

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМНЫМИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ГАЗОВОЗДУШНОМ КОНТУРЕ И ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМАХ СТЕНДА Ц-17Т для ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ

Ю.С. Марков, Е.А. Тихонов, Н.Д. Захаров, П.М. Егоров (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Рассмотрена система автоматического регулирования взаимосвязанных параметров технологических систем испытательного стенда, реализованная с помощью комбинированных двухканальных регуляторов, работающих по замкнутому (с использованием обратной связи) и разомкнутому циклам. Для работы замкнутого цикла в качестве обратной связи используются регулируемые параметры на входе испытуемого изделия (давление и температура), разомкнутый цикл реализуется по полученной экспериментальной путем расходной характеристике регулирующего органа.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления технологическими параметрами, система автоматического регулирования, двухканальный регулятор, замкнутая обратная связь, расходная характеристика.

Во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» создан стенд Ц-17 Т для проведения испытаний камер сгорания. Для каждого вида испытаний с помощью задвижек производится сборка частных технологических схем подвода воздуха и топлива к испытываемому изделию. Каждая такая схема имеет собственную систему автоматизации испытаний с помощью соответствующих регулирующих органов.

Технологическая схема газовоздушного контура стенда предусматривает различные варианты подогрева воздуха и подачи его к испытываемому изделию в зависимости от требуемых значений параметров воздуха. На рис. 1 представлена технологическая схема газовоздушного контура стенда.

Целью работы является обеспечение мероприятий по созданию комбинированных систем автома-

тического регулирования (САР) технологическими параметрами стенда, определение расчетно-экспериментальным путем расходных характеристик регулирующего органа (РО), предназначенных для использования в каналах разомкнутого цикла этих САР с последующей экспериментальной отработкой алгоритмов управления режимными и вспомогательными параметрами ТП испытаний на стенде Ц-17 Т.

### Особенности стенда Ц-17 Т

• Испытания проводятся по схеме с присоединенным трубопроводом на входе и имитацией высотно-скоростных условий перед объектом испытания по параметрам торможения. В ограниченном диапазоне могут быть обеспечены высотные условия на срезе сопла при использовании специальных эжектирующих устройств;

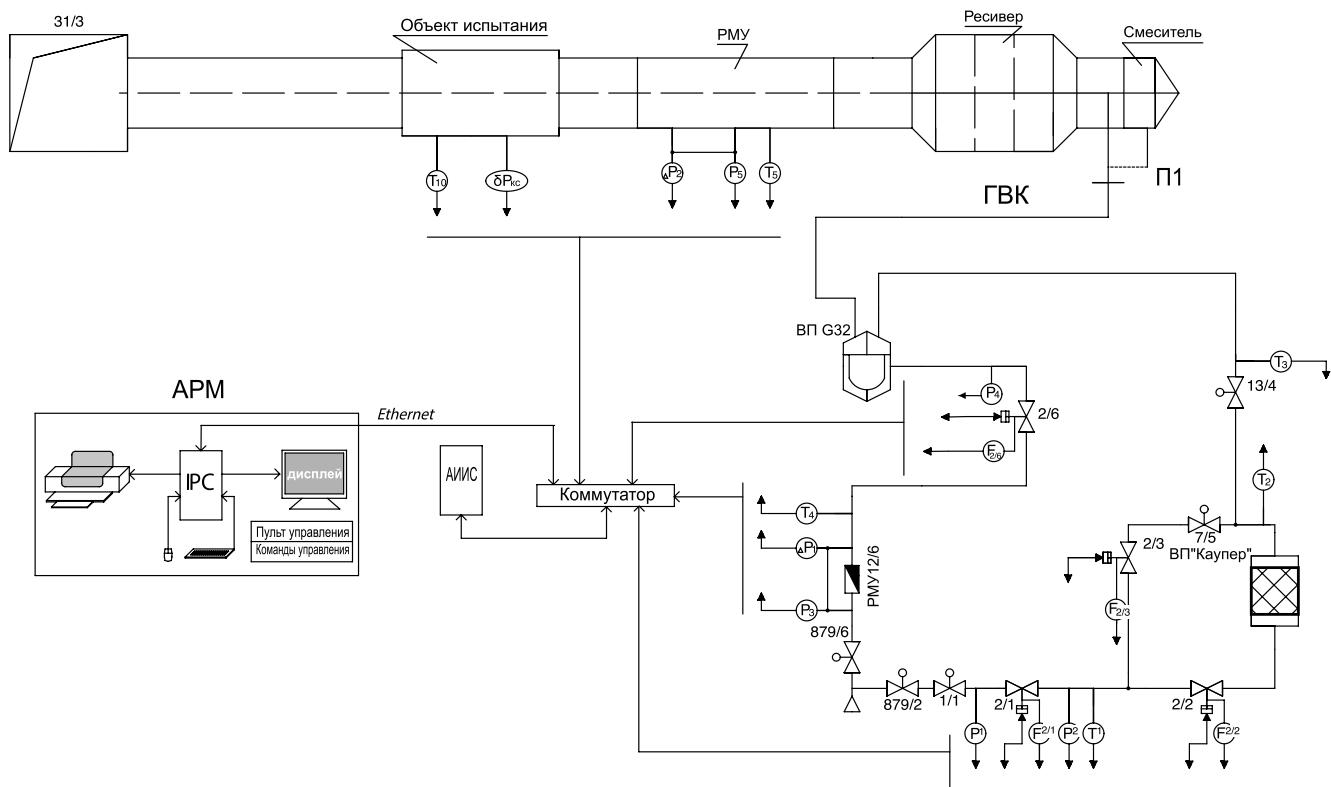


Схема автоматизации ГВК стенда Ц-17Т

- большое разнообразие испытываемых объектов и видов испытаний с различными объемом препарирования, требованиями по обработке и отображению;
- широкая номенклатура измеряемых параметров по давлению и температуре сред, расходам газа и жидкости, усилиям, вибрации, пульсации, частоте вращения и т.д.;
- измерение более 750 параметров в широком частотном диапазоне (1...100 кГц по отдельным каналам);
- высокая точность измерений основных и режимных параметров 0,1...0,5% верхнего предела;
- широкий диапазон изменения параметров.

Требования к качеству САР взаимосвязанных входных параметров стенда Ц-17 Т по быстродействию, монотонности и точности формулируются, исходя из свойств испытываемого изделия. При реализации этих требований в создаваемых САР возникают трудности, обусловленные наличием в объекте регулирования больших запаздываний, возникающих при прохождении сигналов — инерционных, емкостных, транспортных. Задача создания быстродействующей САР может быть решена в этом случае путем применения комбинированного регулятора, в котором со-вмещены два контура регулирования — замкнутый (с обратной связью) и разомкнутый (без обратной связи). В разомкнутом контуре используется расходная характеристика РО, с помощью которой определяется положение РО, соответствующее заданному расходу. Остальные параметры, входящие в формулу расходной характеристики, являются измеренными величинами.

Расход воздуха через РО зависит от ряда измеряемых параметров, таких как температура воздуха, давление на входе/выходе РО, положение его подвижного диска, а также от коэффициента истечения, зависящего от конфигурации проточной части РО. Кроме того, конфигурация проточной части РО существенно влияет на аналитическое выражение расходной характеристики, которое может быть использовано для аппроксимации экспериментальных данных. В данной работе принято аналитическое выражение для расходной характеристики проточных газовых каналов, приведенное в работе [1, 2].

Теоретическая формула для определения расхода потока массы газа обычно записывается для случая, когда скорость потока на входе проточного канала близка к нулю (например, при истечении из сосуда) или если давление во входном сечении канала изменяется с учетом скоростного напора; это так называемое полное давление, обозначаемое обычно  $P^*$

$$G = \mu F_2 \sqrt{\frac{2g}{RT}} \frac{k}{k-1} P_1^* \sqrt{\frac{1}{\pi^k} (\pi^k - \pi)}, \quad (1)$$

где  $\pi = P_2/P_1^*$  (индекс 1 соответствует значениям величин, относящихся к входному сечению проточного канала, а индекс 2 — к выходному его сечению),  $k$  — показатель адиабаты. Сразу видно, что выражение под знаком правого корня равенства (1)

имеет два нулевых значения — при  $\pi = 0$  и  $\pi = 1$ , следовательно, существует точка максимума на кривой, описываемой этим выражением. Абсцисса этой точки расположена в промежутке (0...1). Приравниванием нулю производной от этого выражения найдено значение абсциссы точки максимума, которую принято называть критическим отношением давлений:

$$\pi_{kp} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что критическое отношение давлений зависит только от свойства газа, определяемого показателем адиабаты, и не зависит от уровня соотносящихся давлений. Одно из этих давлений ( $P_2$ ) принадлежит критическому сечению, которым является выходное сечение проточного канала, так как оно минимально и скорость потока в нем наибольшая; при  $\pi = \pi_{kp}$  скорость потока в выходном сечении становится равной скорости звука. Увеличение входного давления ( $P_1^*$ ) при  $\pi = \pi_{kp}$  приводит к увеличению  $P_2$  и скорости потока, которая становится равной скорости звука; увеличивается расход газа. С другой стороны, возникновение в критическом сечении звуковой скорости прерывает влияние на расход газа давлений, реализующихся в сечениях, расположенных ниже (по потоку) критического сечения. Таким образом, диапазон изменения значений  $\pi$ , входящих в формулу (1), составляет  $(\pi_{kp}, 1)$ . Для случая  $\pi = \pi_{kp}$  формулу (1) можно упростить:

$$G = CFP_1^* / \sqrt{T_1}.$$

Для случая, когда во входном сечении канала измеряется статическое давление, формула расхода массы газа должна учитывать скоростной напор, то есть:

$$G = \mu F_2 \sqrt{\frac{2g}{RT}} \frac{k}{k-1} P_1 \sqrt{\frac{\frac{1}{\pi^k} (\pi^k - \pi)}{1 - (\varphi \pi^k)^2}}, \quad (3)$$

где  $\varphi = F_2/F_1$  — коэффициент, учитывающий скоростной напор потока в сечении  $F_1$ . Очевидно, что критическое отношение давлений зависит в данном случае не только от свойства газа, но и от коэффициента  $\varphi$ . Приравнивая к нулю производную от подкоренного выражения формулы (3), получаем выражение:

$$\frac{2}{k} \pi^{\frac{2}{k}-1} - \frac{k+1}{k} \pi^{\frac{1}{k}} - \varphi^2 \frac{4}{k} \pi^{\frac{4}{k}-1} + \varphi^2 \frac{k+3}{k} \pi^{\frac{3}{k}} = 0, \quad (4)$$

которое в общем случае не имеет аналитического решения. В частном случае, при  $\varphi = 1$ , легко проверить, что решение имеет вид:  $\pi_{kp} = 1$ ; подстановка этого решения в равенство (4) дает:

$$\frac{2}{k} - 1 - \frac{1}{k} - \frac{4}{k} + 1 + \frac{3}{k} = 0.$$

Очевидно, что при  $\varphi = 1$  происходит переход к трубопроводу с неизменным значением площади

проходного сечения, в котором (при отсутствии потерь) движение газа будет происходить со скоростью звука при любом малом значении  $\pi$ .

Часто  $\varphi$  имеет малые значения и, поэтому, для расчетов расхода используется формула (1), в которой давление  $P_1$  может быть измерено с помощью датчиков как полного, так и статического давления.

Важным обстоятельством, связанным с применением формулы (1), является то, что если проточный канал не имеет плавной конфигурации во входной его части, подобно той, которая имеет место в сопле Лаваля, то критическое отношение давлений  $\pi_{kp}$  может значительно отличаться от его теоретического значения, определяемого формулой (2). При этом никаким изменением значения показателя адиабаты невозможно трансформировать формулу (1) и сделать ее пригодной для аппроксимации экспериментально получаемых расходных характеристик проточных каналов в РО. Из экспериментальных данных получаем, что  $\pi_{kp}$  находится в диапазоне

$$0 < \pi_{kp} < \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Для получения аппроксимирующей формулы выделим из (1) выражение, зависящее только от  $\pi$ , и обозначим его через  $q$ :

С помощью подстановки  $\pi = \pi_{kp}$  найдем максимальное значение этой функции:

$$q_{max} = q(\pi_{kp}) = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}. \quad (5)$$

В работе [1] показано, что в области допустимых значений  $\pi$  кривая  $q_2(\pi)$  весьма близка к четверти эллипса. Используя это указание, проведем для перехода к эллипсу вертикаль, проходящую через точку  $\pi_{kp}$ , и примем ее за вертикальную ось эллипса. Учитывая границы допустимых значений  $\pi$ , записываем

$$\left( \frac{q(\pi)}{q_{max}} \right)^2 + \left( \frac{\pi - \pi_{kp}}{1 - \pi_{kp}} \right)^2 = 1, \text{ откуда сразу получаем:}$$

$$q(\pi) = q_{max} \sqrt{1 - \left( \frac{\pi - \pi_{kp}}{1 - \pi_{kp}} \right)^2}. \quad (6)$$

Подстановка (5) и (6) в формулу (1) дает:

$$G = \mu F \sqrt{\frac{kg}{R}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \sqrt{1 - \left( \frac{\pi - \pi_{kp}}{1 - \pi_{kp}} \right)^2}.$$

Введем обозначение:  $B = \mu F \sqrt{\frac{kg}{R}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}$ ; после

этого формула для аппроксимации расходных характеристик РО принимает вид:

$$G = B \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \sqrt{1 - \left( \frac{\pi - \pi_{kp}}{1 - \pi_{kp}} \right)^2}. \quad (7)$$

Из формулы обозначения  $B$  видно, что кроме коэффициентов, определяющих свойствами газа, эта величина зависит также от площади проходного сечения дросселирующего элемента РО, которая в свою очередь зависит от положения подвижного диска РО. Введем в рассмотрение функцию  $B(\varphi)$ , где  $\varphi$  — угол установки подвижного диска РО (с помощью привода) в пределах 0...100% открытия, которому соответствует площадь проходного сечения  $F_{max}$ . Для каждого из выбранных значений  $\varphi$ , набор которых должен позволить определить функцию  $B(\varphi)$ , экспериментально определяются параметры  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $P_2$ ,  $G$  с помощью которых вычисляются значения этой функции по формуле

$$B = G \sqrt{T_1} / \left( P_1 \sqrt{1 - \left( \frac{\pi - \pi_{kp}}{1 - \pi_{kp}} \right)^2} \right). \quad (8)$$

При этом для каждого значения  $\varphi$  должны быть получены несколько наборов определяющих параметров, каждый из которых реализует одно из следующих значений  $\pi$ : 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9. Если во время эксперимента обеспечивать равенство давления на выходе РО атмосферному, то для каждого из указанных значений  $\pi$  легко найти для реализации входное давление. С помощью полученных таким образом данных нетрудно определить значение  $\pi_{kp}$ , обеспечивающее наименьший разброс значений  $B$  от среднегарифметического его значения.

Найденные для различных  $\varphi$  значения  $B$  используются для построения обратной функции  $\varphi(B)$ , которая предназначена для создания разомкнутой САР расхода воздуха. С помощью алгоритма линейной интерполяции по значениям  $B$ , которые вычисляются по формуле (8) путем подстановки в нее заданного значения расхода воздуха и измеренных значений остальных параметров, определяется положение подвижного диска РО, которое обеспечивает пусть с относительно невысокой точностью, но при высоком быстродействии близость текущего и заданного значений расхода воздуха.

Для обеспечения проведения эксперимента подготовлены необходимые устройства измерения расхода и средства измерения других параметров, расположенные в газовоздушном контуре и системе подачи газообразного топлива.

Полученные в результате эксперимента данные позволяют с помощью алгоритма линейной интерполяции определять положение подвижного диска РО, которое обеспечивает пусть с относительно невысокой точностью, но при высоком быстродействии близость текущего и заданного значений расхода воздуха. Данные утверждения верны как для САР технологических параметров газовоздушного контура, так и для САР технологических параметров системы подачи газообразного топлива.

На основании полученных экспериментальных данных, а также рассчитанных на их основе зависимостях положения РО, разработаны алгоритмы для

*Наш прогресс проверяется не увеличением изобилия у тех, кто уже имеет много, а тем, способны ли мы достаточно обеспечить тех, кто имеет слишком мало.*

Т. Рузвельт

регулирования основных и вспомогательных технологических параметров газовоздушного контура и системы подачи газообразного топлива стенда Ц-17Т. Также создано специальное программное обеспечение, функционирование которого проверено экспериментально.

**Марков Юрий Степанович** – канд. техн. наук, начальник отделения,  
**Тихонов Евгений Александрович** – начальник отдела, **Захаров Николай Дмитриевич** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,  
**Егоров Павел Михайлович** – начальник сектора  
**НИЦ ЦИАМ** – филиал ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».  
 Контактный телефон (495) 552-97-01.  
 E-mail: egorov@rtc.ciam.ru

На основе экспериментальных данных проведен расчет констант – коэффициентов, входящих в формулы аппроксимации расходных характеристик РО. Полученные результаты подтверждают правильность выбора аналитического выражения для аппроксимирующей формулы. Проведена экспериментальная отработка данных алгоритмов в АСУТП стенда Ц-17 Т.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТП ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ СТЕНДА Ц-5/2 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ

**Ю.С. Марков, Е.А. Тихонов, Н.Д. Захаров, П.М. Егоров (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)**

Рассмотрены вопросы управления технологическими параметрами топливной системы испытательного стенда. Для реализации двухканальных регуляторов, работающих по замкнутому (с использованием обратной связи) и разомкнутому циклам используются алгоритмы, основанные на экспериментально полученных расходных характеристиках регулирующих органов. Для повышения точности в замкнутом контуре регулирования в качестве обратной связи используется замер давления топлива перед испытываемой камерой сгорания.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления технологическими параметрами, система автоматического регулирования, двухканальный регулятор, замкнутая обратная связь, расходная характеристика.

Во ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» создан стенд Ц-5/2, предназначенный для проведения научно-исследовательских и доводочных испытаний полноразмерных камер сгорания авиационных двигателей и ГТУ в земных и полетных (высотных) условиях.

Виды испытаний камер сгорания: определение пусковых характеристик; определение срывных характеристик; определение теплового состояния элементов камеры сгорания; определение характеристик по составу смеси; определение неравномерности полей температуры и давления газа на выходе из камеры; определение характеристик дымления и эмиссионных характеристик; определение характеристик виброгорения; определение гидравлических характеристик.

Основными параметрами рабочего режима камеры сгорания являются:

- расход воздуха через камеру сгорания;
- давление и температура воздуха на входе в камеру сгорания;

— расходы топлива по трем (по двум или одному) коллекторам.

Требования к качеству систем автоматического регулирования (САР) взаимосвязанных входных параметров топливной системы стенда Ц-5/2 по быстродействию, монотонности и точности формулируются исходя из свойств испытываемого изделия. При реализации этих требований в создаваемых САР возникают трудности, обусловленные наличием в объекте регулирования больших запаздываний, возникающих при прохождении сигналов — инерционных, емкостных, транспортных. Во многих случаях эти трудности могут быть преодолены с помощью двухканальных законов регулирования, один из каналов работает по разомкнутому циклу, другой — по замкнутому (с использованием обратной связи). В разомкнутом цикле используется расходная характеристика регулирующего органа. Расход потока топлива через регулирующий орган зависит от ряда измеряемых