

## **АВАРИЙНОСТЬ КАРЬЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Электрические сети и оборудование систем электроснабжения карьеров эксплуатируются в весьма специфических условиях, которые в значительной степени определяют уровень надежности электроснабжения и электробезопасности [1, 3, 6]. К основным особенностям эксплуатации электрических сетей и оборудования открытых горных работ следует отнести:

- непрерывное или периодическое передвижение горнодобывающих и горнотранспортных машин, вызванное перемещением фронта горных работ;
- большая площадь горных работ и децентрализация рабочих мест, что усложняет схемы и приводит к разветвленности распределительных сетей;
- непостоянство рабочих горизонтов и состояния почвы на рабочих уступах, значительные перепады высот, вызывающие трудности в сооружении и эксплуатации воздушных и кабельных линий электропередачи;
- постоянное присутствие персонала и работа большого числа машин и механизмов в зоне расположения ЛЭП и оборудования.

Специфика открытых горных работ и особенности эксплуатации их электрических сетей и оборудования обуславливают соответствующие требования к схемам электроснабжения. Выбор и построение схемы электроснабжения карьеров зависит от количества и мощности электроприемников, технологии горных работ, горногеологических условий и ряда других факторов. Однако основными критериями выбора системы электроснабжения следует считать ее безопасность, надежность и экономичность. Непосредственное влияние на указанные критерии выбора систем электроснабжения оказывают возможные аварийные режимы, т. е. различные виды повреждений в электрических сетях и оборудовании.

Действующие нормативные документы предписывают изолированный режим работы нейтрали карьерных распределительных сетей. При этом понимают, что нейтраль полностью изолирована от земли или соединена с землей через большое индуктивное (компенсированная нейтраль) или активное (сеть с резистором в нейтрали) сопротивление. Основным преимуществом сетей с изолированной нейтралью является то, что в таких сетях однофазные замыкания на землю не связаны с нарушением нормальной работы электроприемников. Однако это преимущество в карьерных распределительных сетях не используется, так как по условиям электробезопасности в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и ЕПБ поврежденный элемент системы должен отключаться защитой от замыканий на землю.

Отмеченные ранее достаточно жесткие условия эксплуатации систем электроснабжения карьеров определяют аварийность распределительных сетей

и оборудования, которая значительно превышает уровень аналогичных аварий в электрических сетях предприятий других отраслей.

**Цель статьи** – изложить результаты анализа повреждаемости элементов карьерных распределительных сетей и дать оценку их надежности.

Основная масса эксплуатационных аварий в распределительных сетях связана с нарушением изоляции фаз сети относительно земли, т. е. появлением несимметричных повреждений, которые можно условно разделить на три основных вида [3]:

- 1) замыкания одной фазы распределительной сети на землю;
- 2) двойные замыкания на землю (замыкания на землю в разных точках распределительной сети;
- 3) замыкания на землю со стороны электроприемника.

По характеру повреждений следует различать металлические (глухие) замыкания на землю, дуговые (через перемежающуюся дугу) и через переходные сопротивления в точках повреждения.

Однофазные замыкания на землю или на корпус появляются вследствие механического повреждения или электрического пробоя изоляции одной из фаз сети относительно земли или корпуса. Такие повреждения в установившемся режиме практически не представляют опасности для работы электроприемников, т.к. симметрия междуфазных напряжений не нарушается, а значения тока замыкания во много раз меньше тока нагрузки. С точки зрения обеспечения электробезопасности такие повреждения представляют значительную опасность за счет появления на корпусах электрооборудования опасных потенциалов (особенно при дуговых замыканиях), кроме того, резко возрастает вероятность появления наиболее опасных двойных замыканий на землю [4, 5].

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 на землю могут сказываться на режиме работы электроприемников и представляют повышенную опасность с точки зрения поражения человека электрическим током, так как такие повреждения при определенных условиях сопровождаются появлением высоких потенциалов на корпусах всего заземленного электрооборудования и электрифицированных механизмов и машин (практически по заземляющей сети распределяется линейное напряжение). Значения аварийных токов при двойных замыканиях на землю могут достигать значений опасных как для электрических сетей и оборудования, так и для заземляющей сети.

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 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].

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.

Выполненный 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 [1, 5, 7]. 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

<i>Элемент сети</i>	<i>Доля отказов %</i>
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 [5] 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.

Таблица 2.

Распределение двойных замыканий на землю по видам электрооборудования.

<i>Элемент карьерной сети</i>	<i>Доля отказов</i>
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. В свою очередь надежность карьерных распределительных сетей и электрооборудования зависит от горно-технических, организационных, погодноклиматических и эксплуатационных условий.

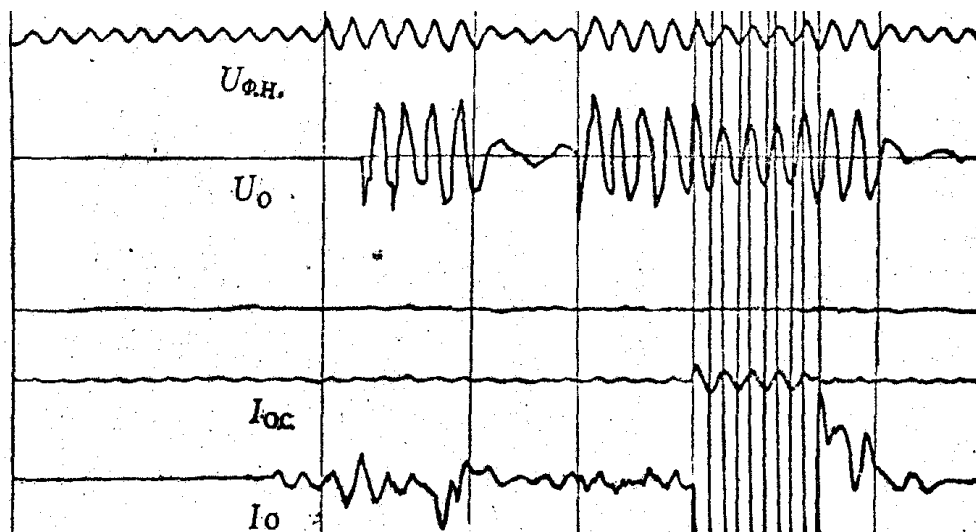


Рис.1. Переход однофазного замыкания на землю в двойное

Основным качественным показателем, характеризующим надежность системы, является понятие отказа, т. е. события, обеспечивающего нарушение работоспособности. Отказы по характеру возникновения делят на внезапные (скачкообразные изменения основных параметров системы или ее элементов вследствие воздействия случайных факторов) и постепенные (плавное изменение параметров в результате износа и старения). Следует также различать конструкционные (возникающие в результате нарушения установленных правил и норм конструирования), производственные (в результате нарушения установленных процессов изготовления и ремонта) и эксплуатационные (в результате нарушения установленных правил и условий эксплуатации) отказы.

К основным количественным показателям надежности относят [1, 2]:

1. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  — вероятность того, что в заданном интервале времени 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  $t$ .

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

$$Q(t) = n(t) / N_0 \quad (2)$$

3. Вероятность безотказной работы и вероятность отказа — события несовместимые и противоположные, для них справедливо равенство

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

4. Нарботку 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;  $r$  — число отказов системы или элемента за время испытаний  $t$ ;  $t_i$  — время безотказной работы между соседними отказами.

5. Среднее время восстановления  $T_B$  — 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 потока отказов  $\lambda(t)$  — число отказов в единицу времени, отнесенное к числу систем или элементов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени

6.

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

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

7. 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  $t$ ;  $\Delta t$  — рассматриваемой период работы системы или элемента, причем физический смысл параметра потока отказов — это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени.

8. 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  $T_{\text{раб}}$  состоянии и в резерве  $T_{\text{рез}}$ , к сумме времени его аварийного простоя  $T_{\text{ав}}$ , рабочего  $T_{\text{раб}}$  и резервного  $T_{\text{рез}}$  состояний за рассматриваемый интервал времени

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

9. Коэффициент отказов  $k_0$ , определяемый отношением 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.

Таблица 3

*Показатели надежности элементов распределительных сетей*

<i>Элементы распределительной сети</i>	<i>Поток отказов <math>10^{-4}</math> 1/ч</i>	<i>Наработка на отказ, ч</i>	<i>Время вос- новления, ч</i>
Воздушная ЛЭП:			
<i>стационарная</i>	0,66-1,82	14235-18182	1,3-2,16
<i>передвижная</i>	3,88-5,07	1972-2780	1,1-1,85
Гибкий экскаваторный кабель	4,75-9,39	1230-2105	2,46-3,38
Переключательный 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

### **Выводы.**

1. Анализ повреждаемости элементов электрических сетей открытых горных работ показывает, что преобладающий вид повреждений — однофазные замыкания на землю. Указанные повреждения составляют от 65 до 90 % всех видов повреждений в карьерных сетях. Около 40 % однофазных замыканий приходится на экскаваторный кабель, 17—18 % — на воздушные линии и примерно столько же на электрооборудование экскаваторов.

2. Основная масса замыканий на землю в кабельных сетях происходит на концевых разделках и в местах ремонта кабеля (около 45 %). Примерно такое

же количество замыканий происходит по длине кабеля в виде электрического пробоя в результате износа жильной или шланговой изоляции. Замыкания на землю кабелей, вызванные механическими повреждениями, составляют менее 20 %.

3. Анализ публикаций и опыта эксплуатации показывает, что вопросы обеспечения надежности распределительных сетей карьеров остаются актуальными и требуют дальнейших исследований.

#### Список литературы

1. Белых Б. П. Заславец Б. И. Распределительные электрические сети рудных карьеров. — М.: Недра, 1978. -239 с.
2. Папков Б. В., Щеголькова Т. М. Повышение эффективности электропотребления на промышленных предприятиях // Промышленная энергетика. – 1995. - №12. - С.21-24.
3. Пивняк Г. Г., Шкрабец Ф. П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. — М.: Недра, 1993. – 192 с.
4. Режимы нейтрали в электрических сетях напряжением до 35 кВ. Сборник тезисов и докладов научно-технической конференции. –К., 1980. — 256с.
5. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. -М.: Недра, 1976. -175 с.
6. Самойлович И. С., Ситник И. В. Линии электропередачи карьеров. — М.: Недра, 1987. - 230 с.
7. Серов В. И., Щуцкий В. И., Ягудаев В. М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. — М.: Наука,1985. -136 с.