

Об оценке пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ при ее эксплуатации

КОВАЛЕВ А.П., СОЛЕНАЯ О.Я.

Возгорание горючего материала в электрифицированном помещении может наступить всякий раз при совпадении в пространстве и времени следующих трех случайных событий: произошло повреждение электрической проводки, которая находится под напряжением; отказала в срабатывании система защиты, которая обеспечивает пожарную безопасность электрической сети; появился горючий материал вблизи места возможного повреждения электрической проводки. На основе регулярных однородных марковских процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем предложена методика оценки пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ при ее эксплуатации. Получена новая аналитическая зависимость вероятности возгорания горючего материала в течение времени t от частоты повреждения сети, надежности средств защиты и сроков ее диагностики, а также от частоты появления горючего материала вблизи возможного повреждения электрической проводки и длительности его нахождения в недопустимо близком расстоянии от места возможного появления источника поджигания. Приведен пример расчетов.

Ключевые слова: электросеть 0,4/0,22 кВ, короткое замыкание, частота появления пожаров, пожаробезопасность, марковский процесс

Из-за коротких замыканий (КЗ), перегрузок, утечек токов на землю и от появления ослабленных силовых контактных соединений в сетях 0,4/0,22 кВ, например в Украине, происходит около 20% общего числа причин возгораний горючего материала в электрифицированных помещениях, что приводит к ежегодным потерям в среднем в сумме 150 млн грн. [1].

Возникает вопрос, каким образом при эксплуатации сетей 0,4/0,22 кВ возможно оценить уровень их пожарной опасности, какую информацию следует ежегодно получать с контролируемого объекта (электрифицированного помещения), чтобы утверждать, что эксплуатируемая сеть безопасна? Какие организационные и технические мероприятия требуется выполнить, чтобы на объекте обеспечить нормируемый в [2] уровень пожарной безопасности? На эти вопросы пока нет исчерпывающих ответов.

Возгорание горючего материала в помещении при КЗ в открытой части электрической проводки может наступить при совпадении в пространстве и времени трех событий: КЗ в элементе сети; отказ в срабатывании токовой отсечки автоматического выключателя; наличие горючего материала вблизи возможного появления КЗ в защищаемой сети.

При определении вероятности возгорания горючего материала в помещении необходимо учитывать не только появление источника поджигания (КЗ), но и его длительность. При длительности срабатывания автоматического выключателя меньше либо равной 0,2 с горючий материал (если он находится в непосредственной близости от места КЗ) не успеет воспламениться. Но, если при КЗ

откажет в срабатывании вводный автоматический выключатель, то поврежденный участок сети с выдержкой времени 0,5 с будет отключен коммутационным аппаратом, который обеспечивает продольное резервирование сети. В этом случае дуговой разряд будет существовать примерно 0,7 с (происходит разбрызгивание части расплавленного металла проводника дугой). За такое время горючий материал (пыль, бумага, текстиль и т.д.) может воспламениться.

Что же касается горючего материала, случайно появляющегося вблизи возможного места повреждения сети, то его следует периодически убирать (производить профилактические осмотры), т.е. следует учитывать длительность нахождения горючего материала вблизи возможного появления повреждения сети.

В настоящее время не совсем ясно, каким образом и в какой степени на пожарную безопасность электрифицированного помещения влияют частота повреждения сети, надежность средств защиты и сроки ее диагностики, а также частота появления горючего материала вблизи возможного повреждения электрической проводки и длительность нахождения горючего материала в недопустимо близком расстоянии от места возможного появления источника поджигания.

В статье предлагается методика расчетов пожаробезопасности узлов нагрузки в сетях 0,4/0,22 кВ.

По данным ГУМЧС Украины в 2011 г. было зафиксировано $n_1 = 11408$ пожаров в электрифицированных помещениях по электротехническим причинам. В 2011 г. в Украине насчитывалось 19327000 электрифицированных помещений (квартир) (N_1).

Частота появления пожаров в электрифицированных помещениях определяется по формуле

$$\tilde{H}_1 = \frac{n_1}{N_1 t} = \frac{11408}{19327000 \times} = 5,9 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Для случая $\tilde{H}_1 t < 0,01$ вероятность появления пожаров в электрифицированном помещении в течение года определим следующим образом:

$$\tilde{Q}_1(1) = 1 - e^{-\tilde{H}_1 t} \approx 1 - (1 - \tilde{H}_1 \times) \approx \tilde{H}_1 \times \approx \tilde{H}_1.$$

Используя формулу Муавра–Лапласа, с доверительной вероятностью 0,95 получим доверительный интервал [3]:

$$P\{7,16 \times 10^{-4} < \tilde{Q}_1(0;1) < 7,37 \times 10^{-4}\} \approx 0,95.$$

По данным Федеральной службы государственной статистики России в 2011 г. произошло $n_2 = 40892$ пожара в электрифицированных помещениях от электротехнических причин. В 2011 г. в России эксплуатировалось около $N_2 = 60800000$ электрифицированных помещений (квартир) [4]. Определим частоту появления пожаров в течение года в этих помещениях при их эксплуатации:

$$\tilde{H}_2 = \frac{n_2}{N_2 t} = \frac{40892}{60800000 \times} = 6,7 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Доверительный интервал в этом случае

$$P\{6,67 \times 10^{-4} < \tilde{Q}_2(0;1) < 6,78 \times 10^{-4}\} \approx 0,95.$$

В соответствии с [2] вероятность возникновения пожара в узле нагрузки в течение года не должна превышать $\tilde{Q}(1) \leq 1 \times 10^{-6}$. Значение 1×10^{-6} означает, что на 1000000 электрифицированных помещений статистически допускается один пожар в год.

В Украине вероятность возникновения пожаров в течение 2011 г. в электрифицированном помещении от электротехнических причин в 590 раз, а в России в 670 раз выше нормируемого значения $\tilde{Q}_0(1) \leq 1 \times 10^{-6}$. Поэтому одной из основных задач по обеспечению пожарной безопасности (ПБ) электрифицированных помещений является разработка организационных и технических мероприятий, с помощью которых возможно перейти от уровня пожарной безопасности $\tilde{Q}_1(1) = 5,9 \times 10^{-4}$ и $\tilde{Q}_2(1) = 6,7 \times 10^{-4}$ к нормируемому $\tilde{Q}(1) = 1 \times 10^{-6}$.

Для решения поставленной задачи необходимо получить аналитическую зависимость вероятности возгорания горючего материала в электрифицированном помещении в течение времени от частоты

появления повреждения сети различного характера (КЗ, перегрузка, утечка тока на землю, появление ослабленного и опасно нагретого контактного соединения), надежности автоматических средств защиты и сроков их диагностики, частоты появления горючего материала (ветошь, волокна, пыль, опилки дерева и т.д.) и длительности его нахождения вблизи возможного места повреждения сети.

Понятия, определения и допущения. Отказ электрической проводки, находящейся под напряжением – появление в сети такого события, которое может приводить к КЗ, перегрузкам, утечкам тока на землю либо к появлению ослабленных и опасно нагретых силовых контактных соединений (СКС).

Опасный нагрев изоляции проводника токами КЗ или перегрузки – такое событие, при котором происходит возгорание изоляции проводника или горючей пыли, которая образуется в течение времени на ее поверхности, либо изоляция проводника размягчается, начинает течь и при попадании каплей горячей массы на поверхность горючих материалов происходит их возгорание.

Опасный нагрев СКС, которые находятся под напряжением – температура, при которой происходит расплавление или возгорание изоляции проводника либо горючего материала, который случайно может находиться в непосредственной близости от нагретого СКС. Предполагается, что при нагреве СКС до температуры, способной поджечь горючий материал, происходит подгорание ослабленного (окисленного) контактного соединения с образованием мельчайших прерывистых дуговых разрядов через большое переходное сопротивление между фазным и нулевым рабочими проводниками.

Появление токов утечки в сети обусловлено изменением тепловых эксплуатационных характеристик электропроводки (перегрузки и др.) – они способствуют образованию влаги (конденсат) на поверхности изоляции проводника. Влажный участок изоляции становится местом протекания токов утечки и выделения дополнительного тепла, что приводит к испарению, в итоге которого на поверхности изоляции проводника остается соль и другие токопроводящие примеси. Периодическая цикличность таких режимов приводит к увеличению концентрации соли и примесей с последующей потерей диэлектрических свойств изоляции проводника и, как следствие, – к возникновению КЗ [5].

Система обеспечения пожарной безопасности электрической проводки – защитные устройства, реагирующие на случайное появление таких повреждений электрической сети, как КЗ, перегрузка, утечка тока на землю, появле-

ние ослабленных, опасно искрящих СКС, сигнал от которых поступает на систему отключения автоматического выключателя.

Предположим, что возгорание горючего материала в электрифицированном помещении из-за повреждения электрической проводки происходит при совпадении в пространстве и времени трех процессов: повреждение электрической проводки, которая находится под напряжением; отказ в срабатывании системы обеспечения пожарной безопасности; появление горючего материала вблизи места повреждения электрической проводки.

Представим изменение состояния электрической проводки в помещении с течением времени в виде регулярного однородного марковского процесса $a(t)$ с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем. Обозначим через «0» такое состояние проводки электрической сети, в котором не наблюдаются повреждения ее изоляции, а через «1» – длительность существования состояния сети после повреждения изоляции электрической проводки (время срабатывания коммутационного аппарата либо время отгорания проводника).

Параметры процесса $a(t)$ обозначим через l_i и m_i , где $i=1,4$ – код повреждения изоляции: $i=1$ – произошло КЗ; $i=2$ – перегрузка; $i=3$ – утечка тока на землю; $i=4$ – появилось ослабленное, опасно искрящее СКС. Параметр l_i характеризует интенсивность либо скорость изменения состояния электрической сети, частоту переходов из состояния «0» в состояние «1», а m_i характеризует частоту переходов из состояния «1» в состояние «0».

Обозначим через $b(t)$ регулярный однородный марковский случайный процесс с двумя дискретными состояниями – «0» и «1» – и непрерывным временем, который характеризует изменение состояния системы обеспечения пожарной безопасности: «0» – работоспособное состояние системы обеспечения пожарной безопасности («ждущий режим») и «1» – поврежденное состояние системы (выявляется только в результате диагностики). Параметры процесса $b(t)$ следующие: w_1 – скорость смены работоспособных промежутков времени (рабочего состояния системы обеспечения пожарной безопасности) на неработоспособные; g_1 – скорость смены неработоспособных промежутков времени, в течение которых система обеспечения пожарной безопасности находилась в отказавшем состоянии, на работоспособные. Диагностика системы обеспечения ПБ проводится с интервалом времени Q_1 .

Наличие или отсутствие горючего материала в непосредственной близости от случайного повреждения изоляции проводников электрической проводки помещения представим аналогичным регу-

лярным однородным марковским процессом $x(t)$ с двумя дискретными состояниями: «0» – вблизи электрической проводки, которая находится под напряжением, отсутствует горючий материал (пыль, бумага, жидкие легковоспламеняющиеся материалы и др.) и «1» – вблизи прокладки электрической проводки находится горючий материал. Параметры процесса $x(t)$ следующие: w_2 – частота появления горючего материала вблизи возможного места повреждения электрической проводки; g_2 – скорость смены промежутков времени нахождения горючего материала вблизи возможного места повреждения сети на промежутки времени, когда будет его полное устранение. Наличие горючего материала вблизи прокладки проводников электрической сети или ее потребителей выявляется и устраняется в результате проведения профилактических проверок с интервалом времени Q_2 .

Возгорание горючего материала в электрифицированном помещении может произойти в момент совпадения в пространстве и времени трех случайных процессов $a(t)$, $b(t)$ и $x(t)$ в состоянии «1», т.е. $a(t)=1$, $b(t)=1$, $x(t)=1$.

Предположим, что в начальный момент времени $a(t)=0$, $b(t)=0$, $x(t)=0$ и параметры процессов $a(t)$, $b(t)$ и $x(t)$, т.е. их характеристики l_i ; m_i , w_1 ; g_1 , w_2 ; g_2 известны. Требуется определить: среднее время до первого возгорания горючего материала t_1 , дисперсию D_1 , вероятность нахождения системы в каждом из возможных состояний $P_i(t)$, вероятность возгорания горючего материала в электрифицированном помещении $F(t)$.

Решение задачи. Совокупность процессов $a(t)$, $b(t)$ и $x(t)$ рассмотрим как один регулярный однородный марковский процесс $k(t)$ с восемью дискретными состояниями и непрерывным временем (рис. 1).

В любой момент времени процесс $k(t)$ 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 это состояние, система из него выйти не может [6]. В состоянии $e_8(1,1,1)$ происходит возгорание горючего материала.

Обозначим через z_k , $k=1,8$, время пребывания процесса $k(t)$ в состоянии e_k . Для регулярного однородного марковского процесса $k(t)$ с дискретным числом состояний и непрерывным временем случайные величины z_k не противоречат показательной функции распределения вероятностей [7]:

$$F_z(t) = P\{z < t\} = 1 - e^{-1} i t^i. \quad (2)$$

Обозначим через $P_{ii}(Dt)$ вероятность того, что процесс $k(t)$ за малый промежуток времени Dt оста-

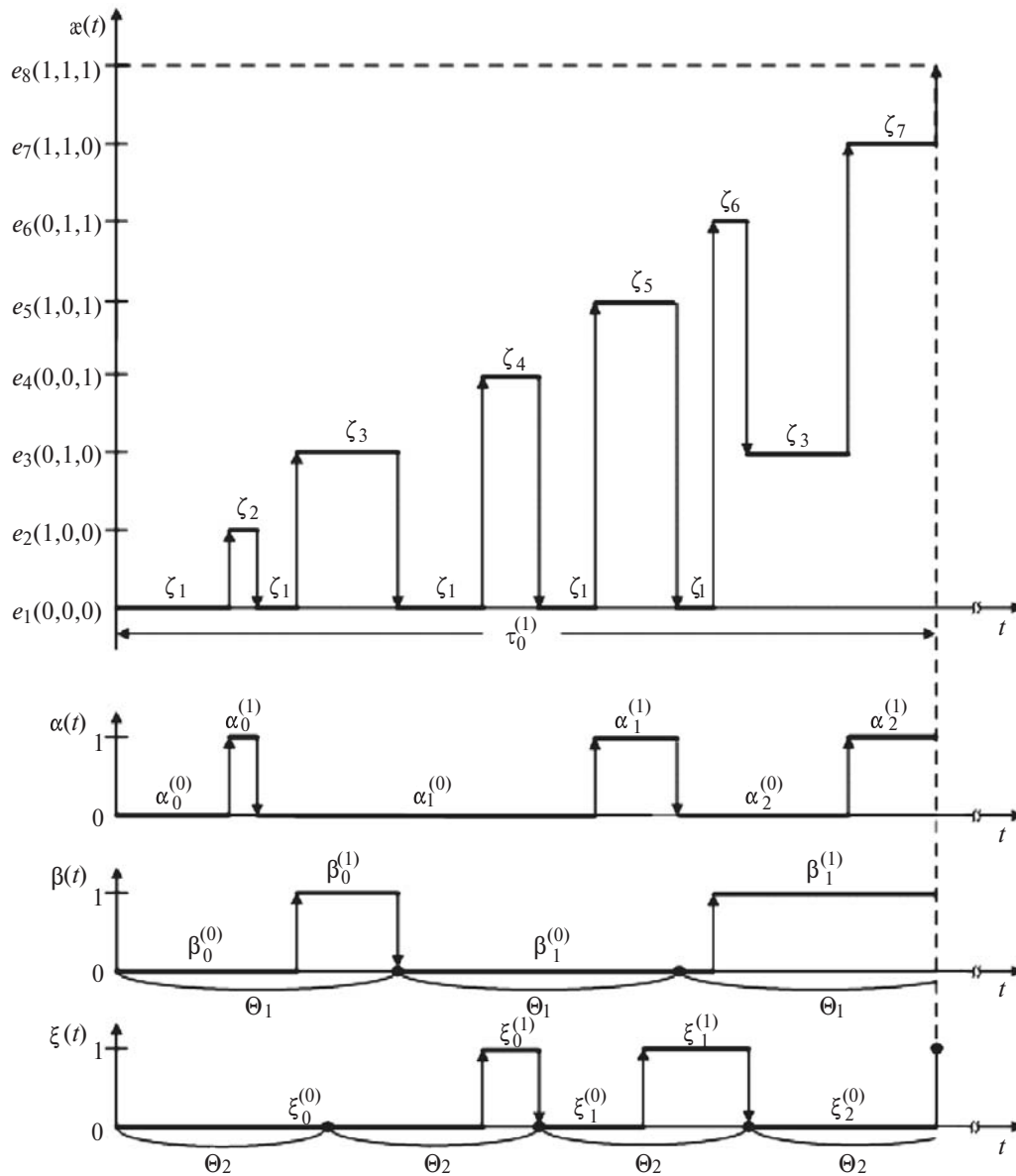


Рис. 1. Возможная реализация регулярного однородного марковского процесса с восемью дискретными состояниями и непрерывным временем: Z_k – длительность нахождения процесса $k(t)$ в каждом из семи возможных состояний $k = \overline{1,7}$; $a(t)$, $b(t)$ и $x(t)$ – регулярные однородные марковские процессы с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем; $a_i^{(0)}, a_j^{(1)}$; $b_i^{(0)}, b_j^{(1)}$; $x_i^{(0)}, x_j^{(1)}$ – интервалы времени между появлением событий и их длительность, $i, j = \overline{1,n}$; Q_1, Q_2 – интервалы времени между диагностиками системы обеспечения пожарной безопасности и проверками наличия горючего материала вблизи возможного появления опасного электрического источника соответственно; $t_0^{(1)}$ – время до возгорания горючего материала в электрифицированном помещении

нется в состоянии $e_i, i = \overline{1,8}$, а через $P_{ij}(Dt)$ – вероятность того, что система за время Dt перейдет из состояния e_i в состояние $e_j, j = \overline{1,8}$. Вероятность переходов $P_{ii}(Dt)$ и $P_{ij}(Dt)$ определяется с помощью формул [8]:

$$P_{ii}(Dt) = P[k(t + Dt) = e_i / k(t) = e_i] = \int_{Dt} P\{e_i \otimes e_i\} = 1 - l_{ii}Dt + 0(Dt); \tag{3}$$

$$P_{ij}(Dt) = P[k(t + Dt) = e_j / k(t) = e_i] =$$

$$= P\{e_i \otimes e_j\} = l_{ij}Dt + 0(Dt). \tag{4}$$

В (3) величина $(1 - l_{ii}Dt)$ учитывает с точностью до второго порядка малости, что за время Dt не произойдет переход системы из состояния e_i в состояние e_j , т.е. процесс останется в состоянии e_i . Из (4) следует, что величина $l_{ij}Dt$ учитывает с точностью до второго порядка малости, что за время Dt произойдет переход системы из состояния e_i в состояние e_j .

Используя формулы (3) и (4), получим матрицу вероятностей переходов $P(Dt)$:

$$P(Dt) = \begin{pmatrix} 1 - c_1 Dt + 0(Dt) & l_i Dt + 0(Dt) & w_1 Dt + 0(Dt) & w_2 Dt + 0(Dt) & 0 \\ g_1 Dt + 0(Dt) & 1 - c_2 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & 0(Dt) & w_2 Dt + 0(Dt) \\ m_1 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & 1 - c_3 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & 0(Dt) \\ g_2 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & 0(Dt) & 1 - c_4 Dt + 0(Dt) & l_i Dt + 0(Dt) \\ 0(Dt) & g_2 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & g_1 Dt + 0(Dt) & 1 - c_5 Dt + 0(Dt) \\ 0(Dt) & 0(Dt) & g_2 Dt + 0(Dt) & m_1 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) \\ 0(Dt) & m_1 Dt + 0(Dt) & g_1 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & 0(Dt) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0(Dt) & w_1 Dt + 0(Dt) & 0 \\ w_2 Dt + 0(Dt) & l_i Dt + 0(Dt) & 0 \\ w_1 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & 0 \\ 0(Dt) & 0(Dt) & w_1 Dt \\ 1 - c_6 Dt + 0(Dt) & 0(Dt) & l_i Dt \\ 0(Dt) & 1 - c_7 Dt + 0(Dt) & w_2 Dt \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Используя матрицу (5), находим матрицу A [9]:

$$A = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{Q(Dt) - I}{Dt}, \quad (6)$$

где I – единичная матрица.

Матрица Q(Dt) находится из матрицы P(Dt) путем исключения поглощающего состояния – последней строки и последнего столбца.

Предел отношения 0(Dt) к Dt при Dt → 0 равен «0» [10]:

$$\lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{0(Dt)}{Dt} = 0. \quad (7)$$

Используя (5)–(7), получим:

$$A = \begin{pmatrix} -c_1 & l_i & w_1 & w_2 & 0 & 0 & 0 \\ g_1 & -c_2 & 0 & 0 & w_2 & 0 & w_1 \\ m_1 & 0 & -c_3 & 0 & 0 & w_2 & l_i \\ g_2 & 0 & 0 & -c_4 & l_i & w_1 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & g_1 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_2 & m_1 & 0 & -c_6 & 0 \\ 0 & m_1 & g_1 & 0 & 0 & 0 & -c_7 \end{pmatrix} \quad (8)$$

где $c_1 = l_i + w_1 + w_2$; $c_2 = g_1 + w_1 + w_2$; $c_3 = l_i + m_1 + w_2$; $c_4 = l_i + w_1 + g_2$; $c_5 = g_1 + w_1 + g_2$; $c_6 = l_i + m_1 + g_2$; $c_7 = m_1 + g_1 + w_2$.

Найдем матрицу N [11]:

$$N = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{I - Q(Dt)}{Dt}. \quad (9)$$

Используя (5), (7) и (9), получим:

$$N = \begin{pmatrix} c_1 & -l_i & -w_1 & -w_2 & 0 & 0 & 0 \\ -g_1 & c_2 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & -w_1 \\ -m_1 & 0 & c_3 & 0 & 0 & -w_2 & -l_i \\ -g_2 & 0 & 0 & c_4 & -l_i & -w_1 & 0 \\ 0 & -g_2 & 0 & -g_1 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_2 & -m_1 & 0 & c_6 & 0 \\ 0 & -m_1 & -g_1 & 0 & 0 & 0 & c_7 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Среднее время t_1 до появления возгорания горючего материала в квартире, дисперсию D_1 и вероятности $P_i(t)$ нахождения системы в течение времени t в каждом из i возможных состояний, $i = \overline{1,7}$, можно найти с помощью систем уравнений [12]:

$$t = N^{-1} x; \quad (11)$$

$$D = (2N - I)t - t^2; \quad (12)$$

$$P_i(t) = P(t)A, \quad (13)$$

где x – вектор-столбец, все элементы которого равны 1; $t = [t_i]_{i=1}^7$ – вектор-столбец; $t^2 = [t_i^2]_{i=1}^7$ – вектор-столбец; $P_i(t) = [P_i(t)]_{i=1}^7$ – вектор-строка; $P(t) = [P_i(t)]_{i=1}^7$ – вектор-строка.

Подставим матрицу (10) в систему алгебраических уравнений (11), тогда систему уравнений для нахождения t можно записать в виде:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix} t = \begin{pmatrix} c_1 & -l_i & -w_1 & -w_2 & 0 & 0 & 0 \\ -g_1 & c_2 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & -w_1 \\ -m_1 & 0 & c_3 & 0 & 0 & -w_2 & -l_i \\ -g_2 & 0 & 0 & c_4 & -l_i & -w_1 & 0 \\ 0 & -g_2 & 0 & -g_1 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_2 & -m_1 & 0 & c_6 & 0 \\ 0 & -m_1 & -g_1 & 0 & 0 & 0 & c_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Используя матрицу (10) и систему уравнений (12) находим дисперсию из системы уравнений:

$$\begin{matrix}
 \ddot{D}_1 \\
 \dot{D}_2 \\
 \dot{D}_3 \\
 \dot{D}_4 \\
 \dot{D}_5 \\
 \dot{D}_6 \\
 \dot{D}_7
 \end{matrix} =
 \begin{matrix}
 c_1 & -l_i & -w_1 & -w_2 & 0 & 0 & 0 \\
 -g_1 & c_2 & 0 & 0 & -w_2 & 0 & -w_1 \\
 \eta & 0 & c_3 & 0 & 0 & -w_2 & -l_i \\
 -g_2 & 0 & 0 & c_4 & -l_i & -w_1 & 0 \\
 0 & -g_2 & 0 & -g_1 & c_5 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -g_2 & -\eta & 0 & c_6 & 0 \\
 0 & -\eta & -g_1 & 0 & 0 & 0 & c_7
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 \ddot{D}_1 \\
 \dot{D}_2 \\
 \dot{D}_3 \\
 \dot{D}_4 \\
 \dot{D}_5 \\
 \dot{D}_6 \\
 \dot{D}_7
 \end{matrix}
 \quad (15)$$

Используя (8) и (13), найдем вероятность нахождения системы в каждом из возможных состояний с помощью системы линейных дифференциальных уравнений, записанной в матричном виде:

$$\begin{matrix}
 \dot{P}_1(t) \\
 \dot{P}_2(t) \\
 \dot{P}_3(t) \\
 \dot{P}_4(t) \\
 \dot{P}_5(t) \\
 \dot{P}_6(t) \\
 \dot{P}_7(t)
 \end{matrix} =
 \begin{matrix}
 -c_1 & l_i & w_1 & w_2 & 0 & 0 & 0 \\
 g_1 & -c_2 & 0 & 0 & w_2 & 0 & w_1 \\
 \eta & 0 & -c_3 & 0 & 0 & w_2 & l_i \\
 g_2 & 0 & 0 & -c_4 & l_i & w_1 & 0 \\
 0 & g_2 & 0 & g_1 & -c_5 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & g_2 & \eta & 0 & -c_6 & 0 \\
 0 & \eta & g_1 & 0 & 0 & 0 & -c_7
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 P_1(t) \\
 P_2(t) \\
 P_3(t) \\
 P_4(t) \\
 P_5(t) \\
 P_6(t) \\
 P_7(t)
 \end{matrix}
 \quad (16)$$

Система уравнений (16) решается при следующих начальных условиях: $P_1(0)=1$; $P_2(0)=0$; $P_3(0)=0$; $P_4(0)=0$; $P_5(0)=0$; $P_6(0)=0$; $P_7(0)=0$.

Для случая $l_i \ll 100\eta$; $w_1 \ll 100g_1$; $w_2 \ll 100g_2$ из системы уравнений (14) находим:

$$t_1 \approx \frac{\eta g_1 g_2}{l_i w_1 w_2 (\eta + g_1 + g_2)} \quad (17)$$

В том случае, если работоспособность системы обеспечения пожарной безопасности проверять через интервал времени Q_1 (проверки абсолютно надежны), параметр процесса g_1 определяется следующим образом [13]:

$$g_1 = \frac{1}{Q_1 - \frac{1}{w_1}(1 - e^{-w_1 Q_1})} \quad (18)$$

Если $w_1 Q_1 < 0,1$, то

$$g_1 = 2 / w_1 Q_1^2 \quad (19)$$

Если наличие горючего материала в электрифицированном помещении контролировать через интервал времени Q_2 и считать, что проверки абсолютно надежны, то

$$g_2 = \frac{1}{Q_2 - \frac{1}{w_2}(1 - e^{-w_2 Q_2})} \quad (20)$$

Если $w_2 Q_2 < 0,1$, то

$$g_2 = 2 / w_2 Q_2^2 \quad (21)$$

Подставим в (17) значения g_1 и g_2 , полученные из (19) и (21), тогда

$$t_1 \approx \frac{4\eta}{l_i w_1 w_2 (\eta w_1 w_2 Q_1^2 Q_2^2 + 2w_1 Q_1^2 + 2w_2 Q_2^2)} \quad (22)$$

В том случае, если $g_1 \ll \eta$ и $g_2 \ll \eta$, (22) можно представить в виде

$$t_1 \approx \frac{1}{0,25 l_i w_1^2 w_2^2 Q_1^2 Q_2^2} \quad (22a)$$

При $t_1 \approx \sqrt{D_1}$ вероятность возгорания горючего материала в электрифицированном помещении в течение времени t равна

$$F_j(t) \approx 1 - e^{-H_1 t}, \quad j = \overline{1,4},$$

где $H_1 = 1/t_1$.

Параметр потока возгораний горючего материала в электрифицированном помещении \tilde{H} с учетом четырех видов повреждений электрической сети и выполнения условий $l_i \ll 100\eta$; $w_1 \ll 100g_1$; $w_2 \ll 100g_2$ и $g_1 \ll \eta$ и $g_2 \ll \eta$ можно определить следующим образом:

$$\tilde{H}_1 \approx 0,25 w_1^2 Q_1^2 w_2^2 Q_2^2 (l_1 + l_2 + l_3 + l_4).$$

Тогда вероятность возгорания горючего материала в электрифицированном помещении в течение времени t примет вид

$$\tilde{Q}(t) = 1 - e^{-\tilde{H}_1 t}, \quad (23)$$

Если условие $t_1 \approx \sqrt{D_1}$ не выполняется, тогда $F_j(t)$, $j = \overline{1,4}$, определяется следующим образом:

$$F_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^7 P_i(t), \quad (24)$$

где $P_i(t)$ определяются из решения системы линейных дифференциальных уравнений (16), а вероятность возгорания горючего материала в помещении

$$Q(t) = 1 - [1 - F_1(t)][1 - F_2(t)][1 - F_3(t)][1 - F_4(t)], \quad (25)$$

где $F_1(t)$ – вероятность возгорания горючего материала в течение времени t при КЗ в узле нагрузки; $F_2(t)$ – то же при перегрузке в узле нагрузки; $F_3(t)$ – то же при утечке тока на землю в узле нагрузки; $F_4(t)$ – то же при появлении ослабленных и опасно нагретых СКС в узле нагрузки.

Пример. Под наблюдением по плану [NMt] в течение 10 лет (Т) находилось электрооборудование (автоматические выключатели, счетчики электрической энергии, электрическая проводка, силовые контактные соединения и потребители) 100-квартирного жилого дома, т.е. $N = 100$ узлов нагрузки.

За время наблюдения было зафиксировано 49 случаев КЗ в системах электроснабжения квартир (n_1); 72 случая появления токов перегрузки, при которых срабатывал вводный автоматический выключатель (n_2); 176 случаев появления утечек тока на землю, которые с течением времени перерастали в КЗ и отключались с помощью токовой отсечки автоматического выключателя (n_3); 201 случай появления ослабленных, опасно искрящих силовых контактных соединений в электрической сети, которые обнаруживались в результате диагностических проверок либо такие повреждения перерастали в КЗ и отключались с помощью вводного автоматического выключателя (n_4).

За время наблюдения за $N_5 = 100$ автоматическими выключателями был выявлен 61 случай выхода из строя системы отключения автоматического выключателя либо неправильный его выбор (n_5).

Неработоспособное состояние системы отключения автоматического выключателя, установленного на вводе в квартиру, выявлялось в результате его диагностической проверки. Проверка работоспособности и правильность выбора установки автоматических выключателей, установленных в квартире, проводилась с интервалом времени $Q_1 = 1$ год.

Принималось, что диагностика системы отключения автоматического выключателя абсолютно надежна, т.е. появление отказов в системе его отключения будет непременно обнаружено и устранено в результате диагностической проверки либо автоматический выключатель будет заменен на новый.

Проверка наличия горючего материала (пыль, бумага, хлопок и т.д.) вблизи возможных потенциальных источников инициирования возгорания проводилась с интервалом времени $Q_2 = 0,082$ года. В результате этих проверок было выявлено 620 случаев (m) наличия горючего материала вблизи возможного появления повреждения в электрической проводке.

Допущения. В квартире установлен автоматический выключатель, который содержит защиты, реагирующие на появление токов КЗ, перегрузки, утечек тока на зем-

лю, а также на появление ослабленных и опасно искрящих силовых контактных соединений.

Среднее время срабатывания автоматического выключателя в зоне действия его защит принимается равным $d_1 = 0,2$ с.

Интенсивность отказов электрической схемы защит более чем на порядок меньше интенсивности отказов системы отключения автоматического выключателя.

Предполагается, что горючий материал в квартире (пыль, бумага, ветошь и др.) равномерно распределяется с течением времени по поверхности изоляции проводников, оборудованию либо по поверхности предметов, которые находятся внутри квартиры.

Необходимо определить вероятность возникновения возгорания горючего материала в квартире в течение года по причине повреждения в электрической проводке квартиры (появление КЗ; перегрузки; утечки тока на землю; ослабленного и опасно искрящего СКС), если работоспособность квартирного автоматического выключателя:

а) контролировалась один раз в год ($Q_1 = 1$ год), а наличие горючего материала вблизи возможного появления дугового разряда проверялось 1 раз в два месяца ($Q_2 = 0,082$ года);

б) не контролируется (выключатель находится во вводном щитке квартиры) ($g_1 \in 0$), а наличие горючего материала вблизи возможного появления дугового разряда проверялось 1 раз в два месяца ($Q_2 = 0,082$ года);

в) контролировалась один раз в год ($Q_1 = 1$ год), а наличие горючего материала вблизи возможного появления дугового разряда не проверялось ($g_2 \in 0$);

г) не контролируется ($g_1 \in 0$) и наличие горючего материала вблизи возможного появления дугового разряда не проверяется ($g_2 \in 0$).

Решение. Введем обозначения: \bar{X}_1 – появление КЗ в защищаемом узле нагрузки; \bar{X}_2 – появление перегрузки защищаемой части сети; \bar{X}_3 – появление в сети утечки тока на землю; \bar{X}_4 – появление ослабленного и опасно искрящего силового контактного соединения в рассматриваемом участке сети; \bar{Y} – отказ в срабатывании защитного коммутационного аппарата; \bar{Z} – появление горючего материала вблизи возможного повреждения сети.

Предположим, что возгорание горючего материала в квартире происходит при совпадении в пространстве и времени случайных событий, представленных на рис. 2. Каждое из событий, которое входит в «дерево» формирования процесса возгорания горючего материала в квартире, характеризуется соответствующими параметрами.

Используя исходные данные примера, находим параметры процессов $a_i(t)$, $b(t)$ и $x(t)$, $i = 1, 4$:

$$l_1 = \frac{n_1}{NT} = \frac{49}{100 \times 10} = 0,049 \text{ год}^{-1};$$

$$m_1 = \frac{1}{d_1} = \frac{60 \times 60 \times 8760}{0,2} = 1,58 \times 10^8 \text{ год}^{-1},$$

где l_1 – параметр потока появления КЗ в электропроводке квартиры (узле нагрузки); m_1 – обратная величина времени срабатывания защиты; $T = 10$ лет – время наблюдения.

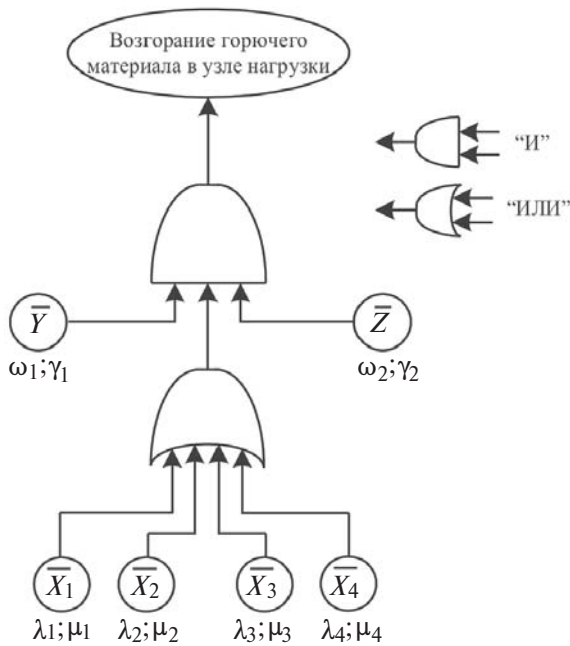


Рис. 2. «Дерево» формирования возгорания горючего материала в квартире при повреждении электрической проводки

Аналогичным образом для данного узла нагрузки находим параметр потока появления:

перегрузки

$$l_2 = \frac{n_2}{NT} = \frac{72}{100 \times 0} = 0,072 \text{ год}^{-1};$$

утечек тока на землю

$$l_3 = \frac{n_3}{NT} = \frac{176}{100 \times 0} = 0,176 \text{ год}^{-1};$$

ослабленного и опасно нагретого СКС

$$l_4 = \frac{n_4}{NT} = \frac{201}{100 \times 0} = 0,201 \text{ год}^{-1}.$$

Считаем, что до момента срабатывания защиты длительность существования каждого повреждения $m_1 = m_2 = m_3 = m_4$.

Определяем параметры w_1 и g_1 процесса $b(t)$:

$$w_1 = \frac{n_5}{NT} = \frac{61}{100 \times 0} = 0,061 \text{ год}^{-1},$$

где w_1 – параметр потока отказов в срабатывании автоматического выключателя.

Используя (18), находим:

$$g_1 = \frac{1}{1 - \frac{1}{0,061}(1 - e^{-0,061 \times 1})} = 33,46 \text{ год}^{-1}.$$

Находим параметры w_2 и g_2 процесса $x(t)$:

$$w_2 = \frac{m}{NT} = \frac{620}{100 \times 0} = 0,62 \text{ год}^{-1},$$

где w_2 – параметр потока появления горючего материала вблизи возможного появления дугообразования в электрической проводке квартиры (узле нагрузки).

Используя формулу (20), находим:

$$g_2 = \frac{1}{0,082 - \frac{1}{0,62}(1 - e^{-0,62 \times 0,082})} = 4,87 \times 10^2 \text{ год}^{-1}.$$

Далее определим вероятность возникновения возгорания горючего материала в конкретных случаях, упомянутых ранее: а) – г). Для пункта а) используя рис. 1, ис-

ходные данные примера, полученные значения l_i ; m_i , $i = 1,4$, и w_1 , g_1 ; w_2 , g_2 , системы уравнений (14)–(16), формулы (17), (24), находим: $F_1(1) = 1,132 \times 10^{-7}$; $F_2(1) = 1,66 \times 10^{-7}$; $F_3(1) = 4,05 \times 10^{-7}$; $F_4(1) = 4,62 \times 10^{-7}$; $t_1 = 8,83 \times 10^6 \text{ год}$; $t_1^{(2)} = 6,016 \times 10^6 \text{ год}$; $t_1^{(3)} = 2,47 \times 10^6 \text{ год}$; $t_1^{(4)} = 2,16 \times 10^6 \text{ год}$; $D_1 = 7,8 \times 10^{13} \text{ год}^2$; $D_1^{(2)} = 3,62 \times 10^{13} \text{ год}^2$; $D_1^{(3)} = 6,09 \times 10^{12} \text{ год}^2$; $D_1^{(4)} = 4,68 \times 10^{12} \text{ год}^2$; $s_1 = 8,83 \times 10^6 \text{ год}$; $s_1^{(2)} = 6,016 \times 10^6 \text{ год}$; $s_1^{(3)} = 2,47 \times 10^6 \text{ год}$; $s_1^{(4)} = 2,16 \times 10^6 \text{ год}$, где $t_1^{(i)}$, $D_1^{(i)}$, $s_1^{(i)}$ – среднее время до первого возгорания горючего материала, дисперсия и стандарт в зависимости от i -го вида повреждения сети, $i = 1,4$ соответственно.

Используя полученные результаты расчетов и формулу (25), находим вероятность возгорания горючего материала в узле нагрузки от всех видов повреждений: $Q(1) = 1,146 \times 10^{-6}$.

Поскольку для каждого вида повреждения соблюдаются условия: $l_i \ll 100 m_i$; $w_1 \ll 100 g_1$; $w_2 \ll g_2$; $g_1 \ll m_1$; $g_2 \ll m_2$ и $t_1 \gg \sqrt{D_1}$, то вероятность возгорания горючего материала в электрифицированном помещении можно определить с помощью приближенной формулы (23). Подставив исходные данные примера, получим: $\tilde{Q}(1) \gg 1,197 \times 10^{-6}$.

Для случая б) $Q_1(1) = 2,65 \times 10^{-4}$; для в) $Q_2(1) = 8,75 \times 10^{-4}$; для г) $Q_3(1) = 4,7 \times 10^{-2}$.

По результатам выполненных расчетов установлено, что, если $l_1 \ll 0,075 \text{ год}^{-1}$, $l_2 \ll 0,065 \text{ год}^{-1}$, $l_3 \ll 0,035 \text{ год}^{-1}$, $l_4 \ll 0,033 \text{ год}^{-1}$, $w_1 \ll 0,058 \text{ год}^{-1}$, $w_2 \ll 0,5 \text{ год}^{-1}$, $g_1 \ll 30 \text{ год}^{-1}$, $g_2 \ll 200 \text{ год}^{-1}$, $m_1 \ll 1,58 \times 10^8 \text{ год}^{-1}$, то $Q(1) \ll 0,999 \times 10^{-6}$.

Выводы. 1. Возгорание горючего материала в электрифицированном помещении может наступить всякий раз при совпадении в пространстве и времени следующих трех случайных событий: повреждение электрической проводки, которая находится под напряжением; отказ в срабатывании системы защиты, которая обеспечивает пожарную безопасность электрической сети; появление горючего материала вблизи места возможного повреждения электрической проводки.

2. Процесс формирования возгорания в электрифицированном помещении по причине повреждения электрической проводки, отказа в срабатывании средств защиты и наличия горючего материала в месте возможного повреждения электрической сети адекватно можно описать с помощью совокупности трех регулярных однородных марковских процессов $a(t)$, $b(t)$ и $x(t)$ с дискретным числом состояний и непрерывным временем.

3. Полученные системы уравнений (14)–(16) дают возможность определить средний промежуток времени t_1 до возгорания горючего материала в электрифицированном помещении и дисперсию D_1 , а также оценить вероятность возгорания горю-

чего материала в электрифицированном помещении в течение определенного времени от частоты появления повреждений в электрической проводке, надежности системы обеспечения пожаробезопасности и сроков ее диагностики, а также от частоты появления горючего материала вблизи возможных источников инициирования возгорания горючего материала и интервалов времени между его обнаружением и устранением.

4. Предлагаемую методику расчета пожаробезопасности сети напряжением 0,4–0,22 кВ в процессе эксплуатации можно использовать при просмотре и уточнении приложения 3 к ГОСТ 12.1.004–91.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.mns.gov.ua/content/nasdopovid2012.html>
2. **ГОСТ 12.1.004–91.** Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1992, 77 с.
3. **Рябинин И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб: Изд-во СПбУ, 2007, 276 с.
4. **Климкина В.И.** Пожары и пожарная безопасность в 2011 году: Статистический сборник. Под общ. ред. В.И. Климкина. – М.: ВНИИПО, 2012, 137 с.
5. **Смелков Г.И.** Пожарная безопасность электропроводок. – М.: Кабель, 2009, 328 с.
6. **Тихонов В.И., Миронов М.А.** Марковские процессы. – М.: Советское радио, 1977, 486 с.
7. **Дж. Кемени, Дж. Скел.** Конечные цепи Маркова. – М.: Наука, 1966, 271 с.

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 11, pp. 36–44

On the Fire Hazard of a 0,4/0,22 kV Electric Network during Its Operation

A.P. KOVALEV, O.Ya. SOLENAYA

Inflammation of combustible material in a room fitted with electrical equipment may take place when the following three random events coincide in space and time: a fault occurred in the energized electric wiring, the protection system intended for ensure fire safety of the electric network failed to come in action, and these was combustible material near the place of possible fault in the electric wiring. A procedure for estimating the fire hazard of a 0.4/0.22 kV network during its operation is proposed on the basis of regular homogeneous Markov processes with a discrete number of states and continuous time. A new analytic dependence for the probability of combustible material to ignite within time t on the network fault occurrence frequency, reliability of protection system and frequency of its diagnostics, as well as on the frequency of combustible material to appear near the place in which possible fault may occur in the electric wiring and the time for which this material dwells at inadmissibly close distance to the place in which an ignition source may appear. A calculation example is given.

Key words: 0.4/0.22 kV electric network, short-circuit fault, fire occurrence frequency, fire safety, Markov process

REFERENCES

1. <http://www.mns.gov.ua/content/nasdopovid2012.html>
2. **GOST 12.1.004–91.** Pozharnaya bezopasnost'. Obshchiye trebovaniya (Fire safety. General requirements). Moscow. Publ. Standarts, 1992, 77 p.

8. **Розанов Ю.А.** Случайные процессы. – М.: Наука, 1979, 184 с.
9. **Сандлер Дж.** Техника надежности систем. – М.: Наука, 1966, 300 с.
10. **Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.К., Каштанов В.А. и др.** Вопросы математической теории надежности/Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983, 376 с.
11. **Карлин С.** Основы теории случайных процессов. – М.: Мир, 1971, 536 с.
12. **Ковалев А.П.** О проблемах оценки безопасности технологических объектов. – Электричество, 1991, № 7, с. 50–55.
13. **Ковалев А.П., Шевченко А.В., Белоусенко И.В.** Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6 кВ. – Промышленная энергетика, 1991, № 6, с. 28–31.

[24.03.14]

А в т о р ы : Ковалев Александр Петрович окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института в 1971 г. и математический факультет Донецкого государственного университета в 1976 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию «Основы теории и методы оценки безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах». Профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» Донецкого национального технического университета (ДНТУ).

Соленая Оксана Ярославовна окончила электротехнический факультет ДНТУ в 2007 г. и факультет менеджмента ДНТУ в 2009 г. Аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ДНТУ.

3. **Ryabinin I.A.** Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh system (Reliability and safety of structurally complex systems). St. Petersburg. Publ. St.Petersburg State University, 2007, 276 p.

4. **Klimkina V.I.** Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2011 godu: Statisticheskii sbornik/Pod redaktsiyey V.I. Klimkina (Fires and fire safety in 2011. Statistical digest). Moscow. VNIPO, 2012, 137 p.

5. **Smelkov G.I.** *Pozharnaya bezopasnost' elektroprovodok* (Fire safety of electric wiring). Moscow. Publ. «Kabel'», 2009, 328 p.
6. **Tikhonov V.I., Mironov M.A.** *Markovskiye protsessy* (Markov processes). Moscow. Publ. «Sovetskoye Radio», 1977, 486 p.
7. **Kemeni J., Skel J.** *Konechnye tsepi Markova* (Finite Markov chains). Moscow. Publ. «Nauka», 1966, 271 p.
8. **RozaNov Yu.A.** *Sluchainye protsessy*. (Stochastic processes). Moscow. «Nauka», 1979, 184 p.
9. **Sandler J.** *Technika nadezhnosti system* (Technique reliability of systems). Moscow. Publ. «Nauka», 1966, 300 p.
10. **Barzilovich Ye.Yu., Belyayev Yu.K., Kashtanov V.A.** *Voprosy matematicheskoi teorii nadezhnosti/Pod redaktsiyey B.V. Gnedenko* (Questions of the mathematical theory of reliability). Moscow. Publ. «Radio i zvyaz'», 1983, 376 p.
11. **Karlin S.** *Osnovy teorii sluchainykh protsessov* (Fundamentals of theory of stochastic processes). Moscow. Publ. «Mir», 1971, 536 p.
12. **Kovalev A.P.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 1991, No. 7, pp. 50–55.
13. **Kovalev A.P., Shevchenko A.V., Belousenko I.V.** *Promyshlennaya energetika* (Industrial energy), 1991, No. 6, pp. 28–31.

Authors: Kovalev Aleksandr Petrovich (Donetsk, Ukraine) – Doctor Techn. Sci. He is a Professor of the Donetsk National Technical University (DNTU).

Solenaya Oksana Yaroslavovna (Donetsk, Ukraine) – Ph. D. Student at the DNTU.