

УДК 621.431.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ВО ВХОДНОМ УСТРОЙСТВЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2015 В. Н. Иваненко¹, А. Г. Александрова¹, Е. С. Дягилева¹,
А. Г. Гимадиев², Н. Д. Быстров²

¹Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара

²Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Для определения влияния неоднородности воздушного потока на входе в двигатель на запас газодинамической устойчивости компрессора проводятся специальные испытания. Для этой цели в расходомерном коллекторе двигателя устанавливаются акустические зонды для измерения пульсаций давления. Зонды устанавливаются по окружности коллектора под углом 90° относительно его оси. Учитывая малость амплитуд пульсаций скоростного напора в коллекторе, в акустическом зонде предусмотрена установка датчика давления дифференциального типа. В основной вход датчика направляется заторможенный пульсирующий поток воздуха, а в разгрузочную полость – демпфированная его составляющая. В статье на основе электродинамических аналогий приведена методика расчёта акустического РС-демпфера, позволяющего отсечь постоянную и низкочастотную составляющие пульсаций скоростного потока. Для подтверждения соответствия характеристик измерительных зондов требованиям технического задания проведены частотные испытания акустических зондов. Результаты исследований показывают, что разработанный акустический зонд позволяет измерять пульсации давления во входном расходомерном коллекторе газотурбинного двигателя с динамической погрешностью не более $\pm 10\%$ в частотном диапазоне 2-300 Гц.

Пульсации давления, дифференциальный датчик давления, акустический зонд, стенд для частотных испытаний, амплитудно-частотная характеристика, испытания, анализ результатов.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-491-500

Введение

В настоящее время перед конструкторами ставится ряд ответственных задач по созданию конкурентоспособных газотурбинных двигателей (ГТД) как авиационного, так и наземного применения. При решении указанных задач важная роль отводится измерению пульсаций давления потока воздуха или газа в отдельных сечениях двигателя [1 - 3].

Стало традицией в практике исследования пульсаций полного давления воздушного потока на входе в двигатель применять значительное число (до нескольких десятков) датчиков, устанавливаемых в специальных гребёнках. Наилучший вариант заключается в установке датчиков пульсаций давления непосредственно в точке измерения [4, 5], но в большинстве случаев он не может быть выполнен из-за невозможности установки

датчиков без разборки двигателя или из-за недостаточной надёжности датчика при работе в условиях высоких температур, вибраций, запылённого воздуха. Последнее обстоятельство может привести к перфорации чувствительного элемента датчика (мембраны) песчинками, содержащимися в воздухе. Возможно проявление эффекта налипания твёрдых частиц, образующихся в тракте в процессе работы двигателя, на мембране датчика со стороны динамического входа в датчик давления, что, в свою очередь, приводит к изменению частотной характеристики датчика давления, а в дифференциальных датчиках ещё и вызывает нарушение линейности характеристики.

Для определения запасов устойчивости двигателя к неоднородностям воздушного потока на его входе проводятся специальные испытания по определению

запасов газодинамической устойчивости двигателя. Для этой цели в расходомерном коллекторе устанавливаются зонды измерения пульсаций давления. На стенде СГАУ для подтверждения соответствия характеристик измерительных модулей требуемым авторами проведены их испытания по определению амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) [6, 7].

Разработка зонда пульсаций давления

Измерительный модуль зонда (рис. 1) представляет собой полый прямоугольный корпус, выполненный из материала

Д1Т. В корпусе выполнена полость объёмом $3,45 \text{ см}^3$, которая совместно с демпфером Д-59 служит для демпфирования переменной составляющей давления в рабочем диапазоне частот. Верхняя часть корпуса образована двумя площадками со сквозными отверстиями под размещение датчика пульсации давления типа ДМИ-0,6-II и демпфера Д-59, пневматическое сопротивление которого рассчитывается по приведённой ниже методике. Электрический сигнал с датчиков ДМИ-0,6-II выводится через разъёмы, установленные на корпусе зонда.

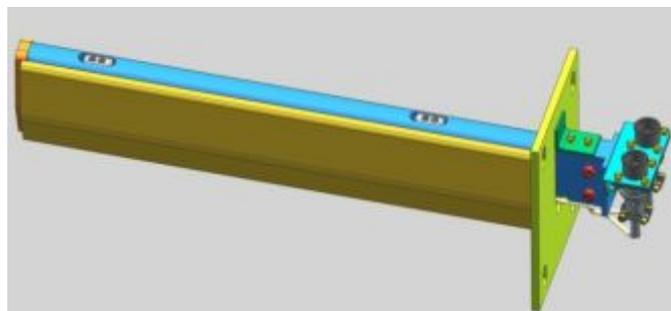


Рис. 1. Зонд измерения пульсаций давления

Модуль измерения уровня пульсаций давления выполнен на базе дифференциального датчика ДМИ-0,6-II (рис. 2), поэтому для измерения переменной составляющей процесса ΔP необходимо на один вход датчика подать полное давление P , на другой вход – среднюю составляющую полного давления или статическое давление $P_{ст}$. Тогда на мембрану датчика будет непосредственно действовать переменная часть давления $\Delta P = P - P_{ст}$. На второй вход датчика полное давление подаётся через газовый демпфер и полость объёмом $3,45 \text{ см}^3$.

В тех случаях, когда на выходе волновода зонда устанавливается преобразователь пульсаций давления дифференциального типа (рис. 3), предназначенный для измерения динамической составляющей давления, задача коррекции частотной характеристики цепи, естественно, усложняется.

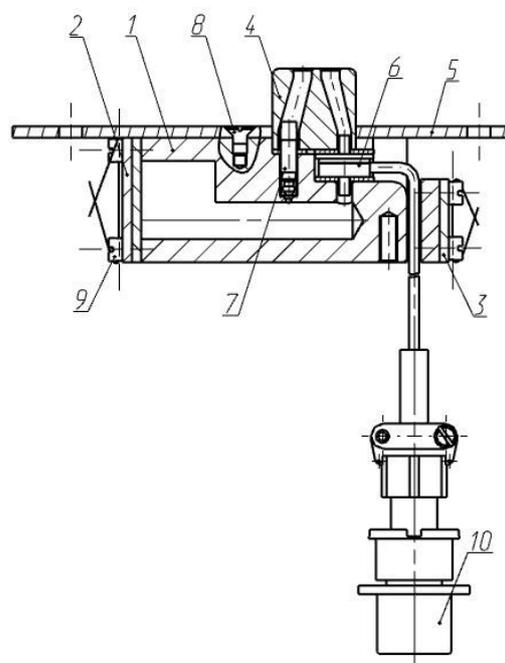


Рис. 2. Конструктивная схема модуля измерения пульсаций давления: 1 – корпус; 2,3 – фланец; 4 – корпус двухканальный; 5 – планка; 6 – датчик давления ДМИ-0,6-II; 7 – демпфер Д59-II; 8,9 – винт; 10 – штексельный разъём

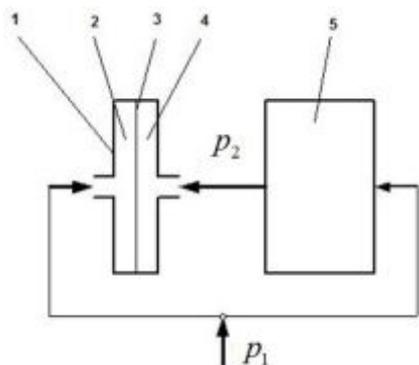


Рис. 3. Принципиальная схема датчика пульсаций давления дифференциальной схемы с акустическим фильтром низких частот:
 1 – дифференциальный датчик пульсаций давления;
 2 – динамическая камера датчика; 3 – мембрана;
 4 – статическая камера датчика; 5 – акустический фильтр низких частот

К дифференциальным цепям предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение передачи давления к динамической камере преобразователя с минимально возможными динамическими искажениями в заданном частотном диапазоне;
- обеспечение фильтрации динамической составляющей давления, передаваемого в статическую полость преобразователя.

В последние годы для гашения колебаний рабочей среды в гидравлических и пневматических цепях разработан ряд схем гасителей [8, 9], которые могут быть использованы как акустический фильтр низких частот (АФНЧ) для устройств измерения и контроля пульсаций давления. По принципу действия АФНЧ подразделяются на реактивные, активные и комбинированные.

В настоящее время для пневматических цепей передачи информации в основном используется один тип АФНЧ – акустический RC-фильтр, который представляет собой последовательное соединение сосредоточенного активного сопротивления и акустической ёмкости. Подбором величины сопротивления и ёмкости при заданной граничной частоте $\omega_{гр}$ до-

бываются требуемой эффективности акустического фильтра.

Расчёт АФНЧ сводится к определению его параметров, при которых обеспечивается заданная эффективность в диапазоне частот выше $\omega_{гр}$. Эффективность акустического фильтра зависит от граничных условий, т.е. от нагрузок со стороны входа и выхода фильтра. Как правило, расчёт фильтров производится при условии согласованных нагрузок. Применительно к датчикам дифференциальной схемы, предназначенным для измерения колебаний давления, условия согласованного включения АФНЧ практически никогда не выполняются.

С одной стороны, от АФНЧ в информационных измерительных цепях не требуется обеспечения передачи максимально возможной акустической мощности, с другой – акустические сопротивления источника колебаний и дифференциального датчика давления отличаются существенным образом в полосе пропускания фильтра.

Переходя к расчёту АФНЧ, необходимо сделать ряд допущений:

- АФНЧ состоит из сосредоточенных элементов (линейные размеры фильтров пренебрежимо малы по сравнению с длиной волны колебаний);
- нагрузочные сопротивления АФНЧ не согласованы, поскольку источник колебаний давления обладает внутренним сопротивлением, близким к нулю, а входное сопротивление датчика весьма велико;
- необратимые потери в индуктивных и ёмкостных элементах не учитываются;
- параметры элементов фильтра не зависят от частоты колебаний.

При принятых допущениях, рассматривая АФНЧ как пассивный четырёхполюсник, связь между комплексными амплитудами давления на входе и на выходе можно записать в виде [10]:

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} = 1 - \frac{Z_H}{Z_H A + B}, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты матрицы передачи фильтра; Z_H – полное сопротивление нагрузки АФНЧ со стороны выхода; p_1, p_2 – комплексные амплитуды колебаний давлений.

Для АФНЧ, включённого в схему согласно рис. 3, нагрузочным сопротивлением является входное сопротивление дифференциального датчика, которое для низких частот можно считать равным бесконечно большой величине. Отсюда следует

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{A}. \tag{2}$$

На основании выражений (1) и (2) частотную функцию АФНЧ можно записать так:

$$W(j\omega) = \frac{p_1 - p_2}{p_1} = 1 - \frac{1}{A}, \tag{3}$$

где ω – угловая частота колебаний, $j = \sqrt{-1}$.

Наиболее простым по структуре является фильтр, состоящий из элементов, включённых по Г-образной схеме (рис. 4). В связи с тем, что АФНЧ должен пропускать колебания низких частот, начиная от нуля до частоты среза фильтра, в последовательных плечах АФНЧ должны быть установлены элементы, пропускающие постоянный расход рабочей среды, т.е. индуктивные элементы. Следовательно, в параллельных плечах должны размещаться ёмкостные элементы. Для Г-образного фильтра коэффициент матрицы передачи согласно [11] равен $A = 1 + Z_1 / Z_2$, где Z_1 , Z_2 – сопротивления плеч фильтра (рис. 4).

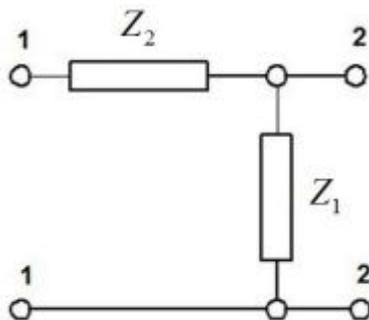


Рис. 4. Г-образная схема электрического аналога простейшего реактивного АФНЧ: Z_1, Z_2 – сопротивления плеч

Тогда выражение для частотной функции датчика пульсаций с АФНЧ запишется в виде:

$$W(j\omega) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}. \tag{4}$$

Для расчёта RC-фильтров также будем считать, что резистивные элементы фильтров обладают только активным сопротивлением.

Для Г-образного RC-фильтра, очевидно, что сопротивление последовательного плеча равно $Z_1 = R$, параллельного плеча – $Z_2 = \frac{1}{j\omega C}$, где R – акустическое сопротивление дросселирующего элемента; C – акустическая ёмкость.

С учётом величин Z_1 и Z_2 формула (4) примет вид:

$$W(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}. \tag{5}$$

Обозначим комплекс RC через T_ϕ и введём в рассмотрение частоту квазирезонанса $\omega_{кр} = 1/T_\phi$ и безразмерную частоту колебаний:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{кр}} = \omega RC. \tag{6}$$

С учётом (6) выражение (5) представим в виде $W(j\bar{\omega}) = \frac{j\bar{\omega}}{1 + \bar{\omega}}$, откуда нетрудно определить модуль и аргумент частотной функции $W(j\bar{\omega})$:

$$|W(j\bar{\omega})| = \frac{\bar{\omega}}{\sqrt{1 + \bar{\omega}^2}}, \tag{7}$$

$$\arg W(j\bar{\omega}) = \arctg \frac{1}{\bar{\omega}}.$$

Расчёт АФНЧ сводится к отысканию параметров фильтра (R и C) при заданной граничной частоте $\omega_{гр}$ и допустимой неравномерности δ АЧХ датчика с фильтром. Из АЧХ, представленной на рис. 5, нетрудно увидеть, что для граничной частоты $\omega_{гр}$ может быть записано следующее равенство:

$$|W(j\bar{\omega}_{гр})| = 1 - \delta. \tag{8}$$

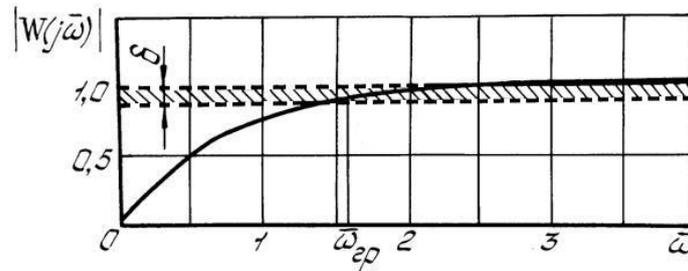


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика дифференциального датчика пульсаций давления с Г-образным RC-фильтром

С учётом выражения (7) равенство (8) переписывается в виде:

$$\frac{\bar{\omega}_{гр}}{(1 + \bar{\omega}_{гр}^2)^{1/2}} = 1 - \delta. \quad (9)$$

Решив уравнение (9) относительно $\bar{\omega}_{гр}$, получим:

$$\bar{\omega}_{гр} = \frac{1 - \delta}{\sqrt{\delta(2 - \delta)}}. \quad (10)$$

Поскольку $\bar{\omega}_{гр} = \frac{\omega_{гр}}{\omega_{кр}}$ и $\frac{1}{\omega_{кр}} = RC$, из

уравнения (10) получим выражение:

$$RC = \frac{1 - \delta}{\omega_{гр} \sqrt{\delta(2 - \delta)}}. \quad (11)$$

При заданных δ и $\omega_{гр}$ можно определить параметры акустического RC-фильтра.

Воспользуемся выведенными выше соотношениями и рассчитаем параметры RC-фильтра, когда $f_{гр} = 2$ Гц ($\omega_{гр} = 2\pi \cdot f_{гр}$) и $\delta = 0,02$.

Находим $T_{\phi} = RC$ по формуле (11).

При принятых выше $f_{гр}$ и δ постоянная времени фильтра $T_{\phi} = 0,39$ с.

Акустическая ёмкость находится по соотношению $C = V / P_{ст}$, где V – геометрический объём модуля пульсаций, равный $3,45 \text{ см}^3$.

Для рассматриваемого случая при атмосферном давлении и указанном выше объёме акустическая ёмкость будет равна $C = 3,45 \cdot 10^{-11} \text{ м}^4 \text{ с}^2 / \text{кг}$. При рассчитанных T_{ϕ} и C сопротивление фильтра $R = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ кг/с м}^4$.

Таким сопротивлением обладает демпфер Д59 при динамическом давлении до 120 дБ.

На основании формулы (5) определяем модуль частотной функции:

$$|W(j\omega)| = \frac{\omega T_{\phi}}{\sqrt{1 + T_{\phi}^2 \omega^2}}. \quad (12)$$

С помощью выражения (12) рассчитана АЧХ зонда в области нижних частот (рис. 6).

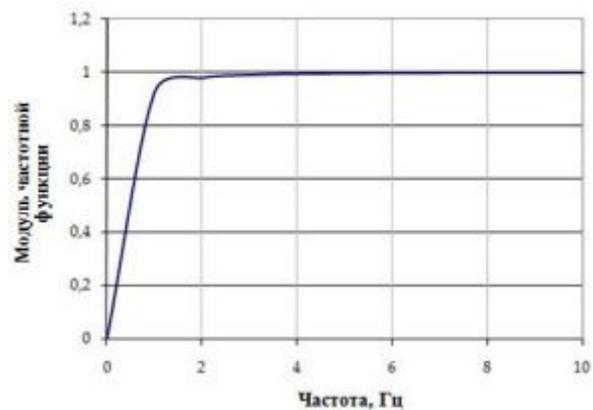


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика АФНЧ

Из графика ясно, что зонд будет регистрировать колебания давления с частотой более 2 Гц.

Экспериментальные исследования частотных характеристик зонда

На первом этапе были проведены частотные испытания измерительного модуля акустического зонда на акустической трубе при атмосферном давлении с генерацией колебаний давления с уровнем амплитуды до 120 дБ в диапазоне частот 100...1000 Гц (рис.7).

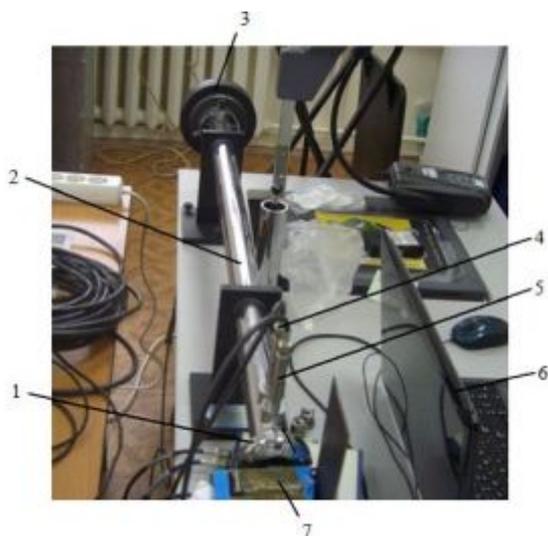


Рис. 7. Общий вид акустической трубы:
 1 – акустический выход трубы; 2 – цилиндрическая часть трубы; 3 – генератор акустических колебаний; 4, 5 – полудюймовые микрофоны; 6 – компьютер с управляющей программой; 7 – измерительный модуль с датчиком давления ДМИ-0,6

С помощью управляющей программы последовательно задавались отдельные частоты колебаний, генерируемые динамиком акустической трубы. При этом

настраивалась наибольшая амплитуда колебаний. Записывались сигналы, представляющие частотно-амплитудный отклик датчика ДМИ и показания микрофона. С шагом 50 Гц по частоте был пройден диапазон частот 100...1000 Гц. Полученный массив данных был впоследствии обработан для получения АЧХ датчика ДМИ-0,6- II.

С помощью программы РУДИП [11] был осуществлен расчёт АЧХ измерительного модуля с датчиком ДМИ-0,6-II в диапазоне частот 10...1000 Гц. При расчёте АЧХ измерительного модуля амплитудная характеристика датчика полагалась равномерной и равной 1,0.

Из графика (рис. 8) следует, что измерительным модулем можно проводить испытания объектов в диапазоне частот 10...550 Гц с погрешностью, не превышающей +10%, обусловленной началом проявления резонансных свойств входного канала.

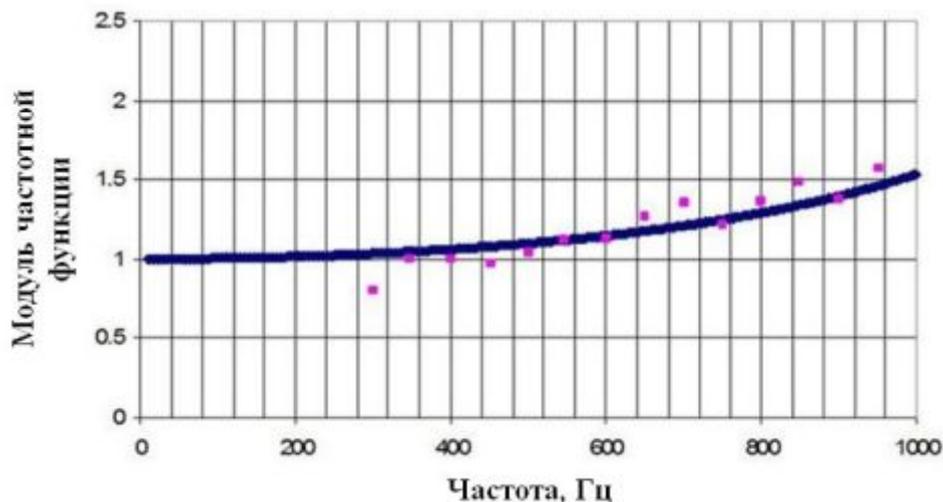


Рис. 8. АЧХ измерительного модуля датчика ДМИ в диапазоне частот 10...1000 Гц: непрерывная линия – расчёт по программе РУДИП; точки – эксперимент на акустической трубе

Следующим этапом исследований измерительного зонда явились испытания на частотном стенде СГАУ (рис. 9). Основным узлом стенда для частотных испытаний пневматических измерительных средств является генератор колебаний давления, принцип действия которого основан на периодическом прерывании потока воздуха модулирующим диском.

Для частотных испытаний измерительного модуля на частотном стенде СГАУ при повышенном уровне амплитуд пульсаций давления спроектирован и изготовлен технологический модуль, который через специальный штуцер подключён к испытательной камере. В качестве контрольного датчика при проведении испытаний применён датчик M102A07.

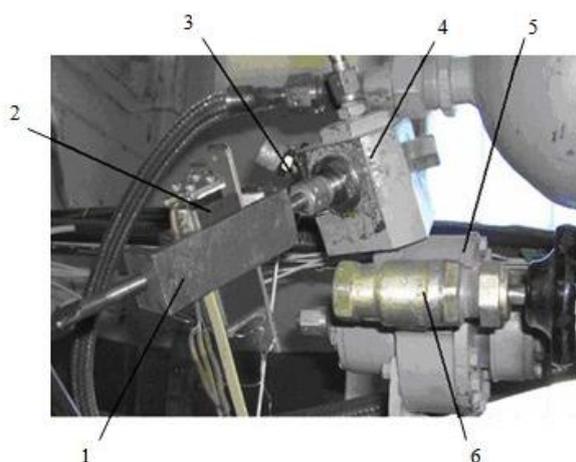


Рис. 9. Технологический модуль с измерительным модулем, установленный на стенде СГАУ: 1,2 – технологический модуль и измерительный модуль; 3 – датчик М102А07; 4 – испытательная камера генератора колебаний; 5 – генератор колебаний; 6 – вентиль воздушный

Для регистрации сигналов с датчиков давления ДМИ-0,6-II и М102А07 использованы аппаратура 4АНЧ-22, измерительно-вычислительный комплекс МИС-026 НПП «Мера» и компьютер.

Сигналы с датчика зонда ДМИ-0,6-II и с контрольного датчика М102А07 во время испытаний поступали на вход платы МС-201 измерительно-вычислительного комплекса МИС-026 и с помощью программы Recorder записывались на жёсткий диск компьютера для последующей обработки. Для обработки осциллограмм (рис. 10) использовалась программа WinПОС НПП «Мера».

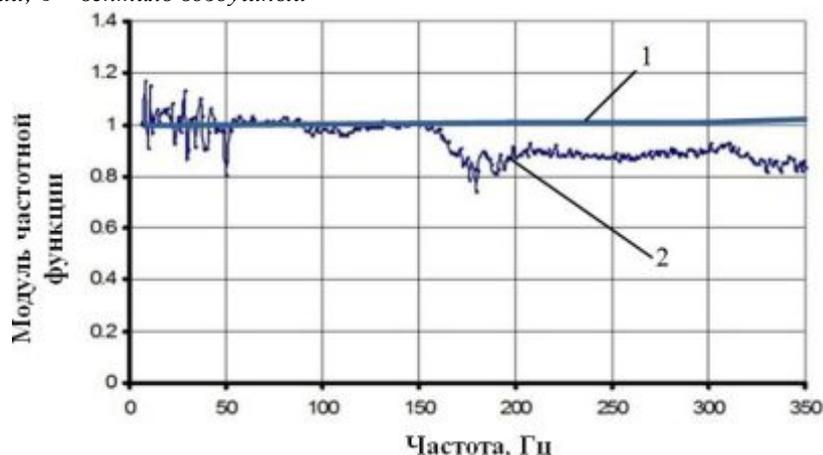


Рис. 10. АЧХ измерительного модуля с датчиком ДМИ-0,6-II при избыточном давлении 0,5 кгс/см²:

1 – расчёт по программе РУДИП; 2 – эксперимент на стенде СГАУ

Анализ зависимостей показывает, что проявившаяся при испытаниях неравномерность АЧХ в частотном диапазоне 150...350 Гц обусловлена проявлением акустических резонансов в подводящих трубках технологического модуля и корпуса с датчиком М102А07. Из-за разницы в значениях коэффициентов усиления и сдвига резонансных частот технологического модуля с датчиком ДМИ и контрольного датчика наблюдаются провалы АЧХ, которые не были зафиксированы при испытаниях на акустической трубе.

Выводы

Результаты исследований показывают, что разработанный акустический зонд позволяет измерять пульсации давления во входном расходомерном коллекторе. При этом наибольшая неравномерность АЧХ измерительного модуля с датчиком ДМИ-0,6-II, экспериментально определённая на стенде СГАУ в диапазоне частот 10...300 Гц, находится в пределах $\pm 10\%$, что допустимо по условиям испытаний ГТД.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777).

Библиографический список

1. Dowling A.P., Morgans A.S. Feedback control of combustion oscillations // Annual Review of Fluid Mechanics. 2005. V. 37, Iss. 1. P. 151-182. doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122038
2. Canbazoglu S., Yakut K. Reduction of peak amplitudes of pressure fluctuations in turbulent pipe flow using vortex generators and compliant boundaries // HVAC and Research. 2005. V. 11, Iss. 3. P. 487-498. doi.org/10.1080/10789669.2005.10391149
3. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling // Progress in Astronautics and Aeronautics. Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. doi: 10.2514/4.866807
4. Шорин В.П., Шахматов Е.В., Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д. Акустические методы и средства измерения пульсаций давления. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2007. 132 с.
5. Choutapalli I., Krothapalli A., Arakeri J.H. An experimental study of an axisymmetric turbulent pulsed air jet // Journal of Fluid Mechanics. 2009. V. 631. P. 23-63. doi.org/10.1017/s0022112009007009
6. Furlotov V.I., Dubovitsky A.N., Khanyan G.S. Determination of frequency characteristics for «transducer waveguide» system under high gas parameters // Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2007. Tokyo, December 3-7, 2007.
7. Benajes J., Bermudez V., Climent H., Rivas-Perea M. Instantaneous pressure measurement in pulsating high temperature internal flow in ducts // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 61, Iss. 2. P. 48-54. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.033
8. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1972. 332 с.
9. Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. 156 с.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
11. Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д., Устинов А.В. Разработка методики и программы расчёта неоднородных газовых измерительных цепей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3 (34), ч. 2. С. 263-268.

Информация об авторах

Иваненко Владислав Николаевич, начальник конструкторского бюро, Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара. Область научных интересов: разработка средств измерения параметров двигателей.

Александрова Татьяна Геннадьевна, ведущий инженер, Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара. Область научных интересов: измерение и обработка экспериментальных данных.

Дягилева Евгения Сергеевна, инженер-конструктор, Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара. Область научных интересов: измерение и обработка экспериментальных данных.

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 пневмогидравлических цепей и систем топливной автоматики двигателей летательных аппаратов.

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: bystrov-nd@yandex.ru. Область научных интересов: динамика пневмогид-

равлических цепей и систем топливной автоматики двигателей летательных аппаратов.

PILOT STUDY OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF AN ACOUSTIC PROBE FOR MEASURING PRESSURE PULSATIОNS IN THE GAS TURBINE ENGINE INLET DEVICE

© 2015 V. N. Ivanenko¹, T. G. Alexandrova¹, E. C. Dyagileva¹,
A. G. Gimadiyev², N. D. Bystrov²

¹Open Joint-Stock Company «KUZNETSOV», Samara, Russian Federation

²Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Special tests are carried out to determine the effect of heterogeneity of the air flow at the engine intake to the gas-dynamic stability margin of the compressor. There are acoustic probes mounted in the engine air flow meter manifold to measure pressure pulsations for this purpose. The probes are installed around the circumference of the collector at an angle of 90° relative to its axis. There is a differential pressure sensor installation in the acoustic probe due to the smallness of the amplitudes of velocity head pulsations in the manifold. Stagnated pulsed-flow of air is directed to the main input of the sensor and its damped component to the discharge chamber. In the paper on the basis of electrodynamic analogies the method of calculation of acoustic RC-damper to eliminate the constant and low frequency components of the flow speed pulsations is presented. To confirm compliance of the measuring probes characteristics to the design specification requirements acoustic probes' frequency tests are conducted. Test results show that the developed acoustic probe can measure pressure fluctuations in the gas turbine engine inlet flow meter manifold with dynamic accuracy of $\pm 10\%$ in the frequency range of 2-300 Hz.

Pressure pulsation, differential pressure sensor, acoustic probe, stand for the frequency tests, amplitude-frequency characteristic, analysis of results.

References

1. Dowling A.P., Morgans A.S. Feedback control of combustion oscillations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2005. V. 37, Iss. 1. P. 151-182. doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122038
2. Canbazoglu S., Yakut K. Reduction of peak amplitudes of pressure fluctuations in turbulent pipe flow using vortex generators and compliant boundaries. *HVAC and Research*. 2005. V. 11, Iss. 3. P. 487-498. doi.org/10.1080/10789669.2005.10391149
3. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. doi: 10.2514/4.866807
4. Shorin V.P., Shakhmatov E.V., Gimadiyev A.G., Bystrov N.D. *Akusticheskie metody i sredstva izmereniya pul'satsiy davleniya* [Acoustic methods and facilities of measuring pressure pulsations]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2007. 132 p.
5. Choutapalli I., Krothapalli A., Arakeri J.H. An experimental study of an axisymmetric turbulent pulsed air jet. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009. V 631. P. 23-63. doi.org/10.1017/s0022112009007009
6. Furletov V.I., Dubovitsky A.N., Khanyan G.S. Determination of frequency characteristics for «transducer waveguide» system under high gas parameters. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2007*. Tokyo, December 3-7, 2007.

7. Benajes J., Bermudez V., Climent H., Rivas-Perea M. Instantaneous pressure measurement in pulsating high temperature internal flow in ducts. *Applied Thermal Engineering*. 2013. V. 61, Iss. 2. P. 48-54. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.033

8. Petunin A.N. *Metod i tehnika izmereniy parametrov gazovogo potoka* [Methods and techniques of measuring gas flow parameters]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 32 p.

9. Shorin V.P. *Ustranenie kolebanii v aviacionnyh truboprovodah* [Suppression of

oscillations in aircraft pipelines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 156 p.

10. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electric circuits]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.

11. Gimadiyev A.G., Bystrov N.D., Ustinov A.V. Development of techniques and calculation program heterogeneous gas measurement circuits // *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3(34), part 2. P. 263-268. (In Russ.)

About the authors

Ivanenko Vladislav Nikolaevich, Head of Design Bureau, Open Joint-Stock Company «KUZNETSOV», Samara, Russian Federation. Area of Research: development of instruments for measuring engine parameters.

Aleksandrova Tatjana Gennadjevna, Senior Engineer, Open Joint-Stock Company «KUZNETSOV», Samara, Russian Federation. Area of Research: measurement and processing of experimental data.

Djagileva Evgenija Sergeevna, design engineer, Open Joint-Stock Company «KUZNETSOV», Samara, Russian Federation. Area of Research: measurement and processing of experimental data.

Gimadiyev Asgat Gatyatovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: gimadiyev_ag@mail.ru. Area of Research: dynamics of pneumatic-hydraulic and fuel metering systems of aircraft engines.

Bystrov Nikolaj Dmitrievich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: bystrofund@yandex.ru. Area of Research: dynamics of pneumatic-hydraulic and fuel metering systems of aircraft engines.