

УДК 621.316.925.014.6

**А.В. САВИЦКИЙ****ГП «Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт рудничного и взрывозащищенного электрооборудования»  
[tb@ukr.net](mailto:tb@ukr.net)**

## **НОВАЯ СЕРИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧЕК НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1200 В**

*Рассмотрено текущее состояние аппаратов защиты в шахтных распределительных сетях, приводятся их недостатки в части безопасной эксплуатации и несоответствия современным требованиям. Обосновывается целесообразность создания новой серии аппаратов защиты от токов утечки. Приводится алгоритм работы нового аппарата защиты, особенности нового принципа определения аварийного режима работы и нахождения поврежденной фазы. Анализируются результаты его разработки.*

**Ключевые слова:** *аппарат защиты, АЗУР, безопасность в шахтах, ток утечки, распределительные сети, сопротивление изоляции, контроль параметров сети.*

**Постановка проблемы.** В целях безопасной эксплуатации распределительных сетей и электрооборудования напряжением до 1200 В на предприятиях угольной и горнорудных отраслей промышленности Правила Безопасности предписывают обязательное применение защиты от токов утечки на землю. Для этого было разработано и в данный момент применяется множество различных аппаратов защиты, целью которых является непрерывный контроль сопротивления изоляции сети в процессе работы и отключение источника питания при нарушении изоляции электрооборудования или прикосновении человека к токоведущим частям.

Следует отметить, что при эксплуатации исправных реле утечки до последнего времени практически не было случаев поражения людей электротоком, а в распределительных сетях напряжением 1140 В вообще не было ни одного случая поражения человека за все время работы. Однако, в последние 2 года только в условиях одной шахты произошло 2 таких случая. Расследование причин поражения людей указывало на «человеческий фактор», обусловленный сложностью обслуживания аппаратов защиты. Кроме того, интенсивное внедрение систем автоматизации предприятий на горных предприятиях не позволяет интегрировать аппараты защиты в указанные системы. Поэтому вопрос разработок, исследований, поиска возможных решений эффективной защиты от утечек тока на землю с широкой информативностью является актуальным и на сегодняшний день.

**Анализ предыдущих исследований и публикаций.** С ростом питающего напряжения от 380 до 1140 В, повышением энерговооруженности технологического оборудования, развитием распределительных сетей, повышением требований к устойчивой и безотказной работе аппараты защиты усложнялись и прошли этапы развития от простейших реле типа РУВ, УАКИ, к сложным электронным устройствам типа АЗУР [1]. В результате ряда модернизаций аппаратов защиты, в настоящее время в эксплуатации на предприятиях угольной и рудной промышленности Украины находятся одновременно аппараты защиты типа УАКИ, БЗП-1А, АЗАК, АЗПБ, АЗШ и серия аппаратов АЗУР 1, 2, 3, 4, 1М общей сложностью свыше 6 тысяч единиц. Анализ ремонта более 1000 аппаратов показал [2], что только 7,7% из них находились в рабочем состоянии, 20,8% аппаратов требовали капитального ремонта, а 71,5% – среднего ремонта. С каждым годом ситуация усугубляется.

Безопасность эксплуатации защищаемых сетей не может быть гарантирована, если аппараты защиты не обладают достаточной надежностью функционирования. В этих условиях требуемая надежность обеспечивается путем самоконтроля исправности основных узлов и элементов всей системы защитного отключения, а требуемая наработка на отказ аппарата защиты должна быть не менее 20000 час. Выполнить указанные требования на дискретной элементной базе проблематично.

**Цель статьи.** Обоснование целесообразности и результаты разработки новой серии микроконтроллерных аппаратов защиты от токов утечки на землю.

**Результаты исследований.** Множество эксплуатируемых аппаратов защиты имеют одинаковые принципы действия, основанные на наложении постоянного измерительного тока на сеть и компенсации емкостных токов на землю. Такое построение схемы подтвердило изменчивость на протяжении многих лет, однако пределы их совершенствования себя исчерпали. В распределительных сетях угольных шахт напряжением до 1200 В эффективным средством снижения токов утечки при однофазных замыканиях на землю многие годы считалась статическая или автоматическая компенсация емкостных токов утечки. Практика эксплуатации не подтвердила правильность принятых решений. Тот же анализ аппаратов при ремонте показывает, что более 90% устройств компенсации в аппаратах защиты типа АЗУР-1, АЗПБ, АЗШ оказались неработоспособными, причем выявить неисправность в условиях эксплуатации не представляется возможным. В аппаратах защиты на напряжение 1140В (АЗУР-4) компенсация емкостных токов носит вспомогательный характер, т.к. не обеспечивает параметры

безопасности. Основной ее целью является повышение чувствительности устройства выбора и шунтирования поврежденной фазы сети на землю, основанного на измерении относительных величин фазных напряжений [2]. Ранее были известны и другие методы определения поврежденной фазы [3], однако реализовать их при помощи дискретной элементной базы не представлялось возможным.

Сегодня с развитием и широким применением микроконтроллерной техники в устройствах релейной защиты оказалось возможным построение принципиально новых аппаратов защиты, обладающих рядом новых функциональных возможностей при существенно меньших габаритах и массе.

В основу создания новой серии аппаратов защиты от токов утечек на землю в распределительных сетях напряжением до 1200В и разработки алгоритма их работы положены технические требования, введение которых диктуется потребностью интеграции аппаратов защиты в современное автоматизированное производство.

Таблица 1– Алгоритм работы аппаратов защиты от токов утечки на землю новой серии

№	Наименование параметра	Обозначение
<b>Контроль работы (самоконтроль и самотестирование) с индикацией состояния аппарата защиты</b>		
1	Контроль целостности цепи и модуля измерительного тока, накладываемого на контролируруемую сеть	$I_{изм}$
2	Контроль целостности цепи формирования напряжения, пропорционального уставке срабатывания	$U_{уст}$
3	Отсутствие или наличие фазных напряжений (режим предварительного контроля изоляции или реле утечки)	$U_A, U_B, U_C$
4	Измерение величины модулей фазных напряжений (адаптация к напряжению сети)	$U_A, U_B, U_C$
5	Определение и контроль несимметрии фазных напряжений	не более 15%
6	Выбор уставок срабатывания схемы контроля сопротивления изоляции сети и устройства выбора поврежденной фазы (УВПФ)	$R_{уст}$
7	Выдача команды на исполнительный орган	$Q_S$
<b>Контроль сопротивления изоляции сети и определение поврежденной фазы</b>		
8	Определение функции устройства обнаружения аварийного режима в зависимости от величины измерительного тока и его соотношения с уставкой срабатывания аппарата	$f(I_{изм}, I_{уст})$
9	Определение функции УВПФ в зависимости от модуля напряжения нулевой последовательности (ННП) и фазовых смещений, определение поврежденной фазы	$f( U_N , U_A \wedge U_N, U_B \wedge U_N, U_C \wedge U_N)$
10	Выдача команды на исполнительные органы	$Q_A, Q_B, Q_C, Q_S$
11	Блокирование сигнализации после срабатывания аппарата	
12	Автоматическое деблокирование исполнительного реле после отключения напряжения сети и определения нормального состояния сопротивления изоляции сети	
13	Отображение на информационном дисплее данных о состоянии сети, аппарата, а также текущих параметров измерения и уставки срабатывания по сопротивлению	$U_L, R_{из}, t$
14	Деблокирование сигнализации	
<b>Режим проверки</b>		
15	Определение времени срабатывания при $R_{уст}=1\text{кОм}$ : времени срабатывания исполнительного реле, УВПФ и полного времени совместно с автоматическим выключателем (АВ)	$t_{собст.}, t_{УВПФ}, t_{полн.}$
16	Отображение на информационном дисплее параметров проверки с текущей датой и временем	
17	Организация «черного ящика», запись данных об аварийных срабатываниях аппарата и результатах проверки	
18	Передача данных по протоколу RS-485 Интегрирование в сеть нижнего уровня автоматизации	

В качестве исходных данных для выбора принципа действия УВПФ приняты известные требования ГОСТ 22920-78 о не превышении величин кратковременного тока (100 мА) и количества электричества (не более 50 мА·с), протекающих через сопротивление утечки. Учитывая тот факт, что положенный в основу принцип определения поврежденной фазы не содержит компенсацию емкостных токов и, соответственно, меняются условия воздействия тока на человека, целесообразно определить параметры срабатывания УВПФ.

Процесс отключения утечки в сети с последующим отключением контакторов [4] схематично приведен на рис. 1. Как известно, происходит он в несколько стадий, при которых учитываются следующие параметры: обнаружение утечки, выбор поврежденной фазы, отключение силового автоматического выключателя,

снижение напряжения на зажимах АВ после его отключения, действие э.д.с. выбега электродвигателей, шунтирование поврежденной фазы на землю малым сопротивлением.

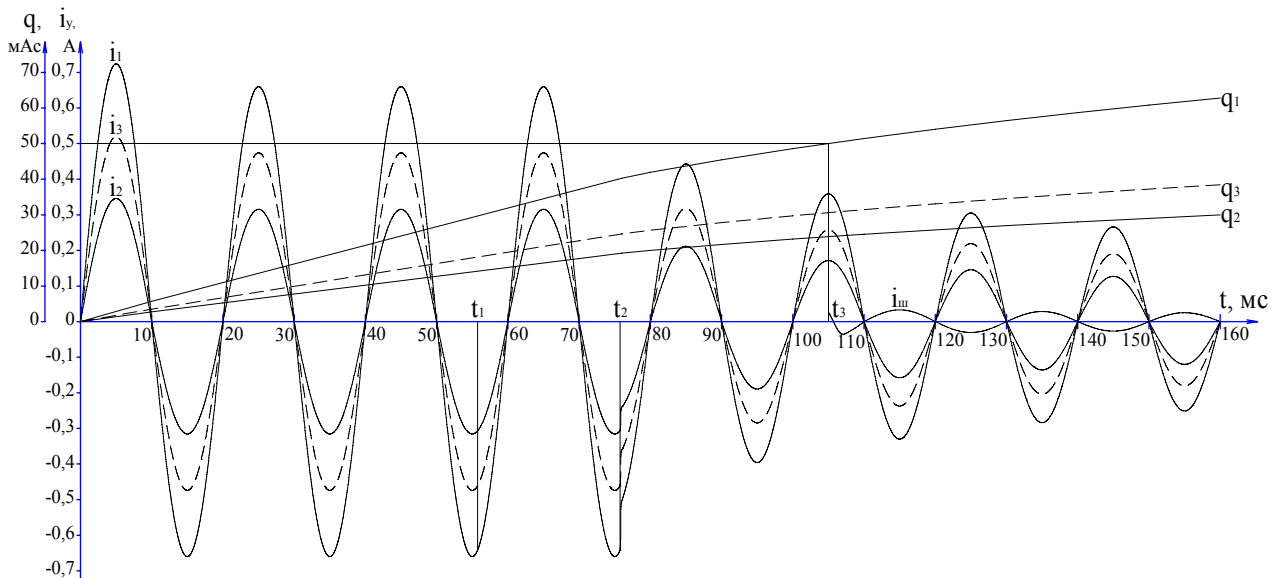


Рисунок 1 – Диаграмма протекания процесса отключения утечки 1 кОм в распределительной сети:

$i_1$  – ток через утечку при  $U=1140\text{В}$  и  $Cc=1\text{мкФ/фазу}$ ,  $i_2$  – ток через утечку при  $U=660\text{В}$  и  $Cc=1\text{мкФ/фазу}$ ,  $i_3$  – ток через утечку при  $U=660\text{В}$  и  $Cc=2\text{мкФ/фазу}$ ,  $q_1, q_2, q_3$  – количество электричества через сопротивление утечки при соответствующих параметрах сети,  $t_1$  – момент выдачи сигнала на отключение АВ,  $t_2$  – момент отключения АВ,  $t_3$  – момент шунтирования поврежденной фазы на землю

Величина кратковременного тока определяется в начальной стадии процесса возникновения утечки, а количество электричества определяется суммой всех составляющих процесса.

Пользуясь методикой определения допустимых значений действия тока на человека, приведенной в [1], определяется время и уставка по сопротивлению срабатывания УВПФ.

Ток от момента возникновения до отключения сети изменяется по закону:

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

где  $I_0$  – постоянный измерительный ток аппарата;  $I_{1m}$  – амплитуда установившегося значения тока утечки;  $I_{2m}$  и  $I_{3m}$  – амплитуды апериодической и свободной составляющих;  $\omega$  – частота сети;  $\omega_0$  – частота свободной составляющей.

После отключения сети её напряжение уменьшается по экспоненциальному закону, а ток через утечку равняется соответственно:

$$I_{\delta 2} = I_0 + K_1 I_{1m} e^{-\frac{t}{T_{\text{ЭД}}}} \sin \omega t \quad (2)$$

где  $K_1$  – коэффициент снижения напряжения после отключения сети;  $T_{\text{ЭД}}$  – постоянная времени, определяемая параметрами сети с учётом электродвигателя.

Третья составляющая тока, воздействующего на человека, появляется после отключения контакторов и действия э.д.с. выбега электродвигателя на одиночном ответвлении сети.

Исходя из этого, количество электричества через утечку определяется в виде среднеквадратического значения.

$$q = \sqrt{I_0^2 + t_1 \int_0^{t_1} i_{\delta 1}^2 dt + K_1 (t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} i_{\delta 2}^2 dt} \quad (3)$$

Учитывая, что в реальном аппарате  $I_0 = 0,6$  мА, первым слагаемым можно пренебречь. Исходя из условия обеспечения безопасности при условии максимально возможного значения количества электричества, его величина определяется при напряжении, равном  $1,1 U_{\text{ном}}$ , и емкости сети, равной  $1 \text{ мкФ/фазу}$ . Суммарное время отключения утечки совместно с АВ, полученное экспериментальным путем, принимается равным  $80$  мс. Тогда  $q_1(t_1) = 41$  мА·с. Второе слагаемое  $q_2$ , следовательно, не должно превышать  $9$  мА·с.

Исследовав функцию (3) на максимум при принятых значениях  $U_{\phi} = 1,1 U_{\text{ном}}$ ,  $q = 50$  мА·с  $C = 1$  мкФ/фазу, определяем, что время срабатывания схемы УВПФ в сети напряжением  $1140$  В с учётом  $K_1 = 0,83$  и для  $t_2 \approx 1$  с, должно быть не более  $0,11$  с, а уставка срабатывания по сопротивлению – не менее  $7,5$  кОм.

Теоретические исследования фазовых зависимостей при возникновении утечки на землю указывают на принципиальную возможность существенно повысить уставку срабатывания УВПФ и снизить время

шунтирования поврежденной фазы без ущерба для устойчивости работы аппарата защиты, что многократно повышает безопасность эксплуатации сети. Практические испытания подтвердили указанную возможность.

Для реализации описанной схемы используется фазовый принцип определения поврежденной фазы сети без компенсации емкостных токов. Именно отсутствие компенсации токов позволяет без искажений и с достаточной степенью точности анализировать естественное протекание процессов в сети. Использование фазовых параметров обеспечивает более 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, исходя из условий электробезопасности.

Данный принцип построения схемы реализован в новой серии аппаратов АЗУР.МК, блок-схема которых приведена на рис.2. Блок-схема устройства содержит трехфазный трансформатор, обеспечивающий измерение фазных напряжений сети, ННП и фазовых соотношений между ними, интегрирующие звенья входных сигналов, микроконтроллер (мультиплексор, АЦП, АЛУ, регистры), выходные устройства.

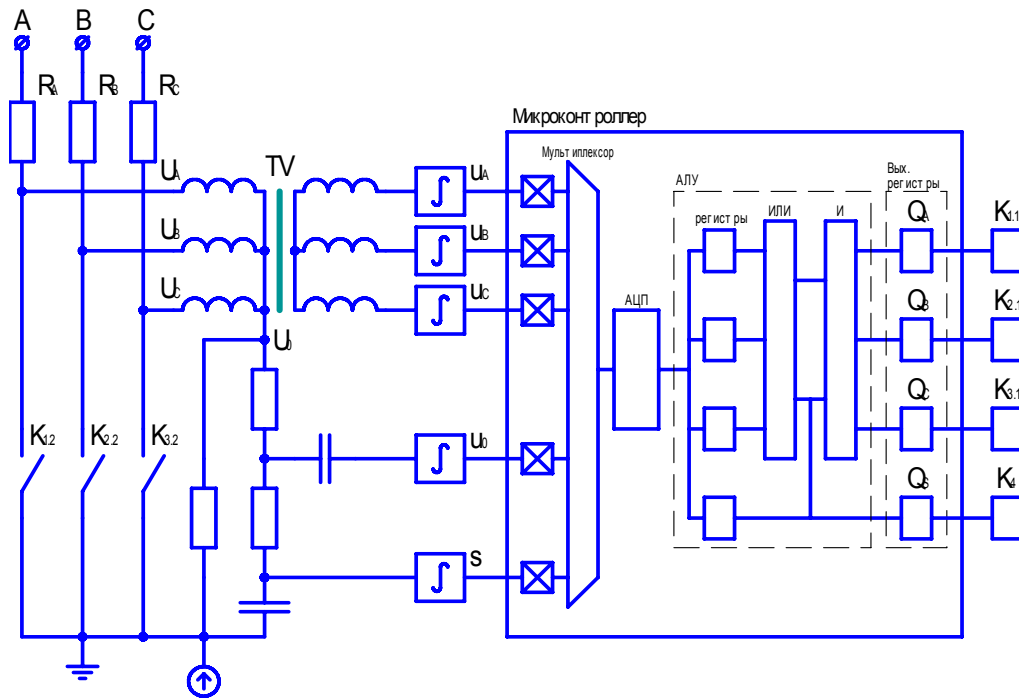


Рисунок 2 – Блок-схема построения аппаратов защиты серии АЗУР.МК:

$U_A, U_B, U_C$  – напряжения фаз А, В, С;  $U_0$  – ННП;  $u_A, u_B, u_C$  и  $u_0$  – опорные и информационные логические сигналы;  $s$  – сигнал о появлении утечки на землю;  $Q_A, Q_B, Q_C, Q_S$  – выходные логические сигналы устройства.

В устройстве сигнал, пропорциональный питающему фазному напряжению, измеряется на вторичной обмотке трехфазного трансформатора, первичные обмотки которого подключены к фазам сети и образуют искусственную нулевую точку сети. Между указанной точкой и землей формируется напряжение  $U_0$ .

Алгоритм работы микроконтроллера построен по принципу программного опроса входных сигналов и контроле начальных углов смещения напряжения нейтрали сети относительно фаз ( $\varphi_1 \dots \varphi_2$ ) путем определения интервалов между переходами сигналов через нуль. Для измерений временных интервалов используется внутренний таймер. При последовательном совпадении двух и более событий, вырабатываются выходные логические сигналы  $Q_A, Q_B$  или  $Q_C$ . Высокий логический уровень одного из них указывает на повреждение фазы А, В или С соответственно.

Общий вид аппаратов защит АЗУР.МК в сопоставлении с серийным аппаратом АЗУР-4 приведен на рис. 3.

Функционально схема аппарата защиты состоит из устройства контроля сопротивления изоляции сети, устройства определения, выбора и шунтирования поврежденной фазы, устройства регистрации и хранения данных, устройства передачи данных в сеть АСУ ТП шахты.

Такое построение схемы аппарата защиты позволяет осуществлять:

- самоадаптацию аппарата к напряжению сети;
- самоконтроль элементов и самодиагностирование состояния схемы со светодиодной индикацией исправного состояния аппарата;



Рисунок 3 – Общий вид аппаратов защиты типа АЗУР.4 и АЗУР.4МК

- возможность проверки аппарата один раз в сутки;
- блокирование исполнительного реле при необходимости и сигнализации после срабатывания аппарата защиты в аварийных режимах;
- возможность построения схемы электроснабжения без использования нулевой защиты в аппарате (при необходимости);
- цифровую индикацию контролируемого сопротивления изоляции;
- отображение на ЖКИ поврежденной (зашунтированной) фазы;
- проверку времени срабатывания аппарата защиты совместно с АВ;
- дистанционную проверку срабатывания в соответствии с ГОСТ Р 52273-2004 «Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В»;
- регистрацию и хранение результатов проверки и срабатываний в аварийных режимах;
- передачу диспетчеру данных о проверке и аварийных отключениях (при необходимости);
- возможность интеграции аппарата защиты в нижний уровень системы автоматизации предприятия.

Аппараты не требуют наладки и соответственно вмешательства человека в работу. Их применение в составе взрывозащищенных трансформаторных подстанций позволяет получать новые свойства и качества.

**Выводы.** Впервые разработанная новая серия микроконтроллерных аппаратов защиты от токов утечки на землю позволит 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.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан.- М: Недра.- 1982.- 151 с.
2. Задорожный В.И. Анализ надежности аппаратов защиты от токов утечки в электрических сетях угольных шахт напряжением до 1000 В/ В.И. Задорожный.- Сб. научных трудов УкрНИИВЭ.- 2006.
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. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки електромережі шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець. - Донецьк:ДВНЗ.- «ДонНТУ».- 2012.- 206 с.

#### REFERENCES

1. Dzuban V.S. *Apparaty zashchity ot tokov utechki v shakhtnykh elektricheskikh setiakh* [Devices of protection against leak currents in mine electric networks]. Moscow: Nedra, 1982. 151 p.
2. Zadorozhnyj V.I. The analysis of protection against leak currents devices reliability in electric networks of coal mines with voltage up to 1000 V. *Sb. nauchnykh trudovUkrNIIVE*, Donetsk, 2006.
3. Yagudayev B.M. *Metody i sredstva borby s zamykaniiami na zemliu v vysokovoltnykh sistemakh gornykh predpriiatii* [Methods and means of struggle against short circuits on the ground in high-voltage systems of the mountain enterprises]. Moscow, Nedra, 1988. 136 p.
4. Marenich K.M., Vasilets S.V. *Zvrotni energetichni potoky asynchronnykh dyguniv yak faktor nebezpeky electromerezhi shakhty* [Return power streams of asynchronous motors as the factor of mine electric system danger]. Donetsk: DVNZ «DonNTU», 2012. 206 p.

Надійшла до редакції 06.03.2013

Рецензент: Є.Б. Ковальов

О.В. САВИЦЬКИЙ

ДП «Український науково-дослідний проектно-конструкторський і технологічний інститут рудничного та вибухозахисного електрообладнання»

**Нова серія мікроконтролерних апаратів захисту від струмів витоку на землю в шахтних розподільних мережах напругою до 1200 В.** У статті розглянутий поточний стан апаратів захисту в шахтних розподільних мережах, приводяться їхні недоліки в частині безпечної експлуатації та невідповідності сучасним вимогам. Обґрунтовується доцільність створення нової серії апаратів захисту від струмів витоку. Приводиться алгоритм роботи нового апарата захисту, особливості нового принципу визначення аварійного режиму роботи та знаходження ушкодженої фази. Аналізуються результати його розробки.

**Ключові слова:** апарат захисту, АЗУР, струм витоку, опір ізоляції, цифрові захисти, розподільні мережі, безпека в шахтах, контроль параметрів мережі.

A. SAVITSKY

SE «The Ukrainian scientific research institute of explosion proof electric equipment»

**New Series Of Microcontroller Protection Devices For Protection From Ground Leaks Currents In Mine Distributive Power Supplies With Voltage Up To 1200 V.** In article considers a current condition of issue of safety, operation of mine distributive networks; protection devices applied at the coal and mining industries enterprises are described. Their disadvantages regarding safe operation and discrepancy to nowadays requirements are listed. Statistics of analysis more than 1000 devices being in operation (and demanding for an average or major repairs) which actually do not carry out their protective functions. On the basis of the technical requirements (dictated by needs of integration of protection devices for the nowadays automated manufacture), the expediency of creation of new leak current protection devices, which are based on modern microcontroller technicians is proved. The work algorithm of the new protection device, new principle of emergency operation detection and finding of the damaged phase (resulted by control of the neutral voltage is placement and comparison of phase displacement). Maximum demanded time of definition of the damaged network phase and its shunting on the ground is calculated on the basis of diagrams and theoretical computations which are proving by practice. Necessity of difficult parallel analysis of entrance signals for increase of the protection device speed, and also accuracy of emergency operation detection is proved by increasing of protection device reliability and minimization of leak current negative influences on the person. Considering resulted requirements, the device function chart and scheme are described. Results of the new protection device working out are analyzed, also its features, advantages are listed: self-adapting to network voltage and an automatic choice of dumping level, work possibility in a network with capacity more than existing devices depends on, self-checking of scheme elements, digital indication, data storage and data transmission to the dispatcher. Also prospects of enhancement of new protection systems and transformer substations complement by the developed device are specified.

**Key words:** *protection device, AZUR, leak current, isolation resistance, digital protections, distributive power supplies, safety in mines, supply parameters control.*