

# **ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ФАКТА ВОЗГОРАНИЙ ПО СИГНАЛАМ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ**

**В.И. Куватов, доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы РФ.**

**Военно-морской институт радиоэлектроники им. А.С. Попова.**

**А.Д. Анашечкин, кандидат технических наук, доцент;**

**С.Н. Хадзиев.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Пожарная безопасность объектов во многом определяется способностью системы автоматической пожарной сигнализации своевременно и достоверно обнаружить факт возгорания. Предложены алгоритмы оценки достоверности возгорания по сигналам пожарных извещателей, учитывая три фактора: априорную вероятность возгорания для объектов данного типа, вероятность правильного обнаружения сигнала о возгорании и вероятность ложной тревоги.

*Ключевые слова:* автоматический пожарный извещатель, априорная вероятность возгорания, вероятность правильного обнаружения сигнала о возгорании, вероятность ложной тревоги, марковская модель процесса с двумя состояниями

## **ESTIMATION OF THE CASE OF IGNITION TRANSMITTED BY FIRE DETECTORS**

**V.I. Kuvatov.**

**A.D. Anachetchkin; S.N. Khadziev.**

**Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia**

Fire safety of an objects depends from system of the automatic fire alarm, which is possible to find out the ignition fact in time and authentically. There are some algorithms of an estimation of the case of ignition transmitted by fire detectors. We are considering three factors: aprioristic probability of ignition for objects of given type, probability of correct detection of an ignition signal and probability of a false alarm.

*Key words:* the automatic fire detectors, aprioristic probability of ignition, probability of correct detection of an ignition signal, probability of a false alarm, Markov's model of process with two conditions

Пожарная безопасность объектов во многом определяется способностью системы автоматической пожарной сигнализации своевременно и достоверно обнаружить факт возгорания. При этом надо помнить, что АПС формирует сигналы на запуск систем пожарной автоматики, а именно, пожаротушение, оповещения, дымоудаления, осуществляет взаимодействие со СКУД в рамках организации эвакуационных путей и с другими инженерными и технологическими системами жизнеобеспечения объекта [1, 2]. Однако сигналы тревог, в случае ложного срабатывания автоматических пожарных извещателей (АПИ), приводят к несанкционированному запуску систем пожарной автоматики со всеми вытекающими последствиями, которые часто соизмеримы с потерями от пожаров.

Реальный путь повышения качества работы системы АПС связан со снижением вероятности ложных тревог при высокой вероятности правильного обнаружения возгорания. Известно, что качество и надежность изделия выступают как результат выполнения совокупности основных требований, к которым можно отнести обоснованный выбор физических принципов получения и преобразования сигналов, построение эффективных алгоритмов обработки информации. Требуемых характеристик можно добиться двумя

путями. Первый путь связан с повышением технических характеристик АПИ, второй – с совершенствованием алгоритмов обработки сигналов, поступающих от АПИ [3].

В настоящее время при разработке побудительной (запускающей) подсистемы установок пожаротушения наряду с направлением, связанным с повышением технических характеристик АПИ все большее внимание уделяется разработке алгоритмов обработки сигналов от АПИ. Однако эти алгоритмы носят достаточно простой характер. Они основаны на требованиях руководящих документов, в соответствии с которыми каждая точка защищаемой поверхности должна контролироваться не менее чем двумя АПИ при условии резерва [4]. Сигнал о возгорании считается достоверным, если сработало не менее двух АПИ. В алгоритмах такого типа не учитывается три фактора: априорная вероятность возгорания для объектов данного типа, вероятность правильного обнаружения сигнала о возгорании и вероятность ложной тревоги. Ниже предложен алгоритм обработки сигналов от АПИ, направленный на преодоление этих недостатков.

Пусть от некоторых из  $n$  АПИ на пожарный прибор управления (ППУ) поступили сообщения о возгорании. Необходимо оценить вероятность того, что возгорание действительно имеет место. Приведем формальную постановку задачи.

Рассмотрим  $(n+1)$ -мерный случайный вектор  $(\theta, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ . Первая компонента данного вектора представляет собой индикатор наличия факта возгорания:  $\theta=1$ , если факт имел место в действительности и  $\theta=0$ , в противном случае. Остальные компоненты представляют собой индикаторы наличия информации о факте. Компонента  $Y_i=1$ , если  $i$ -й АПИ передал на ППУ сигнал о возгорании и  $Y_i=0$ , в противном случае. ППУ по наблюдаемым компонентам  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  должен сделать заключение о том, чему равна ненаблюдаемая компонента  $\theta$ .

Рассмотрим вначале одномерный случай ( $n=1$ ). Пусть нам известна априорная вероятность того, что факт возгорания на момент времени  $t$  на самом деле имеет место –  $P_t(\theta=1) = Pa_t$ . Известны также вероятность правильного обнаружения факта –  $P(Y=1/\theta=1)$  и вероятность ложной тревоги –  $P_t(Y=1/\theta=0)$ . Обозначим эти вероятности  $\rho_c$  и  $\rho_\phi$  соответственно.

Пусть  $Y_i=1$ . Выразим совместную вероятность событий  $(\theta=1)$  и  $(Y=1)$  –  $P_t((\theta=1) \cdot (Y=1))$  через вероятности  $Pa_t$ ,  $\rho_c$  и  $\rho_\phi$ . Запишем формулу для вычисления  $P_t((\theta=1) \cdot (Y=1))$  двумя способами:

$$\begin{aligned} P_t((\theta=1) \cdot (Y=1)) &= P_t(\theta=1) \cdot P((Y=1)/(\theta=1)) = Pa_t \cdot \rho_c. \\ P_t((\theta=1) \cdot (Y=1)) &= P_t(Y=1) \cdot P_t((\theta=1)/(Y=1)). \end{aligned}$$

Приравняем правые части обоих выражений друг к другу,

$$Pa_t \cdot \rho_c = P_t(Y=1) \cdot P_t((\theta=1)/(Y=1)).$$

Мы знаем, что на ППУ поступил сигнал  $Y=1$ . Нам нужно найти вероятность того, что  $\theta=1$ , при условии того, что  $Y=1$ ,  $P_t((\theta=1)/(Y=1))$ ,

$$P_t((\theta=1)/(Y=1)) = \frac{Pa_t \cdot \rho_c}{P_t(Y=1)}. \quad (1)$$

По формуле полной вероятности сложного события имеем

$$P_t(Y=1) = P_t(\theta=1) \cdot P(Y=1/\theta=1) + P_t(\theta=0) \cdot P(Y=1/\theta=0) = Pa_t \cdot \rho_c + (1 - Pa_t) \cdot \rho_\phi.$$

Подставив в (1) вместо  $P(Y=1)$  выражение  $Pa_t \cdot \rho_c + (1 - Pa_t) \cdot \rho_\phi$ , получим

$$P_t((\theta = 1)/(Y = 1)) = \frac{Pa_t \cdot \rho_c}{Pa_t \cdot \rho_c + (1 - Pa_t) \cdot \rho_\phi} = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \frac{\rho_\phi}{\rho_c}}. \quad (2)$$

Формула (2) есть частный случай формулы Байеса для проверки гипотезы о том, что  $\theta=1$ , при условии  $Y=1$ . Всего здесь проверяемых гипотез две:  $H_1: \theta=1$ ,  $H_2: \theta=0$ , и наблюдаемых несовместных событий тоже два:  $Y=1$ ,  $Y=0$ .

Пусть  $Y=0$ . Тогда:

$$\begin{aligned} P_t((\theta = 1) \cdot (Y = 0)) &= P_t(\theta = 1) \cdot P((Y = 0)/(\theta = 1)) = Pa_t \cdot (1 - \rho_c). \\ P_t((\theta = 1) \cdot (Y = 0)) &= P_t(Y = 0) \cdot P_t((\theta = 1)/(Y = 0)). \end{aligned}$$

Приравняем правые части обоих выражений друг к другу.

$$Pa_t \cdot (1 - \rho_c) = P_t(Y = 0) \cdot P_t((\theta = 1)/(Y = 0)).$$

Отсюда получим

$$P_t((\theta = 1)/(Y = 0)) = \frac{Pa_t \cdot (1 - \rho_c)}{P_t(Y = 0)}. \quad (3)$$

Но

$$\begin{aligned} P_t(Y = 0) &= P_t(\theta = 1) \cdot P(Y = 0/\theta = 1) + P_t(\theta = 0) \cdot P(Y = 0/\theta = 0) = \\ &= Pa_t \cdot (1 - \rho_c) + (1 - Pa_t) \cdot (1 - \rho_\phi). \end{aligned}$$

Подставив в (3) вместо  $P_t(Y=0)$  выражение  $Pa_t \cdot (1 - \rho_c) + (1 - Pa_t) \cdot (1 - \rho_\phi)$ , получим

$$P_t((\theta = 0)/(Y = 1)) = \frac{Pa_t \cdot (1 - \rho_c)}{Pa_t \cdot (1 - \rho_c) + (1 - Pa_t) \cdot (1 - \rho_\phi)} = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \frac{1 - \rho_\phi}{1 - \rho_c}}. \quad (4)$$

Формула (4) представляет собой частный случай формулы Байеса для проверки гипотезы о том, что  $\theta=0$ , при условии  $Y=1$ .

Рассмотрим двухмерный случай ( $n=2$ ).

Пусть  $Y_1=1$ ,  $Y_2=1$ . События  $Y_1=1$  и  $Y_2=1$  зависят от того, чему равно  $\theta$ , но не зависят друг от друга. Следовательно,

$$\begin{aligned} P_t((\theta = 1) \cdot (Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)) &= P_t(\theta = 1) \cdot P((Y_1 = 1)/(\theta = 1)) \cdot P((Y_2 = 1)/(\theta = 1)) = Pa_t \cdot \rho_{1c} \cdot \rho_{2c} \\ P_t((\theta = 1) \cdot (Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)) &= P_t((Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)) \cdot P_t(\theta = 1/((Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1))). \end{aligned}$$

Приравняем правые части обоих выражений друг к другу.

$$Pa_t \cdot \rho_{1c} \cdot \rho_{2c} = P_t(Y_1 = 1) \cdot P_t(Y_2 = 1) \cdot P_t((\theta = 1)/(Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)).$$

Отсюда получим

$$P_t((\theta = 1)/(Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)) = \frac{Pa_t \cdot \rho_c}{P_t((Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1))}. \quad (5)$$

Но

$$P_t((Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)) = P_t(\theta = 1) \cdot P((Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)/\theta = 1) +$$

$$+ P_t(\theta = 0) \cdot P((Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1) / \theta = 0) = Pa_t \cdot \rho 1_c \cdot \rho 2_c + (1 - Pa_t) \cdot \rho 1_\phi \cdot \rho 2_\phi.$$

Подставив в (5) вместо  $P_t((Y_1=1) \cdot (Y_2=1))$  выражение  $Pa_t \cdot \rho 1_c \cdot \rho 2_c + (1 - Pa_t) \cdot \rho 1_\phi \cdot \rho 2_\phi$ , получим

$$\begin{aligned} P_t((\theta = 1) / (Y_1 = 1) \cdot (Y_2 = 1)) &= \frac{Pa_t \cdot \rho 1_c \cdot \rho 2_c}{Pa_t \cdot \rho 1_c \cdot \rho 2_c + (1 - Pa_t) \cdot \rho 1_\phi \cdot \rho 2_\phi} = \\ &= \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \frac{\rho 1_\phi \cdot \rho 2_\phi}{\rho 1_c \cdot \rho 2_c}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Пусть  $Y_1=0$  и  $Y_2=0$ . Тогда, по аналогии с формулами (2) и (6), из формулы (4) сразу же получим

$$P_t((\theta = 1) / (Y_1 = 0) \cdot (Y_2 = 0)) = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \frac{(1 - \rho 1_\phi) \cdot (1 - \rho 2_\phi)}{(1 - \rho 1_c) \cdot (1 - \rho 2_c)}}.$$

Можно показать, что для события  $(Y_1=0) \cdot (Y_2=1)$  справедливой является формула

$$P_t((\theta = 1) / (Y_1 = 0) \cdot (Y_2 = 1)) = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \frac{(1 - \rho 1_\phi) \cdot \rho 2_\phi}{(1 - \rho 1_c) \cdot \rho 2_c}},$$

а для события  $(Y_1=0) \cdot (Y_2=1)$  - формула

$$P_t((\theta = 1) / (Y_1 = 0) \cdot (Y_2 = 1)) = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \frac{(1 - \rho 2_\phi) \cdot \rho 1_\phi}{(1 - \rho 2_c) \cdot \rho 1_c}}.$$

Обозначим  $\Lambda_i^{-1} = \frac{\rho i_\phi}{\rho i_c}$ , если  $Y_i=1$  и  $\Lambda_i^{-1} = \frac{1 - \rho i_\phi}{1 - \rho i_c}$ , если  $Y_i=0$ .

Тогда все четыре случая можно объединить одной формулой:

$$P_t(\theta = 1 / Y_1, Y_2) = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \Lambda_1^{-1} \cdot \Lambda_2^{-1}}.$$

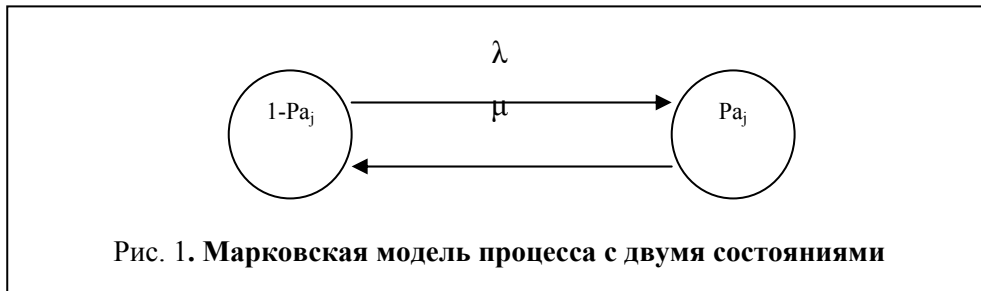
Для случая  $n > 2$ , методом математической индукции можно показать, что

$$P_t(\theta = 1 / Y) = \frac{Pa_t}{Pa_t + (1 - Pa_t) \cdot \prod_{i=1}^n \Lambda_i^{-1}}, \quad (7)$$

где  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ .

Формула (7) позволяет оценить условную вероятность возгорания объекта в момент времени  $t$ , если сработала часть из  $n$ , имеющихся на объекте АПИ. Чтобы рассчитать эту вероятность, необходимо знать характеристики АПИ: вероятность правильного обнаружения возгорания, вероятность ложной тревоги и априорную вероятность возгорания объекта в момент времени  $t$ . Вероятностью ложной тревоги обычно задаются. Затем на основании этой вероятности типа АПИ и величины соотношения сигнала к помехе, рассчитывают вероятность правильного обнаружения [5–7].

Для расчета вероятности  $Pa_t$  может быть использован следующий подход. Пусть из статистических данных нам известно, что время между возгораниями объектов данного типа распределено по показательному закону с интенсивностью  $\lambda$ , а время восстановления объекта после возгорания – по показательному закону с интенсивностью  $\mu$ . Поток возгораний такого типа моделируется Марковским процессом с двумя состояниями, рис 1.



Уравнение динамики Марковского процесса с двумя состояниями, рис.1, имеет вид

$$\frac{dPa_t}{dt} = -\mu \cdot Pa_t + \lambda \cdot [1 - Pa_t].$$

Решение этого уравнения при начальном условии  $Pa$  выражается формулой

$$Pa_{j+1} = Pa_j \cdot e^{-(\lambda+\mu)\Delta t} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - e^{-(\lambda+\mu)\Delta t}].$$

Для начального момента времени примем  $Pa=0$ . Тогда на момент первого измерения

$$Pa_t = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - e^{-(\lambda+\mu)t}]. \quad (8)$$

Таким образом, накопление информации о противопожарном состоянии объекта происходит в соответствии с итерационными формулами

$$P_{t+\Delta t}(\theta = 1/Y) = \frac{Pa_{t+\Delta t}}{Pa_{t+\Delta t} + (1 - Pa_{t+\Delta t}) \cdot \prod_{i=1}^n \Lambda_i^{-1}}, \quad (9)$$

$$Pa_{t+\Delta t} = P_t(\theta = 1/Y) \cdot e^{-(\lambda+\mu)\Delta t} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - e^{-(\lambda+\mu)\Delta t}], \quad (10)$$

где  $\Delta t$  – промежуток времени между съемом информации с АПИ;  $Pa_{t+\Delta t}$  – экстраполированная вероятность возгорания на момент времени  $t+\Delta t$ .

Предлагаемый подход позволяет сформулировать следующий алгоритм оценки достоверности возгорания по сигналам пожарных извещателей:

1. Зададимся верхней  $P_v$  и нижней  $P_n$  значениями вероятностей возгорания. Будем считать факт возгорания установленным, если  $P(\theta = 1) \geq P_v$ , факт отсутствия пожара установленным, если  $P(\theta = 1) \leq P_n$ , ситуацию неопределенной, если  $P_v \geq P(\theta = 1) \geq P_n$ .

2. Найдем  $Pa$  по формуле (8).

3. По формуле (10) найдем экстраполированную вероятность  $Pa_{t+\Delta t}$ .

4. По формуле (9) найдем  $P_{t+\Delta t}(\theta = 1/Y)$  для вектора  $Y$ .

5. Если выполняется неравенство  $P_{t+\Delta t}(\theta = 1/Y) \leq P_n$ , считаем, что возгорания нет. Переходим к шагу 3.

6. Если окажется, что  $P_v \geq P(\theta = 1) \geq P_n$ , обстановка становится пожароопасной. Проверяем состояние объекта. Если возгорания нет, переходим к шагу 3 алгоритма. Если возгорание есть, включаем режим тушения АУПТ.

7. Если окажется, что  $P(\theta = 1) \geq P_v$ , считаем, что возгорание есть, автоматически включается режим тушения АУПТ.

### **Литература**

1. Производственная и пожарная автоматика: учебник / А.А. Навацкий, В.П. Бабуров, В.В. Бабуринов [и др.]. М.: Академия ГПС МЧС России, 2007.

2. Технические средства систем охранной и пожарной сигнализации / А.Н. Членов, Т.А. Буцынская, И.Г. Дровникова, В.И. Фомин [и др.]. М.: Пожкнига, 2008.

3. Сенько Д., Альшевский М. Проблемы оценки эффективности технических средств пожарной сигнализации и автоматики // Алгоритм безопасности. 2007. № 5. 50–51 с.

4. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Ч. 1. Автоматическая пожарная сигнализация и автоматическое пожаротушение. Нормы и правила проектирования.

5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2001.

6. Казаков В.А. Введение в теорию Марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М.: Сов. радио, 1973.

7. Куватов В.И. Исследование операций. Петродворец: ВМИРЭ, 2004.