

## Контроллер для получения и управления газовой смесью в технологическом вакуумном оборудовании

С. В. Сажнев, В.И. Князев, \*Ю.Б. Цветков

Москва, Зеленоград, ООО «ЭЛТОЧПРИБОР» Панфиловский проспект, д.10,  
sazhnev@eltochpribor.ru; gas@eltochpribor.ru

\*Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., д.5,  
tsvetkov@bmstu.ru

*Рассмотрен вопрос получения многокомпонентной газовой смеси из нескольких однокомпонентных стандартных источников газов. Решалась задача высокоточного поддержания процентного соотношения составных частей смеси при сохранении заданного давления в рабочей камере вакуумного оборудования. Показана методика экспериментального подбора коэффициентов ПИД-регулирования при работе контроллера газовой смеси.*

*Controller for gas mixture production and control in technological vacuum equipment. S.V.Sazhnev, V.I.Khyazev, Y.B.Tsvetkov. The article considers the issue of obtaining a multi-component gas mixture from several one-component standard gas sources. The problem of high-precision maintenance of the percentage ratio of the components of the mixture while maintaining the specified pressure in the working chamber of the vacuum equipment is solved. The method of experimental selection of PID-control coefficients during operation of the gas mixture controller is shown.*

Потребность в развитии методов и оборудования для создания газовых смесей с точным содержанием газовых компонентов с ростом, усовершенствованием и многообразием промышленных технологий со временем только возрастает. Это обусловлено широким применением газовых смесей в промышленности, науке и медицине. Однако в каждом из методов получения газовых смесей имеются свои достоинства и недостатки. Обзор существующих методов смешения газов содержится в работе [1].

Для поддержания процентного соотношения составных частей смеси при сохранении заданного давления в рабочей камере вакуумного оборудования нами использовался метод динамического перемешивания газов [2, 3]. Основным достоинством этого метода является простота применения, высокая точность при широком диапазоне концентраций и оперативность приготовления газовых смесей.

Целью настоящей работы является получение и управление многокомпонентной газовой смесью на базе автоматического контроллера КГС-3 «Элточприбор». Моделировалась задача подачи газовой смеси с фиксированным соотношением концентраций газов в вакуумную камеру установки плазменного напыления магнетронного типа систем газотермического напыления в электронной промышленности.

Внешний вид контроллера с газовой системой представлен на рис. 1.



Рис. 1. Контроллер газовой системы КГС-3 и газовая система.

Газовая схема, с которой работал контроллер КГС-3, эквивалентна газовой схеме рис.2.

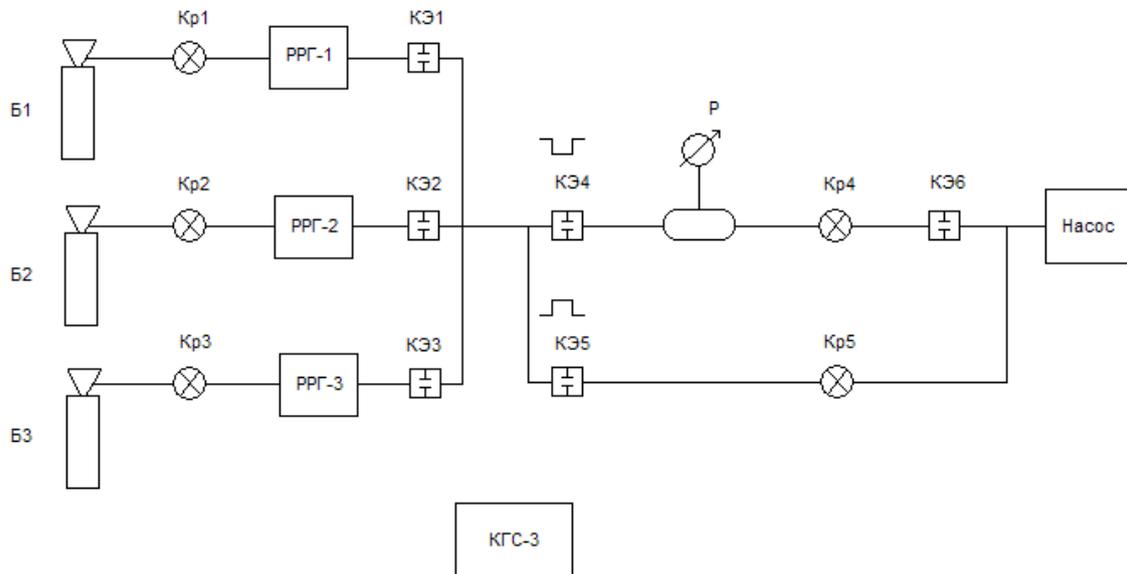


Рис.2. Газовая схема.

В газовую систему входят: две газовых панели, баллон объемом 1л, имитирующий вакуумную камеру установки плазменного напыления магнетронного типа, датчик давления Р типа АИР-10Н-ДИВ, форвакуумный насос типа НВР-4.5Д (рис.2).

В первой газовой панели установлены три цифровых регулятора расхода газа (РРГ) «Элточприбор» с диапазонами расходов  $D1 = 18$  л/ч,  $D2 = 9$  л/ч,  $D3 = 3.6$  л/ч и три электромагнитных клапана SMC XSA1-12V. Во второй газовой панели установлены три электромагнитных клапана SMC XSA1-12V и вакуумный нагнетатель Кр5. К этой панели подсоединен форвакуумный насос, баллон совместно с датчиком давления Р и вакуумным нагнетателем Кр4.

Газовая система представляет собой газовый смеситель трех компонентов газа, работающий по методу динамического перемешивания газов с помощью цифровых регуляторов расхода газа, и включает в себя основной канал с вакуумной камерой, в качестве которой служит баллон и байпасный канал. Вакуумные нагнетатели Кр4 и Кр5, включенные в основной и байпасный каналы, настроены таким образом, чтобы и при откачке форвакуумным насосом каналы имели равные пневмосопротивления.

Использование байпасного канала, у которого пневмосопротивление равно по величине пневмосопротивлению основного канала, позволяет подавать предварительно сформированную газовую смесь в вакуумную камеру без нежелательных скачков давления в камере с помощью соответствующей коммутации электромагнитных клапанов.

Эти скачки обусловлены процессами при установлении задания расхода газа в РРГ в начальный момент времени, когда происходят колебания расхода газа. Влияние этих колебаний можно устранить, пропуская газовую смесь через байпасный канал.

При испытаниях контроллер работал в режиме автоматического поддержания давления воздуха в баллоне величиной 20 кПа, имитируя газовую смесь путем регулирования расхода воздуха тремя РРГ с использованием сигнала обратной связи от датчика давления. Воздушная смесь имитирует постоянный состав газовой смеси с  $C1 = 58.8\%$ ,  $C2 = 29.41\%$ ,  $C3 = 11.79\%$ ,  $Q_m = 22$  и  $30$  л/ч, где  $C1,2,3$  – соответствующие объемные концентрации компонентов газовой

смеси,  $Q_m$  – максимальный расход газовой смеси. Контроллер управляет РРГ так, что при регулировании потока газовой смеси концентрации  $C_{1,2,3}$  сохраняются постоянными.

Контроллер позволяет незначительно изменять величины концентраций компонентов смеси относительно выше приведенного базового состава  $C_1, C_2, C_3$  для соответствующих им  $D_1, D_2, D_3$  для  $Q_m = 22$  л/ч при условии фиксации величины одной из концентраций согласно таблице 1.

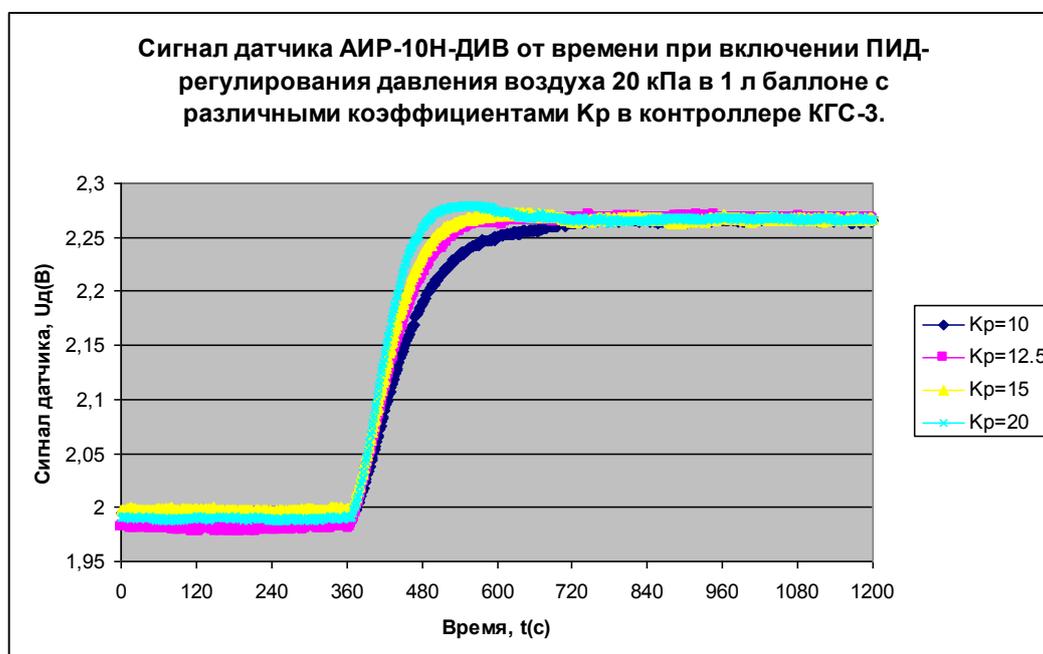
Таблица 1.

$C_1(\%)$	$C_2(\%)$	$C_3(\%)$	$dC(\%)$
58.80	29.41	11.79	0 база
58.80	27.41	13.79	$\pm 2$ $C_1 = \text{const}$
58.80	31.41	9.79	$\pm 2$ $C_1 = \text{const}$
62.80	29.41	7.79	$\pm 4$ $C_2 = \text{const}$
54.80	29.41	15.79	$\pm 4$ $C_2 = \text{const}$
68.80	19.41	11.79	$\pm 10$ $C_3 = \text{const}$
48.80	39.41	11.79	$\pm 10$ $C_3 = \text{const}$

Давлению воздуха величиной 20 кПа соответствует сигнал с датчика давления величиной  $U_d = 2.26$  В на нагрузочном резисторе с сопротивлением 498 Ом, а атмосферному давлению соответствует  $U_d = 3.30$  В.

Для поддержания давления в баллоне величиной 20 кПа в контроллере используется метод ПИД-регулирования с напряжением задания для датчика давления  $U_{зад} = 2.26$  В. Коэффициенты ПИД-регулятора  $K_p, K_i, K_d$  подбираются экспериментально, где  $K_p$  – пропорциональный,  $K_i$  – интегральный,  $K_d$  – дифференциальный коэффициенты. Для данной газовой системы оптимальными являются значения  $K_p = 12.5; K_i = 5; K_d = 0$ .

Переходные процессы от вакуума до давления 20 кПа в баллоне для различных коэффициентов  $K_p, K_i$  при включении ПИД-регулятора в контроллере представлены на рис.3 и рис.4 соответственно.



*Рис.3. Включение ПИД-регулятора при различных  $K_p$ .*

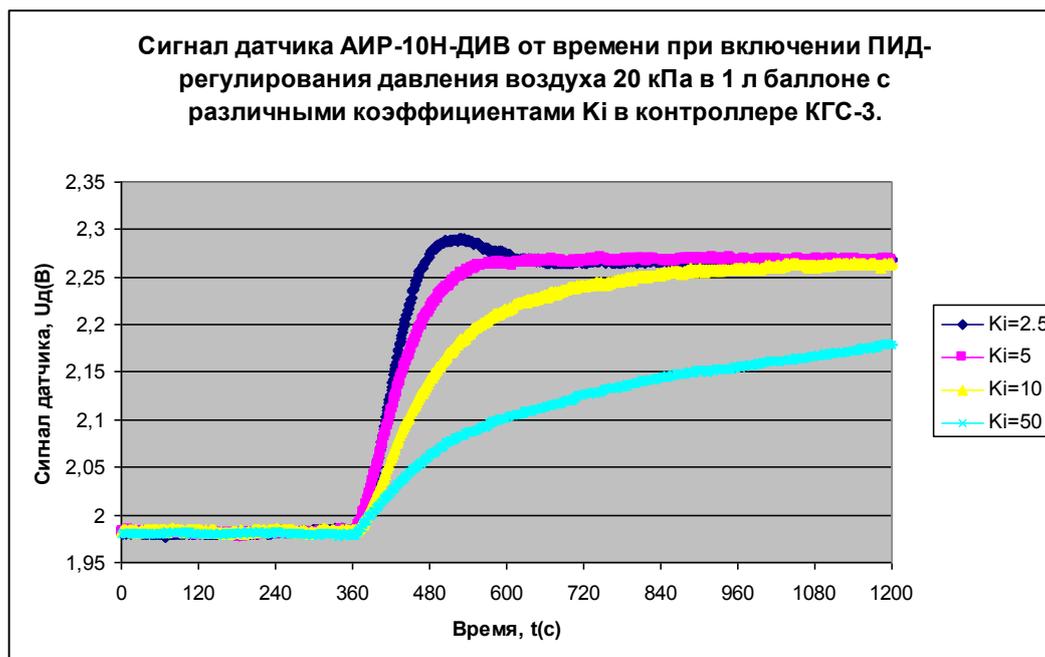


Рис.4. Включение ПИД-регулятора при различных  $K_i$ .

При выборе ПИД-коэффициентов следует отметить, что  $K_i$  не должен принимать нулевое значение. В этом случае ПИД-регулятор не работает.

Для  $K_d$  лучше выбрать нулевое значение, т.к. при флуктуации сигнала датчика давления начинает резко изменяться задание расхода газовой смеси, что приводит к нежелательным колебаниям давления в регулируемой газовой системе.

На рис.5 представлена регистрация сигнала датчика давления от времени на панели контроллера. Первый импульс представляет переходы от вакуума в баллоне к регулируемому давлению 20 кПа и обратно при включении и выключении ПИД-регулятора в контроллере. Второму импульсу соответствует напуск атмосферы в баллон и откачка воздуха до вакуума без включения ПИД-регулятора.

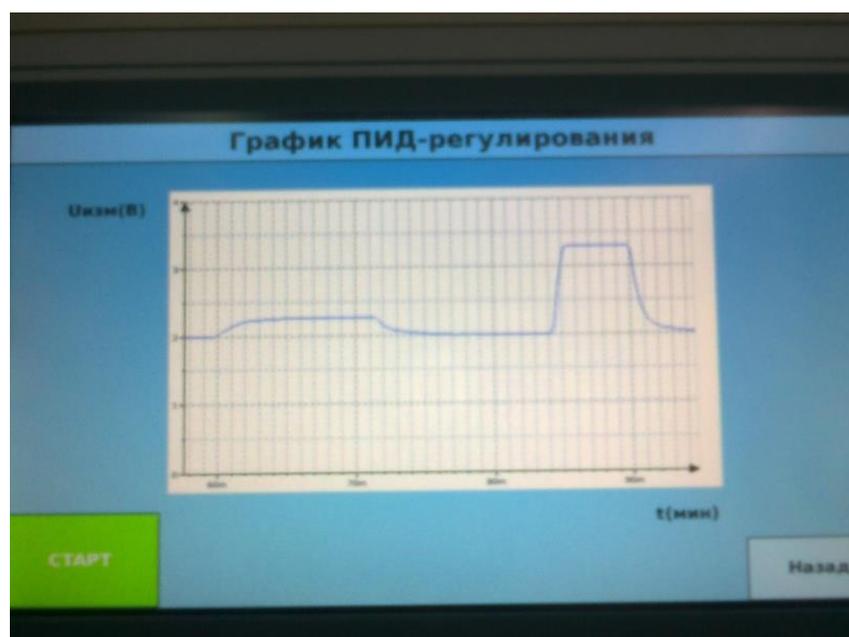


Рис.5. Сигнал датчика давления АИР-10Н-ДИВ от времени. В одном делении по оси времени 1 мин при длине всей шкалы 32 мин.

Контроллер может управляться от внешнего ПК. При этом передается управление заданием расхода газовой смеси  $S$  заданного состава  $C_1, C_2, C_3$ , режимами работы электромагнитных клапанов КЭ1...КЭ6. Управление происходит по протоколу MODBUS RTU при скорости обмена 19200 бит/с, 8N1.

#### **Выводы**

1. В процессе испытаний продемонстрирована устойчивая работа контроллера КГС-3. Контроллер управлял газовой системой в течение нескольких суток непрерывно, не менее 8 часов в сутки во всех предусмотренных режимах работы контроллера: «Ручной», «Авто», «Авто +», управление от ПК.

2. Для каждой газовой системы следует подбирать коэффициенты ПИД-регулирования экспериментальным путем. Достаточно подобрать  $K_p$  и  $K_i$ , а  $K_d$  сделать нулевым. Коэффициент  $K_i$  не может быть нулевым.

3. Для каждой газовой системы экспериментально подбирается длина временной шкалы графика ПИД-регулирования и масштаб оси напряжения датчика давления в пределах от 0 до 10 В.

4. При заданных значениях базового рецепта газовой смеси и диапазонов регулирования РРГ возможна незначительная коррекция состава газовой смеси. Подбор газовой смеси следует осуществлять заранее и можно выполнить в режиме работы контроллера «Ручной». После этого следует использовать РРГ с надлежащими диапазонами регулирования расходов газов  $D_1, D_2, D_3$ . Проверка правильного выбора  $D_1, D_2, D_3$  по заданным параметрам  $C_1, C_2, C_3, Q_m$  осуществляется внутренней компьютерной программой контроллера КГС-3.

6. Контроллер КГС-3 может управлять газовой системой как автономно, так и в режиме внешнего управления от ПК или микроконтроллера, входя в состав общей технологической системы.

#### **Литература**

1. В.Л. Бондаренко, Н.П. Лосяков, Ю.М. Симоненко, О.В. Дьяченко, Т.В. Дьяченко. «Методы приготовления смесей на основе инертных газов». Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012, с. 41-53.
2. Еремина Б.Г. «Газовый анализ», ГНТИХЛ, Л., 1955, с. 88.
3. Платонов И.А., Колесниченко И.Н., Новикова Е.А., Муханова И.М. «Получение газовых смесей известного состава динамическими методами» Сорбционные и хроматографические процессы, ВГУ, 2017, т. 17, №3, с. 378-387.