

# Компенсация емкостных токов и защита от токов утечки

В статье рассмотрены вопросы выбора параметров срабатывания защиты от токов утечки, принцип действия которых основан на использовании постоянного наложенного тока, напряжения нулевой последовательности, на снижении напряжения поврежденной фазы. Сочетание перечисленных принципов действия защиты, а также введение неавтоматической компенсации емкостных токов позволяет существенно повысить безопасность эксплуатации электроустановок в шахтах. Приведены результаты производственных испытаний модуля компенсации и защиты от токов утечки, разработанного компанией ЕХС (Energy X Components), которые показали, что максимальное количество электричества в месте замыкания в пять и более раз меньше нормированного значения.

**Ключевые слова:** модуль компенсации и защиты от токов утечки, безопасность, быстродействие защиты, контроль.

**Контактная информация** — 8 (383) 346-11-22

Использование электрической энергии в шахтах сопряжено с возникновением следующих опасных условий: поражением обслуживающего персонала электрическим током, взрывами метана, возникновением пожаров открытыми дугами, искрами и токами утечек. Для обеспечения максимальной безопасности эксплуатации электрооборудования в шахтах в ГОСТ 22929-78 «Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В» сформулированы основные технические требования. Проведем анализ этих требований.

В соответствии с ГОСТ кратковременный ток утечки не должен превышать 0,1 А, или количество электричества должно быть ограничено величиной 50 мА·с. Снижение тока утечки до уровня 0,1 А возможно только при автоматической компенсации, а время настройки устройств автоматической компенсации не должно превышать 0,1 с. Выполнение этих требований сопряжено с серьезными трудностями. Кроме того, известные устройства автоматической компенсации являются достаточно сложными, что, в свою очередь, снижает надежность устройств защиты от токов утечки. В связи с этим широкое применение нашли неавтоматические устройства компенсации с индуктивным сопротивлением, соответствующим, например, 50 % предельной рабочей емкости сети. Такая компенсация позволяет снизить кратковременный ток утечки до 250–270 мА, поэтому для ограничения количества электричества до 50 мА·с полное время отключения замыкания не должно превышать  $t_{откл.}$ :

$$t_{откл.} \leq \frac{50 \text{ мА} \cdot \text{с}}{270 \text{ мА}} = 185 \text{ мс.}$$

Аппараты общесетевой защиты от токов утечки должны осуществлять непрерывный контроль активного сопротивления изоляции сети и обеспечивать ее отключение при снижении указанных сопротивлений ниже нормированных значений. Сопротивление срабатывания защиты при номинальном напряжении сети 1140 В должно составлять не менее  $R_{уст.} = 60 \text{ кОм}$ , при этом измерительный ток общесетевой защиты должен быть не более

## ЕРУШИН

### Валерий Петрович

Канд. техн. наук, доцент  
(Новосибирский государственный  
технический университет)

## САЛОМАТИН

### Александр Федорович

Старший преподаватель  
(Новосибирский государственный  
технический университет)

## ТИМОФЕЕВ

### Иван Петрович

Канд. техн. наук, доцент  
(Новосибирский государственный  
технический университет)

0,01 А при рекомендуемом наложенном напряжении  $U_{нал.} = 100 \text{ В}$ . Для выполнения этих требований внутреннее сопротивление источника должно быть не менее  $R_{внутр.} = 10 \text{ кОм}$ .

Ток срабатывания защиты будет составлять:

$$I_{C3} = \frac{U_{нал.}}{R_{внутр.} + R_{уст.}} = \frac{100}{10 + 60} = 1,43 \text{ мА}$$

Определим необходимую задержку в срабатывании защиты  $t_{зад}$  для ее отстройки от режима подключения незаряженного кабеля с емкостью 1 мкФ на фазу. Постоянная времени цепи наложенного тока равна:

$$\begin{aligned} \tau_{зар} &= R_{внутр.} \cdot C_{max} = \\ &= 10 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \end{aligned}$$

$$\text{зарядный ток: } i_{зар} = 0,01 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{зар}}}$$

Для обеспечения селективной работы ток заряда емкости сети должен снизиться до тока срабатывания защиты:

$$1,43 \cdot 10^{-3} = 0,01 \cdot e^{-\frac{t_{зад}}{\tau_{зар}}}$$

отсюда  $t_{зад} = 58 \text{ мс}$ .

С учетом коэффициента надежности  $k_H = 1,3$  минимальное время задержки должно быть  $t_{зад} = 58 \cdot 1,3 = 75,4 \text{ мс}$ .

В то же время собственное время срабатывания аппарата общесетевой защиты при сопротивлении однофазной утечки 1 кОм не должно превышать 0,07 с при напряжении сети 1140 В (ГОСТ 22929-78), а полное время отключения — 0,12 с.

Повысить быстродействие защиты можно за счет использования нарушения симметрии фазных напряжений (увеличения напряжения нулевой последовательности) при замыкании на землю. При этом аппарат защиты должен быть отстроен по времени только от разновременности замыкания контактов коммутирующего аппарата (выключателя, контактора). Для определения фазных напряжений, а также напряжения нулевой последовательности на рисунке приведена схема замещения сети с изолированной нейтралью.

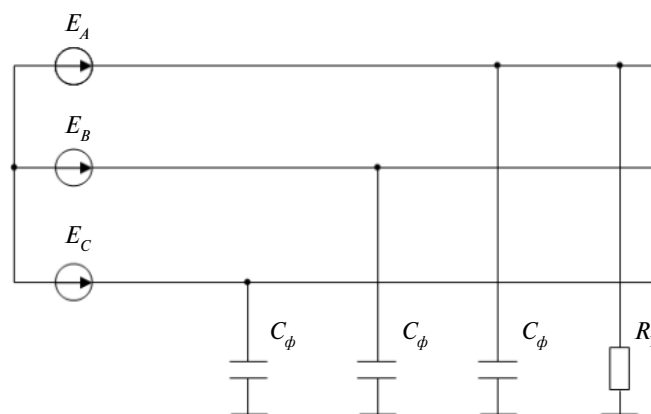


Схема замещения сети с изолированной нейтралью

Результаты испытаний МКЗУ-1,14-1Ш

$R_{\Pi}$ , кОм	$C_{\phi} = 0$ мкФ			$C_{\phi} = 0,5$ мкФ			$C_{\phi} = 1,0$ мкФ		
	$I_3$ , МА	$t_3$ , мс	$Q$ , МА·с	$I_3$ , МА	$t_3$ , мс	$Q$ , МА·с	$I_3$ , МА	$t_3$ , мс	$Q$ , МА·с
1,0	282	32	9,02	253	30	7,59	310	32	9,92
3,5	141	35	4,94	127	32	4,06	155	40	6,2
8,0	70	90	6,3	63	50	3,15	74	70	5,18
18,0	32	165	5,28	32	90	2,88	34	190	6,46

$R_{\Pi}$  — сопротивление однофазной утечки;  $C_{\phi}$  — емкость одной фазы сети относительно земли;  $I_3$  — действующее значение тока замыкания на землю;  $t_3$  — время протекания тока замыкания;  $Q$  — количество электричества в месте замыкания

Напряжения фаз относительно земли и напряжение нулевой последовательности могут быть определены по следующим выражениям:

$$\dot{U}_A = \dot{E}_{\phi} \frac{3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}}{1 + 3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}};$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_{\phi} \frac{a^2(1 + 3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}) - 1}{1 + 3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}};$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_{\phi} \frac{a(1 + 3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}) - 1}{1 + 3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}};$$

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = -3\dot{E}_{\phi} \frac{1}{1 + 3j\omega C_{\phi} R_{\Pi}};$$

где:  $\dot{E}_{\phi}$  — действующее значение фазного напряжения;  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{U}_0$  — действующие значения напряжений фаз  $A, B, C$  относительно земли и нулевой последовательности соответственно;  $a = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  — оператор трехфазной системы;  $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$  — угловая частота;  $C_{\phi}$  — емкость одной фазы относительно земли;  $R_{\Pi}$  — активное переходное сопротивление в месте замыкания на землю.

Определим параметры срабатывания защиты по напряжению нулевой последовательности из следующих соображений. При минимальной емкости фазы относительно земли  $C_{\phi \text{min}}$  защита должна срабатывать при выполнении условия  $R_{\Pi} = R_{\text{уст}}$ , тогда при максимальной емкости  $C_{\phi \text{max}}$  защита будет чувствовать максимальное переходное сопротивление в месте замыкания на землю  $R_{\Pi \text{max}}$ , которое определяется из следующего выражения:

$$-3E_{\phi} \frac{1}{1 + 3j\omega C_{\phi \text{min}} R_{\text{уст}}} = -3E_{\phi} \frac{1}{1 + 3j\omega C_{\phi \text{max}} R_{\Pi \text{max}}},$$

$$R_{\Pi \text{max}} = \frac{C_{\phi \text{min}}}{C_{\phi \text{max}}} \cdot R_{\text{уст}}.$$

Принимая  $C_{\phi \text{min}} = 0,1$  мкФ,  $C_{\phi \text{max}} = 1$  мкФ,  $R_{\text{уст}} = 60$  кОм, получаем  $R_{\Pi \text{max}} = 6$  кОм. Полученный результат показывает, что быстродействующая защита по напряжению нулевой последовательности при максимальной емкости сети будет действовать только при переходном сопротивлении менее 6 кОм.

Одним из методов повышения безопасности обслуживания электроустановок является использование фазных короткозамыкателей, действующих по факту снижения фазного напряжения. Исследования показывают, что при определенных соотношениях сопротивления утечки  $R_{\Pi}$  и емкости сети фазное напряжение поврежденной фазы может быть больше, чем неповрежденной фазы. Это может привести к неправильному определению поврежденной фазы и как следствие — к увеличению тока утечки через человека в  $\sqrt{3}$  раз. Для определения  $R_{\Pi}$ , при котором напряжение на поврежденной фазе будет превышать напряжение на одной из неповрежденных фаз, необходимо решить следующее неравенство:

$$(Re\dot{U}_A)^2 + (Im\dot{U}_A)^2 \geq (Re\dot{U}_B)^2 + (Im\dot{U}_B)^2$$

$$\text{или } (3\omega C_{\phi} R_{\Pi})^2 \geq 2,25[(1 + \sqrt{3}\omega C_{\phi} R_{\Pi})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{3} - \omega C_{\phi} R_{\Pi})^2],$$

из которого следует:

$$R_{\Pi} \geq \frac{1}{\sqrt{3}\omega C_{\phi}}.$$

Принимая  $C_{\phi} = 1$  мкФ, получаем  $R_{\Pi} \geq 1,84$  кОм.

Полученный результат показывает, что при максимальной емкости сети неправильное определение поврежденной фазы будет происходить при переходном сопротивлении 1,84 кОм и более.

Следует отметить, что использование сочетания перечисленных выше принципов позволяет существенно повысить безопасность эксплуатации электроустановок в шахтах. Таким примером является модуль компенсации и защиты от токов утечки (МКЗУ), разработанный компанией EXC (Energy X Components).

В модуле используется индуктивная компенсация тока утечки, настроенная на емкость сети 0,5 мкФ на фазу. Это позволило снизить кратковременный ток утечки через сопротивление 1 кОм с 450 мА (при отсутствии компенсации) до 290 мА.

Короткозамыкатель правильно определяет поврежденную фазу при сопротивлении утечки до 10 кОм, при этом ток утечки не превышает 60 мА. При отсутствии компенсации емкостного тока поврежденная фаза, как это было показано выше, определяется правильно при сопротивлении утечки до 1,84 кОм. При этом ток утечки составляет 310 мА ( $C_{\phi} = 1$  мкФ).

В модуле также предусмотрена быстродействующая защита по напряжению нулевой последовательности с уставками, определенными выше.

Измерение текущего сопротивления изоляции производится с использованием постоянного наложенного напряжения 200 В, что обеспечивает достаточно высокую точность измерения. Результаты измерения используются для мониторинга величины сопротивления изоляции, а также для защиты от токов однофазной утечки при переходном сопротивлении более 10 кОм и при симметричном снижении сопротивления изоляции трех фаз.

Производственные испытания модуля МКЗУ-1,14-1Ш с использованием вакуумного выключателя EX-BB6-20/1000-2, также выпускаемого на заводах компании EXC, показали следующие результаты (см. таблицу).

**Выводы**

1. Обеспечить требования ГОСТ к защитным аппаратам по чувствительности к токам утечки и быстродействию возможно путем совместного использования принципа контроля сопротивления изоляции наложенным напряжением постоянного тока и контроля напряжения нулевой последовательности.

2. Неавтоматическая компенсация емкостного тока утечки, настроенная в резонанс на емкость 0,5 мкФ, позволяет, во-первых, повысить значение переходного сопротивления, при котором достоверно определяется поврежденная фаза, с 1,8 до 10 кОм при максимальной емкости сети 1 мкФ на фазу, а во-вторых, снизить кратковременный ток утечки примерно в 1,5 раза.

3. Испытания МКЗУ-1,14-1Ш показали, что максимальное значение количества электричества в месте замыкания не превышает 10 МА·с, что в пять и более раз меньше нормированного значения 50 МА·с. Это, в свою очередь, обеспечивает высокий уровень электробезопасности обслуживания персонала.