

УДК 621.316.925.014.6

### КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ В РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

**А. Г. Ликаренко, А. А. Петриченко, А. В. Омельченко**

Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»  
ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: speet@ukr.net

Эксплуатация электротехнических комплексов в особо опасных условиях, которыми являются предприятия с подземными способами добычи полезных ископаемых, напрямую связана с необходимостью защиты горняков от поражения электрическим током, поэтому рудничные электрические сети с изолированной нейтралью трансформатора оснащены рудничными аппаратами защиты от токов утечки. Однако в рудничных электрических сетях уже давно начато применение на горных машинах и механизмах полупроводниковых преобразователей энергии в схемах регулируемых электроприводов постоянного и переменного токов. Это превратило рудничные электрические сети из сетей переменного тока в комбинированные, состоящие из участков промышленной частоты, участков постоянного тока и участков переменной частоты 0–70 Гц. Существующие аппараты защиты от утечек токов выполнены согласно требованиям ГОСТ 22929–78, который не распространяется на аппараты защиты комбинированных электрических сетей, поэтому и использование существующих аппаратов защиты в рудничных электрических сетях является неправомерным. Аппарат защиты от токов утечки с рабочим диапазоном емкости от 0 до 3,0 мкФ до настоящего времени не создан. Предлагается новый способ автоматической компенсации емкостных токов утечки, основанный на поинтервальном ограничении статическим дросселем кратковременных токов, в пределах которых токи утечки не превышают их нормирующие значения при создании дросселем колебательного контура с емкостью середины интервала, а для идентификации интервала рабочего диапазона емкости изоляции сети с текущим ее значением на сеть накладывают под рабочим напряжением оперативный ток повышенной частоты, а по его значению судят об интервале рабочего диапазона емкости сети, где находится ее текущее значение, и переключают витки дросселя на создание колебательного контура с емкостью середины идентифицированного интервала.

**Ключевые слова:** рудничная электрическая сеть, электробезопасность, токи утечки, автоматическая компенсация, аппарат защиты.

### КОНЦЕПЦІЯ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ ВИТОКУ В РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**А. Г. Лікаренко, А. А. Петриченко, О. В. Омельченко**

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»  
вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: speet@ukr.net

Експлуатація електротехнічних комплексів в особливо небезпечних умовах, якими є підприємства з підземними способами видобутку корисних копалин, безпосередньо пов'язана з необхідністю захисту гірників від ураження електричним струмом, тому рудничні електричні мережі з ізольованою нейтраллю трансформатора оснащені рудничними апаратами захисту від струмів витоку. Однак у рудничних електричних мережах вже давно розпочато застосування на гірничих машинах і механізмах напівпровідникових перетворювачів енергії в схемах регульованих електроприводів постійного й змінного струмів. Це перетворило рудничні електричні мережі з мереж змінного струму в комбіновані, що складаються з ділянок промислової частоти, ділянок постійного струму й ділянок змінної частоти 0–70 Гц. Існуючі апарати захисту від витоків струмів виконано згідно з вимогами ГОСТ 22929–78, який не поширюється на апарати захисту для комбінованих електричних мереж, тому й використання існуючих апаратів захисту в рудничних електричних мережах є неправомерним. Апарат захисту від струмів витоку з робочим діапазоном ємності від 0 до 3,0 мкФ до теперішнього часу не створено. Пропонується новий спосіб автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку, заснований на поінтервальному обмеженні статичним дроселем короткочасних струмів, у межах яких струми витоку не перевищують їх нормоване значення при створенні дроселем коливального контуру з ємністю середини інтервалу, а для ідентифікації інтервалу робочого діапазону ємності ізоляції мережі з поточним її значенням на мережу накладають під робочою напругою оперативний струм підвищеної частоти й по його значенню судять про інтервал робочого діапазону ємності мережі, де знаходиться її поточне значення, та перемикають витки дроселя на створення коливального контуру з ємністю середини ідентифікованого інтервалу.

**Ключові слова:** рудникова електрична мережа, електробезпека, струми витоку, автоматична компенсація, апарат захисту.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Для защиты горнорабочих от поражения электрическим током и других опасностей вследствие утечек тока на землю рудничные электрические сети до 1200 В с изолированной нейтралью трансформатора, применяемые в

подземных выработках угольных и горнорудных предприятий, оснащены аппаратами от токов утечки. К последним относят аппараты общесетевой защиты от утечек, устройства компенсации емкостной составляющей тока утечки (встраиваемые в ап-

параты защиты или индивидуального исполнения), фазные короткозамыкатели и аппараты предупредительного контроля и блокировки [1].

Применяемые в отечественной и зарубежной практике схемы аппаратов защиты от токов утечки основаны на принципе измерения активного сопротивления фаз сети относительно земли. Они предназначены для применения в простых сетях промышленной частоты, где основными дестабилизирующими факторами являются параметры изоляции сети. Однако в этих сетях уже давно начато внедрение полупроводниковых преобразователей для регулированных электроприводов постоянного и переменного токов, что превратило эти сети в комбинированные, состоящие из участков промышленной частоты, участков постоянного тока и участка изменяемой частоты 0–70 Гц. Поскольку существующие аппараты защиты выполнены с учетом требований ГОСТ 22929-78 [1], который не распространяется на аппараты защиты для комбинированных сетей, то и применение существующих аппаратов защиты в этих сетях неправомерно. Это было известно еще в 80-х годах прошлого века, когда предпринимались попытки внедрения в шахты комбайнов с регулируемой подачей на постоянном токе. Однако аппарат защиты от токов утечки для комбинированных сетей до настоящего времени не создан.

Многочисленные исследования токов утечки на участках промышленной частоты и изменяемой частоты показали, что они являются переменными, а при несимметричном токе утечки на участке постоянного тока появляется постоянная составляющая, возникновение которой является причиной неработоспособности серийных общесетевых аппаратов защиты от токов утечки [2]. Для устранения этого недостатка предложено дополнительно применить асимметр для контроля асимметрии напряжения положительного и отрицательного полюсов относительно земли. При возникновении асимметрии сеть будет отключаться асимметром, во всех остальных случаях – общесетевым аппаратом.

Однако при исследовании защитных характеристик серийных аппаратов в условиях дестабилизирующих факторов комбинированных сетей установлено, что они также неработоспособны и при симметричных утечках на участке постоянного тока [3], поэтому от применения оперативного постоянного тока в аппаратах защиты вообще необходимо отказаться. Альтернативой этому направлению является разработка для комбинированных сетей аппарата защиты на переменном оперативном токе при выделении и контроле его активной составляющей. До настоящего времени работы в этом направлении практически не проводились.

Аппараты защиты от утечек должны иметь такие функциональные характеристики, чтобы ток через тело человека и время действия тока в интервале до 1 с не превышали значений, установленных в ГОСТ ССБ-12.1.038-82 [4]. В соответствии с его

нормами на практике достигается лишь минимальная безопасность при соблюдении двух условий:

$$g_y \leq g_{y.np}; \quad (1)$$

$$\sqrt{G^2 + b^2} = \frac{I_{к.д} \text{ или } Q_{дон}}{U_{\phi}} \leq \frac{Q_{дон}}{t_{ч} U_{\phi}}, \quad (2)$$

где  $g_{y.np}$  – предельное значение сопротивления утечки, при котором ток через тело человека  $I_{дл.д}$  равен или меньше длительно допустимого тока  $I_{дл.д}$ :  $I_{ч} \leq I_{дл.д}$ ,  $I_{к.д}$  – кратковременный, предельно допустимый ток утечки, протекающей через минимальное расчетное сопротивление тела человека при сопротивлении изоляции не менее сопротивления срабатывания и емкости изоляции сети в пределах рабочего диапазона в течение времени отключения сети и действия ЭДС выбега электродвигателей [1];

$Q_{дон} = \int_0^{t_{ч}} i_{ч}(t) dt \leq 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$  – допустимое количество электричества через тело человека за время протекания тока ( $t_{ч}$ ) под действием рабочего напряжения сети и ЭДС вращающихся по инерции электродвигателей до отключения контакторов аппаратов управления [1];  $t_{ч}$  – время протекания тока через тело прикоснувшегося человека.

Для реализации условий минимальной безопасности (1) и (2) необходимо, чтобы защита от утечек вызывала отключение сети от источника питания как при появлении предельной утечки  $r'_{y.np} = 1/g'_{y.np}$ , так и снижении активного сопротивления изоляции до критического отключающего значения  $R_{u(кр)} = 1/G$ . Проверка условия достижения минимальной безопасности (1) осуществляется сравнением фактических защитных характеристик с требуемыми по условию обеспечения электробезопасности. Причем отключающие сопротивления однофазной утечки защитных характеристик аппаратов защиты не должны превышать более чем 150 % их уставки по нормативам электробезопасности [1], определяемых для всех уровней напряжения по выражению

$$r'_{уст} = \frac{U_{\phi}}{I_{дл.д}}. \quad (3)$$

Для  $U_c = 380; 660; 1140 \text{ В}$  величина уставки по однофазной утечке соответственно равна  $r_{уст} = 8,8; 15,2; 26,4 \text{ кОм}$ .

Для снижения кратковременного тока до нормативов по требованиям минимальной безопасности (2) во всех рудничных сетях до 1200 В применяется компенсация емкостной составляющей тока утечки и, кроме того, шунтирование утечки путем автоматического присоединения между поврежденной фазой и землей резистора малого сопротивления. В сетях 380 и 660 В применяются аппараты защиты с устройствами автоматической компенсации емкостных токов утечки АЗАК–380, АЗАК–660, АЗПБ. В

блоке компенсації і шунтування пошкодженої фази БКЗ–1140 використана нерегульована компенсація ємкостної складової току утечки з допомогою дроселя, настроєного в резонанс з ємкістю мережі, рівної 0,5 мкФ на фазу, а шунтування пошкодженої фази проводиться через 0,17 с після виникнення утечки току з допомогою резистора опором 100 Ом [5]. При вказаній налаштуванні компенсуючого дроселя кратковременний ток через утечку опором 1 кОм в мережі з максимальною ємкістю в 1 мкФ на фазу і напругою 1200 В складе 0,295 А. Тому за 0,17 с, що пройшли від моменту шунтування пошкодженої фази, через вказану утечку пройде кількість електричності 50 мА·с, рівне граничній нормі.

Апарати захисту з пристроями автоматичної компенсації ємкостних токів утечки АЗАК–380, АЗАК–660, АЗПБ забезпечують ефективне зниження кратковременних токів до нормованих значень (2) в 100 мА [5]. Однак захисні характеристики цих пристроїв захисту не забезпечують виконання умови (1) по мінімальній безпеці. Вони знаходяться в областях як вище, так і нижче вимог по умовам електробезпеки і мають області повних функціональних відмов при однополюсних утечках на ділянці постійного струму [3]. Застосовуваний в блоці БКЗ–1140 статичний компенсатор забезпечує зниження кратковременного струму однофазної утечки опором 1 кОм тільки з 483 до 281 мА [5]. Для подальшого зниження кратковременного струму в цьому блоці застосовано пристрій вибору пошкодженої фази і шунтування її через мале опором на

землю. Однак це пристрій не працює в умовах комбінованих мереж через наявність в частотному перетворювачі звена постійного струму.

Таким чином, існуючі апарати захисту типів АЗАК, АЗПБ, БКЗ–1140 не забезпечують умови (1) по мінімальній безпеці, а блок короткозамикателя БКЗ–1140 ще і умови (2) по кратковременному току.

Для виконання умови (1) по тривалому току необхідно вирішити задачу розробки пристрою захисного відключення на змінному оперативному струмі, що здійснює контроль опорів ізоляції і витоків на його активній складовій. Для виконання умови (2) по кратковременному току необхідно розробити нову концепцію автоматичної компенсації ємкостної складової струмів витоків в рудничних комбінованих мережах до 1200 В з ізолюваною нейтраллю, застосованих в шахтах вугільних і гірнорудних підприємств.

Метою дослідження є обґрунтування нової концепції автоматичної компенсації ємкостної складової струмів витоків для всіх рівнів напруг рудничних комбінованих мереж до 1200 В з ізолюваною нейтраллю.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Розглянемо, на якому принципі забезпечується виконання умови мінімальної безпеки по кратковременному току (2).

На рис. 1 представлена еквівалентна схема для розрахунку кратковременного струму, отримана по методу еквівалентного генератора з відомої схеми шахтної мережі змінного струму з компенсатором ємкостної складової току утечки [5].

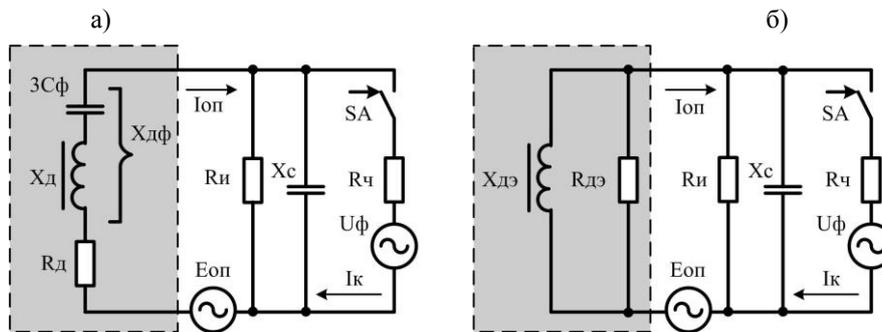


Рисунок 1 – Еквівалентні схеми для розрахунку кратковременного струму: а) при послідовній схемі заміщення компенсуючого дроселя; б) при паралельній схемі заміщення компенсуючого дроселя

На рис. 1 прийняті наступні позначення:  
 $R_u = \frac{r_u}{3}$ ,  $X = \frac{r}{\omega 3C}$  – активне і ємкостне опір мережі;  $r_u$ ,  $C_u$  – опір і ємкість ізоляції фази мережі відносно землі;  $R_q, G_q = 1/R_q$  – опір і активна провідність тіла людини;  $R_\phi, X_\phi = \omega L_\phi$  – активне і індуктивне опір компенсуючого дроселя;

$X_{\phi} = j \left( X_\phi - \frac{I}{\omega 3C_\phi} \right)$  – індуктивне опір дроселя з фільтром підключення до мережі ( $3C_\phi$ );  $R_\phi, X_\phi, R_{\phi\phi}, X_{\phi\phi}$  – опір гілок дроселя відповідно при послідовній і паралельній схемі заміщення;  $U_\phi$  – фазна напруга мережі; SA – комутаційний апарат, що імітує дію людини;  $E_{on}, I_{on}$  – джерело оператив-

ного напряжения частотой  $f_{on} < 50$  Гц для создания оперативного тока  $I_{on}$  и выделения его емкостной составляющей для регулирования индуктивности дросселя.

Компенсирующий дроссель на расчетной схеме представлен двумя эквивалентными схемами, т.е. имеющими одинаковые сопротивления на зажимах только на одной частоте. Если задана схема с последовательным соединением элементов дросселя, то преобразование ее в параллельную схему производится по выражениям

$$X_{\partial\partial} = X_{\partial\phi} \left( 1 + \frac{R_{\partial}^2}{X_{\partial\phi}^2} \right); \quad (4)$$

$$R_{\partial\partial} = R_{\partial\phi} \left( 1 + \frac{X_{\partial\phi}^2}{R_{\partial}^2} \right). \quad (5)$$

Индуктивное сопротивление ветви  $X_{\partial\partial}$  принимается из условия равенства его емкостному сопротивлению изоляции в точке резонанса:

$$X_{\partial\partial} = X_{\partial\phi} \left( 1 + \frac{R_{\partial}^2}{X_{\partial\phi}^2} \right) = \frac{1}{\omega C_{рез}}. \quad (6)$$

При принятом значении  $X_{\partial\partial}$  из (6) эквивалентное сопротивление дросселя и фильтра  $X_{\partial\phi}$  находится из уравнения

$$X_{\partial\phi} = \frac{X_{\partial\partial}}{2} + \sqrt{\left( \frac{X_{\partial\partial}}{2} \right)^2 - R_{\partial\phi}^2}. \quad (7)$$

Приняв к расчету параллельную схему замещения дросселя из расчетной схемы (рис. 1,б), находим в комплексной форме выражение для расчета кратковременного тока в компенсированной сети:

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}_\phi}{R_u + \frac{1}{g_{uo} + j(b_c - b_{\partial\partial})}}, \quad (8)$$

где  $b_c = \omega C_u$  – емкостная проводимость изоляции;  $g_{uo} = g_u + g_{\partial\partial}$  – суммарная активная проводимость изоляции и активной ветви (5) дросселя.

Выражение для определения действующего значения кратковременного тока для случаев отсутствия и наличия компенсации емкостной составляющей тока утечки соответственно равны:

$$I_k = \frac{U_\phi}{R_u \sqrt{1 + \frac{r_u(r_u + 6R_u)}{9R_u^2(1 + r_u^2\omega^2 C_u^2)}}}; \quad (9)$$

$$I_k = \frac{U_\phi}{R_u} \sqrt{\frac{g_u^2 + (b_c - b_{\partial\partial})^2}{(G_u + g_{uo})^2 + (b_c - b_{\partial\partial})^2}}. \quad (10)$$

Учитывая примерно равновеликую вероятность наличия в процессе эксплуатации сети любого значения емкости относительно земли в диапазоне  $C_{min} - C_{max}$ , величину индуктивной проводимости дросселя при параллельной схеме его замещения  $b_{\partial\partial}$  (рис. 1,б) находят из равенства ее проводимости резонансной емкости, определяемой по выражению

$C_{рез} = 0,5(C_{min} + C_{max})$ . Подставив найденное значение  $X_{\partial\partial}$  из условия резонанса в (7), находим эквивалентное значение сопротивления дросселя и фильтра  $R_{\partial\phi}$  и после подстановки их в (5) находим активное сопротивление ветви дросселя  $R_{\partial\partial}$  при параллельной схеме его замещения.

Оценка выполнения условий минимальной безопасности (1) и (2) без компенсации емкостной составляющей тока утечки производилась по зависимостям тока, протекающего через тело человека, от активного и емкостного сопротивления изоляции и емкости фаз сети по отношению к земле.

На рис. 2 представлены графики, построенные по выражениям, полученным из уравнения (9):

- 1 – при  $C_u = 0$  зависимость  $I_k = f(r_u)$ ;
- 2 – при  $r_u = \infty$  зависимость  $I_k = f(X_c)$ ;
- 3 – при  $r_u = \infty$  зависимость  $I_k = f(C_u)$ .

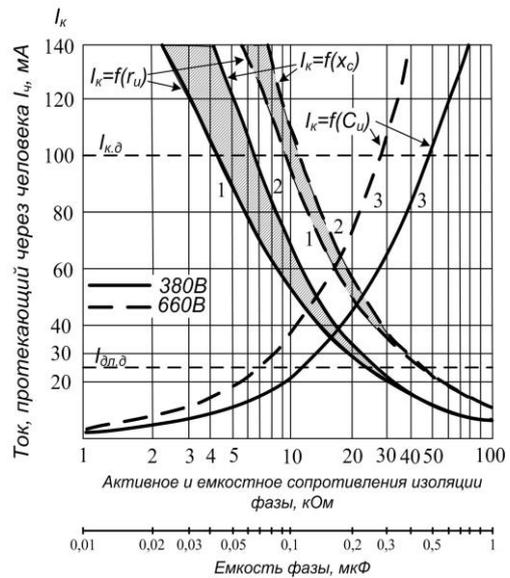


Рисунок 2 – Зависимость тока, протекающего через тело человека, от активного и емкостного сопротивления изоляции и емкости фазы по отношению к земле

Зависимости построены применительно к электроустановкам напряжением 380 и 660 В, предельно допустимых токах  $I_{д.л.д}$ ,  $I_{к.д}$  по условиям (1) и (2), сопротивлению тела человека  $R_u$ , согласно нормативам ГОСТ 12.1.038–82 [6].

Приведенные кривые показывают, что наличие только одной из составляющих полного сопротивления изоляции может создать условия, при которых прикосновение стоящего на земле человека к токоведущему каналу приведет к тяжелой электро травме. Необходимо подчеркнуть, что наличие только емкостного сопротивления изоляции определяет значительно больший ток, протекающий через тело человека, чем наличие только активного сопротивления той же величины. Наиболее ярко это проявляется в области больших токов. Приведенные кривые соответствуют граничным значениям состо-

няння ізоляції. Действительное значение тока поражения в зависимости от соотношения полного сопротивления изоляции, откладываемого по оси абсцисс, будет лежать внутри области, ограниченной рассмотренными кривыми (заштрихованные части рис. 2). При этом наименее опасный режим соответствует случаю преобладания активной составляющей сопротивления.

В соответствии с нормативами [1] минимальная безопасность должна обеспечиваться в рабочем

диапазоне параметров изоляции: активное сопротивление от 10,5 кОм на фазу до ∞; емкость от 0 до 1 мкФ на фазу [1]. Из кривых зависимостей на рис. 4 видно, что этот диапазон при отсутствии компенсации емкостной составляющей тока утечки является значительно меньшим.

В табл. 1 приведены данные, нормируемые ГОСТ 22929–78. За нижнее значение диапазона  $r_u$  принята нормируемая величина критического (отключаемого) сопротивления  $R_{кр}$ .

Таблица 1 – Диапазон параметров изоляции, где выполняется условие минимальной безопасности по кратковременному току (2) при отсутствии компенсации его емкостной составляющей

Наименование	сеть 380 В			сеть 660 В			сеть 1140 В		
	ГОСТ 22929	Расчет по рси.2	Откл. %	ГОСТ 22929	Расчет по рси.2	Откл. %	ГОСТ 22929	Расчет	Откл. %
Критическое сопротивление изоляции $R_{кр}$ (кОм)	10,0 фаза	22,0 фаза	+120 %	20,0 фаза	45,0 фаза	+150 %	35,0 фаза	–	–
Емкость сети на фазу $C_u$ (мкФ)	1,0	0,54	–46 %	1,0	0,29	–71 %	1,0	0,16	–84 %

Примечание: □ выполняется; ■ – не выполняется

Таким образом, во всех сетях кратковременные токи не ограничиваются до нормируемых значений при отсутствии компенсации его емкостной составляющей.

Для исследования выражения кратковременного тока с компенсацией его емкостной составляющей (10) оно было разделено на активную и реактивную составляющие:

$$\dot{I}_k = I_{k(a)} + jI_{k(b)} = \dot{U}_\phi G_u (a_k + jb_k); \quad (11)$$

$$a_k = \frac{g_{u0} (g_{u0} + G_u) + (b_c - b_{03})^2}{(g_{u0} + G_u)^2 + (b_c - b_{03})^2}; \quad (12)$$

$$b_k = \frac{G_u (b_c - b_{03})}{(g_{u0} + G_u)^2 + (b_c - b_{03})^2}. \quad (13)$$

В существующих аппаратах защиты применяется статическая компенсация или автоматическая компенсация емкостной составляющей тока утечки с помощью индуктивности дросселя, присоединенного к сети через фильтр напряжения нулевой последовательности (ФННП).

При таком подключении дросселя создается параллельный колебательный контур из емкостной проводимости изоляции и индуктивной – дросселя (рис. 1,б), поэтому на ток утечки  $I'_{ym}$ , протекающий через тело человека, накладывается генерируемый дросселем индуктивный ток  $I_L$ , противоположный по фазе емкостной составляющей тока утечки  $I_C$ .

При соблюдении равенства  $I_L = I_C$ , что соответствует полной компенсации, величина реактивной составляющей тока утечки (13) будет равна нулю. Через тело человека будет протекать только актив-

ная составляющая тока утечки, определяемая активной проводимостью сети (12).

Таким образом, если при автоматической компенсации достичь равенства емкостной и индуктивной проводимости сети относительно земли, то ток утечки определится только ее активной проводимостью (12) и создается принципиальная возможность выполнения условия (2) по минимальной безопасности.

Автокомпенсаторы аппаратов, находящихся в эксплуатации, работают по принципу измерения емкости изоляции сети и обработки выходного сигнала для поддержания известного соотношения равенства реактивных сопротивлений колебательного контура, образованного емкостью сети и индуктивностью компенсирующего дросселя. При этом параметры последнего изменяются введением и регулировкой подмагничивающего постоянного тока в зависимости от протяженности кабельной сети. Автоматические компенсаторы созданы только для сетей 0,38 и 0,66 кВ и отсутствуют для сетей 1140 В [5].

Измерение емкости изоляции сети во всех известных аппаратах защиты производится под рабочим напряжением с помощью оперативного тока частотой, в десятки раз большей промышленной частоты. Схема их генератора оперативного напряжения представляет L-C генератор звуковой частоты. По данным работы [5], зависимость его напряжения на выходе от емкости изоляции сети определена графически и носит ярко выраженный нелинейный характер.

Эта зависимость  $U_z = f(C_u)$ , при ее кусочной аппроксимации графиками прямой пропорциональности, приведена в табл. 2.

Таблица 2 – Зависимость оперативного напряжения измерительного генератора аппарата защиты АЗАК от емкости изоляции сети

Емкость изоляции сети			Оперативное напряжение измерительного L – С генератора			
№ п/п	Интервалы участков зависимости с прямой пропорциональностью	Длины участков с прямой пропорциональностью напряжения генератора от емкости Δ (мкФ)	Интервалы приращений оперативного напряжения на участках зависимости с прямой пропорциональностью Δ (В)	Абсолютное приращение оперативного напряжения на участках зависимости с прямой пропорциональностью Δ (В)	Плотность приращения оперативного напряжения на участках прямой пропорциональности Δ(В): Δ(мкФ)	Статистическая функция распределения случайной величины оперативного напряжения
1	0–0,45	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0 (%)
2	0,45–0,75	0,3	0–1,5	1,5	5,0	85,91 (%)
3	0,75–1,5	0,75	1,5–2,0	0,5	0,667	97,37 (%)
4	1,5–3,0	1,5	2,0–2,23	0,23	0,153	100 (%)

Из табл. 2 видно, что измерительная функция  $U_2 = f(C_u)$  в рабочем диапазоне емкости  $C_u = (0-3) мкФ$  состоит из четырех участков с резко отличающимися характерами изменений оперативного напряжения:

- 1) в интервале емкости от 0 до 0,45 мкФ измерительная функция вообще отсутствует;
- 2) от 0,45 до 0,75 мкФ она скачком нарастает с плотностью приращений 5,0 В/мкФ;
- 3) от 0,75 до 1,5 мкФ функция монотонно нарастает с плотностью приращений 0,667 В/мкФ;
- 4) от 1,5 до 3,0 она монотонно нарастает с плотностью приращений 0,153 В/мкФ.

Таким образом, измерительная функция емкости изоляции сети в серийных аппаратах защиты не устанавливает функциональной связи, а отражает лишь некоторую статистическую закономерность. Она не пригодна для регулирования индуктивности дросселя насыщения, т.к. имеет «мертвую» зону от 0 до 0,45 мкФ и очень малый участок с приемлемой плотностью приращений (5,0 В/мкФ), а на остальной части, в 75 % рабочего диапазона емкости, плотность приращений явно недостаточна для управления дросселем насыщения.

Более совершенным является устройство для измерения емкости изоляции сети, содержащее стабилизированный по частоте и амплитуде генератор высокой частоты, резонансный фильтр при соединении к сети, настроенный на частоту колебаний генератора и индикатор тока [7]. Ввиду того, что напряжение генератора при измерении нагрузки мало меняется, ток, проходящий через индикатор, изменяется практически пропорцио-

нально изменению емкости сети. При такой пропорциональной измерительной функции  $I_{on} = f(C_u)$  возможно установление регулирования индуктивностью компенсирующего дросселя с приемлемой точностью.

Все серийные автоматические компенсаторы емкости основаны на применении дросселей насыщения с введением для изменения их параметров подмагничивающего постоянного тока. Однако многолетний опыт эксплуатации аппаратов защиты с автокомпенсаторами свидетельствует, что аппаратная часть устройств автокомпенсации является самой ненадежной и более 85 % аппаратов на практике не работают [9]. Кроме того, компенсирующие дроссели насыщения имеют значительную мощность управления, достигающую десятков ватт. Это требует применения в устройствах компенсации мощных выходных усилителей. Однако точность их настройки зависит от изменения сопротивлений управляющих обмоток, вызванного нагревом, изменениями напряжения источника питания, температуры окружающей среды и параметров элементов управления. Кроме того, дроссели насыщения подвержены образованию феррорезонансных явлений в их цепях. При втягивании их в феррорезонанс в цепи дросселей насыщения возникают большие токи, приводящие к повреждениям. Все это обусловило отказ от применения дросселей насыщения и переход на разработку автокомпенсаторов, основанных на применении статических дросселей с немагнитным зазором, в которых индуктивность изменяется за счет величины зазора и переключения отпаек обмотки.

Известно устройство автокомпенсации емкостной составляющей тока утечки, основанное на статической компенсации (не регулируемой) индуктивности дросселя, настроенного на максимальное значение рабочего диапазона емкости изоляции сети [8, 9]. Регулируемым элементом здесь является величина емкости конденсаторов, создающих искусственную утечку тока для поддержания постоянства величины предельной емкости фаз сети относительно земли, т.е.

$$C_{из} + C_{к(ут)} = const = 3,0 \text{ мкФ},$$

где  $C_{из}$  – фактическая (измеренная) емкость изоляции сети относительно земли (мкФ);

$C_{к(ут)}$  – емкость конденсатора искусственной утечки тока на землю (мкФ).

Алгоритм этого способа автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки реализован в аппарате защиты АЗУР–1М [9]. Измерение емкости фаз сети относительно земли в нем выполнено так же, как и в уже рассмотренном аппарате АЗАК (табл. 2). Измерительный генератор повышенной частоты, напряжение которого зависит от емкости фаз сети, присоединен к многоразрядному блоку управления. При изменении емкости фаз сети (уменьшении или увеличении) происходят соответствующие изменения в сигналах, поступающих в блок управления. В соответствии с заданным алгоритмом работы блок управления выдает сигналы на коммутирующие ключи, которые подключают или отключают конденсаторы искусственной утечки тока к земле. Осуществляется ступенчатое подключение или отключение конденсаторов в зависимости от величины емкости сети, которая изменяется. Шаг дискретности регулирования емкости конденсаторов искусственной утечки тока в аппарате защиты АЗУР–1М принят 0,2 мкФ.

Недостатками устройства автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки в этом аппарате защиты, снижающим его эффективность и не позволяющими достичь выполнения условия (2), являются:

1) измерительная функция «напряжение  $L$  -  $C$  генератора от емкости сети» нелинейная и не устанавливает пропорциональной функциональной связи между этими величинами;

2) так как входное напряжение в вычислительный блок поступает не идентифицированное по составляющим емкости изоляции сети и конденсаторов искусственной утечек тока, то их точный расчет для поддержания постоянства емкости фаз сети относительно земли практически невозможен;

3) по нормативам ГОСТ 22929–78 [1] время настройки устройств автоматической компенсации при изменении емкости сети в пределах рабочего диапазона и наличии однофазной утечки сопротивлением 1,0 кОм должно быть не более 0,1 с. Продолжительность настройки автокомпенсации измеряют в режимах скачкообразного изменения емкости сети: от 0 до 1,5 мкФ и от 1,5 до 3,0 мкФ. При принятой дискретности шага настройки автокомпенсации в аппарате АЗУР–1М (0,2 мкФ) это требование практически не выполняется;

4) поскольку диапазон изменений и устойчивые уровни емкости изоляции по присоединениям подстанции шахт значительно меньше, чем во всей сети (0,063–3,0) мкФ и (0,207–0,63) мкФ против (0,22–4,3) мкФ и (0,4–1,8) мкФ соответственно, то переход с защиты общесетевого действия на селективную по присоединениям подстанции позволил бы существенно снизить кратковременные токи в период действия ЭДС выбега электродвигателей для выполнения условия (2). Однако принцип действия компенсации емкостной составляющей, реализованный в аппаратуре АЗУР–1М, нереализуем в селективной защите от утечек, т.к. компенсирующие дроссели нельзя рассредоточить по присоединениям.

На основании теоретического обобщения выполненных работ предлагается новая концепция автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки, основанная на поинтервальном ограничении статическим дросселем кратковременных токов, в границах которых эти токи не превышают их нормирующие значения при создании дросселем колебательного контура с емкостью середины интервала, а для идентификации интервала рабочего диапазона емкости изоляции сети с текущим ее значением на сеть накладывают под рабочим напряжением оперативный ток повышенной частоты и по его значению судят об интервале рабочего диапазона емкости сети, где находится ее текущее значение, и переключают витки дросселя на создание колебательного контура с емкостью середины идентифицированного интервала.

При рабочем диапазоне емкости изоляции сети (0–3) мкФ минимальное количество интервалов для достижения нормируемой величины кратковременного тока 100 мА составляет по сетям: 380 В – один интервал (диапазон); 660 В – два интервала: (0–1,5) и (1,5–3,0) мкФ; 1140 В – три интервала: (0–1,0), (1,0–2,0) и (2,0–3,0) мкФ.

Устройство для реализации предложенной концепции представлено принципиальной электрической схемой на рис. 3.

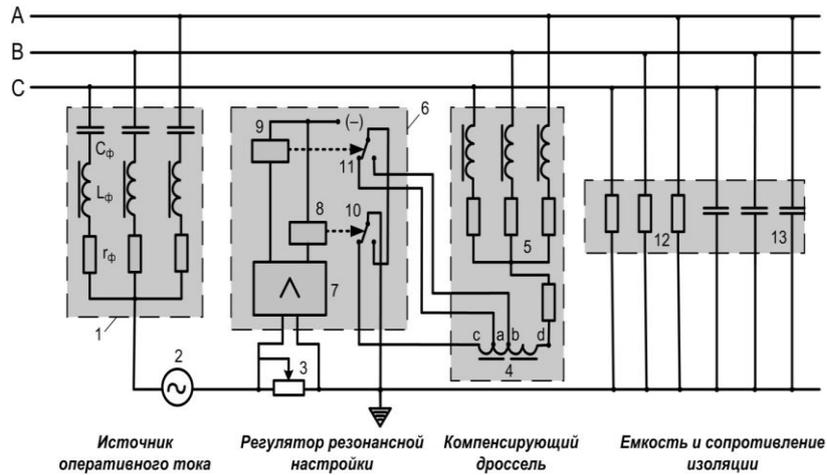


Рисунок 3 – Устрійство для реалізації концепції автоматичної компенсації ємкостної складової струму утечки статическим дроселем і регулятором його резонансної настройки на три інтервала робочого діапазона змінення ємкості ізоляції мережі

Устрійство містить фільтр напруги нульової послідовності (ФННП) 1, джерело оперативного (вимірювального) напруги підвищеної частоти 2, приєднане до ФННП 1, а до землі – через вимірний шунт 3, компенсуючий дросель 4, з обмоткою з трьох секцій і двома проміжними виводами «а» і «б», приєднаний виводом «д» до мережі через другий фільтр ФННП 5, виконаний у вигляді трьохфазного дроселя, а виводами «а», «б», «с» – до регулятора резонансної настройки 6 статического дроселя 4, що складається з підсилювача потужності 7, приєднаного до вимірних шунт 3 і впливаючому на вимірні реле 8 і 9, які своїми перемикаючими контактами 10 і 11 формують з секцій котушки необхідну індуктивність для резонансної настройки дроселя з середнім значенням ємкості ідентифікованого інтервалу з поточним значенням ємкості ізоляції мережі.

Резонансна ємкість для першого інтервалу 0–1,0 мкФ формуються повною обмоткою дроселя, приєднаною до «землі» через нормально закритий контакт 10 першого вимірних реле 8. При знаходженні поточного значення ємкості ізоляції в першому інтервалі, т.е. до 1,0 мкФ, обидва реле 8 і 9 не спрацьовують і через нормально закритий контакт 10 вивід котушки «с» з'єднаний з «землею», т.е. всі три секції дроселя формують резонансну настройку дроселя  $C_{рез(1)} = 0,5 \text{ мкФ}$ .

При збільшенні поточного значення ємкості ізоляції  $C_u \geq 1,0 \text{ мкФ}$  спрацьовує перше вимірне реле 8 і перемикає свій контакт 10 відключає вивід «с» котушки від «землі» і підключає її до виводу «а». При цьому формуються резонансна настройка дроселя на середню ємкість другого інтервалу  $C_{рез(2)} = 1,5 \text{ мкФ}$ , т.е. в роботі знаходяться секції між виводами «а»–«д».

При збільшенні поточного значення ємкості ізоляції мережі  $C_u \geq 2,0 \text{ мкФ}$  спрацьовує друге вимірне реле 9 і перемикає «заземлення» з виводу «а» на вивід «б». При цьому в роботі знаходиться секція третього дроселя (виводи «б»–«д»), витки котушки формують резонансну настройку дроселя на середню ємкість третього інтервалу  $C_{рез(3)} = 2,5 \text{ мкФ}$ .

Якщо, наприклад, поточне значення ємкості ізоляції  $C_u$  зменшилося і перейшло до другого інтервалу  $C_u \geq (1,0 - 2,0) \text{ мкФ}$ , то вимірне реле 11 відпадає і «заземлення» перемикається на вивід котушки 1, т.е. відбувається перестройка дроселя на резонансну ємкість другого інтервалу  $C_{рез(2)} = 1,5 \text{ мкФ}$ . Якщо поточне значення ємкості ізоляції переходить до першого інтервалу  $C_u \geq (0 - 1,0) \text{ мкФ}$ , то вимірне реле 11 відпадає і перемикає «заземлення» на вивід «с» котушки, т.е. резонансна настройка дроселя буде рівною  $C_{рез(1)} = 0,5 \text{ мкФ}$ .

Ефективність компенсації ємкостної складової струму утечки за запропонованою концепцією, т.е. виконання умови мінімальної безпеки по кратковременному струму (2) перевірялася на основі даних експериментальних досліджень електричних параметрів відносно землі мереж напругою до 1200 В, виконаних на рудних шахтах Кривбаса [3]. Як статических компенсаторів використовувалися дані дроселі, застосовуваних в апаратах захисту типу УАКИ.

Исходные данные для исследований кратковременного тока  $I_k$  сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Исходные данные для исследования эффективности компенсации емкостной составляющей кратковременного тока (11)–(13)

Наименование параметра изоляции электрической сети	Интервалы рабочего диапазона емкости изоляции сети					
	380 В	660 В		1140 В		
	диапазон	1-й	2-й	1-й	2-й	3-й
1. Интервалы рабочего диапазона емкости изоляции сети (мкФ)	0–3	0–1,5	1,5–3	0–1	1–2	2–3
2. Емкость середины интервала для создания колебательного контура с индуктивностью дросселя (мкФ)	1,5	0,75	2,25	0,5	1,5	2,5
3. Эквивалентное сопротивление индуктивной ветви дросселя (рис. 1,б) при создании колебательного контура по интервалам (пункт 2) (Ом)	2123	4246	1415	6369	2123	1274
4. Эквивалентное сопротивление активной ветви дросселя (рис. 1,б) при создании колебательного контура по интервалам (пункт 2) (Ом)	12519	38485	10217	85882	12519	9193
5. Статические данные о сопротивлении изоляции по интервалам: математическое ожидание – $\bar{x}$ , кОм; доверительные границы погрешности – $\pm \varepsilon$ ; количество измерений – $n$	61,796 16,725 110	70,009 19,38 92	45,867 32,78 6	82,602 24,35 69	74,029 42,2 9	52,43 47,28 2
6. Статические данные о емкости изоляции по интервалам: математическое ожидание – $\bar{x}$ , мкФ; доверительные границы погрешности – $\pm \varepsilon$ ; количество измерений – $n$	0,732 0,097 110	0,115 0,46 92	1,96 0,36 6	0,483 0,05 69	1,334 0,2 9	2,421 0,14 2

По данным табл. 3 и уравнениям (11)–(13) был рассчитан кратковременный ток  $I_k$  для каждого опыта в соответствующих интервалах. Эти эмпирические зависимости выравнились аналитической зависимостью по принципу наименьших квадратов.

На рис. 4 представлены эмпирические зависимости для сетей 380, 660, 1140 В в их соответствующих интервалах. Там же приведены уравнения нелинейной регрессии по интервалам, а также указан коэффициент корреляции Пирсона  $R^2$  как мера отклонения экспериментальных данных от гипотетических.

Из рассмотрения кривых кратковременного тока видно, что условие минимальной безопасности (2) выполняется во всех сетях: 380 В – при одном значении индуктивности статического дросселя для создания колебательного контура с емкостью 1,5 мкФ; 660 В – при двух значениях индуктивности статического дросселя для создания колебательного контура со значением емкости изоляции сети: 0,75 мкФ и 2,25 мкФ; 1140 В – при трех значениях емкости на соответствующих интервалах: 0,5 мкФ,

1,5 мкФ, 2,5 мкФ.

При увеличении разбиения емкости изоляции сети на большее количество интервалов значения кратковременных токов утечки снижаются еще более, т.е. электробезопасность увеличивается.

Так, при разбиении диапазона емкости изоляции в сети 380 В на два участка кратковременный ток не превышает значения в 60 мА при нормативе 100 мА.

Коэффициент корреляции Пирсона  $R^2$  находится в пределах 0,881; 0,884; 0,894; 0,932, т.е. имеется практически полная корреляция между фактическими и оцениваемыми значениями кратковременного тока.

**ВЫВОДЫ.** 1. Предложена новая концепция автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки, основанная на по-интервальном ограничении статическим дросселем кратковременных токов, в границах которых эти токи не превышают нормируемые значения при создании дросселем колебательного контура с емкостью середины интервала.

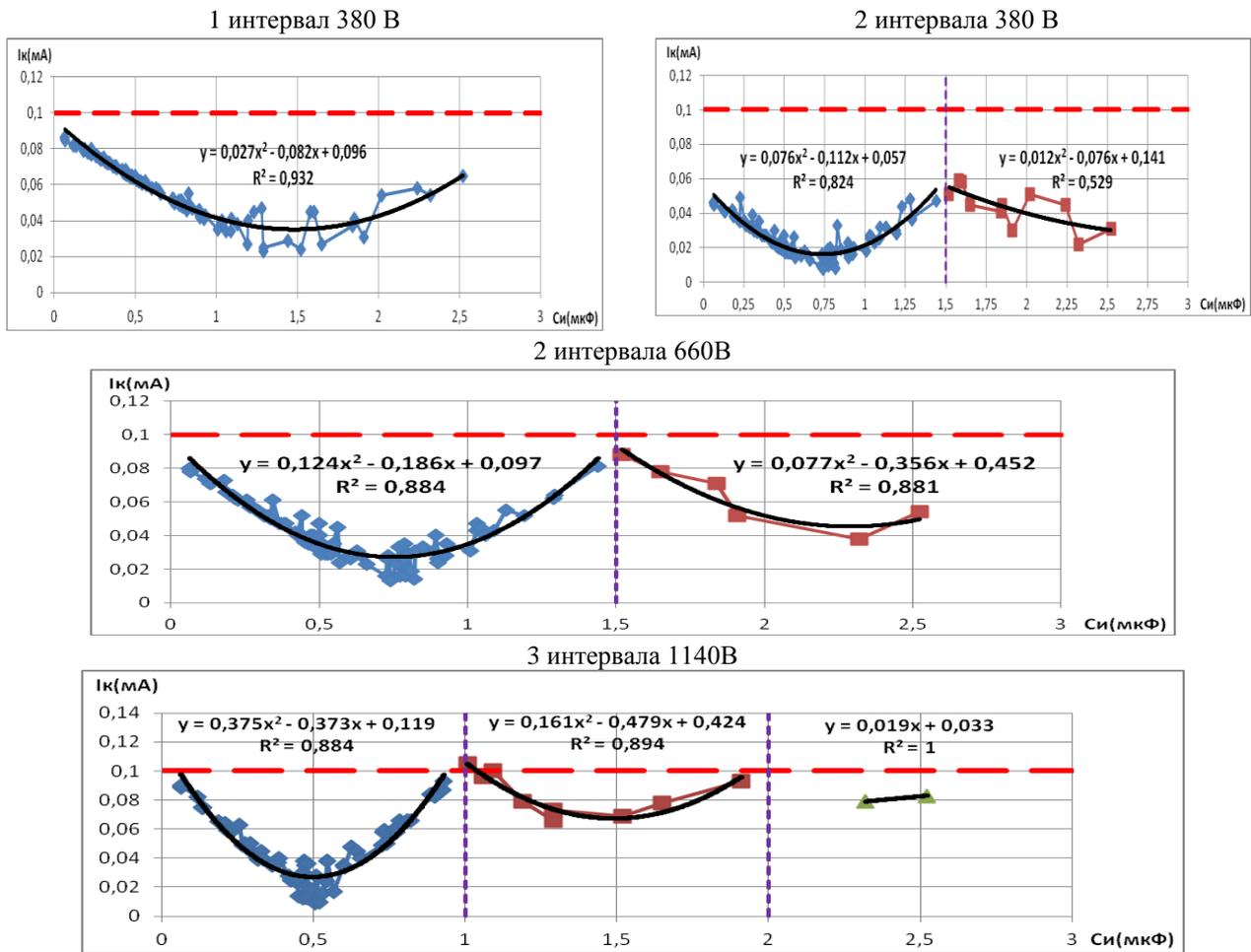


Рисунок 4 – Ограничение кратковременных токов утечки статическим дросселем при разбиении рабочего диапазона емкости изоляции сети на интервалы и поинтервальном регулировании резонансной настройки дроселя с емкостью середины интервалов:

— — — — — допустимое значение кратковременного тока [3]

2. При рабочем диапазоне емкости изоляции сети 0–3 мкФ минимальное количество интервалов для снижения кратковременного тока до нормируемой величины 100 мА по сетям составляет: 380 В – один интервал (диапазон); 660 В – два интервала: 1) 0–1,5 мкФ; 2) 1,5–3,0 мкФ; 1140 В – три интервала: 1) 0–1 мкФ; 2) 1–2 мкФ; 3) 2–3 мкФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 22929-78. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. Введен 01.01.1979.

2. Траубе Е.С., Лукашевич Ю.Ю., Шавелкин А.А. Закономерности формирования токов утечки на землю в шахтных электрических сетях с преобразователями частоты // Безопасная, экономичная и надежная эксплуатация взрывозащищенного электрооборудования. Сб. научн. трудов ВНИИВЭ. – Донецк, 1990. – Вып. 4. – С. 123–129.

3. Тонкошкур Л.С. Исследование электрических сетей напряжением до 1000 В промышленной частоты с целью установления эксплуатационных требований к аппаратуре защиты от утечек тока и

приборам контроля за ее состоянием: отчет о НИР 20-374-80 / ГР 80024268; Инв. № Б917641. – Кривой Рог: КГРИ, 1980. – 117 с.

4. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. Введен 01.01.1983.

5. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

6. Гладилин Л.В., Меньшов Б.Г., Щуцкий В.И. и др. Изоляция подземных электроустановок шахт и электробезопасность. – М.: Недра, 1966. – 261 с.

7. Миндели Г.В. А.с. № 113867 СССР, Класс 21-е, 29 оз. Прибор, измеряющий емкость под рабочим напряжением. – Заявл. 25.05.1957, № 574577.

8. Патент на полезную модель № 46748 Украина, МПК (2009) H2JJ/00. Способ автоматической компенсации емкостных токов утечки в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью / В.Н. Савицкий, А.И. Белошивтов, А.В. Савицкий. – U200904385; заявл. 05.05.2009; опубл. 11.01.2010; Бюл. № 1.

9. Савицкий В.Н., Белошистов А.И., Савицкий А.В. Способы снижения тока утечки в шахтных электрических сетях переменного тока с изолиро-

ванной нейтралью // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научн. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: УкрНИИВЭ, 2010. – Вып. 5.

### THE CONCEPT OF AUTOMATIC COMPENSATION OF CAPACITIVE LEAKAGE CURRENTS IN ORE-MINING ELECTRICAL NETWORKS

**A. Likarenko, A. Petrychenko, A. Omelchenko**

State Institution of Higher Education «Kryvyi Rih National University»

ul. XXII Partsyezda, 11, Krivoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: speet@ukr.net

The exploitation of electrotechnical complexes, namely underground mining enterprises in particularly hazardous conditions are directly connected with necessity of protecting miners against electrical shock. Therefore ore-mining electrical nets with isolated neutral of the transformer are equipped with leakage current protection devices. However, in mine electrical supply networks semiconductor converters for regulating AC and DC in electric drives have been used for a long time. It transformed mine electrical supply networks to combined electrical supply networks that contain areas of commercial frequency, areas of DC and areas of variable frequency 0–70 Hz. The existing leakage current protection devices have been produced according to the requirements of GOST 22929–78, which is not applied in protection devices for combined electrical supply networks. Thus, the use of modern protection devices in mine combined electrical supply networks is unlawful. Leakage current protection devices with a working range of capacities from 0.0 to 3.0  $\mu\text{F}$  has not been produced yet. A new method of capacitive leakage current automatic compensation based on usage of static throttle for limiting short - time currents in intervals is proposed. Short - time current in these intervals cannot exceed their norm value when the throttle makes a oscillating circuit with the capacity of the middle of the interval. To identify the working interval operating range of isolated network capacitance with its current value the operative current of high frequency is imposed on electrical supply network. Then coil windings switch over oscillating circuit with the capacity of the middle of the interval.

**Key words:** ore-mine electrical network, electrical safety, leakage currents, automatic compensation, protection device.

#### REFERENCES

1. GOST 22929 (1979), Devices of protection against leakage current for the electrical grids 1200 V. General specifications. *Introduced 1/1/1979.* (in Russian)
2. Traube, E.S., Lukashevich, Yu.Yu. and Shavelkin, A.A. (1990), "Laws of formation of earth leakage currents in mine power grids with frequency converters", *Sbornik nauchnyh trudov VNIIVE*, Vol. 4, pp. 123–129. (in Russian)
3. Tonkoshkur, L.S. (1980), Research of electrical networks with voltage up to 1000 V and industrial frequency for the purpose of establishing operational requirements for protection devices against leakage current and control devices after its state, 20-374-80, *Report of research work, KGRI*; dir., Inv. № B917641, Krivoy Rog, 117 p. (in Russian)
4. GOST 12.1.038-82, Electrical safety. Maximum permissible levels of the touch voltage and currents. *Introduced 1/1/1983.* (in Russian)
5. Dzyuban, V.S. (1982), *Apparaty zaschity ot tokov utechki v shahtnyh elektricheskikh setyah* [Apparatuses of protection against leakage currents in mine power grids], Nedra, Moscow. (in Russian)
6. Gladilin, L.V., Menshov, B.G. and Shutskiy, V.I. (1966), *Izolyatsiya podzemnyih elektrostanoovok shaht i elektrobezopasnost* [Insulation of underground mines electrical installations and electrical safety], Nedra, Moscow. (in Russian)
7. Mindeli, G.V. (1957), *Copyright certificate* № 113867, The device measures the capacitance at the working voltage, Inv. № 574577. (in Russian)
8. Savitskiy, V.N., Beloshistov, A.I. and Savitskiy, A.V. (2010), "Method for automatic compensation of capacitive leakage currents in three-phase electrical networks with isolated neutral", *The patent for utility model* № 46748, Inv. U200904385. (in Russian)
9. Savitskiy, V.N., Beloshistov, A.I. and Savitskiy, A.V. (2010), "Ways to reduce the leakage current in the mines AC networks with isolated neutral", *Sbornik nauchnyh trudov VNIIVE*, Vol. 5. (in Russian)

Стаття надійшла 23.03.2015.