

УДК 681.53

А. В. ЧУМАЧЕНКО, А. Е. ЛУКЬЯНОВИЧ, И. В. КОРСИЧЕНКО

НПП ХАРТРОН-АРКОС, Украина

## СОЗДАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Рассматриваются этапы создания перспективного программно-технического комплекса для испытаний на радиационную стойкость космических аппаратов. Разрабатывается математическая модель расхода газовой среды для автоматизированной системы мониторинга объемной активности газовых сред. Полученные в ходе моделирования результаты апробированы на реальном исследовательском стенде с положительным результатом, обеспечивающим минимальное время переходного процесса относительно результатов натурных тестов*

**Ключевые слова:** автоматизированная система радиационного контроля; математическая модель расхода газовых сред, ПИД-регулятор, расход газовых сред, радиационная стойкость, регулирование.

### Введение

Быстрый рост космических услуг формирует жесткие конкурентные требования по стоимости аппаратуры систем управления и другой бортовой электроники космических аппаратов (КА). Лучшим решением в этом случае является применение менее дорогой элементной базы, чем типа «space» и «military» – элементной базы индустриального назначения. Именно индустриальные средства автоматизации, такие как микроЭВМ, контроллеры, сетевые устройства, по своим функциональным возможностям и ряду эксплуатационных параметров оказываются пригодными для решения многих задач в составе бортовой аппаратуры (БА) КА. Препятствием к их использованию являются особые эксплуатационные требования, предъявляемые к аппаратуре КА, и, прежде всего, требования по обеспечению радиационной стойкости (РС).

РС аппаратуры определяет в основном срок активного существования и вероятность безотказной работы всего КА в целом [1].

Как правило, испытательные лаборатории, выполняющие радиационное облучение БА (т.е. подтверждающие РС аппаратуры), должны соответствовать строгим требованиям в части радиационного контроля (РК).

Наиболее важной частью систем РК испытательных лабораторий является система контроля радиоактивных выбросов через системы вентиляции, что обуславливается проблемой загрязнения окружающей среды как в лаборатории, так и на прилегающей местности, и, соответственно, вредного воздействия на человека.

Работа такой системы должна характеризоваться мгновенной реакцией на появление радиоактивных элементов в системе вентиляции и возможностью своевременного предупреждения персонала лаборатории. При проведении испытаний БА КА на РС в испытательных лабораториях необходимо контролировать, в том числе, уровень загрязнения воздуха, для чего должны применяться системы радиационного контроля.

С целью реализации данной характеристики может использоваться разработанный специалистами НПП «Хартрон-Аркос» программно-технический комплекс для определения объемной активности выбросов йодов, золь и инертных радиоактивных газов (ПТК АСКМ ОА).

### 1. Постановка задачи

АСКМ ОА характеризуется тем, что обеспечивает автоматический процесс отбора пробы из различных помещений с последующим измерением объемной активности газовой среды.

При этом существует задача, важная для процесса измерения, - обеспечение достоверности замеров путем поддержания заданного значения расхода газовой среды в линии отбора пробы [2].

Это связано с технологическими особенностями функционирования датчиков радиационного контроля объемной активности выбросов йодов, золь и инертных радиоактивных газов, для которых должен постоянно поддерживаться заданный уровень расхода газовой среды.

В связи с данной постановкой задачи были выполнены следующие этапы создания перспективного ПТК АСКМ ОА.

## 2. Проектирование, создание и натурные испытания

АСКМ ОА была спроектирована в четырех исполнениях: с датчиком РК инертных радиоактивных газов (ИРГ), датчиком РК аэрозолей, датчиком РК активных йодов и датчиком РК ИРГ (аварийное исполнение), представленных на рис. 1.

Постоянное переключение запорных шаровых кранов, деградация насосов, а также забивающиеся со временем фильтры и трубопровод являются причиной постоянного изменения скорости потока [2]. В связи с этим было принято решение автоматизировать процесс пробоотбора путем внедрения расходомера и регулятора (см. рис. 2), которые позволят поддерживать постоянное значение расхода.

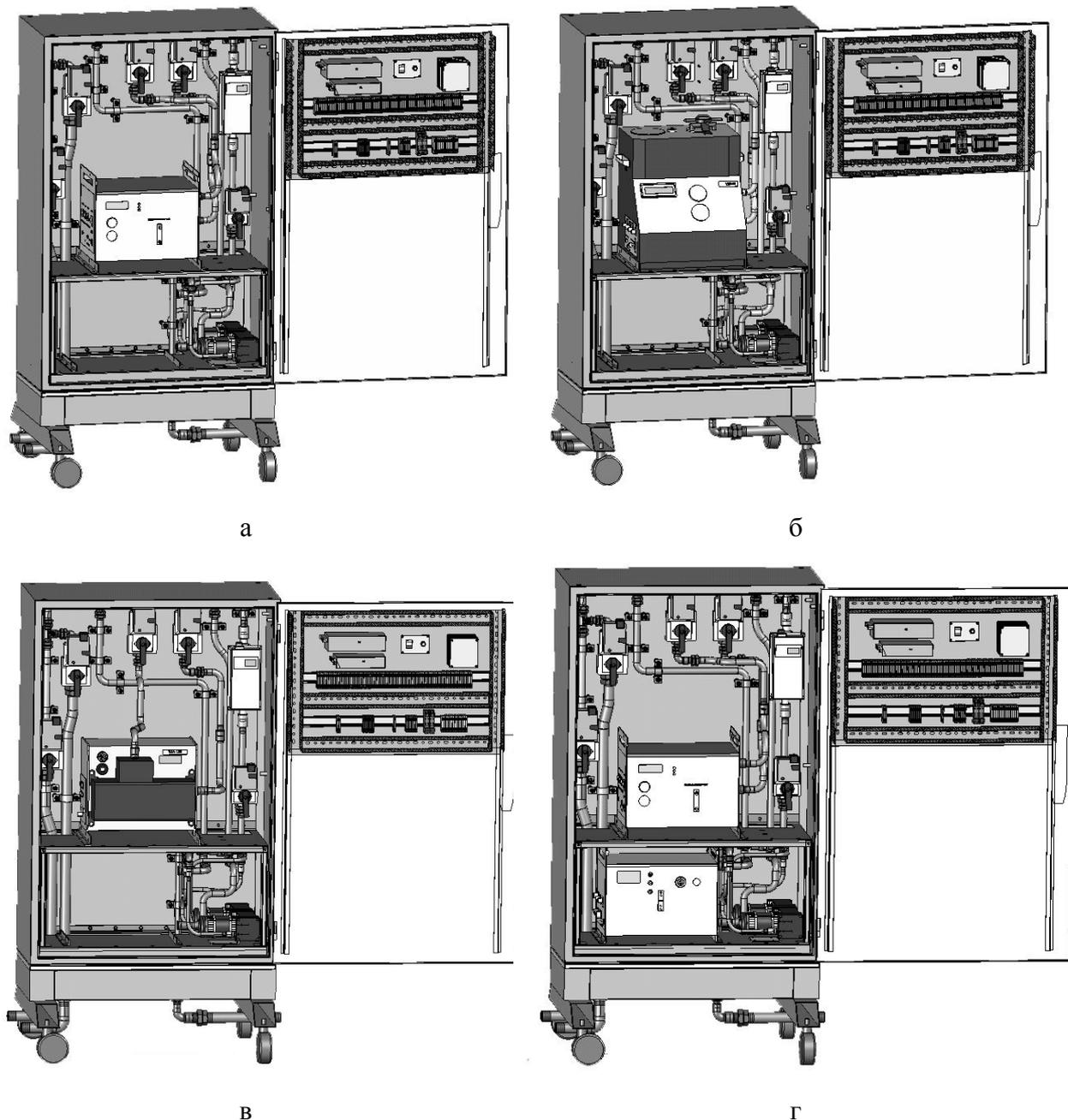


Рис. 1. Внешний вид АСКМ ОА НПП Хартрон-Аркос:  
 а – вариант исполнения: с датчиком РК инертных радиоактивных газов (ИРГ),  
 б – вариант исполнения с датчиком РК аэрозолей,  
 в – вариант исполнения с датчиком РК активных йодов  
 г – вариант исполнения с датчиком РК ИРГ (аварийное исполнение)

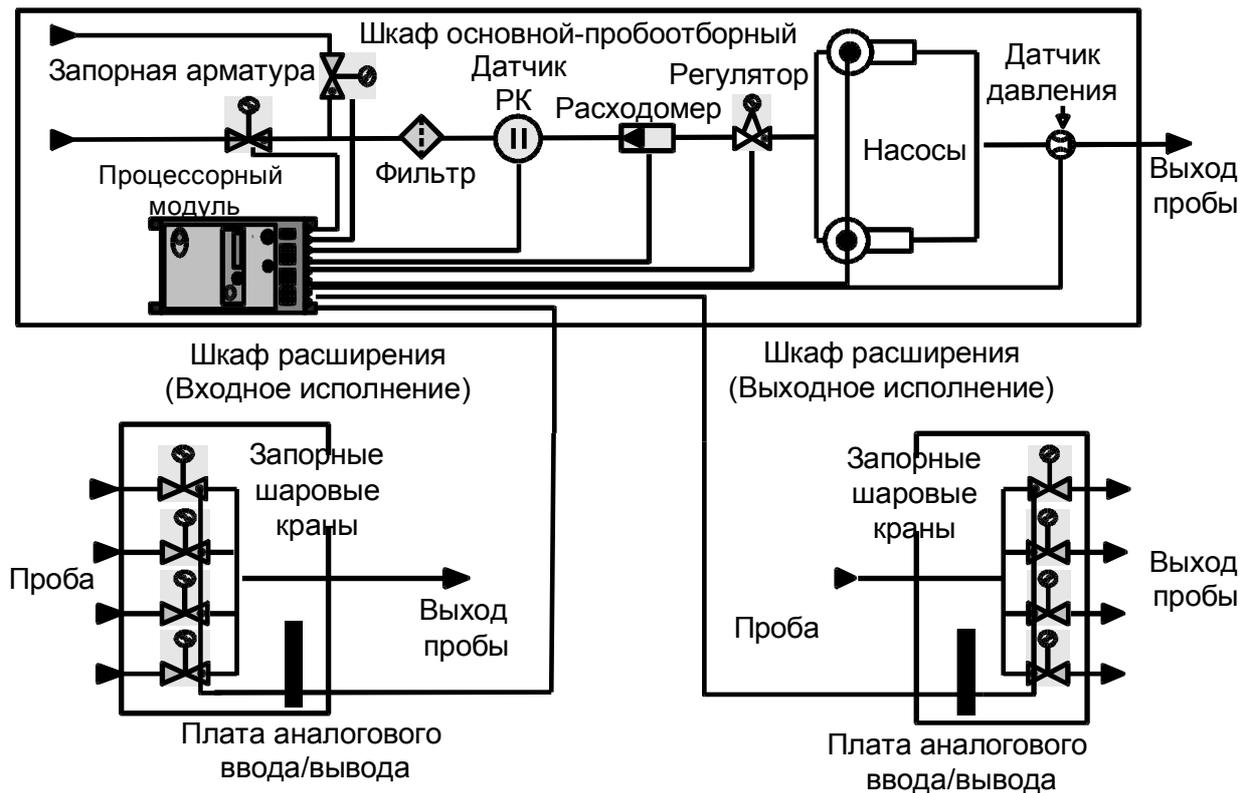


Рис.2. Структурная схема типичного канала измерения АСКМ ОА газовой среды

Для исследования данного вопроса была создана исследовательская установка, представленная на рис. 3.

Для реализации регулирования в АСКМ ОА принято решение использовать классический ПИД-регулятор. Предварительно были рассмотрены структуры ПИД-регуляторов, наиболее часто используемых при регулировании и осуществлен анализ применимости данных ПИД-регуляторов для решения задачи регулирования расходом газовой среды АСКМ ОА с учетом нашей постановки задачи [2].

В качестве метода поиска коэффициентов был выбран «поиск по сетке» (для каждой точки внутри области устойчивости определяется время переходного процесса последующим определением глобального минимума) с построением области устойчивости исходя из критерия минимального времени переходного процесса, т.к. в системе при постоянном переключении запорной арматуры необходимо за кратчайший промежуток времени установить требуемый для датчиков РК расход [3].

На контроллере АСКМ ОА на языке C++ запрограммирован классический ПИД-регулятор с использованием интегрированной среды разработки Sun Studio и СУБД фирмы Oracle, функционирующих под управлением ОС RedHat Linux.



Рис. 3. Внешний вид АСКМ ОА НПП Хартрон-Аркас

В процессе проведения натурных испытаний был проведен поиск по сетке с шагом  $h_1=0,25$  по пропорциональной составляющей, шагом  $h_2=0,5$  по дифференциальной составляющей и шагом  $h_3=0,01$  по интегральной составляющей. Процесс считался

установившимся, если значение расхода составляло 35 л/мин с доверительным интервалом в 5%. В итоге были получены результаты, приведенные в [4].

Результаты для нулевой интегральной составляющей представлены на рис. 4-5.

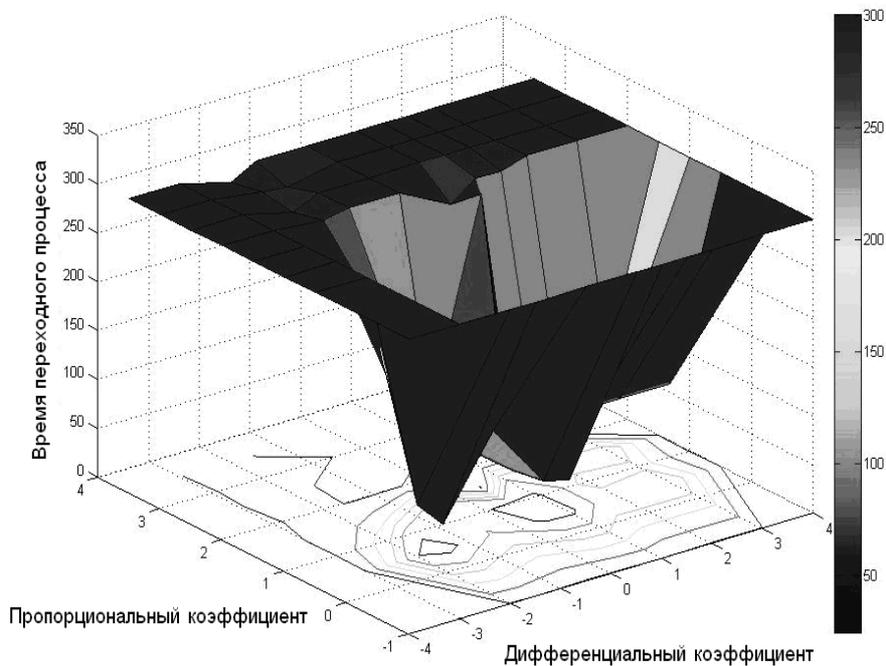


Рис. 4. Трехмерная область устойчивости с отображением времени переходного процесса

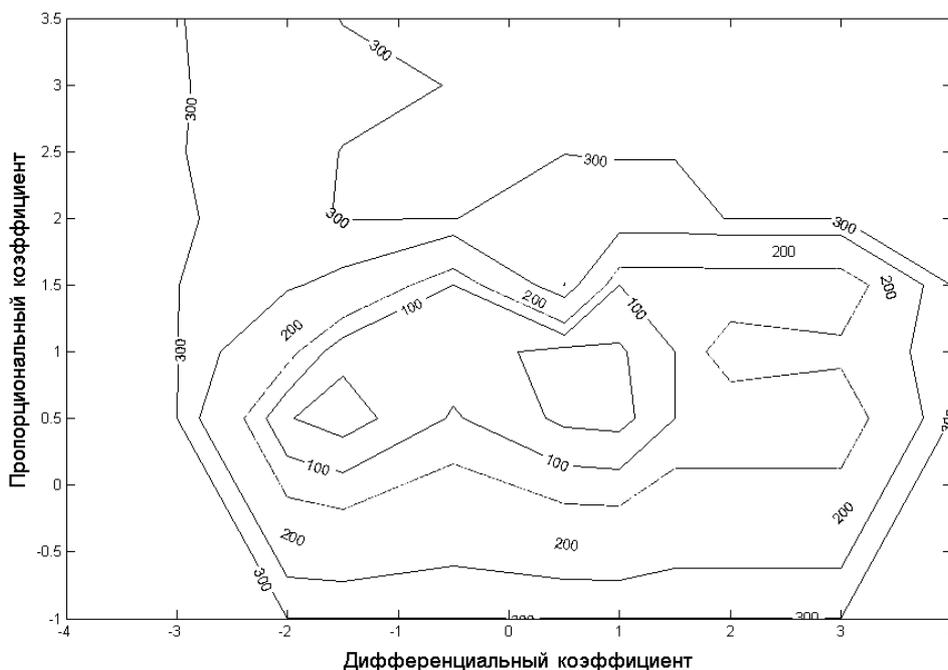


Рис. 5. Проекция области устойчивости на плоскость

Графики зависимости расхода и положения регулятора от времени для данных настроек приведены на рис. 6.

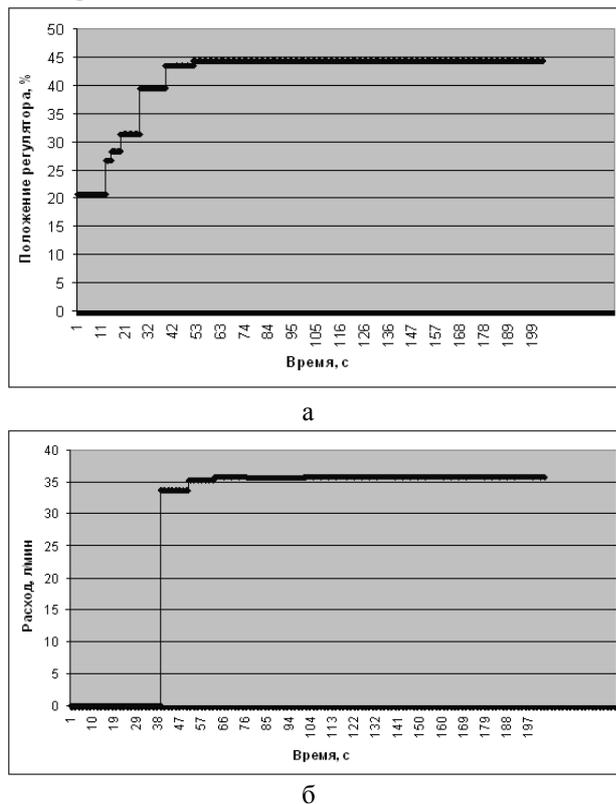


Рис. 6. График зависимости положения регулятора и расхода от времени:  
а – зависимость положения регулятора от времени;  
б – зависимость расхода от времени

Таким образом, минимальное время переходного процесса (38 с) обеспечивает классический ПД-регулятор с настройками  $P_p=0,65$ ;  $P_i=0$ ;  $P_d=-1,8$  [2].

### 3. Создание математической модели расхода газовой среды для уточнения настроек ПД-регулятора

Для улучшения характеристики ПТК в части процесса регулирования (минимальное время переходного процесса) предложена математическая модель, сформированная с использованием математического аппарата, который был разработан для расчетов характеристик вентиляционных систем. [5]

В публикации [4], авторы которой берут за основу классический математический аппарат, предлагается описывать неустановившееся движение воздуха по воздуховодам следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \frac{\lambda \rho}{8R_{\Gamma}} \partial v^2(x,t) + \rho \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}, \\ -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t$  – время от начала переходного процесса;

$p$  – давление в трубопроводе;

$x$  – длина рассматриваемого участка трубопровода;

$\lambda$  – коэффициент гидродинамического трения;

$R_{\Gamma}$  – гидравлический радиус трубопровода;

$\rho$  – плотность газовой среды;

$v$  – скорость перемещения газовой среды;

$c$  – скорость звука в газовой среде.

Система уравнений (1) может быть преобразована в линеаризованный вид с введением параметра, определяющего расход газовой среды [5]:

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

где  $2a$  – линеаризованный коэффициент аэродинамического сопротивления;

$Q$  – расход газовой среды;

$S$  – площадь поперечного сечения трубопровода.

В системе уравнений (2) первое уравнение учитывает аэродинамическое сопротивление движения газовой среды и её инерционные свойства. Второе уравнение учитывает сжимаемость газовой среды, а в нашем случае для АСКМ ОА рассматриваемый участок трубопровода, на котором находятся регулирующие арматура и расходомер, не превышает одного метра, и данным уравнением можно пренебречь в связи с тем, что в публикации [4] обоснована несжимаемость газовой среды для коротких трубопроводов.

Оставшееся первое уравнение преобразовывается для получения зависимости расхода газовой среды в коротком трубопроводе от времени переходного процесса [5] следующим образом:

$$Q(t) = \frac{P_0}{2a\rho L/S} (1 - e^{-2at}), \quad (3)$$

где  $P_0$  – давление в начальном сечении трубопровода;

$L$  – длина трубопровода.

Полученная функциональная зависимость (3) является искомой математической моделью расхода

газовой среды для АСКМ ОА. При моделировании также необходимо учитывать зависимость расхода газовой среды от степени открытия регулирующей арматуры. Исходя из вышесказанного, запишем формулу (3) в следующем виде [4]:

$$Q(t, k) = \frac{P_0}{2a(k)pL/S(k)} (1 - e^{-2a(k)t}), \quad (4)$$

где  $k$  – процент открытия регулирующей арматуры.

Параметр давления в начальном сечении трубопровода формулы (4) определяется не только характеристиками насосного блока [7] установки АСКМ ОА, но и за счет потери давления из-за сопротивлений трубопроводной части АСКМ ОА, расположенной перед расходомером по потоку. Схема соединения трубопроводов и технологического оборудования АСКМ ОА представлена на рис. 3. Габаритные размеры стойки АСКМ ОА в которой расположена данная трубопроводная сеть – 1,2 м на 0,8 м.

До рассматриваемого нами участка трубопровода, начинающегося с расходомера и заканчивающегося регулирующей арматурой, расположен участок с несколькими запорными арматурами, датчиками радиационного контроля и различными по своей конфигурации трубопроводами. Для определения потери давления на данном начальном участке применим следующую формулу [6]:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{\rho v_i}{2}, \quad (5)$$

где  $i$  – элемент начального участка трубопроводной сети;

$\zeta_i$  – коэффициент сопротивления  $i$ -го элемента;

$\rho$  – плотность газовой среды,

$v_i$  – скорость газовой среды в  $i$ -ом элементе трубопроводной сети.

Расчеты, проведенные по формуле (5), с использованием данных из [6] показали незначительную потерю давления. Данный вывод подтверждается следующим результатом эксперимента, где при полностью открытой арматуре и включенном блоке насосов измеренный расход соответствует максимальному заявленному производителем насосов [7] и составляет 112 л/мин, что эквивалентно заявленному максимальному давлению в 1,3 бар. Таким образом, на входе в расходомер потери давления в пересчете из расхода не зафиксированы измерительным прибором.

В формуле (4) также присутствует ряд параметров, являющихся функциями от процента откры-

тия регулирующей арматуры, таких как [4]:

– линеаризованный коэффициент аэродинамического сопротивления, вычисляемый по следующей формуле [4]:

$$2a = \left( \frac{\lambda v}{8R_{\Gamma}} \right)_{cp}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения газовой среды равный 0,0375 и вычисленный по формуле для ламинарного течения газовой среды, т.к. число Рейнольдса ( $Re$ ) в нашем случае 2000 [6];

$R_{\Gamma}$  – гидравлический радиус трубопровода, вычисляемый исходя из диаметра круглого трубопровода, который является функцией от процента открытия регулирующей арматуры. Здесь и далее принято допущение, что процент открытия регулирующей арматуры учитывается в виде линейной зависимости при вычислении геометрических характеристик трубопровода;

$v$  – средняя по сечению и по времени скорость движения газовой среды в рассматриваемом участке трубопровода во время переходного процесса. В ходе экспериментов установлено значение равное 1,1 м/с;

– площадь поперечного сечения трубопровода, в вычисление которого также входит геометрический размер (радиус или диаметр) однодюймового трубопровода, который изменяется в зависимости от процента открытия регулирующей арматуры.

Дополнительно в формулу (4) входит параметр плотности газовой среды ( $\rho$ ) равный 1,225 кг/м<sup>3</sup> и параметр длины трубопровода округленного до 1 м.

Оценка адекватности предлагаемой математической модели расхода газовой среды в коротком трубопроводе выполнялась путем сравнения с реальными данными по расходу газовой среды, измеренными в ходе экспериментов на АСКМ ОА при различных значениях процента открытия регулирующей арматуры (см. рис.7).

С учетом описанных выше математических выкладок и реальных технологических ограничений был создан программно-математический блок, моделирующий работу пневматической схемы АСКМ ОА и пригодный для дальнейших исследований в части автоматизации процессов регулирования расхода газовых сред.

Таким образом, математическая модель расхода газовой среды для АСКМ ОА в виде функциональной зависимости (4) обеспечивает моделирование переходных процессов в зависимости от времени и процента открытия регулирующей арматуры, а погрешности работы уточненной модели относи-

тельно экспериментальных результатов приемлемы при всех режимах работы имитируемого технологического оборудования [4].

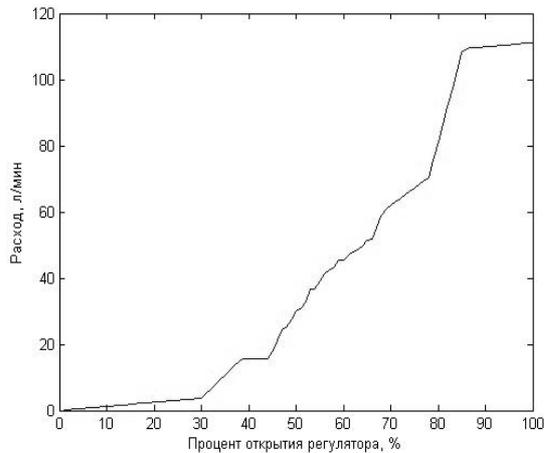


Рис. 7. Экспериментальная зависимость расхода газовой среды от процента открытия регулирующей арматуры АСКМ ОА

#### 4. Уточнение настроек ПИД-регулятора с использованием полученной модели расхода газовых сред (вероятностная модель)

Построение математической модели объекта управления в виде расчетной схемы расхода газовой среды в зависимости от положения регулирующей арматуры [8] позволяет получать (строить) области устойчивости и выбирать оптимальные коэффициенты для различных законов управления с использованием специализированных сред инженерного моделирования без проведения натурных испытаний.

Применение вероятностного подхода, описанного в [8] позволило найти оптимальные настройки регулятора с максимальной вероятностью работоспособности, соответствующей минимальному времени переходного процесса регулирования газовой среды АСКМ. Создано программное обеспечение (ПО) в среде Simulink пакета MatLab, реализующее вероятностный подход. В результате был получен результат, приведенный на рис. 8.

Таким образом, окончательно определены пропорциональный и дифференциальный коэффициент — 0,75 и -1,89 соответственно. Время переходного процесса в этом случае составляет 32 секунды [8].

График расхода газовой среды от времени моделирования для этих значений пропорционального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора приведен на рис. 9.

Данные настройки позволяют минимизировать время переходного процесса, что было проверено на реальной установке [9].

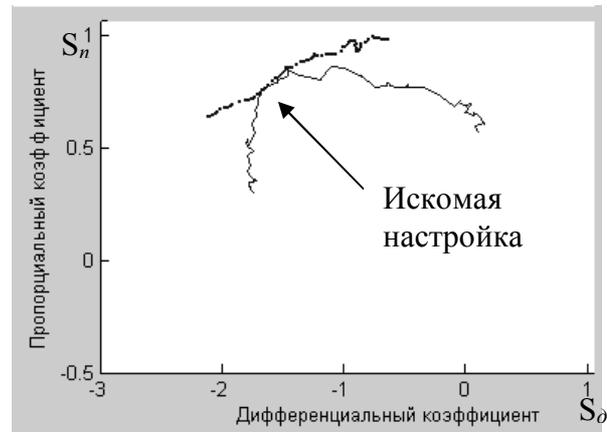


Рис. 8. Определение настроек ПД-регулятора при вероятностном моделировании

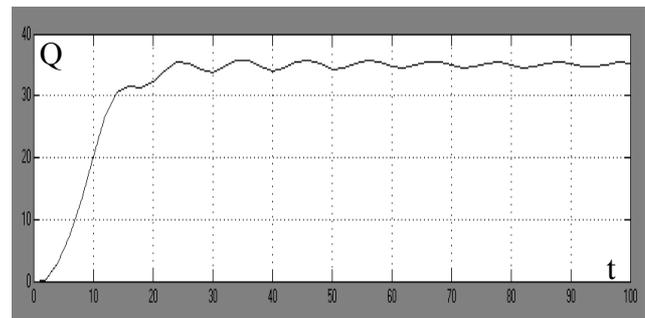


Рис. 9. Зависимости расхода газовой среды ( $Q$ , л/мин) от времени моделирования ( $t$ , с) при пропорциональном и дифференциальном коэффициенте — 0,75 и -1,89

### Выводы

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

- разработанный ПТК обладает высокими эксплуатационными характеристиками в части времени реакции при определении превышения ОА газовых сред;
- созданные в ходе проектирования математические модели прошли верификацию и пригодны для дальнейших исследований при создании систем автоматического регулирования расхода газовых сред аналогичных АСКМ ОА.
- данный ПТК пригоден для применения в системах РК испытательных лабораторий, которые выполняют тестирование на РС;
- применение разработанного ПТК перспективно в связи с модульностью его построения и по-

звolyет дооснащать испытательные лаборатории, производящие испытания БА КА на РС поэтапно.

### Литература

1. Гобчанский, О. Повышение радиационной стойкости индустриальных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры [Текст] / О. Гобчанский, В. Попов, Ю. Николаев // *Современные технологии автоматизации*. – 2001. – № 4. – С. 36-40.
2. 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 // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 2. – С. 7-13.
3. Чумаченко, А. В. Построение процесса регулирования для автоматизированной системы радиационного контроля [Текст] / А. В. Чумаченко, И. В. Корсиченко // *Вісник СевНТУ*. – 2012. – № 133. – С. 389-395.
4. 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. Междунар. конф. 22-25 ноября 2011 г. – Харьков, 2011. – Том 2. – С. 14.*

5. Баглей, С. Г. Дифференциальные уравнения неустановившегося движения воздуха по рудничным воздуховодам [Текст] / С. Г. Баглей, П. А. Воронин // *Сборник научных трудов СевКавГТУ*. – 2002. – № 1. – С. 17-29.
6. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
7. ЛБМВАК группа – мембранные микронасосы М71ВХ А.С. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lbm.ck.ua/>. – 20.02.2012.
8. Чумаченко, А. В. Применение вероятностного подхода при определении оптимальных настроек ПИД-регулятора газовой среды для автоматизированной системы радиационного контроля [Текст] / А. В. Чумаченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 4. – С. 134-139.
9. 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. – X., 2003. – С. 57-68.

*Поступила в редакцию 7.02.2014, рассмотрена на редколлегии 12.02.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., декан инженерно-физического факультета Д. В. Бреславский, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

### СТВОРЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА РАДІАЦІЙНУ СТІЙКІСТЬ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

*О. В. Чумаченко, О. Є. Лук'янович, І. В. Корсиченко*

Розглядаються етапи створення перспективного програмно-технічного комплексу для випробувань на радіаційну стійкість космічних апаратів. Створюється модель витрати газів для автоматизованої системи моніторингу об'ємної активності йодів, золь та інертних радіоактивних газів. Отримані в ході моделювання результати апробовано на реальному дослідницькому стенді з позитивним результатом, що забезпечує мінімальний час перехідного процесу відносно вже відомих результатів натурних тестів.

**Ключові слова:** автоматизована система радіаційного контролю, витрата газових середовищ, математична модель витрати газових середовищ, радіаційна стійкість, ПИД-регулятор, регулювання.

### CREATION OF PERSPECTIVE PROGRAM-TECHNICAL COMPLEX FOR SPACECRAFT RADIATION HARDNESS TESTING

*A. V. Chumachenko, A. E. Lukyanovich, I. V. Korsichenko*

Features of creation of perspective program-technical complex for spacecraft radiation hardness testing are considered. The model of a gas flow rate for the automated system of monitoring of volumetric activity of iodine, particulate and noble gases is created. The positive modeling results are approved on the real research test-bed providing minimum transient time relatively already the known results of model tests.

**Key words:** automated radiation monitoring system, gas flow rate, mathematical model of gas flow rate, PID controller, radiation hardness, regulation.

**Чумаченко Алексей Валентинович** – канд. техн. наук, начальник отд. 13060, НПП ХАРТРОН-АРКОС, Харьков, Украина, e-mail: [oleksiychumachenko@ Rambler.ru](mailto:oleksiychumachenko@ Rambler.ru).

**Лукьянович Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела 13010, НПП ХАРТРОН-АРКОС, Украина.

**Корсиченко Инна Владимировна** – инженер I кат. отд. 13060, НПП ХАРТРОН-АРКОС, Харьков, Украина, e-mail: [korsich@ Rambler.ru](mailto:korsich@ Rambler.ru).