

*Поспелов Б.Б., д-р техн. наук, вед. науч. сотр., НУГЗУ,  
Шевченко Р.И., канд. техн. наук, нач. лаб., НУГЗУ,  
Приходько А.Ю., магистр, НУГЗУ*

## **СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ВО ВРЕМЕНИ СЛУЧАЙНОГО УРОВНЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.Н.)

Решена задача синтеза и анализа оптимального измерителя постоянного во времени случайного уровня опасных факторов чрезвычайных ситуаций на фоне гауссовых помех

**Ключевые слова:** оптимальный измеритель уровня опасного фактора, чрезвычайная ситуация, первичный извещатель

**Постановка проблемы.** В последнее время отмечается рост числа различных чрезвычайных ситуаций (ЧС), объемов наносимого ими ущерба и при этом недостаточная эффективность автоматических систем предупреждения о возможном возникновении ЧС. В качестве основных и единственных источников информации об уровне опасных факторов ЧС в таких системах используются различные типы первичных извещателей. При этом эффективность используемых систем существенно зависит от достоверности и точности информации первичных извещателей. Поэтому возникает необходимость использования в первичных извещателях наилучших (оптимальных) в смысле заданных критериев измерителей уровня опасных факторов ЧС. Одной из проблем построения таких измерителей для первичных извещателей является определение (синтез) оптимальной их структуры и анализ потенциальных характеристик для заданных условий применения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Оптимизации и идентификации параметров различных измерителей, используемых в существующих пожарных извещателях, посвящены работы [1,2]. Однако в этих работах исследования выполнены применительно к заданной заранее структуре измерителей. Синтез оптимальной структуры измерителей уровня опасного фактора ЧС при этом не рассматривается. В отличие от структурного не-

структурный подход к синтезу позволяет не только отыскивать оптимальную структуру измерителя среди всех возможных измерителей для заданных условий, но и оценивать потенциальные (предельные) характеристики, и определять степень совершенства существующих измерителей первичных извещателей и предлагаемых решений по их улучшению, а также выбирать пути их эффективной модернизации. При этом следует отметить, что для решения рассматриваемой задачи синтеза измерителя существует хорошо разработанный математический аппарат теории оптимальной оценки и фильтрации.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является синтез и анализ оптимального измерителя случайного уровня опасных факторов ЧС для заданных условий применения. В качестве простейшей, но характерной для ряда реальных условий применения, будем рассматривать ситуацию, при которой уровень опасных факторов на интервале наблюдения представляет собой постоянную во времени случайную величину с известными статистическими характеристиками, наблюдаемую на сопутствующем мешающем фоне в виде гауссовой помехи со спектральной плотностью  $N/2$  и нулевым средним значением. Требуется по результатам наблюдения получить оптимальную оценку неизвестного случайного уровня опасного фактора ЧС. В качестве критерия оптимальности измерения будем рассматривать минимум среднеквадратической погрешности измерения уровня опасного фактора.

В такой постановке рассматриваемая задача может быть отнесена к частной задаче фильтрации процесса, который не меняется на интервале наблюдения, и решена на основе известных методов теории линейной фильтрации.

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

$$da(t) / dt = 0, \quad a(0) = a_0, \quad (1)$$

где  $a_0$  - гауссова случайная величина с математическим ожиданием  $m_a$  и дисперсией  $D_a$ , описывающих средний уровень и дисперсию измеряемого неизвестного опасного фактора ЧС. Уравнение наблюдения, описывающее процесс на входе измерителя первичного извещателя будет определяться с учетом (1) равенством

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

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

Следуя [3], алгоритм оптимальной фильтрации уровня опасного фактора (1) с учетом наблюдения (2) можно представить в виде

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

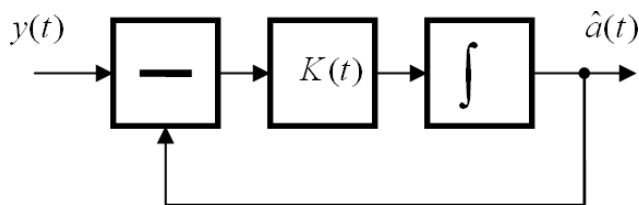
где  $\hat{a}(t)$  - оптимальная оценка уровня опасного фактора ЧС, а  $K(t)$  - функция, называемая коэффициентом передачи фильтра Калмана и определяемая выражением  $K(t) = 2D(t) / N$ , где  $D(t)$  - текущая дисперсия погрешности оценки  $\hat{a}(t)$ . В рассматриваемом случае уравнение для текущей дисперсия погрешности оценки имеет вид

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

После несложных преобразований решение уравнения (4) будет описываться функцией

$$D(t) = D_a N / (N + 2D_a t). \quad (5)$$

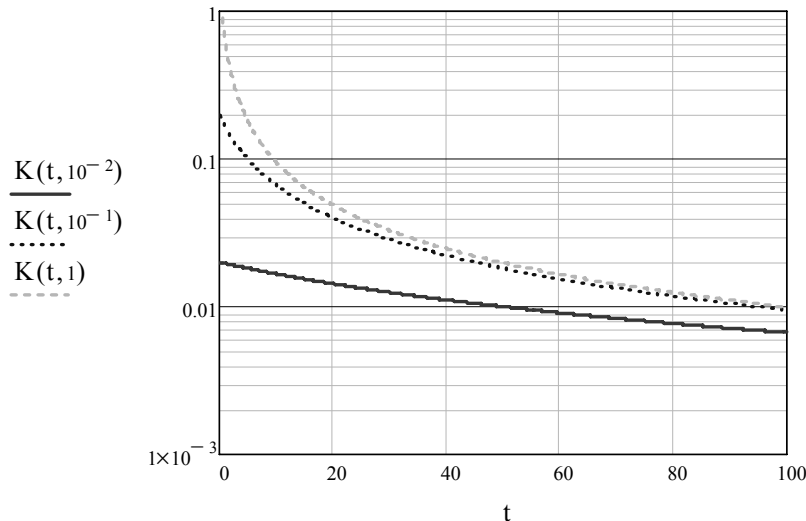
Соотношения (3) и (5) определяют структуру и параметры оптимального измерителя уровня опасного фактора ЧС для рассматриваемых условий. Структура синтезированного оптимального измерителя приведена на рис.1.



**Рис. 1 – Структурная схема оптимального измерителя уровня опасного фактора ЧС первичного извещателя**

Для рассматриваемой ситуации синтезированный оптимальный измеритель должен быть нестационарным и следящим. При этом его нестационарный характер определяется коэффициентом передачи  $K(t)$ , который зависит от времени, спектральной плотности помехи и дисперсии уровня измеряемого опасного фактора. Зависимости коэффициента  $K(t)$  от времени для различных отношений  $q = D_a / N$ , равных  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  и 1, приведены на рис.2.

В частном случае, когда помеха отсутствует или  $D_a$  велико,  $K(t) = 1/t$ , т. е. коэффициент передачи обратно пропорционален времени  $t$ . Это означает, что в случае  $t \rightarrow \infty$  коэффициент передачи  $K(t) = 0$  и фильтр как бы постепенно отключается от наблюдений, сохраняя на выходе интегратора (рис.1), неизменной оценку  $\hat{a}(t)$  измеряемого неизвестного уровня опасного фактора ЧС. При этом дисперсия такой оценки, следуя (5), стремится к нулю. Следовательно, с увеличением времени или интервала наблюдения оценка  $\hat{a}(t)$  на выходе измерителя может быть сколь угодно близкой к истинному значению неизвестного измеряемого уровня опасного фактора.



**Рис. 2 – Зависимость коэффициента передачи во времени в различных условиях применения оптимального измерителя**

Кроме оптимального измерителя с обратной связью (рис.1) возможна его реализация в виде измерителя разомкнутого типа. На основании (3) алгоритм оптимального измерителя разомкнутого типа может быть представлен в виде

$$d\hat{a}(t) / dt + K(t)\hat{a}(t) = K(t)y(t). \quad (6)$$

Вводя функцию  $\tau_o(t) = 1 / K(t)$ , алгоритм (6) может быть записан в виде нестационарного уравнения

$$\tau_o(t)d\hat{a}(t) / dt + \hat{a}(t) = y(t), \quad (7)$$

описывающего выходной процесс  $\hat{a}(t)$  низкочастотного фильтра с переменной постоянной времени  $\tau_o(t)$ , на входе которого действует наблюдаемый процесс  $y(t) = a(t) + n(t)$ . Для упрощения реализации измерителя в оптимальном измерителе (7) переменная постоянная времени  $\tau_o(t)$  может быть заменена фиксированной во времени  $\tau(t) = \tau$  постоянной времени. В этом случае измеритель будет описываться стационарным уравнением

$$\tau d\hat{a}_1(t) / dt + \hat{a}_1(t) = y(t). \quad (8)$$

При этом ясно, что оптимальный (нестационарный) измеритель (7) и измеритель (8), в котором постоянная времени фиксирована (квазиоптимальный), будут иметь различные характеристики. Для количественного сравнения получим выражение дисперсии  $D_T(t)$  погрешности измерения на выходе квазиоптимального измерителя. Введем обозначение  $T(t) = a(t) - \hat{a}_1(t)$ . Вычтем из уравнения (1) уравнение для оценки (8), подставив в него выражение  $y(t)$  из (2). Тогда получим линейное дифференциальное уравнение для погрешности измерения

$$\tau dT(t) / dt + T(t) = -n(t). \quad (9)$$

Учитывая, что в правой части (9) процесс является гауссовым с корреляционной функцией  $\delta(t - t_1)N / 2$ , для нулевых начальных условий  $D_T(0) = 0$  функция, описывающая изменение дисперсии погрешности измерения (9) во времени будет определяться

$$D_T(t, \tau) = N(1 - e^{-2t/\tau}) / 4\tau. \quad (10)$$

Дальнейшую сравнительную оценку для наглядности выполним на примере тепловых пожарных извещателей, в которых измеритель температуры реализован в виде чувствительного элемента с малой активной поверхностью. Для таких измерителей справедливо представление (8), где наблюдения  $y(t)$  представляют собой текущую температуру окружающей среды, определяемую уровнем опасного фактора пожара  $a_0 = \lambda_0$  (статическая температура срабатывания) и неоднородностью температурного фона. В соответствии с EN54 для испытаний тепловых извещателей определены значения постоянных времени  $\tau$  измерителей, равные  $\tau_1 = 20$  с и  $\tau_2 = 60$  с. Зависимости дисперсий погрешности измерения для квазиоптимального  $D_T(t, \tau)$  и оптимального  $D(t)$  измерителей уровня опасного фактора пожара от нормированного времени  $t/\tau$  для условий наблюдения, определяемых отношением  $q = D_a / N$ , представлены на рис.3.

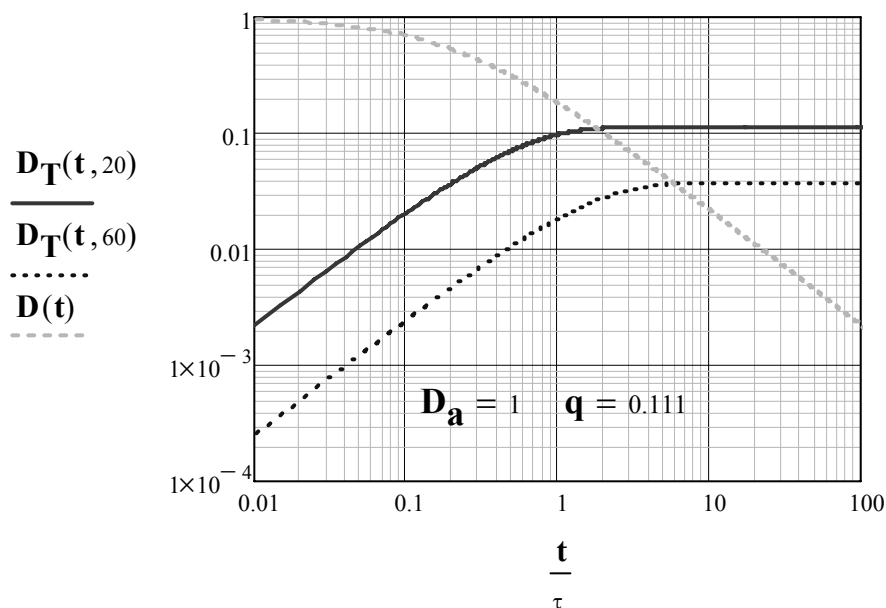


Рис. 3 – Зависимости дисперсий погрешности измерения для квазиоптимальных и оптимального измерителей

Из анализа приведенных данных следует, что в рассматриваемых условиях квазиоптимальные измерители существующих тепловых извещателей на интервалах времени наблюдения, которые превышают  $(3-10)\tau$ , существенно проигрывают оптимальному измерителю. При этом близкие значения дисперсии погрешности

измерения имеют место в моменты времени  $t1 \approx 2\tau1$  и  $t2 \approx 6\tau2$  для соответствующих измерителей. С ростом отношения  $q = D_a / N$  эффективность оптимальных измерителей по сравнению с квазиоптимальными становится еще существенней. Использование квазиоптимальных измерителей приводит к снижению быстродействия и затягиванию переходных процессов, а также появлению отличной от нуля дисперсии погрешности измерения в установившемся режиме, величина которых обратно пропорциональна отношению  $q = D_a / N$ .

Процессы измерения неизвестного уровня опасного фактора пожара в оптимальном измерителе и квазиоптимальных измерителях при значениях  $\tau1 = 20$  с и  $\tau2 = 60$  с иллюстрируются на рис.4 и рис.5 соответственно. Моделирование осуществлялось на основе численного решения соответствующих дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты для случайного измеряемого опасного уровня пожара  $\lambda_0$ , измерений этого уровня  $a_g = a(g\Delta t)$  в квазиоптимальном и  $a1_g = \hat{a}1(g\Delta t)$  в оптимальном измерителе соответственно при начальных условиях  $a_0 = a1_0 = 2$ , где  $g = 1, 2, 3, \dots$  и  $\Delta t = 0,1$  с определяет шаг интегрирования.

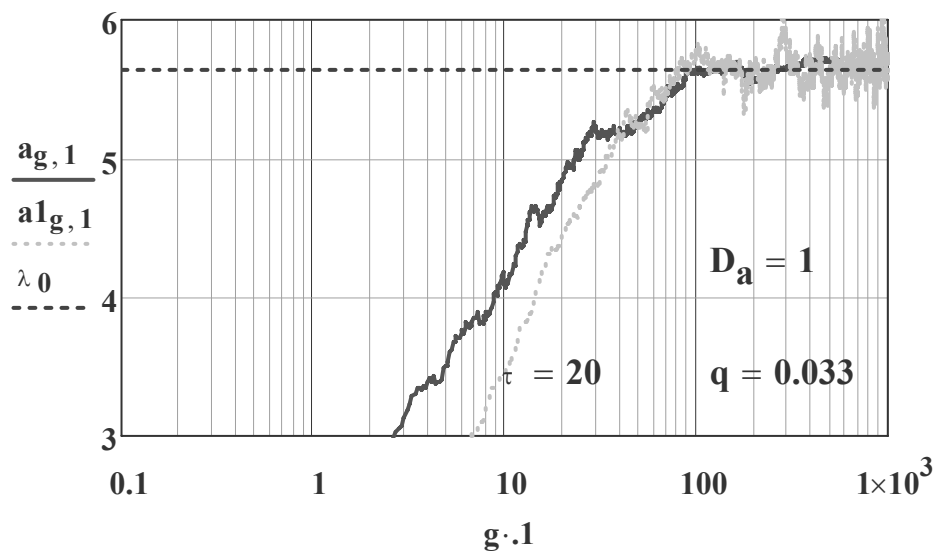
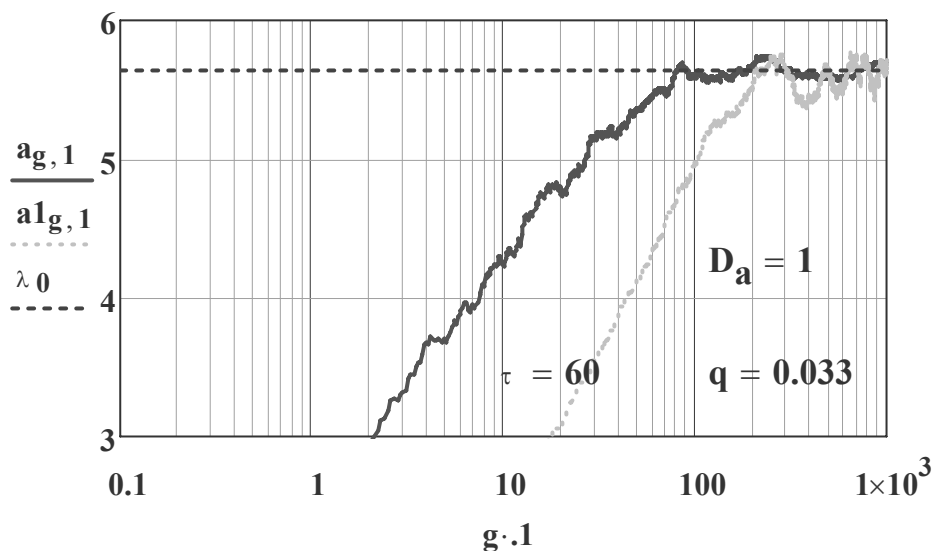


Рис. 4 – Процесс измерения опасного фактора пожара в оптимальном и квазиоптимальном измерителе при величине постоянной времени 20 с

Из анализа приведенных данных следует, что процесс измерения неизвестного уровня опасного фактора пожара при в квазиоптимальных измерителях в условиях значительного мешающего фона характеризуется переходными процессами в течение времени, которое приблизительно равно величине пяти постоянным времени соответствующего измерителя, и сопровождается ростом флуктуаций измерений до уровня, соответствующего установившемуся режиму. При этом в оптимальном измерителе переходный процесс происходит незначительно быстрее, но со значительно меньшим уровнем флуктуаций в установившемся режиме по сравнению с установившимся режимом для квазиоптимального измерителя.



**Рис. 5 – Процесс измерения опасного фактора пожара в оптимальном и квазиоптимальном измерителе при величине постоянной времени 60 с**

В отличие от квазиоптимального в оптимальном измерителе флуктуации установившегося режима стремятся к нулю, обеспечивая для времени  $t \rightarrow \infty$  потенциальную точность измерения с нулевой погрешностью. Если использовать в измерителях квазиоптимальный измеритель, с величиной постоянной времени, равной 60 с, то процесс измерения затягивается, но при этом снижается уровень флуктуаций в установившемся режиме (рис.5). При этом быстродействие оптимального измерителя по сравнению с



квазиоптимальним становиться тем существенней, чем больше величина  $q = D_a / N$  (рис.6).

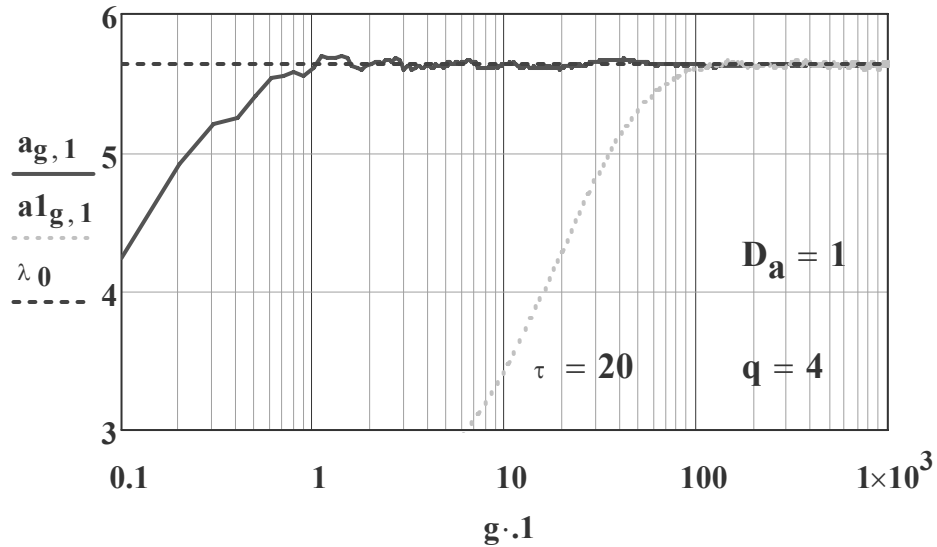


Рис. 6 – Процесс измерения опасного фактора пожара в оптимальном и квазиоптимальном измерителе при величине  $q = 4$

Следует заметить, что отмеченные выше свойства и особенности оптимального и квазиоптимальных измерителей тепловых извещателей характерны для условий, определяемых постоянством во времени измеряемого случайного уровня опасного фактора ЧС. Поэтому в полном объеме распространить их на случай произвольных изменений уровня опасного фактора ЧС и мешающего фона не представляется возможным. Необходимы дополнительные исследования.

**Выводы.** Решена задача синтеза и анализа оптимального измерителя постоянного во времени случайного уровня опасного фактора ЧС, наблюдаемого на фоне гауссовых помех с нулевым средним и заданной равномерной спектральной плотностью. Показано, что оптимальный измеритель извещателей ЧС является следящим, но может быть реализован в виде соответствующего измерителя разомкнутого типа с переменными параметрами. Рассмотрены квазиоптимальные измерители, которые основываются на фиксации постоянной времени оптимального измерителя. Установлено, что квазиоптимальные измерители случайного уровня опасного фактора ЧС по структуре совпадают с известными изме-

рителями, которые, например, используются в тепловых пожарных извещателях. На примере существующих измерителей тепловых извещателей и их параметров проведен сравнительный анализ оптимальных и квазиоптимальных измерителей известных тепловых извещателей в различных условиях. Показано, что рассмотренные квазиоптимальные измерители тепловых извещателей, обладают недостаточной точностью и быстродействием, которые могут быть одной из причин снижения эффективности автоматических систем обнаружения и предупреждения о пожаре.

### 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. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.  
puszu.edu.ua

Поспелов Б.Б., Шевченко Р.І., Приходько О.Ю.

#### **Синтез оптимального вимірювача постійного в часі випадкового рівня небезпечних факторів надзвичайних ситуацій**

Розв'язана задача синтезу та аналізу оптимального вимірювача постійного в часі випадкового рівня небезпечних факторів надзвичайних ситуацій на фоні гаусових перешкод

**Ключові слова:** оптимальний вимірювач рівня небезпечного фактора, надзвичайна ситуація, первинний сповіщувач

Pospelov B.B., Shevchenko R.I., Prykhodko A.Yu.

#### **Synthesis of optimal measuring constant in time random levels emergency situations factors**

We solve the problem of synthesis and analysis of the optimal meter constant in time random level hazard factors the emergency situations in the presence of Gaussian noise

**Keywords:** optimal level meter level hazard, emergency situations, primary detector