

УДК 681.53

А.В. ЧУМАЧЕНКО

НПП ХАРТРОН-АРКОС, Украина

УНИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК ПИД-РЕГУЛЯТОРА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ ПРОБООТБОРНЫХ ЛИНИЙ

Предлагается унифицированная методика определения оптимальных настроек ПИД-регулятора для автоматизированной системы мониторинга объёмной активности газовых сред с использованием шкафов расширений линий отбора пробы. Применён метод сопряженных градиентов для поиска настроек ПИД-регулятора исходя из требования обеспечения минимального времени переходного процесса. Полученные, в ходе применения методики, результаты апробированы на реальном исследовательском стенде с положительными выводами исходя из оценки результатов сравнения с натурными тестами. Сделано заключение о правомерности применения синтезированной методики при поиске оптимальных настроек ПИД-регулятора при различных конфигурациях коротких линий отбора пробы в связи с увеличением скорости процесса поиска и необходимости усовершенствования применяемого математического аппарата при различных конфигурациях длинных линий отбора пробы.

Ключевые слова: оптимальные настройки ПИД-регулятора, метод сопряженных градиентов, минимальное время переходного процесса, автоматизированная система радиационного контроля, ПИД-регулятор, регулирование, расход газовых сред.

Введение

Современные системы радиационного контроля и мониторинга объёмной активности газовых сред состоят из стандартного набора детектирующих элементов. Созданная в НПП Хартрон-Аркос автоматизированная система контроля и мониторинга объёмной активности (АСКМ ОА) выбросов йодов, золь и инертных радиоактивных газов, рассмотренная в предыдущих публикациях [1–5], также включает набор типовых контролирующих стоек отбора пробы. Данные типы стоек предназначены для выполнения контроля объёмной активности йодов, золь и инертных радиоактивных газов в непосредственной близости от точек забора пробы. Но на объектах атомной энергетики существует дополнительный ряд задач, связанных с радиационным контролем систем вентиляции, систем газоочистки и выбросов через вентиляционные трубы, для которых характерна достаточная удалённость контролирующей стойки от точек забора проб. Задача такого удалённого контроля ещё более усложняется введением, так называемых групп контроля, которые характеризуются определением объёмной активности от нескольких точек отбора пробы с помощью одной контролирующей стойки.

Для выполнения данной задачи в НПП Хартрон-Аркос в дополнении к типовым стойкам отбора пробы создана стойка расширения. Пневматическая схема для данной стойки приведена на рис. 1. Дан-

ная стойка обеспечивает отбор проб из восьми разных точек контроля и соединяется через выходной трубопровод с входом любой типовой контролирующей стойки. Необходимо отметить, что трубопровод, соединяющий описанные выше стойки, также имеет варьируемую длину и конфигурацию.

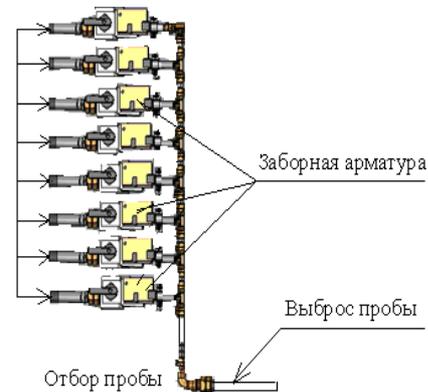


Рис. 1. Пневматическая схема для стойки расширения

При такой сложной пневматической схеме настройки ПИД-регулятора найденные для стандартной конфигурации типовых контролирующих стоек отбора пробы [5] теряют свою актуальность и в каждом конкретном случае необходимо уточнять данные настройки с учётом требования минимизации времени переходного процесса регулирования расходом газовой среды.

Постановка задачи

Рассмотренный в предыдущей публикации [5] метод определения оптимальных настроек ПИД-регулятора расходом газовой среды типовой стойки АСКМ ОА является не достаточно быстрым с точки зрения времени вычислений и, в связи с этим, не может использоваться разработчиком при сжатых сроках проектирования и/или пуско-наладки АСКМ ОА. В этом случае проектировщик должен обладать инструментарием в виде унифицированной методики, позволяющим выполнить экспресс оценку переходных процессов ПИД-регулятора АСКМ ОА с учётом варьируемой конфигурации пневматической схемы. Очевидно, что требование минимизации времени нахождения настроек ПИД-регулятора, определяет круг математического аппарата для решения данной задачи в виде методов поиска экстремума функции от многих переменных. Опираясь на результаты предыдущих исследований [1–5] можно конкретизировать задачу, как нахождение минимального значения функции, определяющей время переходного процесса регулирования АСКМ ОА от двух переменных, таких как пропорциональная и дифференциальная составляющие (интегральная составляющая не рассматривается в связи с отсутствием практического влияния на процесс регулирования [1, 3]).

Исходя из выше описанной постановки задач, рассмотрим далее методику определения оптимальных настроек ПИД-регулятора внутри области устойчивости для различных конфигураций пневматических схем АСКМ ОА.

Описание унифицированной методики и результаты моделирования

Унифицированная методика состоит из трёх следующих последовательных шагов.

1. Формирование и настройка математической модели, являющейся аналогом функциональной зависимости, которая определяет значение времени переходного процесса при заданной пропорциональной и дифференциальной составляющей ПИД-регулятора. Замкнутая математическая модель расхода газовой среды как объекта регулирования и ПИД-регулятора для типовой стойки АСКМ ОА, рассмотрена в публикации [4]. В данной модели необходимо изменить (настроить) только параметр давления в трубопроводе перед расходомером, т.к. в связи с усложнением конфигурации пневматической схемы потери давления будут значительны. Для иллюстрации результатов вычислений по данной методике рассмотрим пример соединения стойки рас-

ширения и типовой стойки АСКМ ОА трубопроводом длиной 14 метров с тремя изгибами на 90 градусов и диаметром, равным входным (выходным) диаметрам трубопроводов стоек. Необходимо уточнить, что в стойке расширения при штатной работе может быть открыта только одна запорная арматура, а все остальные находятся в закрытом состоянии. При использовании формульных зависимостей, описанных в [4], для определения потери давления в шкафах и соединительном трубопроводе получаем значение потери давления, равное 9,71 % относительно создаваемого насосным блоком. С учётом данной поправки рассмотренная модель готова к использованию (здесь и далее все алгоритмы и математические модели исследуются с помощью программного обеспечения, разработанного в среде MatLab).

2. Определение оптимальной настройки ПИД-регулятора. На данном шаге применим метод сопряжённых градиентов для поиска экстремума, т.е. минимального значения времени переходного процесса в зависимости от пропорциональной и дифференциальной составляющей. Выбор данного метода основан на рекомендациях из [6–9], т.к. обладает высокой сверхлинейной скоростью сходимости и является универсальным.

Рассмотрим формульные зависимости для реализации данного метода в части минимизации функции $f(S_n, S_d)$ для которой была определена математическая модель на первом шаге методики:

$$x^{n+1} = x^n + a_n \cdot p^n, n \geq 0, \quad (1)$$

$$p^0 = -f'_0, \quad (2)$$

$$p^n = -f'_n + \beta_{n-1} \cdot p^{n-1}, n \geq 1, \quad (3)$$

где x^n – вектор, содержащий дифференциальную S_d и пропорциональную составляющие S_n , для текущего шага итерационного процесса поиска минимума. Геометрическая интерпретация данного вектора – точка в плоскости S_d и S_n ;

x^{n+1} – вектор от S_d и S_n для следующего шага итерационного процесса поиска минимума;

p^0, p^n – вектора направления поиска для первого и последующих шагов итерационного процесса поиска минимума;

f'_0, f'_n – вектора производных от функции f по S_d и S_n в базовой точке x^n (для первого и последующих шагов итерационного процесса поиска минимума). Производная для каждого элемента вектора x рассчитывается с помощью следующей формульной зависимости с учётом шага приращения h , равного 0,1 [10]:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i + h) - f(x_i - h)}{2 \cdot h}; \quad (4)$$

$$\beta_{n-1} = \frac{|f'_n|^2}{|f'_{n-1}|^2} - \text{поправочный коэффициент, учи-}$$

тывающий значения производной функции f на текущем и предыдущем шагах итерационного процесса (на каждом чётном шаге данный коэффициент обнуляется в соответствии с рекомендациями из [6]);

a_n – шаг алгоритма поиска минимума в направлении, определяемом вектором p . Рассчитывается исходя из решения задачи одномерной минимизации методом дробления [10]. Начальным шагом для данного метода принимается значение 0,1 для каждого элемента вектора x с последующим уменьшением в три раза при «переходе» через минимум в выбранном направлении. Критерием остановки одномерного поиска, а, следовательно, и определением a_n , является получение модуля приращения по каждому элементу вектора x менее 0,01 на текущем шаге относительно предыдущего.

Применение описанного выше метода сопряжённых градиентов для нахождения настроек ПИД-регулятора, соответствующих минимальному времени переходного для объекта, сформированного на первом шаге, дало следующие результаты:

– найденное минимальное время переходного процесса – 27,9498 секунды;

– дифференциальная S_d и пропорциональная составляющие S_p равны -0,75 и 1,4882 соответственно.

Начальными координатами для данного алгоритма были выбраны дифференциальная и пропорциональная составляющие, равные -0,75 и 0,525. Эти координаты являются геометрическим центром области в диапазоне по дифференциальной и пропорциональной составляющей [-2; 0,5] и [0,25; 0,8], сформированной путём пересечения областей устойчивости N^- и N^+ для граничных эксплуатационных режимов объекта регулирования [5].

Оценку эффективности работы метода сопряжённых градиентов выполним путём сравнения с результатами, полученными при формировании области устойчивости для замкнутой математической модели расхода газовой среды и ПИД-регулятора (синтезирована на первом шаге методики) при последовательном переборе дифференциальной и пропорциональной составляющих с шагом 0,01 в диапазоне [-3; 3] и [-0,5; 3,5] соответственно. Полученная область устойчивости приведена на рис. 1.

На рис. 2 также приведена трёхмерная интерпретация данной области устойчивости с отображением времени переходного процесса для каждой пропорциональной и дифференциальной составляющей, которое позволяет определить глобальный минимум.

Исходя из полученных результатов минимальное время переходного процесса составляет 27,6221 секунды при дифференциальной и пропорциональной составляющие ПИД-регулятора, равным -0,92 и 1,95.

Если сравнить полученные результаты, то можно сделать следующие выводы:

– разница между найденными минимумами времени переходного процесса незначительна и составляет в абсолютных величинах 0,3277 секунды или в относительных – 1,17 %;

– соответствующие найденным минимумам пропорциональные и дифференциальные коэффициенты ПИД-регулятора отличаются друг от друга;

– предыдущие выводы позволяют сделать предположение о наличии некоторого количества локальных минимумов рассматриваемой функции, что подтверждается детализацией полученной области устойчивости в диапазоне времён переходного процесса менее 30 секунд (рис. 3).

Сформулированные выше выводы позволяют сделать общую оценку применимости метода сопряжённых градиентов как положительную, но требующую уточнения в связи с большим количеством локальных экстремумов исследуемой функции.

Уточнение найденных настроек ПИД-регулятора. Для определения глобального экстремума рассматриваемой функции $f(S_p, S_d)$ проведём несколько последовательных выполнений (запусков) метода сопряжённых градиентов (второй шаг методики) с различными начальными условиями и из полученных результатов выберем минимум.

Начальные значения по дифференциальной и пропорциональной составляющим ПИД-регулятора (начальные точки) для данного метода определим с помощью следующих геометрических построений:

– построим прямоугольник, обрамляющий область в диапазоне по дифференциальной и пропорциональной составляющей [-2; 0,5] и [0,25; 0,8] (рис. 4), определённую на предыдущем шаге методики, как область пересечения;

– из геометрического центра найденного прямоугольника проведём лучи через каждые 45 градусов, так как это показано на рис. 4;

– отрезки, полученные при пересечении лучей с вершинами и сторонами прямоугольника, разобьём на четыре равные части (участки).

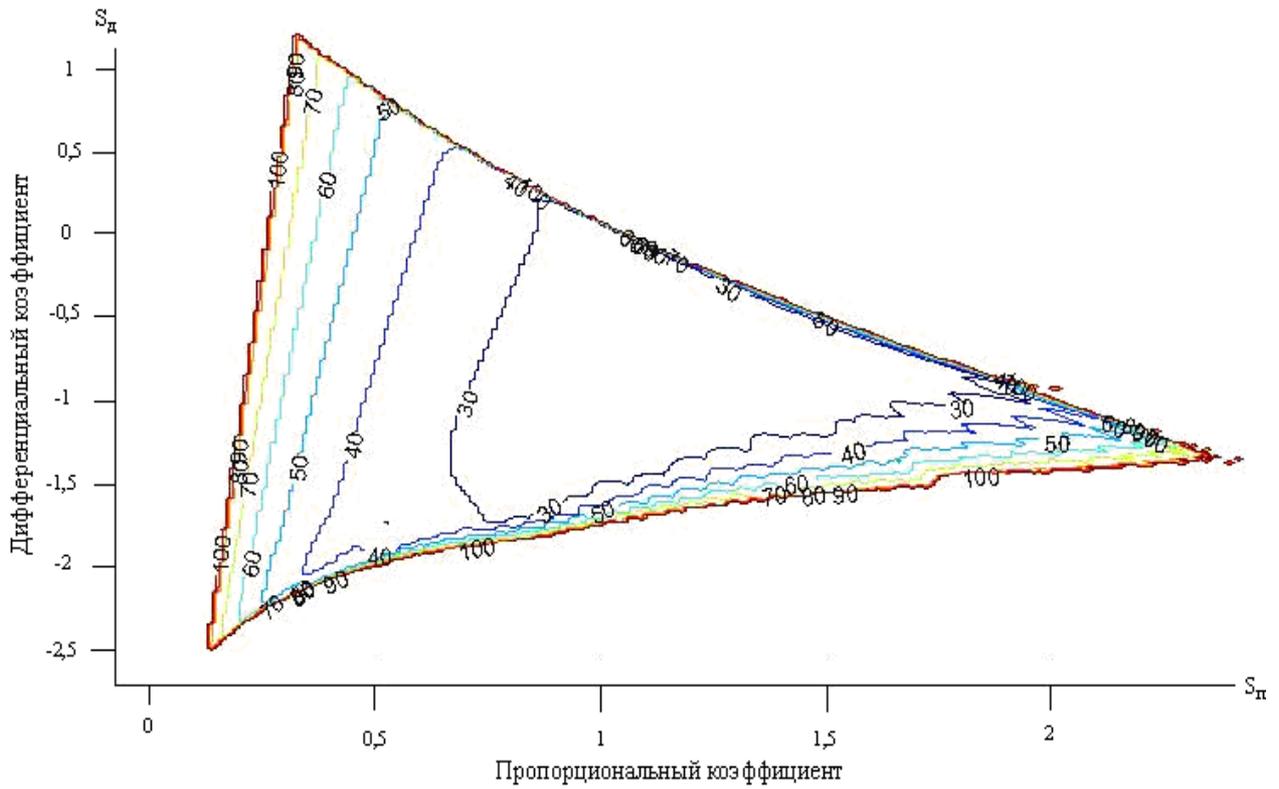


Рис. 1. Область устойчивости в плоскости пропорционального S_p и дифференциального S_d коэффициентов ПИД-регулятора АСКМ ОА в конфигурации: стойка расширения, типовая стойка и соединительный трубопровод

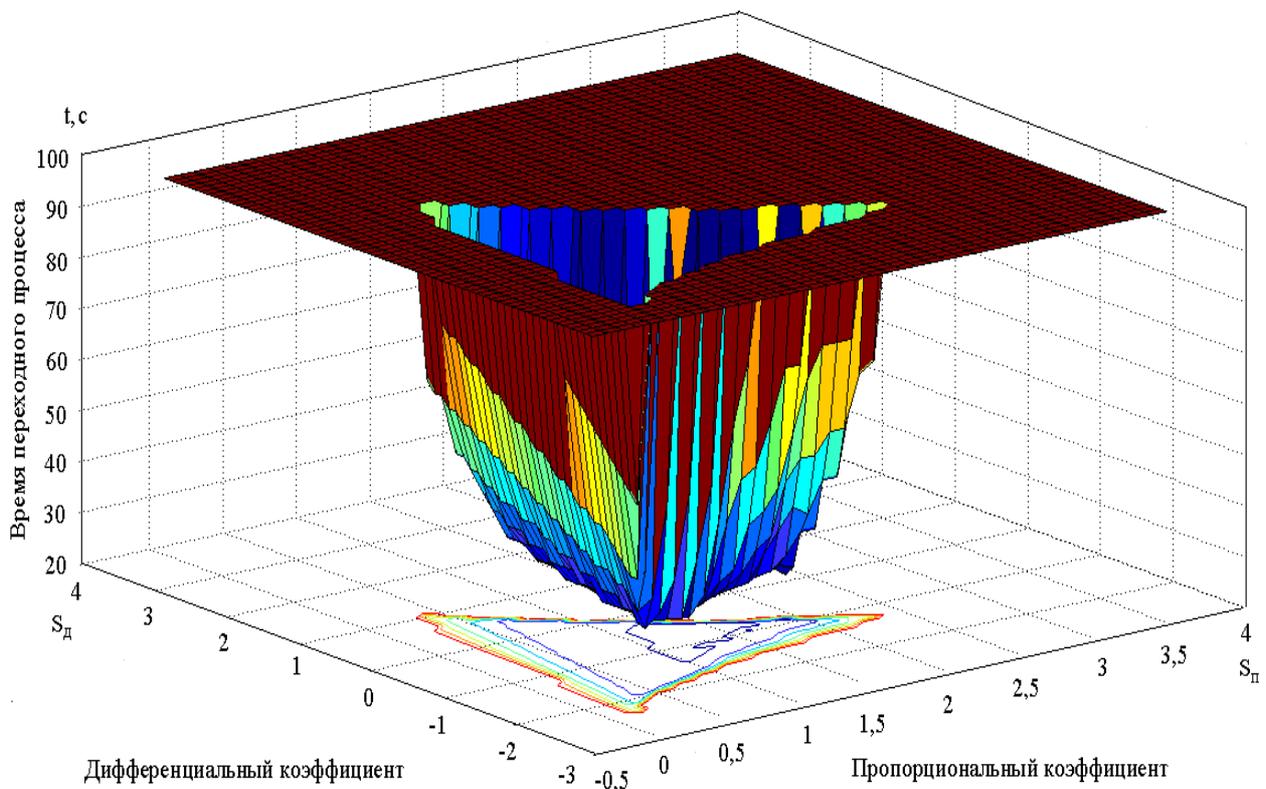


Рис. 2. Зависимость времени переходного процесса t от пропорционального S_p и дифференциального S_d коэффициентов ПИД-регулятора АСКМ ОА в конфигурации: стойка расширения, типовая стойка и соединительный трубопровод

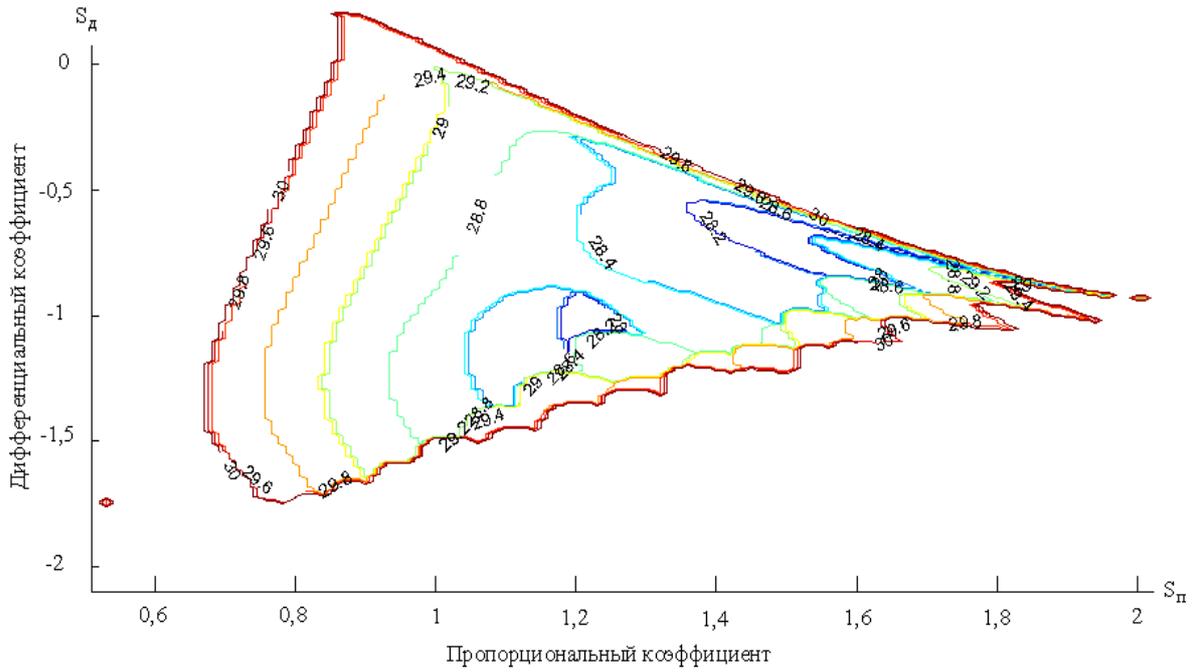


Рис. 3. Детализированная область устойчивости в плоскости пропорционального S_p и дифференциального S_d коэффициентов ПИД-регулятора АСКМ ОА в диапазоне времён переходного процесса менее 30 секунд

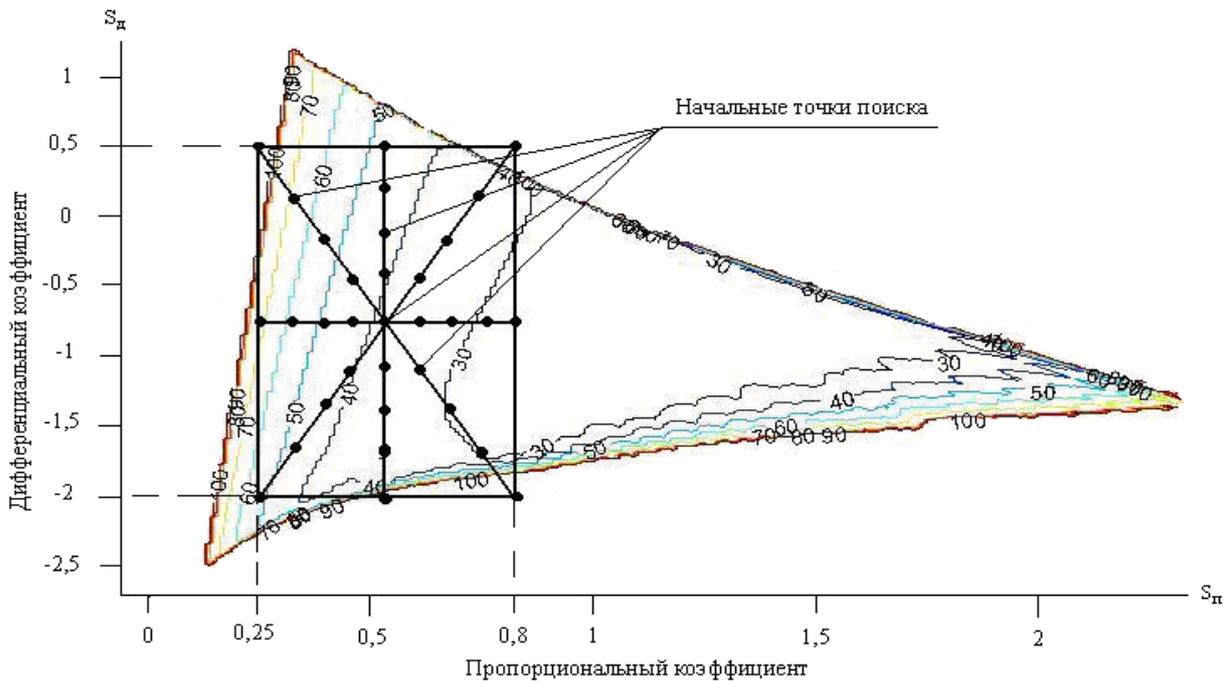


Рис. 4. Начальные точки для запуска метода сопряженных градиентов в плоскости пропорционального S_p и дифференциального S_d коэффициентов ПИД-регулятора АСКМ ОА совмещенные с областью

Координаты границ полученных участков рассматриваются как начальные значения по дифференциальной и пропорциональной составляющим ПИД-регулятора для запуска метода сопряжённых градиентов. Результаты запусков метода поиска минимума приведены в табл. 1. Исходя из полученных результатов минимальное время переходного про-

цесса составляет 27,6219 секунды при дифференциальной и пропорциональной составляющей ПИД-регулятора, равными 0,6657 и 1,565.

Данный результат на 0,3279 секунды лучше (меньше), чем полученный на втором шаге унифицированной методики.

Таблиця 1

Начальные значения и результаты выполнения метода сопряженных градиентов для поиска минимума функции $f(S_n, S_d)$ устойчивости

Начальная точка поиска			Результаты поиска минимума			
S_d	S_n	Время переходного процесса, с	S_d	S_n	Время переходного процесса, с	Кол-во запусков модели ¹
-0,75	0,25	74	-0,7994	1,3858	28,2776	31
-0,75	0,3188	58	-0,6232	1,4847	27,9498	74
-0,75	0,3876	50	-0,8621	1,5143	28,2776	57
-0,75	0,4564	42	-0,8611	1,4564	28,2776	47
-0,75	0,25	74	-0,7994	1,3858	28,2776	31
-0,75	0,3188	58	-0,6232	1,4847	27,9498	74
-0,75	0,3876	50	-0,8621	1,5143	28,2776	57
-0,75	0,4564	42	-0,8611	1,4564	28,2776	47
-0,75	0,5252	38	-0,75	1,4882	27,9498	45
-0,75	0,594	34	-1,0993	1,1934	27,9498	62
-0,75	0,6628	32	-0,75	1,4939	27,9498	45
-0,75	0,7316	30	-0,6657	1,565	27,6219	89
-0,75	0,8004	29,5886	-0,9321	1,211	27,9498	45
-2	0,525	100	-2	0,525	100	4
-1,6875	0,525	30	-0,9551	1,2067	27,9498	70
-1,375	0,525	34	-1,0437	1,2003	27,9498	66
-1,0625	0,525	36	-1,0625	1,2657	27,9498	44
-0,4375	0,525	40	-0,561	1,3892	27,9498	47
-0,125	0,525	42	-0,7111	1,4455	27,9498	96
0,1875	0,525	44	0,1381	0,9201	29,5886	69
0,5	0,525	48	-0,6549	1,5511	27,6221	146
-2	0,25	54	-0,8721	1,4717	28,2776	62
-1,6875	0,3188	48	-1,058	1,2614	27,9498	143
-1,375	0,3875	44	-1,4367	1,0048	28,6054	51
-1,0625	0,4562	40	-0,587	1,2313	28,2776	62
-0,4375	0,5937	36	-0,598	1,3962	27,9498	30
-0,125	0,6625	36	-0,2361	1,1069	28,9331	28
0,1875	0,7312	34	0,1875	0,8794	29,5886	68
0,5	0,8	100	0,5	0,8	100	4
-2	0,8	100	-2	0,8	100	4
-1,6875	0,7313	30	-0,0862	1,0356	28,9331	65
-1,375	0,6625	30	-0,6918	1,52	27,9498	86
-1,0625	0,5938	32	-1,2106	1,1863	28,2776	49
-0,4375	0,4563	46	-0,6289	1,5203	27,9498	120
-0,125	0,3875	56	-0,1744	1,0789	28,9331	53
0,1875	0,3188	70	-0,7623	1,3305	28,2776	58
0,5	0,25	100	0,5	0,25	100	4

¹ В данном столбце приведено количество запусков математической модели, описанной на шаге №1 унифицированной методики, для каждого итерационного процесса поиска минимума методом сопряжённых градиентов для шага № 3.

Результат апробации на исследовательском стенде

Для того чтобы сравнить результаты, полученные при применении унифицированной методики экспресс поиска оптимальных настроек ПИД-регулятора с результатами натурального эксперимента был создан исследовательский стенд, повторяющий пневматическую схему, рассмотренную выше в виде примера. ПИД-регулятор исследовательского стенда был запрограммирован с настройками по дифференциальной и пропорциональной составляющей, найденными для данного примера в ходе поиска на третьем шаге методики.

Многочисленные запуски (более 100) показали среднее время завершения переходного процесса 34,49 секунды. Таким образом, программно-математический аппарат, реализованный в синтезированной методике, обеспечивает приемлемую погрешность относительно результатов работы реального исследовательского стенда (относительная погрешность составляет 19,9 %, а абсолютная погрешность составляет 6,87 секунды).

Выводы

Исходя из приведенных выше результатов, применение унифицированной методики поиска оптимальных настроек ПИД-регулятора для АСКМ ОА позволяет сформулировать основные выводы:

- созданная унифицированная методика поиска настроек ПИД-регулятора, исходя из критерия минимальности времени переходного процесса, обеспечивает нахождение глобального минимума (т.е. оптимальных настроек) для математической модели, имитирующей элементы АСКМ ОА со сложной пневматической схемой;

- программное обеспечение, реализующее представленную методику, выполняет требование, предъявляемое в части создания инструментария для проектировщика АСКМ ОА, исходя из необходимости экспресс оценки процесса регулирования. Данная особенность подтверждается результатами замеров времени работы программного обеспечения при различных методах поиска, которые приведены в табл. 2.

- практически предельный допустимый уровень относительной погрешности 19,9 %, полученный при сравнении результатов работы программно-математического аппарата данной унифицированной методики с результатами работы на исследовательском стенде, определяет необходимость уточнения замкнутой математической модели расхода газовой среды и ПИД-регулятора для элементов

АСКМ ОА со сложной пневматической конфигурацией. Т.е. при увеличении длин соединительных трубопроводов и их конфигурации необходимо также учитывать сжимаемость газовой среды и другие факторы, как это показано в [4];

- созданная программная реализация унифицированной методики в среде MatLab может применяться при проектировании различных нестандартных элементов АСКМ ОА, реализующих сложные пневматические схемы.

Таблица 2

Время работы программного обеспечения при различных методах поиска

Название метода	Время работы, с	Кол-во запусков математической модели
Сопряженных градиентов (шаг № 2 методики)	4	45
Сопряженных градиентов с уточнением (шаг № 3 методики)	76	1924
Последовательный перебор	7508	240000

Литература

1. Фирсов, С.Н. Особенности построения процесса регулирования для автоматизированной системы мониторинга объемной активности йодов, золь и инертных радиоактивных газов [Текст] / С.Н. Фирсов, А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – №2 (54). – 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 регулирования для автоматизированной системы радиационного контроля [Текст] / А.В. Чумаченко, И.В. Корсиченко // *Вісник СевНТУ*. – 2002. – №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 // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – №3 (55). – С. 12-17.

5. Чумаченко, А.В. Применение вероятностного подхода при определении оптимальных настроек ПИД-регулятора газовой среды для автоматизированной системы радиационного контроля [Текст] / А.В. Чумаченко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – №4 (56). – С. 134-139.

6. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров [Текст] / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченкова. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.

7. Моисеев, Н.Н. Методы оптимизации [Текст] / Н.Н. Моисеев, Ю.П. Иванюков, Е.М. Столярова. – М.: Наука, 1978. – 394 с.

8. Shewchuk, J.R. Second order gradients methods [Text] / J.R. Shewchuk. – School Of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburg, 1994. – 231 p.

9. Цериновский, И.Н. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения. [Электронный ресурс] / И.Н. Цериновский. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/2_2.php. – 21.01.2013.

10. Кудрявцев, О.П. Поиск минимума функции. [Электронный ресурс] / О.П. Кудрявцев. – Режим доступа: http://solidbase.karelia.ru/edu/meth_calc/files/12.shtml. – 21.01.2013.

Поступила в редакцию 22.02.2013, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

Рецензент: канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела 13010 А.Е. Лукьянович, НПП ХАРТРОН-АРКОС, Харьков.

УНІФІКОВАНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ НАЛАШТУВАНЬ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПРИ РІЗНІЙ КОНФІГУРАЦІЇ ПРОБОВІДІРНИХ ЛІНІЙ

О.В. Чумаченко

Запропоновано уніфіковану методику визначення оптимальних налаштувань ПІД-регулятора для автоматизованої системи моніторингу об'ємної активності газових середовищ з використанням шаф розширень ліній відбору проби. Застосовано метод спряжених градієнтів для пошуку налаштувань ПІД-регулятора виходячи з вимоги забезпечення мінімального часу перехідного процесу. Отримані, в ході застосування методики, результати апробовано на реальному дослідницькому стенді з позитивними висновками виходячи з оцінки результатів порівняно з натурними тестами. Зроблено висновок про правомірність застосування синтезованої методики при пошуку оптимальних налаштувань ПІД-регулятора при різних конфігураціях коротких ліній відбору проби у зв'язку із збільшенням швидкості процесу пошуку і необхідності удосконалення застосовуваного математичного апарату при різних конфігураціях довгих ліній відбору проби.

Ключові слова: оптимальні настройки ПІД-регулятора, метод спряжених градієнтів, мінімальний час перехідного процесу, автоматизована система радіаційного контролю, ПІД-регулятор, регулювання, витрата газових середовищ.

UNIFIED PROCEDURE OF THE PID-CONTROLLER OPTIMAL SETTINGS DETERMINING OF GAS ENVIRONMENTS FOR RADIATION MONITORING SYSTEM FOR VARIOUS CONFIGURATIONS OF SAMPLING LINES

A.V. Chumachenko

Offers a unified procedure for determining of the PID-controller optimum settings for radiation monitoring system volumetric activity of gas media with extension cabinet lines sampling. Conjugate gradient method is used to find the PID-controller settings based on the demand for a minimum transient time. Obtained in the course of using the technique results tested on real research stand with positive conclusions based on the evaluation results of the comparison with the real tests. A conclusion on the legality of the use of the produced procedure for finding of the PID - controller optimal settings for various configurations of short lines of sampling due to the increased speed of the search process and the need to improve the mathematical tools used for various configurations of the long lines of sampling.

Keywords: optimal settings of PID-controller, conjugate gradient, minimal transient, radiation monitoring system, PID-regulator, regulation, gas flow rate.

Чумаченко Алексей Валентинович – канд. техн. наук, начальник отд. 13060 НПП ХАРТРОН-АРКОС, Харьков, Украина, e-mail: oleksiychumachenko@rambler.ru.