

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, вед. научн. сотр., НУГЗУ,  
Р.И. Шевченко, к.т.н., ст. научн. сотр., нач. НИЛ, НУГЗУ*

## **РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ**

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Предложено достоверность обнаружения и вероятность ложного решения о пожаре для пожарных извещателей определять рабочими характеристиками и характеристиками обнаружения. Разработан инженерный метод определения указанных характеристик в различных условиях наблюдения контролируемого признака пожара.

**Ключевые слова:** пожарный извещатель, рабочие характеристики, характеристики обнаружения.

**Постановка проблемы.** В системах пожарной автоматики широко применяют устройства обнаружения пожара – пожарные извещатели (ПИ). Срабатывание ПИ осуществляется при достижении контролируемым признаком пожара установленного порогового значения [1,2]. В качестве контролируемых признаков пожара могут выступать повышенная температура воздуха, выделение продуктов горения, турбулентные потоки горячих газов, электромагнитное излучение и др.

В соответствии с обнаруживаемыми первичными признаками извещатели разделяют на тепловые, дымовые, пламени, газовые и комбинированные. Возможно также использование и других контролируемых признаков пожара. За последние годы существенно расширился ассортимент ПИ, появились новые разработки, реализующие возможности современной элементной базы, различных smart-технологий и технологий проводной и беспроводной связи. Это позволило создавать автоматические системы раннего обнаружения пожара нового поколения для различных объектов производственного, складского, административно-хозяйственного, жилого и иного назначения [2].

При этом для большей части ПИ основным отличительным признаком остается общий пороговый принцип принятия решения о возникновении пожароопасной ситуации по факту превышения контролируемым признаком пожара установленного допустимого уровня. Для большинства современных объектов характерно существенное усложнение обстановки в зоне действия ПИ, обусловливаемое возрастанием нежелательных возмущений контролируемого признака пожара и флуктуаций фона, на котором обнаруживаются эти признаки. Это приводит к значительному снижению достоверности контроля и увеличению числа ошибочных решений (ложных тревог) о пожаре.

В силу случайного характера возмущений и флуктуаций важными характеристиками ПИ становятся обеспечиваемые ими вероятности правильного и ложного решения о пожаре. Поэтому одной из

проблем современной теории и техники систем пожарной автоматики является определение рабочих характеристик ПИ, представляющих собой зависимости вероятности правильного обнаружения пожара от вероятности ложной тревоги в различных условиях наблюдения контролируемых признаков пожара.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время имеется достаточно большое число публикаций по различным аспектам теории и техники систем пожарной автоматики. Исследованию различных характеристик, особенностям применения, оптимизации и идентификации параметров различных типов ПИ посвящены работы [1-4]. Однако при этом отсутствуют публикации, в которых рассматриваются важные для приложений рабочие характеристики ПИ, а также методы их инженерного расчета. При этом использование известных результатов для этой цели в силу специфических условий применения, требований и особенностей структурного построения ПИ оказывается затруднительным [5].

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является определение рабочих характеристик ПИ и разработка инженерного метода их расчета для различных условий контроля характерных признаков пожара.

В общем случае рабочие характеристики ПИ зависят от конкретных условий контроля, соответствующих признаков пожара и величины используемого в ПИ порога. Рассмотрим наиболее простые, но характерные условия контроля, при которых свойства мешающего фона на выходе соответствующего чувствительного элемента ПИ описываются гауссовой статистикой  $N(T_f, \sigma_f)$  с известными параметрами. При этом будем полагать, что соответствующий контролируемый признак пожара на выходе чувствительного элемента ПИ определяется некоторой фиксированной величиной  $\Delta T$ .

Пусть по гипотезе  $H_1$  на выходе чувствительного элемента ПИ (в случае наличия контролируемого признака  $\Delta T$ ) наблюдается величина  $y = \Delta T + T_f + n_f$ , где  $n_f$  - фон мешающих флуктуаций со статистикой  $N(0, \sigma_f)$ . Тогда по гипотезе  $H_0$  (в случае отсутствия контролируемого признака) -  $y = T_f + n_f$ . Для удобства перейдем к новым наблюдениям  $\xi = y - T_f$ . При этом для гипотезы  $H_1$  получим наблюдение  $\xi = \Delta T + n_f$ , а для гипотезы  $H_0$  -  $\xi = n_f$ .

Для новых наблюдений задача принятия решения в пользу одной из гипотез  $H_1$  или  $H_0$  становится эквивалентной простейшей бинарной задаче обнаружения детерминированного сигнала при гауссовой статистике помехи, рассматриваемой в теории обнаружения. Это позволяет воспользоваться для ее решения известными результатами [5].

В общем случае при однократном отсчете и пороговом испытании критерий отношения правдоподобия можно записать в виде

$$L = \xi / \sigma_f \frac{\frac{H_1}{H_0} \frac{\sigma_f}{\Delta T} \ln(\eta) + \frac{\Delta T}{2\sigma_f}}{\frac{H_1}{H_0}} = l_p, \quad (1)$$

где  $\eta$  - порог испытания, определяемый стоимостью ошибочных и правильных решений и априорными вероятностями наблюдений. Тогда при гипотезе  $H_0$  величина  $L$  будет описываться статистикой  $N(0,1)$ , а при гипотезе  $H_1$  - статистикой  $N(\Delta T / \sigma_f, 1)$ . Вводя расстояние  $d = \Delta T / \sigma_f$  между средними значениями распределений для величины  $L$  по рассматриваемым гипотезам, оптимальный порог будет определяться величиной  $l_p = \ln(\eta) / d + d / 2$ . Тогда вероятность ложной тревоги (ложного срабатывания ПИ при отсутствии контролируемого признака) в рассматриваемых условиях будет определяться величиной

$$F_s = \int_{l_p}^{\infty} dx \exp(-x^2 / 2) / \sqrt{2\pi}. \quad (2)$$

При этом вероятность правильного обнаружения (правильного срабатывания ПИ при наличии контролируемого признака) будет определяться величиной

$$D_s = \int_{l_p}^{\infty} dx \exp(-(x - d)^2 / 2) / \sqrt{2\pi}. \quad (3)$$

Следуя (1), величина контролируемого признака пожара и флуктуаций мешающего фона, а также априорные вероятности пожара и стоимости соответствующих решений будут определять оптимальную величину  $l_p$  порога в ПИ. При этом порог  $l_p$ , согласно (2) и (3), будет определять соответствующие вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения, а также может рассматриваться в качестве общего аргумента для рассматриваемых характеристик ПИ.

В реальных условиях априорные данные о наличии пожара и информация о стоимости правильных и ошибочных решений обычно отсутствует. Для этих условий величина оптимального порога  $l'_p = d / 2$ . В этом случае рабочие характеристики ПИ для заданных условий контроля соответствующего признака пожара будут определяться функцией  $D_s(F_s, \Delta T, \sigma_f)$ . Определение аналитического выражения для данной функции связано с известными трудностями. Поэтому дальнейшее рассмотрение связано с разработкой метода определения аналитического выражения для этой функции относительно ее аргументов  $F_s$ ,  $\Delta T$  и  $\sigma_f$ .

Суть предлагаемого метода состоит в использовании соответствующей рациональной аппроксимации для решения обратной зада-

чи (2) и последующего его использования при решении уравнения (3). При заданной величине вероятности ложной тревоги  $0 < F_s \leq 0,5$  для обратной задачи (2) справедливо решение, представляемое в виде рациональной аппроксимации

$$u(F_s, \sigma_f) = \sigma_f t - \frac{\sigma_f (a_0 + a_1 t)}{1 + b_1 t + b_2 t^2} + \varepsilon, \quad t = \sqrt{\ln(F_s^{-2})}, \quad |\varepsilon| < 3 \cdot 10^{-8}, \quad (4)$$

$$a_0 = 2,30753, \quad a_1 = 0,27061, \quad b_1 = 0,99229, \quad b_2 = 0,04481.$$

В качестве иллюстрации на рис.1 представлены зависимости изменения порога  $u(F_s, \sigma_f)$  срабатывания в ПИ от величины вероятности ложных решений о пожаре для различных значений флуктуаций  $\sigma_f$  фона. Из анализа приведенных зависимостей следует, что зависимость порога от вероятности ложных решений носит нелинейный характер. При этом возрастание уровня флуктуаций фона и его среднего значения  $T_f$  требует соответствующей коррекции порога, определяемой  $u(F_s, \sigma_f) + T_f$ . С учетом аппроксимации (4) рабочие характеристики ПИ будут определяться для рассматриваемых условий контролируемого признака пожара выражением (3), в котором величина порога  $l_p'' = u(F_s, \sigma_f) - \Delta T$ .

Интеграл (3) может быть вычислен прямым методом или с использованием дополнительной функции ошибок (или функции ошибок), которая является табулированной. В инженерной практике часто пользуются приближенным представлением (3) в аналитической форме в виде соответствующих граничных зависимостей для положительных значений аргумента [5]. Однако известные представления оказываются достаточно грубыми в случае ПИ.

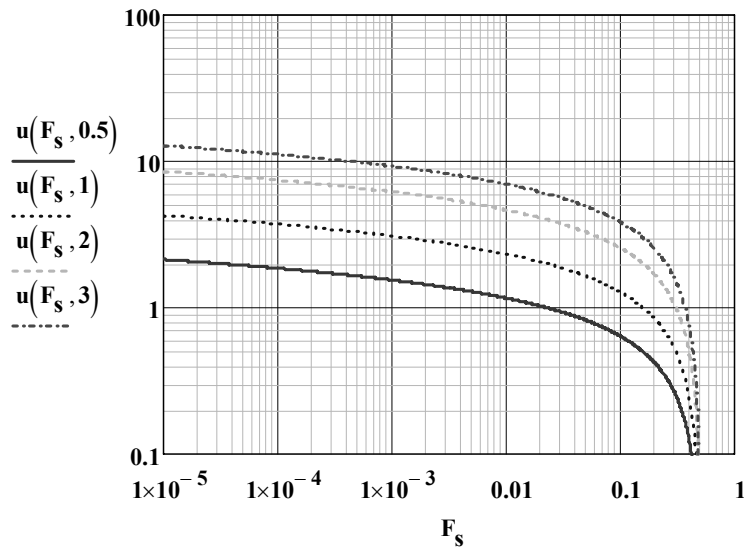


Рис. 1 – Зависимости величины порога ПИ от значений  $F_s$  при флуктуациях  $\sigma_f$  фона, равных 0,5, 1, 2 и 3

Более подходящим в этом случае оказывается использование полиномиальной и рациональной аппроксимации для вычисления интеграла (3), которая определяется в виде

$$D_s(x) = \exp(-x^2/2)(m_1r + m_2r^2 + m_3r^3)/\sqrt{2\pi}, \quad r = (1 + 0,33267x)^{-1}, \quad (5)$$

$$m_1 = 0,4361836, \quad m_2 = -0,1201676, \quad m_3 = 0,9372980.$$

При этом точность вычисления (3), обеспечиваемая (5), составляет не хуже  $10^{-5}$ . На рис. 2 приведены графики зависимости вероятности правильного решения от вероятности ложного решения для ПИ при различных значениях  $d = \Delta T / \sigma_f$ , определяемых условиями наблюдения характерного признака пожара с учетом флуктуаций фона.

Данные зависимости определяют искомые рабочие характеристики ПИ, которые характеризуют обеспечиваемую ими достоверность принятия решения о пожаре (качество критерия порогового решения) в зависимости от вероятности ложного решения для конкретных условий наблюдения.

В общем случае рабочие характеристики ПИ связывают между собой их основные вероятностные параметры  $D_s$  и  $F_s$  с параметрами контролируемого признака пожара, мешающего фона и априорными данными.

Например, если известны стоимости (или условные риски)  $C_{00}$  и  $C_{11}$  для правильных и ошибочных  $C_{10}$  и  $C_{01}$  решений, а также вероятности наличия  $p_1$  и отсутствия  $p_0 = 1 - p_1$  пожара в контролируемой области пространства, то можно вычислить величину порога  $\eta = p_0(C_{10} - C_{00}) / p_1(C_{01} - C_{11})$ .

Затем по величине  $\eta$  определить соответствующую точку на заданной кривой, для которой оцениваются значения  $D_s$  и  $F_s$ , которые будут обеспечиваться для заданных условий наблюдения признака пожара. В этом случае порог  $\eta$  при фиксированном значении  $d = \Delta T / \sigma_f$  рассматривается в качестве изменяющегося параметра. Для заданного значения  $d$  на соответствующей кривой можно выбрать любую точку, определяемую величиной порога  $\eta$  ( $0 \leq \eta \leq \infty$ ).

Так, например, при  $\eta = 0$  ПИ всегда будет принимать решение о пожаре с характеристиками  $D_s = F_s = 1$ . По мере роста величины  $\eta$  вероятности  $D_s$  и  $F_s$  уменьшаются и в пределе, когда  $\eta = \infty$  ПИ будет принимать всегда решение об отсутствии пожара. При этом  $D_s = F_s = 0$ . В общем случае, следуя рис.2, достоверность обнаружения пожара ПИ увеличивается с ростом величины  $d = \Delta T / \sigma_f$ .

Важным свойством рабочих характеристик ПИ является то, что тангенс угла наклона касательной в некоторой точке кривой опреде-

ляет требуемую величину порога  $\eta$  в (1), необходимую для достижения заданных значений  $D_s$  и  $F_s$  в этой точке. Зная  $\eta$ , в соответствии с (1) можно вычислить требуемое значение  $I_p$ . Указанные значения  $D_s$  и  $F_s$  в дальнейшем могут быть использованы для определения финальных рабочих характеристик различных по сложности технических средств и систем пожарной автоматики, использующих ПИ.

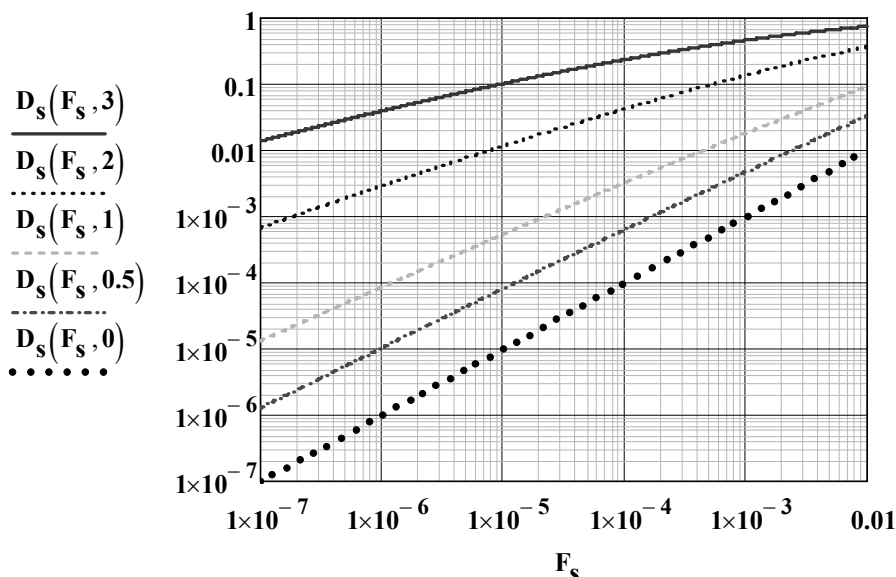


Рис. 2 – Рабочие характеристики ПИ в условиях, характеризуемых величиной  $d$ , равной 0, 0,5, 1, 2 и 3

В реальных условиях данные о стоимостях правильных и ошибочных решений, а также сведения о вероятностях наличия и отсутствия пожара в рассматриваемой области пространства обычно априори неизвестны. В этом случае наличие и отсутствие пожара полагается равновероятным. При этом для правильных и ошибочных решений выбираются соответственно нулевые и единичные стоимости. Тогда рабочие характеристики ПИ можно представить в ином виде, а именно в качестве аргумента рассматривать величину  $d$ , а параметром считать  $F_s$ . Такие характеристики по аналогии с [5] будем называть характеристиками обнаружения ПИ. На рис.3 представлены характеристики обнаружения ПИ, рассчитанные для различных значений  $F_s$ , равных  $10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$  и  $10^{-7}$ .

Характеристики обнаружения позволяют количественно оценить достоверность обнаружения пожара ПИ для заданной величины вероятности ложных решений в различных условиях (характеризуемых величиной  $d$ ) наблюдения контролируемого признака пожара. При этом величина вероятности ложных решений будет определять соответствующий порог, который необходимо устанавливать в ПИ для обеспечения требуемых вероятностей  $D_s$  и  $F_s$ .

Рассмотренные рабочие характеристики и характеристики обнаружения ПИ свидетельствуют о том, что одновременное обеспечение высокой достоверности обнаружения и низкой вероятности ложных решений по одному контролируемому признаку пожара, возможно только в случае малых флуктуаций фона и существенного превышения контролируемым признаком среднего значения мешающего фона на выходе соответствующего чувствительного элемента.

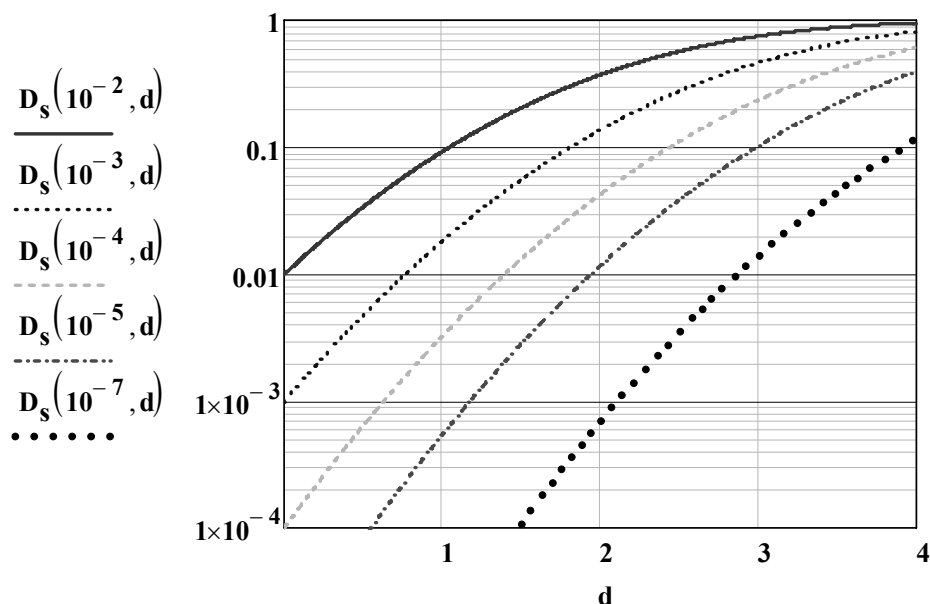


Рис. 3 – Характеристики обнаружения ПИ для различных значений  $F_s$

Поэтому для обеспечения достоверного обнаружения пожара при одновременно низкой вероятности ложных решений необходимо в качестве контролируемых признаков пожара в ПИ выбирать такие, для которых обеспечиваются минимальные флуктуации фона и максимальное превышение контролируемого признака над его текущим средним значением. При этом для достоверного обнаружения пожара ПИ важным является не форма изменения во времени контролируемого признака пожара, а величина его энергетического превышения над средней энергией фона с учетом его флуктуаций.

**Выводы.** Для количественной оценки достоверности обнаружения и вероятности ложного решения о пожаре в ПИ предложено использовать рабочие характеристики и характеристики обнаружения ПИ, применяемые обычно для радиолокационных систем обнаружения. Показаны преимущества такой оценки характеристик ПИ. На основании использования полиномиальной и рациональной аппроксимации предложен инженерный метод расчета указанных характеристик ПИ в аналитической форме. Точность рассмотренной полиномиальной и рациональной аппроксимации оказывается существенно выше известных аппроксимаций, применяемых в классической теории обнаружения. Описана методика определения рабочих характеристик и характеристик об-

наружения ПИ для наиболее распространенной простейшей гауссовой статистики наблюдения контролируемого признака пожара. Показано, что одновременное обеспечение высокой достоверности обнаружения и низкой вероятности ложных решений возможно только в случае незначительных флуктуаций фона и существенного превышения контролируемым признаком пожара среднего значения фона на выходе чувствительного элемента ПИ. Для обеспечения достоверного обнаружения пожара ПИ определяющим является не форма изменения контролируемого признака пожара во времени, а величина его энергетического превышения над средней энергией фона с учетом флуктуаций.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Членов А.Н. Автоматические пожарные извещатели. М.: НИЦ «Охрана» ВНИИПО МВД России, 1997. -51 с.
2. Федоров А.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара / А.В Федоров, А.Н. Членов, А.А. Лукьянченко, Т.А. Буцынская, Ф.В. Демехин: Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 159 с.
3. Членов А.Н. Современные тепловые пожарные извещатели: основные характеристики и особенности применения / Членов А.Н. // Системы безопасности. – 2004. – 1. – С. 55.
4. Абрамов Ю.А. Терморезистивные тепловые пожарные извещатели с улучшенными характеристиками и методы их температурных испытаний / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь. – Харьков: АГЗУ, 2005. – 121 с.
5. Ван Трис. Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Пер. с англ., под ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: Советское радио, 1972. – 744 с.

nuczu.edu.ua

Б.Б. Поспелов, Р.І. Шевченко

#### **Робочі характеристики пожежних сповіщувачів систем пожежної автоматики**

Запропоновано вірогідність виявлення та ймовірність помилкового рішення про пожежу для автоматичних пожежних сповіщувачів визначати робочими характеристиками і характеристиками виявлення. Розроблено інженерний метод визначення зазначених характеристик у різних умовах контролю характерних параметрів навколишнього середовища.

**Ключові слова:** пожежний сповіщувач, робочі характеристики, характеристики виявлення.

B.B. Pospelov, R.I. Shevchenko

#### **Work performance fire sensors automatic fire systems**

Proposed reliability of detection and the probability of a false fire alarm for automatic fire detection systems determine engineering special characteristics detection. Describes develop method for the determination of the engineering characteristics detection in different control conditions of the characteristic parameters of the environment.

**Keywords:** fire sensors, engineering special characteristics detection, characteristics detection.