

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, научн. сотр., НУГЗУ,
Е.А. Рыбка, к.т.н., зам. нач. центра – нач. отдела, НУГЗУ*

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

(представлено д.т.н. Абрамовым Ю.А.)

Разработана динамическая модель теплового пожарных извещателей в пространстве переменных состояния. Рассмотрена параметрическая измерительная схема в виде терморезистивного чувствительного элемента и измерительного моста.

Ключевые слова: динамическая модель, тепловой пожарный извещатель, терморезистивный чувствительный элемент, пространство состояний.

Постановка проблемы. Тепловые пожарных извещатели являются основными первичными источниками информации о температуре окружающей среды при загорании на объекте. Они преобразуют информацию соответствующих чувствительных элементов в напряжение для последующей пороговой или адресно-аналоговой обработки в системах противопожарной сигнализации и автоматики. Повышение требований к характеристикам систем противопожарной сигнализации и автоматики, а также широкое использование в них тепловых пожарных извещателей [1] обуславливают проблему совершенствования таких систем, которая сопряжена с вопросами моделирования процессов в извещателях.

Анализ последних исследований и публикаций. Математические модели чувствительных элементов тепловых пожарных извещателей рассматривались в [2, 3]. В указанных работах модели представлены преимущественно в интегральной форме и в виде соответствующих импульсных и передаточных функций. Такие модели ограничивают возможности изучения процессов в чувствительных элементах рамками интегральных преобразований. При этом более обширные возможности моделей в переменных состояния не используются. В этой связи актуальной является разработка моделей тепловых пожарных извещателей в переменных состояния.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является разработка модели теплового пожарного извещателя с терморезистивным чувствительным элементом в переменных состояния.

Наибольшее распространение в тепловых пожарных извещателях получили параметрические измерительные схемы. Такие схемы преобразуют импеданс чувствительных элементов в соответствующий электрический сигнал в виде напряжения или тока. В качестве чувствительных элементов часто используются резистивные элементы, а в качестве изме-

рительных схем – мостовые схемы [4]. Одна из диагоналей моста подключена к источнику постоянного напряжения E , а к другой подключается нагрузка в виде, например, усилителя или другого устройства обработки. Обычно внутреннее сопротивление источника значительно меньше сопротивления нагрузки. При этом чувствительность измерительного моста максимальна в случае его равновесия. Пусть сопротивления плеч моста одинаковы и равны величине R_0 . Тогда модель извещателя будет определяться функцией преобразования в виде выходного напряжения

$$u = \frac{E \Delta R}{4R_0(1 + \Delta R / 2R_0)}, \quad (1)$$

где $\Delta R = R_{T_0} \bar{\alpha} \theta$ – приращение сопротивления терморезистивного чувствительного элемента, обусловленное приростом его среднеобъемной температуры на величину θ , R_{T_0} – сопротивление чувствительного элемента при начальной температуре, соответствующей условиям балансировки моста, $\bar{\alpha}$ – температурный коэффициент сопротивления материала чувствительного элемента. На начальной стадии загорания величина θ мала и соответственно малой является величина ΔR . Поэтому для теплового пожарного извещателя с учетом (1) справедлива модель

$$u = \frac{E R_{T_0} \bar{\alpha} \theta}{4R_0}. \quad (2)$$

Величина θ в модели (2) будет определяться формой терморезистивного чувствительного элемента. Тепловые процессы в таком чувствительном элементе описываются уравнением нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [5]. Часто можно полагать, что один размер x чувствительного элемента намного меньше других его размеров y и z . В этом случае тепловые процессы $T(x, t)$ в таком элементе аналогичны процессам нестационарной теплопроводности в пластине неограниченных размеров, описываемых уравнением

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

с начальным условием $T(x, 0) = T_0 = const$ и граничными условиями

$$\left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \right)_{x=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{x=\delta} - T_C); \quad \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \right)_{x=0} = 0, \quad (4)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала чувствитель-

ного элемента; α – коэффициент теплообмена материала; δ – толщина материала пластины; λ – коэффициент теплопроводности стенки чувствительного элемента; T_0 – начальная температура материала чувствительного элемента (температура балансировки измерительного моста извещателя); T_C – температура среды в месте размещения пожарного извещателя.

Вводя безразмерную (относительную избыточную) температуру $\bar{\theta} = (T_C - T) / (T_C - T_0)$ и безразмерную координату $\bar{x} = x / \delta$, а также критерии Био $Bi = \alpha \delta / \lambda$ и Фурье $Fo = at / \delta^2$ решение уравнения (3) с учетом (4) методом Фурье будет определяться

$$\bar{\theta}(\bar{x}, Fo) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin(K_i) \cos(K_i \bar{x}) \exp(-K_i^2 Fo)}{K_i + \sin(K_i) \cos(K_i)}, \quad (5)$$

где K_i – решения трансцендентного уравнения $ctg(K) = K / Bi$, которое определяет K_i как функцию числового параметра Bi для всех $i = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Приращение размерной температуры чувствительного элемента для произвольных значений \bar{x} и Fo .

$$\theta(\bar{x}, Fo) = T_C - T(\bar{x}, Fo) = (T_C - T_0) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin(K_i) \cos(K_i \bar{x}) \exp(-K_i^2 Fo)}{K_i + \sin(K_i) \cos(K_i)}. \quad (6)$$

Выражение под знаком суммы в (6) определяет безразмерную пространственно-временную импульсную характеристику рассматриваемого терморезистивного чувствительного элемента. Усредняя (6) по параметру \bar{x} , приращение размерной средней температуры для чувствительного элемента

$$\theta(Fo) = (T_C - T_0) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2(K_i) \exp(-K_i^2 Fo)}{K_i^2 + K_i \sin(K_i) \cos(K_i)}. \quad (7)$$

Полагая, что $Fo = at / \delta^2$, выражению (7) для ограниченного числа n слагаемых может быть поставлен в соответствие динамический векторный процесс, описываемый в переменных состояния

$$B \frac{d\Theta(t)}{dt} + \Theta(t) = A(T_C - T_0), \quad (8)$$

где $\Theta(t)$ – вектор переменных состояния $\Theta_i(t)$ для всех $i = 1, 2, 3, \dots, \infty$, определяющих частное приращение температуры чувствительного элемента, обусловленное каждым корнем K_i в выражении (7); B – диагональная матрица частных постоянных времени чувствительного элемента со-

ответствующего размера с элементами $B_{i,i} = \delta^2 / K_i^2 a$; A – вектор частных статических коэффициентов передачи чувствительного элемента соответствующего размера с элементами $A_i = \frac{2 \sin^2(K_i) \delta^2}{[K_i^2 + K_i \sin(K_i) \cos(K_i)] K_i^2 a}$.

Переход от рассмотренного вектора переменных состояния $\Theta(t)$ (8) к исходной средней размерной температуре $\theta(t)$ в выражении (7) будет определяться уравнением наблюдения

$$\theta(t) = H^T \Theta(t), \quad (9)$$

где H – вектор соответствующего размера с элементами, равными единице. Выражения (8) и (9) определяют модель рассматриваемого терморезистивного чувствительного элемента в переменных состояния. Для значений $B_i \leq 1$ в модели (8), (9) терморезистивного чувствительного элемента с достаточной степенью точности можно ограничиться только первым слагаемым. В этом случае частная модель на основании (8) будет определяться одним уравнением состояния

$$B_{1,1} \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = A_1 (T_C - T_0). \quad (10)$$

С учетом (10) и модели (2) выходное напряжение извещателя с рассматриваемым типом терморезистивного чувствительного элемента будет описываться дифференциальным уравнением

$$B_{1,1} \frac{du(t)}{dt} + u(t) = \frac{E R_{T_0} \bar{\alpha}}{4R_0} A_1 (T_C - T_0), \quad (11)$$

где $B_{1,1} = \delta^2 / K_1^2 a$, а величина $A_1 = \frac{2 \sin^2(K_1) \delta^2}{[K_1^2 + K_1 \sin(K_1) \cos(K_1)] K_1^2 a}$. Уравнение (11) определяет частную динамическую модель (первого приближения) теплового пожарного извещателя с терморезистивным чувствительным элементом в виде тонкой пластины и мостовой измерительной схемой.

Для определения более общей структуры полученной модели теплового пожарного извещателя, будем полагать, что число слагаемых в сумме (7) превышает единицу и ограничивается числом M . Тогда исходное уравнение (8) преобразуется в уравнение

$$\frac{d\Theta(t)}{dt} = -B^{-1} \Theta(t) + B^{-1} A (T_C - T_0), \quad (12)$$

где $\Theta(t)$ – соответствующий вектор состояния размера $M \times 1$; B^{-1} – матрица, обратная матрице B , размера $M \times M$; A – вектор размера $M \times 1$.

Уравнение наблюдения (9) в этом случае будет определяться

$$\theta(t) = H^T \Theta(t), \quad (13)$$

где H – вектор размера $M \times 1$ с элементами, равными единице. С учетом модели (2) и выражений (12) и (13) модель теплового пожарного извещателя с рассматриваемым типом терморезистивного чувствительного элемента будет описываться уравнением состояния

$$\frac{dU(t)}{dt} = -B^{-1}U(t) + C(T_C - T_0), \quad (14)$$

где $U(t)$ – конечномерный вектор переменных состояния $\Theta_i(t)$ размера $M \times 1$; $C = B^{-1}A$ – конечномерный вектор размера $M \times 1$ соответствующих параметров терморезистивного чувствительного элемента в виде тонкой пластины. Уравнение наблюдения (13) в этом случае с учетом модели мостовой измерительной схемы примет вид:

$$u(t) = S^T U(t), \quad (15)$$

где S – вектор размера $M \times 1$ с элементами, равными $\frac{E R_{T_0} \bar{\alpha}}{4R_0}$. Уравнение

состояния (14) и уравнение наблюдения (15) определяют общую модель теплового пожарного извещателя рассматриваемого типа в переменных состояния.

На рис. 1 приведена структурная схема многомерной модели теплового пожарного извещателя рассматриваемого типа в переменных состояния, определяемых (14) и (15).

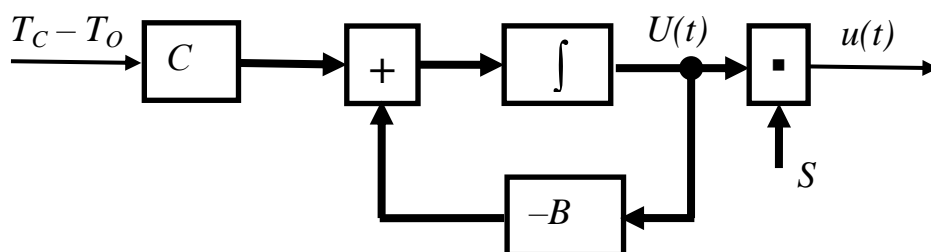


Рис. 1. Структурная схема многомерной модели теплового пожарного извещателя рассматриваемого типа в переменных состояния

Жирными линиями на рис. 1 обозначены векторные (многомерные) связи. Данная модель, являясь представлением в переменных состояния, позволяет легко анализировать влияние на тепловой пожарный извеща-

тель различных случайных воздействий, проявляющихся, например, в среде, где размещается чувствительный элемент, или в различных элементах самого чувствительного элемента и мостовой измерительной схемы. Для этого достаточно в соответствующее место на структурной схеме ввести заданное случайное воздействие и описать его адекватной моделью.

В случае $Bi \leq 1$ частная модель теплового пожарного извещателя рассматриваемого типа в переменных состояния, следуя (14) и (15), будет определяться единственным уравнением состояния

$$\frac{d\Theta_1(t)}{dt} = -\Theta_1(t)/B_{1,1} + A_1(T_C - T_0)/B_{1,1} \quad (16)$$

и уравнением наблюдения

$$u(t) = \frac{E R_{T_0} \bar{\alpha}}{4R_0} \Theta_1(t). \quad (17)$$

Структурная схема частной модели (16) и (17) изображена на рис. 2.

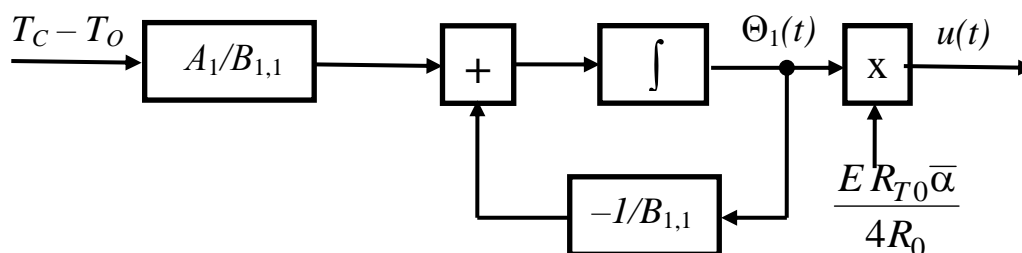


Рис. 2. Структурная схема частной модели теплового пожарного извещателя в переменных состояния

Частная модель на рис. 2 также позволяет легко учесть влияние аддитивных и мультипликативных случайных воздействий в различных элементах, как чувствительного элемента, так и элементах мостовой измерительной схемы. Например, для данной схемы принятые в соответствии с ДСТУ EN 54 параметры $B_{1,1}$ равны значениям 20с и 60с.

Выводы. Полученные выше модели, в отличие от известных моделей [2, 3], позволяют исследовать точность теплового пожарного извещателя в различных условиях его применения с учетом случайных возмущений температуры среды, если таковые присутствуют, а также случайных начальных условий и процессов, действующих в различных элементах извещателя. Для этого необходимо задаться моделью соответствующих случайных начальных условий или воздействий (процессов) и учесть характер их взаимодействия с элементами теплового пожарного извещателя. К настоящему времени в литературе известно множество

моделей случайных начальных условий, процессов и алгоритмов их моделирования, которые без труда могут быть использованы при анализе характеристик тепловых пожарных извещателей с учетом различных случайных воздействий. Следует заметить, что полученная в пространстве состояний модель теплового пожарного извещателя может быть расширена на случай не только аддитивных, но и мультипликативных, а также комбинированных случайных воздействий, действующих в различных элементах рассматриваемого типа извещателя. При этом полученные структурные схемы моделей теплового пожарного извещателя остаются справедливыми и для других простейших типов формы чувствительного элемента, отличных от рассмотренной тонкой пластины, но при иных значениях параметров $B_{i,i}$ и A_i .

ЛИТЕРАТУРА

1. Oppelt U. Improvement on fire detectors by using multiple sensors [Text] / U. Oppelt // Fire & Safety, 2006. Режим доступа: <http://www.securitysa.com/default.aspx?pkliissueid=550>.
2. Абрамов Ю.А. Обобщенные модели чувствительных элементов датчиков первичной информации / Ю.А. Абрамов, В.П. Садковой // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2006. – Вип. 35. – С. 290–294.
3. Абрамов Ю.А. Модели чувствительного элемента датчика первичной информации системы мониторинга локального типа / Ю.А. Абрамов, В.В. Коврегин, М.Н. Витько // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: УЦЗУ, 2006. – Вип. 6. – С. 10–15.
4. Полищук В.С. Измерительные преобразователи / В.С. Полищук. – К.: Вища школа, 1981. – 296 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

Получено редколлегией 10.10.2016

Б.Б. Поспелов, Є.О. Рибка

Динамічна модель теплового пожежного сповіщувача в просторі станів

Розроблена динамічна модель теплового пожежних сповіщувачів в просторі змінних стану. Розглянуто параметричну вимірювальну схему у вигляді терморезистивного чутливого елемента і вимірювального моста.

Ключові слова: динамічна модель, тепловий пожежний сповіщувач, терморезистивний чутливий елемент, простір станів.

B.B. Pospelov, E.A. Rybka

Dynamic model thermal fire detector in the state space

Developed dynamic model thermal fire detectors in the space of state variables. Is considered the parametric measuring circuit in the form of thermoresistive sensitive element and measuring bridge.

Keywords: dynamic model, heat detector, thermoresistive sensitive element, state space.