О ЗАЩИТЕ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНЫХ УЧАСТКОВЫХ СЕТЯХ

Р. Ф. ТРОФИМОВ

Вопрос о защите от замыкания на землю до настоящего времени не получил должного разрешения. Предложенные способы защиты от замыкания на землю в шахтных участковых сетях не являются технически совершенными.

Необходимость применения защиты от замыкания на землю вызывается тем, что при существующих на шахтах заземляющих устройствах с сопротивлением в 2 ома (практически больше) обеспечивается допустимое напряжение прикосновения 40 вольт при токе замыкания на землю

$$J = \frac{U}{r} = \frac{40}{2} = 20 a.$$

При токах замыкания больше 20a не обеспечивается безопасность от электрического удара. Нужно иметь в виду, что двойные замыкания в низковольтной шахтной сети могут вызвать токи в несколько тысяч ампер. Прохождение таких токов по сети заземления небезопасно, так как это может создать напряжение прикосновения, превышающее допустимое. Известно, что проходящие через человека аварийные токи в течение 0.1-0.2 сем. могут нанести ему тяжелые потрясения. Для обеспечения допустимого напряжения прикосновения 40 в нужно было бы уменьшать сопротивление защитного заземления, увеличивая количество металла, что экономически невыгодно и технически нерационально.

Схемы контроля состояния изоляции повышают опасность электрического удара при применении приборов большой мощности. К тому же такой сигнализации недостаточно, так как световой сигнал о возникновении замыкания может быть не воспринят или воспринят, но с большим запозданием, что с эксплоатационной точки зрения считается недопустимым.

Указанные обстоятельства требуют применения защиты, реагирующей на однофазные замыкания на землю.

Однофазные замыкания на землю в сети с изолированной нулевой точкой

Во время нормального режима работы в сетях имеют место зарядные токи и токи, потребляемые силовой и осветительной нагрузкой, которые налагаются друг на друга. При замыканиях на землю появляются еще токи повреждения—токи нулевой последовательности, которые выражаются следующими уравнениями:

токи до места замыкания

$$J'_0 = U.j.\omega.C.x,$$

за местом замыкания

$$J_0'' = -U.j.\omega. C.(L-x)$$

и токи замыкания на землю

$$J_3 = 3. U.j. \omega. C. L,$$

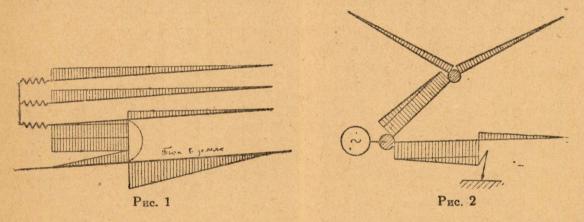
тае U-фазовое напряжение,

С-емкость фазного провода относительно земли,

L-длина сети,

х-расстояние до места замыкания.

Физическая картина этого состояния следующая. Замыкания на землю сопровождаются снижением напряжения дефектного провода относительно земли до нуля (глухое) и повышением напряжения здоровых фаз относительно земли в $\sqrt{3}$ раз. Это состояние равносильно приложению в месте замыкания ко всем фазам отрицательного фазного напряжения поврежденного провода, которое вызывает ток замыкания на землю. Ток замыкания на землю проходит через место соединения провода с землей, емкости проводов относительно земли, по исправным проводам и обмоткам трансформатора, а затем возвращается по проводу к месту замыкания. При этом в исправных прово-



дах происходит увеличение нормального тока, а в фазе, получившей соединение с землей, токи здоровых фаз складываются, отчего создается однофазная перегрузка трансформатора.

Ток поврежденной фазы, в отличие от здоровых фаз, начиная от источника тока, не сбывает, а наоборот, возрастает до места замыкания на землю. Последнее будет ясно, если обратиться к диаграмме, изображенной на рис. 1.

В шахтах, где сети имеют радиальную конфигурацию, к месту замыкания на землю будут подтекать токи и других частей сети данного участка. Полная картина распределения суммарного тока повреждения для этого случая приведена на рис. 2.

Токи замыкания на землю, полученные экспериментальным путем

С целью выявления действительных токов замыкания на землю в системах с изолированной нулевой точкой были произведены экспериментальные их определения. Замеры токов производились по схеме, изображенной на рис. З. Приведем данные, характеризующие сети шахты с крутым падением (шахта № 1) и шахты с пологим падением (шахта № 2) табл. 1 (только для 2 шахт).

На других шахтах токи замыкания на землю имели значение, близкое к нижнему и среднему пределам.

Данные, приведенные в табл. 3, доказывают, что токи замыкания на землю очень малы и не способны привести в действие защиты от замыкания на землю, кроме сложных и обладающих большой чувствительностью; но эти токи достаточны для создания значительного теплового эффекта.

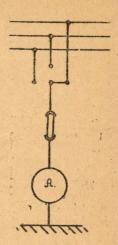


Рис. 3

Таблица 1

	H	Токи замыкания на землю в а				
Наименование шахты и участков	Напряжение в сети	1 фаза	2 фаза	3 фаза		
Шахта № 1				7-1		
Участок № 11	380 "220 380 380 220 380 220	0.100 0.21 0.15 0.095 0.20 0.50 0.05 0.50 меньше 0.1	0.112 0.20 0.15 0.10 0.22 0.48 0.05 0.67 меньше 0.1	0.115 0.20 0.15 0.085 0.14 0.36 0.05 0.60 меньше 0.1		
Тяговая п/станция П/станция Западная первая первая Восточная вторая Восточная 26-й подэтажный Снедки № 4 Западная № 5	380	0.16 0.2 0.1 0.18 0.134 0.036 0.047 0.2	0.17 0.18 0.1 0.19 0.14 0.036 0.047 0.2	0.16 0.18 0.1 0.18 0.120 0.036 0.047 0.2		

Таблица 2

Число вит-		Токи и погрешности коэффициента трансформации по току											
жов обмотки $w_1 = w_2$	jı	j ₂	Δκ%	I ₁	12	Δκ%	I ₁	I ₂	Δκ%	l_1	I_2	Δκ%	
10 15 20 25 30	1 1 1 1 1 1	1.16 0 30 0.41 0.50 0.57	84.0 70.0 59.0 50.0 43.0	2 2 2 2 2	0.87 1.25 1.50 1.60 1.70	5 6 37.5 25.0 20.0 15.0	3 3 3 3 3	1.75 2.25 2.5 2.65 2.75	41.7 25.0 16.6 11.95 8.0	4 4 4 4 4	2.75 3.35 3.5 3.65 3.75	31.2 16.2 12.5 8.5 6.0	

101		the street	-			В	торич	чные	TOK	и в а	при	чис.	Ae Br	TKOB	оби	оток				
поп							Чис	сло в	итко	в пер	рвичн	юй о	бмот	KH					71	
BIES		200	10			1		20			34	al.	30		tack.	1 .33	4	10		
п ервичн о ки		4.					Числ	о ви	тков	втор	онги	й об	MOTK	И			E BA	. L		
Токи пе обмотки	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
2 3 4 5	0.45	0.25 0.55 0.8	0.55		0.2	0.75	1.05	1.05 1.6	$\frac{1.0}{1.25}$	$0.75 \\ 1.15$	1.1	1.65	1.65 2.38	1.55 2.13	0.75 1.3 1.85 2.35	1.35	2.80	2.30 3.1	2.1 285	1.1 1.8 2.5 3.2

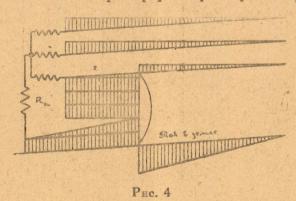
Однофазные замыкания на землю в сети с заземленной нулевой точкой

Для систем с заземленной нулевой точкой трансформатора через сопротивление ток замыкания на землю может быть определен по измененной формуле Обердорфера

$$J_3 = U \frac{1-3.R_{\rm n.}j.\omega.C.L.}{R_{\rm n}-r_{\rm n}(1-3.R_{\rm n.}j.\omega.C.L)}$$

т. е. ток замыкания на землю находится в зависимости от величины сопротивления, через которое нулевая точка трансформатора заземлена (R_n) , и от сопротивления дуги и изоляции сети (r_n) .

Полная картина распределения токов приведена на рис. 4. Из нее видно, это заземление нулевой точки трансформатора через сопротивление R_n соз-



дает большую асимметрию токов и увеличивает ток замыкания на землю и ток в поврежденном проводе на величину $I_{\rm n} = \frac{U}{R_{\rm n}}$.

Существующие способы защиты

Защиту от замыкания на землю можно осуществить на принципе использования: 1) токов нулевой последовательности, 2) напряжений нулевой последовательности, 3) мощности нулевой последова ельности, 4) замены защитного заземления защитным реле (схема инж. С. В. Соколова и RWE) и 5) проверки сопротивления изоляции перед замыканием контактов пускателя (пускатели типа ПМВ). Первый способ нашел применение в системах как с изолированной, так и заземленной нейтралью. В системах с изолированной нейтралью, если сеть состоит из одного или двух радиальных фидеров, селективную защиту токовыми реле при замыканиях на землю осуществить нельзя. К тому же осуществление защиты, работающей на емкостном токе, затруднительно ввиду незначительных емкостных токов. Заземление нейтрали трансформатора дает возможность осуществлять селективную защиту от замыкания на землю.

Используемые в Англии так называемые "экранированные" кабели, при наличии заземленных концентрических медных оболочек, окружающих каждую рабочую жилу в отдельности или же все жилы вместе, снижают опас-

ность в отношении электрического удара.

При механическом повреждении кабеля прежде всего происходит соединение поврежденных рабочих жил с заземленной оплеткой, вызывающее короткое замыкание одной или нескольких фаз на землю и, следовательно,

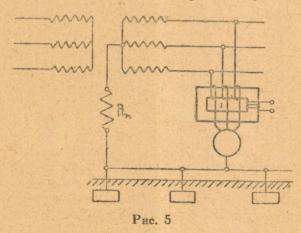
действие максимального реле или реле утечки.

Использование напряжений нулевой последовательности не обеспечивает селективность. Использование мощности нулевой последовательности усложняет схемы защиты. Схемы RWE и инж. С. В. Соколова требуют сложной и чувствительной защиты, не обеспечивающей безопасность при возникновении замыканий до их отключения.

Пускатели типа ПМВ имеют защиту от замыкания на землю, но эта защита действует только в момент включения пускателя (нажатия кнопки "ход"). В остальных случаях она не работает и к тому же она малочувствительна, так как ток трогания реле утечки РУ составляет 1.75 а. Этот ток, проходящий через место аварии, после подтягивания сердечника, снижается до 0.9 а и разрывается от нажатия кнопки "стоп" (БР1) местного управления, встроенной в корпус пускателя, спустя продолжительное время после возникновения замыкания на землю.

Предлагаемые схемы защиты от замыкания на землю

Шахтная защита от замыкания на землю должна удовлетворять следующим требованиям: 1) пригодность для систем с занулением через сопротивления; 2) безопасность в отношении пожаров и взрывов; 3) непрерывность



действия; 4) селективность; 5) простота конструкции и достаточная механическая прочность.

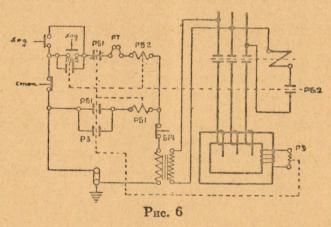
Этим требованиям может удовлетворять защита, схема которой приведена на рис. 5. По этой схеме защита от замыкания на землю осуществляется на принципе использования токов нулевой последовательности, с применением в качестве фильтра балансного (дифференциального) трансформатора

тока (1), помещаемого в пускателе. Учитывая, что токи нулевой последовательности в системах с изолированной нейтралью бывают недостаточными для отключения, они искусственно должны быть увеличены до тока (меньшего) образования дуги, путем применения зануления через сопротивление. Известно, что прерывание цепи тока утечки между металлическими проводниками и почвой выработки может послужить причиной взрыва газа только при дуге, для образования которой необходим ток силою 3—5 а. Защита от замыкания на землю в пускателях типа ПМВ допускает ток замыкания на землю 1.75 а, после подтягивания сердечника снижающийся до 0.9 а и долгоне разрываемый.

В качестве пускателей могут быть использованы пускатели типа ПМВ, но есть необходимость в конструировании нового пускателя. У пускателей типа ПМВ следует изменить и упростить схему управления. Из существующих 3 реле РУ, РБ1 и РБ2 необходимо оставить два реле: одно для управления контактами пускателя и второе—в качестве блокировочного реле от замыкания на землю. Защита от замыкания на землю должна состоять из фильтра токов нулевой последовательности и реле заземления РЗ, включенного в цепь этого фильтра. Полная схема пускателя с защитой от замыченного в цепь этого фильтра. Полная схема пускателя с защитой от замыченного в цепь этого фильтра.

кания на землю изображена на рис. б.

При отсутствии замыкания на землю, как указано выше, пускатель управляется одним блокировочным реле РБ2. Пуск осуществляется нажатием жнопки "ход" местного или дистанционного управления. При этом реле РБ2



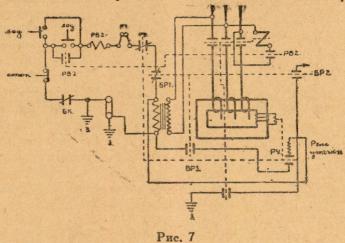
срабатывает и замыкает свои контакты цепи катушки включения пускателя. За этим следует включение контактов силовой цепи. Для выключения суще-

ствуют кнопки "стоп" и БР1 нормально замкнутые.

При замыкании на землю срабатывает реле заземления РЗ, которое замыкает свои контакты РЗ в цепи реле РБ1. Последнее, срабатывая, самоблокируется и разрывает цепь реле РБ2. Этим подается команда на отключение контактов силовой цепи пускателя. Деблокировка реле РБ1 производится нажатием кнопки БР1 (местного управления). Безотказная работа схемы получается благодаря тому, что у реле РБ1 верхние контакты замыкаются раньше, чем размыкаются нижние контакты цепи реле РБ2. Это достигается путем поднятия вверх (выгибания) нижних неподвижных контактов реле РБ1.

Вся эта схема может быть упрощена, если выбросить реле РБ1, а размыкание цепи реле РБ2 производить посредством размыкания нижних контактов реле заземления РЗ. Но этим защита загрубляется, благодаря необходимости увеличивать нажатие подвижных контактов на нижние неподвижные контакты реле РЗ. Схема для этого случая приведена на рис. 7.

При срабатывании реле заземления должно самоблокироваться. Для этож шели могут быть использованы механический или электрический принципы. Первый принцип потребует сложных устройств для деблокировки. Наиболее простым является второй способ. При этом реле заземления необходимо снабдить дополнительной катушкой, подключенной к вторичной обмотке:



трансформатора напряжения через контакты реле заземления и дополнительные контакты БРЗ кнопки "стоп" местного управления. Нажатием этой кнопки будет осуществляться деблокировка.

Фильтры токов нулевой последовательности

Фильтр токов нулевой последовательности можно осуществить посредством трансформаторов тока, включенных в схему Гольмгрина. Наличие токов небаланса и токов отсоса понижает точность схемы Гольмгрина, не говоря уже о том, что она сложна, так как требует 3 трансформатора тока.

Более простым по конструкции и точным по действию является балансный (дифференциальный) трансформатор тока, имеющий один сердечник, на котором располагаются первичные и вторичные обмотки.

При нормальной работе сумма намагничивающих ампервитков

$$i_{AH} \cdot w_1 + i_{BH} \cdot w_1 + i_{CH} \cdot w_1 = 0$$
,

где w_1 —число витков фильтра первичной обмотки, i_{AH} , i_{BH} , i_{CH} —намагничивающие токи фаз A, B и C.

Ввиду отсутствия токов небаланса, ток в реле

$$i_{\rm p} = \frac{w_{\rm 1}}{w_{\rm 2}} (i_{\rm AH} + i_{\rm BH} + i_{\rm CH}) = 0.$$

Во время замыкания на землю появляется действие токов нулевой последовательности, и тогда

$$i_{\rm p} = \frac{w_1}{w_2} [-3.i_{\rm o} + (i_{\rm AH} + i_{\rm BH} + i_{\rm CH})].$$

С учетом токов холостого хода, которыми пренебрегать нельзя, ток в. реле

$$i_{\rm p} = \frac{v_{\rm 1}}{w_{\rm 2}} [-3.i_{\rm 0} + (i_{\rm Axx} + i_{\rm Bxx} + i_{\rm Cxx})],$$

т. е. он равен сумме токов нулевой последовательности и токов отсоса, идущих на намагничивание и покрытие железных потерь.

Балансный трансформатор тока должен работать при малых ампервитках. С целью выявления зависимости вторичных токов от первичных были произведены экспериментальные исследования с различными типами трансформаторов тока. Для сердечкика катушечного трансформатора тока, имеющего поперечное сечение $3 \times 4.2 = 12.6$ см², среднюю длину магнитопровода 25.4 см, число витков 10, 15, 20, 25, 30 и коэффициент трансформации равный 1, данные приведены в табл. 2.

Определялись токи небаланса при пуске двигателей и изменении нагруз-ки для различных типов шахтных двигателей. Во всех случаях эти токи бы-

ли равны нулю.

Опытный образец, подвергшийся дальнейшим испытаниям, был рассчитан на номинальный первичный ток 75 α , имел вес сердечника 0.718 κ 2, а об-

щий вес (с проводами) 2.2 кг при очень малых габаритных размерах.

Первичная и вторичная обмотки изготовлены с отпайками с числом витков 10, 20, 30, 40 и 50. Определялись вторичные токи при различных числах витков обмоток и изменении первичного тока. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Эти результаты доказывают возможность применения в качестве фильтра токов нулевой последовательности балансных трансформаторов на большие рабочие первичные токи при их малых габаритных размерах и малом весе. Коэффициент трансформации должен быть принят равным единице, а количество витков $w_1 = w_2 = 30$. Такой фильтр может располагаться на обратной стороне панели пускателя типа ПМВ, над разъединителями. Данные, приведенные в табл. 2 и 3, доказывают невозможность применения трансформаторов типа Ферранти в схемах защит от замыкания на землю в шахтных условиях.

Реле и его параметры

Как указано выше, реле должно работать мгновенно при однофазных замыканиях на землю. Включаться должно во вторичную обмотку фильтра токов нулевой последовательности, имеющего малое число ампервитков. Учитывая эти обстоятельства и специфические шахтные условия, к реле заземления необходимо предъявить следующие требования:

1) минимальная потребляемая мощность и минимальный ток трогания;

2) достаточный коэффициент возврата;

3) непрерывность действия;

4) минимальное время действия;

- 5) неизменность характеристики при всех возможных условиях эксплоатации;
 - 6) простота конструкции и в эксплоатации;

7) большая механическая прочность;

8) обеспечение нормальной работы при наклонах пускателей до 15°. Этим условиям могут удовлетворять реле электромагнитной системы как клапанного типа, так и броневого типа. В качестве экспериментального образца было принято реле электромагнитной системы клапанного типа.

Для определения токов срабатывания обмотку снабдили отпайками на

50 и 75 витков. Вообще обмотка реле имела 100 витков.

Значения токов срабатывания реле в зависимости от числа витков обмотки реле приведены в табл. 4.

	Таблица 4
Число витков обмотки реле	Токи срабаты-
50	0.75
75	0.52
100	0.30

KALENGLIG STEELS

Что следует признать высокой чувствительностью? Согласно подсчетам мощность трогания составляла менее 0.1 ва.

Чувствительность защиты от замыкания на землю

Токи первичной обмотки (замыкания на землю) указанного выше фильтра, при которых срабатывало реле, указаны в табл. 5.

Таблица 5

Токи первичной обмотки, при которых срабатывало реле, в зависимости от числа витков обмотки фильтра									
$w_1 = w_2 = 20$	$w_1 = w_2 = 30$	$w_1 = w_2 = 40$							
2.35 2.25 2.20	1.3 1.2 1.0	1.15 0.95 0.80							
	реле, в зависимос $w_1 = w_2 = 20$ 2.35 2.25	реле, в зависимости от числа витков $w_1 = w_2 = 20$ $w_1 = w_2 = 30$ 2.35 1.3 2.25 1.2							

Это доказывает, что высокочувствительная защита от замыкания на землю с применением маловиткового фильтра токов нулевой последовательности, в сочетании с реле электромагнитной системы, может быть осуществлена. Это также опровергает английскую практику, доказывающую невозможность работы защиты от замыкания на землю в шахтах при токе утечки до 7.5% от номинального тока. Рассматриваемая защита, как видно из экспериментальных данных, работает при токе от номинального

$$\frac{1.0}{75}$$
 · 100 = 1.33°/_o; ($w_1 = w_2 = 30$),

что в 5.63 раза чувствительнее английских систем и в 1.75 раза чувствительнее реле утечки РУ пускателей типа ПМВ.

Чувствительность защиты по количеству защищаемых витков обмотки

статора обычно принимают не менее 70% (мертвая зона 30%).

Если допустить ток замыкания на землю 3 а, что меньше тока образования дуги, то чувствительность для двигателей, имеющих соединение обмотки статора в звезду, будет равна:

$$\frac{3-1}{3} \cdot 100 = 66.7\%$$

что вполне допустимо.

Для двигателей, у которых обмотка статора соединена в треугольник, получится 100-процентная защита витков.

Чувствительность защиты может быть повышена путем изменения пара-

метров фильтра и реле, а также путем более точного их изготовления.

Если через I_0 обозначить минимальный ток, при котором может работать защита от замыкания на землю (1a) и $I_{0\text{макс}}$ максимально-допустимый ток замыкания на землю (3a), то коэффициент полноты замыкания на землю будет равен:

$$\alpha = \frac{I_0}{I_{\text{OMAKC}}} = \frac{1}{3} = 0.333,$$

что допустимо, так как находится в пределах, рекомендуемых нормами 0.2-0.5.

Согласно осциллограммам, время от начала замыкания на землю до отключения дефектного участка сети составляет до 3—5 периодов.

Селективность защиты

Шахтные участковые сети-радиальные с односторонним питанием.

В сетях с изолированной нейтралью величина тока зависит от длины сети и в определенных условиях может снижаться настолько, что защита перестает функционировать, даже если ток замыкания на землю нормально превосходит ток трогания реле. Для устранения этого, как отмечено выше, необходимо заземлять нейтраль трансформатора через активное сопротивление, искусственно увеличивая таким образом ток замыкания на землю. Селективность осуществима путем применения ступени по времени. Выдержка времени защиты конечного участка (распределительного пункта) может быть принята равной нулю, а на участковых подстанциях—равной 0.5 сек. Для этого фидерные автоматы необходимо снабдить защитой от замыкания на землю и реле времени, целесообразнее теплового типа, выпускаемыми ХЭТЗ, как обеспечивающими простоту конструкции.

Заключение

Вопрос о способах защиты от однофазных замыканий на землю является исключительно актуальным, так как правильное решение его повысит безопасность работы в шахтах, даст возможность перейти на более высокое напряжение, значительно упростить схемы электроснабжения и защитные заземляющие устройства, увеличив их сопротивления.

В системах с занулением через сопротивление из всех возможных способов защиты от однофазных замыканий на землю следует признать наиболее технически совершенным способ, предлагаемый в настоящей работе, как обеспечивающий простоту схемы, селективность, непрерывность действия и

высокую чувствительность.

В связи с тем, что этот способ требует искусственного увеличения токов замыкания на землю до величины, необходимой для срабатывания реле,
могут возникнуть опасения в отношении пожаров и взрывов рудничного
газа. Однако эти токи будут меньше токов образования дуг (от искры защита невозможна и в ней нет необходимости) и они будут продолжаться
3—5 периодов, а не 7—8 дней, что имеет место при существующих способах защиты от замыкания на землю. К тому же, предлагаемая защита предотвратит переход в двойные замыкания на землю двух-трехфазные короткие
замыкания, и таким образом она заменит максимальную защиту в пускателях.