

УДК 621.316.54

Александр Петрович Ковалёв, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: abrecap@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-46

Виктория Викторовна Якимишина, канд. техн. наук, доцент; e-mail: yvsm@list.ru

Ольга Андреевна Сапоненко, магистрант; e-mail: saponenko.olga.andreevna@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-06

НАДЕЖНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Цель. Определить влияние интервала времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения фидерного защитного коммутационного аппарата на обеспечение надежности узла нагрузки промышленного предприятия.

Методы. Моделирование надежности защитного коммутационного аппарата в динамическом режиме с использованием марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем.

Результаты. Для конкретного узла нагрузки промышленного предприятия установлено, что если контролировать работоспособность системы автоматического отключения фидерного защитного коммутационного аппарата два раза в год вместо одного, то количество аварийных отключений секции шин трансформаторной подстанции снизится в 3,1 раза.

Научная новизна. Получена аналитическая зависимость вероятности безотказной работы в течение времени действия защитного коммутационного аппарата, который может находиться в трех состояниях с учетом диагностики его автоматической системы отключения.

Практическая значимость. Полученные аналитические зависимости позволяют оценить и обосновать эффективность разработанных рекомендаций по изменению сроков диагностики автоматической системы отключения защитных коммутационных аппаратов, эксплуатирующихся в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: надежность; защитный коммутационный аппарат; обрыв цепи; отказ в срабатывании; случайный процесс; релейная защита; диагностика.

Постановка проблемы. Наиболее опасен для систем электроснабжения и потребителей электрической энергии на промышленных предприятиях динамический режим, так как крупные аварии на предприятиях происходят тогда, когда случайным образом появляется короткое замыкание (КЗ) в защищаемом элементе сети, а автоматическая система отключения ближайшего к месту повреждения защитного коммутационного аппарата, через который прошел сквозной аварийный ток, оказалась в поврежденном состоянии. Между проводниками различных фаз появляется жидкая перемычка, образованная из расплавленного металла проводников, и под воздействием динамических процессов в сети происходит электрический взрыв. Это приводит к выбросу из зоны дугового разряда нагретых металлических частиц, которые способствуют возгоранию расположенной рядом пожароопасной среды [1]. Поэтому проблема, связанная с оценкой влияния

диагностики системы автоматического автоматического отключения фидерного защитного коммутационного аппарата на обеспечение надежности узла нагрузки промышленного предприятия, весьма актуальна.

Состояние вопроса. Автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата – это последовательная цепь от клемм трансформатора тока до силовых контактов выключателя, в том числе релейной защиты, катушки отключения и привода выключателя.

Отказы защитных коммутационных аппаратов типа «обрыв цепи» приводят к аварийным отключениям потребителей электрической энергии и расстраивают технологический процесс.

Отключаемые КЗ и замыкания на землю в сети ложные, излишние срабатывания релейной защиты, ошибки обслуживающего и эксплуатирующего персонала, при которых происходит аварийное отключение защитного коммутационного аппарата автоматически или с помощью оперативного персонала – будем относить к отказам «обрыв цепи».

К отказам в срабатывании защитного коммутационного аппарата будем относить такие повреждения (КЗ в элементе сети в зоне действия ее релейной защиты), при которых через него проходит сквозной аварийный ток, а автоматическая система отключения не срабатывает.

Предположим, что система отключения защитного коммутационного аппарата может выходить из строя только тогда, когда она находится в режиме ожидания [2]. Если к моменту возникновения повреждения в сети, на которое должна реагировать релейная защита, автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата находилась в исправном состоянии, то маловероятен ее выход из строя в режиме «тревоги».

Например, при КЗ в линии L_1 узла нагрузки промышленного предприятия (рис. 1) произойдет отключение поврежденной линии с помощью релейной защиты коммутационного аппарата 1, что приведет к обесточиванию потребителя электрической энергии, в результате этого прерывается рабочий цикл технологической установки.

Если при КЗ в линии L_1 откажет в срабатывании автоматическая система отключения коммутационного аппарата 1, то поврежденную линию с выдержкой времени отключит релейную защиту вводного коммутационного аппарата 10. Автоматический ввод резерва на секционном коммутационном аппарате 9 в этом случае не срабатывает. Это приведет к обесточиванию не только потребителя электрической энергии, который получает ее по линии L_1 , но и всех потребителей секции 10 кВ. Такое событие расстроит технологический процесс на предприятии с вытекающими из этого нежелательными последствиями.

Известные научные публикации не дают исчерпывающих ответов на вопрос, каким образом и в какой степени диагностика автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата влияет на обеспечение надежности узлов нагрузки промышленного предприятия.

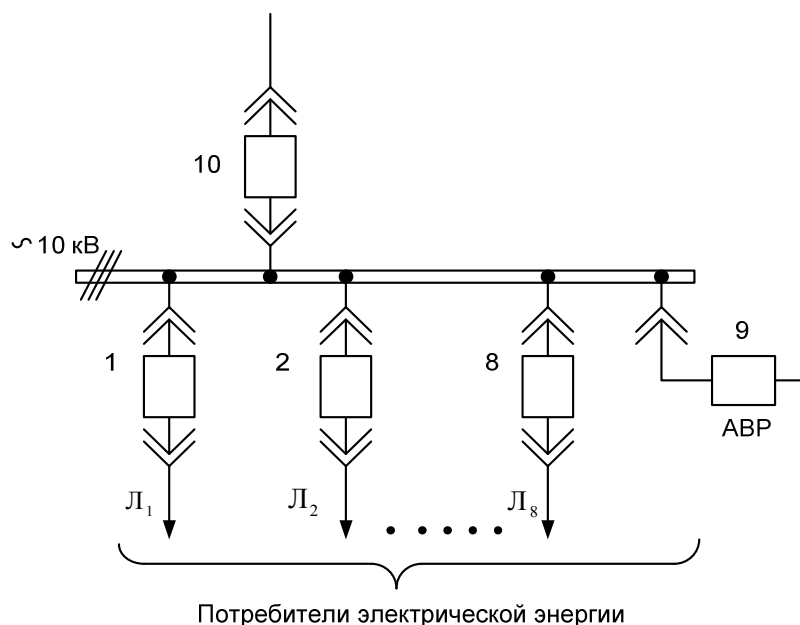


Рис. 1. Узел нагрузки промышленного предприятия

Цель исследования – оценить влияние интервала времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения фидерного защитного коммутационного аппарата на обеспечение надежности узла нагрузки промышленного предприятия.

Результаты исследования. Изменение состояния автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата представим в виде двух однородных марковских процессов: $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ [3]. Пусть $\xi(t)$ в течение времени t может находиться в двух дискретных состояниях: 0 – в сети не наблюдаются события, которые могли бы привести к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата; 1 – произошло КЗ в элементе сети, сработала релейная защита коммутационного аппарата, и он отключил соответствующий потребитель электрической энергии (отказ «обрыв цепи»).

Обозначим параметры процесса $\xi(t)$: λ_o – интенсивность аварийных отключений поврежденных элементов сети, которые находились в зоне действия релейной защиты коммутационного аппарата (отказ «обрыв цепи»); μ_o – интенсивность обнаружения и ремонт (замена) поврежденного элемента сети, включение в работу аварийно-отключившегося коммутационного аппарата.

Индекс «о» указывает на то, что учтены повреждения в сети, которые приводят к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата, ближайшего к месту КЗ, через который прошел сквозной аварийный ток и привел в действие релейную защиту.

События в защищаемой сети, при которых через защитный коммутационный аппарат проходит аварийный ток КЗ, а его релейная защита не срабатывает, представим в виде процесса $\alpha(t)$ с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем. Обозначим: 0 – в сети не наблюдается

событие, в результате появления которого отказывает в срабатывании автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата; 1 – произошло КЗ в элементе сети; через защитный коммутационный аппарат, ближайший к месту повреждения, прошел аварийный ток, а его автоматическая система отключения оказалась в неработоспособном состоянии – произошел отказ в срабатывании.

Параметры процесса $\alpha(t)$ следующие: λ_s – интенсивность отказов в срабатывании автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты; μ_s – интенсивность обнаружения и восстановления работоспособности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата и введения его в эксплуатацию. Индекс s указывает на то, что учтены отказы в срабатывании автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата.

Интервал времени между диагностическими проверками работоспособности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата обозначим через Θ . Диагностические проверки надежны. Это означает, что при диагностических проверках повреждения в автоматической системе отключения коммутационного аппарата будут обязательно выявлены и работоспособность ее будет полностью восстановлена.

Время диагностики обозначим через δ . Время $\delta \ll \Theta$, т.е. $\Theta + \delta \cong \Theta$.

Если известны параметры процессов: $\xi(t)$ и $\alpha(t)$, т.е. λ_o , μ_o , λ_s , μ_s и задан интервал времени между диагностикой автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата Θ , то следует определить:

$P(t)$ – вероятность нахождения коммутационного аппарата в течение времени t в состоянии $e_0(0,0)$, т.е. в режиме ожидания;

$q_o(t)$ – вероятность нахождения защитного коммутационного аппарата в течение времени t в состоянии $e_1(1,0)$, т.е. вероятность отключения от сети поврежденного электрооборудования при появлении КЗ в течение времени t в зоне действия его релейной защиты;

$q_s(t)$ – вероятность нахождения защитного коммутационного аппарата в течение времени t в состоянии $e_2(0,1)$, т.е. вероятность отказов в срабатывании системы автоматического отключения i -го защитного коммутационного аппарата, при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты в течение времени t ;

$A(\tau)$ – вероятность нахождения автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата в режиме ожидания для некоторого произвольно выбранного интервала времени τ ;

$A(\infty)$ – коэффициент готовности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата;

K_s – коэффициент эффективности разработанных рекомендаций.

Решение поставленной задачи

Совокупность двух независимых процессов $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ рассмотрим как один однородный марковский процесс с тремя дискретными состояниями и непрерывным временем.

В любой момент времени автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата может находиться в одном из трех состояний $E\{e_0(0,0), e_1(1,0), e_2(0,1)\}$, где:

$e_0(0,0)$ – в сети не наблюдается событие, которое могло бы привести к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата (отказу «обрыв цепи»); в сети не наблюдается событие, в результате появления которого откажет автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата, т.е. это означает, что автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата находится в режиме ожидания;

$e_1(1,0)$ – произошло КЗ в элементе сети, сработала релейная защита защитного коммутационного аппарата, и он отключил соответствующий потребитель электрической энергии, произошел отказ «обрыв цепи»; в сети не наблюдается событие, в результате которого откажет автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата;

$e_2(0,1)$ – в сети не наблюдается событие, которое могло бы привести к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата (отказу «обрыв цепи»); произошло КЗ в защищаемом элементе сети, через защитный коммутационный аппарат прошел сквозной аварийный ток, а его автоматическая система отключения в это время находилась в неработоспособном состоянии – произошел ее отказ.

Пусть в начальный момент времени $\xi(t)=0$ и $\alpha(t)=0$.

Величина $0(\Delta t)$ означает, что два перехода из одного состояния в другое – это бесконечно малая величина по сравнению с Δt .

Используя граф вероятностей переходов (рис. 2) формулы для определения $P(t)$, $q_o(t)$, $q_s(t)$ можно получить из системы линейных дифференциальных уравнений, записанных в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}(t) \\ \dot{q}_o(t) \\ \dot{q}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(t) \\ q_o(t) \\ q_s(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(\lambda_o + \lambda_s) & \lambda_o & \lambda_s \\ \mu_o & -\mu_o & 0 \\ \mu_s & 0 & -\mu_s \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Система (1) решается при начальных условиях: $P(0)=1$, $q_o(0)=q_s(0)=0$.

Используя преобразование Лапласа [4], систему линейных дифференциальных уравнений (1) преобразуем в систему из трех алгебраических уравнений вида

$$\begin{bmatrix} \overline{P(s)} \\ \overline{q_o(s)} \\ \overline{q_s(s)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \lambda_o + \lambda_s & -\lambda_o & -\lambda_s \\ -\mu_o & s + \mu_o & 0 \\ -\mu_s & 0 & s + \mu_s \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2)$$

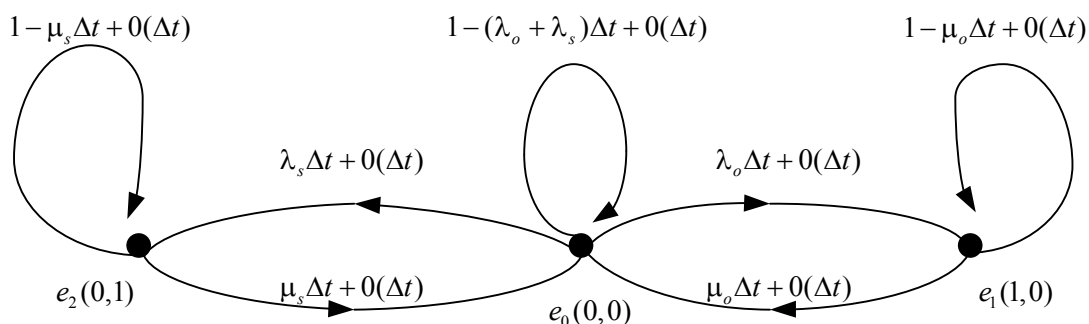


Рис. 2. Граф вероятностей переходов системы защитного коммутационного аппарата в течение времени Δt

Из системы алгебраических уравнений (2) находим

$$P(s) = \frac{(s + \mu_o)(s + \mu_s)}{s[s^2 + s(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + (\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]}; \quad (3)$$

$$q_o(s) = \frac{\lambda_o(s + \mu_s)}{s[s^2 + s(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + (\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]}; \quad (4)$$

$$q_s(s) = \frac{\lambda_s(s + \mu_o)}{s[s^2 + s(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + (\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]}. \quad (5)$$

Формулы (3) – (5) представим в виде

$$P(s) = \frac{(s + \mu_o)(s + \mu_s)}{s(s - s_1)(s - s_2)}; \quad (6)$$

$$q_o(s) = \frac{\lambda_o(s + \mu_s)}{s(s - s_1)(s - s_2)}; \quad (7)$$

$$q_s(s) = \frac{\lambda_s(s + \mu_o)}{s(s - s_1)(s - s_2)}, \quad (8)$$

где

$$s_1 = 0,5 \left\{ -(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + [(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]^{\frac{1}{2}} \right\}; \quad (9)$$

$$s_2 = 0,5 \left\{ -(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) - \left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (10)$$

Применяя обратное преобразование Лапласа к функциям (6) – (8), получим

$$P(t) = \frac{\mu_o \mu_s}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{\frac{1}{2}}} \times \\ \times \left[\frac{(s_1 + \mu_o)(s_1 + \mu_s)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{(s_2 + \mu_o)(s_2 + \mu_s)}{s_2} e^{s_2 t} \right]; \quad (11)$$

$$q_o(t) = \frac{\lambda_o \mu_s}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{\frac{1}{2}}} \times \\ \times \left[\frac{\lambda_o (s_1 + \mu_s)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{\lambda_o (s_2 + \mu_s)}{s_2} e^{s_2 t} \right]; \quad (12)$$

$$q_s(t) = \frac{\lambda_s \mu_o}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{\frac{1}{2}}} \times \\ \times \left[\frac{\lambda_s (s_1 + \mu_o)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{\lambda_s (s_2 + \mu_o)}{s_2} e^{s_2 t} \right], \quad (13)$$

где

$$\lambda_o = \frac{n_o}{NT}, \quad (14)$$

n_o – количество зафиксированных аварийных отключений защитного коммутационного аппарата за время наблюдения;

T – время наблюдения за эксплуатацией защитного коммутационного аппарата;

N – количество защитных коммутационных аппаратов, за которыми было установлено наблюдение;

$$\mu_o = \frac{1}{\tilde{t}_o}, \quad (15)$$

\tilde{t}_o – среднее время обнаружения аварийно-отключившегося от сети электрооборудования, его восстановление и включение защитного коммутационного аппарата в работу;

$$\lambda_s = \frac{n_s}{NT}, \quad (16)$$

n_s — количество выявленных отказов в срабатывании автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата при появлении тока КЗ в зоне действия релейной защиты за время наблюдения.

Интенсивность обнаружения повреждений в автоматической системе отключения защитного коммутационного аппарата при заданном интервале времени между диагностиками Θ можно определить, пользуясь формулой [5]

$$\mu_s = \frac{1}{\Theta - \frac{1}{\lambda_s}(1 - e^{-\lambda_s \Theta})}. \quad (17)$$

В том случае, если выполнено условие

$$\lambda_s \Theta < 0,1, \quad (18)$$

формула (17) примет вид

$$\mu_s = \frac{2}{\lambda_s \Theta^2}. \quad (19)$$

Для определения вероятности нахождения автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата в режиме ожидания для некоторого конечного интервала времени τ необходимо $P(t)$ суммировать по всему заданному интервалу времени, а затем полученный результат разделить на него

$$A(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P(t) dt. \quad (20)$$

Подставим в формулу (20) формулу (11), получим

$$A(\tau) = \frac{\mu_s \mu_o}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{\frac{1}{2}} \tau} \times \\ \times \left[\frac{(s_1 + \mu_o)(s_1 + \mu_s)}{s_1^2} (1 - e^{s_1 \tau}) - \frac{(s_2 + \mu_o)(s_2 + \mu_s)}{s_2^2} (1 - e^{s_2 \tau}) \right]. \quad (21)$$

Коэффициент готовности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата в установившемся режиме с учетом формулы (17) будет иметь вид

$$A(\infty) = \frac{\mu_o}{\lambda_o + \mu_o (\lambda_s \Theta + e^{-\lambda_s \Theta})}. \quad (22)$$

Ожидаемый эффект ($K_s > 1$) после изучения и анализа причин выхода из строя автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата и изменения сроков ее диагностики можно оценить следующим образом:

$$K_s = \frac{[\lambda_o + \mu_o(\lambda_s \Theta + e^{-\lambda_s \Theta} - 1)][\lambda_o + \mu_o(\lambda_s \Theta_1 + e^{-\lambda_s \Theta_1} - 1)]}{[\lambda_o + \mu_o(\lambda_s \Theta + e^{-\lambda_s \Theta} - 1)][\lambda_o + \mu_o(\lambda_s \Theta_1 + e^{-\lambda_s \Theta_1} - 1)]}, \quad (23)$$

где Θ – регламентируемый существующими нормативными документами интервал времени между диагностическими проверками работоспособности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата;

Θ_1 – предлагаемый интервал времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата после анализа причин отказов ее в срабатывании при появлении КЗ в зоне действия токовой защиты.

Если выполняется условие (18), тогда формулы (22) и (23) примут вид

$$A(\infty) = \frac{2\mu_o}{2\lambda_o + \mu_o(2 + \lambda_s^2 \Theta^2)}; \quad (24)$$

$$K_s = \frac{(2\lambda_o + \mu_o \lambda_s^2 \Theta^2)[2\lambda_o + \mu_o(2 + \lambda_s^2 \Theta_1^2)]}{(2\lambda_o + \mu_o \lambda_s^2 \Theta_1^2)[2\lambda_o + \mu_o(2 + \lambda_s^2 \Theta^2)]}. \quad (25)$$

Формулы (22) – (25) позволяют оценить в установившемся режиме готовность к работе системы автоматического отключения защитных коммутационных аппаратов и эффективность ее диагностики при эксплуатации их в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Пример. В результате наблюдения по плану [NMT] в течение $T = 12$ лет за эксплуатацией защитных коммутационных аппаратов ($N = 8$) секции шин трансформаторной подстанции 110/10 кВ одного из промышленных предприятий (см. рис. 1) получена следующая информация: произошло 14 случаев аварийного отключения коммутационных аппаратов 1–8. Все выявленные аварийные отключения защитных коммутационных аппаратов отнесены к отказам типа «обрыв цепи» ($n_o = 14$).

Среднее время обнаружения поврежденного элемента сети, его ремонт или замена и включение вновь защитного коммутационного аппарата в работу составило 2,3 ч. Количество выявленных отказов в срабатывании защитных коммутационных аппаратов при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты – девять случаев ($n_s = 9$). Диагностические проверки автоматической

системы отключения защитного коммутационного аппарата проводили ежегодно ($\Theta = 8760$ ч).

Определить, во сколько раз снизится количество аварийных отключений секции шин 10 кВ (см. рис. 1), если диагностику системы отключений защитных коммутационных аппаратов 1–8 проводить через $\Theta_1 = 4380$ ч.

Решение. Используя исходные данные примера, формулы (14) – (16), находим:

$$\lambda_o = \frac{n_o}{NT} = 0,000133 \text{ ч}^{-1}; \mu_o = \frac{1}{\tilde{t}_o} = 0,435 \text{ ч}^{-1}; \lambda_s = \frac{n_s}{NT} = 0,0000856 \text{ ч}^{-1}.$$

Значения $\lambda_o, \mu_o, \lambda_s$, $\Theta = 8760$ ч, $\Theta_1 = 4380$ ч подставим в формулу (23) и в результате вычислений получим: $K_s = 3,1$. Этот результат расчетов означает, что если контролировать работоспособность системы автоматического отключения защитных коммутационных аппаратов 1–8 (см. рис. 1) два раза в год с интервалом времени $\Theta_1 = 4380$ ч, то количество аварийных отключений секции шин 10 кВ снизится в 3,1 раза.

Список литературы / References

1. Ковалёв, А.П. О причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,4/0,22 кВ к пожарам в электрифицированных помещениях / А.П. Ковалёв, И.А. Бершадский, А.В. Згарбул // Промышленная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 60 – 65.

Kovalyov, A.P., Bershadskiy, I.A., Zgarbul, A.V. *O prichastnosti korotkikh замыkaniy v elektricheskoy provodke 0,4/0,22 kV k pozharom v elektrifitsirovannykh pomeshcheniyakh* [On complicity of the 0.4/0.22 kV electrical wiring short circuits in fires in electrified premises]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2018, no. 4, pp. 60 – 65.

2. Ковалёв, А.П. О надежности защитных коммутационных аппаратов, которые эксплуатируются в системах электроснабжения 10 – 0,4 кВ промышленных предприятий / А.П. Ковалёв, И.И. Москвина, А.А. Сорочка // Промышленная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 32 – 37.

Kovalyov, A.P., Moskvina, I.I., Sorochka, A.A. *O nadyezhnosti zashchitnykh kommutatsionnykh apparatov, kotoryye ekspluatiruyutsya v sistemakh elektrosnabzheniya 10 – 0,4 kV promyshlennykh predpriyatiy* [On reliability of safe switching devices operating in the 10 – 0.4 kV electrical power supply systems of industrial enterprises]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2019, no. 3, pp. 32 – 37.

3. Дьяков, Б.Н. Случайные процессы / Б.Н. Дьяков, В.Ф. Ковязин, А.Н. Соловьев. – СПб.: Лань, 2013. – 640 с.

D'yakov, B.N. Kovyazin, V.F., Solov'yov, A.N. *Sluchaynyye protsessy* [Stochastic processes]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 640 p.

4. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 2018. – 610 с.

Bronshteyn, I.N., Semendyayev, K.A. *Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Mathematics handbook. For engineers and students of high educational institutions]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 544 p.

5. Белоусенко, И.В. Влияние надежности оборудования газораспределительных пунктов на взрывобезопасность газифицированных объектов / И.В. Белоусенко, А.П. Ковалев, И.И. Лехтман // Промышленная энергетика. – М., 2011. – № 11. – С. 48 – 54.

Belousenko, I.V., Kovalyov, A.P., Lekhtman, I.I. *Vliyaniye nadyezhnosti oborudovaniya gazoraspredeletel'nykh punktov na vzyvobezopasnost' gazifitsirovannykh ob'yektov* [Influence of reliability of equipment of gas-distributing points on explosion safety of objects with gas supply]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, Moscow, 2011, no. 11, pp. 48 – 54.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 13.02.2020

Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: abrecap@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-46
Viktoria Viktorovna Yakimishina, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: yvsm@list.ru
Olga Andreyevna Saponenko, master's student; e-mail: saponenko.olga.andreevna@gmail.com
The State Educational Institution of Higher Occupational Education
“Donetsk National Technical University”
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-06

RELIABILITY OF PROTECTIVE SWITCHING DEVICES

Purpose. To determine the influence of a time interval between the diagnostic tests of automatic shutdown system of the feeder protective switching device on ensuring the safety of load center of an industrial enterprise.

Methods. Modeling of reliability of the protective switching device in dynamic mode with application of the Markovian processes with digital number of states and continuous time.

Results. It has been established for the particular load center of the industrial enterprise that if the functional state of the automatic shutdown system of the feeder protective switching device is controlled twice a year instead of once then the number of emergency shutdowns of the transformer substation busbar section will reduce by 3.1.

Scientific novelty. The analytical dependence has obtained for probability of the non-failure operation during the operation time of the protective switching device that may exist in three states taking into account the diagnostics of its automatic shutdown system.

Practical value. The obtained analytical dependences make it possible to evaluate and to substantiate the efficiency of the developed guidelines on rescheduling the periods of diagnostics of the automatic shutdown system of the protective switching devices being operated in the power supply systems of the industrial enterprises.

Keywords: *reliability; protective switching device; electric discontinuity; failure to operate; random process; relay protection; diagnostics.*