

# ОБҐРУНТУВАННЯ УМОВ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІНІЙ ЖИВЛЕННЯ НАПРУГОЮ 35 КВ ГЛИБОКИХ ШАХТ

Ф.П. Шкрабець, О.В. Остапчук, А.В. Акулов, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет", Україна

Виконано аналіз небезпечних факторів, що чинять вплив на рівень безпеки обслуговуючого персоналу та наведено технічне обґрунтування для запровадження засобів захисту для підвищення рівня безпеки експлуатації мереж живлення класу напруги 35 кВ в умовах глибоких шахт.

*Вступ.* Забезпечення необхідного рівня безпеки експлуатації мереж живлення напругою вище 1000 В на вугільних і рудничних шахтах досягається за рахунок використання комплексу організаційних і технічних заходів захисту. До яких відносяться: виключення можливості дотику до струмовідних частин, застосування знижених напруг для певних умов, захисне розділення мереж, вибір необхідного рівня захисної ізоляції, захисне заземлення та автоматичні засоби захисту.

*Стан питання.* Останнім часом, через використання пристроїв на мікропроцесорній елементній базі, широкого поширення набули автоматичні пристрої захисту. Вони увібрали в себе великий спектр пристроїв, що використовують різні способи захисту від ураження електричним струмом. Вони досить різні за своєю складністю та функціональними властивостями, але можуть застосовуватися для певних умов. На рис. 1, згідно /42/, наведена приблизна класифікація способів і пристроїв автоматичного захисту для високовольтних ліній напругою 6-35 кВ. Сучасний стан рівня електробезпеки та надійності електропостачання можна охарактеризувати, виконавши аналіз кожного з наведених способів.



Рис. 1. Класифікація способів та пристроїв автоматичного захисту від електричних уражень у високовольтних мережах шахт

*Захисне вимикання.* Захисту от ураження електричним струмом в підземних мережах напругою вище 1000 В на основі захисного вимикання, на сьогоднішній день не існує, через неможливість виконання досить жорстких обмежень за швидкодією та чутливістю. Належна

швидкодія не забезпечується через застосування неефективних масляних вимикачів, час спрацювання яких складає 0,08-0,15 с /1/. Застосування більш сучасних вакуумних вимикачів з часом спрацювання 0,03 с, теж не вирішує проблему, як зазначено в /2/, повний час спрацювання захисного вимикання навіть у мережі 6 кВ повинен складати не більше 0,01 с.

Крім того при використанні вакуумних вимикачів, існує ризик виникнення значних внутрішніх перенапруг, що можуть спричинити вихід з ладу електрообладнання. Крім високої швидкодії, пристрої захисту повинні мати належну чутливість, її можна розрахувати з виразу визначення опору однофазного витоку  $R'_{cn}$ , (опір ізоляції  $r_{із} = \infty$ ):

$$R'_{cn} = U_{\phi} \sqrt{\left(\frac{1}{I_{д*}}\right)^2 - \left(\frac{1}{I_{C*}}\right)^2},$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга мережі, В;  $I_{д*}$  – припустимий тривалий струм, А;  $I_{C*}$  – ємнісний струм замикання на землю, А.

*Пристрій контролю ізоляції.* Для реальних умов шахтних кабельних мереж напругою 6 кВ з параметрами ( $C=8...10$  мкФ/фазу,  $I_{C*}=25...30$  А) для обмеження аварійного струму до 25 мА, необхідний опір повинен складати значення не менше 140 кОм. Оскільки це значення приблизно відповідає можливим значенням несиметрії опорів ізоляції відносно землі, то забезпечити необхідну чутливість досить складно. Тому в високовольтних мережах, такий захист виконує функцію контролю рівня струмів витоку при пошкодженнях у мережі. На сьогоднішній день широке розповсюдження отримав один з пристроїв під назвою АЗО-6, що є захисним пристроєм та реагує на зниження опору до 120 кОм з часом спрацювання 0,05 с. Більш докладно про цей спосіб захисту буде сказано у наступних главах.

*Компенсація ємнісної складової струму замикання.* Крім нормального режиму роботи електричної мережі можливий досить тривалий режим роботи при виникненні однофазного замикання на землю (через режим нейтралі мережі). В електричних мережах напругою 6-35 кВ гірничих підприємств, часто виникаючим видом аварії, є однофазне замикання на землю, на його частку припадає від 75 до 90% від усіх видів замикань. Причини виникнення замикань на землю можна класифікувати таким чином: електричний пробій робочою напругою за рахунок розвитку мікротріщин в ізоляційних матеріалах; електричний пробій ізоляції за рахунок дії внутрішніх (при дугових і металевих замиканнях на землю; комутаційних) і атмосферних перенапруг; механічне руйнування фазної ізоляції; дотик до неізольованих струмовідних частин людей або тварин; помилкові дії обслуговуючого персоналу. Однофазні замикання на землю мають істотний негативний вплив на умови надійності електропостачання та електробезпеки при експлуатації електричних мереж та обладнання. Якщо вважати, що відповідно до норм в мережах з ізолюваною нейтраллю струм однофазного замикання на землю не повинен перевищувати 30 А, напруга дотику складе не більше 120 В. У теж час, тривало допустима напруга дотику (загальноприйняте значення його становить 40 В), значно менше максимально можливих значень при сталому режимі замикання. У випадку дії захисту від замикань на землю на сигнал з'являється реальна небезпека ураження людини напругою дотику при відповідній ємності мережі відносно землі /3/.

*Формулювання цілей статті.* Одним з логічних напрямів поліпшення умов електробезпеки при експлуатації електричних мереж напругою 6-35 кВ на гірничих підприємствах є шлях зниження негативних показників процесу однофазного замикання на землю, а саме:

- зменшення значення аварійного струму в зоні замикання на землю;
- зменшення часу впливу вражаючих величин (аварійного струму і напруги дотику);
- зниження кратності внутрішніх перенапруг і, відповідно, зменшення ймовірності розвитку аварії в розподільній мережі.

*Виклад основного матеріалу.* Для досягнення зазначених вище цілей використовується метод зниження аварійного потенціалу за рахунок автоматичного закорочування на землю

пошкодженій фази. Цей захід забезпечує шунтування постраждалого та знижує значення струму, який протікає через нього. Процес шунтування будь-якого електричного кола необхідно розглядати перш за все як окремий випадок широко розповсюдженого в природі явища, що призводить до зниження кількості речовини, яка протікає через зашунтовану ділянку. В останні роки шунтування однофазних замикань на землю використовується як один з методів для забезпечення необхідного рівня електробезпеки та перш за все – для зниження значення струму, що протікає через тіло людини при однофазному приєднанні.

При захисті з закорочуванням на землю фази мережі безпека торкання до неї буде забезпечуватись, якщо захист задовольняє наступним умовам [2]:

- в початковий момент закорочування (перехідний режим) –  $T_0 \leq t_d$ , де  $T_0 = t_c + t_n$  – час протікання струму через тіло людини, с;  $t_c$  – повний час спрацювання захисту, який складається з часу необхідного для вибору пошкодженій фази та часу заколювання її на землю;  $t_n$  – час затухання перехідного струму після закорочування, с;  $t_d = f(I_c)$  – короткочасно припустимий час протікання струму через тіло людини, с;

- після  $T_0$  (сталій режим) –  $U_{np.\phi} = I_3 z_\Sigma + I_n z_n \leq U_{np.d}(t)$ , де  $U_{np.\phi}$  – напруга торкання до фази, В;  $I_3$  – струм, що стікає в землю через заземлювач, А;  $I_n z_n$  – спадання напруги, що викликане струмом навантаження та опором ділянки лінії від місця торкання до заземлювача, В;  $z_\Sigma$  – повний опір кола замикання, Ом;  $U_{np.d}(t)$  – припустима напруга торкання тривалістю  $t$ , В.

З наведеної класифікації захисних пристроїв можна зробити висновок, що ефективність застосування різних технічних заходів пов'язана з підвищенням надійності роботи електрообладнання та безпеки обслуговуючого персоналу. Аналіз захисних пристроїв показує, що до цих пір у високовольтних підземних мережах не існує універсальних технічних рішень, що дозволяють підвищити безпеку та надійність системи електропостачання, тому головним завданням при використанні напруги 35 кВ в умовах глибоких вугільних та рудних шахт є розробка комплексу заходів та засобів з організації безпечної та надійної роботи електрообладнання та обслуговуючого персоналу.

Ступінь небезпеки розподільних мереж при дотику до корпусу електрообладнання, який опинився під напругою, характеризується значенням напруги дотику і часом його впливу. Значення напруги дотику для сталого процесу замикання в загальному випадку визначається значенням струму однофазного замикання на землю і опором захисного заземлення та, без урахування шунтуючої дії опором тіла людини і активного опором ізоляції мережі відносно землі, розраховується за виразом:

$$U_{dot} = I_3 r_3 = \frac{\sqrt{3} U_H \omega C r_3}{\sqrt{1 + 9 \omega^2 C^2 r_3^2}},$$

де  $r_3$  – опір захисного заземлення пошкодженого електрообладнання,  $I_3$  – струм однофазного замикання на корпус.

Для виконання дослідження ефективності застосування зазначеного методу в умовах глибоких та енергоємних гірничих підприємств використовувалась математична модель мережі живлення напругою 35 кВ. На рис. 2 приведена електрична схема заміщення, що складається з джерела напруги  $U1$ ,  $U2$ ,  $U3$ , однорідної лінії передачі з зосередженими параметрами: повним опором –  $Z_n$  і ємністю фази на землю  $C$  та споживача з опором навантаження  $Z_n$ .

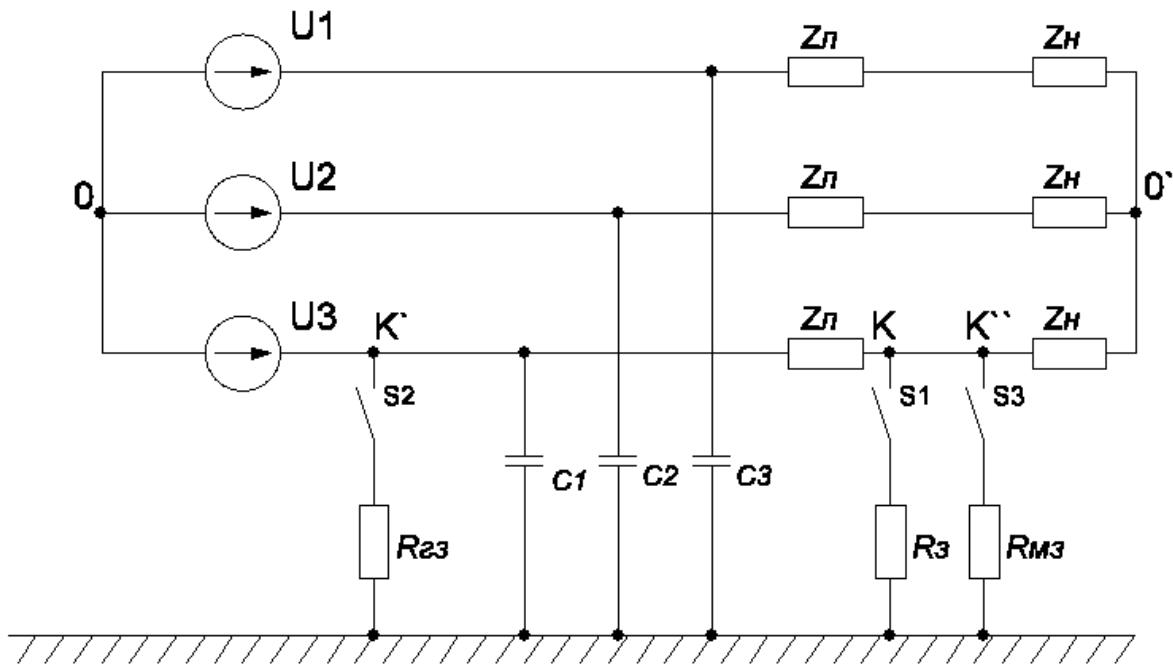


Рис. 2. Принципова схема електричної мережі при шунтуванні замикання на землю

При виникненні однофазного замикання на землю у точці  $K$  через опір  $R_з$  (ключ  $S1$  замкнено), в місці замикання буде протікати струм  $I^{(1)}$ . Якщо опір  $R_з$  штучно шунтувати за допомогою опору головного заземлювача (замкнути ключ  $S2$ ), що встановлений на головній розподільній підстанції –  $R_{гз}$  та дорівнює 4 Ом, тоді напруга дотику людини знизиться і буде залежати від значення перехідного опору  $R_з$ . Разом з тим необхідно проаналізувати вплив місцевого заземлювача, що може бути встановлений безпосередньо у гірничій виробці поблизу примикального пункту (на схемі імітується замиканням ключа  $S3$ ). Згідно вимог нормативних документів – опір місцевого заземлювача складає 2 Ом.

Розрахунок значень напруги дотику при змінних параметрах мережі ( $L$  – довжина ліній живлення,  $S$  – смність поперечного перерізу,  $\text{мм}^2$ ) виконувався з використанням законів Кирхгофа. У якості перехідного опору використовувались декілька значень:  $R_з = 0$  Ом – для випадку металевого замикання на землю;  $R_з = 10$  Ом – для замикання на землю через невеликий опір;  $R_з = 100$  Ом – для замикання на землю через великий опір;  $R_з = 1000$  Ом – для замикання на землю через опір людини. У результаті проведених розрахунків було отримано залежності напруги дотику від параметрів мережі  $U_{дот} = f(L, S)$ , що зображені на рис.3 (рис.3а – використовується головний шунтувальний пристрій на підстанції; рис.3б – використовується головний та місцевий шунтувальні пристрої).

Основні вимоги до пристроїв захисту на основі АЗФ. Основною умовою ефективності процесу автоматичного замикання (шунтування) пошкодженої фази є висока швидкодія системи, а також необхідна чутливість та надійність. Повний час спрацювання, який складається з часу спрацювання блока, що визначає пошкоджену фазу та пристрою, що створює штучне замикання не повинен перевищувати 15-20 мс та повинен відповідати умові

$$t_{ПЗФ} \leq t_{с.з.} / (1,5 \dots 2).$$

Виконання зазначеної умови забезпечує можливість затримки спрацювання селективного захисту від ОЗЗ на пошкоджену приєднання за час захисного закорочування на землю при

сталих ОЗЗ або неспрацювання селективного захисту при короточасних самоліквідованих ОЗЗ за рахунок достатньо швидкого перенесення точки замикання на землю від місця однофазного пошкодження. Час витримки в режимі захисного шунтування не повинен перевищувати більш ніж 30-60 с, виходячи з можливості забезпечення умов для відновлення електричної міцності ізоляції у місці самоліквідованих ОЗЗ. При усталених ОЗЗ пошкоджене приєднання після дешунтування через 30-60 с повинне відключатися селективним захистом у звичайному режимі.

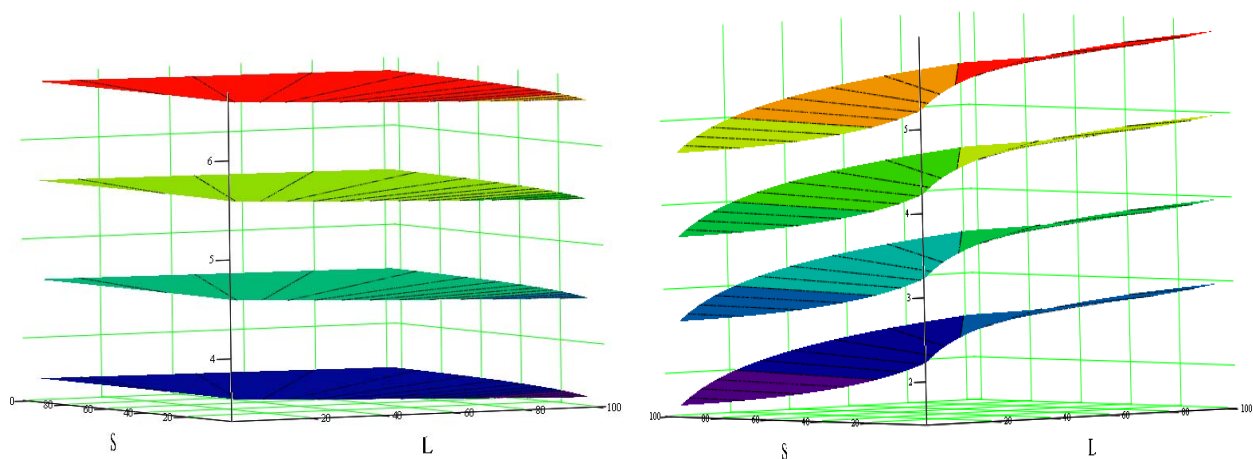


Рис.3 Залежність напруги дотику від параметрів мережі  $U_{dom} = f(L, S)$ : а – з головним шунтувальним пристроєм; б – з головним та місцевим шунтувальними пристроями.

Чутливість ПЗФ за опором однофазного витoku на землю ( $R'_{ПЗФ}$ ) повинна бути погоджена з уставкою селективного ступеню захисту от ОЗЗ ( $R'_{ЗНЗ}$ ) та обиратись виходячи з умови

$$R'_{ПЗФ} \leq R'_{ЗНЗ}.$$

Цей параметр в основному визначається ємністю фази та в мережах з ємнісними струмами ОЗЗ 1-10 А не перевищує 3-8 кОм/фазу.

*Висновки.* 1. Значне поліпшення умов непрямой електробезпеки в електричних мережах напругою 35 кВ може бути забезпечено застосуванням захисного заземлення пошкодженої фази при замиканнях на землю.

2. Отримані залежності дозволяють зробити висновок про необхідність облаштування місцевих заземлювачів для підвищення рівня безпеки у кожному конкретному випадку. Для кращого візуального сприйняття значень напруги, можливе використання двовимірних графіків для постійного значення довжини чи поперечного перерізу ліній.

3. Визначені показники ефективності роботи захисного шунтування до яких відноситься час спрацювання пристроїв релейного захисту та опір лінії

#### Список літератури

1. Пивняк Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров [Текст] справ. пособие Г.Г. Пивняк, Ф.П. Шкрабец. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
2. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0 – 1. 01–05. – К.: Недра, 2005. – 496 с.
3. Шкрабец Ф.П. Автоматический и селективный контроль параметров изоляции в распределительных сетях напряжением выше 1000 В [Текст] /Ф.П. Шкрабец // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юговосток, Лтд». – 2009. – С.31–39.