

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, вед. науч. сотр., НУГЗУ,
Р.И. Шевченко, к.т.н., с.н.с., нач. НИЛ, НУГЗУ,
А.Н. Коленов, ст. преподаватель, НУГЗУ*

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДИНАМИКОЙ ДЛЯ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ

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

Выполнен синтез и анализ оптимального измерителя опасных факторов пожара с произвольной динамикой, наблюдаемых на фоне аддитивных мешающих факторов.

Ключевые слова: измеритель опасных факторов пожара, пожарный извещатель, извещатель дифференциального типа.

Постановка проблемы. В последнее время отмечается рост числа пожаров на объектах, объемов наносимого ими ущерба и недостаточная эффективность работы пожарных сигнализаций и объектовых автоматических систем обнаружения пожара. Поэтому проблема повышения эффективности пожарных сигнализаций и систем автоматического обнаружения пожара становится одной из главных на современном этапе развития государства. Конструктивное решение данной проблемы связано с использованием оптимальных первичных извещателей для измерения опасных факторов пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. Оптимизации параметров различных измерителей, используемых в существующих пожарных извещателях, посвящены работы [1,2]. Однако в них исследуются пожарные извещатели с заданной заранее структурой измерителей опасных факторов. Синтез оптимальных измерителей опасных факторов пожара для извещателей при этом не рассматривается. В [3] рассмотрен синтез оптимального измерителя, но для частного случая, когда измеряемый опасный фактор характеризуется случайным постоянным во времени значением. В общем случае измеряемые факторы пожара могут иметь произвольную динамику и наблюдаться на фоне мешающих аддитивных флуктуаций. Поэтому актуальной является научная задача синтеза оптимального измерителя опасных факторов пожара с произвольной динамикой и аддитивными флуктуациями для пожарных извещателей пожарных сигнализаций и систем автоматического обнаружения пожара.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является синтез и анализ оптимального измерителя опасных факторов пожара с произвольной динамикой, наблюдаемых на фоне аддитивных мешающих факторов. Будем полагать, что некоторый произвольный

фактор пожара характеризуется регулярной динамикой $c(t)$ и аддитивными флуктуациями. Наблюдения опасного фактора сопровождаются мешающим фоном в виде гауссовой помехи со спектральной плотностью $N/2$ и нулевым средним значением. Требуется по результатам наблюдения получить оптимальную оценку опасного фактора. В качестве критерия оптимальности будем рассматривать минимум среднеквадратической погрешности измерения опасного фактора.

Априорное уравнение, описывающее общую динамику $a(t)$ опасного фактора в рассматриваемой ситуации на интервале наблюдения $[0, T]$, будет определяться в виде

$$da(t)/dt = c(t) - \alpha a(t) + n_a(t), \quad a(0) = a_0, \quad (1)$$

где a_0 – начальное значение измеряемого фактора пожара; $n_a(t)$ – гауссов случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_a , описывающий флуктуации опасного фактора; α – эффективная ширина спектра флуктуаций опасного фактора. Уравнение наблюдения, описывающее процесс на входе измерителя опасного фактора первичного извещателя, будет определяться с учетом (1) равенством

$$\xi(t) = a(t) + n(t), \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где $n(t)$ – помеха, описываемая гауссовым процессом с равномерной спектральной плотностью $N/2$, на фоне которой наблюдается опасный фактор.

Следуя [4], алгоритм оптимальной фильтрации опасного фактора пожара (1) с учетом наблюдений (2) можно представить в виде

$$d\hat{a}(t)/dt = c(t) - \alpha\hat{a}(t) + K(t)[\xi(t) - \hat{a}(t)], \quad (3)$$

где $\hat{a}(t)$ – оптимальная оценка опасного фактора пожара, а $K(t)$ – коэффициент передачи фильтра, определяемый выражением $K(t) = 2D(t)/N$, где $D(t)$ – текущая дисперсия погрешности оценки $\hat{a}(t)$. В рассматриваемом случае уравнение для текущей дисперсия погрешности оценки имеет вид

$$dD(t)/dt = 2\alpha D_a - 2\alpha D(t) - 2D^2(t)/N. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) определяют структуру и параметры оптимального измерителя опасных факторов пожара с произвольной динамикой и аддитивными флуктуациями. Структура синтезированного оптимального измерителя приведена на рис. 1.

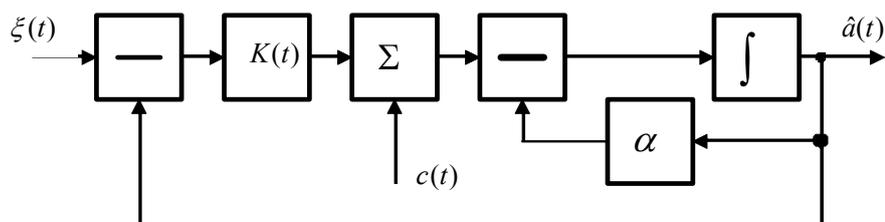


Рис. 1. Структурная схема оптимального измерителя опасного фактора пожара для рассматриваемых условий

Для упрощения реализации оптимального измерителя можно коэффициент передачи $K(t)$ заменить постоянным, равным его стационарному значению $K_s = \alpha(\sqrt{1+q} - 1)$, где $q = 4D_a / \alpha N$ – отношение сигнал-шум в наблюдениях. При этом замена коэффициента $K(t)$ на коэффициент K_s оказывает влияние только на качество переходного процесса. Для количественной оценки указанной замены введем обозначение для погрешности $\varepsilon(t) = a(t) - \hat{a}(t)$. Вычтем из (1) выражение (3) и, учитывая (2), получим

$$d\varepsilon / dt = -(\alpha + K_s)\varepsilon + [n_a(t) - K_s n(t)] + \Delta c(t), \quad (5)$$

где $\Delta c(t)$ – слагаемое, учитывающее отклонение реальной динамики регулярной составляющей опасного фактора и принятой модели. Для безразмерного времени $\tau = \alpha t$ дисперсия ошибки оценивания с учетом (5) будет определяться

$$D(\tau) = D_{a0} \exp[-2(1 + K_s / \alpha)\tau] + \frac{[1 - \exp[-2(1 + K_s / \alpha)\tau]]}{2\alpha(1 + K_s / \alpha)} * [N_a / 2 + K_s^2 N / 2 + D_{\Delta c}] \quad (6)$$

где D_{a0} – начальная дисперсия флуктуаций опасного фактора; $D_{\Delta c}$ – дисперсия отклонения реальной динамики регулярной составляющей опасного фактора и модели. Из (6) следует, что в установившемся режиме $\tau \rightarrow \infty$ дисперсия ошибки

$$D(\infty) = \frac{1}{2\alpha + 2K_s} [N_a / 2 + K_s^2 N / 2 + D_{\Delta c}]. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) свидетельствуют, что дисперсия ошибки состоит из суммы двух составляющих. Первая составляющая при условии $n(t) = 0$ определяет динамическую ошибку, зависящую от суммы дисперсий флуктуаций опасного фактора пожара и отклонений реальной динамики регулярной составляющей опасного фактора от принятой модели, а вторая – дисперсией флуктуаций наблюдения при условии $n_a(t) = 0$.

При этом выбором значения K_s по соответствующей программе можно обеспечить требуемый характер переходного процесса и снижение дисперсии результирующей ошибки оценивания в установившемся режиме.

Предположение об априори заданной модели динамики регулярной составляющей опасного фактора пожара существенно ограничивает область практического использования синтезированного измерителя. При этом в случае различия принятой модели и реальной динамики опасного фактора пожара, синтезированный измеритель не будет оптимальным. Чем сильнее это различие, тем больше дисперсия ошибки оценивания (6).

В качестве иллюстрации на рис. 2 представлены реализации выходного сигнала для оптимального $\hat{a}(t) = a1(t)$ и традиционного $a(t)$ измерителя ($\tau = 20$ с) для безразмерного времени при отношении сигнал-шум, равном 4.

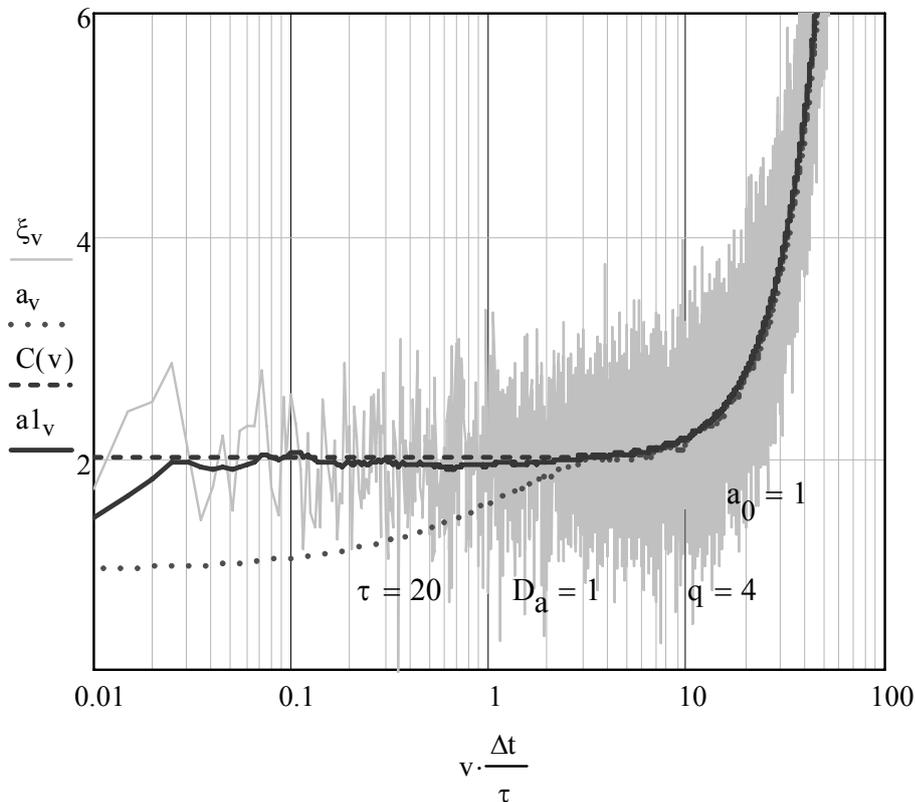


Рис. 2. Реализации выходного сигнала для оптимального и традиционного измерителя

На рис. 2 для сравнения также представлены реализации результирующего сигнала (2) и регулярной его составляющей $c(t)$. Аналогичные данные для постоянной времени $\tau = 60$ с представлены на рис. 3.

Представленные данные свидетельствуют о том, что оптимальный измеритель обладает существенно более высоким быстродействием и отсутствием смещения во времени выходного сигнала (оценки опасного

фактора пожара) при больших значениях постоянной времени традиционного измерителя. На рис. 4 и рис. 5 представлены аналогичные реализации выходного сигнала при отношении сигнал-шум, равном 0,25 для различных значений постоянной времени традиционного измерителя.

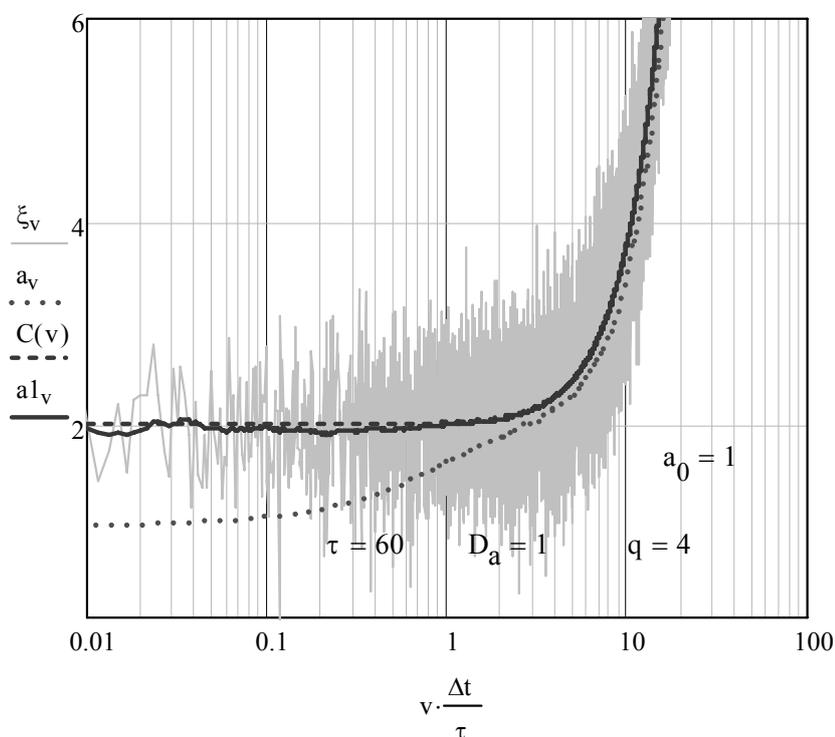


Рис. 3. Реализации выходного сигнала для оптимального и традиционного измерителя

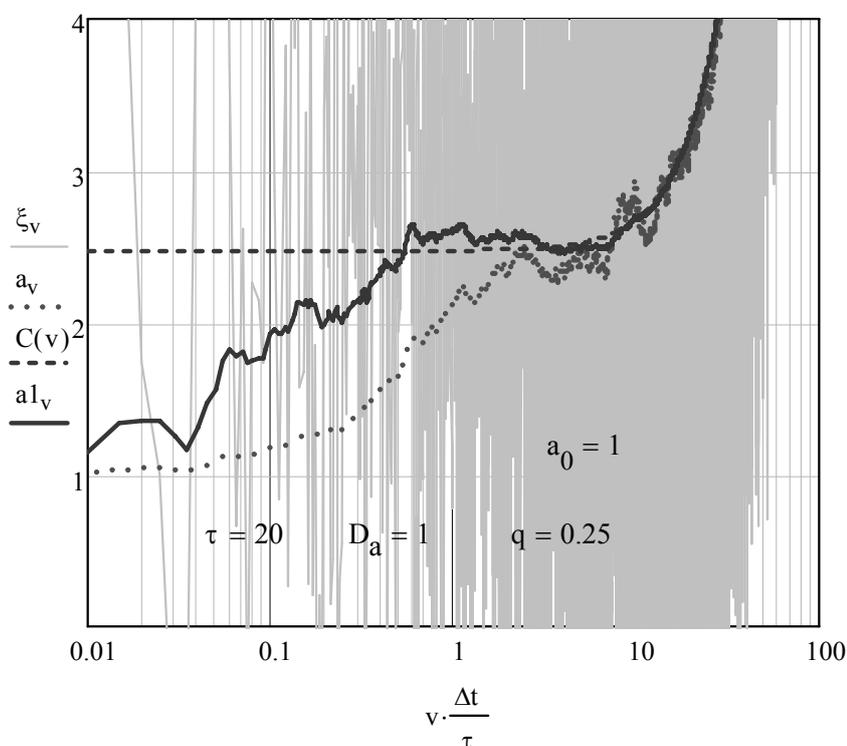


Рис. 4. Реализации выходного сигнала для оптимального и традиционного измерителя

Для расширения области применения синтезированного измерителя предлагается в случае априори неизвестной динамики опасного фактора пожара использовать сигнал с выхода дополнительного измерителя извещателя дифференциального типа. При этом неточности в оценке регулярной и случайной составляющих на выходе измерителя извещателя дифференциального типа соответствующего опасного фактора пожара могут вызывать существенные ошибки оптимального оценивания. Например, случайная составляющая ошибки приводит к росту дисперсии ошибки оценивания, а регулярная составляющая в зависимости от знака приводит к соответствующему смещению оценки. Однако при наличии неточностей быстродействие оптимального измерителя остается большим по сравнению с традиционным измерителем.

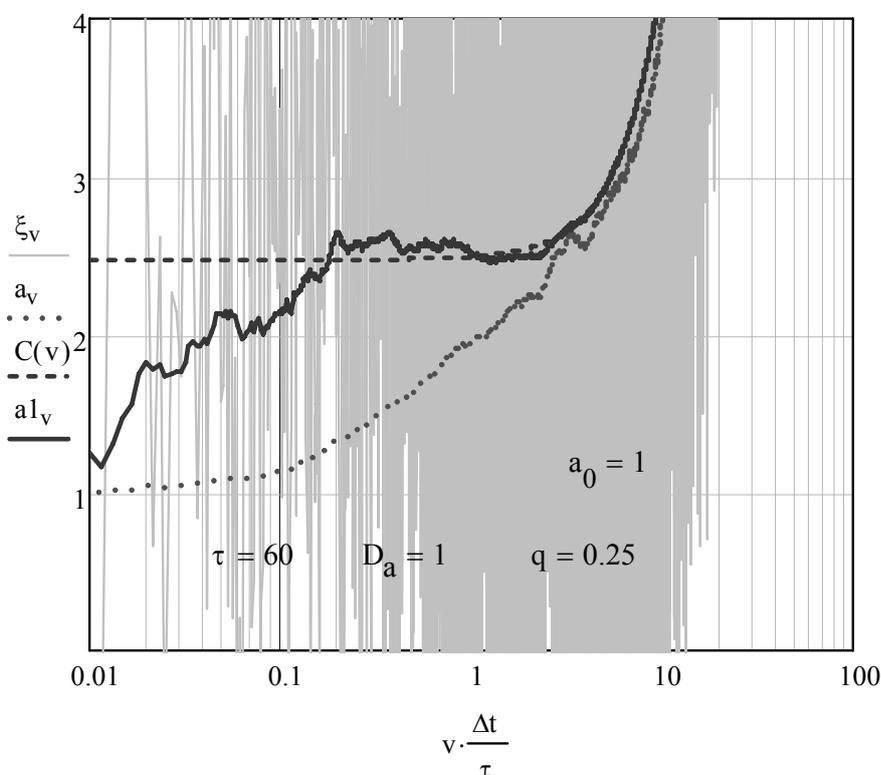


Рис. 5. Реализации выходного сигнала для оптимального и традиционного измерителя

Поэтому при реализации предлагаемого измерителя необходимо использовать измерители извещателей дифференциального типа повышенной точности. Другим возможным направлением снижения требований к точности измерителя дифференциального типа является использование фиксированного значения $K < K_s$. При этом удастся несколько снизить требования к точности дифференциального измерителя за счет некоторого снижения быстродействия.

Выводы. Решена задача синтеза и анализа оптимального измерителя произвольного во времени опасного фактора пожара, наблю-

даемого на фоне гауссовой помехи с нулевым средним и заданной спектральной плотностью. Показано, что оптимальный измеритель является следящим с переменными параметрами. Рассмотрена реализация измерителя, в котором используется фиксированный коэффициент передачи, равный стационарному значению оптимального коэффициента. Установлено, что синтезированный измеритель опасного фактора пожара с произвольной динамикой по структуре отличается от известных измерителей, которые используются в тепловых пожарных извещателях максимального типа. Проведен сравнительный анализ оптимальных и традиционных измерителей тепловых извещателей в различных условиях. Показано, что предлагаемые измерители обладают достаточной точностью и высоким быстродействием и могут быть рекомендованы к использованию в системах пожарной сигнализации и автоматических системах раннего обнаружения пожара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Харьков: МОУ, 1993. – 288 с.
2. 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.
3. Поспелов Б.Б. Синтез оптимального измерителя постоянного во времени случайного уровня опасных факторов чрезвычайных ситуаций / Б.Б. Поспелов, Р.И. Шевченко, О.Ю. Приходько // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2012. – Вип. 16. – С. 85-94.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

Б.Б. Поспелов, Р.И. Шевченко, О.М. Коленов

Синтез оптимального вимірника небезпечних факторів пожежі з довільною динамікою для пожежних сповіщувачів

Виконано синтез і аналіз оптимального вимірювача небезпечних факторів пожежі з довільною динамікою, спостережуваних на тлі адитивних факторів, що заважають.

Ключові слова: вимірювач небезпечних факторів пожежі, пожежний сповіщувач, сповіщувач диференціального типу.

B.B. Pospelov, R.I. Shevchenko, A.N. Kolenov

Synthesis of optimal measuring fire hazards with an arbitrary dynamics for fire detectors

Synthesis and analysis of optimal meter fire hazards with arbitrary dynamics observed on the background of additive interfering factors.

Keywords: meter fire hazards, fire detector, the detector differential type.