

УДК 622.237.7:681.583.3

Е.Н. Новиков (канд. техн. наук, доц.)ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова»
E-mail: en1313@i.ua**ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ
АППАРАТУРЫ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ**

Выполнен анализ эффективности применения аппаратуры газового контроля при эксплуатации электрооборудования на пластах опасных по внезапным выбросам угля и газа. На его основе разработана математическая модель, объясняющая процесс возникновения взрывов газа из-за отказов оборудования защиты. Предложена методика расчетов эффективности применения аппаратуры газового контроля при эксплуатации электрооборудования на пластах опасных по внезапным выбросам угля и газа.

Ключевые слова: эффективность применения, взрывобезопасность, контроль метана, способы диагностики, нормы надежности.

Общая постановка проблемы

Среди всех видов аварий особую опасность представляют взрывы метано-воздушных смесей и угольной пыли. Они приводят к групповым несчастным случаям со смертельным исходом, большим разрушениям горных выработок, оборудования и оснащения. Одним из наиболее опасных явлений, приводящим к образованию взрывоопасных газовых смесей, являются внезапные выбросы угля, породы и газа. Одним из важных вопросов обеспечения техники безопасности в угольных шахтах является своевременное отключение электроэнергии при формировании опасной газовой ситуации. Этим обеспечивается безопасность работ по газовому фактору, которая находится в зависимости от эффективности мероприятий по борьбе с выделением рудничных газов вообще и эффективности средств газового контроля в частности.

Причем, этому вопросу посвящено несколько работ [1 – 3], которые позволили на основе вероятностных методов выработать критерии оценки эффективности обеспечения безопасности применения электрооборудования в шахтах. Однако эти модели не учитывают наличие аппаратуры газовой защиты (АГЗ).

Процесс внезапного выброса угля и газа освещен в ряде работ [4, 5]. Этот процесс характеризуется быстрым отторжением угля и горной массы от обнаженного горного массива, отбросом горной массы на значительные расстояния под действием возникшего давления и быстрым загазированием горных выработок с нарастанием концентрации метана до опасного содержания, вплоть до взрывчатой концентрации.

Постановка задач исследования

Целью данной публикации является разработка методов анализа эффективности применения аппаратуры газового контроля при эксплуатации электрооборудования на пластах опасных по внезапным выбросам угля и газа.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать математическую модель объясняющую процесс возникновения взрывов газа из-за отказов оборудования защиты.

Решение задач и результаты исследований

Взрыв газа в выработке шахты разрабатывающей пласты опасные по внезапным выбросам угля и газа может произойти при совпадении в пространстве и времени трех событий: произошел отказ в системе защиты электрооборудования, произошел отказ в автоматической газовой защите (контроль концентрации), произошел отказ в канале контроля скорости нарастания концентрации метана (быстродействующая автоматическая газовая защита БАГЗ).

Будем предполагать, что опасная концентрация метана в шахтной выработке при внезапном выбросе угля и газа существует. Нас интересует вероятность взрывов в течение времени t , т.е. $F(t)$, среднее время до первого взрыва T_1 , дисперсия времени до первого взрыва σ^2 .

Изменение состояния во времени системы защиты электрооборудования, контроль предельной концентрации метана в АГЗ, контроль предельной скорости нарастания концентрации метана в БАГЗ $\xi(t)$, $\gamma(t)$, $\varphi(t)$.

Состояние системы защиты электрооборудования $\xi(t)$ может принимать два значения: 0 - защита в рабочем состоянии; 1 - защита находится в неработоспособном состоянии. Будем считать состояние $\xi(t)$ случайной функцией, характер изменения которой во времени состоит в следующем: существуют чередующиеся отрезки времени $\xi_0^{(0)}, \xi_1^{(0)}, \xi_2^{(0)}, \dots, \xi_n^{(0)}, \xi_0^{(1)}, \xi_1^{(1)}, \xi_2^{(1)}, \dots, \xi_n^{(1)}$. Промежутки $\xi_n^{(0)}$ - работоспособное состояние системы защиты электрооборудования, а $\xi_n^{(1)}$ - неработоспособное состояние системы защиты электрооборудования.

Работу аппаратуры газовой защиты представим с помощью функции $\gamma(t)$, которая с течением времени может принимать два значения: 0 - защита в рабочем состоянии; 1 - защита находится в неработоспособном состоянии. Характер изменения функции $\gamma(t)$ во времени представим в виде ряда чередующихся случайных промежутков времени: $\gamma_0^{(0)}, \gamma_1^{(0)}, \gamma_2^{(0)}, \dots, \gamma_m^{(0)}$, и $\gamma_0^{(1)}, \gamma_1^{(1)}, \gamma_2^{(1)}, \dots, \gamma_m^{(1)}$. Последовательно $\gamma(t) = 0$ и $\gamma(t) = 1$. Промежутки $\gamma_m^{(0)}$ и $\gamma_m^{(1)}$ - работоспособные и неработоспособные состояния аппаратуры газовой защиты соответственно.

Работу аппаратуры по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана в течении времени t представим с помощью функции $\varphi(t)$, которая как и две предыдущие функции может принимать два значения: 0 - аппаратура по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана в работоспособном состоянии и 1 - аппаратура по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана в неработоспособном состоянии. Характер изменения функции $\varphi(t)$ во времени представим в виде ряда чередующихся случайных промежутков времени: $\varphi_0^{(0)}, \varphi_1^{(0)}, \varphi_2^{(0)}, \dots, \varphi_r^{(0)}$, и $\varphi_0^{(1)}, \varphi_1^{(1)}, \varphi_2^{(1)}, \dots, \varphi_r^{(1)}$. Промежутки $\varphi_r^{(0)}$, и $\varphi_r^{(1)}$ - работоспособные и неработоспособные состояния аппаратуры по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана.

В данной модели взрыв метана в выработке соответствует моменту соприкосновения промежутков времени $\xi_n^{(1)}$, $\gamma_m^{(1)}$, и $\varphi_r^{(1)}$. Возникновение взрыва не зависит от общей длины наложившихся промежутков времени $\xi_n^{(1)}$, $\gamma_m^{(1)}$, и $\varphi_r^{(1)}$, а зависит только от того соприкоснулись они или нет.

Статистическая природа функции $\xi(t)$ следующая: вероятность выхода из строя системы защиты электрооборудования за промежуток времени Δt равна $\lambda_1 \cdot \Delta t + \chi(\Delta t)$, где $\chi(\Delta t)$ - обозначает величину высшего порядка малости по сравнению с Δt , причем эта вероятность не зависит от предшествующего значения Δt . Вероятность восстановления работоспособного состояния системы защиты электрооборудования за время Δt равна $\mu_1 \cdot \Delta t + \chi(\Delta t)$. Величины λ_1 и μ_1 являются параметрами процесса $\xi(t)$. Параметр λ_1 характеризует интенсивность или скорость, с которой промежутки времени работоспособного состояния системы защиты электрооборудования сменяются на неработоспособные, а μ_1 - интенсивность или скорость смены неработоспособного состояния системы защиты электрооборудования на работоспособное.

Принятые допущения означают, что $\xi(t)$ можно рассматривать как процесс Маркова с двумя состояниями: 0 - работоспособное состояние и 1 - неработоспособное состояние.

Статистическая природа функции $\gamma(t)$ следующая: вероятность выхода из строя газовой защиты за промежуток времени равна Δt равна $\lambda_2 \cdot \Delta t + \chi(\Delta t)$, а вероятность восстановления его работоспособного состояния за время Δt равна $\mu_2 \cdot \Delta t + \chi(\Delta t)$. Величины λ_2 и μ_2 являются параметрами процесса $\gamma(t)$.

Параметр λ_2 характеризует интенсивность или скорость, с которой промежутки времени работоспособного состояния газовой защиты сменяются на неработоспособные. А μ_2 - интенсивность или скорость смены неработоспособного состояния газовой защиты на работоспособное.

Аналогичная статистическая природа и функции $\varphi(t)$. Вероятность выхода из строя аппаратуры по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана за промежуток времени Δt равна $\lambda_3 \cdot \Delta t + \chi(\Delta t)$, а вероятность восстановления его работоспособного состояния за время Δt равна $\mu_3 \cdot \Delta t + \chi(\Delta t)$.

Величины λ_3 и μ_3 являются параметрами процесса $\varphi(t)$, где λ_3 характеризует интенсивность или скорость с которой промежутки времени работоспособного состояния аппаратуры по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана сменяются на неработоспособные; μ_3 характеризует интенсивность или скорость, с которой промежутки времени неработоспособного состояния аппаратуры по контролю предельной скорости нарастания концентрации метана сменяются на работоспособные.

Диагностика состояния системы защиты электрооборудования, контроля предельной концентрации метана в АГЗ, контроля предельной скорости нарастания концентрации метана в БАГЗ производится с интервалами времени Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 соответственно. Предполагается, что диагностика абсолютно надежная.

Взрыв в выработке в этой математической модели происходит в момент встречи процессов в состоянии 1, т.е. когда $\xi(t) = 1$, $\gamma(t) = 1$ и $\varphi(t) = 1$. Будем считать, что в начальный момент времени $\xi(t) = 0$, $\gamma(t) = 0$ и $\varphi(t) = 0$. Решение состоит в том, чтобы зная параметры процессов λ_1 , μ_1 , λ_2 , μ_2 и λ_3 , μ_3 определить: вероятность взрывов в течение времени t , т.е. $F(t)$, среднее время до первого взрыва T_1 , дисперсия времени до первого взрыва σ^2 .

Совокупность процессов $\xi(t)$, $\gamma(t)$ и $\varphi(t)$ рассмотрим как один процесс Маркова $\Psi(t)$ с восьмью дискретными состояниями и непрерывным временем. В любой момент времени система может находиться в одном из восьми состояний:

$$E \{e_1(0,0,0), e_2(1,0,0), e_3(0,1,0), e_4(0,0,1), e_5(1,0,1), e_6(0,1,1), e_7(1,1,0), e_8(1,1,1)\}.$$

При случайном попадании системы в поглощающее состояние $e_8(1, 1, 1)$ происходит взрыв газа в выработке. Время нахождения системы в каждом состоянии обозначим ζ_i .

Полученный марковский процесс $\Psi(t)$ полностью характеризуется графом вероятностей переходов (рис. 1) и матрицей интенсивностей переходов, которая имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_2 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 & 0 \\ \mu_3 & 0 & 0 & \alpha_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & \alpha_5 & 0 & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & \alpha_6 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 & \lambda_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где $\alpha_1 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$; $\alpha_2 = 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$; $\alpha_3 = 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$; $\alpha_4 = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)$; $\alpha_5 = 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \mu_3)$; $\alpha_6 = 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3)$; $\alpha_7 = 1 - (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3)$.

Среднее время до первого взрыва определим из системы уравнений в матричном виде [6]:

$$\tau = (I - Q)^{-1} \cdot \alpha, \tag{2}$$

где I - единичная матрица; Q - матрица, полученная из матрицы (1) путем исключения поглощающего состояния (строки из элементов 0,0, ..., 1 и соответствующего столбца); α - вектор-столбец, все элементы которого равны 1; $\tau = [\tau_i]_{i=1}^7$ - вектор столбец.

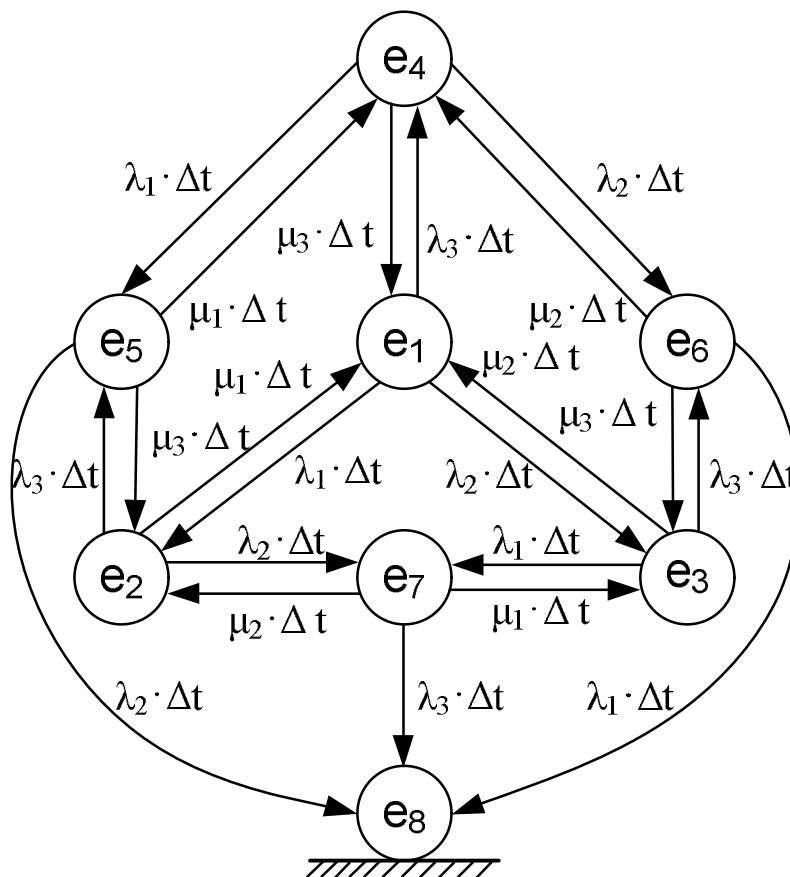


Рисунок 1 - Графы возможных переходов рассматриваемой системы

В том случае, если заданы интервалы времени между диагностиками Θ_i системы защиты электрооборудования, контроля предельной концентрации метана в АГЗ и контроля предельной скорости нарастания концентрации метана в БАГЗ, тогда μ_i вычисляется следующим образом [6]:

$$\mu_i = \frac{1}{\Theta_i - \frac{1}{\lambda_i} [1 - e^{-\lambda_i \Theta_i}]} \tag{3}$$

В том случае, если $\Theta_i \cdot \lambda_i < 0,1$, тогда:

$$\mu_i = \frac{2}{\lambda_i \Theta_i^2} \tag{4}$$

Если выполняется условие $\lambda_i \leq 0,01 \mu_i$, то используя систему уравнений (2), матрицу (1) и формулу (4), находим среднее время до первого взрыва:

$$\tau_{cp} = \frac{4}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 (\lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \Theta_2^2 \cdot \Theta_3^2 + \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot \Theta_1^2 \cdot \Theta_3^2 + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \Theta_1^2 \cdot \Theta_2^2)} \quad (5)$$

В том случае если $\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta_3 = \Theta$, тогда формулу (5) можно записать в виде:

$$\tau_{cp} = \frac{4}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \Theta^4 [\lambda_3 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2]} \quad (6)$$

Дисперсию времени до первого взрыва находим из системы уравнений [6]:

$$\sigma^2 = (2 \cdot N - 1) \cdot \tau - \tau^* \quad (7)$$

где $N = (I - Q)^{-1}$ - фундаментальная матрица; Q - получается из матрицы интенсивности переходов (1) путем исключения поглощающего состояния (строчки из элементов 0,0, ..., 1 и соответствующего столбца); $\tau^* = [\tau_i^*]_{i=1}^7$ - вектор столбец.

Функция распределения интервалов времени между взрывами в течении времени t запишем как:

$$F(t) = 1 - \sum_{i=1}^7 P_i(t) \quad (8)$$

где $P_i(t)$ находится из системы уравнений [7]:

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A$$

$\dot{P}(t) = [\dot{P}_i(t)]_{i=1}^7$ - вектор строка; A - матрица, которая получается из матрицы интенсивности переходов (1) путем исключения единицы из главной диагонали и поглощающего состояния - восьмой строки и восьмого столбца.

В том случае, если выполняется условие:

$$\tau_1 \approx \sigma_1$$

тогда

$$F(t) = 1 - e^{-H \cdot t} \quad (9)$$

где $H = \frac{1}{\tau_1}$.

Выводы

1. На основе однородных марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем, разработана математическая модель, которая объясняет причины возникновения взрывов газа в выработках шахты из-за повреждений системы защиты электрооборудования, контроля предельной концентрации метана в АГЗ и контроля предельной скорости нарастания концентрации метана в БАГЗ.

2. Предложена методика расчетов эффективности функционирования быстросействующей аппаратуры газового контроля (БАГЗ).

Список использованной литературы

1. Ковалев П.Ф. Надежность и безопасность применения электрооборудования в угольных шахтах / П.Ф. Ковалев, В.П. Коптиков, А.П. Ковалев // Безопасность труда в промышленности. - 1973. - №7. - С. 40-41.

2. Новиков Е.Н. К вопросу оценки эффективности функционирования газовой защиты для шахт опасных по внезапным выбросам / Е.Н. Новиков // Способы и средства безопасного ведения взрывных работ: сб. науч. тр. МакНИИ – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1980. – С. 39 – 44.
3. Дремов В.И. Применение статистических критериев для оценки точности функционирования информационной части релейной защиты / В.И. Дремов, А.Г. Воронцов // Известия высших учебных заведений. – 1973. - №7. – С. 15-20.
4. Бобров И. В. Работы МакНИИ в области борьбы с внезапными выбросами угля и газа за 1956-1960 гг. / И. В. Бобров, Р. М. Кричевский. – Макеевка-Донбасс, 1960. – 143 с.
5. Волошин Н. Е. Газовыделение при выбросах / Н.Е. Волошин, А.Е. Ольховиченко, В.А. Воронин. – Донецк: Донбасс, 1976. – 43 с.
6. Карлин С. Основы теории случайных процессов / С. Карлин. - М.: Мир, 1971. – 536 с.
7. Венцель Е.С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров. - М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.

Надійшла до редакції:
15.04.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Ковальов Є.Б.

Є.М. Новіков

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Про оцінку ефективності швидкодіючої апаратури газового захисту. Виконаний аналіз ефективності застосування апаратури газового контролю при експлуатації електроустаткування на пластах небезпечних по раптових викидах вугілля і газу. На його основі розроблена математична модель, що пояснює процес виникнення вибухів газу із-за відмов устаткування захисту. Запропонована методика розрахунків ефективності застосування апаратури газового контролю при експлуатації електроустаткування на пластах небезпечних по раптових викидах вугілля і газу.

Ключові слова: ефективність застосування, вибухобезпечність, контроль метану, способи діагностики, норми надійності.

E.N. Novikov

Donetsk National Technical University

Estimating the Efficiency of Fast-Acting Gas Protection Device. Among all types of failures the explosions of methane and coal dust mixtures are of particular danger. They result in group accidents with lethality and great damage of equipment. Among the most dangerous phenomena leading to explosive gas mixtures formation are sudden outbursts of coal, rock and gas. One of the important problems of accident prevention in coal mines is timely disconnection of electric power in case of a gas accident. This will provide gas safety, which depends on the efficiency of measures against mine gases emission in general and on the performance of gas control facilities in particular. On the basis of homogeneous Markovian random processes with discrete number of states and continuous time, we developed a mathematical model, which explains the causes of gas explosions in mines due to the damage of the systems of electrical equipment protection, control of maximum methane concentration and of maximum rate of methane concentration growth. We analyzed the performance of gas control devices when using electrical equipment in seams prone to sudden coal and gas outbursts and suggested the methods of its calculation.

Keywords: performance, explosion, methane control, diagnostic methods, reliability standards.