

УДК 621.316.925.014.6



В. Н. САВИЦКИЙ,
канд. техн. наук
(УкрНИИВЭ)



А. В. САВИЦКИЙ,
магистр
(УкрНИИВЭ)

В целях безопасной эксплуатации распределительных сетей и электрооборудования напряжением до 1200 В на предприятиях угольной и горнорудной отраслей промышленности Правила безопасности предписывают обязательное применение защиты от токов утечки на землю.

Аппараты защиты как правило имеют одинаковый принцип действия, основанный на наложении постоянного измерительного тока на сеть и компенсации емкостных токов на землю. Этот принцип был положен в основу работы практически всех известных аппаратов, работающих в шахтных распределительных сетях при использовании различных схемных решений. Однако возможность совершенствования таких схем себя исчерпала. Обследование аппаратов при ремонте показало, что более 90 % устройств компенсации в аппаратах защиты типа АЗУР-1, АЗПБ, АЗШ оказались неработоспособными, а обнаружить неисправ-

Новая серия аппаратов защиты от токов утечек на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В

Проанализировано состояние защиты от токов утечки на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В. Приведены сведения о разработке новой серии микроконтроллерных аппаратов защиты типа АЗУР.МК. Описан принцип построения аппаратов, даны их отличительные особенности.

ность в условиях эксплуатации невозможно [1].

В аппаратах защиты на напряжение 1140 В (АЗУР-4) компенсация емкостных токов носит вспомогательный характер, так как не обеспечивает параметры безопасности, поскольку основная ее цель — повышение чувствительности устройства выбора и шунтирования поврежденной фазы (УВПФ) сети на землю, основанного на измерении относительных фазных напряжений [2, 3]. Положенный в основу принцип действия работоспособен только при правильной настройке устройства компенсации, поэтому такие аппараты могли иметь ограниченную чувствительность схемы выбора поврежденной фазы, не превышающей несколько килоОм, и низкое быстродействие. Кроме того, настройка схем трудоемкая, требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

С развитием и широким применением микроконтроллерной техники в устройствах релейной защиты [4] оказалось возможным построение принципиально новых аппаратов защиты от токов утечки на землю, обладающих новыми функциональными возможностями при существенно меньших габаритах и массе.

В основу создания новой серии аппаратов защиты положены требования повышения надежности,

упрощения обслуживания и интеграции в современные системы автоматизации производства.

Функции, выполняемые аппаратами защиты новой серии:

- *контроль работы (самоконтроль и самотестирование) с индикацией состояния аппарата защиты* — контроль целостности цепи и модуля измерительного тока, накладываемого на контролируемую сеть $I_{изм}$; контроль целостности цепи формирования напряжения, пропорционального уставке срабатывания $U_{уст}$; отсутствие или наличие фазных напряжений (режим предварительного контроля изоляции или реле утечки) U_A, U_B, U_C ; измерение модулей фазных напряжений (адаптация к напряжению сети) U_A, U_B, U_C ; определение и контроль несимметрии фазных напряжений не более 15 %; выбор уставок срабатывания схемы контроля сопротивления изоляции сети (УВПФ) $R_{уст}$; выдача команды на исполнительный орган Q_s ;

- *контроль сопротивления изоляции сети и определение поврежденной фазы* — обнаружение аварийного режима в зависимости от измерительного тока и уставки срабатывания $f(I_{изм}, I_{уст})$; определение функции УВПФ в зависимости от модуля напряжения нулевой последовательности (ННП) и фазовых смещений, определение поврежденной фазы $f(|U_N|, U_A^{\wedge}, U_B^{\wedge}, U_C^{\wedge}, U_N)$; выда-

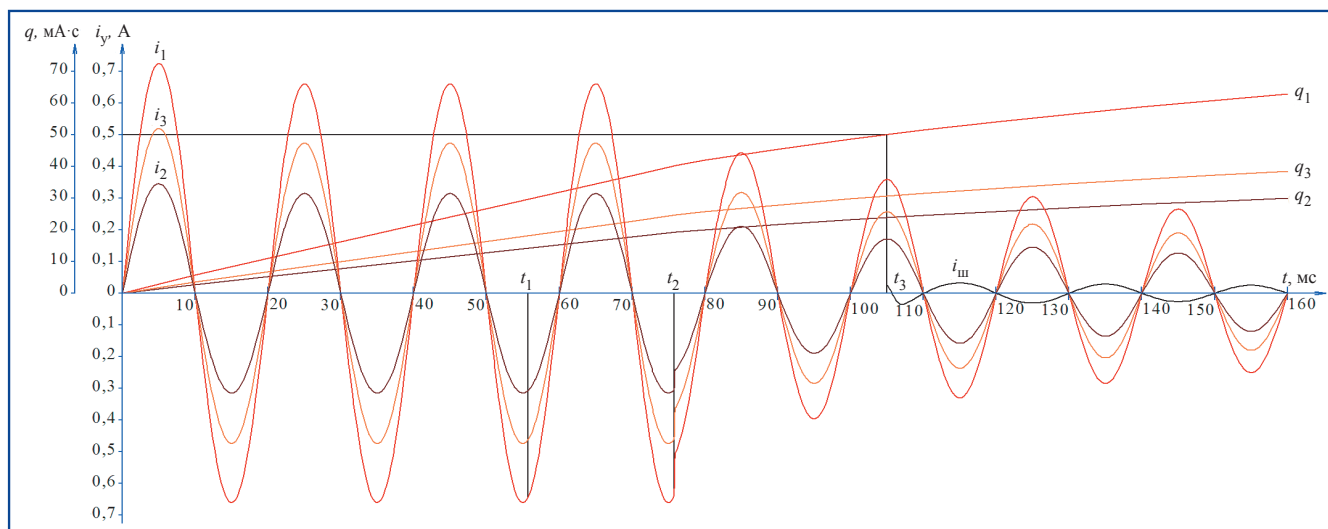


Рис. 1. Диаграмма протекания тока после отключения утечки сопротивлением 1 кОм в распределительной сети и количества электричества q через сопротивление утечки i_y : i_1 — ток через утечку при $U = 1140$ В и $C_c = 1$ мкФ на фазу; i_2 — при $U = 660$ В и $C_c = 1$ мкФ на фазу; i_3 — при $U = 660$ В и $C_c = 2$ мкФ на фазу; C_c — общая емкость сети; t_1 и t_2 — момент выдачи сигнала на отключение АВ и отключения АВ; t_3 — момент шунтирования поврежденной фазы на землю.

ча команды на исполнительные органы Q_A, Q_B, Q_C, Q_S ; блокирование сигнализации после срабатывания аппарата; автоматический взвод исполнительного реле после отключения напряжения сети и определения нормального состояния сопротивления изоляции сети; отображение на информационном дисплее данных о состоянии сети, аппарата, а также текущих параметров измерения и уставки срабатывания по сопротивлению $U_{д}, R_{из}, t$; деблокирование сигнализации;

- режим проверки — определение времени срабатывания при $R_{ут} = 1$ кОм: времени срабатывания исполнительного реле ($t_{собст}$), УВПФ ($t_{УВПФ}$) и полного времени ($t_{п}$) совместно с силовым автоматическим выключателем (АВ); отображение на информационном дисплее параметров проверки с текущей датой и временем; организация «черного ящика», запись данных об авариях и результатах проверки; передача данных по протоколу RS-485; интегрирование в сеть нижнего уровня автоматизации.

В качестве исходных данных для выбора принципа действия УВПФ приняты требования ГОСТ 22920-78 о непревышении кратковременного тока (100 мА) и количества электричества (50 мА·с), протекающих через сопротивление утечки. Учитывая, что положенный в основу принцип определения поврежденной фазы не предусматривает компенсацию емкостных токов, соответственно меняются условия воздействия тока на человека, поэтому необходимо определить требуемые параметры срабатывания УВПФ из анализа процесса отключения утечки в сети с последующим стохастическим отключением контакторов [5] (рис. 1).

Как известно, процесс происходит в несколько стадий, при которых учитываются: время обнаружения утечки; выбор поврежденной фазы; отключение АВ; скачкообразное снижение напряжения на зажимах АВ после его отключения; действие ЭДС выбега электродвигателей; шунтирование поврежденной фазы на землю малым сопротивлением.

Кратковременный ток определяют на начальной стадии возникновения утечки, а количество электричества — суммой всех составляющих процесса. Пользуясь методикой определения допустимых значений действия тока на человека [2], находим время и уставку по сопротивлению срабатывания УВПФ.

Ток от момента возникновения до отключения сети изменяется по закону

$$i_{y1} = I_0 + I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} e^{-\alpha t} + I_{3m} e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t + \alpha), \quad (1)$$

где I_0 — постоянный измерительный ток аппарата;
 I_{1m} — амплитуда установившегося тока утечки;
 I_{2m} и I_{3m} — амплитуды аperiodической и свободной составляющих;
 α и β — декременты затухания составляющих аperiodической и свободной;
 ω — частота сети;
 ω_0 — частота свободной составляющей;
 t — текущее время.

После отключения сети ее напряжение уменьшается по экспоненциальному закону, а ток — через утечку соответственно

$$I_{y2} = I_0 + K_1 I_{1m} e^{-(t/T_{эд})} \sin \omega t, \quad (2)$$

где K_1 — коэффициент снижения напряжения после отключения сети;
 $T_{эд}$ — постоянная времени выбега электродвигателя, определяемая параметрами сети.

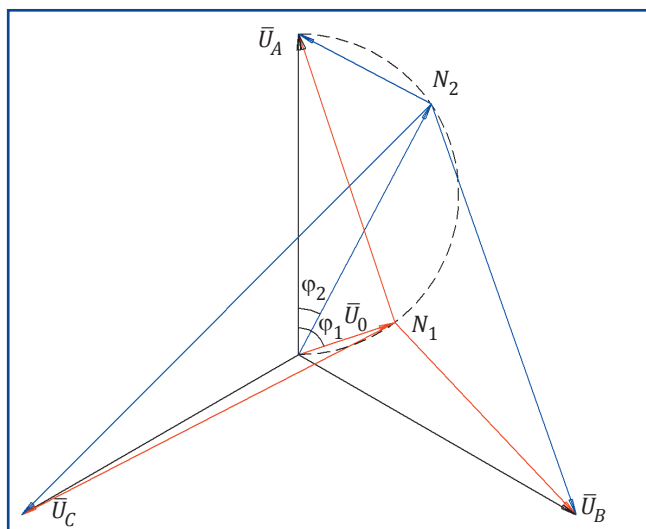


Рис. 2. Векторная диаграмма фазных напряжений и ННП в некомпенсированной сети при утечке тока в фазе А: $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ — векторы питающих фазных напряжений; \bar{U}_0 — вектор напряжения смещения нейтрали сети; φ_1, φ_2 — начальные углы смещения напряжения нейтрали сети, отсчитываемые как фазовые сдвиги этих векторов относительно вектора \bar{U}_A ; N_1, N_2 — точки смещения нейтрали сети при разных сопротивлениях утечки.

Составляющая тока, воздействующего на человека, возникает после отключения контакторов и действия ЭДС выбега электродвигателя на одином ответвлении сети.

Следовательно, количество электричества через утечку определяется в виде среднеквадратического значения суммы выражений (1) и (2):

$$q = \sqrt{I_0^2 + t_1 \int_0^{t_1} i_{y1}^2 dt + K_1 (t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} i_{y2}^2 dt} = \sqrt{I_0^2 + q_1^2 (t_1) + q_2^2 (t_2 - t_1)}. \quad (3)$$

Исходя из условия обеспечения безопасности при максимально возможном количестве электричества, его значение определяется при напряжении $1,1U_{ном}$ и емкости сети 1 мкФ на фазу. Суммарное время отключения утечки совместно с автоматическим выключателем, полученное экспериментальным путем, принимается 80 мс, тогда $q_1(t_1) = 41 \text{ мА} \cdot \text{с}$, при этом q_2 не должно превышать $9 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

Из результатов расчетов формулы (3) на максимум при принятых значениях $U_{\phi} = 1,1U_{ном}$, $q = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$ и емкости сети, равной 1 мкФ на фазу, следует, что время срабатывания схемы УВПФ в сети напряжением 1140 В с учетом $K_1 = 0,83$ и $T_{эд} \approx 1 \text{ с}$ должно быть не более 0,11 с, а не 0,17 с, как было принято раньше, уставкой срабатывания по сопротивлению — не менее 7,5 кОм. После шунтирования

поврежденной фазы ток $i_{ш}$ через утечку снижается и становится меньше допустимого значения, поэтому в дальнейших расчетах не учитывается.

Теоретические исследования фазовых зависимостей при возникновении утечки на землю определяют возможность реализации приведенных требований и существенного повышения уставки срабатывания УВПФ, а также снижения времени шунтирования поврежденной фазы без ущерба для устойчивости работы аппарата защиты, что многократно повышает безопасность сети. Практические испытания подтвердили указанную возможность.

Для создания устройства защиты от токов утечки на землю предлагается подход, предусматривающий быстроедействие измерение токов утечки и последующую цифровую обработку, которая предполагает анализ входных сигналов, принятие решения о состоянии контролируемой сети и передачу результатов в систему автоматизации нижнего уровня. Используется фазовый принцип определения поврежденной фазы сети на землю без компенсации емкостных токов, что позволяет достаточно точно прогнозировать естественное протекание процессов в сети без возможных искажений. Использование фазовых параметров обеспечивает наиболее высокую точность обработки сигналов, так как полезная информация извлекается относительно их нулевых переходов, что предотвращает появление ошибок распознавания малых изменений амплитудных параметров за ограниченное время из условий электробезопасности.

На рис. 2 показаны векторные диаграммы напряжений, поясняющие работу УВПФ для случая повреждения в сети фазы А при разных сопротивлениях утечки.

Фазовые промежутки начальных фаз φ_1 и φ_2 напряжения нулевой последовательности (ННП) являются опорными для контроля соответствия значений начальной фазы напряжения U_0 . Размещение и значения фазовых опорных промежутков задаются так, чтобы по соответствию значений φ_1 и φ_2 можно было определить поврежденную фазу сети с проверкой на достоверность. Принципиальная возможность многократной проверки достоверности определения поврежденной фазы без ухудшения быстрогодействия основана на количестве возможных точек отсчета значений U_0 и обеспечивает устойчивость против ложных срабатываний. Способ определения поврежденной фазы реализуется следующей совокупностью операций.

Аналоговые сигналы, пропорциональные фазным напряжениям, ННП и измерительному току, через интегрирующие звенья поступают на мультиплексор и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуются в цифровые сигналы с частотой дискретизации не менее 1 кГц (рис. 3). Следовательно, количество точек опроса на одном периоде пере-

менного входного сигнала составляет не менее 50. Затем преобразованные сигналы поступают в арифметико-логическое устройство (АЛУ), где происходит их сопоставление по заданному алгоритму.

Появление первого признака поврежденной фазы — только предварительный результат, необходимый для установления достоверного выбора поврежденной фазы сети. Сопоставление постоянно обновляемых входных данных в режиме реального времени происходит до тех пор, пока не будет найдено двукратное определение признаков, причем вычисленное в двух последовательных периодах, что подтверждает достоверность предварительного результата и является условием получения конечного — определения поврежденной фазы.

За счет проверки достоверности достигается устойчивость безошибочного определения поврежденной фазы. В то же время выдача команды на шунтирование поврежденной фазы сети происходит только при совпадении по времени с третьим событием — превышением порогового значения измерительного тока. Такой сигнал формируется с регулируемой задержкой, необходимой для исключения влияния импульсных помех, а также коммутационных процессов в сети. При обнаружении низкого уровня модуля измерительного тока, превышающего порог допустимых значений, как и в случае с определением поврежденной фазы, многократно перепроверяется достоверность полученных данных. При высоком уровне входных сигналов достоверность определения утечки несомненна.

Параллельное измерение всех входных сигналов и одновременный их анализ позволяют обнаружить аварийный режим работы, вычислить поврежденную фазу за минимальное время (несмотря на вынужденные задержки в вычислениях) и тем самым повысить эффективность защиты. Такой принцип построения схемы реализован в новой серии аппаратов защиты АЗУР.МК, блок-схема которых приведена на рис. 3.

Устройство содержит трехфазный трансформатор TV , обеспечивающий измерение фазных напряжений сети, ННП и фазовых соотношений между ними, интегрирующие звенья входных сигналов, микроконтроллер (мультиплексор, АЦП, АЛУ, регистры), выходные устройства. В устройстве сигнал, пропорциональный питающему фазному напряжению, измеряется на вторичной обмотке трансформатора TV , первич-

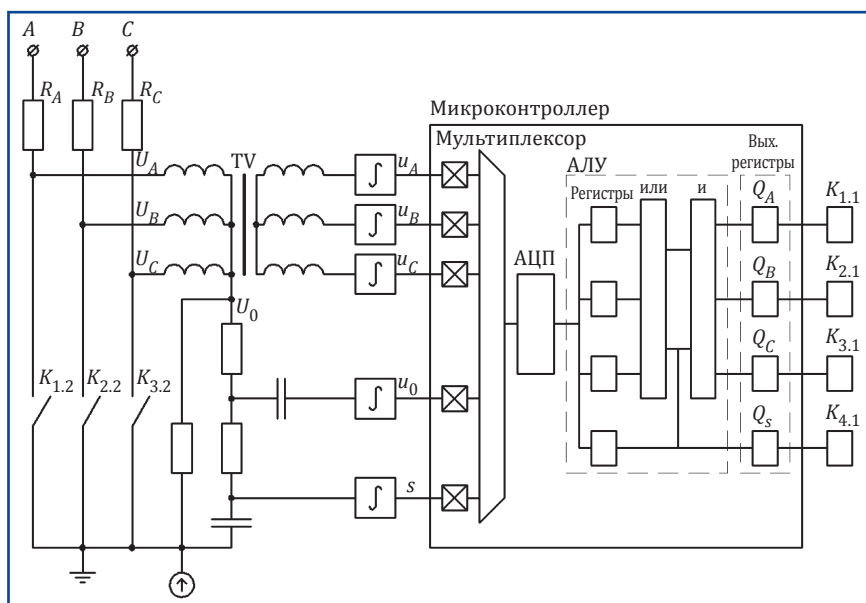


Рис. 3. Блок-схема построения аппаратов защиты серии АЗУР.МК: U_A, U_B, U_C — питающие напряжения фаз A, B, C ; U_0 — напряжение нулевой последовательности; u_A, u_B, u_C и u_0 — опорные и информационные логические сигналы; s — логический сигнал о появлении опасной утечки на землю; Q_A, Q_B, Q_C, Q_S — выходные логические сигналы устройства; K_1, K_2, K_3, K_4 — выходные реле.

ные обмотки которого подключены к фазам и образуют искусственную нулевую точку сети. Между указанной точкой и землей формируется напряжение U_0 .

Из напряжений U_A, U_B, U_C, U_0 создаются логические сигналы u_A, u_B, u_C, u_0 , а интегрирующее звено формирует сигнал s на входе решающего устройства. Указанные входные сигналы u_A, u_0 и s сопоставляются в регистрах посредством АЛУ и при последовательном совпадении двух и более событий микроконтроллер вырабатывает выходные логические сигналы Q_A, Q_B или Q_C . Высокий логический уровень одного из них указывает на повреждение в сети фазы A, B или C соответственно. Алгоритм работы микроконтроллера построен по принципу программного опроса входных сигналов и контроля начальных углов смещения ННП сети относительно фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ определением интервалов между переходами сигналов через нуль.

Целостность элементов цепи измерительного тока — резисторов $R1-R3$ и трансформатора TV — непрерывно контролируется микроконтроллером после подачи на аппарат питающего напряжения. Одновременно элементы схемы самотестируются, об их нормальной работе свидетельствует мигающий светодиод. В случае сбоя в функционировании аппарата или при отказе хотя бы одного из ключевых элементов светодиод перестает мигать, а исполнительное реле блокирует включение силового автоматического выключателя.



Рис. 4. Общий вид аппаратов защиты АЗУР.МК.

Функционально схема аппарата защиты состоит из устройств: контроля сопротивления изоляции сети; определения, выбора и шунтирования поврежденной фазы; регистрации и хранения данных; передачи данных в сеть АСУ технологического процесса шахты. Общий вид аппаратов защиты АЗУР.МК приведен на рис. 4. Аппараты серии АЗУР.1 МК и АЗУР.4 МК имеют единую схему и конструкцию, отличаются элементами подключения к сети. При использовании вместе с аппаратом информационного блока с жидкокристаллическим индикатором (ЖКИ) представляется возможным проверять время срабатывания аппарата защиты в шахте совместно с автоматическим выключателем трансформаторной подстанции без дополнительных средств.

Визуальный контроль состояния изоляции контролируемой сети осуществляется с помощью километра или информационного блока на ЖКИ. Состояние световой индикации о срабатывании аппарата защиты не влияет на его работоспособность. Возврат в исходное состояние световой сигнализации о срабатывании аппарата осуществляется кнопкой «Сброс индикации» трансформаторной подстанции.

В зависимости от использования аппарата защиты в разных режимах по требованиям заказчиков электрическая схема предусматривает исполнение с блокированием исполнительного реле и без него, работу без функции нулевой защиты, с использованием различных видов сигнализации.

Такое построение схемы аппарата защиты позволяет осуществлять:

- самоконтроль элементов и самодиагностирование состояния схемы со светодиодной индикацией исправного состояния аппарата;
- самоадаптацию аппарата к напряжению сети и выбор уставок без участия обслуживающего персонала;
- возможность проверки аппарата 1 раз в сутки;
- блокирование сигнализации после срабатывания аппарата;
- дистанционную проверку срабатывания;
- проверку времени срабатывания аппарата совместно с автоматическим выключателем без дополнительных средств;
- отображение на ЖКИ информационного блока данных о состоянии сети, аппарата, текущих параметров измерения и уставки срабатывания по сопротивлению, а также поврежденной (зашунтированной) фазы;
- регистрацию и хранение результатов проверки и срабатываний в аварийных режимах;
- передачу диспетчеру данных о проверке и аварийных отключениях;
- возможность интеграции аппарата защиты в нижний уровень системы автоматизации предприятия (передача данных по интерфейсу RS-485);
- повышение надежности функционирования, гарантирующей не менее 20 тыс. ч наработки на отказ.

Аппараты не требуют наладки и соответственного вмешательства человека.

Выводы. Впервые разработана новая серия микроконтроллерных аппаратов защиты от токов утечки на землю, которая выпускается серийно. Внедрение аппаратов даст возможность существенно повысить безопасность и информационность распределительных сетей горных предприятий, облегчит их обслуживание, а также даст толчок к развитию новых систем защиты и построения трансформаторных подстанций с новыми качественными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Задорожный В. И.* Анализ надежности аппаратов защиты от токов утечки в электрических сетях угольных шахт напряжением до 1000 В / В. И. Задорожный // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. — Донецк: Юго-Восток ЛТД, 2006. — С. 110–113.
2. *Дзюбан В. С.* Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В. С. Дзюбан. — М.: Недра, 1982. — 151 с.
3. *Ягудаев Б. М.* Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий / Б. М. Ягудаев. — М.: Недра, 1988. — 136 с.
4. *Шнеерсон Э. М.* Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. — М.: Энергоатомиздат, 2007. — 549 с.
5. *Маренич К. Н.* Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки електромережі шахти / К. Н. Маренич, С. В. Василець. — Донецьк: ДонДТУ, 2012. — 206 с.