

*Б.Б. Поспелов, д-р техн. наук, проф., Р.М. Полстянкін  
(Національний університет цивільного захисту)*

### **ЙМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІЯВЛЕННЯ ЗАЙМАНЬ ТЕПЛОВИМИ ПОЖЕЖНИМИ СПОВІЩУВАЧАМИ**

Розглядаються ймовірнісні характеристики виявлення загорянь тепловими пожежними сповіщувачами у вигляді робочих характеристик і характеристик виявлення. Визначені характеристики, які дають змогу прогнозувати ймовірність правильного і помилкового виявлення загорянь в планованих умовах використання теплових пожежних сповіщувачів на об'єктах. Показано що для надійного виявлення загорянь тепловими пожежними сповіщувачами визначальним є не форма зміни контрольованого параметра температури середовища, а абсолютна величина перевищення його енергії над енергією відповідного маскуючого фону.

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

*Б.Б. Поспелов, Р.М. Полстянкін*

### **ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАГОРАНИЙ ТЕПЛОВЫМИ ПОЖАРНЫМИ ИЗВЕЩАТЕЛЯМИ**

Рассматриваются вероятностные характеристики обнаружения загораний тепловых пожарных извещателей в виде рабочих характеристик и характеристик обнаружения. Определены характеристики, позволяющие прогнозировать вероятность правильного и ложного обнаружения загораний в планируемых условиях использования тепловых пожарных извещателей на объектах. Показано что для надежного обнаружения загораний тепловыми пожарными извещателями определяющим является не форма изменения контролируемого параметра температуры среды, а абсолютная величина превышения его энергии над энергией соответствующего маскирующего фона.

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

*В.В. Pospelov, R.M. Polstiankin*

### **PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF COMBUSTION DETECTING WHILE USING HEAT FIRE DETECTORS**

Probabilistic characteristics of combustion detecting while using heat fire detectors in the form of performance and detection characteristics are considered. Characteristics that allow to predict the probability of correct and false detection of fires in the planned conditions of use of thermal fire detectors are defined. It is shown that for reliable detection of fires with heat fire detectors the form of changes in the environmental temperature is not the determining factor. The absolute value of the excess of the energy over the energy corresponding to a background masking is the determining factor.

**Key words:** heat fire detector, performance characteristics, detection characteristics

**Постановка проблеми.** У сучасних системах протипожежного захисту об'єктів широко застосовуються різного типу пристрої виявлення загорянь – пожежні сповіщувачі. Найбільшого поширення в Україні набули теплові пожежні сповіщувачі (ТПС). Відзначається, що ТПС є і залишаються незамінними джерелами інформації про загоряння в важких умовах виробництва.

Виявлення загорянь такими ТПС засноване на реалізації порогового принципу, суттю якого є спрацювання ТПС при досягненні контрольованим параметром – температурного середовища, встановленого порогового значення [1, 2]. Останнім часом істотно розширився асортимент і сфера застосування ТПС, з'явилися нові розробки, що базуються на можливостях сучасної елементної бази та реалізації різних smart-технологій. Це дало змогу створювати автоматичні системи раннього виявлення загорянь для захисту складних об'єктів виробничого, складського, адміністративно-господарського, житлового та іншого призначення [2]. При цьому, більшість ТПС працює за пороговим принципом виявлення пожежонебезпечної ситуації. Для більшості сучасних об'єктів характерно істотне ускладнення пожежонебезпечної обстановки в зоні дії ТПС. Це пов'язане, перш за все, зі зростанням рівня небажаних впливів на контрольований параметр температури середовища, а також флуктуацій температурного фону, що маскують початковий стан загоряння. Це знижує якість виявлення займань і призводить до зменшення числа правильних і збільшення числа помилкових виявлень загоряння.

В силу випадкового характеру завод та флуктуацій температурного фону більш важливими, поряд з чутливістю і швидкодією, характеристиками ТПС стають ймовірності правильного і помилкового виявлення загорянь, що забезпечуються ТПС в конкретних умовах їх застосування. Тому однією з важливих проблем створення сучасних систем протипожежного захисту об'єктів є визначення імовірнісних характеристик виявлення загорянь ТПС в умовах їх об'єктового застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні маємо велику кількість публікацій, присвячених різним аспектам створення систем протипожежного захисту об'єктів. Перелік технічних характеристик ТПС наведено в ДСТУ EN 54-5: 2003. Основними з них є статична температура і час спрацювання. Статична температура спрацювання залежно від класу ТПС повинна лежати в певному діапазоні. В Україні найбільшого поширення набули ТПС класів А, В і С. Час спрацювання нормується залежно від класу ТПС, величини швидкості наростання температури навколишнього середовища і початкової температури. Зазначені норми визначені ДСТУ EN 54-5: 2003 в припущенні, що чутливі елементи ТПС описуються аперіодичними ланками з постійними часу у 20 та 60 секунд.

Дослідженню різних характеристик, оптимізації та ідентифікації параметрів ТПС присвячені роботи [1-4]. Однак при цьому відсутні роботи, в яких розглядаються такі важливі при створенні ефективних систем протипожежного захисту об'єктів характеристики як імовірнісні характеристики виявлення загорянь ТПС та методи їх визначення. Через специфічні особливості застосування, вимоги і структури ТПС скористатися безпосередньо відомими результатами класичної теорії виявлення [5] є складно.

**Постановка задачі та її рішення.** Метою роботи є ознайомлення з новим класом імовірнісних характеристик ТПС, що визначають їх можливості з виявлення загорянь в різних умовах застосування, а також інженерним методом їх визначення. У загальному випадку ймовірнісні характеристики виявлення загорянь ТПС залежать від конкретних умов їх застосування, а також характерних контрольних параметрів температури газового середовища і величини використовуваного порогу.

Розглянемо найбільш характерні умови виявлення загорянь ТПС, за яких властивості завод та фону, які спостерігаються на виході відповідного чутливого елемента за відсутності вогнища загоряння на об'єкті описуються гаусовою статистикою  $N(T_f, \sigma_f)$  з відомими параметрами. Через значну інерційність чутливих елементів ТПС таке припущення можна вважати справедливим на практиці. При цьому будемо вважати, що контрольований параметр температури середовища на виході відповідного чутливого елемента за наявності займання визначається деякою фіксованою величиною  $\Delta T$ .

Нехай за гіпотезою  $H_1$  на виході чутливого елемента ТПС (в разі наявності загоряння і контрольованого параметра  $\Delta T$ ) спостерігається величина  $y = \Delta T + T_f + n_f$ , де величина  $T_f$  визначає середнє значення контрольованого параметра температури середовища на виході

чутливого елемента за відсутності вогнища загоряння на об'єкті, а величина  $n_f$  є маскуючим фоном, що описується гаусовою статистикою  $N(0, \sigma_f)$  з відомими параметрами. При цьому за гіпотезою  $H_0$  (в разі відсутності загоряння на об'єкті і контрольованого параметра  $\Delta T = 0$ ) спостерігається величина  $y = T_f + n_f$ . Для зручності подальшого розгляду перейдемо до спостережень  $\xi = y - T_f$ . При цьому гіпотеза  $H_1$  буде відповідати спостереженню  $\xi = \Delta T + n_f$ , а гіпотеза  $H_0$  – спостереженню  $\xi = n_f$ .

Для нових спостережень  $\xi$  завдання прийняття рішення на користь однієї з гіпотез  $H_1$  або  $H_0$  стає еквівалентною найпростішою бінарною задачею виявлення детермінованого сигналу при гаусовій статистиці перешкоди, що розглядається в теорії виявлення [5]. Це дає змогу для вирішення задачі використовувати відомі результати.

Будемо вважати, що виявлення загоряння ТПС проводиться при одноразовому відліку і пороговому випробуванні спостереження  $\xi$ . Тоді оптимальне правило виявлення займання ТПС буде визначатися відповідно до відомого критерію відношення правдоподібності у вигляді

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

де  $\eta$  – оптимальний поріг, який визначається вартістю помилкових і правильних рішень, а також апіорними ймовірностями наявності і відсутності вогнища загоряння на об'єкті. При цьому в разі гіпотези  $H_0$  величина  $L$  в (1) буде описуватися статистикою  $N(0,1)$ , а в разі протилежної гіпотези  $H_1$  – статистикою  $N(\Delta T / \sigma_f, 1)$ . Вводячи відстань  $d = \Delta T / \sigma_f$  між середніми значеннями відповідних розподілів  $L$  для розглянутих гіпотез, величина  $l_p = \ln(\eta) / d + d / 2$  буде визначати оптимальний поріг для виявлення займання в ТПС. З огляду на це, ймовірність помилкового виявлення займання ТПС (спрацьовування ТПС при відсутності вогнища загоряння на об'єкті) в розглянутих умовах буде визначатися величиною

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

При цьому ймовірність правильного виявлення займання ТПС (спрацьовування ТПС за наявності вогнища загоряння на об'єкті) буде визначатися величиною

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

Дотримуючись процедури (1), величина контрольованого параметра температури газового середовища, рівень флуктуацій маскуючого фону, апіорні ймовірності наявності і відсутності вогнища загоряння на об'єкті та вартості правильних і помилкових рішень визначатимуть величину оптимального порогу  $l_p$  для ТПС в цих умовах. При цьому величина порогу  $l_p$ , згідно з (2) і (3), буде визначати відповідне значення ймовірності помилкового і правильного виявлення ТПС вогнища загоряння. Слід зауважити, що  $l_p$  є загальним аргументом для розглянутих показників якості виявлення загорянь ТПС.

Зазвичай при використанні ТПС в реальних умовах апіорні дані про наявність і відсутність вогнища загоряння на об'єкті в даний момент часу відсутні, а вартість правильних і помилкових рішень важко формалізувати. У цьому випадку величина оптимального порогу буде визначатися  $l'_p = d / 2$ . У зв'язку з цим ймовірнісні характеристики виявлення загорянь ТПС в заданих умовах спостереження контрольованого параметра температури середовища будуть визначатися функцією  $D_S(F_S, \Delta T / \sigma_f)$ . Цю функцію при фіксованому значенні

$\Delta T / \sigma_f$ , відповідно до [5], будемо називати *робочою характеристикою виявлення загорянь* ТПС в заданих умовах застосування. Відомо, що точного аналітичного виразу для функції  $D_S(F_S, \Delta T / \sigma_f)$  не існує. Тому в інженерній практиці застосовуються різні наближені вирази для цієї функції. Через наявні обмеження скористатися відомими апроксимаціями в цьому випадку не є можливим. У зв'язку з цим розглянемо новий наближений метод визначення аналітичного виразу для цієї функції при довільних значеннях  $F_S$  і  $\Delta T / \sigma_f$ .

Суть пропонованого методу полягає у використанні відповідної раціональної апроксимації рішення для оберненої задачі (2) і подальшого його використання при вирішенні рівняння (3). Для розв'язання оберненої задачі рівняння (2) при заданій величині ймовірності помилкової тривоги  $0 < F_S \leq 0,5$  визначимо раціональну апроксимацію у вигляді:

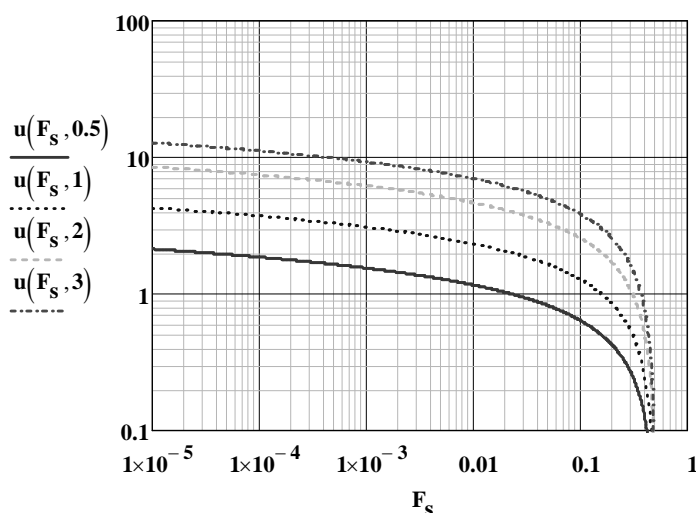
$$u(F_S, \sigma_f) = \sigma_f t - \frac{\sigma_f (a_0 + a_1 t)}{1 + b_1 t + b_2 t^2} + \varepsilon, \quad t = \sqrt{\ln(F_S^{-2})}, \quad |\varepsilon| < 3 \cdot 10^{-8}, \quad (4)$$

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

Як ілюстрацію на рис.1 наведено залежності величини порога спрацьовування в ТПС від величини ймовірності помилкового виявлення займання для різних рівнів флуктуацій маскуючого фону.

З аналізу кривих (рис. 1) випливає, що в загальному випадку залежність порога від ймовірності помилкового виявлення займання ТПС має нелінійний характер. При цьому зростання рівня флуктуацій маскуючого фону (погіршення умов виявлення вогнища загоряння на об'єкті) потребує відповідної нелінійної корекції порога, яка повинна проводитися з урахуванням середнього значення  $T_f$  для контрольованого параметра температури середовища за відсутності вогнища загоряння і визначатися величиною  $u(F_S, \sigma_f) + T_f$  відповідно. З урахуванням апроксимації (4) пропоновані робочі характеристики виявлення загорянь ТПС в заданих умовах контрольованого параметра температури газового середовища будуть визначатися виразом (3), в якому поріг  $I_p'' = u(F_S, \sigma_f) - \Delta T$ .

Відомо, що інтеграл (3) може бути обчислений прямим методом або з використанням додаткової функції помилок (або функції помилок), яка є табульованою. В інженерній практиці часто користуються наближеним поданням (3) в аналітичній формі у вигляді відповідних граничних залежностей для позитивних значень аргументу [5]. Однак відомі представлення виявляються досить грубими для визначення робочих характеристик виявлення ТПС.



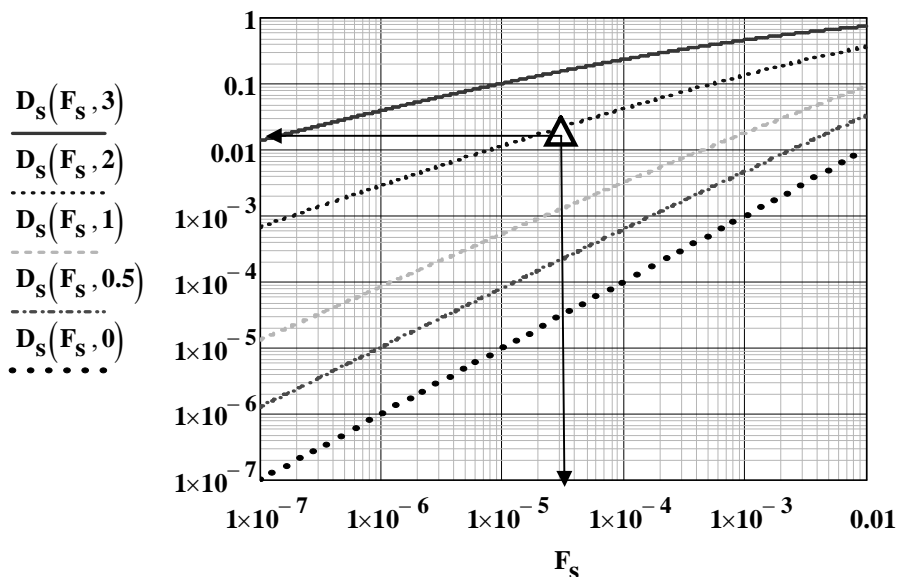
**Рисунок 1** – Залежності величини порога ТПС від значень  $F_S$  при флуктуаціях  $\sigma_f$  маскуючого фону, рівних 0,5, 1, 2 і 3

Найбільш сприятливим в цьому випадку виявляється використання поліноміальної і раціональної апроксимації представлення (3), яка визначається у вигляді

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

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

При цьому точність визначення (3), що забезпечується апроксимацією (5), є не гіршою за  $10^{-5}$ . На рис.2 наведені робочі характеристики виявлення загорянь ТПС (графіки залежності ймовірності правильного виявлення займання від ймовірності його помилкового виявлення при різних значеннях  $d = \Delta T / \sigma_f$ ) в різних умовах виявлення вогнища загоряння на об'єкті. Робочі характеристики виявлення, на відміну від відомих характеристик ТПС, дають змогу чисельно оцінювати очікувані ймовірності правильного і помилкового виявлення загорянь ТПС для конкретних умов їх застосування на об'єкті. У загальному випадку робочі характеристики виявлення ТПС пов'язують між собою основні імовірнісні показники якості виявлення загорянь  $D_S$  і  $F_S$  з умовами спостереження контрольованого параметра температури середовища та іншими апіорними даними. Так, наприклад, якщо відомі вартості (або умовні ризики)  $C_{00}$  і  $C_{11}$  для правильних і помилкових  $C_{10}$  і  $C_{01}$  рішень, а також ймовірність наявності  $p_1$  і відсутності  $p_0 = 1 - p_1$  загоряння на об'єкті в даній області в заданий момент часу, то можна обчислити величину порога  $\eta = p_0(C_{10} - C_{00}) / p_1(C_{01} - C_{11})$ , який необхідно встановлювати в ТПС. За величиною  $\eta$  визначається відповідна точка ( $\Delta$ ) на кривій (рис. 2), яка відповідає прогнозованим умовам виявлення загорянь на об'єкті. Для даної точки ( $\Delta$ ) оцінюються очікувані значення  $D_S$  і  $F_S$  виявлення загорянь ТПС. В цьому випадку при фіксованому значенні  $d = \Delta T / \sigma_f$  поріг  $\eta$  розглядається в якості змінного параметра. Для заданого значення  $d$  на відповідній кривій можна вибрати будь-яку точку, яка визначається величиною порога  $\eta$  ( $0 \leq \eta \leq \infty$ ).



**Рисунок 2** – Робочі характеристики ТПС в умовах виявлення загорянь, які характеризуються різною величиною  $d$ , рівною 0, 0,5, 1, 2 і 3

Так, наприклад, при  $\eta = 0$  ТПС завжди буде виявляти вогнище загоряння на об'єкті з ймовірністю  $D_S = F_S = 1$ . У міру збільшення величини  $\eta$  ймовірності  $D_S$  і  $F_S$  зменшуються і в межі, коли  $\eta = \infty$  ТПС завжди не буде виявляти вогнище загоряння - буде відключений. При цьому  $D_S = F_S = 0$  У загальному випадку, слідуючи рис.2, ймовірність правильного ви-

явлення займання ТПС збільшується з ростом величини  $d = \Delta T / \sigma_f$  - поліпшенням умов виявлення вогнища загоряння на об'єкті.

Важливою властивістю робочих характеристик виявлення загорянь ТПС є те, що тангенс кута нахилу дотичної в деякій точці ( $\Delta$ ) кривої визначає необхідну величину порога  $\eta$  в (1), необхідну для досягнення заданих значень  $D_S$  і  $F_S$  в цій точці. Знаючи  $\eta$ , відповідно до (1) можна обчислити потрібну установку. Зазначені значення  $D_S$  і  $F_S$  надалі можуть бути використані для визначення фінальних робочих характеристик проєктованих технічних засобів і систем протипожежного захисту об'єктів з великою кількістю ТПС.

В реальних умовах дані про ціни правильного і помилкового виявлення займання ТПС, а також відомості про можливості наявності і відсутності загоряння на об'єкті в даній області простору і в заданий момент часу зазвичай апріорі невідомі. У цьому випадку ймовірність загоряння та відсутності загоряння на об'єкті покладаються однаковими, а ці події вважаються рівно ймовірними. При цьому для правильних і помилкових виявлень загоряння приймаються відповідно нульові і поодинокі вартості. Тоді робочі характеристики виявлення загорянь ТПС можна представити у вигляді, при якому в якості аргументу розглядається величина  $d$ , а параметром є  $F_S$ . Такі характеристики за аналогією з [5] будемо називати характеристиками виявлення загорянь ТПС. На рис.3 представлені *характеристики виявлення загорянь* ТПС, розраховані для різних значень  $F_S$ , рівних  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$  і  $10^{-7}$ .

Характеристики виявлення дають змогу оцінювати ймовірності правильного виявлення займання ТПС при заданій ймовірності помилкового виявлення в різних умовах (характеризуються величиною  $d$ ) виявлення контрольованого параметра температури газового середовища. При цьому задана ймовірність помилкового виявлення визначатиме відповідний поріг, який необхідно встановлювати в ТПС для забезпечення необхідних значень ймовірностей  $D_S$  і  $F_S$ .

Розглянуті ймовірнісні характеристики виявлення загорянь ТПС у вигляді робочих характеристик і характеристик виявлення свідчать про те, що загалом забезпечення одночасно високої ймовірності правильного і малої ймовірності помилкового виявлень загорянь ТПС з використанням тільки одного контрольованого параметра температури середовища на об'єкті є складним. Забезпечення виконання зазначених вимог можливе тільки в окремому випадку дуже низького рівня флуктуацій маскуючого фону і істотного перевищення контрольованим параметром температури середнього значення фону, які спостерігаються на виході відповідного чутливого елемента ТПС.

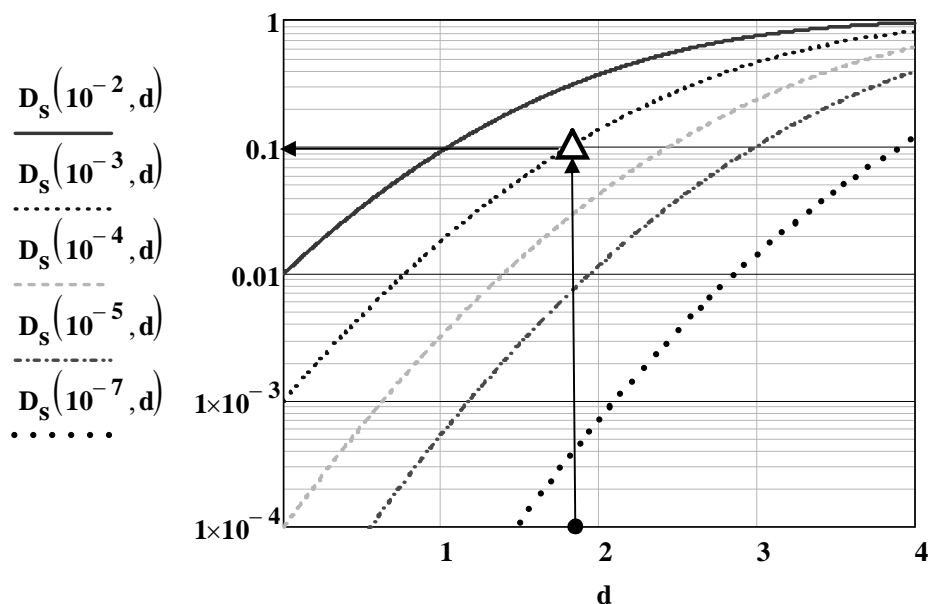


Рисунок 3 – Характеристики виявлення загорянь ТПС для різних значень  $F_S$

Тому для забезпечення високої ймовірності правильного і одночасно низької ймовірності помилкового виявлення вогнища загоряння на об'єкті, необхідно в якості контрольованого параметра температури середовища вибирати такий, який має менший рівень флуктуацій маскуючого фону, а в разі загоряння - більше перевищення над середнім значенням відповідного фону. При цьому для ефективного виявлення загорянь ТПС важливим є не форма зміни контрольованого параметра температури середовища при загорянні, а величина перевищення енергії параметра над енергією відповідного маскуючого фону.

**Висновки.** Запропоновано в якості ймовірнісних характеристик виявлення загорянь ТПС використовувати робочі характеристики і характеристики виявлення, що застосовуються зазвичай в класичній теорії виявлення. Зазначені характеристики на відміну від традиційних дають змогу прогнозувати ймовірність правильного і помилкового виявлення загорянь в конкретних умовах використання ТПС на об'єктах. На підставі використання поліноміальної і раціональної апроксимації розроблений інженерний метод визначення робочих характеристик і характеристик виявлення загорянь ТПС. Точність пропонує методів виявляється істотно вищою від відомих апроксимацій, застосовуваних в класичній теорії виявлення. Показано, що забезпечити одночасно високу ймовірність правильного і низьку ймовірність помилкового виявлення загорянь можливо тільки в разі незначних флуктуацій відповідного до маскуючого фону та істотного перевищення контрольованим параметром середнього значення цього фону, що діє на виході чутливого елемента ТПС. Відмічається, що для надійного виявлення загорянь ТПС визначальним є не форма зміни контрольованого параметра температури середовища у часі, а абсолютна величина перевищення його енергії над енергією відповідного маскуючого фону.

#### Список літератури:

1. Членов А. Н. Автоматические пожарные извещатели. – М.: НИЦ «Охрана» ВНИИ-ПО 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 / А. Н. Членов // Системы безопасности. – 2004. – С. 55.
4. Шаровар Ф. И. Пожаропредупредительная автоматика: Теория и практика предотвращения пожаров от маломощных загораний / Ф. И. Шаровар. – М.: Специнформатика. – СИ, 2013. – 556 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.

#### References:

1. Chlenov A.N. Avtomaticheskie pozharnye izveshchateli. M.: NIC «Ohrana» VNIPO MVD Rossii, 1997. -51 s.
2. Fedorov A.V. Sistemy i tehicheskie sredstva rannego obnaruzheniya pozhara / A.V Fedorov, A.N. Chlenov, A.A. Luk`yanchenko, T.A. Bucynskaya, F.V. Demehin: Monografiya. – M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2009. – 159 s.
3. Chlenov A.N. Sovremennye teplovye pozharnye izveshchateli: osnovnye harakteristiki i osobennosti primeneniya / Chlenov A.N. // Sistemy bezopasnosti. – 2004. – S. 55.
4. Sharovar F.I. Pozharopredupreditel'naya avtomatika: Teoriya i praktika predotvrashcheniya pozharov ot malomoshchnyh zagoraniy / F.I., Sharovar. – M.: Specinformatika - SI, 2013. – 556 s.
5. Van Tris. G. Teoriya obnaruzheniya, ocenok i modulyacii. Tom 1. Per. s angl., pod red. prof. V.I. Tihonova. – M.: Sovetskoe radio, 1972. – 744 s.

