

УДК 628.440.22

С.В. СОЛЕНЬЙ, А.П. КОВАЛЁВ (д-р техн.наук, проф.)
 Донецкий национальный технический университет
 ssv555ssv@yandex.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВА ИСКРОЗАЩИТЫ НА ПОЖАРНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ КВАРТИРНОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

В данной статье оценивается статистический уровень пожарной опасности квартирных сетей Украины и выявляется влияние надежности системы отключения искрозащиты и сроков ее диагностики на пожарную безопасность узлов нагрузки.

Актуальность. По данным ГУ МЧС Украины, за последние 10 лет произошло 523833 пожаров [1], из них до 43,7 % от экзогенных источников. Т.е. 228915 пожаров, из которых около 90% происходит от появления в сети квартир ослабленных, искрящихся силовых разборных контактных соединений, что составило $n = 206023$ пожаров за 10 лет. Поэтому работы, связанные с прогнозированием и разработкой организационных и технических мероприятий по предотвращению пожаров в квартирах от ослабленных силовых контактных соединений, являются весьма актуальной задачей.

Состояние вопроса. На сегодняшний день существующие автоматические выключатели и устройства защитного отключения (УЗО), применяемые в квартирных сетях, не реагируют на появление ослабленных, искрящихся силовых контактных соединений, что приводит к выгоранию изоляции проводников, а это, в свою очередь, приводит к пожарам в квартирах. В работе [2] предложены технические решения с помощью которых возможно автоматическое отключение ослабленных, искрящихся силовых контактных соединений. Проверочные испытания устройства [2] выявили ряд существенных недостатков:

- применяемый в нем преобразователь спектра высокочастотных электромагнитных колебаний представляет собой трансформатор тока, выполненный с воздушным зазором магнитопровода, а так как в качестве материала магнитопровода применяются ферриты (твердый, хрупкий материал, по механическим свойствам подобен керамике), его изготовление становится непростой производственной задачей, ведущей к увеличению себестоимости и цены устройства;

- вторичная обмотка трансформатора тока подключается на прямую к токовому реле (исполнительный орган). Таким образом, чувствительность всего устройства зависит от тока срабатывания данного реле, и все высокочастотные колебания тока, инициированные искрением ненадежных контактов или электрической дугой через переходное сопротивление, не достигшие тока срабатывания реле, не будут восприниматься устройством;

- при использовании устройства в электрических сетях промышленно-бытового сектора также используют регуляторы напряжения для регулировки интенсивности освещения, регулировки мощности электрических систем. Работа регуляторов напряжения построена на использовании тиристоров или симисторов, которые при работе искажают синусоиды тока и напряжения, и дают в питающую сеть высокочастотные помехи, которые защита воспринимает как искрение ослабленного контактного соединения и ложно срабатывает;

- при включении или отключении питания нагрузок при помощи выключателей и автоматов возникает переходной процесс, сопровождающийся выбросом высокочастотных колебаний в сеть, что также приводит к ложному срабатыванию защиты.

Эти недостатки были устранены в устройстве (рис. 1.), предложенном в [3].

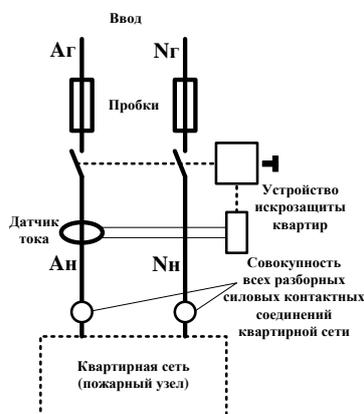


Рисунок 1 – Устройство искрозащиты квартир

Цель работы. Оценить статистический уровень пожарной безопасности квартирных сетей Украины. Выявить влияние надежности системы отключения искрозащиты и сроков ее диагностики на пожарную опасность узлов нагрузки.

Результаты исследований. Под пожарным узлом будем понимать совокупность всех контактных соединений в системе электроснабжения квартиры.

Ежегодно в среднем под контролем в Украине находятся 19183000 пожароопасных узлов (квартир).

Вероятность возникновения пожаров в год от пожароопасного узла не должна превышать величину $Q(t) = 1 \cdot 10^{-6}$, где $t = 1$ год [4].

Известно, что интервалы времени между пожарами в Украине не противоречат экспоненциальной функции распределения вероятностей [5]. Тогда частоту пожаров в год в квартире от ослабленных, искрящихся разборных контактных соединений можно определить следующим образом:

$$\lambda_1 = \frac{n}{N \cdot t}, \quad (1)$$

где $n = 50578$ – среднее число пожаров за год в квартирах по причине возникновения искрящегося, ослабленного силового разборного контактного соединения;

$N = 19183000$ – среднее число пожароопасных узлов в Украине (число квартир);

$t = 1$ год.

Вероятность возникновения пожаров в год:

$$Q^*(1) = 1 - e^{-\lambda_1 \cdot t}, \quad (2)$$

т.е. $Q^*(1) = 7.12 \cdot 10^{-4}$, что в 712 раз выше нормируемой величины $Q(t) = 1 \cdot 10^{-6}$.

Предположим, что возгорание изоляции проводников происходит всякий раз, когда совпадут в пространстве и времени следующие случайные события: появился ослабленный, искрящийся силовой контакт в сети напряжением до 1 кВ квартиры; отказало в срабатывании устройство искрозащиты.

Изменение состояния во времени контактного соединения представим в виде однородного марковского случайного процесса $\xi(t)$ [6] с двумя состояниями: 0 – в защищаемой сети нет ослабленных и опасно искрящихся разборных контактов; 1 – появился ослабленный и опасно искрящийся силовой контакт.

Величины λ_1 и μ_1 являются параметрами процесса $\xi(t)$.

Аналогичным однородным марковским процессом $\eta(t)$ представим изменение во времени состояния защиты: 0 – искрозащита находится в работоспособном состоянии; 1 – искрозащита находится в отказавшем состоянии. Параметры процесса $\eta(t)$ следующие: λ_2 и μ_2 .

Совокупность процессов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ рассмотрим как однородный процесс маркова с 4 дискретными состояниями и непрерывным временем.

Следовательно, система «контактное соединение – искрозащита» может находиться в одном из конечного множества состояний:

$e_1(0,0)$ – в защищаемой сети нет ослабленных силовых разборных искрящихся контактных соединений, устройство искрозащиты находится в работоспособном состоянии;

$e_2(1,0)$ – в защищаемой сети появился ослабленный и искрящийся силовой контакт, устройство искрозащиты находится в работоспособном состоянии;

$e_3(0,1)$ – в защищаемой сети нет ослабленных силовых разборных контактных соединений, устройство искрозащиты находится в отказавшем состоянии;

$e_4(1,1)$ – в защищаемой сети появился ослабленный разборной искрящийся силовой контакт, искрозащита находится в отказавшем состоянии.

При случайном попадании системы в состояние $e_4(1,1)$ происходит возгорание изоляции проводников квартирной электрической сети, что нередко приводит к пожарам в квартирах.

Вероятность возгорания изоляции проводника в течение времени t можно определить следующим образом:

$$Q(t) = 1 - [P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)], \quad (3)$$

где

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot P_1(t) + \mu_1 \cdot P_2(t) + \mu_2 \cdot P_3(t) \\ \dot{P}_2(t) = \lambda_1 \cdot P_1(t) - (\mu_1 + \lambda_2) \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_1(t) \\ \dot{P}_3(t) = \lambda_2 \cdot P_1(t) - (\lambda_1 + \mu_2) \cdot P_3(t) \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) решается при начальных условиях:

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = 0, \quad (5)$$

где

$$\lambda_1 = \frac{1}{\bar{g}_1}; \mu_1 = \frac{1}{g_1}; \lambda_2 = \frac{1}{\bar{g}_2}; \mu_2 = \frac{1}{g_2},$$

где \bar{g}_1 – средний интервал времени между появлением ослабленного, искрящегося разборного контактного соединения;

g_1 – средняя длительность нахождения силового контактного соединения в опасном состоянии (дугообразование между контактами соединения);

\bar{g}_2 – средний интервал времени между выходами из строя системы отключения искрозащиты;

g_2 – средняя длительность нахождения системы отключения искрозащиты в необнаруженном отказавшем состоянии.

Из системы уравнений (4) известными методами [6] находим $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$ и, подставив их значения в формулу (3), находим вероятность возгорания изоляции проводника квартирной электрической сети:

$$Q(t) = 1 - \frac{G(S_1)}{Z'(S_1)} \cdot e^{S_1 \cdot t} + \frac{G(S_2)}{Z'(S_2)} \cdot e^{S_2 \cdot t} + \frac{G(S_3)}{Z'(S_3)} \cdot e^{S_3 \cdot t}, \quad (6)$$

где

$$G(S) = S^2 + aS + b_1 = 0, \quad (7)$$

$$Z(S) = S^3 + aS^2 + bS + C = 0, \quad (8)$$

Корни S_1 , S_2 и S_3 находятся из решения кубического уравнения (8) известными способами.

$$S^3 + aS^2 + bS + C = 0,$$

где

$$a = 2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2;$$

$$b = \lambda_1\lambda_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1);$$

$$c = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2); \quad b_1 = 2\lambda_1\lambda_2 + b.$$

Подставляя найденные из уравнения (8) корни находим:

$$Z'(S_1) = 3S_1^2 + 2aS_1 + b;$$

$$Z'(S_2) = 3S_2^2 + 2aS_2 + b;$$

$$Z'(S_3) = 3S_3^2 + 2aS_3 + b.$$

Подставим значения $Z'(S_1)$, $Z'(S_2)$, $Z'(S_3)$ и $G(S_1)$, $G(S_2)$, $G(S_3)$ в формулу (6) находим вероятность возгорания изоляции проводника в течении времени t .

Если задан интервал времени между диагностиками системы отключения искрозащиты Θ_2 , тогда μ_2 можно найти пользуясь формулой [7].

$$\mu_2 = \frac{1}{\Theta_2 - \frac{1}{\lambda_2} [1 - e^{-\lambda_2 \Theta_2}]}. \quad (9)$$

$$\text{В том случае если } \lambda_2 \Theta_2 < 0,1 \text{ тогда } \mu_2 = \frac{2}{\lambda_2 \Theta_2^2}. \quad (10)$$

Среднее время до первого возгорания изоляции проводника, если в начальный момент времени система находилась в одном из состояний: $e_1(0,0)$; $e_2(1,0)$ или $e_3(0,1)$ можно определить из системы линейных алгебраических уравнений записанной в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)} \begin{bmatrix} (\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_2(\mu_1 + \lambda_2) \\ \mu_1(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2) & \lambda_2\mu_1 \\ \lambda_2(\mu_1 + \lambda_2) & \lambda_2\mu_2 & \lambda_2(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Из системы (11) находим:

$$\tau_1 = \frac{(\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)}; \quad (12)$$

$$\tau_2 = \frac{\mu_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2) + \lambda_2\mu_1}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \mu_1)}; \quad (13)$$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_2(\mu_1 + \lambda_2) + \lambda_2\mu_2 + \lambda_2(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}, \quad (14)$$

где τ_1 – среднее время до первого возгорания изоляции проводника, если система в начальный момент времени находилась в состоянии $e_1(0,0)$;

τ_2 – среднее время до первого возгорания изоляции проводника, если система в начальный момент времени находилась в состоянии $e_2(1,0)$;

τ_3 – среднее время до первого возгорания изоляции проводника, если система в начальный момент времени находилась в состоянии $e_3(0,1)$.

Дисперсию времени до первого возгорания изоляции проводника, если система находилась в одном из состояний $e_1(0,0)$, $e_2(1,0)$ или $e_3(0,1)$, можно найти из решения следующей алгебраической системы уравнений записанной в математической форме:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \sigma_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tau_1^2 \\ \tau_2^2 \\ \tau_3^2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{(\mu_1 + \mu_2)(\lambda_1 + \mu_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; & a_{12} &= \frac{\lambda_1(\lambda_1 + \mu_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; & a_{13} &= \frac{\lambda_2(\mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; \\ a_{21} &= \frac{\mu_1(\lambda_1 + \mu_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; & a_{22} &= \frac{\lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; & a_{23} &= \frac{\lambda_2\mu_1}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; \\ a_{31} &= \frac{\lambda_2(\mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; & a_{32} &= \frac{\lambda_2\mu_2}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; & a_{33} &= \frac{\lambda_2(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Из системы уравнений (15) находим:

$$\sigma_1^2 = (2a_{11} - 1)\tau_1 + 2a_{12}\tau_2 + 2a_{13}\tau_3 - \tau_1^2; \quad (17)$$

$$\sigma_2^2 = 2a_{21}\tau_1 + (2a_{22} - 1)\tau_2 + 2a_{23}\tau_3 - \tau_2^2; \quad (18)$$

$$\sigma_3^2 = 2a_{31}\tau_1 + 2a_{32}\tau_2 + (2a_{33} - 1)\tau_3 - \tau_3^2, \quad (19)$$

где σ_1^2 – дисперсия времени до первого возгорания изоляции проводника, если система находилась в состоянии $e_1(0,0)$;

σ_2^2 – дисперсия времени до первого возгорания изоляции проводника, если система находилась в состоянии $e_2(1,0)$;

σ_3^2 – дисперсия времени до первого возгорания изоляции проводника, если система находилась в состоянии $e_3(0,1)$.

Формулы (6), (12-14) и (17-19) полностью характеризуют пожаробезопасный узел (квартирную сеть). В том случае, если в результате расчетов получим, что: $\tau_1 \approx \sigma_1$, $\tau_2 \approx \sigma_2$ и $\tau_3 \approx \sigma_3$ тогда вероятность возгорания изоляции проводника можно определить следующим образом:

$$Q_i(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (20)$$

где $i = 1, 2, 3$.

Пример. Дано: $\lambda_1 = 7.12 \cdot 10^{-4}$ 1/год, $\lambda_2 = 0.2$ 1/год, $\mu_1 = 1.576 \cdot 10^8$ 1/год, $\mu_2 = 1.425 \cdot 10^3$ 1/год. Определить вероятность возгорания изоляции проводника из-за появления ослабленного и искрящегося разборного контактного соединения в электрической сети квартиры в течении года $Q(1)$, среднее время до первого возгорания изоляции проводника τ_1 и дисперсию σ_1^2 при условии, что в начальный момент времени система находилась в состоянии $e_1(0,0)$.

Решение. Среднее время τ_1 до первого возгорания изоляции проводника находим пользуясь формулой (12), а дисперсию σ_1^2 по формуле (17), т.е. $\tau_1 = 1.0008215 \cdot 10^7$ лет и $\sigma_1 = 1.00083 \cdot 10^7$ лет. Поскольку получили, что $\tau_1 \approx \sigma_1$, вероятность возгорания изоляции проводника можно найти пользуясь приближенной формулой (20), т.е. $Q_1(1) = 0.99918 \cdot 10^{-6}$. В нашем случае значение $Q_1(1)$ по приближенной формуле совпадает со значением $Q(1)$, полученной по точной формуле (6), т.е. $Q(1) = 0.98245 \cdot 10^{-6}$.

Выводы. Полученные в работе формулы (6), (12-14), (17-20) позволяют оценить пожарную безопасность квартиры при появлении в ее электрической сети ослабленного и опасно искрящегося контактного соединения.

Применение в квартирных электрических сетях искрозащиты с параметрами $\lambda \leq 0.2$ 1/год и $\Theta_2 = 0.084$ год позволит почти полностью обеспечить пожарную безопасность электрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт ГУ МЧС Украины: <http://www.mns.gov.ua>
2. Устройство для защитного отключения электрических сетей: патент № 2172050 Россия / Васин А.А., Нагорный М.А., Белоусенко И.В., Ершов М.С., Дубровский Д.И., Кавицкий С.И., Ковалев А.П., Муха В.П., Шевченко О.А. - Приоритет от 21.01.2000; опубл. 10.08.2001, Бюл. № 22. – 8 с.
3. Пристрій для захисного відключення електричної мережі: патент на Корисну модель № 48914 UA / Сольоний С.В., Ковальов О.П., Демченко Г.В., Нагорний М.О.- зареєстрований 12.04.2010, Бюл. № 7.
4. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – М: Издательство стандартов, 1976. – 32 с.
5. Шевченко О.А. Прогнозирование и предотвращение опасности возгорания в электрических сетях промышленных и бытовых объектов : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : спец. 05.26.01 «Охрана труда» / О.А. Шевченко. – Донецк, 2003. – 20 с.
6. Вопросы математической теории надежности / Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов и др. Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
7. Ковалев А.П. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6 кВ / А.П. Ковалев, А.В. Шевченко, И.В. Белоусенко // Промышленная энергетика. – 1991. – № 6 – С. 28-31.

Надійшла до редколегії 30.11.2010

Рецензент: Ю.Л.Сасенко

С.В. СОЛЬОНИЙ, О.П. КОВАЛЬОВ
Донецький національний технічний університет

S. SOLYONIY, O. KOVALYOV
Donetsk National Technical University

Оцінка впливу надійності пристрою іскрозахисту на пожежну безпеку квартирної мережі напругою до 1 кВ. У даній статті оцінюється статистичний рівень пожежної небезпеки квартирних мереж України та виявляється вплив надійності системи відключення іскрозахисту й строків її діагностики на пожежну безпеку вузлів навантаження.

Estimation of the Influence of Reliability of Sparks Protection Devices in Fire Safety of Room Network up to 1 kV. In the given article the statistical level of fire danger of room networks of Ukraine is estimated and the influence of reliability of system of switching-off sparks and terms of its diagnostics on fire safety of units of loading is considered.