

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА НЕОДНОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

© 2012 А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров, А. В. Устинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Разработаны математическая модель и методика расчёта неоднородных газовых измерительных цепей, представлены алгоритм и программа расчёта их частотных характеристик. Представлены амплитудно-частотные характеристики акустических зондов с неоднородным подводным волноводом и корректирующим элементом в виде длинной согласованной линии. Показано, что при выбранных параметрах корректирующего элемента динамическая погрешность зонда не превышает $\pm 15\%$.

Газовая измерительная цепь, неоднородный волновод, динамическая погрешность, акустический зонд, корректирующий элемент, амплитудно-частотная характеристика, эффективность коррекции частотных характеристик.

При доводке и эксплуатации газотурбинных двигателей чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о стационарных и динамических процессах. Одним из основных параметров, несущих наиболее полную информацию о рабочих процессах в двигателях, является давление, на долю которого по данным ЦИАМ приходится 25...30 % от всей получаемой информации. Для получения достоверной информации о пульсационном состоянии узлов энергетических установок необходимо, чтобы динамическая погрешность измерения пульсаций давления не превышала $\pm 10\%$ в частотном диапазоне 5...5000 Гц.

Пульсации давления в воздухозаборнике могут стать причиной снижения запаса газодинамической устойчивости компрессора, спровоцировать вибрационное горение в камере сгорания, а также вызвать интенсивные вибрации элементов двигателя.

Другая задача связана с использованием альтернативных источников энергии (например, природный сжиженный газ) в авиации и для двигателей наземного применения, при которых возможно появление вибрационного горения топлива в камере сгорания. Вибрационное горение является чрезвычайно опасным режимом работы, поскольку энергия колебаний потока может стать настолько высокой, что вызовет появление возбуждающих сил, способных привести к разрушению элементов двигателя. Устойчи-

вость горения не может быть обеспечена без измерения пульсаций давления.

Измерение пульсаций давления в двигателе невозможно осуществить с помощью микрофонов, так как их динамический диапазон ограничен величиной 140...145 дБ. В трактах газотурбинных установок регистрируются уровни пульсаций давления, достигающие 200 дБ и более. Поэтому при их испытаниях и доводке требуется применение датчиков быстропеременных давлений с более высоким динамическим диапазоном, чем у микрофонов. В отечественной практике находят применение датчики абсолютного и избыточного быстропеременного давления, разработанные на ведущих приборостроительных предприятиях.

Данные по требуемой точности контроля и измерения пульсаций давления на отечественных испытательных стендах ГТД приводятся в ОСТ 1.01-021-93 и составляют $\pm 10\%$ по амплитуде. Достигнутый к настоящему времени уровень точности при измерении пульсаций давления составляет не более $\pm 20\%$.

Из-за высоких температур и уровня вибраций, наличия взвешенных частиц в продуктах сгорания, а также из-за больших габаритов датчик не может быть установлен в тракте двигателя непосредственно в точке измерения. Поэтому подключение датчика к точке измерения производится при помощи подводного канала. Наличие подводного канала приводит к значительному искаже-

нию передаваемой к датчику информации о переменной составляющей давления из-за резонансных явлений.

На резонансных частотах могут сильно проявляться нелинейные свойства подводящего канала, что приводит к расслоению его частотной характеристики от уровня пульсационной составляющей давления. В этой связи непосредственное восстановление динамических процессов по сигналам, зарегистрированным с помощью сильно резонирующих измерительных цепей с использованием средств вычислительной техники, не представляется возможным.

Устранение влияния подводящих трубопроводов пневматических цепей на результаты измерения переменного давления можно осуществить с помощью акустической коррекции динамических характеристик подводящего канала. Решение этой задачи путем создания математических моделей измерительных цепей, алгоритмов и программ расчёта частотных характеристик и разработки средств их акустической коррекции приведено в данной статье.

Теоретическое исследование частотных характеристик газовых измерительных цепей проводится при следующих допущениях: объект испытаний по отношению к измерительной цепи представляет собой источник колебаний давления; потеря энергии колебаний газа в подводящем канале учитывается в соответствии с высокочастотной теорией; температура и площадь проходного сечения по длине подводящего канала переменны, то есть волновод неоднородный; потери колебательной энергии потока газа в местах резкого перехода с одного диаметра на другой не учитываются; податливость чувствительного элемента датчика давления учитывается приведённым объёмом.

Представив участки измерительной цепи в виде последовательного соединения однородных элементов, можно выразить при принятых допущениях связь между комплексными амплитудами давления и объёмного расхода по концам элементов формулами [13]:

$$\begin{aligned} p_{i1} &= p_{i2} ch\Gamma_i l_i + Z_i q_{i2} sh\Gamma_i l_i; \\ q_{i1} &= \frac{1}{Z_i} p_{i2} sh\Gamma_i l_i + q_{i2} ch\Gamma_i l_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где p_{i1}, p_{i2} - комплексные амплитуды колебаний давления на входе и выходе; q_{i1}, q_{i2} - комплексные амплитуды колебаний давления расхода на входе и выходе; Z_i - волновое сопротивление; Γ_i - коэффициент распространения волн на единицу длины; l_i - длина i -го элемента измерительной цепи.

Волновое сопротивление и коэффициент распространения волн в соответствии с высокочастотной теорией [22] определяются по формулам

$$Z_i = \sqrt{Z_i / Y_i}; \quad (2)$$

$$\Gamma_i = \sqrt{Z_i Y_i}, \quad (3)$$

где $Z_i = R_i + j\omega L_i$ - последовательный импеданс; $Y_i = G_i + j\omega C_i$ - параллельный импеданс; R_i - активное сопротивление; L_i - акустическая индуктивность; G_i - параллельная проводимость; C_i - акустическая ёмкость на единицу длины i -го участка цепи; ω - угловая частота колебаний; $j = \sqrt{-1}$. Параметры R_i, L_i, G_i, C_i рассчитываются по формулам:

$$R_i = \frac{1}{2} L_i \sqrt{\omega \cdot \omega_{vi}}; \quad L_i = \frac{\rho_i}{S_i}; \quad (4)$$

$$G_i = \frac{k-1}{2\sqrt{Pr}} C_i \sqrt{\omega \cdot \omega_{vi}}; \quad C_i = \frac{S_i}{k P_{cp}}, \quad (5)$$

где $\omega_{vi} = 8\pi v_i / S_i$ - характеристическая частота колебаний; v_i - кинематическая вязкость; S_i - площадь поперечного сечения i -го элемента цепи; ρ_i - плотность газа; k - показатель адиабаты; Pr - число Прандтля; p_{cp} - среднее давление газа в измерительной цепи. Использование высокочастотной теории распространения волн в канале в области низких частот приводит к заниженному учёту потерь энергии колебаний по длине канала. Поэтому в низкочастотной области выражение для расчёта R_i принято по квазистационарной модели

$$R_i = 8\pi \rho_i v_i / S_i^2, \quad (6)$$

а величины L_i, C_i равны соответствующим значениям высокочастотной модели и $G_i = 0$.

Критерием разграничения низкочастотной и высокочастотной областей расчётной модели является ω_{vi} . Критическая час-

тота колебаний, выше которой используется высокочастотная модель, определяется из равенства [22]:

$$\omega_{кр} = 4\omega_{vi}. \quad (7)$$

Уравнения граничных условий для конечного сечения подводящего канала выводятся, исходя из равенства давлений и неразрывности потока газа:

$$p_{12} = p_{\delta} = p_{к11} = p_{к21}; \quad (8)$$

$$q_{12} = q_{\delta} + q_{к11} + q_{к21}, \quad (9)$$

где p_{δ} , q_{δ} - комплексные амплитуды колебаний давления и объёмного расхода на входе в полость чувствительного элемента датчика пульсаций давления. Комплексные амплитуды p_{δ} , q_{δ} связаны зависимостью

$$q_{\delta} = Y_{\delta} \cdot p_{\delta}, \quad (10)$$

где $Y_{\delta} = jV_{\delta}\omega / (кP_{cp})$ - входная акустическая проводимость датчика; V_{δ} - приведенный объём полости чувствительного элемента датчика.

Уравнения граничных условий для конечного сечения волновода записываются в форме

$$q_{к} = Y_{к} p_{к}, \quad (11)$$

где $Y_{к} = j(V_{к}\omega / кP_{cp})$ - акустические проводимости концевой ёмкости волновода.

Формулы для определения площади сечений и температуры газа при экспоненциальном их распределении для каждого из выделенных участков приведены в работе [1]. Таким образом, из решения системы уравнений (1)...(11) может быть определена импедансным методом частотная функция акустической цепи, связывающая комплексные амплитуды колебаний давления в полости датчика давления p_{δ} и на входе в измерительную цепь или в объекте контроля p_{11} . На основе разработанной математической модели измерительной цепи составлены алгоритм и программа расчёта её частотной функции.

Программа расчёта частотных характеристик измерительной цепи построена на алгоритмическом языке C++ Builder.

На первом этапе пользователь задаёт тип используемого датчика: датчик с одним входом или дифференциальный датчик, есть ли корректирующий элемент и число участков волновода. Для однородного волновода число участков равно 1. Далее выбирается тип участка волновода: однородный или неоднородный по температуре и/или по площади, и для каждого участка пользователь задаёт длину участка, его диаметр и температуру рабочей среды (рис. 1).

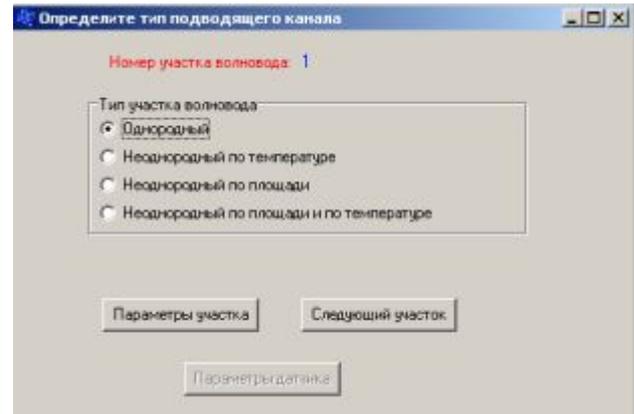


Рис. 1. Окно задания типа участка измерительной цепи

В случае неоднородности по соответствующему параметру приводятся значения на входе и выходе участка. Далее вводятся данные по объекту контроля и датчику (рис. 2). Если ранее было указано, что имеется корректирующий элемент, то выбирается тип корректирующего элемента и его параметры. В программе предусмотрено восемь типов корректирующих элементов (рис. 3).

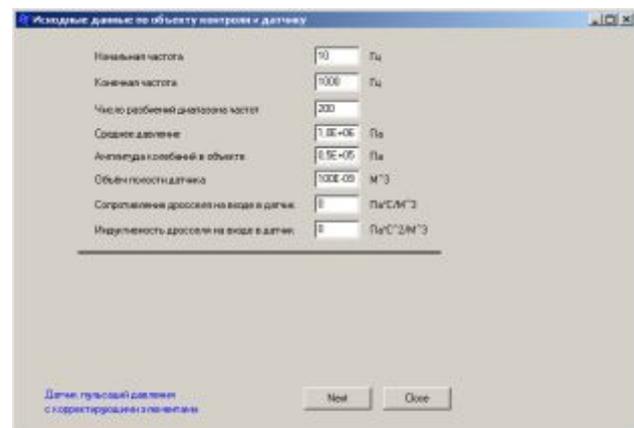


Рис. 2. Ввод исходных данных по объекту контроля и датчику

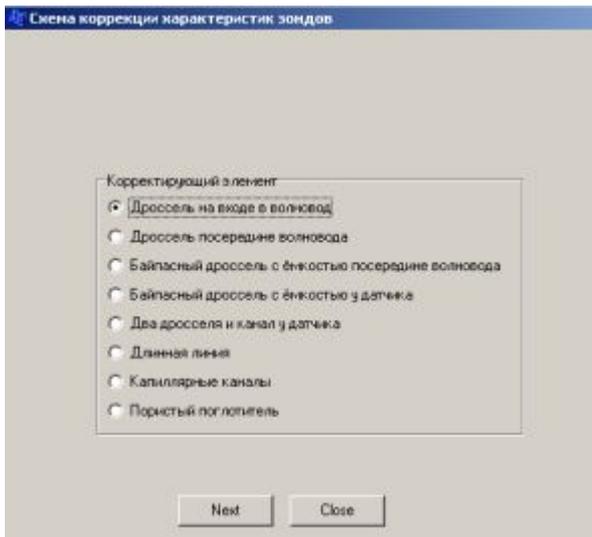


Рис. 3. Окно задания типа корректирующего элемента

Если волновод является неоднородным, то допустимо применение только отдельных видов корректирующих элементов.

На рис. 4 представлено окно с амплитудно-частотной характеристикой, в котором имеется возможность рассмотреть также фазочастотную характеристику цепи, модуль и аргумент входной проводимости измерительной цепи в зависимости от частоты колебаний.

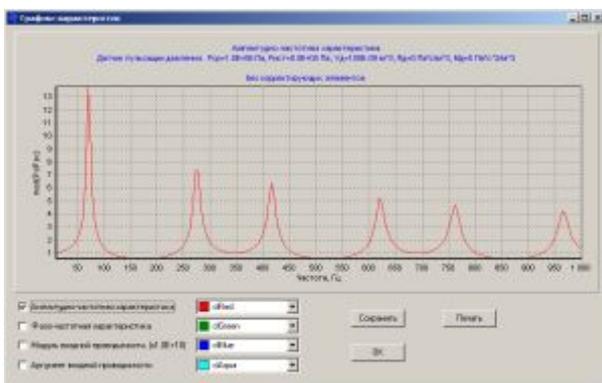


Рис. 4. Пример амплитудно-частотной характеристики неоднородной акустической измерительной цепи

Графики можно отпечатать на принтере, сохранить в файле формата Windows Bitmap или Windows Metafile.

В результате расчётов амплитудно-частотных характеристик неоднородной измерительной цепи установлено, что повышенная температура на входе в волноводный канал приводит к повышению модуля её частотной функции.

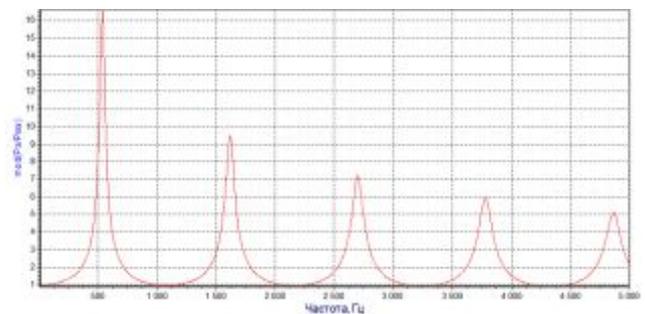
Аналогично, если волноводный канал имеет вид рупорообразного насадка, то так-

же происходит увеличение модуля частотной функции измерительной цепи.

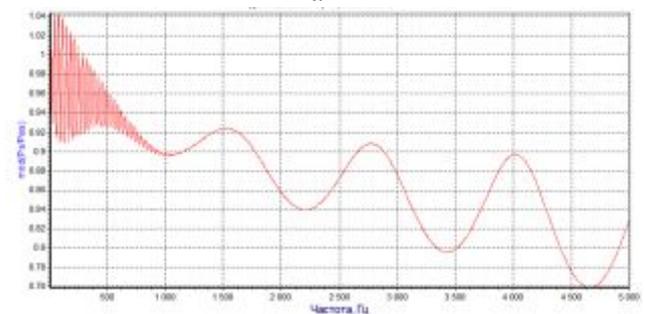
При подключении акустического корректирующего элемента в виде трубки того же диаметра, что и волновод, происходит выравнивание АЧХ зонда. Диапазон частот в пределах коридора погрешности $\pm 10\%$ при длине корректирующей трубки 5 м составляет 10...1750 Гц (рис. 5). Из рис. 5,б следует, что неравномерность АЧХ в низкочастотной области определяется длиной корректирующей трубки, а в высокочастотной области – объёмом полости датчика пульсаций давления.

Для волновода с внутренним диаметром 3 мм предельное значение объёма, которое допустимо, составляет не более 25...30 мм³. Если объём полости датчика нулевой, то АЧХ зонда представляет плавную нисходящую кривую.

Если предположить, что диаметр волновода равен 6 мм, то можно допустить объём датчика 60 мм³, а длину корректирующей трубки придётся увеличить до 10 м. При этом диапазон частот в пределах коридора погрешности $\pm 10\%$ составляет 10...3250 Гц.



а



б

Рис. 5. Теоретическая амплитудно-частотная характеристика акустического зонда пульсаций давления с однородным волноводом $D_y=3$ мм, длиной 0,14 м, объём полости датчика 30мм³ при среднем давлении 1 кгс/см², температура газа на входе минус 30°С: а – без корректирующего элемента; б – с корректирующим элементом в виде трубки $D_y=3$ мм длиной 5 м

Таким образом, для повышения диапазона частот измерения пульсаций давления необходимо увеличить диаметр подводящего волновода. Конечно, при этом повышаются габариты корректирующего элемента, но допускается больший объем полости датчика, что предоставляет больший простор конструктору при разработке приемного узла зонда.

Исследования частотных характеристик акустических зондов с корректирующим элементом в виде длинной согласованной линии с высокой температурой на входе показали, что АЧХ зонда в малом диапазоне частот возрастает из-за температурной неоднородности подводящего волновода, а в области высоких частот имеет нисходящий характер, обусловленный потерями волн давления на трение (рис. 6).

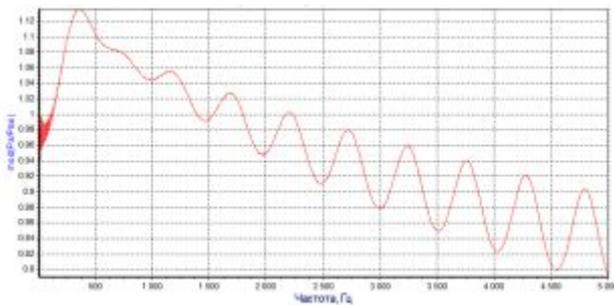


Рис. 6. Теоретическая амплитудно-частотная характеристика акустического зонда пульсаций давления с температурно-неоднородным волноводом $D_y=3$ мм, длиной 0,5 м, объем полости датчика 30 мм^3 при среднем давлении 4 кгс/см^2 , температура газа на входе $+800^\circ\text{C}$, на выходе $+150^\circ\text{C}$ с корректирующим элементом в виде трубки $D_y=3$ мм длиной 20 м

С применением разработанной методики и программы рассчитаны частотные характеристики неоднородной цепи для измерения пульсаций давления в проточной части авиационного ГТД и выбраны параметры корректирующих элементов, обеспечивающих равномерную (в пределах 10...15 %) амплитудно-частотную характеристику в максимально возможном для данной измерительной цепи диапазоне частот пульсаций давления.

Библиографический список

1. Шорин, В.П. Гидравлические и газовые цепи передачи информации [Текст] / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров. – М.: Машиностроение, 2000.- 384 с.
2. Акустические методы и средства измерения пульсаций давления [Текст] / В.П. Шорин, Е.В. Шахматов, А.Г. Гимадиев [и др.] – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. - 132 с.
3. Об измерении пульсаций давления в проточной части газотурбинных двигателей [Текст] / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров [и др.] // Докл. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» 28-30 июня 2011 г., - Самара: СГАУ, 2011. –Ч. 1. - С. 84-85.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

DEVELOPMENT OF TECHNIQUES AND CALCULATION PROGRAM HETEROGENEOUS GAS MEASUREMENT CIRCUITS

© 2012 A. G. Gimadiyev, N. D. Bystrov, A. V. Ustinov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The mathematical model and method of calculation of heterogeneous gas-measuring circuits are presented algorithm and program for calculating their frequency characteristics. Presented frequency response of acoustic probes inhomogeneous the feeding waveguide and corrective element in the form of a long coherent line. Shown that for the chosen parameters dynamic error correction element of the probe does not exceed $\pm 15\%$.

Gas measurement chain, inhomogeneous waveguide, dynamic error, the acoustic probe, the adjustment element, frequency response, the effectiveness of frequency response correction.

Информация об авторах

Гимадиев Асгат Гатьятович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gimadiev_ag@mail.ru. Область научных интересов: динамика систем управления и контроля параметров технологических и энергетических установок.

Быстров Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: iam@ssau.ru. Область научных интересов: коррекция динамических характеристик систем измерения давления при испытаниях ГТД.

Устинов Андрей Владимирович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: iam@ssau.ru. Область научных интересов: коррекция динамических характеристик систем измерения давления при испытаниях ГТД.

Gimadiev Asgat Gatjatovich, the professor of faculty ASEU of Samara state aerospace university named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: iam@ssau.ru. Area of research: correction of dynamic characteristics of systems of measurement of pressure at tests GTD.

Bystrov Nikolay Dmitrievich, the professor of faculty ASEU of Samara State Aerospace university named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: iam@ssau.ru. Area of research: correction of dynamic characteristics of systems of measurement of pressure at tests GTD.

Andrey Vladimirovich Ustinov, graduate of Samara State Aerospace university named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: iam@ssau.ru. Area of research: correction of dynamic characteristics of systems of measurement of pressure at tests GTD.