{\Phi} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ в.}$$

Выбираем диод Д7Ж с допустимым обратным напряжением 400 в и рабочим током 300 ма.

Защитные характеристики схемы 4В. На рис. 13 показаны защитные характеристики, снятые при напряжении 380 в для различных значений емкости сети. Характеристики построены при настройке реле на ток срабатывания 5 ма при принятом критическом сопротивлении изоляции сети для работы реле только от схемы 3В, равном 6600 ом. Дополнительный ток фильтра тока нулевой последовательности при

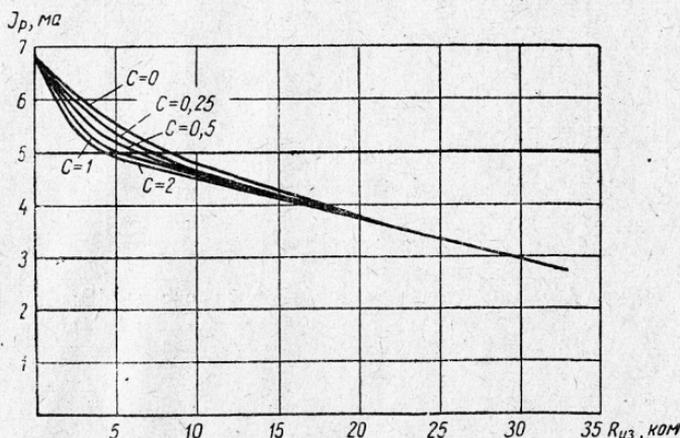


Рис. 13. Защитные характеристики схемы 4В:
 $U_n = 380$ в; $R_{кр} = 6600$ ом; $I_{p0} = 1$ ма; $I_{pср} = 5$ ма; сопротивление изоляции фаз сети $r_{\phi_2} = r_{\phi_3} = 100$ ком; $r_{\phi} = \text{var}$

замыкании одной из фаз на землю равен 1 ма, что составляет 20% от тока срабатывания реле. Величина сопротивления двух фаз равна 100 ком, сопротивление первой фазы изменялось от 0 до 100 ком. Емкость одной фазы сети изменялась от 0 до 2 мкф.

На рис. 14 и 15 показаны аналогичные защитные характеристики схемы 4В, снятые при напряжении 380 в, для других принятых защитных параметрах сети.

Настройка реле производилась для работы от схемы 3В на ток, равный 5 ма, при сопротивлении изоляции каждой фазы сети 2000 ом. Величина добавочного тока от фильтра нулевой последовательности была принята равной 1,5 ма, что составляет 30% от тока срабатывания реле.

На рис. 16 приведены защитные характеристики схемы 4В, снятые при напряжении сети 660 в. Характеристики построены для тока срабатывания реле 5 ма при критическом сопротивлении изоляции сети 15 000 ом, добавочном токе от нулевой последовательности при замыкании одной из фаз на землю, равном 1 ма, что составляет 20% от тока срабатывания реле.

Из рассмотрения приведенных на рис. 13, 14, 15 и 16 кривых

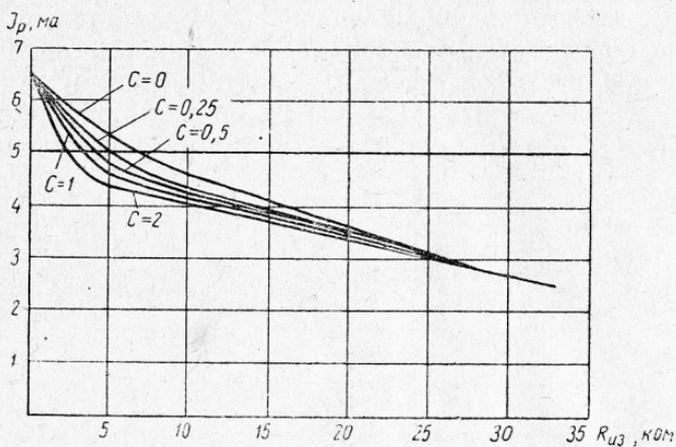


Рис. 14. Защитные характеристики схемы 4В:
 $U_{л} = 380$ в; $I_{Pcp} = 5$ ма; $r_{\Phi_2} = r_{\Phi_3} = 100$ ком; $r_{\Phi_1} = var$; $I_{P_0} = 1,5$ ма

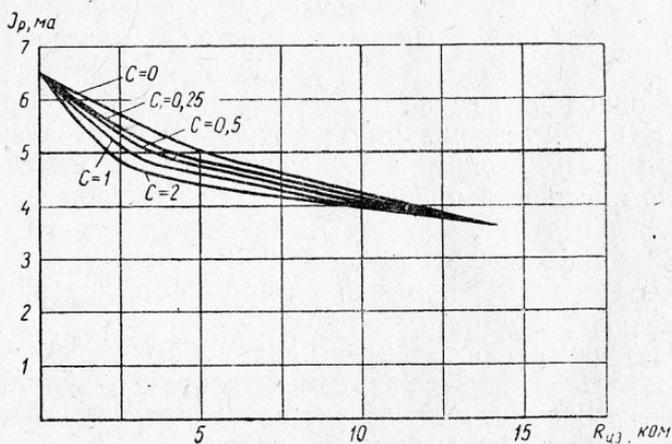


Рис. 15. Защитные характеристики схемы 4В:
 $U_{л} = 380$ в; $I_{Pcp} = 5$ ма; $I_{P_0} = 1,5$ ма; $r_{\Phi_1} = var = 43$ ком; $r_{\Phi_2} = var$

видно, что схема 4В имеет вполне удовлетворительные защитные характеристики.

Завод «Цветметприбор» выпустил партию защитных устройств по схеме, приведенной на рис. 11, имеющих следующие параметры: сопротивление $R_1 = 82$ ком типа МЛТ-1; сопротивление $R_2 = 20$ ком, проволочное, регулируемое типа ППЗ-11; сопротивление $R_3 = 100$ ком типа МЛТ-2; сопротивле-

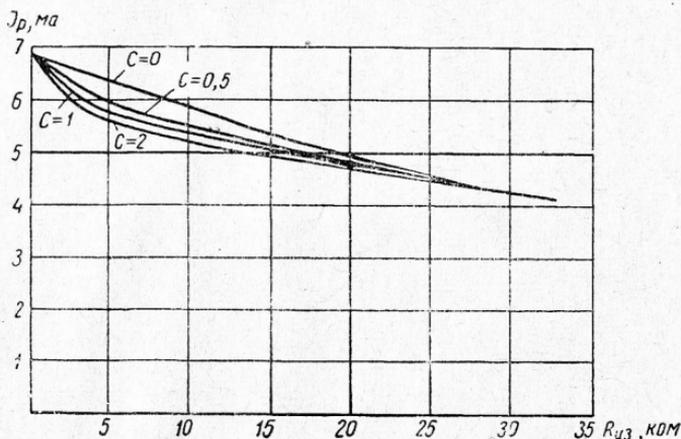


Рис. 16. Защитные характеристики схемы 4В:

$$U_{л} = 660 \text{ в}; I_{\text{рсп}} = 5 \text{ ма}; I_{\text{р0}} = 1 \text{ ма}; R_{\text{кр}} = 15 \text{ ком};$$

$$r_{\text{ф2}} = r_{\text{ф3}} = 100 \text{ ком}; r_{\text{ф1}} = \text{вар}$$

ния R_4 и R_5 заменены одним регулируемым сопротивлением типа А-2 на 100 ком. Реле типа РКН, ток срабатывания реле 3 ма, сопротивление обмотки 5 ком. Общий вид защитного устройства показан на рис. 17.

Схема защиты 7В

На рис. 18 приведена схема защиты от утечек на землю, которая по числу выпрямительных элементов названа схемой защиты 7В. Из рисунка видно, что схема состоит из двух основных элементов: обычной схемы 3В, реагирующей на общее сопротивление изоляции сети, и дополнительного элемента, подключенного к точкам АБ схемы 3В, в котором имеется двухполупериодный выпрямительный мост, подключенный ко второй обмотке реле. В принципе защиту можно выполнять с подключением обеих частей схемы на одну обмотку реле, но настройка реле в этом случае усложняется, поэтому включение в схему защиты двухобмоточного реле предпочтительнее.

Особенности работы схемы 3В были изложены выше.

Вторая часть схемы защиты, подключенная к точкам АБ, состоит из емкости C , регулируемого сопротивления R_3 и выпря-

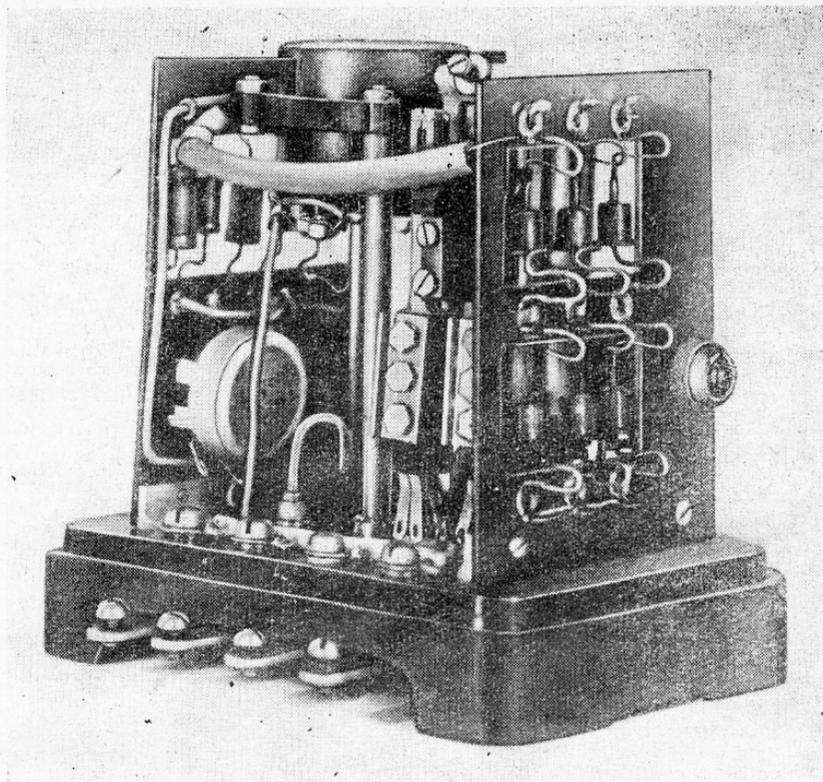
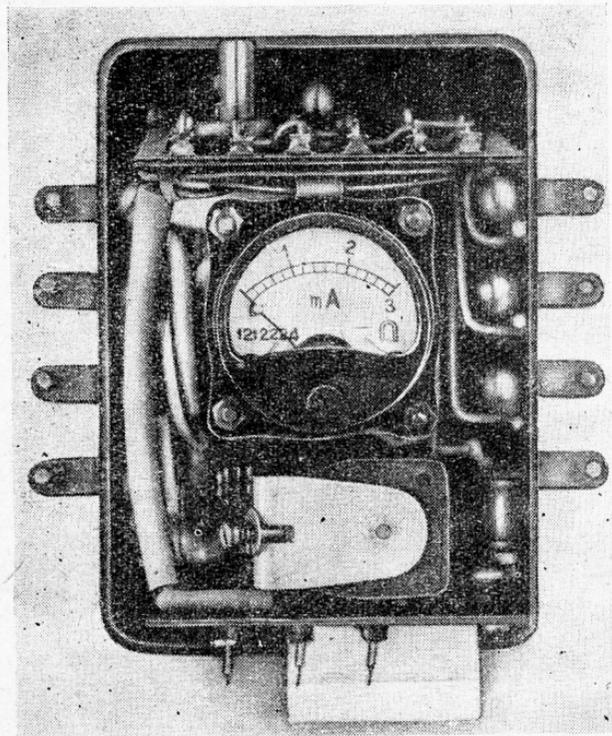


Рис. 17. Общий вид защитного устройства по схеме 4В

мительного моста B_1 , подключенного ко второй обмотке реле. Наличие емкости препятствует протеканию постоянного тока в рассматриваемой части схемы, кроме зарядного тока емкости C . Таким образом, через схему с емкостью будет протекать только переменный ток, который выпрямляется мостом B_1 , подключенным к обмотке реле. При симметричном сопротивлении изоляции сети через эту часть схемы будут протекать все высшие гармоники трехфазного выпрямления, которые будут выпрямляться мостом B_1 (в основном третья гармоника). Совершенно очевидно, что наибольшее искажение формы выпрямленного напряжения, подводимого к точке A схемы, будет при однофазном замыкании на землю (так как в этом случае будут работать только два диода из трех моста B) и ток в схеме с емкостью C резко возрастает. Следовательно, при любой несимметрии подведенного напряжения к трехфазному выпрямительному мосту будет увеличиваться искажение формы выпрямленного напряжения и, как следствие, увеличиваться ток. Это позволяет создать защиту, которая наряду с контролем общей изоляции сети будет также реагировать и на несимметричные утечки. Поскольку несимметрия напряжения в сети будет зависеть от ее параметров, ток в части схемы с емкостью C будет зависеть от емкости сети. Типичная осциллограмма токов в схеме защиты 7В показана на рис. 19.

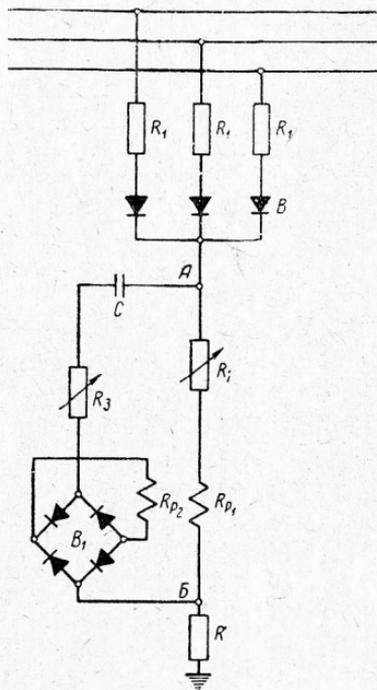


Рис. 18. Схема 7В:

$R_{П1}$ и $R_{П2}$ — сопротивления первой и второй обмоток реле; $R_{ОМ}$ — сопротивление омметра

Защитные характеристики схемы 7В, как показали исследования, совершенно идентичны с характеристиками схемы 4В. Это объясняется тем, что характер кривой выпрямленного напряжения и его величина зависят от асимметрии сопротивления изоляции фаз.

Однако при идентичности защитных характеристик между схемами защиты 4В и 7В имеются некоторые различия, которые необходимо иметь в виду при настройке реле защиты и расчете элементов схемы. Прежде всего отметим, что если в схеме 4В при симметричном сопротивлении изоляции фаз выпрямленный добавочный ток нулевой последовательности, подводимый к реле от выпрямителя B_1 , будет равен нулю, то при тех же усло-

виях в схеме 7В (через выпрямительный мост B_1) в части схемы с емкостью C будет протекать ток, обусловленный высшими гармониками (в основном третьей гармоникой). Следовательно,

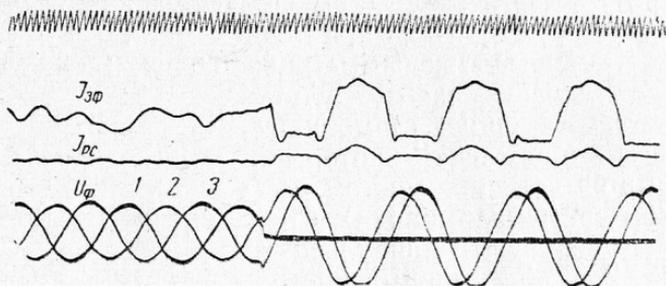


Рис. 19. Оциллограмма токов в схеме 7В и напряжения сети при замыкании фазы 1 на землю:
 $I_{3ф}$ — выпрямленный ток в первой обмотке реле; $I_{рс}$ — выпрямленный ток второй обмотки реле; $U_{\phi 1, 2, 3}$ — напряжения фаз сети

при отсутствии асимметрии напряжений в сети в схеме с емкостью C будет протекать некоторый ток небаланса, обусловленный высшими гармониками выпрямленного напряжения.

Схема защиты 3В с нелинейным сопротивлением

При исследовании схем 4В и 7В было выявлено, что характер кривой выпрямленного трехфазным мостом напряжения, подключенным к фазам сети, существенно зависит от асимметрии сопротивлений изоляции фаз. Оказалось, что если в схему 3В подключить последовательно или параллельно сопротивлению R_2 нелинейное (практически безинерционное) сопротивление, как это показано на рис. 20, то защита будет реагировать не только на симметричное, но и на несимметричное изменение сопротивления изоляции сети. Исследование схемы показало, что защитные характеристики схемы 3В при включении нелинейного сопротивления существенно улучшаются, что позволяет использовать эту схему для контроля изоляции и защиты сетей.

В качестве нелинейного сопротивления можно использовать любое малоинерционное сопротивление, имеющее резкую зависимость величины сопротивления от приложенного напряжения. Например, для этой цели можно использовать нелинейные полупроводниковые сопротивления, неоновые лампы и т. п. Следует отметить, что при использовании в схеме защиты нелинейных полупроводниковых управляемых сопротивлений или трех электродных неоновых ламп защита осуществляется без реле. В этом случае отключающий импульс подается непосредственно на промежуточное реле или на отключающую катушку коммутационного аппарата. Ниже приводятся схемы с применением

неоновых ламп, что следует рассматривать как один из вариантов схемы ЗВ с нелинейным элементом.

Вариант схемы защиты с неоновой лампой наиболее наглядно иллюстрирует роль нелинейного сопротивления. Однако защита в настоящее время заводом изготавливается с применением неуправляемых варисторов, которые включены в схему последовательно с реле взамен сопротивления R_2 (см. рис. 20).

Прежде всего отметим, что схема защиты ЗВ с нелинейным сопротивлением имеет два режима работы: режим работы при симметричном снижении сопротивления изоляции сети и режим работы при замыкании одной из фаз сети на землю. Рассмотрим оба режима работы более подробно и выявим роль нелинейного сопротивления в схеме защиты ЗВ.

Предположим, что в сети имеет место симметричное снижение сопротивления изоляции сети, к которой подключено защитное устройство по схеме, приведенной на рис. 20, а в качестве нелинейного сопротивления в схему включена неоновая лампа. Величина сопротивления R_2 в схеме подбирается таким образом, чтобы при токе в реле ниже его тока срабатывания падение напряжения на сопротивлении R_2 было меньше напряжения зажигания неоновой лампы и ток через лампу практически был бы равен нулю. При снижении сопротивления изоляции сети ток в схеме защиты увеличится и, когда достигнет величины тока срабатывания реле, падение напряжения на сопротивлении R_2 достигнет величины напряжения зажигания неоновой лампы; лампа загорится и шунтирует сопротивление R_2 .

Вследствие снижения общего сопротивления в схеме защиты ток в реле резко возрастет и вызовет его срабатывание. В данном случае имеет место работа защиты с отсечкой, как это показано кривыми на рис. 21. Таким образом, нелинейное сопротивление (лампа) будет изменять защитную характеристику только начиная с тока срабатывания реле. Величина изменения защитной характеристики будет зависеть, с одной стороны, от вольтамперной характеристики нелинейного сопротивления, а с другой, — от величины шунтируемого сопротивления в схеме R_2 .

Следует иметь в виду, что при установке выпрямителей

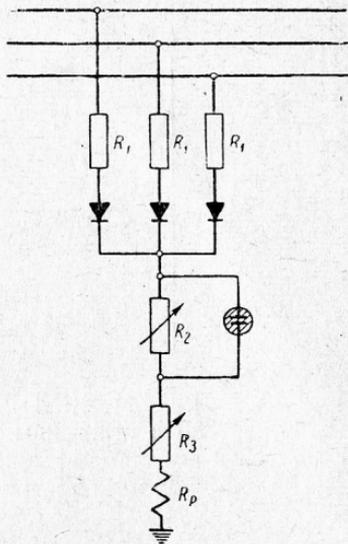


Рис. 20. Схема защиты ЗВ с нелинейным сопротивлением:

R_1 — ограничительные сопротивления; R_2 и R_3 — регулируемые сопротивления для настройки реле; R_p — сопротивление обмотки реле

в трех фазах величина напряжения во времени не остается постоянной, как это показано на рис. 7, а колеблется от половины до полного амплитудного значения. Отсюда следует, что неоновая лампа будет загораться и шунтировать сопротивление R_2 только в периоды, когда напряжение, приложенное к электродам неоновой лампы, будет превосходить напряжение зажигания. Ток в реле будет иметь пики, которые будут частично сглаживаться реактивным сопротивлением обмотки реле.

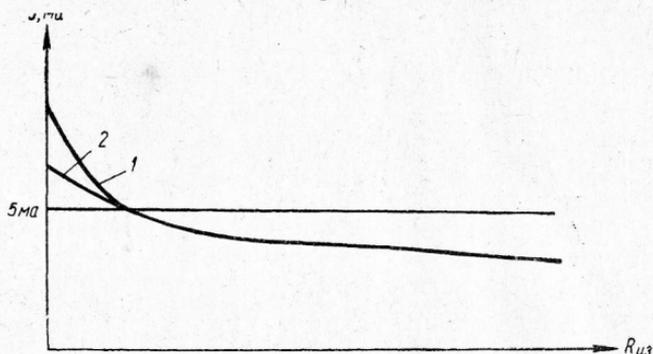


Рис. 21. Кривые зависимости тока в реле в схеме 3В с нелинейным сопротивлением (неоновая лампа): 1 — защитная характеристика с неоновой лампой (с отсечкой), 2 — защитная характеристика схемы 3В без неоновой лампы

Рассмотрим теперь второй режим работы схемы 3В с нелинейным элементом. Предположим, что в сети имеет место замыкание одной из фаз на землю. Ранее было показано, что в этом случае характер кривой выпрямленного напряжения принимает вид, показанный на рис. 9, б. Из рисунка видно, что напряжения в двух фазах по величине возрастают до линейного и по фазе сдвинуты на 60° . За каждый период выпрямления переменного тока напряжение в течение 120° полностью отсутствует. Если средняя величина выпрямленного напряжения, как было показано выше, остается по величине такой же, как и при трехфазном симметричном выпрямлении, то характер его кривой резко изменяется. Это оказывает существенное влияние на работу нелинейного сопротивления.

При замыкании одной из фаз на землю или резком снижении сопротивления в одной из фаз сети произойдет, с одной стороны, резкое изменение формы кривой выпрямленного напряжения, а с другой, — возрастет ток в схеме защиты.

Мгновенное значение падения напряжения на сопротивлении возрастет, и при некоторой величине мгновенного значения тока наступит момент, когда мгновенное значение падения напряжения на сопротивлении R_2 достигнет напряжения зажигания лампы, лампа загорится и произойдет шунтирование сопротивления R_2 , ток возрастет и реле сработает. Необходимо об-

ратить внимание на то, что неоновая лампа будет гореть не весь период переменного тока, а только в те моменты, когда мгновенное значение падения напряжения на сопротивлении R_2 будет превышать напряжение зажигания лампы. При коротком замыкании фазы на землю лампа будет гореть в пределах от 0 до 240° . В этот период времени произойдет резкое возрастание тока в реле за счет нелинейного сопротивления, шунтирующего сопротивление R_2 . Таким образом, работа нелинейного сопротивления зависит не от величины среднего выпрямленного

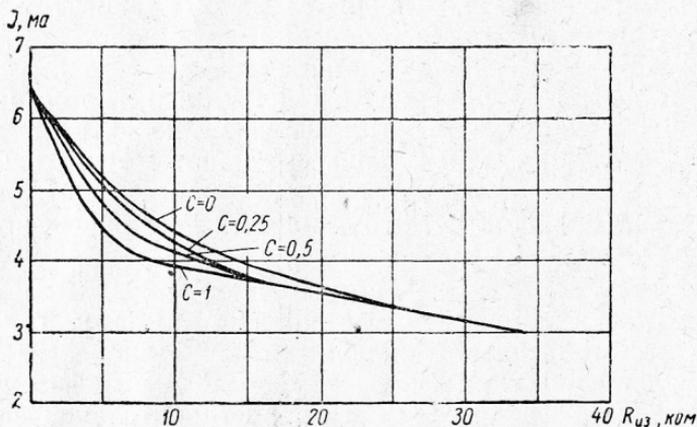


Рис. 22. Защитные характеристики схемы ЗВ с нелинейным сопротивлением (неоновой лампой), при напряжении сети 380 в; $r_{\phi_2} = r_{\phi_3} = 102 \text{ ком}$; $I_{рсп} = 5 \text{ ма}$

напряжения, а от мгновенных значений выпрямленного напряжения, т. е. от характера его изменения. При наличии нелинейного сопротивления ток в реле резко возрастает. Поскольку характер кривой выпрямленного напряжения зависит от асимметрии сопротивления изоляции фаз, т. е. от асимметрии подведенного напряжения к выпрямительному мосту, то чем больше будет асимметрия напряжения, тем более резко изменится характер кривой выпрямленного напряжения. Это и позволяет при наличии нелинейного сопротивления в схеме ЗВ, осуществить защиту, реагирующую не только на симметричное, но и на несимметричное снижение сопротивления изоляции фаз сети.

На рис. 22 приведены защитные характеристики схемы ЗВ с нелинейным сопротивлением (с неоновой лампой), снятые при напряжении сети 380 в по схеме, приведенной на рис. 20. Параметры схемы: $R_1 = 20 \text{ ком}$; $R_2 = 23,3 \text{ ком}$; $R_3 = 2,8 \text{ ком}$; реле РКН; $R_p = 5 \text{ ком}$. Ток срабатывания реле 5 ма при общем симметричном сопротивлении изоляции сети 1 ком.

При снятии характеристик сопротивление одной из фаз изменялось от 0 до 100 ком при величине сопротивления в двух дру-

гих фазах по 102 ком на фазу. Величина емкости сети меняется от 0 до 1 мкф на фазу.

Из рассмотрения защитных характеристик, приведенных на рис. 22, видно, что включение нелинейного сопротивления в схему защиты ЗВ существенно улучшает защитные характеристики схемы. Защита становится достаточно чувствительной, что обеспечивает четкую работу реле. Защита реагирует на несимметричное снижение сопротивления изоляции сети, тогда как схема ЗВ реагирует только на общее снижение сопротивления изоляции сети независимо от асимметрии. Характер защитных характеристик схемы ЗВ с нелинейным сопротивлением зависит от наличия емкости в защищаемой сети и чем больше емкость сети, тем ниже лежит защитная характеристика, как это видно из кривых рис. 22. Это объясняется тем, что величина асимметрии напряжения зависит от параметров сети, а следовательно, и от величины ее емкости. Из приведенных кривых видно, что при замыкании одной из фаз на землю ток в реле возрастает до 6,5 ма, т. е. превышает на 30% ток уставки защиты — это обеспечивает надежное срабатывание его.

Следует отметить, что защитные характеристики с варисторами получаются лучше, чем с неоновыми лампами. Так, например, при последовательном включении варисторов типа Т₈ и замыкании одной из фаз сети на землю ток в реле возрастет до 1,8 от номинального при весьма удовлетворительной защитной характеристике во всем диапазоне изменения сопротивления изоляции сети.

Схема защиты 4В₁

На рис. 23 показана схема защиты, которую назовем (по числу вентилях схемы) 4В₁. Аналогичные схемы защиты сетей применяются во Франции.

Из схемы видно, что для контроля общего сопротивления изоляции сети подается постоянный ток от однофазного двухполупериодного выпрямителя В, питающегося от трансформатора ТС. Трансформатор можно выполнить со стабилизацией напряжения на выходе.

Принцип работы схемы сводится к следующему. От выпрямителя В постоянный ток через омметр, реле, сопротивления R₂ и R₁ подается в сеть. При наличии утечек в изоляции сети постоянный ток будет протекать на землю и через нее ко второму зажиму выпрямителя В. Поскольку сопротивление схемы защиты остаются постоянными, а меняться будет только сопротивление изоляции сети, то ток в реле будет зависеть от величины сопротивления изоляции сети относительно земли.

Если сопротивление изоляции сети будет несимметричным, то на фильтре (из сопротивлений R₁) появится напряжение ну-

левой последовательности, которое обусловит протекание дополнительного тока в схеме защиты. Причем ток будет протекать в течение одного полупериода, который совпадает с положительным направлением включения вентилей моста B . Во вторую половину периода ток протекать не будет, поскольку вентили выпрямительного моста окажутся включенными встречно приложенному напряжению нулевой последовательности.

Величина тока, протекающего через реле, регулируется сопротивлением R_2 . Емкость C шунтирует обмотку реле в переходных режимах в защищаемой сети.

Анализ схемы показывает, что для ограничения тока в схеме, обусловленного напряжением нулевой последовательности, необходимо, чтобы сопротивление схемы было достаточно большим. Поэтому для питания выпрямительного моста необходимо значительное напряжение, что является существенным недостатком рассматриваемой схемы.

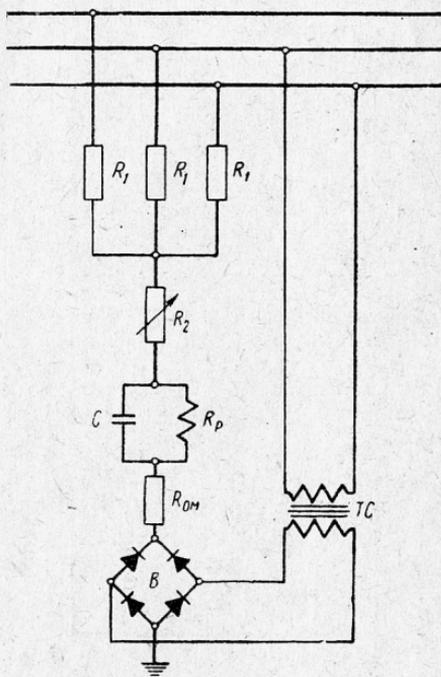


Рис. 23. Схема защиты 4В₁

Схема защиты 4В₂

Комбинированный вариант схемы защиты можно выполнить с приемлемой величиной напряжения, подводимого к мосту, за счет шунтирования части схемы емкостью C_2 и сопротивлением R_2 (рис. 24). Принцип работы этой схемы аналогичен принципу работы схемы 4В₁.

При появлении несимметричной утечки в изоляции сети на фильтре из сопротивлений R_1 появится напряжение нулевой последовательности, которое обусловит протекание тока в реле и параллельной реле цепи с C_2 и R_2 . Ток в цепи реле практически будет протекать только в течение одного полупериода. Распределение тока между параллельными цепями будет зависеть от их относительных величин сопротивлений.

Методика расчета схемы 4В₂ сводится к следующему:

1) выбирается напряжение вторичной обмотки трансформатора TC ;

2) определяется величина сопротивления схемы по постоянному току;

3) по заданному добавочному току в реле (от напряжения нулевой последовательности) определяются величины сопротивления R_2 и емкости C_2 .

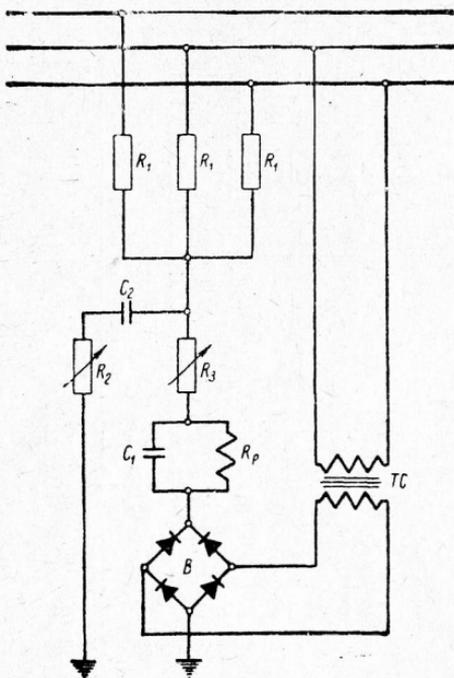


Рис. 24. Схема защиты 4В₂

Следует отметить, что снижение напряжения, подводимого к мосту, достигается за счет снижения общего сопротивления схемы защиты.

Пример расчета схемы 4В₂. Рассчитать схему (по рис. 24) для сети 380 в, исходя из следующих условий:

1) ток срабатывания реле 5 ма;

2) добавка тока в реле от напряжения нулевой последовательности составляет 20% от тока срабатывания реле (1 ма) при замыкании одной из фаз на землю;

3) величина безопасного тока $I_0 = 30$ ма;

4) сопротивление тела человека $R_{\text{чел}} = 1000$ ом;

5) величина напряжения на вторичной обмотке трансформатора ТС 220 в;

6) величина емкости 3 мкф.

Выбор общего сопротивления схемы. Ток утечки

$$I_{\text{ут}} = \sqrt{I_0^2 - I_p^2} = \sqrt{30^2 - 5^2} = 29,6 \text{ ма.}$$

Сопротивление изоляции сети

$$R_{\text{из}} = \frac{U_{\text{ф}}}{I_{\text{ут}}} - R_{\text{чел}} = \frac{220}{29,6 \cdot 10^{-3}} - 1000 = 6400 \text{ ом.}$$

Сопротивление схемы постоянному току

$$I_p = \frac{0,9U_{\text{т.с}}}{R + R_{\text{из}}};$$

$$R = \frac{0,9U_{\text{т.с}}}{I_p} - R_{\text{из}} = \frac{0,9 \cdot 220}{5 \cdot 10^{-3}} - 6400 = 33200 \text{ ом.}$$

Сопrotивление R_1 (принимает типа МЛТ-2)

$$R_1 = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{4 \cdot P} = \frac{3 \cdot 220^2}{4 \cdot 2} = 18\,100 \text{ ом.}$$

Принимаем 20 000 ом.

Выбираем реле типа РКН № 1717710 с сопротивлением обмотки $R_p = 1000 \text{ ом}$ и омметр типа М63, $R_{\text{ом}} = 300 \text{ ом}$.

Добавочное сопротивление R_3

$$R_3 = R - \frac{1}{3} R_1 - R_p - R_{\text{ом}} = 33\,200 - \\ - \frac{1}{3} 20\,000 - 1\,000 - 300 \approx 25\,200 \text{ ом.}$$

Приблизенно значение тока в реле от напряжения нулевой последовательности можно найти следующим образом.

Ток в реле от напряжения нулевой последовательности

$$I_{\text{ор}} = 0,45 I'_0; \quad I'_0 = \frac{I_{\text{ор}}}{0,45}.$$

Общий ток нулевой последовательности при замыкании фазы сети на землю

$$I_{\text{ор}} = \frac{U_0}{R} = \frac{U_{\Phi}}{R_0};$$

$$I'_0 = I \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_4},$$

где

$$R_4 = R_3 + R_1 + R_p + R_{\text{ом}};$$

$$I'_0 = I_0 \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_4} = \frac{I_{\text{ор}}}{0,45};$$

$$R_0 = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_4} + \frac{1}{3} R_1;$$

$$I_0 = \frac{U_{\Phi}}{\frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_4} + \frac{1}{3} R_1};$$

$$\frac{I_{\text{ор}}}{0,45} = \frac{U_{\Phi}}{\frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_4} + \frac{1}{3} R_1} \cdot \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_4};$$

$$Z = 4,03 \cdot 10^3 = 4\,030 \text{ ом.}$$

(68)

Решая уравнение (68), найдем значение модуля сопротивления

$$Z = \frac{R_1 R_4}{\frac{1,35 \cdot U_\Phi}{I_{0p}} - (3 + R_1)} \quad (69)$$

Подставляя в уравнение (69) значения величин тока и сопротивления, получим

$$Z = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 26,5 \cdot 10^3}{\frac{1,35 \cdot 220}{1 \cdot 10^{-3}} - (3 + 20 \cdot 10^3)} \approx 1920 \text{ ом};$$

$$R_2 = \sqrt{Z^2 - x^2} = \sqrt{1920^2 - \left(\frac{10^6}{314 \cdot 3}\right)^2} = 1620 \text{ ом}.$$

Величина тока нулевой последовательности, протекающего через схему, будет равна

$$I_0 \frac{Z}{Z + R_4} = \frac{I_{0p}}{0,45};$$

$$I_0 = 2,23 \cdot I_{0p} \left(1 + \frac{R_4}{Z}\right);$$

$$I_0 = 2,23 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{26,5 \cdot 10^3}{1,92 \cdot 10^3}\right) = 30,8 \text{ ма}.$$

Из приведенного расчета видно, что схема 4В₂ создает значительные токи утечки при замыкании на землю одной из фаз сети.

СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ

При разработке системы опережающего отключения кабельных сетей для электроснабжения шахт и предприятий, опасных по газу или пыли, возникла необходимость разработки сверхбыстродействующей защиты от токов замыкания на землю [2]. Проведенные исследования показали, что суммарное время срабатывания опережающего отключения не должно превышать 3—4 мсек, чтобы обеспечить низкую вероятность воспламенения газовоздушной среды при механических повреждениях изоляции в электрической системе. Поскольку общее время срабатывания опережающего отключения мало, время работы защитного устройства должно быть порядка 1 мсек. Это время срабатывания защитного устройства состоит из двух слагаемых: времени срабатывания реле и нарастания тока от момента повреждения

изоляции в системе до момента срабатывания реле. Из этого следует, что применение в схеме защиты индуктивных элементов является нежелательным. Создание сравнительно мощного реле, со временем срабатывания порядка 1 мсек, — задача весьма сложная.

Поскольку время срабатывания весьма мало, схема сверхбыстродействующей защиты должна быть такой, чтобы выпрямленный ток в реле при нарушении изоляции в сети был непрерывным и не имел мертвой зоны. Этому требованию может удовлетворить несколько видоизмененная схема защиты 4В.

Для перекрытия мертвой зоны, которая в схеме 4В равна 120° (при замыкании одной из фаз на землю трехфазной сети), предусмотрено однополупериодное выключение тока нулевой последовательности, которое перекрывает мертвую зону работы трехфазного моста.

Схема защиты 4ВС

Схема сверхбыстродействующей защиты показана на рис. 25. Назовем ее по числу диодов схемой 4ВС (С — сверхбыстродействующая).

Для снижения времени срабатывания защитного устройства обмотка омметра включается в схему только на время измерения сопротивления изоляции сети; при нормальной работе обмотка омметра шунтируется.

На рис. 26 приведена типичная осциллограмма токов в схеме 4ВС при замыкании одной из фаз на землю.

Из приведенной осциллограммы видно, что выпрямленный ток нулевой последовательности перекрывает провал тока, поступающего в реле от выпрямительного моста B , причем полупериодное выпрямление длится 180° , а отсутствие тока от выпрямительного моста B длится 120° . Поэтому часть времени в реле будут действовать суммарные ампервитки, обусловленные токами как от моста B , так и от моста B_1 .

Совершенно очевидно, что выпрямленный однополупериодный ток нулевой последовательности по своей величине должен быть достаточным для срабатывания реле. Поэтому при расчете

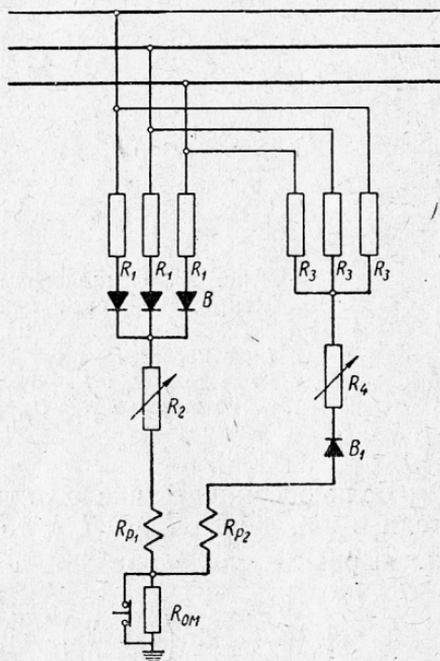


Рис. 25. Схема сверхбыстродействующей защиты 4ВС:

R_1, R_2, R_3, R_4 — активные сопротивления; R_{p1} и R_{p2} — сопротивления обмоток реле; R_{om} — сопротивление обмотки омметра

схемы 4ВС необходимо выпрямленный ток нулевой последовательности выбирать равным току срабатывания реле.

Совмещенная кривая ампервитков реле в схеме 4ВС при замыкании первой фазы на землю показана на рис. 27.

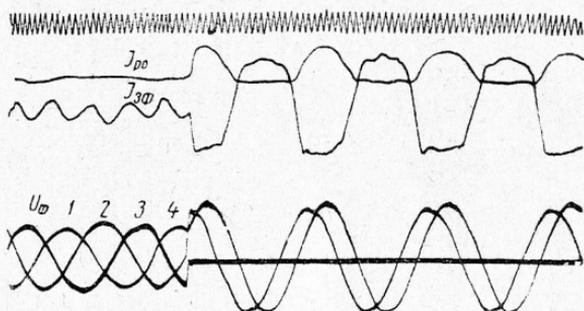


Рис. 26. Осциллограмма токов в схеме 4ВС и напряжений сети при замыкании одной из фаз на землю:

I_{p0} — выпрямленный ток нулевой последовательности в обмотке реле R_{p2} ; $I_{3\phi}$ — выпрямленный ток, протекающий в обмотке реле R_{p1} ; $U_{\phi 1, 2, 3}$ — напряжения фаз сети

Если обозначить число витков обмоток реле через W_1 и W_2 , токи в них через $I_{3\phi}$ и I_{p0} , то общие ампервитки на реле можно выразить следующей аналитической зависимостью:

$$AW_p = \begin{cases} W_1 I_{3\phi} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{12}\right) + W_2 I_{p0} \sin\left(\alpha + \frac{11}{12}\pi\right); & 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ W_1 I_{3\phi} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{12}\right); & \frac{\pi}{12} \leq \alpha \leq \frac{7}{12}\pi \\ W_1 I_{3\phi} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right); & \frac{7}{12}\pi \leq \alpha \leq \frac{13}{12}\pi \\ W_1 I_{3\phi} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right) + W_2 I_{p0} \sin\left(\alpha - \frac{13}{12}\pi\right); & \frac{13}{12}\pi \leq \alpha \leq \frac{5}{4}\pi \\ W_2 I_{p0} \sin\left(\alpha - \frac{13}{12}\pi\right); & \frac{5}{4}\pi \leq \alpha \leq \frac{23}{12}\pi \\ W_2 I_{p0} \sin\left(\alpha - \frac{13}{12}\pi\right) + W_1 I_{3\phi} \sin\left(\alpha - \frac{23}{12}\pi\right); & \frac{23}{12}\pi \leq \alpha \leq 2\pi \end{cases}$$

Схема защиты 4ВСН

Время срабатывания защитного устройства зависит при прочих равных условиях от скорости нарастания тока в реле при замыкании одной из фаз сети на землю. Поэтому для ускорения

срабатывания защитного устройства от замыкания на землю целесообразно ввести в схему 4ВС нелинейные сопротивления, которые позволяли бы резко снизить сопротивление схемы защи-

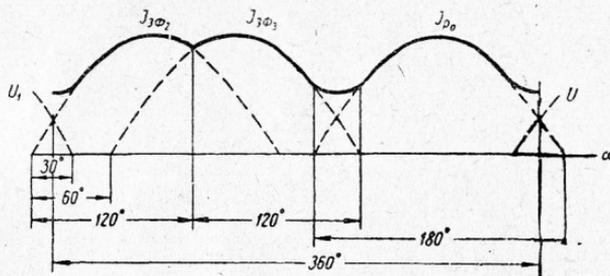


Рис. 27. Характер совмещенной кривой ампер-витков реле в схеме 4ВС:

I_{p_0} — выпрямленный ток нулевой последовательности;
 $I_{3\phi_2}$ — выпрямленный ток второй фазы сети; $I_{3\phi_3}$ — то же.
 третьей фазы сети

ты в момент короткого замыкания одной из фаз на землю, что привело бы к быстрому нарастанию тока на реле.

Один из вариантов разработанных схем 4ВСН с нелинейными сопротивлениями приведен на рис. 28.

Быстродействующее реле

Конечной задачей любой схемы защиты от утечек на землю является формирование сигнала, действующего на исполнительный орган.

Сверхбыстродействующая защита от токов утечки на землю должна действовать непосредственно на сверхбыстродействующий фидерный автомат. Полное время срабатывания фидерного автомата равно 2,5—3 мсек. Схема защиты 4ВС или 4ВСН управляет разрядом емкости заряженной до 450 в на отключающую катушку автомата. Максимальная величина разрядного тока управления автоматом достигает величины 20 а. Все это предъявляет к реле следующие требования:

1) время срабатывания реле при замыкании одной из фаз сети на землю должно быть не более 1—1,5 мсек;

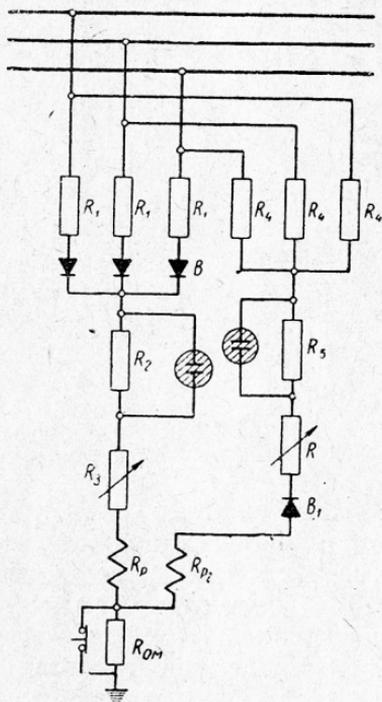


Рис. 28. Схема защиты 4ВСН

2) раствор между контактами реле во взведенном состоянии должен соответствовать напряжению управляемой цепи 450 в. Практически это означает, что раствор между контактами должен быть 2 мм;

3) контакты реле должны пропускать импульс тока величиной до 20 а при длительности 5 мсек.

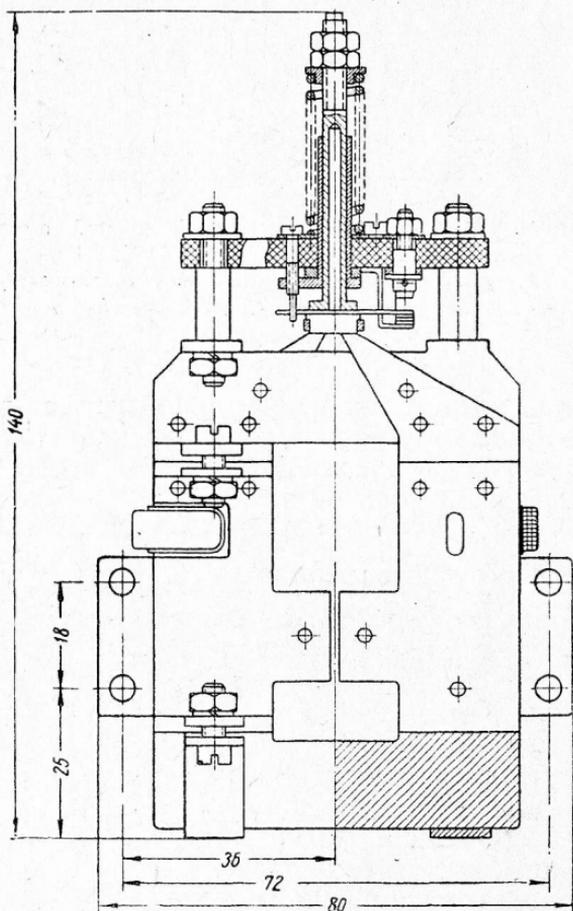


Рис. 29. Разрез быстродействующего реле (взводное устройство не показано)

Выпускаемые электропромышленностью реле не отвечают указанным требованиям, поэтому были проведены исследования по разработке специального реле. Конструктивно это реле состоит из контактной системы, пружинно-магнитного механизма и взводного устройства (рис. 29). Управление магнитной системой реле осуществляется с помощью двух размагничивающих катушек, одна из которых обтекается током от выпрямительного моста В (схема 4ВС), а вторая выпрямленным током нулевой последовательности. Магнитная система реле выполнена в двух

вариантах — с постоянным удерживающим магнитом из сплава магнико и с электромагнитом. Якорь и полюсные наконечники в первом варианте выполнены из супермендюра (новый магнитный материал, имеющий индукцию насыщения 23 000 гс при коэрцитивной силе 0,26 эрстеда при 21 150 гс), а во втором варианте вся магнитная система выполнена из супермендюра. Эти свойства супермендюра позволяют создать относительно большую силу тяги магнитной системы реле при небольшой массе и управлять (размагничивать) небольшим током.

В разработанном реле при общей массе подвижной части реле 15 г и ходе якоря 2 мм удалось получить полное время срабатывания реле 1,0—1,5 мсек при токе срабатывания реле 20 ма. Реле имеет две пары контактов: н. о. контакты и н. з. контакты. Связь контактных систем жесткая.

Взвод реле осуществляется специальным вспомогательным электромагнитом дистанционно.

Техническая характеристика реле

Раствор контактов, мм	2
Полное время срабатывания, мсек	1,0—1,5
Ток срабатывания, ма	20
Вес подвижных частей реле, г	15
Сила тяги магнита, кг	9,6
Давление контактов, кг	2,0

ВЫВОДЫ

Из изложенного выше следует, что разработанные защитные устройства на полупроводниках имеют существенные преимущества перед применяемыми в настоящее время защитными устройствами. Так, например, полное время срабатывания быстродействующей защиты равно 5—15 мсек, а сверхбыстродействующей 1,0—1,5 мсек. Известно, что реле РУВ имеет время срабатывания 250 мсек.

Защитные устройства реагируют на симметричные и несимметричные снижения сопротивления изоляции сети, причем чувствительность защиты к несимметричным повреждениям выше, чем к симметричным.

Для промышленного использования рекомендуются защитные устройства, выполняемые по схемам:

а) схема 4В для защиты и контроля величины изоляции сети с воздействием на отключающую катушку фидерных автоматов;

б) схема 4ВС с варисторами для защиты и контроля величины сопротивления изоляции сети с воздействием на отключающую катушку быстродействующих фидерных автоматов;

в) схема 3В с варисторами для защиты и контроля изоляции сети с воздействием на отключающую катушку фидерных автоматов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миндели Г. В. Режим нейтрали шахтных электрических сетей. Углетехиздат, 1957.
 2. Шишкин Н. Ф., Олексевич В. П., Данилин П. Я. и др. Защита шахтных электроустановок и кабельных сетей. Углетехиздат, 1959.
 3. Кузнецов А. И. Техника безопасности в электрических установках. Госэнергоиздат, 1956.
 4. Dalziel A. Effects of Electric Shock on Man, *Transactions of medical Electronics*, 1956, July.
 5. Миндели Г. В. К вопросу повышения безопасности эксплуатации шахтных кабельных сетей. Сб. статей, вып. 13. Углетехиздат, 1958.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Действие электрического тока на человека	—
Токи утечки на землю	6
Общие положения расчета схем с полупроводниками	13
Схема защиты 3В	17
Комбинированные схемы защиты на полупроводниках	28
Схема защиты 4В	—
Схема защиты 7В	37
Схема защиты 3В с нелинейным сопротивлением	40
Схема защиты 4В ₁	44
Схема защиты 4В ₂	45
Сверхбыстродействующая защита от токов утечки на землю	48
Схема защиты 4ВС	49
Схема защиты 4ВСН	50
Быстродействующее реле	51
Выводы	53



ШИШКИН НИКОЛАЙ ФЕДОРОВИЧ

Быстродействующая защита
шахтных сетей от замыкания
на землю

Отв. редактор *Н. Г. Любимов*
Техн. редактор *В. В. Галанова*
Корректор *Ю. М. Непомнящая*

Сдано в набор 8/1 1960 г. Подписано в печать
7/III 1960 г. Формат бумаги 60×92¹/₁₆. Печ. л. 3,5
Уч.-изд. л. 3 Тираж 4000 экз. Т-01994
Изд. № 508 Инд. 2/3 Цена 1 р. 50 к. Заказ № 14
Государственное научно-техническое
издательство литературы по горному делу
ГОСГОРТЕХИЗДАТ
Москва, Грузинский вал, д. 35

Московская типография Госгортехиздата
Москва, Ж-88, Южно-портовый 1-й пр., 17

Цена 1 р. 50 к.

ЧИТ. ЗАЛ
ГОУБС СССР

26/48

~~K 313~~
~~Ш 655~~ о.г.

2/111

14