

УДК 62-783.3

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА
ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН**

Б. Б. Утегулов, А. Б. Утегулов, А. Б. Уахитова

*Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,
E-mail: utegulov_bolatbek@mail.ru,
просп. Победы, 62, 010000, г. Астана, Казахстан*

Приведены результаты экспериментальных исследований состояния изоляций электрической сети на экскаваторах угольного разреза. Установлено, что ток однофазного замыкания на землю в сети напряжением до 1000 В имеет меньшее значение, чем ток уставки устройства защитного отключения. Предложен способ повышения эффективности работы устройства защитного отключения, применяемый на экскаваторах и буровых станках горнодобывающих предприятий. Разработанный способ основан на наложении постоянного тока на трехфазную сеть с фиксированной уставкой срабатывания защиты, где при прикосновении человека к токоведущим частям производится отключение электрооборудования за счет увеличения емкости фаз относительно земли.

Горные предприятия, экскаватор, устройство защитного отключения, электробезопасность, состояние изоляции

В настоящее время горнодобывающие предприятия оснащаются мощными электрифицированными горными машинами, которые обеспечивают высокую производительность труда. Данные предприятия являются крупными потребителями электрической энергии. Мощность электрооборудования, установленного на современном экскаваторе, достигает 20 МВт и более. Это сопоставимо с мощностью крупного промышленного предприятия, где бесперебойное и надежное электроснабжение электроприемников во многом зависит от состояния эксплуатируемого электрооборудования, интенсивности повреждений электроустановок и электрических сетей [1].

Частые перемещения гибких кабелей, питающих передвижные горные машины, приводят к механическим деформациям и повреждениям. Тяжелые условия работы электроустановок горных предприятий способствуют снижению уровня изоляции электрической сети [2]. Возникает опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала, работающего с кабелем, электрооборудованием и металлическими конструкциями. Количество электротравм находится в прямой зависимости от частоты повреждаемости электрооборудования. При этом более 80 % электротравм связано с непосредственным прикосновением человека к токоведущим частям и 3–10 % — с прикосновением к корпусам электрооборудования в момент однофазного замыкания на землю [3].

На горных предприятиях, согласно правилам ведения горных работ, обязательно применение защитного отключения. Защитное отключение — это быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки напряжением до 1000 В при возникновении опасности поражения электрическим током. Опасность может возникнуть при замыкании фазы на корпус, снижении сопротивления изоляции какой-либо фазы относительно земли ниже определенного значения, а также при прикосновении человека к токоведущей части, находящейся под напряжением [4]. В таких ситуациях применяемые устройства защитного отключения (УЗО) обеспечивают быстрое отключение соответствующего участка электросети. Время срабатывания современных УЗО не превышает времени обеспечения безопасного тока, проходящего через тело человека [5].

Надежность работы электрооборудования и безопасность его обслуживания в значительной степени зависят от состояния изоляции токоведущих частей электроустановок [6]. Повреждение изоляции является основным источником аварий и причиной многих электротравм различной степени тяжести (вплоть до летального исхода). Контроль состояния изоляции в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на горных предприятиях обеспечивается с помощью устройств автоматического контроля изоляции УАКИ-380, аппарата защиты АЗШ, аппарата защиты сетей от утечки с устройством автоматической компенсации емкостной составляющей токов утечки АЗАК-380, устройств контроля изоляции A-ISOMETER серии IRDH575 (Bender, Германия) и т. д. [7].

На экскаваторах горнодобывающих предприятий используются УЗО типа УАКИ, которые разработаны для шахтных электрических сетей. Шахтные электрические сети напряжением до 1000 В содержат протяженные кабельные линии, где полные проводимости изоляции сети соизмеримы с емкостной проводимостью, а активные проводимости изоляции на порядок ниже полной и емкостной проводимостей. В шахтных сетях токи однофазного замыкания на землю превышают ток уставки УЗО. Это позволяет эффективно проводить защиту людей от поражения электрическим током. Эффективность работы УЗО в шахтных электрических сетях напряжением до 1000 В приведены в работе [8].

С целью повышения эффективности работы УЗО в настоящей работе выполнены исследования состояния изоляции в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторе.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Для определения значений основных параметров изоляции электрической сети напряжением до 1000 В проведены экспериментальные исследования на экскаваторе типа ЭКГ-8И угольного разреза “Екибастузский” ТОО “Ангренсор” в Павлодарской области Республики Казахстан. Обязательное применение на экскаваторах системы с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В обусловлено обеспечением условий электробезопасности. В решении вопросов электробезопасности в горнодобывающей отрасли накоплен значительный опыт, особенно в области исследования состояния изоляции электроустановок с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В [9]. Но методы исследования состояния изоляции и результаты этих исследований неприемлемы для экскаваторов, так как в их системе электроснабжения отсутствуют кабельные линии большой протяженности, а электроприемники сосредоточены на небольшой площади. То есть питание электроприемников экскаватора типа ЭКГ-8И осуществляется по короткой сети. Кроме того, электроприемники работают в различных горно-геологических и климато-метеорологических условиях, что также влияет на проводимые измерения.

В качестве устройств контроля изоляции, предусмотренных правилами безопасности, на обследуемых экскаваторах Екибастузского угольного разреза применяются реле утечки типов УАКИ и РУ-2М. Опыт эксплуатации электрооборудования положительно рекомендовал реле утечки типа УАКИ [10]. Основной причиной неэффективной работы реле является несоответствие технических возможностей УЗО параметрам изоляции электрической сети напряжением до 1000 В экскаватора. Однако существующие схемы электроснабжения экскаваторов, имеющие, как правило, один центр питания, в большинстве случаев не позволяют выполнить это требование. Связано это с тем, что реле УАКИ, являющиеся устройствами общесетевой защиты от утечек, осуществляют отключение всей сети при возникновении в любой точке опасных утечек на землю, что в свою очередь может привести к простоя экскаватора [11].

Измерения на угольном разрезе “Екибастузский” проводились по разработанной методике определения параметров изоляции в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В при нормальном рабочем состоянии электрической сети экскаватора с работающими электроприемниками [12]. Контроль состояния изоляции фаз электрической сети относительно земли имеет большое значение для своевременного выявления дефектов на ранней стадии развития и устранения аварийных ситуации в промышленных предприятиях [13, 14].

По измеренным величинам модулей линейного напряжения $U_{л}$, напряжения фазы относительно земли $U_{\phi 0}$, а также с учетом активной дополнительной проводимости g_0 определяются [15]:

— полная проводимость изоляции сети

$$y = \frac{\sqrt{3}U_{\phi 0}}{U_{л} - \sqrt{3}U_{\phi 0}} g_0, \quad (1)$$

— активная проводимость изоляции сети

$$g = \left(\frac{3U_{\phi 0}^2}{U_{л}^2} - \frac{3U_{\phi 0}^2}{(U_{л} - \sqrt{3}U_{\phi 0})^2} - 1 \right) 0.5g_0, \quad (2)$$

— емкостная проводимость изоляции сети

$$b = \sqrt{y^2 - g^2}. \quad (3)$$

Полученные результаты определения проводимостей изоляции фаз короткой сети напряжением 380 В экскаватора ЭКГ-8И обрабатывались методом малой выборки (таблица). Определим полное сопротивление изоляции сети $Z = 1/y$, емкостное сопротивление изоляции сети $X = 1/b$, активное сопротивление изоляции сети $R = 1/g$, тангенс угла диэлектрических потерь изоляции сети $\operatorname{tg} \delta = b/g$, ток однофазного замыкания на землю $I_0 = U_{\phi} / Z$.

Результаты определения параметров изоляции короткой сети напряжением 380 В экскаватора ЭКГ-8И угольного разреза “Екибастузский” ТОО “Ангренсор”, См

Параметры изоляции сети	Количество измерений								X_c
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Полная проводимость $y \cdot 10^{-5}$	2.20	2.21	2.18	2.24	2.17	2.22	2.15	2.17	2.19
Емкостная проводимость $b \cdot 10^{-5}$	1.34	1.35	1.37	1.40	1.39	1.41	1.35	1.37	1.37
Активная проводимость $g \cdot 10^{-5}$	1.74	1.75	1.69	1.75	1.67	1.71	1.67	1.68	1.71

Ниже приведены результаты расчетов экспериментального исследования параметров изоляции и тока однофазного замыкания на землю короткой сети напряжением до 1000 В экскаватора ЭКГ-8И: $Z = \frac{45662}{44643 \div 46512}$ Ом; $R = \frac{58480}{57143 \div 59880}$ Ом; $X = \frac{72993}{70922 \div 74627}$ Ом; $\operatorname{tg} \delta = \frac{0.80}{0.80 \div 0.81}$, $I_o = \frac{4.82}{4.73 \div 4.93}$ мА.

В числителе — данные математических ожиданий основных параметров изоляции электрической сети напряжением до 1000 В, а в знаменателе — диапазоны изменения этих же параметров при нормальном рабочем состоянии схемы электроснабжения экскаватора ЭКГ-8И.

Определяем емкость сети

$$C = \frac{1}{X_c \omega} = \frac{1}{X_c 2\pi f}, \quad (4)$$

где ω — круговая частота, рад/с, $\omega = 2\pi f$ [9]; X_c — среднее значение емкостной проводимости сети.

На основе представленных данных по формуле (4) определяется ожидаемая емкость сети, равная 0.0436 мкФ, а диапазон изменения емкости сети с напряжением до 1000 В составляет 0.0427–0.0449 мкФ.

Напряжение фаз относительно земли позволяет рассчитать ток утечки фаз на землю:

$$I_{\text{ут}} = U_{\phi} g = 220 \cdot 1.71 \cdot 10^{-5} = 3.76 \text{ мА.}$$

Исследования состояния изоляции в сетях напряжением до 1000 В экскаватора показали, что сопротивления изоляции обусловлены активным сопротивлением, которое характеризует свойства диэлектрика изоляционного материала. Емкостное сопротивление выше, чем активное, поэтому ток однофазного замыкания на землю в сети напряжением до 1000 В на экскаваторе обусловлен не емкостной составляющей, а активной. При проведении экспериментов на экскаваторе ЭКГ-8И угольного разреза “Екибастузский” ТОО “Ангренсор” исследован режим металлического однофазного замыкания, значение тока которого составило порядка 5 мА. Ток однофазного замыкания на землю в сети напряжением до 1000 В на экскаваторе имеет значение меньше, чем уставка срабатывания УЗО, которая равна 24 мА. Поэтому используемые УЗО на экскаваторах по своим техническим характеристикам не обеспечивают эффективную защиту человека от поражения электрическим током в сети напряжением до 1000 В.

Установлено, что параметры изоляции короткой сети изменяются в незначительных пределах и находятся на высоком уровне. Это объясняется тем, что схема электроснабжения экскаватора не содержит сеть с распределенными параметрами, а емкость сети состоит из емкости фаз относительно земли только электроприемников. Это обуславливает высокий тангенс угла диэлектрических потерь изоляции сети экскаватора ЭКГ-8И. Ток однофазного замыкания на землю обладает малым значением и небольшим диапазоном изменения. Диапазон изменения параметров изоляции сети, тангенса угла диэлектрических потерь и тока однофазного замыкания на землю в сети напряжением до 1000 В зависит от напряжения питающей сети [16].

Поскольку применяемые УЗО на экскаваторах не работают и это приводит к нарушению правил безопасности эксплуатации электрооборудования экскаваторов на горнодобывающих предприятиях, необходимо разработать технические мероприятия по повышению их эффективности.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Принцип действия УЗО типа УАКИ основан на подключении между фазами сети и землей трех диодов, соединенных в “звезду”. Данное соединение обеспечивает контроль состояния изоляции и защиту людей от поражения электрическим током путем наложения на трехфазную электрическую сеть постоянного напряжения. Исследования принципа действия УЗО проводились для повышения эффективности УЗО в шахтных электрических сетях напряжением до 1000 В [17].

Существующий способ УЗО в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах имеет недостаток. Данный способ основан на наложении постоянного тока на трехфазную сеть с фиксированной уставкой тока срабатывания защиты от поражения электрическим током. Недостаток заключается в том, что фиксированная уставка тока срабатывания защиты не позволяет обеспечить защиту человека от поражения электрическим током, так как короткая сеть напряжением до 1000 В на экскаваторе имеет ток однофазного замыкания на землю меньше, чем величина уставки УЗО. Для устранения данного недостатка необходимо разработать способ повышения эффективности УЗО в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах. Повышение эффективности УЗО в данном случае основано на отключении питания при повреждении изоляции относительно земли за счет увеличения емкости фаз.

Способ повышения эффективности УЗО в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах поясняется электрической принципиальной схемой (рисунок). Схема содержит: силовой трансформатор Т; выключатель нагрузки QF1, подающий напряжение в трехфазную электрическую сеть; трехфазную электрическую сеть с фазами А, В, С; электроприемники; выключатель нагрузки QF2, коммутирующий конденсаторы между фазами сети и землей; конденсаторы С1, С2, С3, обеспечивающие увеличение тока однофазного замыкания на землю; выключатель нагрузки QF3, коммутирующий устройство защитного отключения; устройство защитного отключения УЗО; полные проводимости изоляции сети Z1, Z2, Z3 [18].

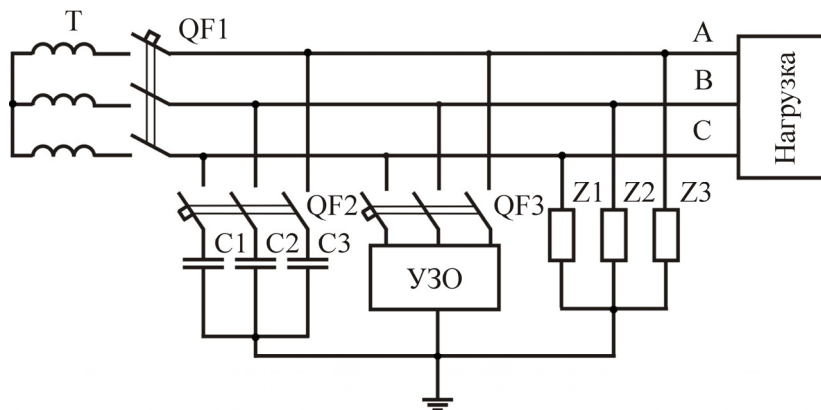


Схема защитного отключения в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах (пояснения в тексте)

В трехфазной электрической сети напряжением 380/220В применяется устройство защитного отключения типа УАКИ-Э380/220/127. Данное устройство автоматического контроля изоляции применяется в сетях напряжением 380, 220 или 127 В с изолированной нейтралью и используется в карьерах и шахтах на экскаваторах, буровых станках и т. д.

Принцип действия схемы защитного отключения в короткой сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах заключается в следующем: с силового трансформатора Т выключателем нагрузки QF1 подается напряжение в трехфазную электрическую сеть с фазами А,

В, С, откуда запитаны электроприемники напряжением до 1000 В экскаватора. Выключатель нагрузки QF2 осуществляет подключение конденсаторов С1, С2, С3 между фазами сети и землей для обеспечения увеличения тока однофазного замыкания на землю. Выключатель нагрузки QF3 выполняет подключение УЗО в трехфазную электрическую короткую сеть экскаватора [19].

С целью отключения трехфазной сети при повреждении изоляции производится увеличение тока однофазного замыкания в сети путем подключения выключателем нагрузки QF2 конденсаторов С1, С2, С3 между фазами электрической сети и землей.

Устройство УАКИ-Э380/220/127 конструктивно состоит из корпуса с крышкой из негорючего полистирола и платы, расположенной внутри корпуса. Корпус имеет ввод для подключения кабеля, связывающего устройство с сетью и вводным коммутатором электроустановки.

Для правильного срабатывания УЗО принято емкостное сопротивление конденсаторов выбирается равным 11 000 Ом для обеспечения емкостного тока 20 мА. Емкостное сопротивление вводимых конденсаторов, согласно формуле (4), соответствует емкости 0.289 мкФ. Таким образом, емкостной ток через подключаемый набор конденсаторов равен

$$I_c = \frac{U_\phi}{X_c} = \frac{220}{11000} = 20 \text{ мА.}$$

Для повышения тока замыкания на землю используется набор емкости марки МБМ 0.5 мкФ напряжением 250 В. Путем параллельно-последовательного соединения конденсаторов получается требуемая емкость, используемая для повышения эффективности устройства защитного отключения. В результате суммарный ток составит порядка 25 мА. При аварийных ситуациях на экскаваторе, с учетом выставленной уставки 24 мА, УЗО обеспечит эффективную защиту от поражения электрическим током человека в короткой сети напряжением до 1000 В.

Внедрение разработанного способа повышения эффективности УЗО в сети напряжением до 1000 В позволит обеспечить рост уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок и снижение количества аварийных ситуаций на экскаваторах.

ВЫВОДЫ

Экспериментально получены числовые значения параметров изоляции сети на экскаваторе ЭКГ-8И угольного разреза “Экибастузский” ТОО “Ангренсор”. Установлено, что емкостное сопротивление изоляции сети выше, чем ее активное сопротивление.

Разработан способ повышения эффективности УЗО в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В. Способ основан на подключении между фазами сети и землей дополнительной емкости, обеспечивающей в каждой фазе дополнительный ток утечки, равный 20 мА. При прикосновении человека к токоведущим частям и токе замыкания не менее 5 мА обеспечивается надежное срабатывание защиты, настроенной на уставку по току 24 мА.

Предложенные организационно-технические мероприятия направлены на повышение надежности и уровня электробезопасности в электроустановках горных предприятий, а также на снижение количества несчастных случаев на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абалаков Г. И. Исследование и разработка средств предварительного контроля изоляции высоковольтных кабельных линий горных предприятий: дис. канд. техн. наук. — Кемерово, 1999. — 179 с.

2. Сидоров А. И., Утегулов Б. Б., Утегулов А. Б., Уахитова А. Б. Методика исследования параметров изоляции при повреждении одной из фаз сети напряжением до 1000 В на горных предприятиях // Тр. КарГТУ. — 2007. — № 3. — С. 88–90.
3. Ягудаев Б. М., Шишкин Н. Ф., Назаров В. В. Защита от электропоражения в горной промышленности. — М.: Недра, 1982.
4. Valinevicius A., Keras E., and Balaisis P. Protection against electric shock using residual current devices in circuits with electronic equipment, *Electronics & Electrical Engineering*, 2007, Vol. 76, P. 51–54.
5. Xiang Y., Cuk V., and Cobben J. Impact of residual harmonic current on operation of residual current devices, Paper presented at the Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 10-th International Conference, Rome, Italy, 2011.
6. Meijer C., van der Ven J.-K., and Ross R. EMC and electrical safety on board ships how EMI filters undermine the protection against electric shock, Paper presented at the Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), International Symposium, Brugge, 2013, P. 1034–1038.
7. Кисаримов Р. А. *Электробезопасность*. — М.: РадиоСофт, 2013.
8. Манойлов В. Е. *Электробезопасность и человек*. — М.: Наука, 1991.
9. Гладилин Л. В., Щуцкий В. И., Бацезев Ю. Г., Чеботаев Н. И. *Электробезопасность в горнодобывающей промышленности*. — М.: Недра, 1977.
10. *Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах*. — М.: Недра, 1986. — 447 с.
11. Утегулов Б. Б., Утегулов А. Б., Уахитова А. Б., Амургалинов С. Т., Бегентаев Б. М. Исследование безопасности производства работ в сетях напряжением до 1000 В на экскаваторе ЭКГ-8И // Вестн. ПГУ. Серия “Энергетика”. — 2009. — № 3. — С. 111–114.
12. Utegulov B. B., Utegulov A. B., Begentayev M. M., Begentayev V. M., Uakhitova A. B., Zhakipov N., and Sadvakasov T. Method for determining the insulation in asymmetric networks with voltage up to 1000 v in mining enterprises, Paper presented at the the IASTED International Conference on “Power and Energy Systems and Applications (PESA)”, Pittsburgh, USA, 2011, P. 54–57.
13. Уахитова А. Б. Методика контроля состояния изоляции в несимметричной сети с изолированной нейтралью напряжением 6–10 кВ // Изв. вузов. Проблемы энергетики: КГЭУ, — 2012. — № 9–10. — С. 102–106.
14. Shutskii V. I., and Utegulov B. B. Three-phase insulated neutral network insulation testing by measuring zero sequence and phase voltages of network with additional conductance in one phase, Patent number: SU917127-B, 1982.
15. Утегулов Б. Б., Утегулов А. Б., Уахитова А. Б., Амургалинов С. Т., Бегентаев Б. М. Числовые значения параметров изоляции электрических сетей напряжением до 1000 В экскаватора ЭКГ-8И // Вестн. ПГУ. Серия “Энергетика”. — 2009. — № 4. — С. 102–107.
16. *Единые правила безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом*. — М.: НТЦ “Промышленная безопасность” Гостехнадзора России, 2003.
17. Лазарев А. И. Разработка системы защитного отключения для шахтных электрических сетей напряжением до 1 кВ с частотно-регулируемым электроприводом: дис. ... канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 1998. — 245 с.
18. Утегулов Б. Б., Уахитова А. Б., Утегулов А. Б., Амургалинов С. Т. Способ защитного отключения в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах / Инновационный патент № 23240. КазПАТЕНТ. — Астана, 2011.
19. Утегулов Б. Б., Утегулов А. Б., Уахитова А. Б., Амургалинов С. Т. Способ защитного отключения в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на экскаваторах // Наука и техника Казахстана. — 2010. — № 1. — С. 105–107.

Поступила в редакцию 20/V 2015