

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

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЛЯ ГРУППОВЫХ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ
СИСТЕМ ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ**
(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Разработан приближенный метод аналитического определения рабочих характеристик и характеристик обнаружения групповых пожарных извещателей, используемых в системах пожарной автоматики для обнаружения контролируемых признаков пожара в присутствии фоновых флуктуаций с гауссовой статистикой.

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

Постановка проблемы. В системах пожарной автоматики в качестве первичных источников информации о величине контролируемых признаков пожара широко используются различные типы пожарных извещателей (ПИ). В качестве признаков пожара могут выступать повышенная температура воздуха, выделение продуктов горения, турбулентные потоки горячих газов, электромагнитное излучение и др. При достижении контролируемым признаком (или совокупности признаков) установленной пороговой величины происходит выдача соответствующего сигнала в систему пожарной автоматики [1,2].

Современные условия в зоне действия большинства ПИ существенно усложняются из-за наличия различного рода нежелательных искажений контролируемого признака и возрастания флуктуаций фона наблюдений. Это приводит к снижению достоверности определения (правильного обнаружения) контролируемых признаков ПИ и увеличению числа ошибочных решений (ложных тревог). При этом обеспечить одновременно высокую вероятность правильного решения и низкую вероятность ложного решения за счет выбора порога в ПИ не представляется возможным. Для преодоления этой трудности переходят к групповому использованию ПИ и соответствующим двухэтапным процедурам принятия решений, которые позволяют обеспечивать высокие характеристики группового решения. Поэтому одной из проблем современной теории систем пожарной автоматики является определение рабочих характеристик групповых ПИ, представляющих собой зависимости вероятности правильного решения от вероятности ложной тревоги в различных условиях контроля заданных признаков пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию различных характеристик и особенностям применения различных ти-

пов ПИ и систем пожарной автоматики посвящено большое число публикаций. Наиболее характерные результаты этих исследований представлены, например, в работах [1-3]. Однако важные задачи исследования рабочих характеристик групповых ПИ в различных условиях применения и разработки аналитических методов их приближенного расчета остаются не решенными. Известные трудности аналитического решения этой задачи для обнаружителей радиолокационных сигналов [4] преодолеваются ограничением характерных модельных задач обнаружения, решение которых базируется на табличных функциях или слишком грубых аппроксимациях, справедливых для больших отношений сигнал/шум.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является разработка аналитического приближенного метода определения рабочих характеристик групповых ПИ заданного признака пожара в условиях контроля, характеризуемых произвольными параметрами гауссовой статистики наблюдений.

В общем случае рабочие характеристики групповых ПИ зависят от конкретных условий контроля характерного признака пожара и величины порогов двухэтапной процедуры принятия решения. Рассмотрим наиболее простые и характерные условия контроля, при которых свойства мешающего фона на выходе соответствующих чувствительных элементов ПИ описываются гауссовой статистикой $N(T_f, \sigma)$ с известными параметрами. При этом будем полагать, что на выходе чувствительного элемента ПИ соответствующий контролируемый признак пожара характеризуется величиной приращения T_p относительно среднего значения фона T_f .

Тогда при наличии контролируемого признака (гипотеза H_1) на выходе чувствительного элемента ПИ будет наблюдаться величина $y = T_p + T_f + n_f$, где n_f – мешающий фон, характеризуемый статистикой $N(0, \sigma)$. В случае отсутствия контролируемого признака (гипотеза H_0) будет наблюдаться величина $y = T_f + n_f$. Для удобства дальнейшего рассмотрения перейдем к новым наблюдениям $\xi = y - T_f$. При этом для гипотезы H_1 наблюдение $\xi = T_p + n_f$, а для гипотезы H_0 – $\xi = n_f$.

Для новых наблюдений решение в пользу одной из гипотез H_1 или H_0 при двухэтапной процедуре принятия решения и различных значений n числа ПИ в групповом ПИ будет характеризоваться вероятностями правильного обнаружения D_{GS} и ложной тревоги F_{GS} , которые вычисляются с использованием неполной бета-функции в виде:

$$D_{GS} = I_{D_S}(k, n - k + 1), F_{GS} = I_{F_S}(k, n - k + 1), \quad (1)$$

где $I_P(a, b) = \int_0^P dx \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}$ – неполная бета-функция;

k - порог на втором этапе обнаружения, определяемый заданным числом k из n ПИ, обнаруживших контролируемый признак пожара на первом этапе процедуры обнаружения.

В выражениях (1) параметры D_S и F_S определяются вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги для ПИ при пороге l_p на первом этапе процедуры обнаружения заданного признака пожара

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

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

где $l_p = \ln(\eta) / d + d / 2$ - оптимальный порог для ПИ; $d = T_P / \sigma$, а η - порог, определяемый стоимостью ошибочных и правильных решений, а также априорными вероятностями соответствия наблюдений H_1 или H_0 гипотезе. Обычно в реальных условиях априорные данные о наличии пожароопасной ситуации и информация о стоимости правильных и ошибочных решений отсутствуют. В этом случае оптимальный порог $l'_p = d / 2$, а функция $D_S(F_S, T_P, \sigma)$ определяет рабочие характеристики ПИ для заданных условий наблюдения контролируемого признака пожара. Следуя выражениям (1), рабочие характеристики для группового ПИ будут определяться функцией $D_{GS}(F_{GS}, T_P, \sigma, k, n)$, где F_{GS} определяется вторым из выражений (1) с учетом выражения (2). Определение вероятности F_S для ПИ по заданной величине F_{GS} для группового ПИ представляет собой обратную задачу. Решение этой задачи в замкнутом виде может быть найдено на основе приближенного представления неполной бета-функции через интеграл вероятности [5]. Можно показать, что учитывая справедливость условия $0 < F_{GS} \leq 0,5$, а также существование соответствующих полиномиальных и рациональных аппроксимаций для рассматриваемых обратных функций, искомое решение обратной задачи можно представить в виде:

$$F_S(F_{GS}, k, n) = \frac{\exp\left\{\left[\frac{2}{2(n-k)+1} - \frac{2}{2k-1}\right]\left[\lambda + \frac{5h+4}{6h}\right]\right\}}{1 + \left(\frac{n-k+1}{k}\right) \exp\left\{\frac{\xi(F_{GS})(h+\lambda)^{0,5}}{h/2}\right\}}, \quad (4)$$

где $\xi(F_{GS}) = \sqrt{\ln(F_{GS}^{-2})} - \frac{(2,30753 + 0,27061\sqrt{\ln(F_{GS}^{-2})})}{1 + 0,99229\sqrt{\ln(F_{GS}^{-2})} + 0,0448 \ln(F_{GS}^{-2})} + \varepsilon, |\varepsilon| < 3 \cdot 10^{-8}$.

При этом параметры λ и h в формуле (4) определяются выражениями $\lambda = (\xi^2 - 3)/6$ и $h = (2k - 1)(2(n - k) + 1)/(n - 1)$ соответственно. Следуя (4), вероятность ложной тревоги F_S в ПИ определяется вероятностью ложной тревоги F_{GS} в групповом ПИ и величиной вторичного порога, определяемого в виде правила « k/n », используемого для принятия решения об обнаружении соответствующего признака пожара. В качестве иллюстрации на рис.1 представлены зависимости вероятности ложной тревоги F_S для ПИ от требуемой вероятности ложной тревоги F_{GS} группового ПИ при различных правилах « k/n » принятия решения.

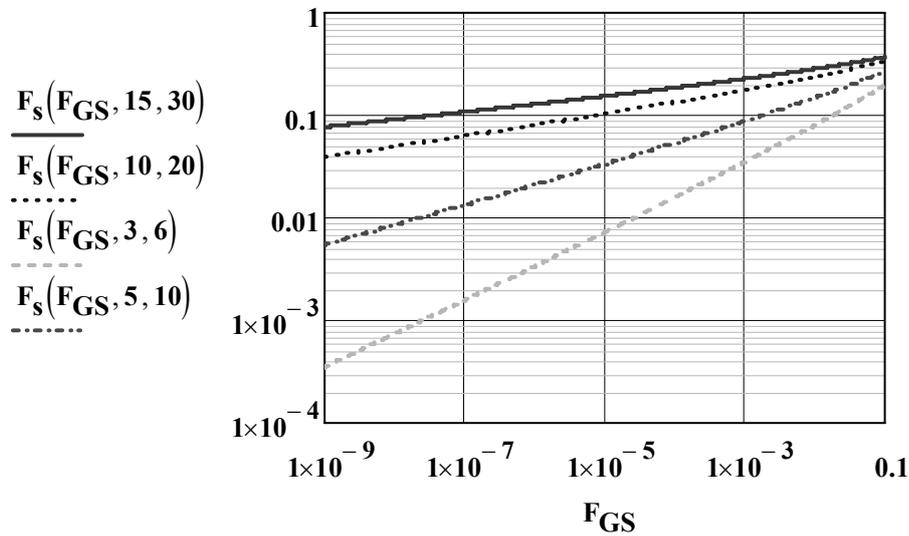


Рис. 1 – Зависимости вероятности ложной тревоги ПИ в группе от вероятности ложной тревоги группового ПИ при различных правилах « k/n »

В общем случае из анализа представленных зависимостей следует, что для групповых ПИ, использующих ПИ с достаточно высокой вероятностью ложных решений, возможно путем выбора «жестких» правил « k/n » снижать вероятность ложных групповых решений. Чем выше вероятность ложных решений для ПИ, тем большее их количество

ство требуется для достижения заданной вероятности F_{GS} ложных решений группового ПИ. Определив вероятность ложной тревоги (4), можно по ней найти величину соответствующего порога для ПИ в группе. Для этой цели воспользуемся выражением для функции $\xi(F_{GS})$ и вместо аргумента подставим величину F_S , определяемую (4). Тогда полученная функция $\xi(F_S)\sigma$ будет описывать зависимость порога в ПИ в условиях наблюдения контролируемого признака пожара на уровне σ фоновых флуктуаций. Кривые, приведенные на рис.2, получены для уровня σ единичных фоновых флуктуаций и иллюстрируют зависимость порога в ПИ от требуемой вероятности ложной тревоги F_{GS} группового ПИ для трех правил « k/n » с различной степенью жесткости при фиксированном числе ПИ $n = 10$ в группе.

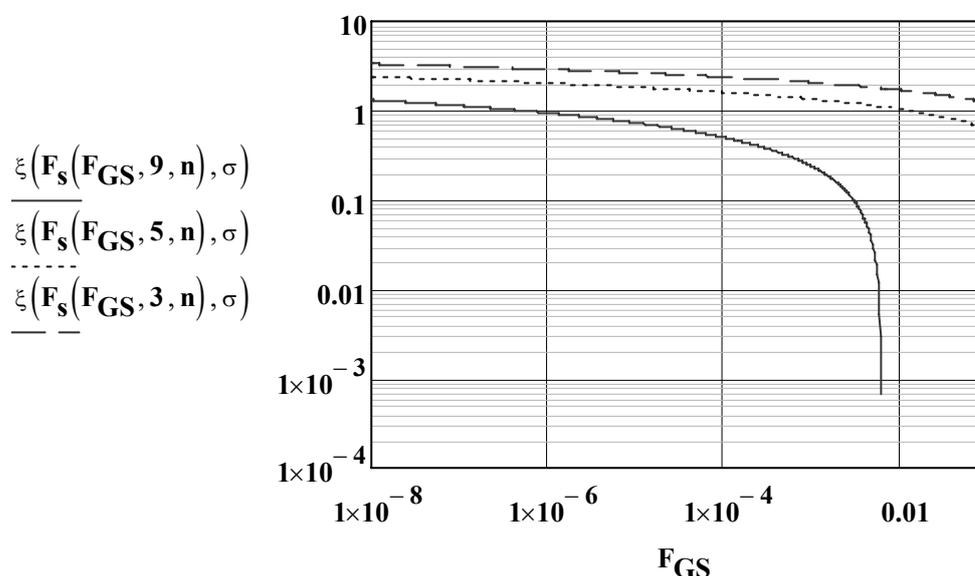


Рис. 2 – Зависимости порога ПИ от вероятности ложной тревоги группового ПИ при различных правилах « k/n »

Из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что снижение вероятности ложных групповых решений связано с увеличением величины порога для ПИ в группе. При этом с ростом уровня «жесткости» правил возрастает чувствительность порога и требуется более точная его установка для обеспечения заданной вероятности ложной тревоги группового ПИ. Зная порог, необходимый для ПИ, можно с учетом (3) определить соответствующую вероятность правильного обнаружения контролируемого признака пожара. Для этой цели воспользуемся полиномиальной и рациональной аппроксимацией для интеграла (3), определяемой в виде

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

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

Обеспечиваемая точность аппроксимации (5) при этом составляет не хуже 10^{-5} . С учетом (5) вероятность правильного обнаружения контролируемого признака T_P пожара ПИ в условиях фоновых флуктуаций уровня σ будет определяться функцией вида

$$D_S(F_S, \sigma, T_P) = D_S(\xi(F_S(F_{GS}, k, n))\sigma, T_P). \quad (6)$$

В общем случае (6) является функцией требуемой вероятности ложных решений группового ПИ, числа n используемых ПИ в группе, правила « k/n » принятия группового решения, а также условий наблюдения контролируемого признака T_P пожара и уровня σ фоновых флуктуаций. На основании (6), а также используя выражение для биномиального распределения, рабочие характеристики групповых ПИ в общем случае будут описываться функцией

$$D_{GS}(F_{GS}, T_P, \sigma, k, n) = \sum_{m=k}^n \frac{n! D_S(F_S, \sigma, T_P)^m (1 - D_S(F_S, \sigma, T_P))^{n-m}}{m!(n-m)!}. \quad (7)$$

На основании (7) в качестве иллюстрации получены зависимости достоверности обнаружения контролируемого признака T_P пожара для группового ПИ, состоящего из $n = 40$ однотипных ПИ, от вторичного порога, определяемого правилом « k/n », при фиксированной вероятности ложной тревоги F_{GS} в условиях наблюдения, характеризующихся различными отношениями T_P/σ , которые представлены на рис. 3.

Из анализа приведенных данных следует, что обеспечиваемый групповым ПИ уровень достоверности обнаружения в рассматриваемых условиях существенно зависит от правила « k/n » и соотношения уровня T_P контролируемого признака пожара и уровня σ фоновых флуктуаций наблюдения. При этом существуют оптимальные правила, для которых обеспечивается наивысшая для рассматриваемых условий достоверность обнаружения. Так, например, в условиях наблюдения, характеризующихся отношением $T_P/\sigma = 2$, достоверное обнаружение признака T_P уже обеспечивается для правила « $8/n$ ». В общем случае при уменьшении величины отношения T_P/σ наблюдается снижение величины наивысшего возможного уровня достоверности

обнаружения. Для повышения достоверности обнаружения в этом случае необходимо использовать групповые ПИ с большим числом ПИ. Так, например, можно показать, что в случае, когда условия наблюдения характеризуются отношением $T_p / \sigma = 1$, для обеспечения достоверного обнаружения пожара необходимо использовать вдвое большее число ПИ в группе.

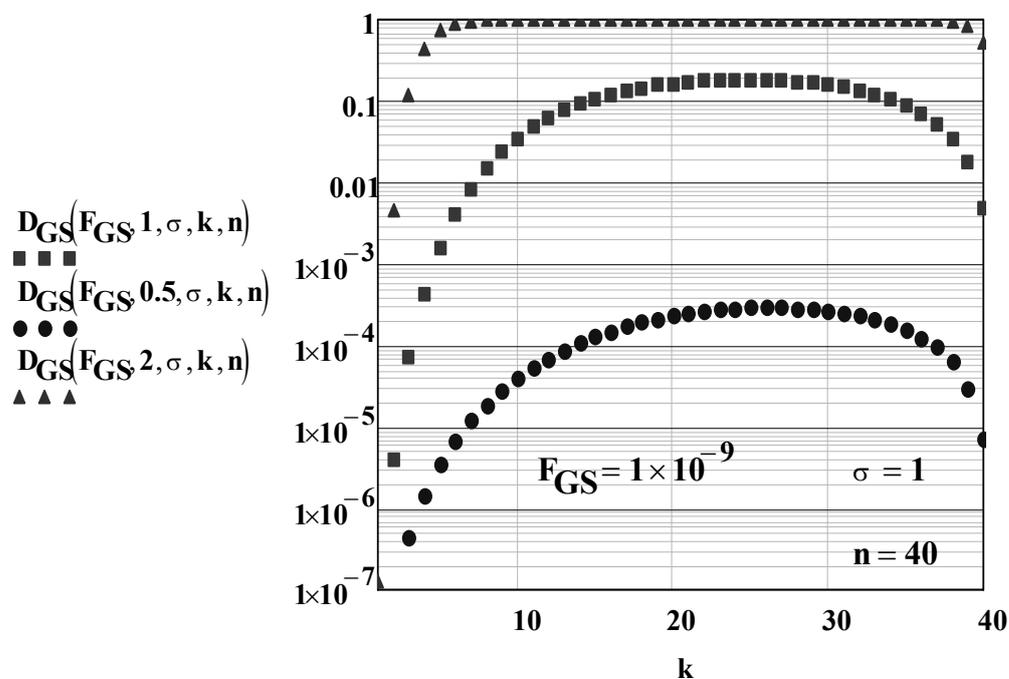


Рис. 3 – Зависимости достоверности обнаружения контролируемого признака пожара групповым ПИ в различных условиях при различных правилах « k/n »

Для этого случая на рис. 4 приведены рабочие характеристики для группового ПИ, соответствующие различным правилам « k/n » обнаружения. Из анализа представленных данных следует, что для «мягких» правил « k/n », характеризуемых $k \ll n$, увеличение числа ПИ в группе является малоэффективным способом повышения уровня достоверности обнаружения. При увеличении числа ПИ в группе целесообразно переходить к использованию «жестких» правил « k/n » обнаружения, характеризуемых $k \geq n$. С точки зрения приращения достоверности обнаружения в групповых ПИ увеличение жесткости правил оказывается наиболее существенным для малых требуемых вероятностей ложных решений. Если контролируемый признак пожара превышает соответствующие фоновые флуктуации и условия наблюдения характеризуются значением отношения $T_p / \sigma = 2$, то вероятности правильного обнаружения при тех же значениях вероятности ложных решений и правилах решения « k/n » существенно возрастают. Этот результат иллюстрируется соответствующими кривыми, представленными на рис. 5.

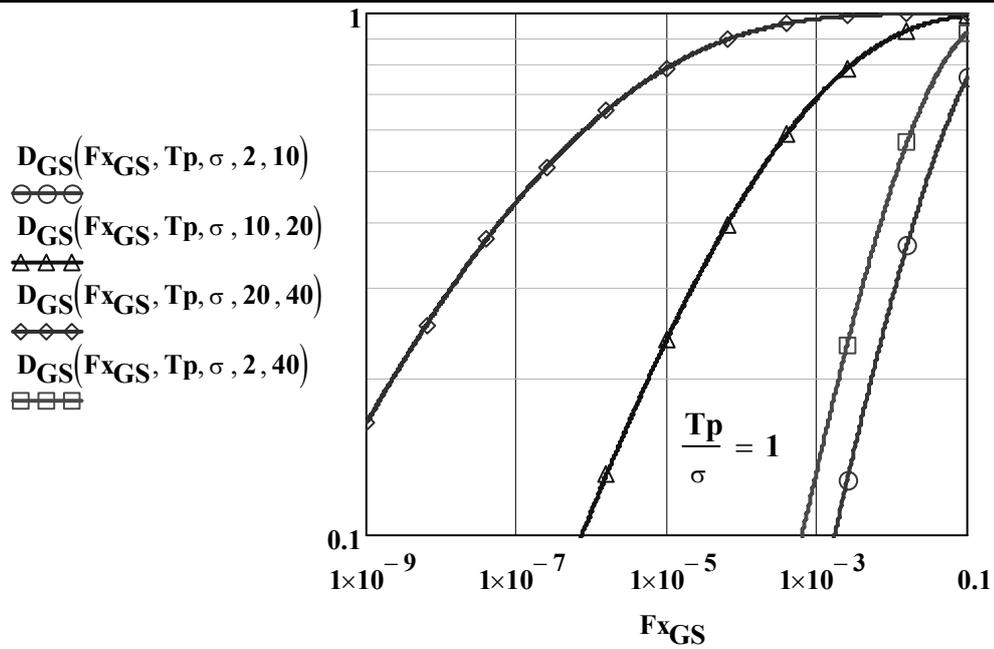


Рис. 4 – Рабочие характеристики группового ПИ для различных правил обнаружения в заданных условиях наблюдения

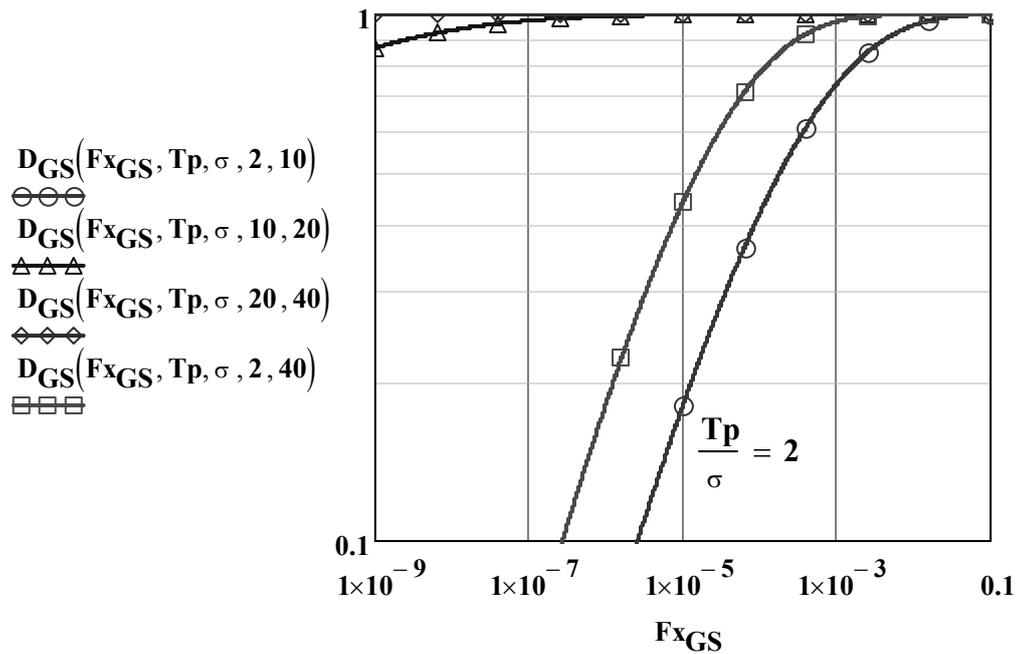


Рис. 5 – Рабочие характеристики группового ПИ для различных правил обнаружения в заданных условиях наблюдения

Из анализа приведенных данных следует, что и в этих условиях наблюдения более предпочтительным оказывается использование «жестких» правил « k/n » обнаружения. При этом для «жестких» правил и вероятностей ложной тревоги не выше $5 \cdot 10^{-5}$ оказывается возможным вдвое сократить число ПИ, необходимых в групповом ПИ. Если условия наблюдения ухудшаются, и уровень контролируемого

признака оказывается ниже фоновых флуктуаций, то рабочие характеристики рассматриваемого группового ПИ и принятых правил « k/n » обнаружения существенно снижаются. Этот факт характеризуется кривыми, представленными на рис. 6.

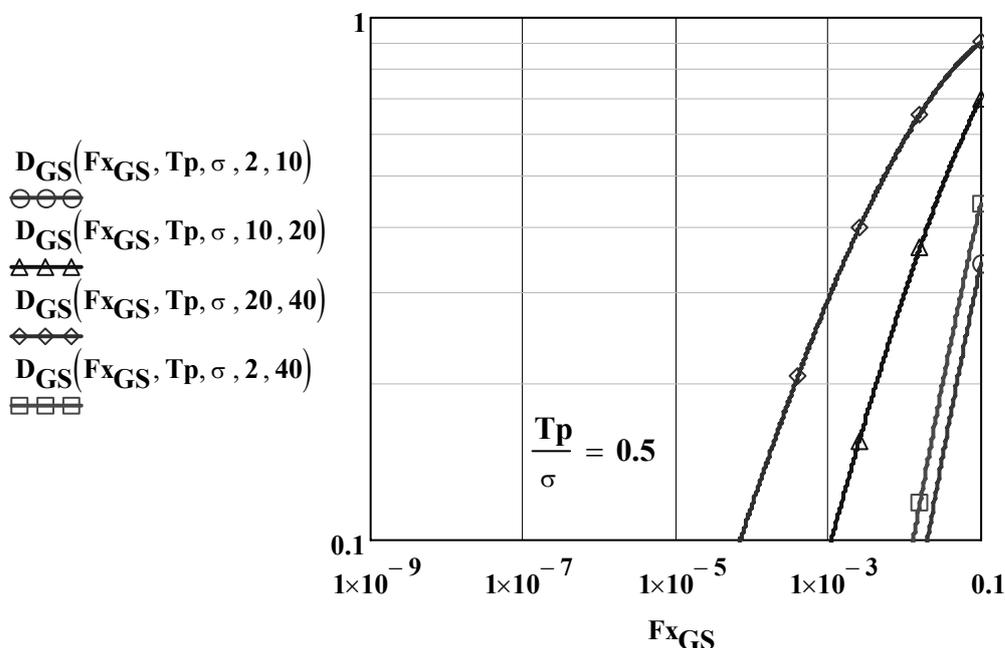


Рис. 6 – Рабочие характеристики группового ПИ для различных правил обнаружения в заданных условиях наблюдения

Часто на практике пользоваться рабочими характеристиками для групповых ПИ оказывается не очень удобно. Необходимо иметь семейства рабочих кривых для различных условий наблюдения. При этом обычно вероятность ложных решений об обнаружении пожара является заданной или указываются ее граничные значения. В этом случае более удобными являются характеристики (кривые) обнаружения групповых ПИ, которые предоставляют информацию о зависимости вероятности правильного обнаружения от условий наблюдения при фиксированной вероятности ложных решений. В качестве иллюстрации указанные зависимости приведены на рис.7. Данные характеристики обнаружения получены в соответствии с выражением (7) для групповых ПИ, характеризуемых различным правилом « k/n » обнаружения контролируемого признака пожара и числом одиночных ПИ в группе. Из анализа данных на рис. 7 следует, что для заданной вероятности ложных решений $F_{GS} = 10^{-9}$ самая низкая вероятность обнаружения имеет место для группового ПИ, характеризуемого правилом « $k = 2/n = 5$ », который обеспечивает высокую вероятность обнаружения только при отношениях $T_p/\sigma > 5$. При снижении отношения T_p/σ достоверность обнаружения существенно снижается. Увеличе-

ние числа ПИ в групповом ПИ приводит в целом к улучшению характеристик обнаружения, но это улучшение не очень значительное. Так, например, при увеличении числа ПИ до 40 в группе и использовании правила « $k = 2/n = 40$ » позволяет обеспечивать высокую достоверность обнаружения группового ПИ только в условиях, характеризующихся $T_p / \sigma > 4$.

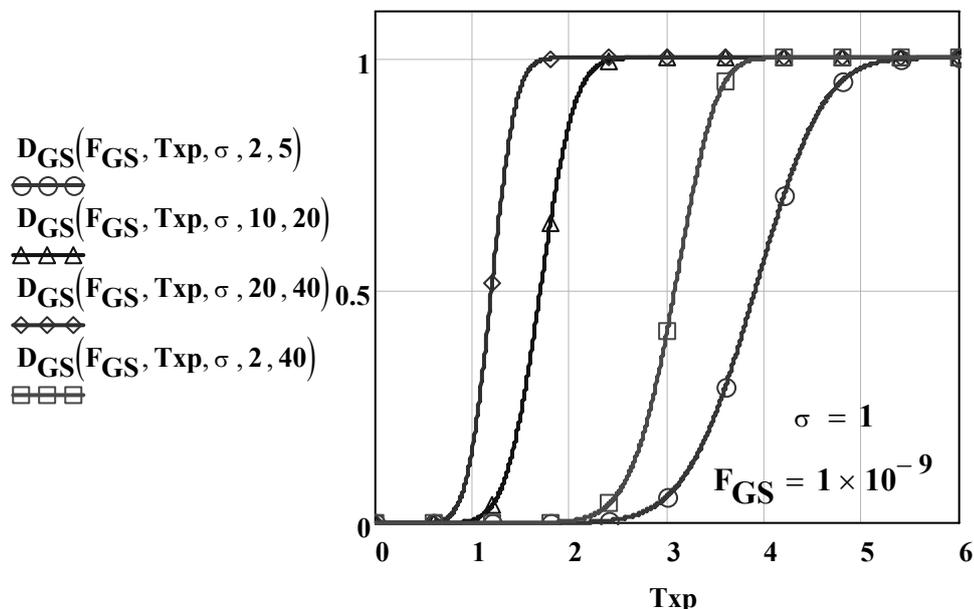


Рис. 7 – Характеристики обнаружения групповых ПИ в различных условиях наблюдения контролируемого признака пожара

Для группового ПИ с тем же числом ПИ, но при реализации правила « $k = 20/n = 40$ » высокая вероятность обнаружения при вероятности ложной тревоги $F_{GS} = 10^{-9}$ обеспечивается для условий наблюдения, характеризующихся отношением T_p / σ , равным 1,8 и более. При этом следует заметить, что вероятность обнаружения контролируемого признака пожара в этих условиях для обычного ПИ составляет не более 10^{-5} . Это означает, что в рассматриваемых условиях в таком ПИ будут практически отсутствовать ложные решения, но и обнаружить контролируемый признак пожара такой ПИ не сможет.

Выводы. На основании использования полиномиальной и рациональной аппроксимаций разработан приближенный аналитический метод определения рабочих характеристик и характеристик обнаружения для групповых ПИ, используемых в системах пожарной автоматики для обнаружения контролируемых признаков пожара в присутствии фоновых флуктуаций, характеризующихся гауссовой статистикой. Предложенный метод в отличие от известных позволяет по заданной вероятности ложных решений и используемому правилу « k/n » обнаружения для группового ПИ, а также условий его приме-

нения аналитически выполнять расчеты по определению требуемого значения порога в первичных ПИ группы. Суть описываемой методики определения основных характеристик и параметров для групповых ПИ сводится к соответствующему и последовательному использованию выражений (4), (5) и (7).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Членов А.Н. Современные тепловые пожарные извещатели: основные характеристики и особенности применения / Членов А.Н. // Системы безопасности. – 2004. – 1. – С. 55.

3. Поспелов Б.Б. Выбор порогов в системах обнаружения и тушения пожара с группированием датчиков первичной информации / Б.Б. Поспелов, Р.И. Шевченко, А.Е. Басманов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2012. – Вып.31. – С. 160-168.

4. 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.

5. Самсоненко С.В. Цифровые методы оптимальной обработки радиолокационных сигналов. – М.: Военное издательство, 1968. – 320 с.
nuczu.edu.ua

Б.Б. Поспелов, Р.И. Шевченко

Метод визначення робочих характеристик для групових пожежних сповіщувачів систем пожежної автоматики

Розроблений наближений метод аналітичного визначення робочих характеристик і характеристик виявлення групових пожежних сповіщувачів, що використовуються в системах пожежної автоматики для виявлення контрольованих ознак пожежі в присутності фонових флуктуацій з гауссовою статистикою.

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

B.V. Pospelov, R.I. Shevchenko

Method for determining the performance of group fire detector automatic fire systems

The proposed approximate analytical method for determining the performance and characteristics of the detection of group of fire detectors used in fire automatic detection of controlled fire sign in the presence of background fluctuations with Gaussian statistics.

Keywords: group fire detector, performance, detection performance.