

*Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук, А.В. Остапчук, канд. техн. наук, М.С. Кириченко  
(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ "Национальный горный университет")*

## **ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Введение.** Электрические сети и оборудование систем электроснабжения горных предприятий эксплуатируются в очень специфических условиях, что в значительной степени определяет уровень надежности электроснабжения и уровень электробезопасности. В современных рыночных условиях надежность электроснабжения неразрывно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий.

Условия эксплуатации электрических сетей и оборудования шахт и рудников (подземные горные работы) характеризуются следующими особенностями:

- высокая относительная влажность и наличие капежа;
- ограниченность рабочего пространства из-за маленьких габаритов подземных горных выработок;
- наличие взрывной пыли или газов;
- влияние химических реагентов (кислотных и щелочных вод);
- периодическое перемещение большинства механизмов и электрооборудования;
- тяжелые условия обслуживания электрических сетей и оборудования.

На открытых горных работах системы электроснабжения имеют ряд особенностей, которые определяются условиями эксплуатации электрических сетей и оборудования, а также спецификой ведения технологических работ [1], а именно:

- непрерывным или периодическим передвижением горнотранспортных машин в связи с частым перемещением фронта горных работ;
- расположением электрических сетей и оборудования на открытом воздухе и, следовательно, влиянием запыленности, влаги и достаточно резко колеблющихся климатических параметров;
- большой площадью горных разработок и децентрализацией рабочих мест, усложняющих схемы и обуславливающих разветвленность распределительных сетей;
- непостоянством рабочих горизонтов и состоянием почвы на рабочих уступах, значительными перепадами высот, вызывающими трудности сооружения и эксплуатации воздушных и кабельных линий электропередачи;
- ведением взрывных работ (кроме карьеров россыпных месторождений), сопряженных с опасностью повреждения линий и оборудования;
- постоянным присутствием персонала и работой большого числа передвижных машин и механизмов в зоне расположения линий электропередачи и оборудования.

**Целью работы** является анализ основных причин возникновения повреждений в электрических сетях и оборудовании систем электроснабжения горных предприятий и оценка состояния повреждаемости.

**Изложение основного материала.** Основными критериями выбора системы электроснабжения горных предприятий следует считать ее безопасность, надежность и экономичность. Непосредственное влияние на отмеченные критерии выбора систем электроснабжения делают возможными аварийные режимы, то есть разные виды повреждений в электрических сетях и оборудовании [2]. Отмеченные довольно жесткие условия эксплуатации систем электроснабжения горных предприятий "обеспечивают" повреждаемость распределительных сетей и оборудования, которая значительно превышает уровень аналогичных повреждений в электрических сетях предприятий не горной области. К аварийным режимам следует отнести все виды повреждений, которые согласно ПУЭ и правил безопасности должны отключаться релейной защитой, а именно:

- междуфазные короткие замыкания (трехфазные и двухфазные);
- несимметричные замыкания в трехфазной системе.

Основными причинами возникновения коротких замыканий являются:

- естественное старение (износ) изоляции;
- механические повреждения;
- неудовлетворительные условия эксплуатации;
- низкое качество монтажа;
- ошибки обслуживающего и ремонтного персонала.

С точки зрения работы электрических сетей и оборудования наиболее трудными являются трехфазные и двухфазные короткие замыкания.

Появление несимметричных повреждений связано с повреждением изоляции фаз относительно земли. Несимметричные повреждения в распределительных сетях напряжением 6-35 кВ шахт можно разделить на два основных вида:

- 1) замыкание одной фазы сети на землю;
- 2) двойные замыкания на землю (замыкание на землю в разных точках распределительной сети).

Кроме приведенной общей классификации несимметричных повреждений следует различать металлические (глухие) замыкания на землю, дуговые (через перемежающуюся дугу) и через переходные сопротивления в точках повреждения.

Все несимметричные повреждения характеризуются появлением составляющих (тока и напряжения) нулевой последовательности. Характеристики параметров нулевой последовательности в переходном и установившемся режиме повреждения определяются видом повреждения, параметрами электрической сети и местом повреждения и, в значительной мере, режимом работы нейтрали электрической сети.

Однофазные замыкания на землю (на корпус) появляются вследствие механического повреждения электрического пробоя изоляции фазы сети относительно земли. Такие повреждения в установившемся режиме практически не представляют опасности для работы электроприемников, так как симметрия междуфазных напряжений практически не нарушается, а значение тока однофазного замыкания, как правило, во много раз меньше тока нагрузки. Однако с точки зрения электробезопасности такие повреждения представляют значительную опасность за счет появления на корпусах электрооборудования значительных потенциалов (особенно в переходных режимах). Кроме того, при таких повреждениях резко возрастает вероятность появления двойных замыканий на землю.

Двойные замыкания на землю в разных точках распределительной сети появляются в результате действия внутренних перенапряжений или являются развитием возникших однофазных замыканий на землю. Двойные замыкания могут сказываться на режиме работы электроприемников и представляют особую опасность с точки зрения поражения людей электрическим током. Такие повреждения при определенных условиях сопровождаются появлением высоких потенциалов на корпусах всего заземленного электрооборудования (практически по заземляющей сети распределяется линейное напряжение).

Повреждаемость в системах электроснабжения шахт непосредственно связана с надежностью электроснабжения, а также значительно влияет на уровень электротравматизма. Установлено, что количество электротравм при ликвидации аварий увеличивается приблизительно вдвое по сравнению с плановыми работами по обслуживанию электрических сетей и оборудования.

Основными причинами возникновения замыканий на землю в электрических сетях являются:

- воздействие перенапряжений на изоляцию элементов электрической сети;
- постепенное изменение диэлектрической прочности (старение) изоляции;
- воздействие внешних объектов и дефекты монтажа электрических сетей и оборудования;
- внезапные изменения расстояния между токоведущими и заземленными частями электрического оборудования.

Замыкания на землю со стороны электроприемников возможны в карьерных смешанных воздушно-кабельных сетях и сопровождаются, как правило, обрывом одной фазы воздушной ЛЭП. Указанные повреждения вызывают неполнофазный режим работы электроприемников и сопровождаются появлением кратковременных перенапряжений в распределительной сети. В установившемся режиме повреждения со стороны электроприемника с точки зрения электробезопасности практически соответствуют обычным однофазным замыканиям на землю [3].

Анализ эксплуатационных данных об аварийности карьерных распределительных сетей показывает, что на долю замыканий на землю приходится до 65...90 % всех повреждений. Частота замыканий на землю в распределительных сетях и их элементах определяется условиями эксплуатации, назначением и конструктивным исполнением.

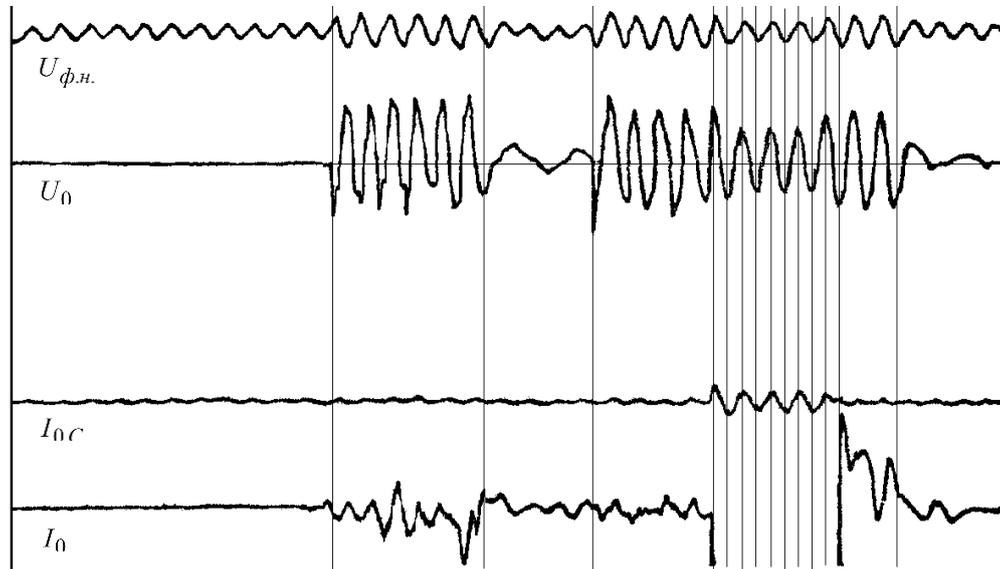
По данным статистических исследований, наиболее уязвимым элементом является гибкий экскаваторный кабель, на долю которого, как следует из табл. 1, приходится более половины замыканий на землю. Анализ характера и мест повреждений кабельных карьерных сетей показывает, что более 90 % из всех повреждений кабелей приходится на замыкания на землю, а менее надежным элементом кабельной линии являются концевые заделки, счалки и соединительные муфты.

Таблица 1

**Распределение замыканий на землю среди элементов системы электроснабжения**

<b>Элемент сети</b>	<b>Доля отказов</b>
Гибкий экскаваторный кабель	0,509
Воздушная ЛЭП	0,120
Приключательный пункт	0,034
Экскаватор	0,225
Передвижная трансформаторная подстанция	0,018
Карьерное распределительное устройство	0,030

Частота появления двойных замыканий на землю составляет по данным [4] от 9 до 17 % от всех повреждений фазной изоляции. Основная причина появления двойных замыканий – действие перенапряжений, сопровождающих однофазные замыкания на землю. На рис. 1 представлена осциллограмма перехода однофазного замыкания на землю в двойное. Распределение относительной частоты двойных замыканий на землю по различным видам карьерного электрооборудования показано в табл. 2.



**Рис. 1. Переход однофазного замыкания на землю в двойное**

Таблица 2

<b>Распределение двойных замыканий на землю по видам электрооборудования</b>	
Элемент карьерной сети	Доля отказов
Гибкий резиновый кабель	0,74
Электрооборудование экскаваторов	0,21
Воздушная ЛЭП	0,02
Другие элементы	0,03

Успешность работы технологического оборудования на открытых горных работах во многом определяется надежностью системы электроснабжения.

Надежность систем электроснабжения зависит от множества факторов, большинство из которых являются случайными. Качественные показатели надежности не пригодны для инженерных целей, т.к. они не позволяют рассчитывать надежность существующих и вновь вводимых элементов; сравнивать надежность различных элементов и систем; рассчитывать сроки службы и необходимое количество запасных деталей для нормальной эксплуатации системы.

Основным качественным показателем, характеризующим надежность системы, является понятие отказа, т.е. события, при котором нарушается работоспособность объекта или он перестает соответствовать требованиям, установленным нормативно-технической документацией

По характеру процесса возникновения бывают внезапные и постепенные отказы.

Внезапные отказы характеризуются резким, скачкообразным изменением основных параметров системы (элемента) вследствие воздействия многих случайных факторов. Внезапный отказ обычно является следствием накопления мелких неисправностей и повреждений. Постепенные отказы наступают вследствие плавного изменения параметров системы при ее износе и старении.

Для большинства элементов системы электроснабжения постепенное изменение их характеристик за границы допуска обычно проходит незамеченным, и перерыв в электроснабжении наступает только тогда, когда элемент не в состоянии выполнять своих функций, т.е. при внезапном отказе (пример – постепенное старение изоляции, впоследствии приводящее к короткому замыканию). Поэтому любой отказ, приведший к перерыву электроснабжения, можно рассматривать как внезапный.

Повреждения и неисправности в системах электроснабжения могут возникнуть из-за дефектов оборудования, т.е. из-за несоответствия его установленным требованиям при выпуске с завода-изготовителя (брак продукции), из-за аварийных (нерасчетных) воздействий окружающей среды или в результате неправильной транспортировки, монтажа, обслуживания и ремонта. При этом в зависимости от причины возникновения различают:

- конструкционные – отказы, возникающие в результате нарушения установленных правил и норм конструирования;
- производственные – отказы, возникающие в результате нарушения установленных процессов изготовления и ремонта;
- эксплуатационные – отказы, возникающие в результате нарушения установленных правил и условий эксплуатации.

Для практических расчетов в системах электроснабжения применяют количественные характеристики надежности, полученные методами теории вероятности и математической статистики.

К основным количественным показателям надежности относят следующие:

1. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  – вероятность того, что в заданном интервале времени  $t$  при определенных режимах и условиях эксплуатации не произойдет ни одного отказа. В условиях эксплуатации из статистических данных

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – начальное число испытываемых систем или элементов;  $n(t)$  – число систем или элементов, отказавших за время  $t$ .

Эта функция наиболее полно определяет надежность системы и ее отдельных элементов.

2. Вероятность отказа  $Q(t)$  – это вероятность того, что за время  $t$  произойдет хотя бы один отказ. Для определения  $Q(t)$  по статистическим данным пользуются выражением

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0} \quad (2)$$

Поскольку вероятность безотказной работы и вероятность отказа – это события несовместные (т.е. не могут появиться одновременно в результате однократного испытания) и противоположные, то для них справедливо равенство

$$P(t) + Q(t) = 1 \quad (3)$$

3. Нарботка на отказ  $T_0$  – среднее время работы системы (или элементов) между двумя соседними отказами, которое может быть определено из выражения

$$T_0 = \sum_{i=1}^{N_0} T_{0i} / N_0 \quad \text{или} \quad T_0 = \sum_{i=1}^r t_i / r. \quad (4)$$

где  $T_{0i}$  – наработка на отказ  $i$ -й системы или  $i$ -го элемента;  $r$  – количество отказов системы или элемента за время испытаний  $t$ ;  $t_i$  – время безотказной работы между соседними отказами.

4. Среднее время восстановления  $T_B$  – среднее время отыскания и устранения одного отказа

$$T_B = \sum_{i=1}^r \tau_i / r, \quad (5)$$

где  $\tau_i$  – время восстановления системы (элемента) после очередного  $i$ -го отказа.

5. Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  – это количество отказов в единицу времени, отнесенное к числу систем или элементов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_0 P(t) \Delta t}, \quad (6)$$

где  $\Delta n(t)$  – число систем или элементов, отказавших за время  $\Delta t$ .

6. Параметр потока отказов  $\omega(t)$  – среднее число отказов восстанавливаемой системы или элемента, приходящееся на единицу оборудования в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} r_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^{N_0} r_i(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (7)$$

где  $r_i(t + \Delta t)$  и  $r_i(t)$  – число отказов  $i$ -й системы или элемента по состоянию на моменты времени соответственно  $(t + \Delta t)$  и  $t$ ;  $\Delta t$  – рассматриваемый период работы системы или элемента, причем физический смысл параметра потока отказов – это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени.

7. Коэффициент готовности  $k_G$  – вероятность того, что система (или элемент) будет работоспособна в произвольно выбранный момент времени и определяется как отношение времени, в течение которого она находится в рабочем  $T_{раб}$  состоянии и в резерве  $T_{рез}$ , к сумме времени его аварийного простоя  $T_{ав}$ , рабочего  $T_{раб}$  и резервного  $T_{рез}$  состояний за рассматриваемый интервал времени

$$k_G = (T_{раб} + T_{рез}) / (T_{ав} + T_{раб} + T_{рез}). \quad (8)$$

Коэффициент готовности является важным показателем надежности систем электроснабжения, так как характеризует не только их эксплуатационные свойства, но и квалификацию обслуживающего персонала. Недостатком такой количественной характеристики является то, что по его величине невозможно судить о времени безотказной работы системы.

8. Коэффициент отказов  $k_0$  – отношение числа отказов системы из-за выхода из строя данного типа элементов к общему числу отказов системы

$$k_0 = r_i / r, \quad (9)$$

где  $r_i$  – число отказов системы из-за отказа  $i$ -го элемента за определенный промежуток времени. Коэффициент отказов характеризует не абсолютную надежность элемента системы, а его надежность по отношению к другим элементам системы.

Данный коэффициент позволяет выделить из общего числа отказы отдельных элементов системы и, следовательно, определить, надежность каких элементов является недостаточной. Однако при этом не учитывается количество однотипных элементов и время вынужденного простоя при их отказе.

Таблица 3

**Показатели надежности элементов распределительных сетей карьеров**

Элементы распределительной сети	Параметр потока отказов, $10^{-4}, 1/ч$	Наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч
Воздушная линия электропередачи:			
– стационарная	0,66 ... 1,82	14235 ... 18182	1,3 ... 2,16
– передвижная	3,88 ... 5,07	1972 ... 2780	1,1 ... 1,85
Гибкий экскаваторный кабель	4,75 ... 9,39	1230 ... 2105	2,46 ... 3,38
Приключательный пункт	1,41 ... 3,1	3225 ... 5400	1,78 ... 3,0
Соединительные кабельные коробки, штепсельные разъемы	2,66 ... 2,75	3710 ... 3760	1,03 ... 1,3
Передвижная трансформаторная подстанция	1,11 ... 1,85	5406 ... 6856	1,78 ... 3,5
Электрооборудование экскаваторов, вводное устройство	2,81 ... 3,5	3215 ... 4700	3,8 ... 5,25

В таблицах 3 и 4 представлены количественные показатели эксплуатационной надежности элементов подземной части систем электроснабжения шахт напряжением 6 кВ [5].

**Показатели надежности элементов шахтной электрической сети**

Элемент схемы	Параметр потока отказов, $10^{-5}$ , 1/ч	Наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч
Распределительные устройства	2,4 ... 103	970 ... 42400	4,2 ... 4,9
Передвижная подстанция ТКШ ВПС	13,3	7500	-
Кабели (на 100 м):			
– ствольные	2,4	42400	15,0
– в наклонных выработках без рельсового транспорта	6,5	15400	5,43
– в наклонных выработках с рельсовым транспортом	9,0	11300	5,43
– в горизонтальных выработках без рельсового транспорта	3,7	26800	5,33
– в горизонтальных выработках с рельсовым транспортом	6,7	14900	5,33
Электродвигатели	3,0 ... 25,0	4000 ... 33000	20,0

Анализ повреждаемости элементов системы электроснабжения горных предприятий показывает, что основная их масса (до 60 %) приходится на кабельные линии и вызвана электрическим пробоем изоляции. На силовые трансформаторные подстанции приходится от 6 до 33 % от всех повреждений. Часть повреждений электрооборудования, возникающие в результате ошибочных действий обслуживающего персонала, могут быть предотвращены. Основным путем для решения этой проблемы является повышение уровня подготовки эксплуатационного и оперативного персонала.

Особо следует отметить, что однофазные и особенно двойные замыкания на землю в значительной степени повышают вероятность поражения рабочих и обслуживающего персонала в условиях горных предприятий от действия аварийных токов и выносных потенциалов. Эффективными путями решения проблемы предупреждения или минимизации повреждений и развития аварий в электрических сетях напряжением выше 1000 В шахт и карьеров, а также обеспечения гарантированного уровня электробезопасности следует считать:

- разработка и внедрение технических средств непрерывного и селективного контроля изоляции с функциями защитного отключения;
- применение средств ограничения внутренних перенапряжений;
- исследование и разработка систем минимизации аварийных токов и выносных или наведенных потенциалов до безопасных значений;
- обоснование и разработка системы предварительного контроля изоляции для условий разветвленных систем электроснабжения шахт и карьеров.

**Выводы.**

1. Уровень повреждаемости системы электроснабжения горных предприятий превышает аналогичные показатели в других отраслях промышленности. Анализ эксплуатационных данных об аварийности свидетельствует о том, что на долю замыканий на землю приходится до 65...90 % всех повреждений. Наиболее уязвимым элементом является гибкий экскаваторный кабель (50,9%). Частота появления двойных замыканий на землю составляет от 9 до 17% от всех повреждений фазной изоляции.

2. Для повышения уровня надежности систем электроснабжения и обеспечения условий электробезопасности высоковольтных систем горных предприятий требуется разработка и внедрение технических решений и систем, обеспечивающих значительное сокращение аварийных режимов и минимизацию их негативных последствий

**Список литературы**

1. Пивняк, Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: справочное пособие [Текст] / Г.Г. Пивняк, Ф.П. Шкрабец // М.: Недра, 1993. – 192 с.
2. Разумный, Ю.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт [Текст] / Ю.Т. Разумный, Ф.П. Шкрабец // К.: Техника, 1984. –136 с.
3. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий [Текст] / В.И. Серов, В.И. Щуцкий, В.М. Ягудаев // М.: Наука, 1985. – 136 с.
4. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф.А. Лихачев // М.: Энергия, 1972. – 151 с.
5. Сокил, А.М. Проблемы энергосбережения и надежности в технологиях добычи и переработки россыпей [Текст] / А.М. Сокил, В.Г. Скосырев, Ф.П. Шкрабец // Днепропетровск: Полиграфист, 2000. – 195 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Разумним Ю.Т.*