

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ШАХТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ковалев А.П., Чурсинова А.А., Чурсинов В.И.  
Донецкий государственный технический университет.  
Olga@elf.dgtu.donetsk.ua

*Proposal of design procedure probability ignition shaft cable from short circuit. Method differ from far-famed so much, that she permit determine rate element inflammation shaft cable by any correlation mean time being element in dangerous and safe condition. The example of account is given.*

Пожарную безопасность в шахтных кабельных сетях обеспечивает комплекс защит: максимальная токовая защита (МТЗ), аппаратура защиты от утечек тока (РУ) и блокировочный аппарат защиты от утечек тока (БРУ). МТЗ и РУ осуществляют непрерывный контроль за состоянием изоляции кабельной сети соответственно между фазами и между ними и землей в период, когда контролируемый участок сети находится под напряжением.

С помощью БРУ осуществляется контроль изоляции кабеля между жилами и землей в период, когда на контролируемом участке сети отсутствует напряжение.

Таким образом, можно считать, что совокупность защит МТЗ, РУ и БРУ осуществляет непрерывный контроль за состоянием изоляции в шахтных кабельных сетях в течение всего периода ее эксплуатации-содержании в рабочем и нерабочем ее состояниях- и решающим образом влияет на пожарную безопасность сети.

Для оценки пожарной опасности систем электроснабжения угольных шахт примем ряд допущений и положений [1]:

Под пожароопасным узлом будем понимать группу электрооборудования, либо отдельный элемент в системе электроснабжения, короткое замыкание (КЗ) в котором может привести к пожару в выработке.

Пожароопасные узлы различаются между собой по степени продольного резервирования МТЗ. Если элемент узла при возникновении в нем двухфазного КЗ защищается только МТЗ пускателя, а уставка МТЗ автоматического выключателя распредпункта будет выше тока двухфазного КЗ поврежденного элемента, то такой элемент относится к узлам первого типа. Если при КЗ в элементе узла в действие приходят защиты двух коммутационных аппаратов, через которые прошел сквозной ток КЗ, то такие узлы относятся к узлам второго типа и т.д.

При оценке пожаробезопасности элементов электроснабжения в первую очередь необходимо выделять и оценивать пожаробезопасность элементов, относящихся к узлам первого типа, а затем остальных типов.

Сумма интенсивностей возможных пожаров от каждого элемента комплекса электрооборудования, составляющего один узел, определяется числом возможных пожаров в единицу времени от данного узла.

Интенсивность возгораний элемента кабельной сети  $H_l$  для одного пожароопасного узла должна быть  $H_l \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ ,  $l = 1, 2, 3, 4$ .

Опасным состоянием электрооборудования (кабеля), находящегося под напряжением, будем считать такое его состояние, когда при случайном повреждении оно способно выделять в окружающую его среду электрический источник, мощность и длительность которого достаточна для воспламенения окружающей среды или изоляции самого электрооборудования.

Под опасным состоянием среды понимается независимое случайное соприкосновение горючего материала с корпусом электрооборудования или оболочкой кабеля.

Опасным состоянием системы защиты в коммутационном аппарате, считается такое, при котором в момент случайного КЗ (в зоне действия защиты), происходит ее отказ в срабатывании.

Опасное состояние системы защиты коммутационного аппарата или среды обнаруживаются только в результате профилактических осмотров с интервалом времени  $\Theta_n$ ,  $n = \overline{1, k}$ .

Любое КЗ в кабельной сети сопровождается замыканием фазы на заземляющий проводник или броню непосредственно, либо через электрическую дугу, поэтому, при КЗ в кабеле действие МТЗ дублируется аппаратом защиты от утечек тока. Это означает, что в случае отказа МТЗ поврежденный участок сети будет отключен с помощью аппарата защиты от утечек тока.

Если сквозной ток КЗ будет больше коммутационной способности пускателя, то его МТЗ не участвует в обеспечении пожаробезопасности и в расчет не принимается.

МТЗ коммутационных аппаратов не реагирует на дуговые КЗ в элементе сети с большим переходным сопротивлением дуги. В этом случае в отключении токов КЗ участвует только аппарат защиты от утечек тока.

Выгораемое (неотключаемое) КЗ в кабеле приводит к его возгоранию.

При оценке надежности защитных средств (МТЗ и аппарат защиты от утечек тока) по экспериментальным данным учитывается надежность, как схемы защиты, так и отключающего устройства.

Максимальное число событий, участвующих в процессе возможного формирования случаев возгорания элементов шахтной кабельной сети при КЗ равно шести, а минимальное трем.

Максимальное число событий, участвующих в формировании пожаров при КЗ в электрооборудовании равно семи, а минимальное пяти.

Возгорание кабеля, питающего двигатель комбайна, наступает, например, при совпадении (совмещении) следующих событий: произошло КЗ на рассматриваемом участке сети; отказала в срабатывании МТЗ пускателя; отказала в срабатывании МТЗ в групповом автоматическом выключателе; отказала в срабатывании МТЗ автоматического выключателя трансформаторной подстанции; отказала в срабатывании МТЗ высоковольтного комплектного распределительного устройства; отказал в срабатывании аппарат защиты от утечек тока.

При совпадении этих событий возникает выгораемое КЗ, за время существования которого часть кабеля сгорает независимо от того, из каких материалов он изготовлен, выделяя ядовитые газы способные отравить людей в выработке. Положение усугубляется, если в кабеле имеются горючие материалы, так как такой кабель горит и после отключения КЗ.

Пожар в выработке от электрооборудования наступает всякий раз при совпадении, например, следующих событий: произошло КЗ во вводной коробке электрооборудования; наличие горючего материала на вводной коробке электрооборудования; отказала в срабатывании МТЗ в пускателе; отказала в срабатывании МТЗ в групповом автоматическом выключателе; отказала в срабатывании МТЗ в автоматическом выключателе трансформаторной подстанции; отказал в срабатывании аппарат защиты от утечек тока.

Предположим, что возгорание элемента сети происходит при совмещении в пространстве и времени минимального числа независимых случайных событий, имеющих различную частоту появления и длительность существования [2].

Под минимальным пожароопасным совмещением аварийных событий данного узла системы электроснабжения (электрооборудование- защита- окружающая пожароопасная среда) будем понимать такой минимальный набор его элементов, находящихся в опасном состоянии, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из пожароопасного состояния.

Интенсивность появления возгорания элемента шахтной кабельной сети от каждого минимального совмещения, опасного в отношении возгорания можно определить, пользуясь теоремой восстановления [3].

$$H = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{H(T)}{T} = \frac{1}{\tau_1}, \quad (1)$$

где  $\tau_1$  - среднее время до первого возгорания.

Вероятность возгораний шахтных кабельных сетей в течение года:

$$F(t) = 1 - e^{-H_0 t}, \quad (2)$$

где

$$H_0 = \sum_{m=1}^3 H^{(l)},$$

$H^{(l)}$  - интенсивность появления возгорания элемента шахтной кабельной сети от  $l$ -того узла  $l=1,2,3,4$ .

Среднее время до первого возгорания определим, пользуясь системой уравнений [4].

$$\tau = (I - Q)^{-1} \xi, \quad (3)$$

где

$I$  - единичная матрица;

$Q$  - матрица, полученная из матрицы интенсивностей переходов  $P$  при исключении поглощающего состояния ( последней строки и последнего столбца);

$\tau = [\tau_s]$  - матрица столбец,  $s = \overline{1,6,3}$ ;

$\xi$  - матрица столбец, все элементы которой равны 1.

Матрицу интенсивностей переходов для минимального совмещения, состоящего из шести элементов, можно получить, пользуясь [5]. Матрица  $P_6$  примет вид (4).

Матрицы  $Q_6, Q_5, Q_4, Q_3$  отличаются от матриц  $Q_6^1, Q_5^1, Q_4^1, Q_3^1$  только диагональными элементами. Диагональные элементы матриц  $P_6, P_5, P_4, P_3$  определяются, как единица минус сумма элементов, соответствующей строки. Например, для матрицы  $P_3$ , диагональный элемент имеет вид

$$\alpha_1 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3), \quad \alpha_2 = 1 - (\mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2), \quad \alpha_3 = 1 - (\mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1), \quad \alpha_4 = 1 - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2),$$

$$\alpha_5 = 1 - (\mu_3 + \mu_1 + \lambda_2), \quad \alpha_6 = 1 - (\mu_3 + \mu_2 + \lambda_1), \quad \alpha_7 = 1 - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_3).$$



$$P_3 = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_2 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 & 0 \\ \mu_3 & 0 & 0 & \alpha_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & \alpha_5 & 0 & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & \alpha_6 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & \lambda_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Аналогичным образом определяются и все остальные диагональные элементы.

Например в матрице (4)  $\lambda_n = \frac{1}{d_n}$ ;  $\mu_n = \frac{1}{d_n}$ ;  $n = \overline{1,6}$ .

$\bar{d}_n$  и  $d_n$  - средний интервал времени между появлением опасного события и длительность его существования.

Если заданы интервалы времени  $\Theta_n, n = \overline{1,6}$  между проверками элементов, входящих в минимальное пожароопасное совмещение, то среднее время нахождения элементов в необнаруженном отказавшем состоянии определим следующим образом [6]:

$$d_n = \Theta_n - \bar{d}_n \left( 1 - e^{-\left(\frac{\Theta_n}{d_n}\right)} \right). \quad (8)$$

В тех случаях, когда  $\frac{\Theta_n}{d_n} < 0,1$ , формула (8) примет вид:

$$d_n \approx \frac{\Theta_n^2}{2 \cdot d_n}. \quad (9)$$

Если выполняется условие:

$$\frac{d_n}{\bar{d}_n} < 0,01, \quad (10)$$

тогда [5]

$$\tau_1 = \frac{\prod_{n=1}^6 \bar{d}_n}{\prod_{n=1}^6 d_n \sum_{n=1}^6 \frac{1}{d_n}} \quad (11)$$

В тех случаях, если условие (10) не выполняется, тогда  $\tau_1$  находится из системы уравнений (3) с использованием матриц (4-7).

Обозначим символом  $x_{i,j}^{-(l)}$  событие, относящееся к  $i=1$  кабелю, в котором  $j=1$  произошло короткое замыкание, а  $l$  указывает на узел, в котором это событие произошло. События, относящиеся к средствам защиты, обозначим символом  $y_{i,j}$ , где  $i = \overline{1,5}$ ,  $j = \overline{1,2}$ . Код  $i$  относится к элементам кабельной сети и средствам защиты, установленных в различных коммутационных аппаратах:  $i=1$  - кабельная линия магистральная;  $i=2$  - кабельная линия, отходящая от распределительного пункта;  $i=3$  - максимальная токовая защита в пускателе;  $i=4$  - максимальная токовая защита в групповом автоматическом выключателе;  $i=5$  - максимальная токовая защита в автоматическом выключателе трансформаторной подстанции;  $i=6$  - аппарат защиты от утечек тока;  $i=7$  - максимальная токовая защита в высоковольтном комплекте распределительном устройстве. Код  $j$  относится к видам опасных состояний элементов системы:  $j=1$  - короткое замыкание,  $j=2$  - отказ защиты в срабатывании.

Используя принятые допущения, коды и события, формирующие процесс возгорания кабеля, типовую схему электроснабжения участка рисунок 1 строим «дерево» формирования пожара от КЗ в элементе кабельной сети рисунок 2 и схему минимальных пожароопасных совмещений рисунок 3.

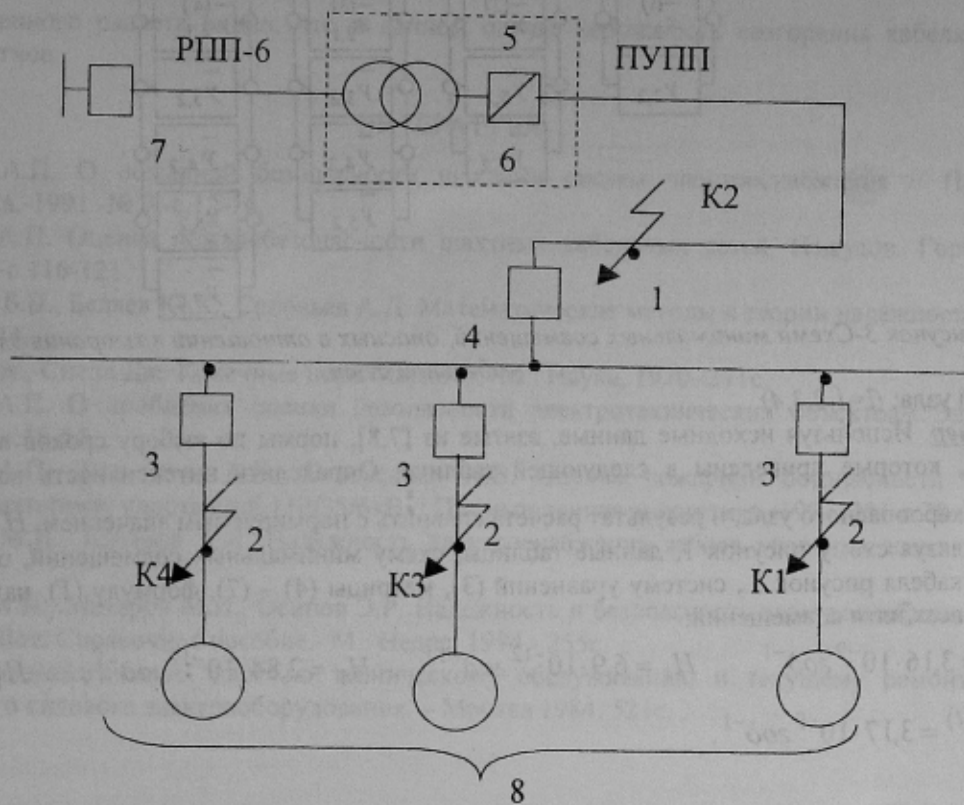


Рисунок 1-Типовая схема системы электроснабжения участка угольной шахты (все потребители объединены в соответствующие узлы: первого, второго, третьего и четвертого видов)

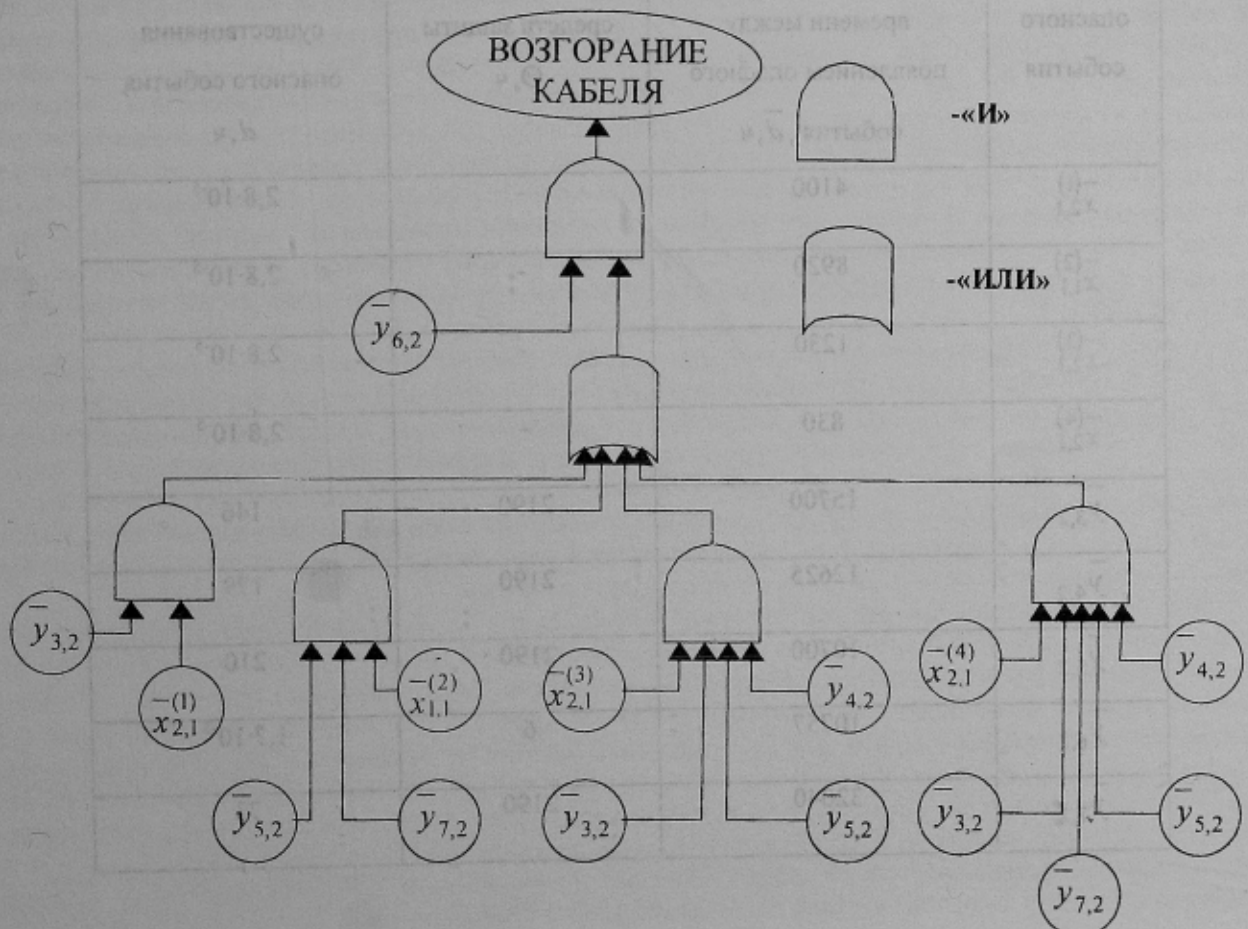


Рисунок 2- Дерево возможного формирования случаев возгорания элементов шахтной кабельной сети при коротких замыканиях

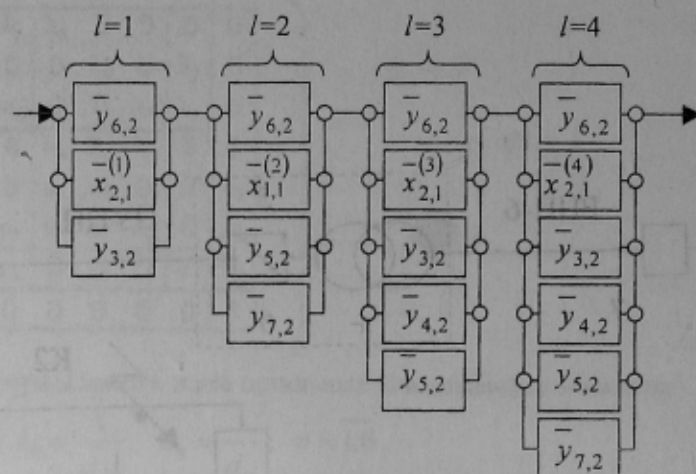


Рисунок 3-Схема минимальных совмещений, опасных в отношении возгорания элементов шахтной кабельной сети.

$l$ - тип узла; ( $l=1,2,3,4$ ).

**Пример.** Используя исходные данные, взятые из [7,8], нормы по выбору сроков профилактики средств защиты [9], которые приведены в следующей таблице. Определить интенсивность возгорания кабеля для каждого пожароопасного узла, и результат расчета сравнить с нормируемым значением  $H = 1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ .

Используя схему рисунок 1, данные таблицы, схему минимальных совмещений, опасных в отношении возгорания кабеля рисунок 3., систему уравнений (3), матрицы (4) – (7), формулу (1), находим интенсивности пожаров от всех пяти совмещений:

$$H_1 = 3,16 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}, \quad H_1 = 6,9 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}, \quad H_1 = 2,84 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}, \quad H_1 = 9,22 \cdot 10^{-15} \text{ год}^{-1},$$

$$H_0 = \sum_{l=1}^4 H^{(l)} = 3,17 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}.$$

Таблица - Исходные данные для расчета вероятности возгорания элемента шахтной кабельной сети

Код опасного события	Средний интервал времени между появлением опасного события, $\bar{d}, \text{ч}$	Срок профилактики средств защиты $\Theta, \text{ч}$	Средняя длительность существования опасного события $d, \text{ч}$
$-(i) x_{2,1}$	4100	-	$2,8 \cdot 10^{-5}$
$-(2) x_{1,1}$	8920	-	$2,8 \cdot 10^{-5}$
$-(3) x_{2,1}$	1230	-	$2,8 \cdot 10^{-5}$
$-(4) x_{2,1}$	830	-	$2,8 \cdot 10^{-5}$
$\bar{y}_{3,2}$	15700	2190	146
$\bar{y}_{4,2}$	12625	2190	179
$\bar{y}_{5,2}$	10700	2190	210
$\bar{y}_{6,2}$	10757	6	$1,7 \cdot 10^{-3}$
$\bar{y}_{7,2}$	32040	2190	73

В том случае, если для оценки пожарной безопасности сети использовать приближенные формулы (9) и (11), тогда вероятность возгорания элементов кабельной сети в течении года примет следующее значение:

$$H_0^* = 4,698 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$$

Из приведенного расчета видно, что в данном случае вероятность возгорания кабеля от токов КЗ событие маловероятное.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев А.П. О пожарной безопасности шахтных систем электроснабжения // Промышленная энергетика.-1991.-№ 9.-с.12-14.
2. Ковалев А.П. Оценка пожаробезопасности шахтных кабельных сетей. Из.вузов. Горный журнал.-1992.-№2-с.116-121.
3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности.- М.: Наука, 1965. С.524.
4. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова.- М.: Наука, 1970.-271с.
5. Ковалев А.П. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов// Электричество.-1991.-№8 с.50-55.
6. Ковалев А.П., Шевченко А.В., Белоусенко И.В. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6кВ.// Промышленная энергетика.-1991.-№6 с.28-31.
7. Макаров М.И., Бочаров А.А. Надежность электроснабжения забоев угольных шахт.- К.: Техніка, 1985-184с.
8. Щуцкий М.И., Макаров М.И., Осипов Э.Р. Надежность и безопасность электроснабжения подземных горных работ: Справочное пособие.- М.: Недра, 1994.- 255с.
9. Альбом технологических карт по техническому обслуживанию и текущему ремонту основного рудничного силового электрооборудования. – Москва 1984. 521с.