

## ОБ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ РИСКА ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

*Ковалев А. П., Журавель Е. А., Шевченко О. А.*  
*Донецкий государственный технический университет*  
*olga@elf.dgtu.donetsk.ua*

*One of possible mathematical models explaining process of a defeat of the man by an electrical current is offered. The approximation formula is received with the help of which it is possible to define the reliability of protective switching-off distinguished by standardized level of electrical safety. The example of account is given.*

Под риском будем понимать меру опасности при эксплуатации электрооборудования. Риск может быть измерен числом поражений человека электрическим током в единицу времени.

Анализ статистических данных МакНИИ за последние десять лет показал, что на угольных шахтах Украины число поражений людей электрическим током в участковых сетях напряжением до 1000 В, от случайного прикосновения человека к токоведущим частям электрооборудования или оголенным местам кабельной сети, находящихся под напряжением, составляет более 85 %, из них 43 % приходится на случайное прикосновение человека к голому контактному проводу или металлическим частям, имеющим случайный контакт с этим проводом.

За время наблюдения не было зафиксировано ни одного смертельного случая поражения человека электрическим током при исправном состоянии защитного отключения (реле утечки).

Возникает вопрос, возможно ли на данном этапе развития техники и организации ее обслуживания обеспечить такую надежность системы защитного отключения, чтобы почти полностью исключить случаи поражения человека электрическим током.

В основу оценки электробезопасности при эксплуатации электрооборудования на участке угольной шахты положим представление о поражении человека электрическим током как о случайном совмещении ряда опасных состояний техники и человека [1].

Состояние электрооборудования будем считать безопасным в те периоды его эксплуатации, когда оно не является источником поражения человека электрическим током (нет замыкания фазы на корпус, не ремонтируется электрооборудование без снятия напряжения) и опасным, когда является.

Под безопасным состоянием человека будем понимать такое его поведение, когда он не касается ни оболочки, ни, тем более, токоведущих частей электрооборудования, находящихся под напряжением, а опасным – когда происходит случайное касание либо корпусов электрооборудования, либо токоведущих частей без индивидуальных средств защиты.

Под опасным состоянием средств защиты (реле утечки, общее и местное заземление) будем понимать их нерабочее состояние (отключена защита, загроблена уставка, оборваны проводники, недопустимо большим является сопротивление цепи заземления и т. д.).

При построении математической модели, описывающей процесс формирования поражения человека электрическим током, примем ряд допущений и положений [2]: источник поражения человека электрическим током появляется всякий раз, когда возникает однофазное замыкание на землю (ОЗ), вскрывается оболочка электрооборудования под напряжением или оголяются силовые жилы кабеля; поражение человека электрическим током при исправном состоянии защитного отключения – маловероятное событие, поэтому в расчетах не учитывается; опасное состояние средств защиты обнаруживается только в результате профилактических осмотров.

Под минимальным электроопасным совмещением аварийных событий технической системы (в данном случае: электрооборудование - средства защиты – человек) будем понимать такой минимальный набор находящихся в опасном состоянии элементов, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из электроопасного состояния.

Рассмотрим случай поражения человека электрическим током в результате его случайного прикосновения к фазному проводу 0,4 кВ при ремонте кабельной сети.

Поражение человека электрическим током произойдет при совпадении в пространстве и времени следующих независимых случайных событий: подано напряжение на электрооборудование; человек прикоснулся к оголенной части кабеля, находящейся под напряжением; произошел отказ в срабатывании защитного отключения.

Обозначим через  $\chi_k(t)$ ,  $k = 1, 2, 3$  процесс изменения состояния каждого из трех элементов, участвующих в формировании поражения человека электрическим током. Предположим, что  $\chi_k(t)$  принимает два значения: 0 и 1 в зависимости от того, в безопасном или опасном состоянии находится элемент. Что же касается

статистической природы этих функций, предположим следующее: вероятность переходов из безопасного состояния в опасное за промежуток времени  $\Delta t$  равна  $\lambda_k \Delta t + 0(\Delta t)$ , где  $0(\Delta t)$  означает, что вероятность появления более одного опасного состояния в интервале  $t + \Delta t$  является величиной высшего порядка малости по сравнению с  $\Delta t$ ; вероятность перехода из опасного состояния в безопасное за время  $\Delta t$  равно  $\mu_k \Delta t + 0(\Delta t)$  и не зависит от предшествующего течения процесса  $\chi_k(t)$ .

Величины  $\lambda_k$  и  $\mu_k$  - являются параметрами рассматриваемого процесса. При этом  $\lambda_k$  характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени сменяются опасными, а  $\mu_k$  - частоту или скорость смены опасных промежутков времени безопасными.

Принятые допущения означают, что  $\chi_k(t)$  можно рассматривать как процесс Маркова с двумя состояниями: 0 (безопасное) и 1 (опасное) [3]. Поражение человека электрическим током наступит в момент случайной встречи процессов в состоянии 1, т. е., когда  $\chi_1(t) = 1$ ,  $\chi_2(t) = 1$ ,  $\chi_3(t) = 1$  (рис. 1).

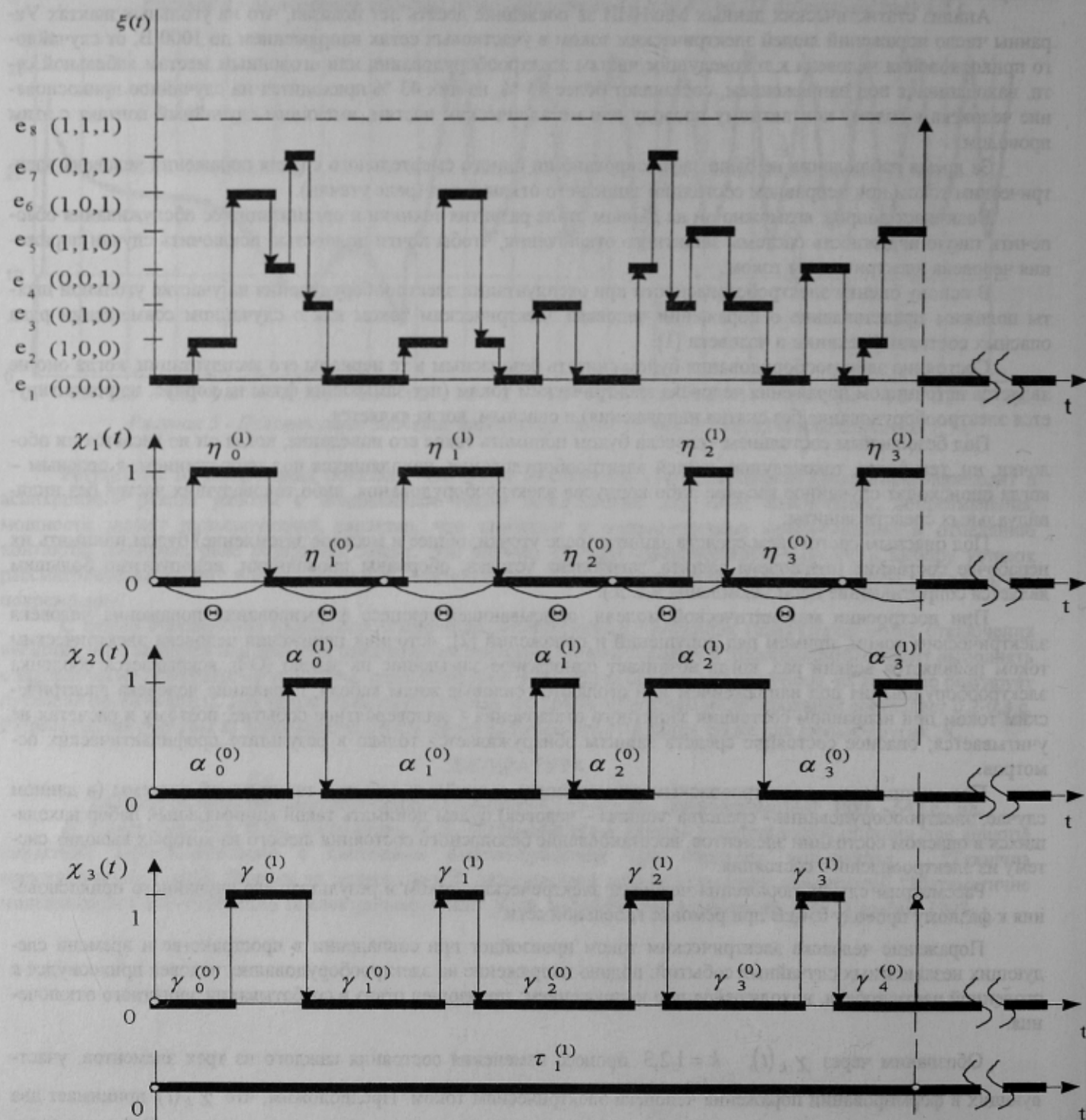


Рисунок 1 - Возможная реализация марковского процесса

Выразим значение среднего времени  $\tau_1$  до поражения человека электрическим током через параметры процессов  $\chi_k(t)$ , если в начальный момент времени все элементы рассматриваемой системы находились в безопасном состоянии. Для этого совокупность указанных процессов рассмотрим как процесс Маркова с восьмью состояниями и непрерывным временем. Поведение во времени такой системы полностью описывается матрицей интенсивностей переходов (1)

$$Q = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 \\ \mu_2 & 0 & \alpha_3 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_3 \\ \mu_3 & 0 & 0 & \alpha_4 & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & \alpha_5 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & 0 & \alpha_6 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & 0 & \alpha_7 \end{pmatrix}, (1)$$

$$\text{где } \alpha_1 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3);$$

$$\alpha_2 = 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3);$$

$$\alpha_3 = 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3);$$

$$\alpha_4 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3);$$

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i}; \quad \mu_i = \frac{1}{d_i}, \quad i = 1, 2, 3.$$

$$\alpha_5 = 1 - (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3);$$

$$\alpha_6 = 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \mu_3);$$

$$\alpha_7 = 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3).$$

$\bar{d}_1, d_1$  - средний интервал времени между подачами напряжения на электрооборудование и средняя длительность нахождения его под напряжением соответственно;

$\bar{d}_2, d_2$  - средний интервал времени между прикосновениями человека к силовым токоведущим частям электрооборудования при его ремонте без индивидуальных средств защиты и средняя длительность ремонта соответственно;

$\bar{d}_3, d_3$  - средний интервал времени между отказами защитного отключения и среднее время нахождения его в необнаруженном отказавшем состоянии соответственно.

Используя общую систему уравнений [4] и полученную матрицу (1), можно определить среднее время до поражения человека электрическим током

$$\tau = (I - Q)^{-1} \cdot \xi, \quad (2)$$

где  $I$  - единичная матрица;  $\xi$  - вектор-столбец, все элементы которого равны 1;

$$\tau = [\tau_i]_{i=1}^7 - \text{вектор-столбец.}$$

Используя систему уравнений (2) и матрицу (1), при соблюдении условий:

$$\bar{d}_1 \gg d_1; \quad \bar{d}_2 \gg d_2; \quad \bar{d}_3 \gg d_3, \quad (3)$$

получим приближенную оценку для нахождения среднего времени  $\tau_1$  до поражения человека электрическим током, если в начальный момент времени все элементы системы находились в безопасном состоянии

$$\tau_1 = \frac{\bar{d}_1 \cdot \bar{d}_2 \cdot \bar{d}_3}{d_1 \cdot d_2 + d_1 \cdot d_3 + d_2 \cdot d_3}. \quad (4)$$

Используя теорему восстановления [5], определим степень риска поражения человека электрическим током  $H$ .

$$H = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{H(T)}{T} = \frac{1}{\tau_1}. \quad (5)$$

Если известен интервал времени между проверками защитного отключения  $\Theta$ , то используя формулы [6], определим среднее время нахождения защитного отключения в необнаруженном отказавшем состоянии:

$$d_3 = \Theta - \bar{d}_3 \left( 1 - e^{-\left(\frac{\Theta}{d_3}\right)} \right). \quad (6)$$

В тех случаях, когда:  $\frac{\Theta}{d_3} < 0,1$ , тогда формула (6) примет вид:

$$d_3 \cong \frac{\Theta^2}{2 \cdot d_3} \quad (7)$$

Подставив  $d_3$ , полученное с помощью формулы (7), в формулу (5) получим:

$$H = \frac{2\bar{d}_3 d_1 d_2 + \Theta^2 (d_1 + d_2)}{2(\bar{d}_3)^2 \cdot d_1 d_2} \quad (8)$$

Минимально возможное значение интервала времени между отказами защитного отключения  $\bar{d}_3$  можно получить из формулы (8):

$$2H\bar{d}_1\bar{d}_2(\bar{d}_3)^2 - 2d_1d_2\bar{d}_3 - \Theta^2(d_1 + d_2) = 0 \quad (9)$$

Решая квадратное уравнение относительно  $\bar{d}_3$  получим:

$$\bar{d}_3 = \frac{2d_1d_2 \pm \sqrt{(2d_1d_2)^2 + 8H\bar{d}_1\bar{d}_2\Theta^2(d_1 + d_2)}}{4H\bar{d}_1\bar{d}_2} \quad (10)$$

Пример. На одной из шахт Донбасса в течение  $T=216$  ч (36 ремонтных смен) под наблюдением находилось  $N = 36$  отрезков кабеля, питающих добычной комбайн.

За время наблюдения было зафиксировано:  $n_1 = 6$  случаев ошибочной подачи напряжения на питающий кабель комбайна, когда он находился в ремонте;  $n_2 = 18$  случаев ремонта кабеля после его отключения. Среднее время нахождения напряжения на ремонтируемом кабеле составило  $d_1 = 0,25$  ч, а среднее время ремонта одной кабельной линии  $d_2 = 0,7$  ч.

Определить минимально возможное время  $\bar{d}_3$ , в течение которого защитное отключение должно работать безотказно, при ежесменной его проверке  $\Theta = 6$  ч, чтобы риск поражения человека электрическим током был минимальным ( $H \leq 1,14 \cdot 10^{-10}$  ч<sup>-1</sup>).

Определим  $\bar{d}_1$  и  $\bar{d}_2$  следующим образом:

$$\bar{d}_1 = \frac{N \cdot T}{n_1} = \frac{36 \cdot 216}{6} = 1296 \text{ ч},$$

$$\bar{d}_2 = \frac{N \cdot T}{n_2} = \frac{36 \cdot 216}{18} = 432 \text{ ч}.$$

Подставляя в формулу (10) полученные значения для  $\bar{d}_1$  и  $\bar{d}_2$  и данные примера  $d_1$ ,  $d_2$  и  $\Theta$ , находим два значения корня:  $\bar{d}_3 = 2836,315$  ч и  $\bar{d}_3 = -94,46$  ч. Отрицательное значение корня в расчет не принимается, так как  $\bar{d}_3$  всегда больше нуля. Точное значение  $\bar{d}_3^{(T)}$  было получено используя исходные данные примера, матрицу (1), систему уравнений (2), формулу (6) и (5). Получили  $\bar{d}_3^{(T)} = 2831,2$  ч.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусенко И. В., Ковалев А. П. Об оценке степени риска поражения человека электрическим током на объектах добывающей промышленности. Промышленная энергетика. -1995-№10. с.43-47.
2. Ковалев А. П. Оценка степени риска поражения человека электрическим током при эксплуатации оборудования в подземных выработках угольных шахт. Промышленная энергетика. -1992-№2. с.42-45.
3. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. - М.: Наука, 1970, 271с.
4. Тихомиров В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. - М.: Сов. радио, 1977, 485 с.
5. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. - М.: Наука, 1965, 386с.
6. Ковалев А. П., Шевченко А. В., Белоусенко И. В. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6кВ. Промышленная энергетика, 1991, №6.