

ОЦЕНКА СЕЛЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНЫХ СЕТЯХ 6(10) кВ

На основе анализа структуры и параметров высоковольтных сетей шахт ОАО «Воркутауголь» разработана расчетная схема для исследования процессов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Получена картина распределения токов при замыканиях в различных точках сети и выполнена оценка условий срабатывания основных типов защит от ОЗЗ, с учетом дополнительных требований по условиям эксплуатации. Показано, что причиной низкой чувствительности и селективности является большая протяженность, высокая степень разветвленности и меняющаяся конфигурация шахтной сети. Для повышения чувствительности и селективности необходимо обеспечить обмен информацией между смежными узлами распределительной сети.

The analysis of high voltage coal-mine distribution networks has been carried out to build up the equivalent circuit in order to study the ground fault processes under different conditions. The current distribution-based evaluation of protective relay functionality has revealed a strong impact of the network topology, length of cables, continuous variation in the network parameters on the efficiency of protective relays. The increase in the distributions network reliability can be achieved through involving the information exchange between the network nodes in the process of relay decision making.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются основным видом повреждений в шахтных сетях 6(10) кВ с изолированной нейтралью. Их число достигает 80 % от общего числа повреждений шахтных сетей, при частоте аварий 30-150 случаев в год [3]. Отказы в срабатывании, а также ложные, неселективные отключения (до 50 % от общего числа ОЗЗ), вызваны несовершенством релейных защит. Это приводит к простою оборудования, электротравматизму и переходу ОЗЗ в более опасные аварийные режимы. В 90 % случаев ОЗЗ переходят в двухфазные, в 30 % – в трехфазные замыкания. Неудовлетворительная работа защит указывает на необходимость улучшения ее показателей, в основном селективности и чувствительности. В соответствии с регламентирующими документами [2, 4] поврежденное присоединение должно быть селективно отключено быстродействующей защитой при максимально допустимой выдержке до 0,5 с, в зависимости от участка сети; если основная защита не сработала в течении установ-

ленного времени, то используется резервная защита, отключающая все источники питания (воды подстанций).

На рис.1 представлена расчетная схема, составленная на основе анализа структуры и параметров сетей шахт ОАО «Воркутауголь»: «Воргашорская», «Заполярная», «Воркутинская». Схема содержит: ЦПП, представленную на рис.1 как УН1; столовой кабель КЛ1.0 от ГПП; РУ, представленные на рис.1 как УН2, УН3.1, УН3.2 и УН4. С помощью модели, реализованной в среде Simulink Matlab, проведены исследования переходных и стационарных режимов ОЗЗ. Модель учитывает параметры силового трансформатора Y/Δ-Δ 110/6 кВ, входные емкости приемников, переходное сопротивление в месте замыкания, изменяющиеся параметры кабельных линий [6, 7] (кабельные линии от ЦПП – АСБ 3 × 150, кабельные линии, питающие приемники марок СБН, АВВГ, ЦАСВ сечением 3 × 50, 3 × 70, 3 × 120).

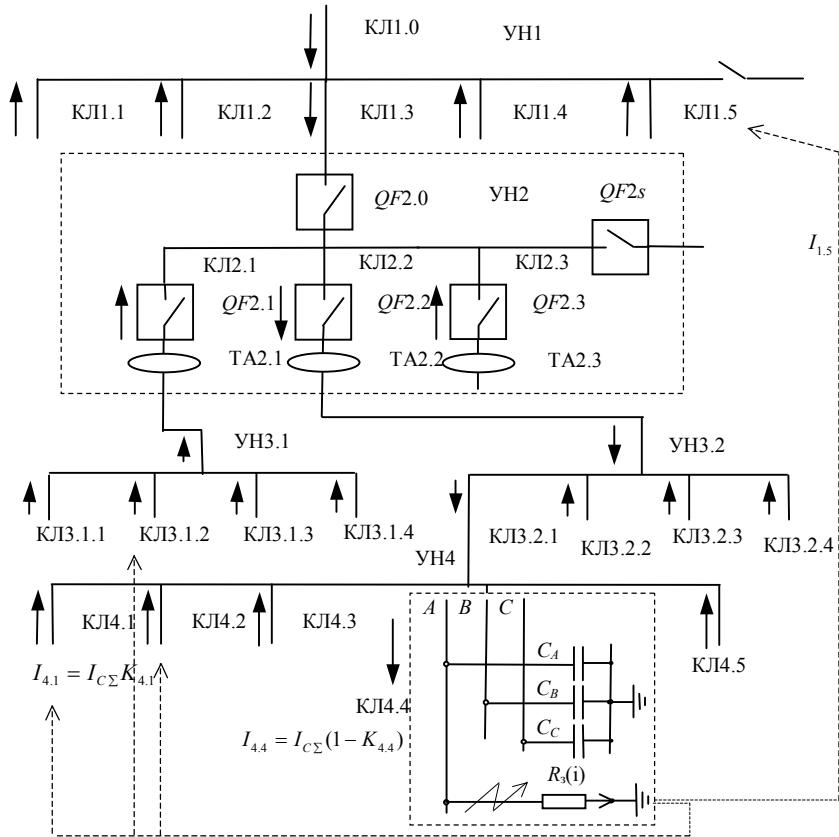


Рис.1. Типовой фрагмент схемы электроснабжения шахты, содержащий пять узлов нагрузки
УН – узел нагрузки; КЛ – кабельная линия; QF – автоматический выключатель; $QFXs$ – межсекционный автоматический выключатель (ввод резерва); ТА – трансформатор тока нулевой последовательности;
 R_3 – сопротивление замыкания на землю

Расчет токов установившегося режима сети с идеальной изоляцией производился по току замыкания $I_c = 3U_\delta \omega \tilde{N}_\Sigma$ и коэффициентам деления $K_n = C_n / C_\Sigma$, где n – номер присоединения; \tilde{N}_Σ – суммарная емкость сети.

Распределение токов в одном из продольных и одном из поперечных сечений расчетной схемы показано на рис.2, где положительные токи соответствуют ОЗЗ на указанном присоединении, отрицательные – внешним ОЗЗ.

Селективность большинства токовых защит от ОЗЗ обеспечивается отстройкой от собственного емкостного тока присоединения. Уставка защиты $I_{n,c}$ выбирается из условия несрабатывания при внешнем ОЗЗ и условия срабатывания (чувствительности) на защищаемом присоединении:

$$I_c(1 - K_n) / k_+ \geq I_{n,c} \geq k_{i_0} k_{ad} I_c K_n, \quad (1)$$

где $k_{i_0} = 1,2 - 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле тока, ошибки расчета, ток небаланса; $k_{ad} = 3 - 5$ – коэффициент броска тока для электромеханических и электронных реле, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, для цифровых реле $k_{ad} = 1,5 - 2$; $k_+ = 1,25 - 1,5$ – коэффициент чувствительности [7].

Иллюстрация выбора уставок защиты линий КЛ1.1, КЛ1.3, КЛ1.0 дана на рис.3, из которого следует, что в ряде случаев, например КЛ1.3, невозможно выбрать уставку в соответствии с условием (1). На практике это приводит к «загрублению» уставки и, как следствие, к ложным срабатываниям исправных защит. В других случаях, например на линии КЛ1.0, выбор уставки невоз-

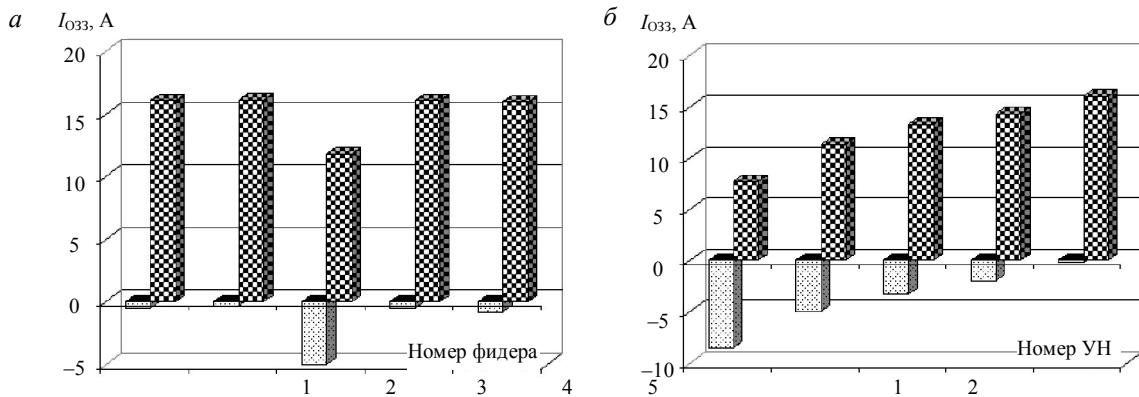


Рис.2. Распределение токов нулевой последовательности при ОЗЗ: *а* – поперечная селективность в сечении узла УН-1; *б* – продольная селективность в сечении, включающем линии узлов УН1(КЛ1.3)-УН2(КЛ2.2)-УН3.1(КЛ3.2.1)-УН4(КЛ4.4)

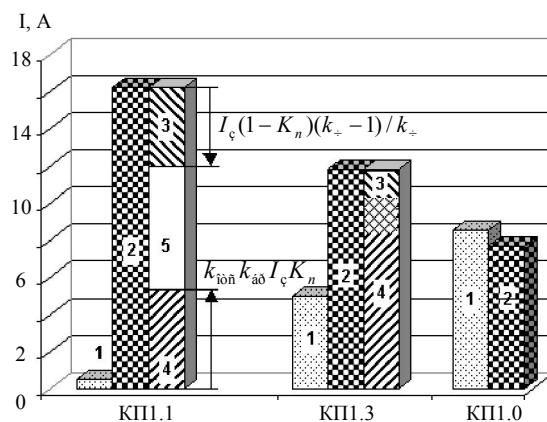


Рис.3. Выбор уставки токовой защиты

1 – ток нулевой последовательности при внешнем ОЗЗ; 2 – ток ОЗЗ; 3 – условие чувствительности; 4 – условие несрабатывания при внешнем ОЗЗ; 5 – зона выбора уставки

можен, поскольку собственный емкостной ток присоединения равен или превышает значение суммы токов неповрежденных присоединений. Срабатывание защиты носит случайный характер, не связанный с уставкой. Количество таких присоединений увеличивается по мере приближения узлов с защитами присоединений к ГПП (см. рис.2, *б*). Случайное отключение присоединений ведет к нарушению электроснабжения горизонта, а несрабатывание защиты на указанном присоединении приводит к отключению электроснабжения ЦПП резервной защитой.

Применение токовых защит целесообразно только для обеспечения поперечной селективности присоединений с малыми

собственными емкостными токами. В условии (1) коэффициент отстройки $k_{\text{io}n}$ лишь приближенно учитывает погрешность трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП), которая зависит от амплитуды и частоты тока в первичной обмотке. Для ТТНП типа ТЗЛМ и ТЗРЛ погрешности составляют 18-52 % [1]. Поэтому выбор уставки на основе усредненного значения приводит к неверной оценке чувствительности и селективности.

Более чувствительной и селективной является централизованная защита, основанная на сравнении токов нулевой последовательности (ТНП) в переходном или установленвшемся режимах при определен-

нии поврежденного присоединения по одному из признаков, например, по наибольшему току. По такому алгоритму работает микроконтроллерная защита присоединений секции сборных шин 6 кВ от замыкания на землю МКЗ3П-6, поставляемая комплектно с современными шахтными распределительными устройствами на базе ячеек КРУВ-6М. Уставка по току выбирается из условия $I_{\text{н.с}} \leq I_c(1-K_n)/k_+$.

В случае защиты присоединения с большим собственным емкостным током (см. рис.2, а, линия КЛ1.3) эта защита не обеспечит селективности. Кроме того, ложные срабатывания происходят из-за токовых погрешностей ТТНП контролируемых присоединений.

Если уставка защиты кабеля выбрана из условия (1), где I_c – ток замыкания участка кабельной линии, например КЛ1.3, то при замыкании удаленного присоединения, например КЛ4.4, в условиях срабатывания находятся несколько реле. В таких случаях не удается обеспечить продольную селективность.

Рассмотренные ограничения справедливы для защит с обратнозависимой времятоковой характеристикой, например работающих на следующем преобразовании: $t_n = 5,8 - 1,35 \ln(\bar{I}/k)$, где $k = 0,05-0,5$; $\bar{I} = I_c/I_n$ – относительное значение тока замыкания.

В случаях, когда невозможно обеспечить чувствительность защит по току, целесообразно применять направленные защиты. На угольных шахтах ОАО «Воркутауголь» применяются блоки направленной защиты от однофазных замыканий на землю БНЗ УХЛ5.1. Условие срабатывания такого рода защит:

$$\cos(\phi_c + \phi_{i,+}) \geq 0, \quad (2)$$

где ϕ_c – угол между током и напряжением нулевой последовательности; $\phi_{i,+}$ – дополнительный фазовый сдвиг, обеспечивающий максимальную чувствительность реле.

Уставки защиты выбираются из условий

$$k_{\text{cái}} U_{\text{fáá}} \leq U_{\text{c.с}} \leq 3U_0/k_+;$$

$$k_{\text{cái}} I_{\text{fáá}} \leq I_{\text{c.с}} \leq I_c(1-K_n)/k_+,$$

где $U_{\text{c.с}}$ и $I_{\text{c.с}}$ – напряжение и ток уставки срабатывания; $k_{\text{cái}}$ – коэффициент запаса; $U_{\text{fáá}}$ и $I_{\text{fáá}}$ – напряжение и ток небаланса ТТНП.

Из распределения ТНП при ОЗЗ на линии КЛ4.4 (см. рис.1), видно, что попечерная селективность обеспечивается за счет направленности защиты. Угловые погрешности порядка 60° для ТТНП типа ТЗЛМ и ТЗРЛ [1], приводят к сокращению зоны максимальной чувствительности и последующему неселективному срабатыванию. Однако, даже в случае настроенного реле, обеспечение продольной селективности в разветвленной сети принципиально не возможно, ввиду того, что условия на срабатывание в присоединениях КЛ4.4, КЛ3.2.1, КЛ2.2, КЛ1.3 и КЛ1.0 совпадают.

В случаях отключения сети защитами допускается применение АВР при условии применения устройств контроля изоляции [2]. Несогласованная работа устройств автоматики (АВР, АПВ) и защиты от ОЗЗ в случаях неселективной работы может привести к развитию аварийных режимов. Например, при ОЗЗ на КЛ2.2 питание на поврежденную линию поступает от резервной линии через секционный выключатель $QF2s$ (см. рис.1). Это приводит к отключению поврежденного присоединения, в другом случае – к дальнейшему развитию аварийного режима вследствие рассогласования уставок в новой конфигурации сети.

ЛИТЕРАТУРА

- Гречухина И.В. Расчет электромагнитного поля кабельной оболочки в режиме однофазного замыкания / И.В.Гречухина, В.К.Слышенко // Вестник ИГЭУ. Вып.II. Иваново, 2001.
- Инструкция по безопасной эксплуатации электроустановок в горно-рудной промышленности РД 06-572-03. Серия 06. Вып.3. М.: Госгортехнадзор, 2003.

3. *Муравьев В.П.* Надежность систем электроснабжения и электрооборудования подземных разработок шахт / В.П.Муравьев, Г.И.Разгильдеев. М.: Недра, 1970.

4. Правила безопасности в угольных шахтах ПБ 05-618-03 / НТЦ «Промышленная безопасность». М., 2004.

5. Правила устройства электроустановок. 6-е и 7-е изд. М.: Энас, 2007.

6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970.

7. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / ПЭИПК. СПб, 2003.

Научный руководитель д-р т.н. проф. *О.Б.Шонин*