

УДК 533.6.07:62-52

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ Т-106 ЦАГИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ЧИСЛУ МАХА

К.Д. БУХАРОВ, В.В. ПЕТРОНЕВИЧ, П.В. САВИН

Статья представлена доктором технических наук Миргазовым М.Н.

В работе предложен метод построения математической модели трансзвуковой компрессорной аэродинамической трубы (АДТ) Т-106 ЦАГИ как объекта управления по числу Маха. Математическая модель отыскивается в виде семейства линейных передаточных функций с запаздыванием с постоянными коэффициентами. Проведены экспериментальные исследования динамических свойств АДТ Т-106 как объекта управления по числу Маха по управляющему воздействию в дозвуковом диапазоне чисел Маха. По экспериментальным данным идентифицированы коэффициенты математической модели АДТ Т-106.

Ключевые слова: математическая модель, число Маха, аэродинамическая труба.

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых образцов авиационной и ракетно-космической техники требует проведения большого объема экспериментальных исследований в аэродинамических трубах (АДТ). Важной задачей при этом является повышение экономичности и точности эксперимента путем оптимизации управляющих и измерительных систем. В частности, оптимизация управления и поддержание с высокой точностью числа Маха (скорости потока) в рабочей части АДТ на заданном уровне является одним из важнейших условий проведения испытаний моделей летательных аппаратов (ЛА) в АДТ.

Аэродинамическая труба как объект управления по числу Маха является нелинейной динамической системой с переменными параметрами. Это предъявляет повышенные требования к функциональным возможностям систем автоматического управления и регулирования АДТ, которые должны обеспечивать требуемую точность и качество управления.

Основой для создания и оптимизации алгоритмов управления числом Маха, обеспечивающих требуемое качество управления, является адекватное математическое описание динамических свойств АДТ как объекта управления. В связи с этим актуальной является задача разработки и идентификации математических моделей АДТ.

Данная работа посвящена определению вида и идентификации параметров математической модели АДТ Т-106 ЦАГИ как объекта управления по числу M по управляющему воздействию в дозвуковом диапазоне.

АДТ Т-106 является высокопроизводительной аэродинамической трубой замкнутого типа, непрерывного действия, переменной плотности и предназначена для исследования аэродинамических характеристик моделей ЛА и их элементов на дозвуковых и трансзвуковых скоростях. Поток в трубе создается компрессором с электроприводом мощностью 32 МВт. Высокая мощность электропривода АДТ Т-106 в сочетании с большим объемом исследований (от 10 до 100 трубочасов и более для одной программы испытаний) наряду с высокой загрузкой АДТ Т-106 приводит к большим затратам электроэнергии и, соответственно, к большим материальным затратам на экспериментальные исследования. Поэтому весьма актуальной является задача повышения экономичности эксперимента в АДТ Т-106 наряду с повышением его информативности и точности. Схема АДТ Т-106 и основные технические характеристики приведены на рис. 1 и табл. 1, соответственно.

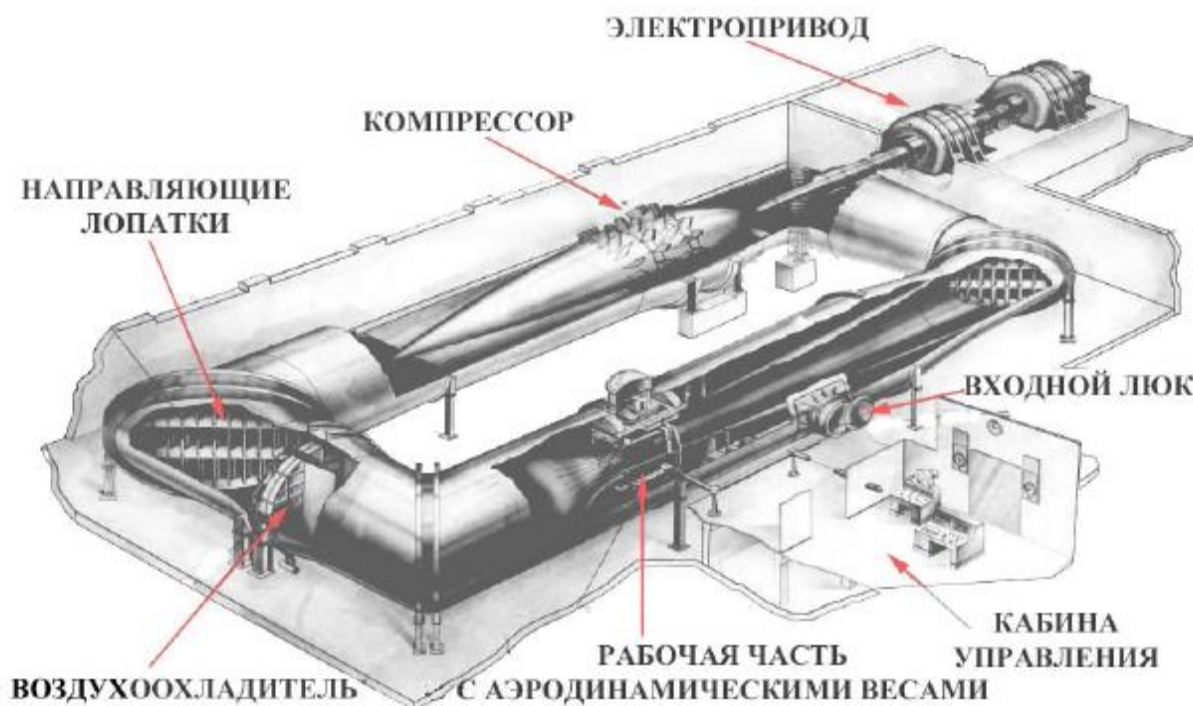


Рис. 1. Схема АДТ Т-106

Таблица 1

Основные технические характеристики АДТ Т-106

Наименование параметра	Значение
Число M потока	от 0,15 до 1,1
Число Рейнольдса на 1 м, не более	$35 \cdot 10^6$
Скоростной напор, кПа, не более	58
Диапазон углов атаки на электромеханических весах	от -10° до $+40^\circ$
Размеры рабочей части: диаметр сечения, м длина рабочей части, м	2,48 4,85

Математическое описание динамических характеристик трансзвуковой компрессорной АДТ представляет собой сложную задачу. В работе [1] получена математическая модель переходных процессов в компрессорных трубах, но она представляет собой сложную нелинейную систему дифференциальных уравнений, малоприспособленную для анализа и синтеза алгоритмов системы управления. В работе [2] применительно к АДТ Т-128 предложен подход к построению математической модели компрессорной АДТ в виде набора линейных одномерных моделей с постоянными коэффициентами, значения которых идентифицируются по экспериментальным данным. Такой подход позволяет, с одной стороны, с удовлетворительной для задач управления точностью описать динамические свойства объекта управления, с другой, – применить хорошо разработанные методы синтеза линейных систем управления.

В данной работе рассмотрена задача идентификации математической модели АДТ Т-106 как объекта управления по числу Маха по управляющему воздействию в виде семейства линейных передаточных функций с запаздыванием с постоянными коэффициентами, значения которых определяются по экспериментальным данным.

Входным управляющим воздействием является скорость вращения ротора компрессора $\omega(t)$.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ Т-106 КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ЧИСЛУ МАХА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Поскольку испытания моделей летательных аппаратов в АДТ Т-106 проводятся, как правило, в окрестности установившихся значений чисел Маха с шагом $0,05 \div 0,1$, представляется возможным описать динамику АДТ набором линейных передаточных функций с постоянными коэффициентами вида:

$$W_{\text{АДТ}}(s) = \frac{\Delta M(s)}{\Delta \omega(s)} = \frac{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_m s^m}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n} \exp(-T_d \cdot s). \quad (1)$$

Для идентификации параметров модели были проведены серии экспериментальных исследований в диапазоне чисел Маха от 0,2 до 1. В ходе проведения экспериментов по идентификации шаг по оборотам компрессора составлял 25 об/мин., что примерно соответствовало шагу по числу Маха 0,05. Программа испытаний включала в себя эксперименты с открытой и закрытой задвижкой обратного канала АДТ.

Как показал анализ экспериментальных данных, передаточная функция аэродинамического контура $W_{\text{АДТ}}(s)$ в окрестности заданного числа Маха $M_{\text{ст}}$ в рабочем диапазоне чисел M удовлетворительной для задач управления точностью (порядка 0,002 числа M) аппроксимируется звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{\text{АДТ}}(s) = \frac{\Delta M(s)}{\Delta \omega(s)} = \frac{K_{\text{tr}}}{1 + T_p(M_{\text{ст}}) \cdot s} \exp(-T_d \cdot s). \quad (2)$$

Входом для передаточной функции является изменение значения числа оборотов компрессора $\Delta \omega(t)$, выходом – изменение числа Маха $\Delta M(t)$. Число Маха определялось по измерениям полного давления P_0 в форкамере и статического давления $P_{\text{ст}}$ в рабочей части АДТ. K_{tr} – коэффициент передачи по управляющему воздействию, $T_p(M_{\text{ст}})$ – постоянная времени АДТ по управляющему воздействию. Параметр запаздывания T_d обусловлен конечной скоростью распространения управляющих воздействий от компрессора к рабочей части и определяется, исходя из геометрии аэродинамического контура АДТ Т-106.

После перехода к дискретному виду передаточной функции (2) методом наименьших квадратов для каждого переходного процесса найдены коэффициенты формулы (2) [3].

На рис. 2 приведены переходные процессы для различных начальных чисел $M_{\text{ст}}$, полученные в эксперименте, и соответствующие им аппроксимации с помощью передаточной функции (2) с идентифицированными по экспериментальным данным коэффициентами, иллюстрирующие хорошее соответствие полученной математической модели реальным данным.

На рис. 3 и 4 и в табл. 2 приведены коэффициенты передаточной функции (2) K_{tr} , $T_p(M_{\text{ст}})$, T_d в диапазоне чисел $M_{\text{ст}}$ от 0,2 до 1,0, полученные в результате идентификации их значений по экспериментальным данным. Из представленных данных видно, что коэффициент передачи по управляющему воздействию K_{tr} имеет нелинейность порядка 10 %, постоянная времени АДТ по управляющему воздействию $T_p(M_{\text{ст}})$ имеет параболический вид как функция числа $M_{\text{ст}}$, параметр запаздывания T_d имеет величину порядка 0,3 с.

Полученные данные описывают с удовлетворительной точностью динамические свойства АДТ Т-106 как объекта управления по числу Маха во всем диапазоне чисел Маха АДТ Т-106. Среднее квадратическое отклонение (СКО) аппроксимации реальных переходных процессов полученной математической моделью составляет порядка 0,002.

Полученные результаты являются основой для синтеза и оптимизации алгоритмов и программного обеспечения системы управления числом Маха АДТ Т-106.

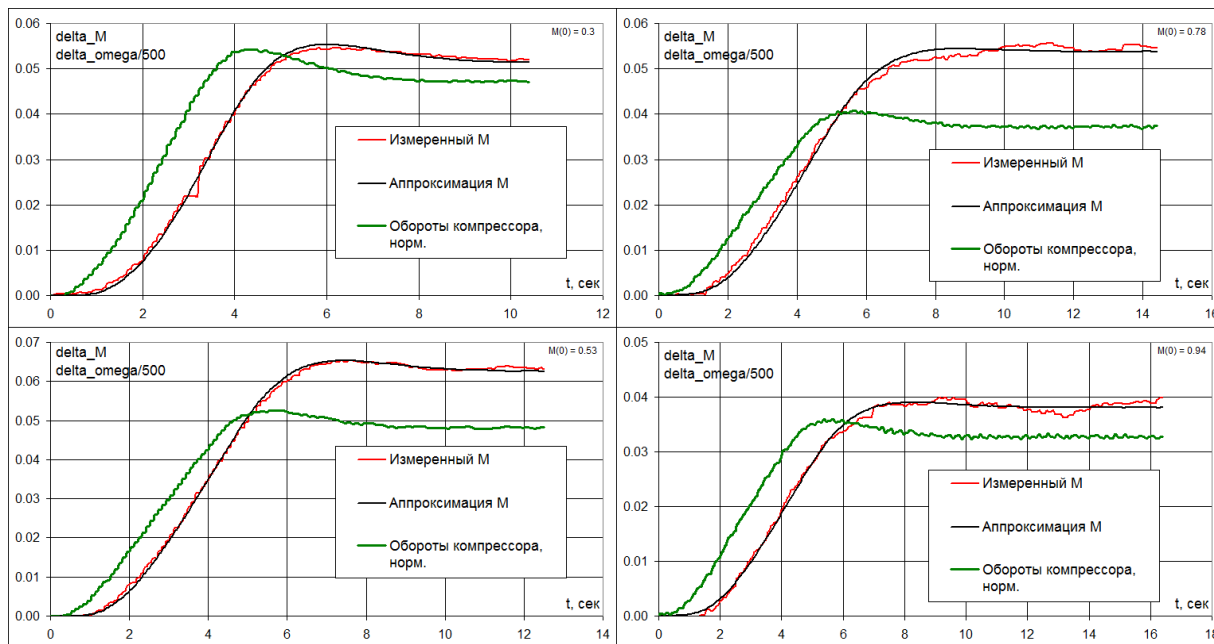


Рис. 2. Аппроксимация переходных процессов для различных чисел $M_{ст}$

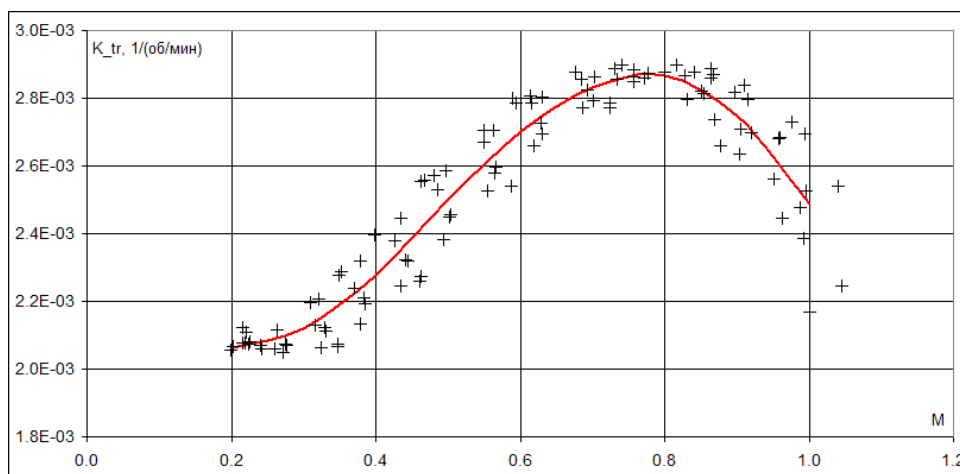


Рис. 3. Зависимость коэффициента передаточной функции $W_{АДТ}(s)$ K_{tr} от числа Маха

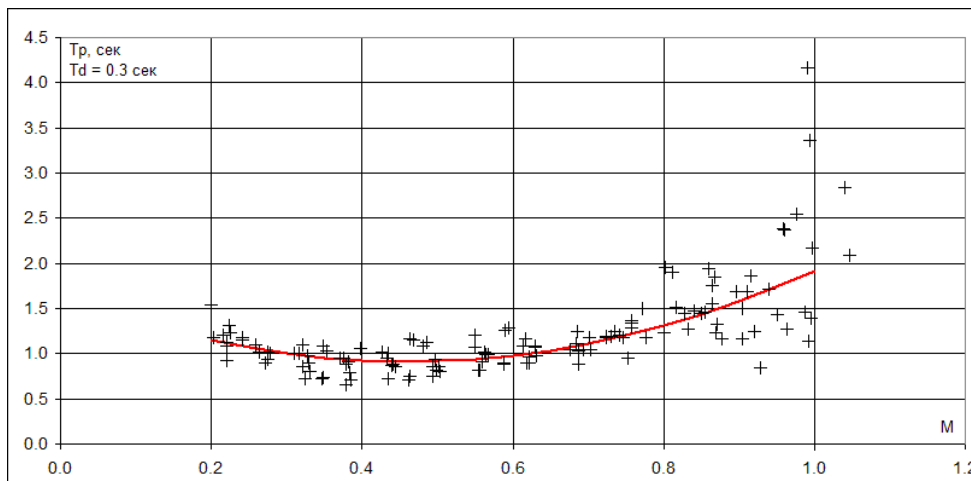


Рис. 4. Зависимость постоянной времени передаточной функции $W_{АДТ}(s)$ T_p от числа Маха

Таблица 2

Результаты идентификации параметров передаточной функции $W_{\text{АДТ}}(s)$

№ режима	$M_{\text{ст}}$	$K_{\text{тр}}$, 1/(об/мин)	T_p , с	T_d , с	СКО
1	0,2	0,00206	1,15	0,3	0,0011
2	0,3	0,00211	1,00	0,3	0,0014
3	0,4	0,00227	0,93	0,3	0,0020
4	0,5	0,00250	0,92	0,3	0,0020
5	0,6	0,00270	0,98	0,3	0,0016
6	0,7	0,00283	1,11	0,3	0,0012
7	0,8	0,00286	1,31	0,3	0,0016
8	0,9	0,00274	1,58	0,3	0,0026
9	1,0	0,00248	1,92	0,3	0,0044

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получена математическая модель АДТ Т-106 в виде семейства линейных передаточных функций первого порядка с постоянными коэффициентами, значения которых идентифицированы по экспериментальным данным. Математическая модель хорошо описывает динамические свойства АДТ Т-106 как объекта управления по числу Маха по управляющему воздействию – скорости вращения ротора компрессора в рабочем диапазоне чисел Маха.

Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных подтверждает адекватность полученного математического описания АДТ Т-106 как объекта управления, которое может быть положено в основу для синтеза и оптимизации алгоритмов управления числом Маха АДТ Т-106.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебсак В.А., Лыжин О.В. Математическая модель переходных процессов в компрессорных трубах // Ученые записки ЦАГИ. 1985. Том XVI. № 2. С. 33 – 39.
2. Кудрин Н.А., Петров В.В. Идентификация математической модели компрессорной аэродинамической трубы как объекта управления // Ученые записки ЦАГИ. 1993. Том XXIV. № 2. С. 100 – 106.
3. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. – М.: Наука, 1995. – 336 с.

MATHEMATICAL MODEL OF THE TSAGI'S TRANSONIC WIND TUNNEL T-106 AS A MACH NUMBER CONTROL OBJECT

Bukharov K.D., Petronevich V.V., Savin P.V.

In this paper we propose a method of constructing a mathematical model of the TsAGI's compressor transonic wind tunnel T-106 as a Mach number control object. The mathematical model is sought in the form of a family of linear transfer functions with constant coefficients and delay. Experimental investigation of dynamic properties of the wind tunnel T-106 as an object of Mach number control in the subsonic range is provided. The coefficients of the mathematical model of the wind tunnel T-106 is identified on basis the experimental data.

Key words: mathematical model, Mach number, wind tunnel.

REFERENCES

1. Lebsak V.A., Lyzhin O.V. Matematicheskaya model perehodnyh processov v kompressornyh trybah. [A mathematical model of transient processes in compressor wind tunnels.

САИ Scientific Notes] Moscow. Uchenye zapiski TsAGI. 1985. v. XIV № 2. PP. 33-39. (In Russian).

2. Kudrin N.A., Petronevich V.V. Identifikaciya matematicheskoy modeli kompressornoy aerodinamicheskoy trubki kak ob'ekta upravleniya [Identification of a mathematical model of a compressor wind tunnel as a control object. САИ Scientific Notes] Moscow. Uchenye zapiski TsAGI. 1993. v. XXIV № 2. PP. 100-106. (In Russian).

3. Csykin Ya.Z. Informacionnaya teoriya identifikatsii [Information theory of identification] Moscow. Nauka. 1995. 336 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бухаров Кирилл Дмитриевич, 1990 г.р., окончил МФТИ (2012), аспирант кафедры аэрофизического и летного эксперимента ФАЛТ МФТИ, младший научный сотрудник ЦАГИ, автор 5 научных работ, область научных интересов – измерительные и управляющие системы для автоматизации аэродинамического эксперимента, электронный адрес: mera@tsagi.ru.

Петроневи́ч Василий Васильевич, 1952 г.р., окончил МИФИ (1975), кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отделения измерительной техники и метрологии ЦАГИ, заведующий базовой кафедры аэрофизического и летного эксперимента ФАЛТ МФТИ, автор более 40 научных работ, область научных интересов – системы комплексной автоматизации аэродинамического эксперимента, электронный адрес: petronevich@tsagi.ru.

Савин Петр Владимирович, 1982 г.р., окончил МАИ (2005), начальник экспериментальной лаборатории ЦАГИ, автор 2 научных работ, область научных интересов – экспериментальные исследования характеристик летательных аппаратов в аэродинамических трубах, электронный адрес: mera@tsagi.ru.