

Ли Вэй, С.В. Зинченко, В.П. Зинченко, И.П. Муха, Э.Э. Кулиев

**Алгоритм управления потоком в аэродинамической трубе**

Предложен алгоритм программного управления потоком в дозвуковой аэродинамической трубе в режиме реального времени на основе математической модели. Прикладное программное обеспечение имеет два уровня, взаимодействующих через общий блок памяти двух компьютеров.

An algorithm of the software flow control subsonic wind tunnel in real time on the basis of the mathematical model is suggested. The application software has two levels integrating via a shared memory block between two computers.

Запропоновано алгоритм програмного керування потоком у дозвуковій аеродинамічній трубі в режимі реального часу на основі математичної моделі. Прикладне програмне забезпечення має два рівні, які взаємодіють через загальний блок пам'яті двох комп'ютерів.

**Введение.** Актуальной проблемой обеспечения соответствия условий экспериментальных исследований в аэродинамической трубе (АДТ) натурным условиям есть поддержка параметров потока в режиме реального времени (РВ) [1, 2], где необходимо обеспечить: требуемый скоростной напор ( $Q_\infty$ ) и скорость ( $V_\infty$ ) с заданной точностью; их изменение как функций времени; закон перехода от текущих значений к заданным [3, 4].

Предложен алгоритм программного управления потоком в режиме РВ на основе математической модели, в которой АДТ заменяется «эквивалентной» трубой круглого сечения с реальным коэффициентом гидродинамического сопротивления в предположении, что поток происходит в горизонтальной плоскости, несжимаем, изотермический, без учета объемных сил. Обмен данными между параллельно выполняемыми модулями прикладного программного обеспечения (ПО) реализован через общую область памяти двух компьютеров. Один компьютер осуществляет регулирование, а другой – управляет экспериментом, что обеспечивает соответствие экспериментальных и натурных условий, требуемую точность и информативность.

**Постановка задачи**

В дозвуковой АДТ энергетическая установка (компрессор, вентилятор, т.п.) создает поток воздуха ( $0,1 \leq M_\infty \leq 0,4$ ), в который помещается модель объекта и выполняются экспериментальные исследования [3, 5].

Математическая модель движения воздуха в АДТ должна учитывать состояние потока (турбулентный/ламинарный), геометрию и качество поверхности элементов АДТ, а также динамику энергетической установки.

Требуется разработать алгоритм для поддержки (управления потоком): заданного скоростного напора ( $Q_\infty$ ) и скорости ( $V_\infty$ ) с точностью не более 0,15 процента; их изменения как функций времени; закона перехода от текущих значений к заданным.

**Математическая модель**

В [3] показано, что турбулентное движение ( $10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^7$ ,  $Re_{кр} \approx 2300$ ) вязкого несжимаемого газа в АДТ ( $\rho = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ ,  $F \neq 0$ ) описывается уравнением Стокса [3, 6]:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \cdot \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \gamma \nabla^2 \bar{V} \quad (1)$$

и уравнением неразрывности:

$$\text{div } \bar{V} = 0. \quad (2)$$

Единственность решения обеспечивается заданием граничных и начальных условий:

$$V_{|s} = 0. \quad (3)$$

$$V_{|t=0} = \Phi(x, y, z, t = 0). \quad (4)$$

Перепад давления  $\Delta p$ , создаваемый энергетической установкой, расходуется на преодоление гидравлического сопротивления, обусловленного силами сопротивления и трения. Необходимое значение  $\Delta p$  для заданного  $Q_\infty$  и  $V_\infty$  определяется из решения задачи стационарного движения газа, где уравнение (1) используется в виде:

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \gamma \nabla^2 \vec{V}, \quad (5)$$

для которого (3) остается без изменений, а (4) уничтожается.

Общий закон сопротивления для АДТ имеет такой вид [6]

$$\begin{aligned} \Delta p = |\text{grad } p| &= \xi_{\infty} \frac{\rho}{2} |\vec{V}_{\infty}|^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ \xi_{ii} \left( \frac{F_{\infty}}{F_i} \right)^2 + \xi_{mi} \left( \frac{F_{\infty}}{F_i} \right)^2 \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\xi_{\infty}$ ,  $\xi_{ii}$ ,  $\xi_{mi}$  – коэффициенты гидравлического сопротивления АДТ, сопротивления трения и местного сопротивления элементов АДТ соответственно;  $F_{\infty}$ ,  $F_i$  – площадь рабочей части и характерных сечений;  $n$  – количество элементов АДТ;  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Метод и алгоритм определения коэффициентов сопротивления трения и местных сил приведен в [3]. Сопротивление модели объекта, энергетической установки и т.п. измеряется и определяется в режиме РВ экспериментальных исследований так [3, 5]:

$$\xi_m = c_x \frac{S_m}{F_{\infty}} \left( 1 - \frac{S_m}{F_{\infty}} \right)^{-3}, \quad (7)$$

где  $c_x = f(\alpha, \beta, \text{Re}, \dots)$  – измеряемый в РВ коэффициент сопротивления модели объекта;  $S_m$ ,  $F_{\infty}$  – площади миделевого и нормального сечений модели и рабочей части АДТ соответственно.

Вычисляется  $\xi_{\infty}$  (6) из трансцендентных уравнений [3] методом *Brent-Dekker* [7], который обеспечивает асимптотическую сходимость решения в режиме РВ.

Уравнение (1) нестационарного осесимметричного движения газа [3, 6] в цилиндрической системе координат используется в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} - \gamma \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) = f(t), & a) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = f(t), & б) \end{cases} \quad (8)$$

с граничным  $w|_s = 0$  и начальным условием

$$w|_{t=0} = \varphi(r)|_{t=0} = w(r, t=0) = \frac{a^2 \Delta p}{\mu L} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad [3, 4],$$

где  $f(t) = \frac{\Delta p}{\rho L} \psi(t)$ ,  $\psi(t)$  – функция динамики

энергетической установки;  $\Delta p/L$  – перепад давления на длине  $L$ ;  $0 \leq t \leq T$ ;  $0 \leq r \leq a$ .

Решение (8) получено методом разделения переменных в виде [3, 4, 8]:

$$w(r, t) = \Theta(r, t) + \Omega(r, t),$$

где  $\Theta(r, t)$  – вынужденное движение от изменения градиента давления при условии отсутствия начального движения;  $\Omega(r, t)$  – изменение движения, вызванное начальным состоянием.

Значение скорости определяется так [3]:

$$\begin{aligned} w(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \left[ 1 - \frac{I_0 \left( r \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)}{I_0 \left( a \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)} \right] \sin \frac{\pi n}{T} t + \\ + a_n J_0 \left( \frac{\mu_n r}{a} \right) e^{-\gamma \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2 t}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $B_n = \left( \frac{\pi n}{T} \right) \cos \frac{\pi n}{T} t$ ,  $A_n = \frac{2}{T} \int f(\zeta) \sin \frac{\pi n}{T} \zeta d\zeta$ ,

$J_0(\mu_n) = 0$ ,  $n = 1, 2, \dots, \infty$ ,  $a_n = \frac{2}{a^2 J_1^2(\mu_n)} \int_0^a w(r, t=0) \times \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) r J_0 \left( \frac{\mu_n r}{a} \right) dr = w(r, t=0) \left\{ \frac{2(1-a^2)}{\mu_n J_1(\mu_n)} + \frac{4J_2(\mu_n)}{\mu_n^2 J_1(\mu_n)} \right\}$ .

Выражение для определения расхода  $Q(t)$  имеет вид:

$$\begin{aligned} Q(t) = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{A_n}{B_n} \left[ \frac{a^2}{2} - a \sqrt{\frac{\gamma}{B_n}} \frac{I_1 \left( a \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)}{I_0 \left( a \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)} \right] \sin \frac{\pi n}{T} t + \right. \\ \left. + a_n e^{-\gamma \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2 t} \frac{a^2}{\mu_n} J_1(\mu_n) \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

При решении прикладных задач (1) граничные  $\bar{w}(\bar{r} = 1, \bar{t}) = 0$  и начальные условия

$\bar{w}(\bar{r}, \bar{t} = 0) = \varepsilon(1 - \bar{r})$  для эквивалентной АДТ используются в виде:

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{t}} - \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{t}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{r}} \right) = 4(1 - \varepsilon) f\left(\frac{a^2}{\gamma} \bar{t}\right), \varepsilon = \left( \frac{\xi_{\infty k}}{\xi_{\infty n}} \right) \left( \frac{\bar{w}_{\infty k}}{\bar{w}_{\infty n}} \right)^2,$$

где:  $\xi_{\infty n}, \xi_{\infty k}, w_{\infty n}, w_{\infty k}$  – коэффициенты соотношений гидродинамического сопротивления и скорости в начале и в конце управления;  $f(a^2/\gamma)$  – динамика энергетической установки.

В предположении о возможном разложении  $f(a^2/\gamma)$  в ряд Фурье на  $[0, T]$  ( $T$  – время наблюдения) скорость и объемный расход определяются по таким формулам:

$$\bar{w}(\bar{r}, \bar{t}) = 8\varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n \bar{r})}{\lambda_n^3 J_1(\lambda_n)} e^{\lambda_n^2 \bar{t}} + 4(1 - \varepsilon) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \left[ 1 - \frac{I_0(\bar{r} \sqrt{B_n})}{(\sqrt{B_n})} \right] \sin\left(\frac{\pi n}{T} \bar{t}\right), \quad (11)$$

$$\bar{Q}(\bar{t}) = 32\varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{\lambda_n^2 \bar{t}}}{\lambda_n^4} + 8(1 - \varepsilon) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{B_n}} \frac{I_1(\sqrt{B_n})}{I_0(\sqrt{B_n})} \right] \sin\left(\frac{\pi n}{T} \bar{t}\right), \quad (12)$$

где

$$B_n = \left( \frac{T}{\pi n} \right) \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi n}{T} \bar{t} \right); \quad J_0(\lambda_n) = 0, \\ n = 1, 2, \dots, \infty; \quad A_n = \frac{2}{T} \int_0^{\bar{t}} f(\theta) \sin\left(\frac{\pi n}{T} \theta\right) d\theta.$$

Практические случаи рассмотрены в [3, 9, 10].

### Алгоритм управления

Предложена система управления потоком дозвуковой АДТ, структурная схема которой показана на рис. 1 [11], где:  $K_1, K_2$  – базовый и управляющий компьютеры соответственно; УСО – устройство связи с объектом (для сопряжения  $K_1$  и  $K_2$  с агрегатами АДТ); БУ – блок управления тиристорным электроприводом (ТП), ЭП – энергетическая установка, ТГ –

тахогенератор, ДД – датчик давления; ДС – датчик сопротивления модели объекта.

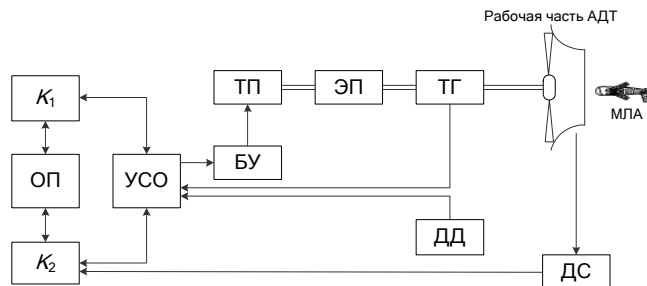


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Собственно  $K_2$  совместно с УСО обеспечивает управление потоком. Взаимодействие  $K_1$  и  $K_2$  осуществляется через общую область памяти, что позволяет параллельно выполнять прикладное ПО на  $K_1$  и  $K_2$ , работающих под управлением операционных систем РВ (ОС РВ). Внутренняя обратная связь системы управления регулирует параметры энергетической установки (например, обороты), а внешняя – по значению  $Q_{\infty}(t)$ .

Функциональная схема системы управления потоком показана на рис. 2, где  $K_1$  работает в режиме РВ эксперимента. В момент необходимого регулирования  $Q_{\infty}(t)$ ,  $K_1$  формирует задание для  $K_2$  на выполнение одной из таких задач: поддержка требуемого  $Q_{\infty}$  и  $V_{\infty}$  с заданной точностью; их изменения как функций времени; закона перехода от текущих значений к заданным. По-другому,  $K_2$  осуществляет грубое (выход в заданную область) и точное (поддержка значений параметров) регулирование, а  $K_1$  – управляет экспериментом.

Алгоритм управления потоком соответствует следующей процедуре.

Шаг 1. Выбрать опыт из плана эксперимента и поместить параметры в общую область памяти  $K_2$  и  $K_1$ .

Шаг 2. Задать  $V_{\infty}$  и интервал наблюдения  $[0, T]$  (длительность опыта).

Шаг 3. Определить  $\Delta p$  (алгоритм приведен ниже) [3].

Шаг 4. Вычислить и записать значения  $w(r, t)$  (9),  $Q(t)$  (10) на  $t \subseteq [0, T]$  в общую область памяти.

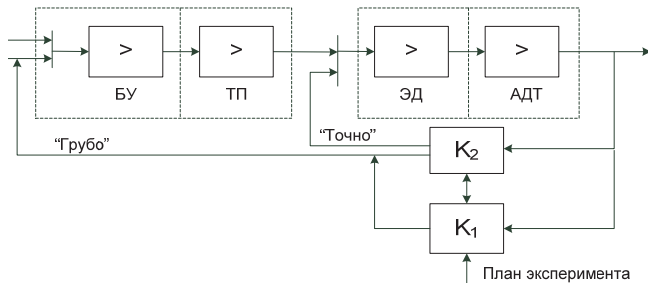


Рис. 2. Функциональная схема системы управления

Шаг 5. Параллельно выполнить:

а) регулирование потока  $K_2$ :

Шаг 5а\_1. Ожидание: если выполнять опыт, то перейти на Шаг 5а\_2; иначе на Шаг 7.

Шаг 5а\_2. Прочитать параметры и выбрать стратегию управления.

Шаг 5а\_3. Решить задачу регулирования.

Шаг 5а\_4. Задать режим управления и поддерживать параметры потока в допустимых пределах (измерять и передавать параметры в общую область памяти) на  $t \in [0, T]$ .

Шаг 5а\_5. Передать данные опыта в общую область памяти, перейти на Шаг 5а\_1.

б) управление экспериментом  $K_1$ :

Шаг 5б\_1. Ожидать выполнения условий опыта на  $t \in 2x[0, T]$ . Если они выполнены, то перейти на Шаг 5б\_2, иначе перейти на Шаг 5.

Шаг 5б\_2. Считать с общей области памяти данные опыта, их обработать, визуализировать и записать.

Шаг 6. Если план эксперимента выполнен, то перейти на Шаг 7, иначе на Шаг 1.

Шаг 7. Конец.

Решение стационарной задачи (определение  $\Delta p$ ) отвечает такой процедуре [3].

Шаг 1. Задать скорость  $V_\infty$  и извлечь из БД параметры элементов АДТ.

Шаг 2. Вычислить: площади ( $F_i$ ), периметры ( $P_i$ ); гидравлические радиусы ( $r_{0i}$ ) и шероховатости ( $k_i$ ).

Шаг 3. Вычислить  $V_i$  и  $Re_i$  в сечениях АДТ.

Шаг 4. Вычислить коэффициенты трения  $\lambda_i = f(k_i, Re_i)$  и  $\xi_{ii}$  с учетом поворота, расширения/сужения и нелинейности потока.

Шаг 5. Вычислить местный коэффициент сопротивления  $\xi_{mi}$ .

Шаг 6. Определить общий коэффициент сопротивления элементов АДТ  $\xi_i$  с учетом дополнительных местных потерь.

Шаг 7. Определить  $\xi_\infty$  (7).

Шаг 8. Конец.

Прикладное ПО управления потоком дозвуковой АДТ предложено реализовать на двух уровнях:

- формирование задания на управление;
- выполнение управления.

Взаимодействие между модулями прикладного ПО осуществляется через общую область памяти, как показано на рис. 3. Собственно алгоритм программного управления потоком – это участок а) алгоритма. Отметим, что данный алгоритм оптимален по быстродействию, точности обработки и поддержке параметров.

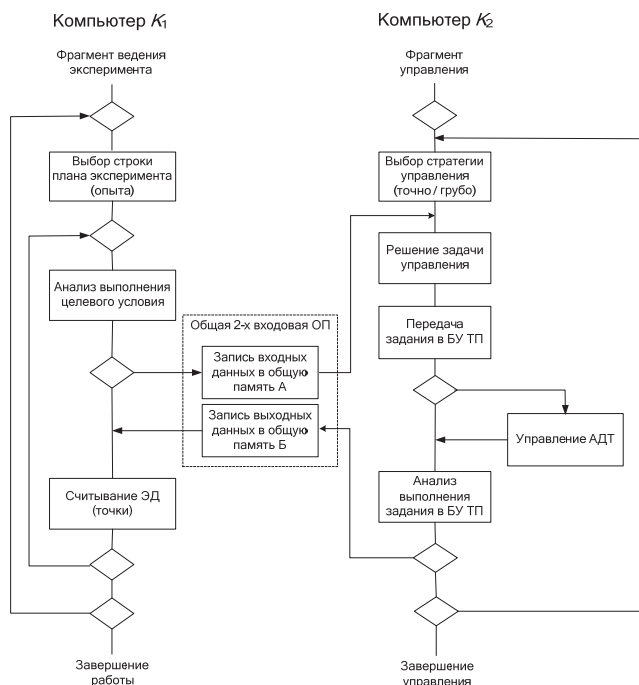


Рис.3. Алгоритм программного управления потоком

Реализация алгоритма возможна при использовании соответствующего аппаратного и программного обеспечения [12, 13]. В частности, предложено использовать ОС *PB QNX, Linux* на первом и *WCE* на втором уровнях системы. Загрузка ОС *PB* в  $K_2$  осуществляется с  $K_1$  совместно с прикладным ПО.

**Заключение.** В статье предложен алгоритм программного управления потоком в рабочей

части АДТ, обеспечивающий заданный режим поддержания  $Q(t)$  с заданной точностью.

Алгоритм основывается на математической модели, предполагающей, что АДТ заменяется эквивалентной трубой круглого сечения с радиусом, равным гидравлическому радиусу рабочей части АДТ, и реальным коэффициентом гидродинамического сопротивления в предположении, что поток несжимаем, изотермичен и происходит в горизонтальной плоскости.

Соответствующее прикладное ПО предложено реализовать на двух уровнях, взаимодействие между которыми реализовано через общую область памяти двух компьютеров. При этом управляющий компьютер осуществляет оптимальное регулирование, а базовый – участвует в контуре оптимального управления экспериментом.

В дальнейшем будут исследованы средства и методы обеспечения эксперимента в РВ.

1. Зинченко В.П. Автоматизация экспериментальных исследований в аэродинамической трубе // УСиМ. – 1989. – № 1. – С. 95–99.
2. Зинченко В.П. Інформаційна технологія проектних досліджень складних технічних об'єктів // Наукові вісті НТУУ «КПШ». – 2000. – № 4. – С. 32–42.
3. Зинченко В.П., Египко В.М. Метод моделирования динамических процессов в аэродинамических трубах малых дозвуковых скоростей. – К., 1996. – 19 с. (Преп. / НАН Украины Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 96–13).
4. Моделирование переходных процессов в аэродинамической трубе / В.П. Зинченко, С.В. Зинченко,

Ф.Н. Горин и др. // Технології розподілених обчислень в імітаційному моделюванні. – К.: Ін-т кибернетики ім. В.М. Глушкова, 2001. – С. 92–98.

5. Горлин С.М., Слезингер Н.М. Аэромеханические измерения. – М.: Наука, 1964. – 720 с.
6. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
7. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
9. Zhao Changyu, Li Guangli. The design of low speed cascade wind tunnel// J. of Shenyang institute of aeronautical engineering. – 2009. – N4. – P. 15–17.
10. Li Guowen, Li Changren, Li Guangli. Speed and angle control design of HIT wind tunnel test system // Ibid. – 2010. – N 2. – P. 4–8.
11. Зинченко В.П. Исследование и реализация алгоритма адаптивного управления экспериментом // Проблемы управления и информатики. – 2001. – № 3. – С. 58–69.
12. Зинченко В.П., Зинченко С.В. Алгоритмы и базовые программные модули для управления технологическими модулями Prometheus // УСиМ. – 2007. – № 5. – С. 52–60.
13. Зинченко С.В. Исследование характеристик знаниеориентированных интеллектуальных систем мягкого реального времени // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2012. – № 11. – С. 13–22.

Поступила 15.03.2014  
Тел. для справок: +38 063 359-3039 (Шэньян (Китай), Киев)  
E-mail: zinchenkosv@gmail.com, zinchenko.vp@gmail.com,  
elviskuliev@gmail.com

© Ли Вэй, С.В. Зинченко, В.П. Зинченко, И.П. Муха,  
Э.Э. Кулиев, 2014

**Внимание !**

**Оформление подписки для желающих  
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.  
В розничную продажу журнал не поступает.  
Подписной индекс 71008**