

УДК 681.53

А.В. ЧУМАЧЕНКО

НПП ХАРТРОН-АРКОС, Україна

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК ПИД-РЕГУЛЯТОРА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Рассматриваются особенности построения замкнутой математической модели объекта управления (расход газовой среды) с ПИД-регулятором для автоматизированной системы мониторинга объёмной активности газовых сред. Выполнен анализ существующего вероятностного подхода для определения настроек ПИД-регулятора, исходя из критерия максимальной вероятности работоспособности. Адаптирована методика нахождения настроек ПИД-регулятора внутри области устойчивости. Полученные, в ходе моделирования, результаты апробированы на реальном исследовательском стенде с положительным результатом, обеспечивающим минимальное время переходного процесса относительно уже известных результатов натурных тестов. Сделано заключение о правильности использования математических моделей при поиске оптимальных настроек ПИД-регулятора в связи с увеличением скорости и точности процесса поиска.

Ключевые слова: замкнутая математическая модель объекта управления с ПИД-регулятором, вероятностные методы, максимальная вероятность работоспособности, автоматизированная система радиационного контроля, ПИД-регулятор, регулирование, расход газовых сред.

Введение

Наиболее критичным параметром любой системы радиационного контроля и мониторинга объёмной активности газовых сред является время запаздывания между событием возникновения аварийной ситуации (повышенного уровня активности в газовой среде) и фиксации датчиком данного момента.

Рассмотренная в предыдущих публикациях [1–4], автоматизированная система контроля и мониторинга объёмной активности (АСКМ ОА) выбросов йодов, золь и инертных радиоактивных газов должна также характеризоваться минимальным временем запаздывания, т.е. процесс регулирования расхода газовой среды в АСКМ ОА должен обеспечивать выход на устойчивое значение требуемого расхода (для датчика радиационного контроля) за минимальное время. Результаты тестирования ПИД-регулятора АСКМ ОА на исследовательском стенде дали возможность найти настройки, обеспечивающие минимальное время переходного процесса – 38 секунд.

Несмотря на тот факт, что это лучший показатель среди конкурентов [1–3], возникает необходимость уточнения результатов поиска оптимальных настроек ПИД-регулятора, что напрямую связано со значительным увеличением объёма экспериментов.

Натурные испытания на исследовательском стенде являются более трудоёмкими, чем проведение исследований с использованием математической модели объекта управления, т.е. возможность проведения объёмных экспериментов более затруднена.

Описанная в предыдущей статье [4], математическая модель расхода газовой среды для АСКМ ОА позволяет сформировать общую математическую модель в виде замкнутого контура – объект управления и регулятор. Исследованию такой общей математической модели с точки зрения вероятностного подхода к определению оптимальных настроек ПИД-регулятора АСКМ ОА и посвящена данная статья.

Постановка задачи

Построение математической модели объекта управления в виде расчётной схемы расхода газовой среды в зависимости от положения регулирующей арматуры [4] позволяет получать (строить) области устойчивости и выбирать оптимальные коэффициенты для различных законов управления с использованием специализированных сред инженерного моделирования без проведения натурных испытаний. Это является необходимым свойством рассматриваемой математической модели, но не достаточным, т.к. применение вероятностного подхода [5, 6]

для определения оптимальных настроек закона управления требует возможности целенаправленного изменения коэффициентов дифференциальных уравнений, описывающих объект управления. В связи с этим рассмотрим математическую модель расхода газовой среды исходя из необходимости определения коэффициентов, которые варьируются в ходе эксплуатации АСКМ ОА.

Описание общей математической модели для АСКМ ОА

В опубликованной статье [4] рассматривается линеаризованная система дифференциальных уравнений, описывающая неустановившееся движение воздуха по воздуховодам внутри стойки АСКМ ОА, которая приведена ниже:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \frac{2a\rho}{S} Q(x,t) + \frac{\rho}{S} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t}; \\ -\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = \frac{S}{\rho c^2} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где $2a$ – линеаризованный коэффициент аэродинамического сопротивления;

Q – расход газовой среды;

S – площадь поперечного сечения трубопровода;

t – время от начала переходного процесса;

p – давление в трубопроводе;

x – длина рассматриваемого участка трубопровода;

ρ – плотность газовой среды;

c – скорость звука в газовой среде.

В публикации [4] было показано, что данная система может быть упрощена до рассмотрения только первого уравнения в связи с тем, что доказана не сжимаемость газовой среды для коротких трубопроводов.

В свою очередь первое уравнение было преобразовано для получения зависимости расхода газовой среды в коротком трубопроводе от времени переходного процесса и процента открытия регулирующей арматуры следующим образом [4]:

$$Q(t, k) = \frac{P_0}{2a(k)\rho L / S(k)} (1 - e^{-2a(k)t}), \quad (2)$$

где k – процент открытия регулирующей арматуры;

P_0 – давление в начальном сечении трубопровода;

L – длина трубопровода.

Рассмотрим подробно коэффициенты, входящие в состав функциональной зависимости (2), с точки зрения возможности вариации данных коэф-

фициентов в ходе эксплуатации АСКМ ОА в следующих случаях:

1) при штатной эксплуатации забор газовой среды в АСКМ ОА может осуществляться не только из помещений, но и из открытых конструкций, например, вентиляционных труб. Т.е. необходимо учитывать изменение плотности газовой среды (ρ) в течение годового цикла на уровне $\pm 17\%$ [7]¹ относительно номинального значения [4];

– предприятие-изготовитель насосного блока АСКМ ОА указывает на допуск по создаваемому давлению (p) $\pm 15\%$ относительно номинального значения [8];

– аналогичные допуски устанавливаются в соответствии со стандартом [9] на внутренний диаметр трубопровода (связан с коэффициентами $2a$ и S) d , равный -10% , и длину трубопровода L , равную $+1\%$.

Рассмотренная выше математическая модель объекта управления может использоваться для дальнейшего вероятностного анализа совместно с контуром регулирования (ПИД-регулятором), описанным ниже:

$$k_{\text{рег}} = S_{\text{п}} \cdot \Delta Q + S_{\text{и}} \cdot \int_0^t \Delta Q \cdot dt + S_{\text{д}} \cdot \frac{d(\Delta Q)}{dt}, \quad (3)$$

где $k_{\text{рег}}$ – выходная величина регулятора, эквивалентная проценту открытия регулирующей арматуры;

ΔQ – рассогласование, определяемое разницей между текущим значением расхода газовой среды и заданным значением расхода (требуемый уровень расхода – 35 л/мин);

$S_{\text{п}}$, $S_{\text{и}}$, $S_{\text{д}}$ – пропорциональный, интегральный и дифференциальный соответственно коэффициенты ПИД-регулятора.

Далее найдем оптимальные настройки ПИД-регулятора с точки зрения критерия минимального времени переходного процесса, используя общую математическую модель АСКМ ОА и вероятностный подход, описанный ниже.

Вероятностная модель

Основой для вероятностной модели являются результаты работы общей математической модели (ОММ) АСКМ ОА в виде кривой G [5], ограничивающей область устойчивости N^0 (рис. 1), которая получена в ходе запусков ОММ для 100-ой секунды

¹ Здесь и далее приведены $\pm 3\sigma$ разбросы.

в плоскости пропорционального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора.

Для запусков ОММ была создана программная реализация данной модели в среде Simulink пакета

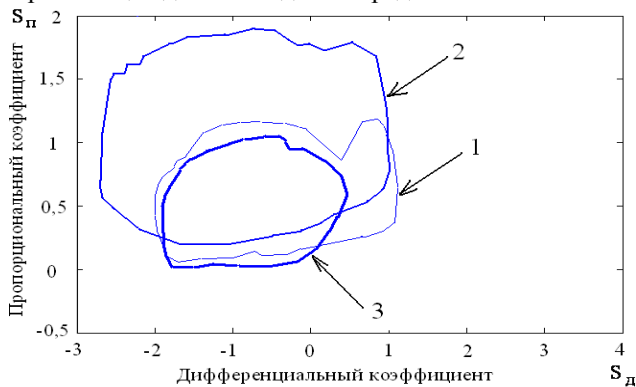


Рис. 1. Область устойчивости в плоскости пропорционального S_p и дифференциального S_d коэффициентов ПИД-регулятора АСКМ ОА: 1 – область устойчивости N^0 при номинальных значениях коэффициентов уравнения (2); 2 – область устойчивости N^- при значениях коэффициентов уравнения (2), ухудшающих устойчивость переходных процессов по нижней границе; 3 – область устойчивости N^+ при значениях коэффициентов уравнения (2), ухудшающих устойчивость переходных процессов по верхней границе

MatLab, обеспечивающая построение области устойчивости с учётом следующих ограничений:

- интегральный коэффициент $S_{ин}$ равен нулю в связи с тем, что в предыдущей публикации [1] показано невлиание данного коэффициента на достижение минимального времени переходного процесса для АСКМ ОА;

- установлено крайнее время достижения устойчивого состояния, равное 100 секундам;

- допустимый диапазон колебаний по расходу газовой среды составляет $\pm 1,5$ л/мин.

В подтверждение адекватности работы программной реализации (ПР) ОММ на рис. 2 приведена область устойчивости, полученная в ходе натурных испытаний для 100 секунды в плоскости пропорционального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора на исследовательском стенде АСКМ ОА. Как видно из рис. 1, 2 (области под номером 1), рассматриваемые области устойчивости практически идентичны.

Подход, предложенный в [5], основывается на утверждении, что координаты каждой точки границы (кривая G) области устойчивости N^0 являются случайными величинами X_i и любое приращение коэффициентов уравнения (2) внутри $\pm 3\sigma$ коридора среднеквадратичных отклонений приводит к изме-

нению формы и места расположения кривой G. В этом случае выражение для нахождения вектора X_i имеет следующий вид [5, 10 – 12]:

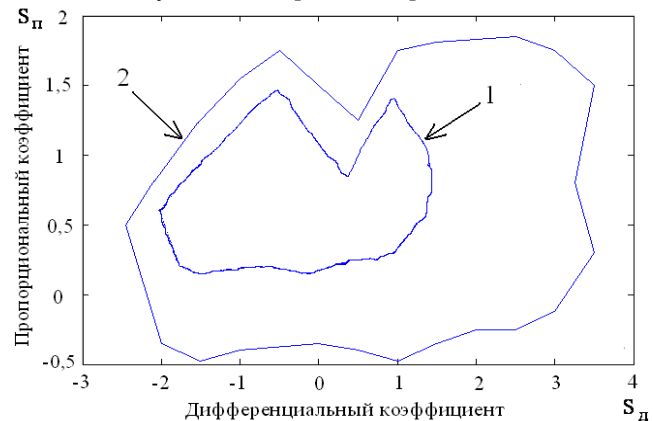


Рис. 2. Область устойчивости в плоскости пропорционального S_p и дифференциального S_d коэффициентов ПИД-регулятора для исследовательского стенда АСКМ ОА: 1 – область устойчивости для 100-ой секунды; 2 – область устойчивости для 200-ой секунды

$$X_i(\eta_j) = X_i^0 + \sum_{j=1}^n b_j \cdot \eta_j, \quad (4)$$

где η_j – вектор случайных величин, представляющих собой разбросы коэффициентов (ρ , r , d и L) зависимости (2);

X_i^0 – координаты кривой G, принятые за математическое ожидание случайной величины X_i (i – количество рассматриваемых точек кривой G).

Значение b_j равно:

$$b_j = \frac{\partial X_i}{\partial \eta_j}. \quad (5)$$

Исходя из рассмотренного в [5] алгоритма нахождения оптимальных настроек регулятора с максимальной вероятностью работоспособности, соответствующей минимальному времени переходного процесса регулирования газовой среды АСКМ ОА, необходимо последовательно сужать область устойчивости и, соответственно, кривую G. Выполнять этот итерационный процесс, как видно из формулы (4), необходимо последовательным увеличением величины вектора η_j с шагом σ . Таким образом, на каждом шаге фиксируется новая область устойчивости с настройками ПИД-регулятора, обеспечивающими большую вероятность работоспособности (см. табл. 6 в [5]). Рассмотрим реализацию данного алгоритма и соответствующие результаты применительно к нашей задаче.

Результаты поиска

Первоначально выполним построение двух областей устойчивости N^- и N^+ (рис. 1). Область устойчивости, соответствующая разбросам значений коэффициентов зависимости (2), которые ухудшают возможность обеспечения устойчивости ОММ АСКМ ОА по нижней границе, обозначается N^- . Область устойчивости, соответствующая затруднению обеспечения устойчивости ОММ АСКМ ОА по верхней границе, обозначается N^+ . Построение данных областей устойчивости было выполнено с помощью ПР ОММ путем подбора разбросов всех коэффициентов зависимости (2) таким образом, чтобы для N^- произошло максимальное смещение (деформация) границы области устойчивости в сторону её повышения, а для N^+ – в сторону её понижения.

В табл. 1, 2 приведены сочетания знаков отклонений коэффициентов зависимости (2) для случаев N^- и N^+ . Значение самих разбросов равны 3σ и описаны выше в виде процентов от невозмущенных значений [4].

Таблица 1

Знаки отклонений коэффициентов ОММ для области устойчивости N^-

Коэффициент	ρ	p	d	L
Знак разброса коэффициента	+	-	-	+

Таблица 2

Знаки отклонений коэффициентов ОММ для области устойчивости N^+

Коэффициент	ρ	p	d	L
Знак разброса коэффициента	-	+	-	+

Вычисление коэффициентов зависимости (2) в данном случае выполняется по следующей формуле:

$$D_j = D_j^0 + \partial\eta_j, \quad (6)$$

где D_j – коэффициент зависимости (2);

D_j^0 – невозмущенное значение коэффициента зависимости (2);

$\partial\eta_j$ – 3σ -приращение относительно невозмущенного значения коэффициента зависимости (2) со знаками, приведенными в табл. 1 и 2.

Далее определим «нижний» и «верхний» участки кривой G с помощью полученных областей устойчивости N^- и N^+ , а именно:

– «нижний» участок кривой G – это участок, ограниченный границей области устойчивости N^+ ;

– «верхний» участок кривой G – это участок, ограниченный границей области устойчивости N^- .

Относительно найденных участков строим нормали и определяем отрезки на данных нормалях между «верхним» участком кривой G и верхней границей области устойчивости N^+ , а также между «нижним» участком кривой G и нижней границей области устойчивости N^- . Полученные отрезки соответствуют 3σ -приращению коэффициентов зависимости (2).

После этого выполним смещение (сближение) узловых точек «верхнего» и «нижнего» участков кривой G по построенным нормальям друг навстречу другу с шагом, соответствующим σ -приращению коэффициентов зависимости (2) [5]. Данный шаг считаем равным $1/3$ отрезков, полученных для 3σ -приращения.

Процесс сближения останавливается в случае отсутствия на текущем шаге узловой точки (принадлежащей или «верхнему», или «нижнему» участкам кривой G), которая по-прежнему «не перешла» за противоположный участок кривой. В дальнейшем выполняется уменьшение шага на порядок, и процесс сближения повторяется с предыдущего шага с тем же критерием остановки, но уже без последующего уточнения.

Для реализации описанного выше алгоритма поиска было создано программное обеспечение (ПО) в среде Simulink пакета MatLab, которое представлено в виде отдельного модуля ПР ОММ. С использованием данного ПО был получен результат, приведенный на рис. 3.

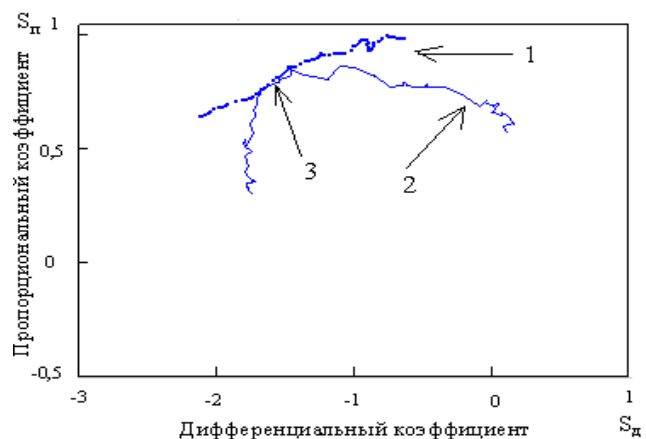


Рис. 3. Результат сближения «верхнего» и «нижнего» участков кривой G в плоскости пропорционального S_p и дифференциального S_d

коэффициентов ПИД-регулятора:

1 – «нижний» участок кривой G , перешедший за верхний; 2 – «верхний» участок кривой G , перешедший за нижний; 3 – узловые точки, «не перешедшие» за противоположный участок кривой

На последнем шаге работы созданного ПО остались три узловые точки «не перешедшие» за противоположный участок кривой. Для каждой из этих узловых точек, которые характеризуются своим пропорциональным и дифференциальным коэффициентом ПИД-регулятора, были построены зависимости расхода газовой среды от времени моделирования с помощью ПР ОММ (были использованы номинальные значения коэффициентов зависимости (2)). Исходя из критерия минимального времени переходного процесса окончательно выбраны пропорциональный и дифференциальный коэффициенты – 0,75 и – 1,89 соответственно. Время переходного процесса в этом случае составляет 32 секунды.

График расхода газовой среды от времени моделирования для этих значений пропорционального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора приведен на рис. 4.

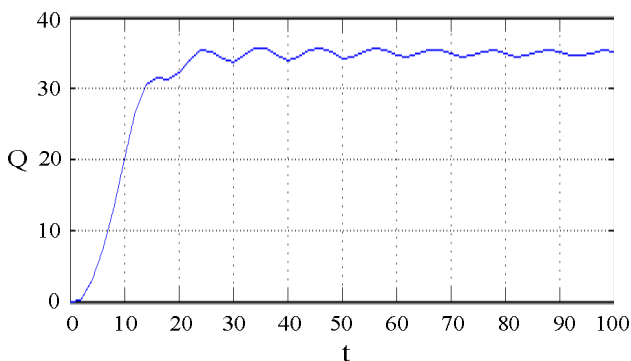


Рис. 4. Зависимости расхода газовой среды (Q , л/мин) от времени моделирования (t , с) при пропорциональном и дифференциальном коэффициентах – 0,75 и – 1,89

Лучшее (минимальное) время переходного процесса, найденное с помощью прямого метода поиска при натурном моделировании на исследовательской установке АСКМ ОА, составляло 38 секунд [1, 3]. Для того чтобы сравнить результаты, полученные в ходе математического моделирования, с результатами натурального эксперимента был проведен запуск исследовательской установки АСКМ ОА с настройками ПИД-регулятора, которые были найдены с использованием вероятностного подхода. Многократные запуски (около 100 запусков) исследовательской установки показали среднее время завершения переходного процесса 33,87 секунды. Т.е., созданная ПР ОММ даёт незначительную погрешность относительно результатов работы реальной исследовательской установки (относительная погрешность составляет – 5,52 %, а абсолютная погрешность составляет – 1,87 секунды) и позволяет более точно находить, с помощью веро-

ятностного подхода, оптимальные настройки ПИД-регулятора.

Выводы

Основываясь на приведенных выше результатах поиска оптимальных настроек ПИД-регулятора для АСКМ ОА, сформулируем основные выводы:

- создана замкнутая математическая модель работы АСКМ ОА (математическая модель расхода газовой среды в трубопроводах АСКМ ОА совместно с математической моделью регулятора);

- результаты апробации программной реализации замкнутой математической модели АСКМ ОА практически полностью совпадают с результатами натуральных исследований, полученных на исследовательской установке при контроле времени регулирования расхода газовой среды (относительная погрешность составляет 5,52 %, а абсолютная погрешность составляет 1,87 секунды);

- применение вероятностного подхода к поиску оптимальных настроек ПИД-регулятора АСКМ ОА с использованием замкнутой математической модели дал положительный результат, а именно, – синтезированы настройки, обеспечивающие меньшее время переходного процесса относительно найденных в ходе предшествующих натуральных исследований. Сравнение результатов тестов на исследовательской установке показало выигрыш во времени на 4,13 секунды, что подтверждает правильность создания и использования математической модели для поиска оптимальных настроек;

- созданная программная реализация замкнутой математической модели АСКМ ОА в среде Simulink пакета MatLab может применяться для дальнейших исследований по оптимизации ПИД-регулятора АСКМ ОА. В частности, при применении других непрямых методов поиска, а также в виде основы для создания математических моделей более сложных пневматических схем, включающих АСКМ ОА.

Литература

1. Фирсов, С.Н. Особенности построения процесса регулирования для автоматизированной системы мониторинга объёмной активности йодов, золь и инертных радиоактивных газов [Текст] / С.Н. Фирсов, А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – №2. – С. 7-13.
2. Фирсов, С.Н. Синтез ПИД-регулятора расхода газовых сред системы радиационного контроля [Текст] / С.Н. Фирсов, А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2011: тез. докл. Всеукраїнської науково-технічної конференції 22 – 25 листопада 2011 р.* – Х., 2011. – С.14.

3. Чумаченко, А.В. Построение процесса регуляции для автоматизированной системы радиационного контроля [Текст] / А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Вісник СевНТУ*. – 2012. – №133. – С. 389-395.
4. Чумаченко, А.В. Построение математической модели расхода газовой среды для автоматизированной системы мониторинга объемной активности йодов, золь и инертных радиоактивных газов [Текст] / А.В. Чумаченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – №3. – С. 12-17.
5. Чумаченко, А.В. Автоматизированный выбор «рабочей точки» внутри области устойчивости в плоскости параметров управляющего контура системы стабилизации ракеты-носителя [Текст] / А.В. Чумаченко // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 18, 2003. – С. 57-68.
6. Айзенберг, Я.Е. Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов [Текст] / Я.Е. Айзенберг, В.Г. Сухоребрий. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
7. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Машиностроение, 1997. – 344 с.
8. ЛБМВАК группа – мембранные микронасосы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lbm.ck.ua>. – 20.02.12 г.
9. ГОСТ 3262-75. Трубы стальные водогазопроводные [Текст]. – Введ. 01.01.1971. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 15 с.
10. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения [Текст] / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчарова. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 432 с.
11. Карлин, С. Основы теории случайных процессов [Текст] / С. Карлин. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
12. Лэнинг, Дж. Х. Случайные процессы в задачах автоматического управления [Текст] / Дж.Х. Лэнинг, Р.Г. Бэттин. – М.: Иностранная литература, 1958. – 381 с.

Поступила в редакцию 15.11.2012

Рецензент: канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела 13010 А.Е. Лукьянович, НПП «Хартрон-Аркос», Харьков.

ЗАСТОСУВАННЯ ІМОВІРНІСНОГО ПІДХОДУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ОПТИМАЛЬНИХ НАЛАШТУВАНЬ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ

О.В. Чумаченко

Розглядаються особливості побудови замкнutoї математичної моделі об'єкту управління (витрата газового середовища) з ПІД-регулятором для автоматизованої системи моніторингу об'ємної активності газових середовищ. Виконан аналіз існуючого імовірнісного підходу для визначення налаштувань ПІД-регулятора виходячи з критерію максимальної імовірності працездатності. Адаптована методика знаходження налаштувань ПІД-регулятора усередині області стійкості. Отримані, в ході моделювання, результати апробовані на реальному дослідницькому стенді з позитивним результатом, що забезпечує мінімальний час перехідного процесу відносно вже відомих результатів натурних тестів. Зроблен висновок про правильність застосування математичних моделей при пошуку оптимальних налаштувань ПІД-регулятора у зв'язку зі збільшенням швидкості і точності процесу пошуку.

Ключові слова: замкнута математична модель об'єкту управління з ПІД-регулятором, імовірнісні методи, максимальна імовірність працездатності, автоматизована система радіаційного контролю, ПІД-регулятор, регулювання, витрата газових середовищ.

APPLICATION OF PROBABILISTIC APPROACH AT DETERMINATION OF OPTIMAL TUNING OF PID-REGULATOR FOR RADIATION MONITORING SYSTEM

A.V. Chumachenko

The features of construction of the closed mathematical model of the controlled object (gas flow rate) with PID-regulator are examined for radiation monitoring system. The analysis of existent probabilistic approach is executed for determination of PID-regulator tuning on basis of the criterion of maximal execution probability. Searching methodology of PID-regulator tuning into the area of stability is adapted. The positive modeling results are approved on the real research test-bed providing minimum transient time relatively already the known results of model tests. Concluded about the rightness of the mathematical models using at the search of the optimal PID-regulator tuning in connection with the increase of speed and exactness of searching process.

Keywords: closed mathematical model of gas flow rate with PID-regulator, probabilistic methods, maximal execution probability, radiation monitoring system, PID-regulator, regulation, gas flow rate.

Чумаченко Алексей Валентинович – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела 13060 НПП «Хартрон-Аркос», Харьков, Украина, e-mail: oleksiychumachenko@rambler.ru.