УДК 658.382.3

О ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Шевченко О. А.
Донецкий государственный технический университет
olga@elf.dgtu.donetsk.ua

On the basis marcov's casual process the new mathematical model is developed. The mathematical model allows to define average time up to the first fire and probability of occurrence of circuit current on a protected line. The mathematical model makes possible to set reliability of system of switching-off of the protective switching device. The example of account is given.

В сетях напряжением до 1000 В промышленных предприятий величина токов КЗ значительна. Например, ток при трехфазном КЗ на шинах подстанции (380/220 В) составляет 25-40 кА, на шинах главных цеховых силовых шкафов – 10-20 кА, а на зажимах электродвигателей (4-8 кВт) – 2 кА.

Резкое возрастание токов в короткозамкнутой цепи может вызвать: опасный нагрев токоведущих частей и воспламенение горючих изоляционных материалов в конструкции кабеля или оплетки провода, воспламенение пожароопасной и взрывоопасной среды при разбрызгивании расплавленного металла, из которого изготовляется проводник, сваривание электрических контактов, вызвать электрические дуги, обладающие воспламеняющей способностью и т. д. [1].

Анализ данных УГПО УМВД Донецкой области за период с 1995 по 2000 г показал, что во всех зафиксированных случаях пожар от КЗ в кабелях и проводах происходил тогда, когда отказывал в срабатывании ближайший к месту КЗ коммутационный аппарат, а отключалось КЗ резервным защитным аппаратом с выдержкой времени.

Следовательно, будем предполагать, что пожар в сети происходит при совпадении в пространстве и времени следующих случайных событий: КЗ в защищаемой сети; отказ в срабатывании (без выдержки времени) ближайшего к месту КЗ защитного коммутационного аппарата.

Задача данной работы состоит в следующем: определить вероятность безопасной работы рассматриваемого участка сети $R(t)$, вероятность пожара в элементе сети $Q(t)$, среднее время до первого пожара τ_1 при условии, что в начальный момент времени в защищаемой сети не наблюдаются токи КЗ и система отключения и защиты коммутационного аппарата находятся в исправном состоянии.

Пусть изменения состояния рассматриваемого участка сети представим в виде марковского случайного процесса [2] $\xi(t)$, с параметрами λ_1 и μ_1, который может принимать два значения: 0 – безопасное состояние (интервалы времени между появлениями КЗ в защищаемой сети) и 1 – опасное состояние (в сети произошло КЗ, длительность которого равна времени срабатывания защитного коммутационного аппарата). Аналогичной функцией $\eta(t)$ с параметрами λ_2 и μ_2 описывается состояние защитного коммутационного аппарата: 0 – система защитного отключения коммутационного аппарата находится в исправном состоянии; 1 – система защитного отключения находится в отказавшем состоянии.

Рассмотрим случай, когда система защитного отключения без самоконтроля, т. е. при отказе защиты она не дает сигнал на отключение защитного коммутационного аппарата. Состояние защиты в течение рассматриваемого интервала времени t не проверяют. В этом случае принимаем $\mu_2 = 0$. К таким защитам, у которых $\mu_2 = 0$ можно отнести автоматические выключатели (пробки) жилых квартир.

Пожар от КЗ в защищаемой сети наступает в момент, когда $\xi(t) = 1$ и $\eta(t) = 1$.

Совокупность процессов $\eta(t)$ и $\xi(t)$ рассмотрим как процесс маркова с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем.

Выразим вероятности $P_i(t)$, $i = \overline{0,3}$ нахождения системы в каждом из четырех возможных состояний через параметры известных процессов: λ_1, μ_1 и λ_2. Поведение во времени такой системы полностью описывается системой линейных дифференциальных уравнений.

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{p}_0(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)\cdot p_0(t) = \mu_1 \cdot p_2(t);\\
&\dot{p}_1(t) + \lambda_1 \cdot p_1(t) = \lambda_2 \cdot p_0(t);\\
&\dot{p}_2(t) + (\lambda_2 + \mu_1)\cdot p_2(t) = \lambda_1 \cdot p_0(t);\\
&\dot{p}_3(t) = \lambda_1 \cdot p_1(t) + \lambda_2 \cdot p_2(t);
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Система дифференциальных уравнений (1) должна быть решена при следующих начальных условиях: $P_0(t)=1$, $P_1(t)=P_2(t)=P_3(t)=0$, т. е. в начальный момент времени КЗ в защищаемой сети нет и система отключения автоматического выключателя исправна и готова к работе в случае появления КЗ.

Используя преобразования Лапласа [3] систему линейных дифференциальных уравнений (1) приводим к системе алгебраических уравнений вида:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{p}_0(s)(s+\lambda_1+\lambda_2)=\mu_1\cdot p_2(s)+1;\\
&\dot{p}_1(s)(s+\lambda_1)=\lambda_2\cdot p_0(s);\\
&\dot{p}_2(s)(s+\lambda_2+\mu_1)=\lambda_1\cdot p_0(s);\\
&s\dot{p}_3(s)=\lambda_1\cdot p_1(s)+\lambda_2\cdot p_2(s);
\end{aligned}\right\}. \tag{2}$$

Решая систему алгебраических уравнений (2) относительно $P_i(s)$, $i=\overline{0,3}$ находим:

$$P_0(s)=\frac{s+\lambda_2+\mu_1}{(s+\lambda_2)\cdot(s+\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}; \tag{3}$$

$$P_1(s)=\frac{\lambda_2\cdot(s+\lambda_2+\mu_1)}{(s+\lambda_1)\cdot(s+\lambda_2)\cdot(s+\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}; \tag{4}$$

$$P_2(s)=\frac{\lambda_1}{(s+\lambda_2)\cdot(s+\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}; \tag{5}$$

$$P_3(s)=\frac{\lambda_1\cdot\lambda_2\cdot(2s+\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}{s\cdot(s+\lambda_1)\cdot(s+\lambda_2)\cdot(s+\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}. \tag{6}$$

Переходим в формулах (3), (4), (5) и (6) от изображения к оригиналам, получим:

$$P_0(t)=\frac{\mu_1 e^{-\lambda_2\cdot t}+\lambda_1 e^{-(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2)\cdot t}}{\lambda_1+\mu_1}; \tag{7}$$

$$P_1(t)=\frac{\gamma_1 e^{-\lambda_1\cdot t}+\gamma_2 e^{-\lambda_2\cdot t}+\gamma_3 e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)\cdot t}}{(\mu_1+\lambda_1)(\mu_1+\lambda_2)(\lambda_1-\lambda_2)}; \tag{8}$$

где

$$\gamma_1=\lambda_2\cdot(\lambda_1+\mu_1)\cdot(\lambda_1-\mu_1-\lambda_2); \tag{9}$$

$$\gamma_2=\mu_1\lambda_2\cdot(\lambda_2+\mu_1); \tag{10}$$

$$\gamma_3=\lambda_1\lambda_2\cdot(\lambda_1-\lambda_2); \tag{11}$$

$$P_2(t)=\frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2\cdot t}-\lambda_1 e^{-(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2)\cdot t}}{\lambda_1+\mu_1}; \tag{12}$$

$$P_3(t)=1+\frac{\lambda_1\lambda_2 e^{-(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2)\cdot t}}{(\lambda_1+\mu_1)(\lambda_2+\mu_1)}-\frac{\lambda_2(\lambda_1-\lambda_2-\mu_1)e^{-\lambda_1\cdot t}}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_2+\mu_1)}-\frac{\lambda_1(\lambda_1-\lambda_2+\mu_1)e^{-\lambda_2\cdot t}}{(\lambda_1+\mu_1)(\lambda_1-\lambda_2)}; \tag{13}$$

Вероятность безопасной работы в течение времени t определяется суммой вероятностей $P_0(t)$, $P_1(t)$ и $P_2(t)$, т. е.

$$R(t)=-\frac{\lambda_1\lambda_2 e^{-(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2)\cdot t}}{(\lambda_1+\mu_1)(\lambda_2+\mu_1)}+\frac{\lambda_2(\lambda_1-\lambda_2-\mu_1)e^{-\lambda_1\cdot t}}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_2+\mu_1)}+\frac{\lambda_1(\lambda_1-\lambda_2+\mu_1)e^{-\lambda_2\cdot t}}{(\lambda_1+\mu_1)(\lambda_1-\lambda_2)}. \tag{14}$$

Вероятность пожара в течение времени t

$$Q(t)=1-R(t)=P_3(t). \tag{15}$$

Среднее время τ_1 до первого пожара можно определить следующим образом [2]

$$\tau_1=\int_0^\infty R(t)dt. \tag{16}$$

Подставляя выражение (14) в (16) и вычисляя интеграл получим

$$\tau_1=\frac{\lambda_1^2+\lambda_2(\lambda_2+\mu_1)+\lambda_1(\lambda_2+\mu_1)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}. \tag{17}$$

Дисперсию времени до первого пожара можно определить пользуясь выражением [3]

$$\sigma_1^2 = \psi''(s)\Big|_{s=0} - \left[\psi'(s)\Big|_{s=0}\right]^2, \tag{18}$$

где

$$\psi(s) = 1 - s\left[P_0(s) + P_1(s) + P_2(s)\right]. \tag{19}$$

Подставим (3), (4) и (5) в (16) и находим:

$$\psi(s) = 1 - \frac{s\lambda_2(s+\lambda_2+\mu_1) + s(s+\lambda_1)(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+s)}{(s+\lambda_1)(s+\lambda_2)(s+\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)}. \tag{20}$$

Подставляем значение $\psi(s)$ полученное по формуле (17) в (15) и находим σ_1^2.

$$\sigma_1^2 = \frac{\lambda_1^2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)^2 + \lambda_2^2(\lambda_2+\mu_1)(2\lambda_1+\lambda_2+\mu_1) - 2\lambda_1^2\lambda_2^2}{\lambda_1^2\lambda_2^2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)^2}. \tag{21}$$

В том случае, если выполняется условие:

$$\tau_1 \cong \sigma_1, \tag{22}$$

тогда

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\tau_1}}. \tag{23}$$

Полученные в работе формулы позволяют оценить пожароопасность любого участка сети защищаемого автоматическими выключателями или любой другой защитной аппаратурой, действующей на отключение, задавать нормы надежности на защитную аппаратуру, при которой обеспечивается нормируемый уровень пожарной безопасности [4].

Пример. Интенсивность появления токов КЗ в защищаемой автоматическим выключателям сети 220 В жилой квартиры $\lambda_1 = 5{,}2 \cdot 10^{-5}$ ч$^{-1}$, а $\mu_1 = \frac{1}{d_1} = 17857$ч$^{-1}$ (d_1 - среднее время срабатывания защитного коммутационного аппарата); интенсивность отказов в срабатывании автоматического выключателя $\lambda_2 = 5{,}7 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$.

Определить: среднее время до первого пожара τ_1; стандарт этого времени σ_1; вероятность возникновения пожара в течение времени t=8760ч и сравнить полученное значение $Q(8760)$ с нормируемой величиной $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$; построить функции безопасной работы $R(t)$, используя формулы (14) и формулу (23); определить вероятности нахождения системы в каждом из четырех возможных состояний $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $t = (1 \div 5) \cdot 10^5$ ч.

Используя исходные данные примера, формулы (17), (18) и (15) находим: $\tau_1 = 194669$ ч, $\sigma_1 = 176489$ ч, $Q(8760) = 9{,}66 \cdot 10^{-3}$. Сравнивая найденное значение с нормируемым $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$ можно сделать вывод, что в данном примере пожарная безопасность сети не обеспечивается.

Функция вероятности безотказной работы $R(t)$ приведена на рис.1 Кривая 1 построена с помощью формулы (14), а кривая 2 с помощью формулы (23).

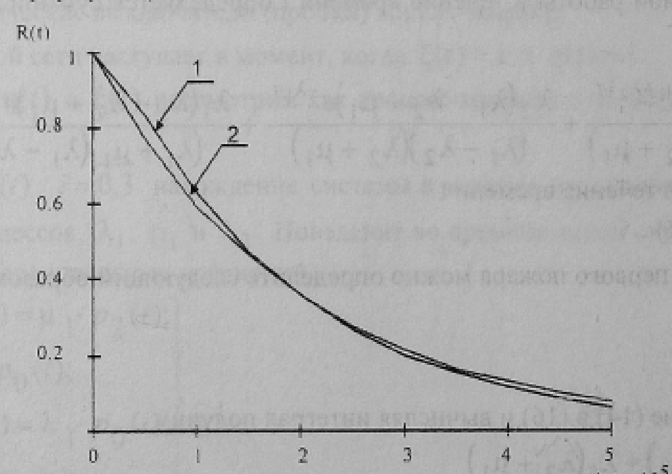

Рисунок 1

Вероятности нахождения системы в каждом из возможных состояний $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$ приведены на рис. 2 и рис. 3, кривая 1 получена с помощью формулы (7), кривая 2 – (8), кривая 3 – (12) и кривая 4 – (13) для $t = (1 \div 5) \cdot 10^5$ ч.

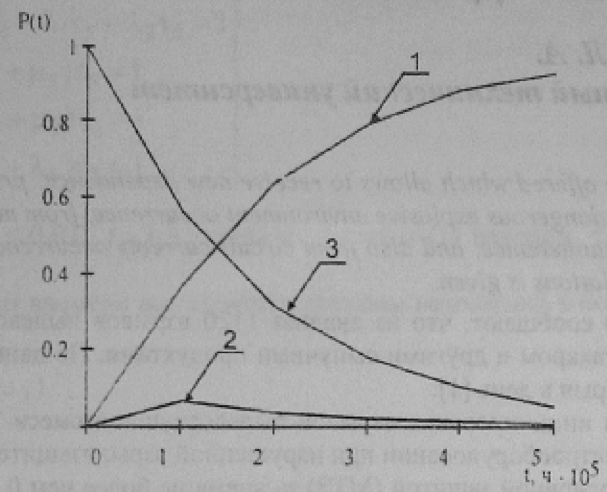

Рисунок 2

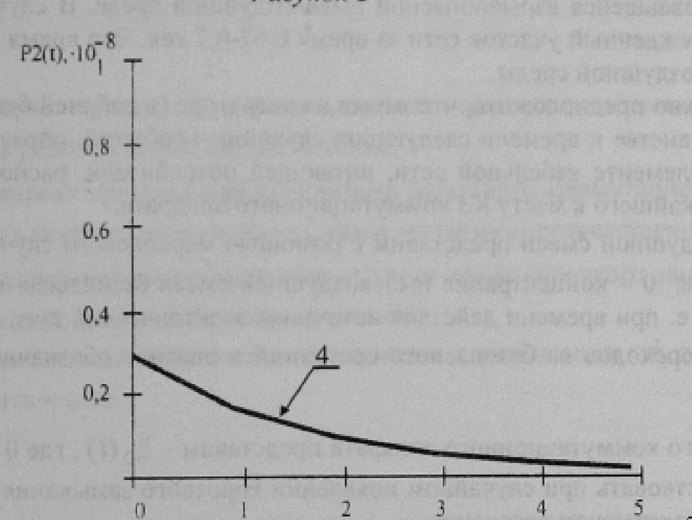

Рисунок 3

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Забиров. Пожарная опасность коротких замыканий. – М.: Стройиздат, 1980. – 137 с.
2. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: 1965. – 524 с.
3. Креденцер Б. П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.
4. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. Издательство стандартов. – 72 с.