

Розроблено метод та систему автоматичного керування процесом хімічної нейтралізації ВВП у процесі гуманітарного розмінування, яка забезпечує нормалізацію температури, концентрації та швидкості реакції хімічної нейтралізації при нестационарних збуруючих діях

Ключові слова: хімічна нейтралізація, система автоматичного керування, нормалізація, регулятор, фільтр, принцип роздільності

Разработаны метод и система автоматического управления процессом химической нейтрализации ВОП в процессе гуманитарного разминирования, обеспечивающая нормализацию температуры, концентрации и скорости реакции химической нейтрализации при нестационарных возмущающих воздействиях

Ключевые слова: химическая нейтрализация, система автоматического управления, нормализация, регулятор, фильтр, принцип разделимости

A method and a system for automatic control of the process of UXOs deacidification in the process of humanitarian demining are developed; they provide normalization of the temperature, the concentration, and the reaction rate of deacidification at unsteady perturbation actions

Key words: deacidification, automatic control system, normalization, regulator, filter, principle of separability

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ ПРИ ГУМАНИТАРНОМ РАЗМИНИРОВАНИИ

С.К. Шульгин

Кандидат технических наук, ассистент*
E-mail: Shusek@ukr.net

В.А. Ульшин

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

*Кафедра системной инженерии
Восточнoукраинский национальный университет имени Владимира Даля
кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, Украина, 91000
Контактный тел.: (0642) 47-14-44
E-mail: ulshin@ccs.snu.edu.ua

М.В. Дубровкина

Кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией специализированных систем
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра»
ул. Звейнека, 145 с, г. Луганск, Украина, 91033
Контактный тел.: (0642) 71-75-92, 068-689-01-60
E-mail: margarita_dubrov@mail.ru

Введение

На сегодняшний день одной из нерешенных проблем гуманитарного разминирования является проблема снижения опасности обезвреживания взрывоопасных предметов (ВОП) [1-4] с поврежденными корпусами, состояние механизмов взрывателей которых неизвестно или ВОП, оснащенных устройствами неизвлекаемости, которые установлены в местах возможного скопления людей, на важных объектах, а так-

же в местах, в которых несанкционированный взрыв может повлечь за собой экологическую катастрофу. Такими ВОП являются террористические заряды, конструкция которых обычно неизвестна, невзорвавшиеся боеприпасы, подвергнувшиеся механическим, тепловым или другим воздействиям, и диверсионные мины, имеющие несколько степеней защиты от обезвреживания. Как правило, такие ВОП нельзя уничтожить на месте методом подрыва и опасно транспортировать на полигоны для уничтожения.

Актуальность исследований

Одним из перспективных методов обезвреживания таких ВОП является их химическая нейтрализация [4, 5]. Процесс химического обезвреживания ВОП включает в себя две последовательные операции: формирование отверстий (полостей) в корпусе ВОП (в данном случае методом электрохимической обработки) [6] с последующей химической нейтрализацией и вымыванием взрывчатого вещества с помощью растворителя. Основными параметрами процесса химической нейтрализации, которые необходимо контролировать на этапе формирования отверстий являются температура электролита и момент окончания процесса формирования [5], а на этапе нейтрализации – температура и концентрация реагента. Так как вышеописанные ВОП опасно транспортировать на полигоны для уничтожения, то процесс обезвреживания выполняется в полевых условиях и прямое определение концентрации реагента является затруднительным, поэтому концентрация реагента определяется косвенным методом – по значению расхода используемых реагента и воды. Однако растворитель – это сложная (многокомпонентная) смесь, которая в процессе химической нейтрализации вступает в реакцию с взрывчатым веществом, поэтому полученное значение концентрации не всегда точно отражает концентрацию реагента. Следовательно, необходимо вести дополнительный параметр контроля процесса химической нейтрализации, который даст информацию о протекании реакции. Таким параметром является скорость процесса нейтрализации. Однако контроль данного параметра обычно осуществляется посредством визуального контроля перемещения дымовыделения в процессе нейтрализации, а при применении некоторых реагентов дымовыделение может быть очень слабым.

Постановка задачи

С целью недопущения теплового инициирования взрыва взрывчатого вещества (ВВ) и его полного вымывания в процессе нейтрализации требуется разработать систему автоматического управления процессом нейтрализации ВВ, которая позволила бы нормализовать температуру, концентрацию и скорость реакции в области процесса нейтрализации.

Полученные результаты

Представленная система автоматического управления (рис. 1) обеспечивает управление процессом химической нейтрализации взрывчатого вещества путем формирования с помощью регулятора требуемой для нормализации температуры величины объемного расхода воды, с последующей коррекцией значения управляющего воздействия для обеспечения нормализации концентрации и скорости реакции в области процесса нейтрализации ВВ.

Возмущающим воздействием в системе является объемный расход реагента-растворителя.

Процесс нормализации температуры раствора в канале управления «объемный расход воды - температу-

ра раствора в процессе нейтрализации» описывается при помощи дифференциального уравнения первого порядка:

$$T_{\text{темп}} \cdot \frac{dt^0(t)}{dt} + t^0(t) = K_{\text{темп}} \cdot Q^1_{\text{воды}}(t), \tag{1}$$

где $K_{\text{темп}} = \frac{t^0(t)}{Q_{\text{воды}}(t)}$ - коэффициент передачи $\left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{л/мин}}\right)$; $T_{\text{темп}} = \frac{V_{\text{ВВ}}}{Q^1_{\text{воды}}(t)}$ - постоянная времени датчика температуры (мин), где $Q_{\text{воды}}$ - объемный расход воды (л/мин), $V_{\text{ВВ}}$ - объем взрывчатого вещества, который должен быть растворен.

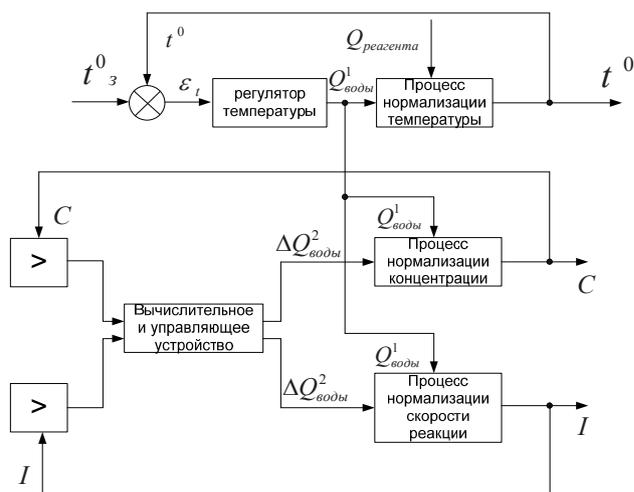


Рис. 1. Функциональная схема САУ химической нейтрализации взрывчатого вещества: t^0 - фактическое значение температуры; ϵ_t - рассогласование в канале управления «объемный расход воды – температура раствора в процессе нейтрализации»; C - фактическое значение концентрации; I - фактическая сила тока

В канале управления «объемный расход воды – температура раствора в процессе нейтрализации» с помощью регулятора формируется управляющее воздействие $Q^1_{\text{воды}}(t)$, обеспечивающее равенство нулю в установившемся режиме разности фактической t^0 и заданной температуры t^0_z в области процесса нейтрализации. В случае, если данного расхода воды недостаточно для нормализации концентрации и, следовательно, скорости реакции в области процесса нейтрализации, вычислительное устройство осуществляет пошаговое увеличение объемного расхода воды $Q^1_{\text{воды}}(t)$ на величину $\Delta Q^2_{\text{воды}}(i)$, пока не будут выполнены условия $C \in [C_1; C_2]$ или $I \in [I_1; I_2]$, в зависимости от того, имеется ли возможность контролировать концентрацию раствора или скорость реакции в процессе нейтрализации. Здесь C_1 и C_2 – допустимые границы концентрации раствора; I_1 и I_2 - допустимые границы силы тока в цепи фоторезистора в камере анализатора дымовыделения, соответствующие скорости реакции в процессе нейтрализации.

Таким образом, объемный расход воды, необходимый для поддержания на требуемом уровне температуры, концентрации и скорости реакции в области процесса нейтрализации определяется из следующего выражения:

$$Q_{\text{воды}} = \begin{cases} Q_{\text{воды}}^1, & \text{если } t^0 - t_7^0 = 0 \wedge (C \in [C_1; C_2] \vee I \in [I_1; I_2]), \\ Q_{\text{воды}}^1 + \Delta Q_{\text{воды}}^2(i), & \text{если } C \notin [C_1; C_2] \vee I \notin [I_1; I_2], \end{cases} \quad (2)$$

где $Q_{\text{воды}}^1$ - значение объемного расхода воды, сформированного регулятором в канале управления «объемный расход воды – температура раствора в процессе нейтрализации»; $\Delta Q_{\text{воды}}^2$ - значение объемного расхода воды, сформированного вычислительным устройством для обеспечения условий $C \in [C_1; C_2]$ или $I \in [I_1; I_2]$.

$$\Delta Q_{\text{воды}}^2(i) = \begin{cases} -k \cdot (C - C_2), & \text{если } C > C_2, \\ k \cdot (C_1 - C), & \text{если } C < C_1, \end{cases}$$

где k - коэффициент пропорциональности.

Принимая во внимание динамические характеристики процесса нормализации температуры раствора в процессе нейтрализации, структурная схема канала управления «объемный расход воды – температура раствора в процессе нейтрализации» выглядит следующим образом (рис. 2):

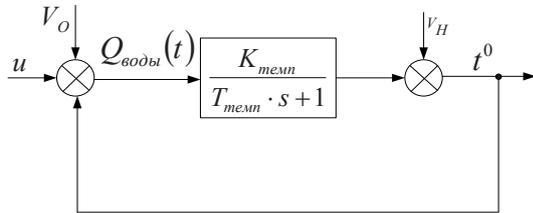


Рис. 2. Структурная схема канала управления «объемный расход воды - температура раствора в процессе нейтрализации»

Процесс нормализации температуры в канале управления «объемный расход воды – температура раствора в процессе нейтрализации» и наблюдение за данным процессом описываются уравнением вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -\frac{1}{T_{\text{темп}}} x(t) + \frac{K_{\text{темп}}}{T_{\text{темп}}} u + V_o, \\ y(t) &= x(t) + V_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь V_o и V_n – гауссовские белые шумы с характеристиками [7].

$$\begin{aligned} M\{V_o(t)\} &= 0; \quad M\{V_o(t) \cdot V_o^T(t')\} = Q_0 \cdot \delta(t-t'), \\ M\{V_n(t)\} &= 0; \quad M\{V_n(t) \cdot V_n^T(t')\} = r_0 \cdot \delta(t-t'), \\ M\{V_n(t) \cdot V_o^T(t')\} &= S_0 \cdot \delta_{ij}, \end{aligned}$$

x^0 - гауссовская случайная величина с характеристиками

$$\begin{aligned} M\{x^0\} &= \bar{x}^0, \\ M\{(x^0 - \bar{x}^0) \cdot (x^0 - \bar{x}^0)^T\} &= P_0, \end{aligned}$$

- симметричные неотрицательно-определенные матрицы; r_0 - положительно-определенная симметричная матрица; $\delta(t-t')$ - символ Кронекера.

Шум объекта возникает при случайных изменениях объемного расхода реагента-растворителя на входе процесса, а шум наблюдения – при измерении температуры и концентрации. Шум наблюдения обусловлен погрешностью измерения, нарушениями условий измерений.

В качестве шума объекта и шума наблюдения в работе принят гауссовский шум. Указанные возмущения заранее предсказать невозможно, поэтому используются экспериментальные методы определения их вероятностных характеристик.

Задача синтеза САУ процессом химической нейтрализации взрывоопасного вещества формулируется как задача синтеза линейной непрерывной системы автоматического управления при стохастических возмущающих воздействиях, по интегральному квадратичному критерию качества, характеризующему близость кривой, определяющей идеальный переходный процесс, характеризующий нормализацию температуры в области нейтрализации, и кривой, соответствующей реальному процессу нормализации, предусматривающего синтез оптимального непрерывного фильтра и выбор непрерывного детерминированного регулятора, в котором в качестве фазового вектора используются его оценка, полученная с помощью фильтра [8].

Для процесса нормализации температуры в процессе нейтрализации вектор состояния определяется как $X(t) = [x(t)]$. Несмещенная оценка $\hat{X}(t) = [\hat{x}(t)]$, полученная на основе измеренных выходных переменных $y_{\text{темп}}(\tau) = t^0(\tau)$ и обеспечивающая минимум среднего квадрата ошибки $J_0 = M\{(X(t) - \hat{X}(t))^T \cdot (X(t) - \hat{X}(t))\} \rightarrow \min$ процесса нормализации температуры в процессе нейтрализации определяется как

$$\dot{\hat{x}}(t) = -\frac{1}{T_{\text{темп}}} \hat{x}(t) + \frac{K_{\text{темп}}}{T_{\text{темп}}} u + K^0 \cdot (y_{\text{темп}}(\tau) - \hat{x}(t)), \quad (5)$$

Для модели динамики объекта управления по каналу управления «объемный расход воды – температура раствора в процессе нейтрализации» квадратичный критерий качества принимает вид:

$$J = M \left\{ \int_{t_0}^{t_f} x^2(t) \cdot q \right\}, \quad (6)$$

где q - положительно-определенная величина.

В качестве алгоритма управления примем пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритм вида:

$$U(t) = K_p \cdot \hat{x}(t) + K_d \cdot \frac{d\hat{x}(t)}{dt} + K_i \cdot \int_0^{\infty} \hat{x}(t) dt, \quad (7)$$

где K_p, K_d, K_i - коэффициенты усиления соответственно пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих алгоритма управления;

$\hat{x}(t)$ - оценка выходной координаты $y_{\text{темп}}(\tau) = t^0(\tau)$.

Структурная схема САУ процессом нормализации температуры раствора при химической нейтрализации взрывчатого вещества методом вымывания представлена на рис. 3.

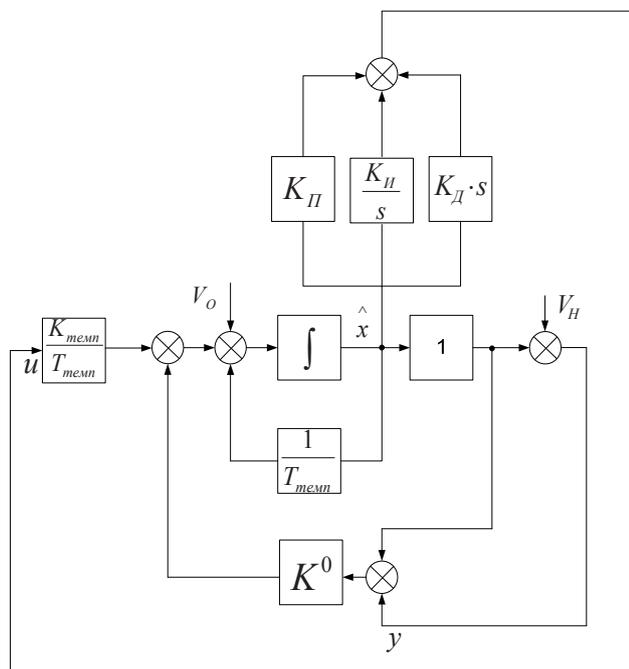


Рис. 3. Структурная схема САУ процессом нормализации температуры

Выводы

1. Основными параметрами процесса химической нейтрализации взрывоопасных предметов, которые необходимо контролировать на этапе вымывания взрывоопасного вещества с целью недопущения теплового инициирования взрыва являются температура и концентрация раствора.

2. Ввиду того, что растворитель имеет многокомпонентный состав и в процессе химической нейтрализации вступает в реакцию с взрывчатым веществом, полученное значение концентрации не всегда точно отражает концентрацию реагента, что требует введения контроля скорости процесса нейтрализации.

3. Реализованная система автоматического управления процессом химической нейтрализации взрывоопасного вещества путем вымывания обеспечивает формирование с помощью регулятора требуемой для нормализации температуры величины объемного расхода воды, с последующей коррекцией значения управляющего воздействия для обеспечения нормализации концентрации и скорости реакции в области процесса нейтрализации взрывчатого вещества.

4. На процесс химической нейтрализации взрывоопасного вещества действуют возмущения, обусловленные изменениями объемного расхода реагента-растворителя на входе процесса, а также возмущения, обусловленные неточностью и помехами измерения, которые являются соответственно шумом объекта управления и шумом наблюдения и рассматриваются как последовательность независимых гауссовских случайных величин.

5. Процесс нормализации температуры раствора в канале управления «объемный расход воды - температура раствора в процессе нейтрализации» описы-

вается при помощи дифференциального уравнения первого порядка.

6. Задача синтеза САУ процессом химической нейтрализации взрывоопасного вещества формулируется как задача синтеза линейной непрерывной системы автоматического управления при стохастических возмущающих воздействиях, по интегральному квадратичному критерию качества, характеризующему близость кривой, определяющей идеальный переходный процесс, характеризующий нормализацию температуры в области нейтрализации, и кривой, соответствующей реальному процессу нормализации, предусматривающего синтез оптимального непрерывного фильтра и выбор непрерывного детерминированного регулятора, в котором в качестве фазового вектора используются его оценка, полученная с помощью фильтра.

Литература

1. Ульшин В.А. Тенденции создания технологий и технических средств для обезвреживания взрывоопасных предметов при проведении операций гуманитарного разминирования / В.А. Ульшин, В.А. Бигвава, Г.Л. Логунова // Науковий вісник Укр НДПБ – 2009. – №2 (20). – С. 189-196.
2. Operational Evaluation Test of Mine Neutralization Systems. – Alexandria: Institute for Defense Analyses, 2005. – 93 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iter.ws/pdf/FinalReportNeutSysEval.pdf>.
3. Дубровкина М. В. Специальные средства, реагирующие на различные виды взрывчатых веществ (вв). Общие технические требования / М. В. Дубровкина // Науковий вісник УНДІ ПБ. – 2007. – № 2 (16). – С. 181-188.
4. Исследование теоретических основ приборного, технологического и методического обеспечения гуманитарного разминирования: Отчет о НИР / Министерство образования и науки Украины. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Искра"; № ГР 0106Г001178; Инв. № 75. – Луганск, 2008. – 897 с.
5. Дубровкина М.В. Система управления процессом химической нейтрализации взрывчатого вещества при обезвреживании взрывоопасных предметов / Дубровкина М.В., Логунова Г. Л., Бигвава В.А. // Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг (ІУС та КМ-2010): Матеріали I міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих учених (ДонНТУ, 19-21 мая 2010, г. Донець), - Т.1. - С. 63-67.
6. А.А. Власова. Проблемы осуществления электрохимической размерной обработки в составе комплекса по обезвреживанию боеприпасов / А.А. Власова; В.А. Бигвава // Артиллерийское и стрелковое вооружение, 2010.
7. Теория автоматического управления: [учебник для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. / [под ред. А.А. Воронова]. – М.: Высш. шк., 1986. Ч. 2: Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления, 1986 – 504с., илл. – (2-е изд., перераб. и доп.).
8. Ульшин В.А. Комбинированная система автоматического управления процессом флотации углей / В.А. Ульшин, С.К. Шульгин // Праці Луганського відділення Міжн. Акад. інформ. – 2009. – №2(20). Ч.2 – С. 83-87.