

УДК 004.942

Математическое моделирование частотного датчика давления

Калинов Е.Д.¹

Ульяновский государственный университет¹

Аннотация: Математическое моделирование разрабатываемых изделий с целью оценки эффективности конструкции, влияние изменения материалов, из которых она изготавливается, исследование различных технических решений, являющихся новаторскими в области их применения, применяются на практике в различных отраслях промышленности. В статье описаны конструкция и принцип работы частотного датчика давления, применяемого в авиационном приборостроении, и его математическая модель, отражающая его работу в условиях окружающей среды.

Ключевые слова: частотный датчик давления, тонкостенный резонатор, FSI-анализ, Ansys CFX, Ansys Mechanical.

1. Общие сведения об авиационных датчиках давления

Система воздушных сигналов (СВС) определяет параметры потока воздуха, проводя измерения во внешней среде [1]. Датчики давления СВС предназначены для восприятия полного и статического давления, преобразования их в электрические сигналы и последующей передачи их в вычислитель в удобной форме с целью определения параметров движения летательного аппарата.

Схема датчика давления представлена на рис. 1.

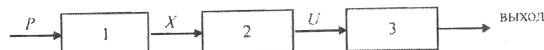


Рис. 1. Структурная схема датчика давления: P – измеряемое давление; 1 – первичный преобразователь; 2 – вторичный преобразователь; 3 – блок обработки сигналов; X – перемещение; U – электрический сигнал.

Первичный преобразователь (чувствительный элемент по давлению) присутствует в датчиках давления всех типов и служит для преобразования давления в перемещение. Чувствительный элемент – самая ответственная часть конструкции датчика давления. Главными статическими характеристиками любого упругого чувствительного элемента, самой ответственной части конструкции датчика, являются:

– зависимость перемещения X от давления:

$$X = f(P), \quad (1)$$

– зависимость тягового усилия F от давления:

$$F = f(P). \quad (2)$$

Выходом чувствительного элемента для вибрационно-частотного датчика давления являются колебания, которые также являются перемещениями, в связи с чем уравнение (1) актуально и для датчиков давления данного типа. При этом упругий чувствительный элемент любого вида работает только в пределах закона Гука, когда сила упругости прямо пропорциональна изменению перемещения материала.

Принцип работы преобразователя давления в частоту вибрационно-частотного датчика основан на функциональной зависимости частоты резонансных колебаний упругого чувствительного элемента от величины измеряемого давления [2]:

$$\nu = F(P). \quad (3)$$

В рассматриваемом случае в качестве упругого чувствительного элемента используется тонкостенный цилиндр, собственная частота колебаний которого является функцией его физических свойств. Она зависит от формы и размера, упругости материала, массы цилиндра и распределения масс, участвующих в колебаниях, механических напряжений внутри него. Действие датчика основано на зависимости собственной частоты упругого элемента от величины его внутреннего механического напряжения, вызванного действием измеряемого давления [3].

2. Устройство и принцип работы частотного датчика давления с цилиндрическим чувствительным элементом

Датчик давления работает следующим образом. Давления, разность которых подлежит измерению, с помощью штуцеров 1 и 17 (рис.2) характеризуют воздействия на внешнюю и внутреннюю поверхности тонкостенного цилиндрического резонатора 11, вследствие чего в последнем возникают пропорциональные этой разности тангенциальное (окружное) и меридиональное механическое напряжения. Совместно с системой самовозбуждения колебаний резонатор образует электромеханическую автоколебательную систему, частота колебаний которой равна его собственной частоте и связана с механическими напряжениями в его стенке и, следовательно, с измеряемой разностью давлений однозначной функциональной зависимостью [4].

Система самовозбуждения поддерживает незатухающие изгибные колебания резонатора, в процессе которых его поперечное сечение принимает форму эллипса, вытянутого попеременно то по одной, то по другой из двух взаимно перпендикулярных осей, совпадающих с направлениями жирных стрелок 6 на рис. 3. На этом рисунке на фоне деталей конструкции датчика давления схематично изображена конфигурация создаваемого постоянными магнитами 1 квадрупольного магнитного поля (пунктирные стрелки 4) и форма поперечного сечения резонатора, которая возникает при взаимодействии протекающего по нему тока с этим магнитным полем. Жирными стрелками 6 условно обозначены равнодействующие приложенных к резонатору ponderomotorных сил [5].

При равенстве наружного и внутреннего давлений частота колебаний стенок определяется их массой и жесткостью. В случае присутствия внутреннего избыточного давления к жесткости стенок добавляется жесткость, созданная давлением. Влияние этой дополнительной жесткости состоит в том, что при деформации сечения цилиндра из окружности в эллипс его внутренний объем уменьшается, следовательно, должна быть затрачена дополнительная энергия, пропорциональная внутреннему давлению [6].

При колебаниях резонатора изменяются емкости конденсаторов, образуемых электродами и цилиндрической поверхностью резонатора, вследствие чего на входе усилителя появляется переменное напряжение той же частоты, что и частота колебаний резонатора. С выхода усилителя это напряжение через согласующий трансформатор подается на резонатор. При протекании переменного тока в осевом направлении через резонатор, расположенный

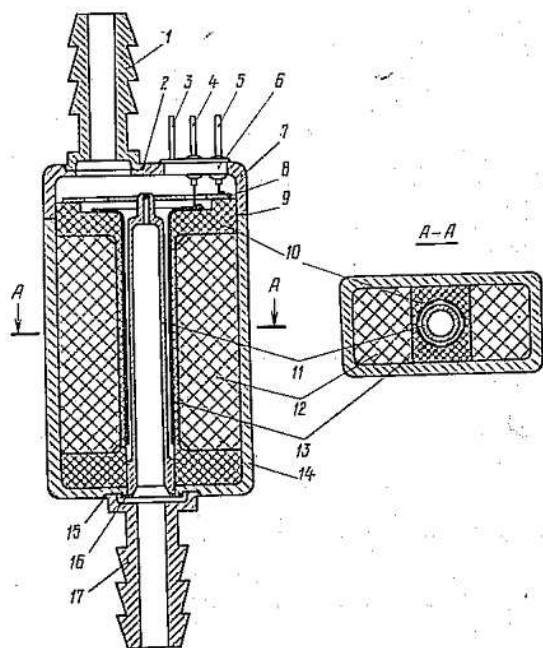


Рис. 2. Конструкция модуля давления (общий вид): 1, 17 – штуцера; 2, 9, 15, 16 – сварные швы; 3 – электрический вывод от кожуха модуля; 4, 5 – электрические выводы от электродов 13 и от резонатора; 6 – корпус гермовода; 7 – крышка; 8 – плоская пружина из термобиметалла; 10 – керамическое основание; 11 – тонкостенный цилиндрический резонатор; 12 – постоянные магниты из ферроксида; 13 – электроды ёмкостной системы съема; 14 – кожух датчика.

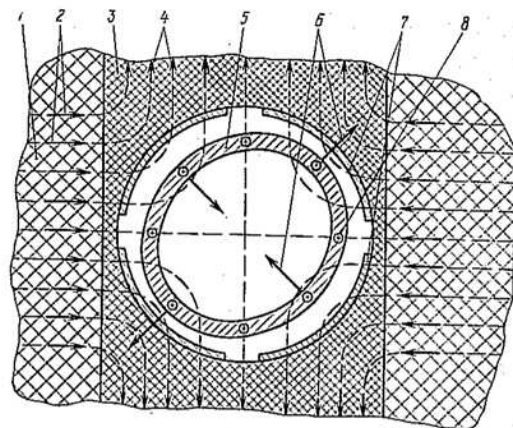


Рис. 3. Форма равновесия цилиндрического резонатора с током в квадрупольном магнитном поле: 1 – постоянные магниты из ферроксида; 2 – направления постоянного намагничивания магнитов; 3 – керамическое основание; 4 – силовые линии квадрупольного магнитного поля; 5 – тонкостенный цилиндрический резонатор; 6 – равнодействующие приложенных к резонатору ponderomotorных сил; 7 – электроды емкостной системы съема; 8 – условные обозначения протекающих по резонатору токов.

в постоянном квадрупольном магнитном поле, на него действуют ponderomotorные силы, обеспечивающие его дальнейшую раскачку.

Выходной сигнал усилителя является одновременно и выходным сигналом датчика. Фазовая характеристика усилителя подбирается таким образом, что обеспечивается выполнение условия самовозбуждения. Благодаря этому в системе поддерживаются незатухающие колебания, частота которых связана с измеряемой разностью давлений [5].

В таблице 1 представлен диапазон измерения абсолютного давления для рассматриваемого датчика давления.

Таблица 1. Диапазон измеряемого давления.

ГПа	мм.рт.ст
От 6,67 до 1199,90	От 5 до 2100

Чувствительный элемент в виде тонкостенного цилиндра для датчика изготавливается из стали 45НХТ, свойства которой представлены в таблице 2 [7].

Таблица 2. Свойства материала резонатора (45НХТ)

$T, ^\circ C$	$E, 10^{11}, Pa$	$\rho, kg/m^3$	σ_B, MPa
20	1,85	8050	800-1180

3. Математическая модель частотного датчика давления

Моделирование механических колебаний датчика осуществлялось в программном комплексе ANSYS. Применялась технология FluidStructureInteraction (FSI), позволяющая реализовать связь между анализом напряженно-деформированного состояния и газодинамическим расчетом, по схеме одностороннего взаимодействия, подразумевающей передачу поверхностных нагрузок из ANSYS CFX в ANSYS Mechanical и перемещений из ANSYS Mechanical в ANSYS CFX.

При проведении моделирования были использованы модули программного комплекса ANSYS: «Modal» (для расчета форм и частот собственных колебаний чувствительного элемента), «TransientStructural» (для моделирования колебания стенок резонатора под воздействием магнитов), «CFX» (проектирование воздуха, находящего внутри резонатора). Схема проекта в ANSYS Workbench представлена на рис. 4.

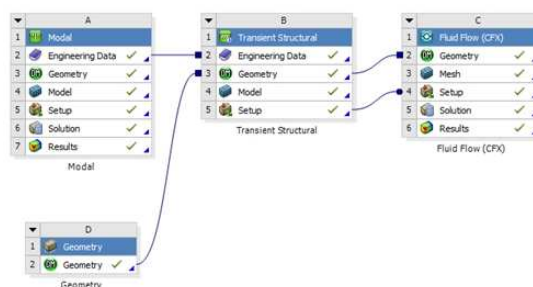


Рис. 4. Схема проекта в ANSYS Workbench.

При выполнении расчета форм и частот собственных колебаний внешние силы и демпфирование отсутствуют, в качестве граничных условий использовалось частичное ограничение перемещения (фиксация) конструкции. В данном случае фиксация выполнена на открытом конце на утолщенной части цилиндра и на конце токосъемника (рис. 5).

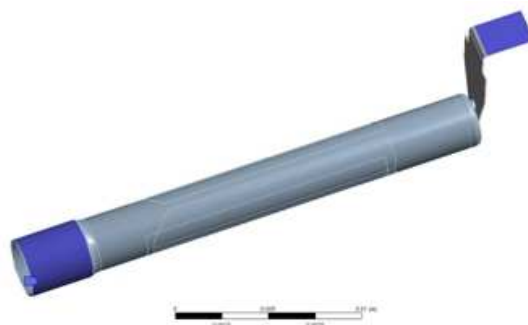


Рис. 5. Фиксация конструкции.

По результатам модального анализа нужные формы колебаний соответствуют 4 и 5 модам (формам свободных колебаний), собственные частоты которых равны 10783 и 10785 Гц (рис. 6).

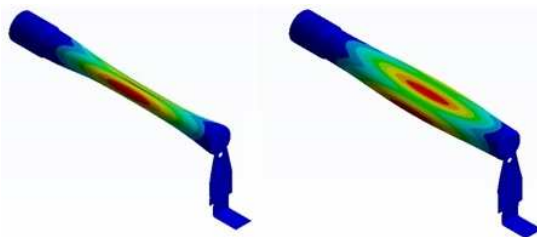


Рис. 6. Формы продольных колебаний резонатора, соответствующие собственным частотам 10783 Гц (слева) и 10785 Гц (справа).

Согласно техническим характеристикам датчика, его рабочая частота равна 11 кГц, в связи с чем модель и полученные по ней результаты можно считать адекватными.

В настройках Transient анализа (анализа переходных процессов) для решения задачи, связанной с взаимодействием газа (воздуха) и твердого тела, создается объект Fluid SolidInterface, представляющий собой поверхность контакта двух сред.

Задается граничное условие Force, определяющее силу, действующую на резонатор со стороны магнитов, изменяющуюся по синусоидальному закону (рис. 7).

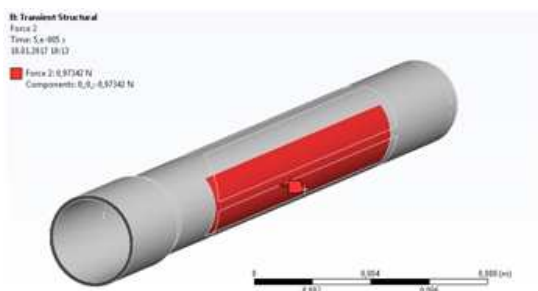


Рис. 7. Сила, действующая на магниты.

Перемещение стенок цилиндра из Transient анализа передавались в модуль Fluid Flow (CFX). Обязательным условием функционирования модели, реализующей связанный расчет, является идентичность настроек длительности одного шага расчета по времени и диапазона расчетного времени в TransientStructural и CFX. В данном случае это 0,00002 с и 0,01 с.

В качестве граничных условий в модуле CFX задается давление, равномерно распределенное по всему объему воздуха. Величины давления заданы 0,5; 1,0; 1,5 атм. (рис. 8).

На основании результатов расчета были построены графики зависимости спектральной плотности от частоты, по которым выявлено, что резонансные частоты находятся в пределах 11-12 кГц (рис. 9).

4. Заключение

Анализ полученных данных математического моделирования датчика дает представление о корректности построенной модели, применение которой позволяет оценить точность прибора на этапе проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

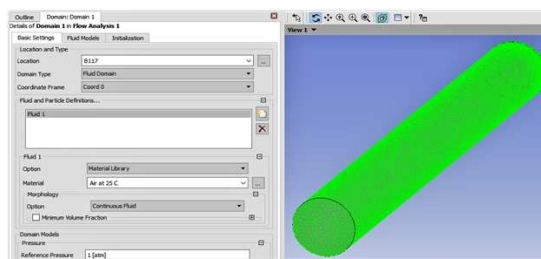


Рис. 8. Граничные условия для расчета датчика с учётом воздуха при давлении 1 атм. Процесс – изотермический, температура равна 25°С.

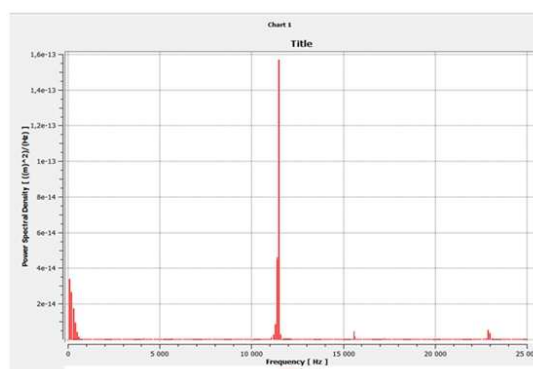


Рис. 9. График зависимости спектральной плотности от частоты.

Помимо этого, изменение параметров модели дает возможности использования ее для оценки работоспособности чувствительного элемента при измерении отличных от давления величин. Частотный датчик давления может послужить общей конструктивной основой для создания унифицированных рядов датчиков средней точности для измерения в широких диапазонах таких величин, как давление, температура, линейные и угловые ускорения, угловые скорости, массовые плотности и вязкоупругие свойства жидкости сред и др. [5]

Развитие численных методов расчета динамики датчиков, связанное с использованием смешанных вариационных принципов, ортогональных финитных функций и моделей наномеханики [8–10], дает возможность развития конструкций датчиков и проведения исследований динамики напряженно-деформированного состояния датчиков на более высоком уровне, поскольку такой подход позволяет находить не только приближенные решения для перемещений, но и для деформаций и напряжений с одинаково высокой точностью и одинаковой гладкостью. Подобными достоинствами численные методы, используемые, например, в ANSYS, не обладают.

Литература

1. Кучерявый А.А. Бортовые информационные системы: Курс лекций / А.А. Кучерявый; под ред. В.А. Мишина и Г.И. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. Ульяновск: УлГТУ, 2004. С. 5-7.
2. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов:

- учебное пособие / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов; под ред. В.А. Мишина. Ульяновск: УлГТУ, 2005. С. 419-433.
3. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах / Пер. с англ. Под ред. А. С. Яроменка. М.: Энергоиздат, 1981. С. 78-98.
 4. Патент СССР №4340588/10, 03.11.1987. Частотный датчик давления // Патент SU №1484068. 2005. Бюл. № 16. / Граур С.И.
 5. Горенштейн И. А. Гидростатические частотные датчики первичной информации. М.: Машиностроение, 1976. С. 12-17.
 6. Агейкин Д.И., Костина Е.И., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965. 928 с.
 7. ТУ14-1-3074-80 Прокат горячекатаный сортовой и листовой, прутки и полоса кованые, проволока и лента из сплава марки 45НХТ (ЭП218), 45НХТ-П (ЭП218-П), 45НХТ-ВИ (ЭП218-ВИ), 45НХТ-ИЛ (ЭП218-ИЛ) – Изменение №13; Введ. 1.12.2017г.
 8. Леонтьев В.Л., Мелентьев А.Ю. Сеточные методы расчета криволинейных стержней // Математическое моделирование. 2003. Т. 15. № 10. С. 95.
 9. Леонтьев В.Л., Михайлов И.С. О построении потенциала взаимодействия атомов, основанном на ортогональных финитных функциях // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9 (134). С. 48-50.
 10. Леонтьев В.Л., Рыков Е.А. Интегральные преобразования, связанные с ортогональными финитными функциями, в задачах спектрального анализа сигналов // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 7. С. 93-100.

MSC2010 65-04

Mathematical modeling of the frequency pressure sensor

E.D. Kalinov¹

Ulyanovsk State University¹

Abstract: Mathematical modeling of the products being developed in order to assess the effectiveness of the design, the impact of changes in the materials, studies of various technical solutions, is used in practice in various industries. The article describes the design and principle of operation of the frequency pressure sensor used in aircraft instrumentation, and its mathematical model.

Keywords: frequency pressure sensor, thin-wall resonator, FSI analysis, Ansys CFX, Ansys Mechanical.

References

1. Kucheryavyj A.A. Bortovye informacionnye sistemy: Kurs lekcij "[Airborne Information Systems: Lecture Course]". Edited by V.A. Mishina, G.I. Klyueva. 2-nd ed. Ul'yankovsk: UIGTU, 2004. P. 5-7.

2. Klyuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov: uchebnoe posobie "[Meters of the aerodynamic parameters of aircraft: tutorial]". Edited by V.A. Mishina. Ul'yanovsk: UIGTU, 2005. P. 419-433.
3. Vul'vet Dzh. Datchiki v cifrovyykh sistemakh "[Transducers in digital systems]". Edited by A. S. YAromenka. M.: Energoizdat, 1981. P. 78-98.
4. Patent SSSR №4340588/10, 03.11.1987. "[Pressure transmitter]". Patent SU №1484068. 2005. Bul. № 16. / Graur S.I.
5. Gorenshtejn I. A. Gidrostatischeckie chastotnye datchiki pervichnoj informacii "[Hydrostatic frequency sensors of primary information]". M.: Mashinostroenie, 1976. P. 12-17.
6. Agejkin D.I., Kostina E.I., Kuznecova N.N. Datchiki kontrolya i regulirovaniya [Monitoring and regulation sensors]. M.: Mashinostroenie, 1965. 928 p.
7. TU14-1-3074-80 Hot-rolled sectional and sheet metal, forged bar and strip, wire and strip from alloy grade 45NHT (EP218), 45NHT-P (EP218-P), 45NHT-VI (EP218-VI), 45NHT-IL (EP218-IL) - Change №13; ent. 1.12.2017.
8. Leont'ev V.L., Melent'ev A.I. Grid methods of calculations curvilinear bars. Matematicheskoe modelirovanie. 2003. Vol. 15, No. 10. P. 95.
9. Leont'ev V.L., Mihajlov I.S. On the construction of the atomic interaction potential based on orthogonal finite functions. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. No. 9 (134). P. 48-50.
10. Leont'ev V.L., Rykov E.A. Integral transformations associated with orthogonal finite functions in problems of spectral analysis of signals. Matematicheskoe modelirovanie. 2006. Vol. 18, No. 7. P. 93-100.