

Анализ факторов ограничения функции защиты человека от электропоражения в электрической сети участка шахты

К.Н. Маренич, А.И. Денисова ✉

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация

✉ denisova_anastasi@mail.ru

Резюме: Актуальность совершенствования защиты персонала шахты от поражения электрическим током связана с высокой степенью вероятности прикосновения человека к фазному токоведущему проводнику, находящемуся под напряжением, при эксплуатации силового электрооборудования в структуре шахтных участков электротехнических комплексов. Авторами установлены факторы ограничения функции защиты от утечек тока на землю применительно к возможности её эксплуатации в структуре шахтных участков электротехнических комплексов с потребителями высокой мощности: 1 – не в полной мере осуществляется компенсация ёмкостных токов в проводимостях изоляции и цепи утечки автокомпенсаторами, действующими на основе корректировки индуктивности компенсирующего дросселя; 2 – реализация способа выявления фазы с цепью утечки тока на землю методом сопоставления напряжений фаз относительно земли имеет ограничение в области ёмкостей изоляции, превышающих 0,9 мкФ/фазу, и сопротивления утечки (тела человека), превышающего 1,0 кОм; 3 – устойчивость работы аппаратов защиты от утечек тока на землю к коммутационным переходным процессам в сети не обеспечивается при коммутации присоединений с высокими ёмкостями изоляции в условиях малых (но находящихся на допустимом уровне) активных сопротивлений изоляции сети; 4 – функция защиты от утечек тока на землю ограничивается отделением от сети энергетического потока трансформаторной подстанции участка шахты и не распространяется на подавление обратных электродвижущих сил асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега и представляющих собой электропоражающий фактор.

Ключевые слова: шахтный участок электротехнический комплекс, аварийное состояние, функциональные узлы, утечка тока на землю, защита персонала шахты, электропоражение человека

Для цитирования: Маренич К.Н. Денисова А.И. Анализ факторов ограничения функции защиты человека от электропоражения в электрической сети участка шахты. *Горная промышленность*. 2023;(4):54–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-54-58>

Analysis of factors limiting the efficiency of human protection against electric shocks in the power supply network of the mine site

K.N. Marenich, A.I. Denisova ✉

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation

✉ denisova_anastasi@mail.ru

Abstract: The relevance of enhancing the protection of mine personnel from electric shocks is associated with a high probability of human contact with a live phase conductor during the operation of power electrical equipment in presence of complex electrical equipment being part of the mine site. The authors have identified the following factors that limit the efficiency of the earth leakage protection means in relation to the their possible operation as part of the mine electric network used to supply power to high-capacity equipment: 1 – capacitance currents in the shunt conductances and leakage circuit are not fully compensated by autocompensators based on the correction of the compensating choke inductance; 2 – implementation of the method to detect the phase with the earth leakage by comparing the phase-to-ground voltages has a limitation for the insulation capacitances exceeding 0.9 $\mu\text{F}/\text{phase}$ and the leakage resistance (human body) exceeding 1.0 kOhms; 3 – stability of the earth leakage protection devices to switching transient processes in the power line is not ensured when switching connections with high insulation capacitance in conditions of low (but still within the permissible level) active insulation resistance of the power line; 4 – functionality of the earth leakage protection is limited to cutting the energy flow of the transformer substation of the mine site off the power line and does not cover the suppression of inverse electromotive forces of the induction motors of consumers switching to the run-out mode, which represent an electrical shock hazard.

Keywords: cmine site complex electro technical system, emergency condition, functional units, earth leakage, protection of mine personnel, human electrocution

For citation: Marenich K.N., Denisova A.I. Analysis of factors limiting the efficiency of human protection against electric shocks in the power supply network of the mine site. *Russian Mining Industry*. 2023;(4):54–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-54-58>

Введение

Специфика условий эксплуатации силового электрооборудования в структуре шахтных участковых электротехнических комплексов предопределила высокую степень вероятности прикосновения человека к фазному токоведущему проводнику, находящемуся под напряжением. Это, в свою очередь, обусловило актуальность исследований и разработок в области совершенствования защиты персонала шахты от поражения электрическим током, что нашло своё выражение в применении аппаратов защиты от утечек тока на землю в структуре шахтных участковых электротехнических комплексов.

Технологический участок современной шахты – это, как правило, многомашинный комплекс, содержащий большое количество электромеханических установок, оснащённых асинхронными двигателями высокой мощности, что обуславливает увеличение энергетических параметров процессов в системах электроснабжения участков шахты. В связи с этим актуальны исследования, относящиеся к установлению соответствия концепции применения существующих в настоящее время технических средств защиты человека от электропоражения критериям эффективности защитной функции.

Анализ исследований и публикаций

Проблема защиты от электропоражения человека в шахтной участковой электрической сети раскрыта в работах, выполненных в контексте разработки и совершенствования соответствующих защитных устройств [1–4]. Здесь же представлены схемы, дано описание принципа их действия. Однако отсутствует анализ опыта эксплуатации и выявленных факторов ограничения функции защиты, в частности, в электрических сетях с относительно высоким уровнем ёмкости изоляции, что характерно для электропитания потребителей высокой мощности. В работе [3] имеется краткая информация, относящаяся к ограничению области применения короткозамыкателя аппарата защиты от утечек тока на землю. Однако в этом направлении актуально комплексное исследование с уточнением области возможного применения данного функционального узла.

В целом, информация относительно схем и функционирования устройств защиты человека от электропоражения в шахтных участковых электросетях позволяет сделать вывод об актуальности анализа факторов ограничения их функции, в том числе в условиях применения в сетях потребителей высокой мощности.

Результаты и обсуждение

Многофункциональность схем аппаратов защиты от утечек тока на землю предопределяет исследование эффективности функционирования их отдельных структурных компонентов. В условиях эксплуатации электропотребителей высокой мощности и применения в связи с этим гибких кабелей, отличающихся высоким уровнем ёмкости изоляции (относительно земли) особое значение приобретают разработки в области компенсации (статической, либо автоматической) ёмкостных токов утечки.

Автокомпенсация ёмкостных токов утечки на землю, реализуемая, в частности, в аппаратах защиты типа АЗУР-1, состоит в измерении ёмкости изоляции сети и автоматической корректировке величины индуктивности компенсирующего дросселя пропорциональным изменением постоянного тока в его обмотке управления. Анализ эф-

фективности этой функции выполнен путём экспериментального исследования физической модели трёхфазной электрической сети линейного напряжения 380 В, частоты 50 Гц, содержащей активные сопротивления изоляции относительно земли ($R_{из} = 150 \text{ кОм}$) /фазу; постоянные по величине $C_{из} = 0,25 \text{ мкФ/фазу}$ и коммутируемые параллельно с ними дополнительные ($0,1 \text{ мкФ/фазу} \leq C_{вар} \leq 0,5 \text{ мкФ/фазу}$) ёмкости изоляции относительно земли; сопротивление однофазной утечки на землю ($R_{ут} = 1 \text{ кОм}$); автокомпенсатор ёмкостного тока утечки на землю, входящий в структуру аппарата защиты типа АЗУР-1. Падение напряжения Δu на сопротивлении утечки фиксировалось осциллографом, что позволяло вычислить величину тока ($i = \Delta u / 1000$) в цепи утечки.

Работоспособность автокомпенсатора аппарата АЗУР-1 иллюстрируется сопоставлением осциллограмм напряжения Δu на резисторе $R_{ут}$ при отключенных и подключенных к цепи «земля» обмотках дросселя автокомпенсатора аппарата АЗУР-1 (рис. 1). Переходный процесс перенастройки автокомпенсатора при подключении дополнительной ёмкости изоляции сети характеризуется кратковременным (до трех периодов напряжения сети) увеличением тока в цепи утечки на землю с последующим снижением тока до установившегося значения. Максимум амплитуды измеряемого параметра в переходном процессе по отношению к амплитуде параметра предшествующего установившегося состояния зафиксирован в соотношении 2,2–2,5. Полученные данные позволяют сделать вывод, что амплитудно-временные характеристики переходного процесса перенастройки дросселя автокомпенсатора при ступенчатом подключении ёмкости изоляции сети не вносят существенных изменений в процесс накопления количества электричества в цепи сопротивления утечки $R_{ут}$ тока на землю, т.е. могут быть не отнесены к возмущающим воздействиям, существенно влияющим на параметр электропоражения человека. В то же время с увеличением ёмкости изоляции сети при неизменной величине активного сопротивления изоляции имеет место рост тока в цепи утечки на землю (см. рис. 1), что свидетельствует о неполной компенсации ёмкостного тока утечки на землю.

Результаты, полученные экспериментально при исследовании процессов в сети линейного напряжения 380 В, могут быть пересчитаны для сетей напряжения 660 В (коэффициент увеличения $k = \sqrt{3}$) и напряжения 1140 В (коэффициент увеличения $k = 3$). Они позволяют судить о степени зависимости тока в цепи утечки на землю от величины ёмкости изоляции сети и рассчитать количественные показатели зависимости допустимой продолжительности $\tau_{доп}$ протекания этого тока до момента достижения количеством электричества q в этой цепи утечки предельно допустимого по критерию электробезопасности значения $q_{доп} = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}^1$: $\tau_{доп} = q_{доп} / I_{ут}$, где $I_{ут} = f(C_{из})$, табл. 1.

Из анализа данных (табл. 1) следует, что функции аппаратов защиты от утечек тока на землю, адаптированных к сетям линейного напряжения 1140 В и не содержащих автокомпенсаторов ёмкостных токов утечки², находятся на пределе допустимого по параметру продолжительности защитного отключения сети. Так, согласно техническим

1 Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. [Вступил в силу 01.01.79]. М.: Издательство стандартов, 1978. 13 с. (Межгосударственный стандарт).

2 Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации. ИТЭП 28648513.004.РЭ. Донецк; 2013. 28 с. Режим доступа: <https://itep.com.ua>

характеристикам³ аппарата АЗУР-4 при эксплуатации в сети линейного напряжения 1140 В собственное время его срабатывания не превышает 0,07 с, а время шунтирования «повреждённой» фазы не превышает 0,17 с. Схема данного аппарата защиты, не усложнённая структурой автокомпенсатора ёмкостного тока утечки на землю, в качестве защитной функции реализует принцип ускоренного выявления и закорачивания на землю «повреждённой» фазы через сопротивление малой величины.

В основе работы короткозамыкателя «повреждённой» фазы лежит принцип реагирования на процесс смещения напряжения нейтрали сети вследствие появления цепи однофазной утечки ($R_{yt} \ll R_{из}$) на землю, что выражается изменением величин напряжений фаз U_{10} ; U_{20} ; U_{30} относительно земли [4], т.е. выявляется состояние $U_{10} \neq U_{20} \neq U_{30}$, где $U_{10} = U_{сqr}(1 - (1 + 2k_1)/a)$; $U_{20} = U_{сqr}(1 + (2 + k_1 - k_2 \text{сqr } 3)/a)$; $a = 1 + k_1(2 + k_1) + k_2^2$; $k_1 = R_{yt}/R_{из}$; $k_2 = 2\pi f C_{из} \cdot R_{yt}$; $U_{30} = U_{сqr}(1 + (2 + k_1 + k_2 \text{сqr } 3)/a)$; U ; f – напряжение и частота сети соответственно.

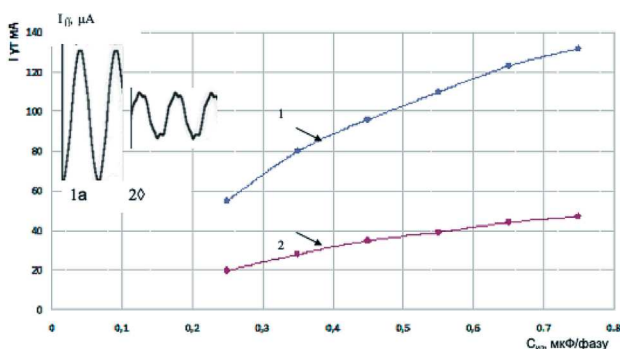


Рис. 1
Результаты измерения тока ($I_{1\mu}$) в цепи утечки ($R_{yt} = 1 \text{ кОм/фазу}$) на землю (сеть линейного напряжения 380 В) в функции ёмкости изоляции сети ($C_{из}$) при неизменной величине активного сопротивления изоляции ($R_{из} = 150 \text{ кОм/фазу}$): 1; 1а – компенсация ёмкостного тока утечки отсутствует; 2; 2а – автокомпенсатор ёмкостного тока утечки включен в работу

Fig. 1
The results of measuring the current ($I_{1\mu}$) in the leakage circuit ($R_{yt} = 1 \text{ kOhm / phase}$) to the ground (380 V line voltage network) as a function of the insulation capacity of the network ($C_{из}$) at a constant value of the active insulation resistance ($R_{из} = 150 \text{ kOhm / phase}$): 1; 1a – there is no compensation for the capacitive leakage current; 2; 2a – the capacitive leakage current autocompensator is included in the operation

Таким образом, схема короткозамыкателя аппарата защиты в случае появления цепи однофазной утечки тока на землю и, как следствие, смещения нейтрали сети выявляет фазу с минимальным падением напряжения относительно земли с последующим её закорачиванием на землю. Однако в участковых электросетях мощных электропотребителей, характеризующихся относительно высокими ёмкостями изоляции относительно земли (близкими к 1,0 мкФ/фазу), существует вероятность выявления в качестве поврежденной – смежной с ней фазы при условии превышения сопротивлением цепи утечки (сопротивлением тела человека, прикоснувшегося к фазе) величины, оговоренной в нормативной документации ($R_{yt} = 1,0 \text{ кОм}$), что

Таблица 1
Величины допустимой продолжительности протекания тока в цепи утечки на землю ($R_{yt} = 1 \text{ кОм}$) до достижения параметром q значения $q_{доп} = 50 \text{ мА}\cdot\text{с}$

Table 1
Values of permissible duration of the current flow in the earth leakage circuit ($R_{yt} = 1 \text{ kOhm}$) until the q value reaches the $q_{доп} = 50 \text{ mAs}$

Ёмкость изоляции $C_{из}$, мкФ/фазу	Параметр $\tau_{доп}$, с			
	Напряжение сети 660 В		Напряжение сети 1140 В	
	Автокомпенсатор ёмкости сети		Автокомпенсатор ёмкости сети	
	включен	отключен	включен	отключен
0,25	1,46	0,53	0,91	0,30
0,35	1,04	0,32	0,60	0,18
0,45	0,82	0,28	0,48	0,16
0,55	0,74	0,27	0,43	0,15
0,65	0,65	0,24	0,37	0,14
0,75	0,61	0,22	0,35	0,13

поясняется соотношением напряжений фазы 1 и фазы 2 относительно земли при $R_{yt} > 2,0 \text{ кОм}$ (рис. 2) [3]. В этом случае закорачивание на землю фазы, смежной с «повреждённой», приведёт к тому, что человек окажется под действием линейного напряжения сети, что крайне опасно.

С учётом тенденции к повсеместному применению в шахтах электромеханических установок повышенной мощности представляется целесообразным рассмотреть работу аппарата защиты от утечек тока на землю в части выявления «повреждённой» фазы при $C_{из} > 1,0 \text{ мкФ/фазу}$. Полагая $R_{из} = \text{const}$ и варьируя параметр $1,0 \text{ мкФ/фазу} \leq C_{из} \leq 2,0 \text{ мкФ/фазу}$, методом компьютерного моделирования определены величины напряжений между фазами и землёй в условиях возникновения цепи ($R_{yt} U_{10} \ll R_{из}$) однофазной утечки тока на землю. Выявлен эффект, когда при определённых величинах параметров $C_{из}$ и R_{yt} напряжение между «повреждённой» фазой и землёй (условно, U_{10}) оказывается выше, чем напряжение между смежной с ней «неповреждённой» фазой и землёй (условно, U_{20}). В части работы короткозамыкателя это приведёт к недопустимому действию – закорачиванию на землю «неповреждённой» фазы. Этот вывод подтверждается результатами моделирования, приведенными в табл. 2.

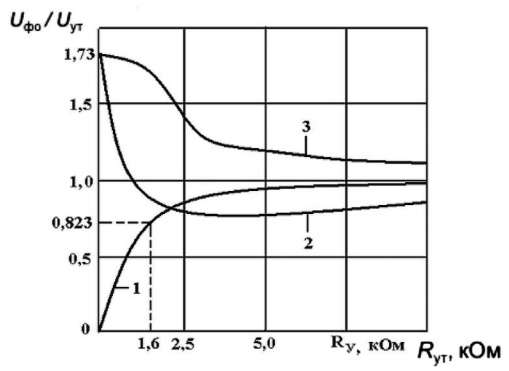


Рис. 2
Графики зависимости отношений напряжения фаз 1, 2, 3 сети относительно земли к фазному напряжению однофазной утечки на землю при $C_{из} = 1,0 \text{ мкФ/фазу}$ [3]

Fig. 2
Graphs of the dependence of the voltage ratios of phases 1, 2, 3 of the network relative to the ground to the phase voltage of a single-phase leakage to the ground at $C_{из} = 1.0 \mu\text{F / phase}$ [3]

³ Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации. ИТЭП 28648513.004.РЭ. Донецк; 2013. 28 с. Режим доступа: <https://itep.com.ua>

Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии технического противоречия в части применения шахтных участков электротехнических комплексов с электроприводами высокой мощности. Применение в этом случае силовых кабелей больших сечений и зачастую – больших протяжённостей сопровождается существенным увеличением ёмкости изоляции сети до уровня $C_{из} > 1,0$ мкФ/фазу при том, что сопротивление утечки (тела человека, прикоснувшегося к фазному проводнику) может находиться в пределах: $R_{ут} = 0,9 - 2,0$ кОм.

Таблица 2
Параметры электрической сети линейного напряжения 1140 В с цепью утечки тока на землю ($R_{ут} \ll R_{из}$), при которых $U_{10} < U_{20}$. В процессе моделирования активное сопротивление изоляции сети $R_{из} = 200$ кОм/фазу

$C_{из}$, мкФ/фазу	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$R_{ут} \geq$, кОм	1,87	1,70	1,55	1,43	1,32	1,23	1,16	1,09	1,03	0,97	0,92

Table 2
Parameters of the electric network with the phase-to-phase voltage of 1140 V with the earth leakage circuit ($R_{ут} \ll R_{из}$) at which $U_{10} < U_{20}$. The active insulation resistance of the network $R_{из}$ was 200 kOhm/phase during the simulation process

Проблемным вопросом в части эксплуатации аппаратов защиты от утечек тока является наличие вероятности реакции их схем на процессы коммутации нагрузки (электродвигателей) [4; 5]. Так, экспериментально выявлены устойчивые ложные срабатывания аппарата защиты АЗУР-1 в процессе контакторной коммутации асинхронного двигателя мощностью 55 кВт (присоединение с ёмкостью изоляции $C_{из. доп} = 0,15$ мкФ/фазу) в сети линейного напряжения 660 В с относительно высокой ёмкостью изоляции $C_{из} = 0,4$ мкФ/фазу при величине активного сопротивления изоляции $R_{из} = 32$ кОм/фазу, близкой к минимально допустимой (рис. 3).

Особенностью защиты от утечек тока на землю в шахтной участковой электросети является то, что вся их защитная функция завершается процессом отключения напряжения питания, подаваемого на силовые присоединения, т.е. отделением от сети энергетического потока участковой трансформаторной подстанции. При этом процесс (от момента появления цепи утечки на землю до момента отделения от сети энергетического потока трансформаторной подстанции) сопровождается ростом количества электричества в цепи утечки (в теле человека) тока на землю.

Однако после таких защитных действий и отключения группового автоматического выключателя участка сохраняются коммутационные связи контакторов магнитных пускателей и присоединенных асинхронных двигателей, а электрическая сеть остаётся под действием обратных энергетических потоков указанных электрических машин. Таким образом, после защитного отключения сети её силовые присоединения между контакторами пускателей и асинхронными двигателями остаются под действием обратных электродвижущих сил (ЭДС) (электродвижущая сила вращения) последних:

$$u_{вр} = \frac{Lm}{Lp} j(1-s)\omega_0 \psi_{ор} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-s)t}, \quad (1)$$

где L_m – индуктивность главного потока АД; L_p – полная индуктивность ротора; s и ω_0 – скольжение и синхронная частота вращения ротора.

Постоянная затухания свободного тока ротора обуславливает характер снижения ЭДС вращения АД и определяется выражением:

$$T_p = (L_p / r_p) = U_{\phi} K_n / I_0 r_p \omega_0, \quad (2)$$

где r_p – активное сопротивление обмотки ротора АД; U_{ϕ} – фазное напряжение статора двигателя в режиме холостого хода; $K_n = 1,1$ (для двигателя с воздушным охлаждением) – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной системы АД; I_0 – ток холостого хода асинхронного двигателя.

С учётом того, что постоянная времени ЭДС выбега асинхронного двигателя определяется отношением параметра его индуктивности к активному сопротивлению обмоток, и в связи с тем, что с ростом мощности двигателя его индуктивность увеличивается, а активное сопротивление снижается, представляется корректным сделать вывод о том, что концепция защитного отключения электросети в контексте обеспечения электробезопасности является недостаточной.

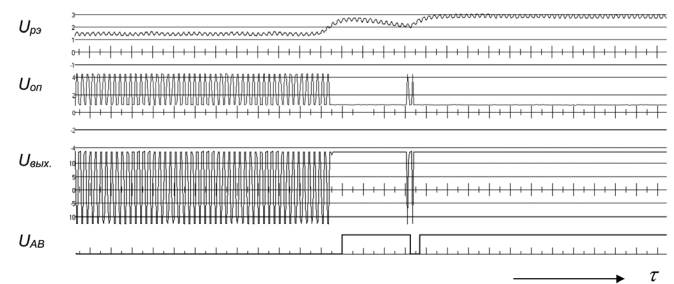


Рис. 3
Осциллограммы параметров в контролируемых точках схемы аппарата АЗУР-1. Исследование коммутационного процесса при подключении асинхронного двигателя ЭДКОФ250М4 мощностью 55 кВт. Линейное напряжение сети $U = 660$ В, частота сети $f = 50$ Гц. $U_{рз}$ – напряжение на реагирующем элементе АЗУР; $U_{оп}$ – опорное напряжение измерительного канала АЗУР; $U_{вых}$ – напряжение выхода компаратора АЗУР; $U_{ав}$ – напряжение датчика срабатывания автоматического выключателя трансформаторной подстанции участка шахты

Fig. 3
Waveforms of parameters at controlled points of the AZUR-1 unit circuit. Investigation of the switching process when connecting the EDKOF250M4 asynchronous motor with the power of 55 kW. The line voltage of the network $U = 660$ V, the frequency of the network $f = 50$ Hz. $U_{рз}$ is the voltage at the responder of the AZUR unit; $U_{оп}$ is the reference voltage of the measuring channel of the AZUR unit; $U_{вых}$ is the output voltage of the AZUR comparator; $U_{ав}$ is the trigger sensor voltage of the circuit breaker at the transformer substation of the mine section

Эффективность функции защиты от аварийных, опасных состояний в шахтной участковой электрической сети может быть обеспечена не защитным её отключением, а защитным двусторонним обесточиванием, т.е. отделением от сети обратных энергетических потоков асинхронных двигателей в процессе их защитного отключения от источника электропитания. Такой подход составляет сущность концепции автоматического защитного двустороннего обесточивания шахтной участковой электрической сети [5].

В этой связи критериям практической актуальности соответствуют разработки устройств выявления утечки тока на землю в кабельной сети, действующих со стороны присоединения статоров асинхронных двигателей автономно, независимо от функционирования средств защиты со стороны участковой трансформаторной подстанции, а также разработки силовых исполнительных устройств подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей в процессе их защитного отключения, адаптированные в структуру конструкции этих электрических машин.

Выводы

Эксплуатация мощных электромеханических установок в структуре шахтных участковых электротехнических комплексов сопряжена с необходимостью противодействия энергетическим потокам высокого уровня, повышающим

опасность электропоражения человека. Установлены факторы ограничения функции защиты шахтной участковой электрической сети от утечек тока на землю в части компенсации ёмкостных токов утечки, точности выявления повреждённой фазы в сетях с высоким уровнем ёмкости изоляции и сопротивления утечки, устойчивости функционирования защиты в условиях коммутационных переходных процессов.

Нераспространение защитной функции на подавление обратных ЭДС асинхронных двигателей после отключения электросети обуславливает актуальность решения этой научно-технической задачи.

Список литературы

1. Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М. *Справочник энергетика угольной шахты*. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд»; 2001. Т. 1. 446 с.
2. Белошистов А.И., Савицкий А.В., Савицкий В.Н. Модернизация аппаратов защиты от токов утечки АЗУР-1. *Взрывозащищённое электрооборудование*. 2017;(1):45–57. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/ldcqfz>
3. Дзюбан В.С. *Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях*. М.: Недра; 1982. 152 с.
4. Колосюк В.П. *Защитное отключение рудничных электроустановок*. М.: Недра; 1980. 334 с.
5. Маренич К.Н. *Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов*. 2-е изд. доп. М.; Вологда: Инфра-Инженерия; 2021. 240 с.

References

1. Dzyuban V.S., Shirnin I.G., Vaneev B. N., Gostischev V.M. *Handbook of Coal Mine Power engineering*. Donetsk: LLC "South-East, Ltd."; 2001. Vol. 1. 446 p. (In Russ.)
2. Beloshistov A.I., Savitsky A.V., Savitsky V.N. Modernization of devices of protection from currents of leakage of AZUR-1. *Vzryvozaschishchennoe elektrooborudovanie*. 2017;(1):45–57. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/ldcqfz>
3. Dzyuban V.S. *Devices for protection against leakage currents in mine electrical networks*. Moscow: Nedra; 1982. 152 p. (In Russ.)
4. Kolosyuk V.P. *Protective shutdown of mine electrical installations*. Moscow: Nedra; 1980. 334 p. (In Russ.)
5. Marenich K.N. *Theoretical foundations and principles of application of protective de-energization of mine electrical complexes*. 2nd ed. Moscow; Vologda: Infra-Engineering; 2021. 240 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Маренич Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горной электротехники и автоматизации, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация; e-mail: marenich_1958@mail.ru

Денисова Анастасия Игоревна – аспирант кафедры горной электротехники и автоматизации, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация; e-mail: denisova_anastasi@mail.ru

Information about the authors

Konstantin N. Marenich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mining Electrical Engineering and Automation, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation; e-mail: marenich_1958@mail.ru

Anastasija I. Denisova – Postgraduate Student of the Department of Mining Electrical Engineering and Automation, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation; e-mail: denisova_anastasi@mail.ru

Article info

Received: 09.06.2023

Revised: 11.07.2023

Accepted: 11.07.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.06.2023

Поступила после рецензирования: 11.07.2023

Принята к публикации: 11.07.2023