

Оценка пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ в промышленных электрифицированных помещениях

Ковалев А. П., доктор техн. наук, Соленая О. Я., аспирант

Донецкий национальный технический университет

На основе марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем предложена математическая модель процесса формирования возгораний пожароопасной среды в помещении (цехе) с учетом частоты появления повреждений в сети 0,4/0,22 кВ и надежности средств защиты. Дан пример расчета.

Ключевые слова: изоляция проводника, КЗ, марковский процесс, силовое контактное соединение, пожарная безопасность.

В соответствии с нормативным документом [1] вероятность пожаров в узле нагрузки $Q(1)$ в течение года не должна превышать $1 \cdot 10^{-6}$. При оценке пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ под системой “источник — защита — среда” будем понимать совокупность процессов, связанных с изменением в пространстве и времени состояния электрической проводки помещения, средств ее защиты и окружающей их пожароопасной среды. При этом всю сеть данного помещения (от потребителей до вводного защитного коммутационного аппарата) будем рассматривать как один узел нагрузки, любое КЗ в элементе которого вызывает срабатывание токовой защиты вводного автоматического выключателя.

Введем еще ряд понятий, касающихся некоторых терминов:

отказ электрической проводки, находящейся под напряжением, — событие в электрической сети, которое может приводить к КЗ, перегрузкам, утечкам тока на землю либо к опасному нагреву силовых контактных соединений (СКС);

опасный нагрев изоляции проводника токами КЗ или перегрузки — событие, когда она (или горячая пыль, которая может образоваться в течение времени на ее поверхности) воспламеняется либо размягчается, начинает растекаться, и в случае попадания капель горячей массы на поверхность горючих материалов (ветоши, опилок дерева и т.д.) происходит их возгорание;

опасный нагрев СКС, находящихся под напряжением, — нагрев при температуре, которая обуславливает расплавление или возгорание изоляции проводников.

При нахождении в непосредственной близости от нагретого СКС горючего материала последний может воспламениться. То же происходит при случайном попадании на по-

верхность этого материала расплавленных капель изоляции проводника.

Предполагается, что при КЗ в узле нагрузки и отказе в срабатывании ближайшего к месту КЗ защитного коммутационного аппарата, через который протекал сквозной аварийный ток, резервная защита отключит поврежденный узел нагрузки с выдержкой времени 0,5 с. Однако если вблизи места КЗ присутствует горючий материал, за время отключения поврежденного проводника может произойти поджигание данного материала расплавленными частицами металла, что подтверждено экспериментально.

Под системой обеспечения пожарной безопасности электрической проводки будем понимать комплекс защитных устройств, реагирующих на случайное появление таких событий как КЗ, перегрузка, утечка тока на землю или опасно искрящие СКС. Сигнал от указанных защитных устройств поступает в систему отключения автоматического выключателя.

Предположим, что возгорание горючего материала в помещении вследствие повреждения электрической проводки происходит при совпадении в пространстве и времени следующих трех процессов: повреждения изоляции электрической проводки, которая находится под напряжением; отказа в срабатывании системы обеспечения пожарной безопасности; появления горючего материала вблизи места возможной неисправности электрической проводки.

Представим изменение состояния электрической проводки в помещении с течением времени в виде однородного марковского процесса $\alpha(t)$ с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем. Примем за 0 состояние сети, при котором не наблюдаются повреждения ее изоляции, а за 1 — длительность существования состояния сети

после повреждения изоляции проводников электрической проводки помещения (время срабатывания коммутационного аппарата либо время отгорания проводника). Обозначим через λ_1 и μ_1 параметры процесса $\alpha(t)$, характеризующие интенсивность либо скорость изменения состояния сети (соответственно частоты переходов из состояния 0 в состояние 1, и наоборот).

Изменение состояния системы обеспечения пожарной безопасности представим однородным марковским случайным процессом $\beta(t)$ с непрерывным временем и двумя дискретными состояниями: 0 — работоспособное состояние (“ждущий режим”) и 1 — поврежденное состояние (выявляется только в результате диагностики). Параметры процесса $\beta(t)$: λ_2 — скорость замены работоспособных промежутков времени (рабочего состояния системы) на неработоспособные; μ_2 — скорость замены неработоспособных промежутков времени, в течение которых система обеспечения пожарной безопасности находилась в отказавшем состоянии, на работоспособные. Диагностика системы обеспечения пожарной безопасности проводится через каждые Θ_2 года.

Наличие или отсутствие горючего материала в непосредственной близости от места случайного повреждения изоляции проводников электрической проводки помещения представим аналогичным однородным марковским процессом $\xi(t)$ с двумя дискретными состояниями: 0 или 1 — соответственно отсутствует или имеется горючий материал (пыль, бумага, жидкие легковоспламеняющиеся материалы и др.). Наличие горючего материала вблизи места прокладки проводников электрической сети или ее потребителей выявляется и устраняется в результате проведения профилактических проверок с интервалом времени Θ_3 .

Возгорание горючего материала в помещении может произойти в момент совпадения в пространстве и времени трех случайных процессов: $\alpha(t)$, $\beta(t)$ и $\xi(t)$ в состоянии 1, т. е. когда $\alpha(t) = 1$, $\beta(t) = 1$ и $\xi(t) = 1$. Предположим, что в начальный момент времени $\alpha(t) = 0$, $\beta(t) = 0$ и $\xi(t) = 0$, а параметры процессов $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\xi(t)$ и их характеристики λ_1 , μ_1 , λ_2 , μ_2 , λ_3 , μ_3 известны. Требуется определить вероятность возгорания горючего материала в помещении в течение времени t — $F(t)$, среднее время τ_1 и стандарт σ_1 до первого возгорания горючего материала в помещении.

Совокупность процессов $\alpha(t)$, $\beta(t)$ и $\xi(t)$ рассмотрим как один регулярный однородный марковский процесс $\alpha(t)$ с восемью дискретными состояниями и непрерывным временем. В любой момент времени процесс $\alpha(t)$ может находиться в одном из восьми возможных дискретных состояний: $e_1(0,0,0)$; $e_2(1,0,0)$; $e_3(0,1,0)$; $e_4(0,0,1)$; $e_5(1,0,1)$; $e_6(0,1,1)$; $e_7(1,1,0)$; $e_8(1,1,1)$.

Состояние $e_8(1,1,1)$ — поглощающее, попав в которое система “источник — защита — среда” выйти из него не может [2]. В этом состоянии происходит возгорание горючего материала. Если в начальный момент времени система “источник — защита — среда” находилась в состоянии $e_1(0,0,0)$, среднее время до возгорания горючего материала τ_1 и стандарт σ_1 находим из следующих систем алгебраических уравнений, записанных в матричном виде [3]:

$$\tau = \underline{N}\xi; \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{(2\underline{N}-1)\tau - \tau_{sq}}, \quad (2)$$

где $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_7)$, $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_7)$, $\tau_{sq} = (\tau_1^2, \tau_2^2, \dots, \tau_7^2)$ — векторы-столбцы; $\xi = (1, 1, \dots, 1)$ — вектор-столбец, все элементы которого состоят из единиц; $\underline{N} = (1 - \underline{Q})^{-1}$ — фундаментальная матрица.

Матрица \underline{Q} в данном случае имеет следующий вид:

$$\underline{Q} = \begin{pmatrix} c_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & c_2 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & c_3 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 \\ \mu_3 & 0 & 0 & c_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & c_6 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & c_7 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $c_1 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$; $c_2 = 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$; $c_3 = 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$; $c_4 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)$; $c_5 = 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \mu_3)$; $c_6 = 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3)$; $c_7 = 1 - (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3)$.

Вероятность нахождения системы “источник — защита — среда” в течение времени t в каждом из состояний $e_1(0,0,0)$, $e_2(1,0,0)$, ..., $e_7(1,1,0)$ определяется из системы линейных дифференциальных уравнений, записанных в матричной форме:

$$\dot{P}(t) = P(t)\underline{A}, \quad (4)$$

где $\dot{P}(t) = [\dot{P}_1(t), \dot{P}_2(t), \dots, \dot{P}_7(t)]$ и $P(t) = [P_1(t), P_2(t), \dots, P_7(t)]$ — векторы-строки; $\underline{A} = (\underline{Q} - \underline{1})$ — матрица, которая представляет собой разницу между матрицей \underline{Q} и единичной.

Данная система уравнений решается при следующих начальных условиях: $P_1(0) = 1$; $P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = P_7(0) = 0$.

Если работоспособность системы обеспечения пожарной безопасности проверяют через интервал времени Θ_2 , а наличие горючего материала вблизи прокладки электрической проводки контролируют каждые Θ_3 года (предполагаем, что проверки абсолютно надежны), то параметр μ_i ($i = 2, 3$) находят следующим образом [4]:

$$\mu_i = \frac{1}{\Theta_j - \frac{1}{\lambda_i}(1 - e^{-\lambda_i \Theta_j})}. \quad (5)$$

В случае, если выполняются условия: $\lambda_1 \leq 100\mu_1$; $\lambda_2 \leq 100\mu_2$; $\lambda_3 \leq 100\mu_3$; $\lambda_2 \Theta_2 < 0,1$; $\lambda_3 \Theta_3 < 0,1$; $\mu_2 \ll \mu_1$; $\mu_3 \ll \mu_1$, то, используя формулу (5), систему уравнений (1) и матрицу (3), определяют:

$$\tau_1 \approx \frac{1}{0,25\lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \Theta_2^2 \Theta_3^2}. \quad (6)$$

Точные значения τ_1 и σ_1 вычисляют, решив системы алгебраических уравнений (1) и (2).

Если

$$\tau_1 \approx \sigma_1, \quad (7)$$

вероятность возгорания горючего материала в помещении можно оценить по формуле

$$F(t) \approx 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}. \quad (8)$$

В случае невыполнения условия (7) вероятность возгорания горючего материала в помещении определяют из выражения

$$F(t) = 1 - \sum_{i=1}^7 P_i(t), \quad (9)$$

где $P_i(t)$ находят путем решения системы линейных дифференциальных уравнений (4).

Приведенные системы уравнений (1), (2), (4) и формулы (5)–(9) позволяют оценить пожарную безопасность любого электрифицированного помещения.

Пример. По плану [NMt] [5] в течение $t = 5$ лет под наблюдением находилось 20 складских электрифицированных помещений

одного из металлургических заводов, т. е. число узлов нагрузки (N_1) равнялось 20. За указанное время в электрической проводке было зафиксировано 12 (n_1) случаев КЗ. Из 20 (N_2) автоматических выключателей из строя вышло 5 (n_2) вследствие отказов в системе их отключения.

Неработоспособное состояние системы отключения автоматического выключателя, установленного на вводе в каждое помещение, выявлялось в результате диагностической проверки. Работоспособность средств защиты проверялась с интервалом времени $\Theta_2 = 1$ году. Во внимание принималась абсолютная надежность диагностики системы отключения автоматического выключателя, при которой отказы в системе его отключения непременно обнаруживаются и устраняются либо он заменяется новым аппаратом.

Проверка наличия горючего материала (пыли, бумаги, опилок и т. д.) вблизи возможного появления источников инициирования возгорания проводилась с интервалом времени $\Theta_3 = 0,082$ года. В результате в 20 (N_3) помещениях было выявлено 58 (n_3) случаев наличия горючего материала вблизи мест возможного возникновения токов КЗ.

Среднее время срабатывания автоматического выключателя d_1 при КЗ в зоне действия его токовой защиты принималось равным 0,2 с.

Необходимо определить вероятность возгорания горючего материала в помещении склада в течение года:

а) вследствие случайного возникновения КЗ в электрической проводке.

Используя исходные данные, находим:

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{N_1 t} = \frac{12}{20 \cdot 5} = 0,12 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_2 = \frac{n_2}{N_2 t} = \frac{5}{20 \cdot 5} = 0,05 \text{ год}^{-1},$$

$$\lambda_3 = \frac{n_3}{N_3 t} = \frac{58}{20 \cdot 5} = 0,58 \text{ год}^{-1};$$

$$\mu_1 = \frac{1}{d_1} = \frac{60 \cdot 60 \cdot 8760}{0,2} = 1,58 \cdot 10^8 \text{ год}^{-1}.$$

На основе формулы (5) при $\Theta_2 = 1$ году и $\Theta_3 = 0,082$ года получаем:

$$\begin{aligned}\mu_2 &= \frac{1}{\Theta_2 - \frac{1}{\lambda_2}(1 - e^{-\lambda_2 \Theta_2})} = \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1}{0,05}(1 - e^{-0,05 \cdot 1})} = 40,7 \text{ год}^{-1};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_3 &= \frac{1}{\Theta_3 - \frac{1}{\lambda_3}(1 - e^{-\lambda_3 \Theta_3})} = \\ &= \frac{1}{0,082 - \frac{1}{0,58}(1 - e^{-0,58 \cdot 0,082})} = 5,2 \cdot 10^2 \text{ год}^{-1}.\end{aligned}$$

Основываясь на системе уравнений (4), матрице (3), формуле (9), исходных данных и используя математическое программное обеспечение, определяем:

$$F(1) = 1,6 \cdot 10^{-7}.$$

Аналогичный результат для этого случая можно получить, используя приближенную формулу (8).

Из систем алгебраических уравнений (1) и (2) с помощью математического программного обеспечения находим:

$$\tau_1 = 1,69 \cdot 10^7 \text{ год};$$

$$\sigma_1 = 1,69 \cdot 10^7 \text{ год}.$$

Поскольку условие (7) соблюдается, то в этом случае вероятность возгорания горючего материала, вычисленная с помощью формулы (8) и исходных данных,

$$F_1(1) = 1,6 \cdot 10^{-7};$$

б) при отсутствии контроля наличия горючего материала вблизи возможного появления КЗ в электропроводке ($\mu_3 \rightarrow 0$).

Используя систему уравнений (4), формулу (8), исходные данные примера, ПК и математическое программное обеспечение, получаем:

$$F_2(1) = 1,4 \cdot 10^{-4};$$

в) при отсутствии в процессе эксплуатации диагностирования защиты автоматического выключателя ($\mu_2 \rightarrow 0$) и контроля окружающей пожароопасной среды помещения ($\mu_3 \rightarrow 0$).

Применив систему линейных дифференциальных уравнений (4), формулу (9) и ма-

тематическое программное обеспечение, находим:

$$F_3(1) = 1,2 \cdot 10^{-2}.$$

На основе полученных в течение 5 лет результатов наблюдения за 20 складскими помещениями сделаны следующие выводы:

1) проверять работоспособность вводного автоматического выключателя, правильность его выбора и установки следует через 1 год, а выявлять наличие горючего материала вблизи возможного возникновения токов КЗ в электрической проводке — каждые 2 мес. В таком случае пожарная безопасность узла нагрузки (складских помещений) будет находиться на уровне $Q(1) \leq 1 \cdot 10^{-6}$, установленном в действующих нормативных документах;

2) при отсутствии контроля наличия горючего материала вблизи мест возможного появления токов КЗ ($\mu_3 \rightarrow 0$) опасность его возгорания в электрифицированном помещении увеличивается в 875 раз. Если же не контролируются работоспособность защитного коммутационного аппарата ($\mu_2 \rightarrow 0$) и наличие опасной в отношении пожара среды ($\mu_3 \rightarrow 0$), то опасность возгорания оказывается еще в 86 раз выше;

3) используя приведенную в статье методику, можно оценить пожарную безопасность любого электрифицированного помещения и для обеспечения ее соответствия действующим нормативным документам выбрать оптимальные с этой точки зрения сроки диагностики средств защиты Θ_2 и контроля помещения Θ_3 .

Список литературы

1. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов, 1991.
2. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. — М.: Советское радио, 1977.
3. Ковалев А. П. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов. — Электричество, 1991, № 8.
4. Ковалев А. П., Шевченко А. В., Белоусенко И. В. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6 кВ. — Промышленная энергетика, 1991, № 6.
5. Гук Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

oksana_solenaya@i.ua