

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-75-82>

МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ГЕНЕРАТОРОВ ЗВУКА ДЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

© Андрей Яковлевич Стерлин*, Евгений Александрович Сурков, Иван Сергеевич Иванушкин

Центральный Аэрогидродинамический институт, Россия, 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д. 1; *e-mail: andrey.sterlin@tsagi.ru

Статья поступила 6 августа 2023 г. Поступила после доработки 17 октября 2023 г. Принята к публикации 30 октября 2023 г.

При определении ресурса современных летательных аппаратов необходимо учитывать воздействие на конструкцию интенсивных пульсаций звукового давления — шума, создаваемого работой двигателей, турбулентности воздушной среды, изменения режимов полета и т.д. Поэтому в наземных условиях в специальных реверберационных камерах проводят испытания на акустическую прочность и усталость. В процессе проведения этих испытаний следует создать определенную спектральную плотность звукового давления, воздействующего на исследуемую конструкцию согласно утвержденным нормам. Для получения необходимого силового воздействия на конструкцию используют три типа звуковых генераторов — низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные, каждый из которых должен создавать сигналы с требуемой спектральной плотностью и постоянной амплитудой шумового воздействия в своем диапазоне частот. В настоящее время ведется разработка высокочастотного генератора звука в диапазоне частот 600 – 2000 Гц. Цель данной работы — конструктивное совершенствование подвижного элемента клапанного узла в целях увеличения электромагнитной силы, движущей затвор клапанного узла модулятора потока газа, минимизации электромагнитных сил сопротивления движению, а также уменьшения массы подвижного элемента. Увеличение электромагнитной движущей силы достигнуто за счет применения двух электромагнитных движителей. В работе предложены конструктивные изменения, которые позволили снизить электромагнитные силы сопротивления (силы Лоренца, силы Фуко), а также уменьшить массу подвижной части клапанного узла (затвора). Данная задача решена посредством перфорации затвора в тех его частях, которые находятся в зазорах магнитопроводов электромагнитных движителей.

Ключевые слова: генератор звука; электропневматический преобразователь; модулятор; клапанный узел; акустическая усталость; звуковое давление; реверберационная камера; спектральная плотность.

METHOD FOR EXTENDING THE FREQUENCY RANGE OF SOUND GENERATORS FOR STRENGTH ACOUSTIC TESTS

© Andrey Ya. Sterlin*, Evgenij A. Surkov, Ivan S. Ivanushkin

Central Aerohydrodynamic Institute; 1, Zhukovskogo ul., Zhukovskij, Moscow oblast', 140180, Russia; *e-mail: andrey.sterlin@tsagi.ru

Received August 6, 2023. Revised October 17, 2023. Accepted October 30, 2023.

When determining the service life of modern aircraft, it is necessary to take into account the impact of intense pulsations of sound pressure (the noise created by the operation of engines, air turbulence, changes in flight regimes), etc. on the aircraft structure. Therefore, in ground conditions, acoustic strength and fatigue tests are carried out in special reverberation chambers. During these tests it is necessary to provide a certain spectral density of the sound pressure affecting the structure under study according to the approved standards. Three types of sound generators are used to obtain the desired force impact on the structure: low-frequency, medium-frequency and high-frequency, which must create signals with the required spectral density and constant amplitude of the noise impact each in its frequency range. Nowadays, a high-frequency sound generator operating in the frequency range of 600 – 2000 Hz is being developed. The goal of the study is to modify and improve the moving element of the valve assembly to increase the electromagnetic force driving the valve gate of the valve assembly of a gas flow modulator; minimize the electromagnetic forces hindering movement, and to reduce the mass of the moving element. An increase in electromagnetic driving force is achieved using two electromagnetic thrusters. The proposed modifications reduce hindering electromagnetic forces (Lawrence forces, Foucault forces), and decrease the mass of

a movable part of the valve assembly (gate). The goal is achieved by perforating the gate in those parts that are located in magnetic gaps of electromagnetic propulsion.

Keywords: sound generator; electropneumatic converter; modulator; valve assembly; acoustic fatigue; acoustic pressure; reverberation chamber; spectral density.

Введение

Акустические испытания предназначены для определения прочностных и усталостных характеристик различных конструктивных элементов и приборов авиационно-космической техники [1, 2]. В зависимости от испытываемых образцов акустические нагрузки проводят в одном из трех частотных диапазонов звука (шума): низкочастотном — 20 – 150 Гц; среднечастотном — 150 – 600 Гц; высокочастотном — 600 – 2000 Гц [3].

В 80 – 90-х годах прошлого века в СССР был разработан ряд низкочастотных и среднечастотных генераторов звука [4 – 7], с использованием которых испытан космический аппарат «Буран». В качестве высокочастотного генератора звука применяли генератор EPT-200 фирмы LING (США) [8 – 11]. Отечественных высокочастотных генераторов в СССР не было.

Российские реверберационные камеры оснащены отечественными среднечастотными генераторами звука. Для высокочастотных акустических испытаний применяют иностранные генераторы США фирмы LING и Франции фирмы S.E.R.E.M.E. [12].

В настоящее время в Центральном аэродинамическом институте (ЦАГИ) имени профессора Н. Е. Жуковского ведется разработка высокочастотного генератора звука [13 – 17]. Основное внимание уделено повышению его быстродействия посредством увеличения электромагнитной силы, движущий затвор клапанного узла

модулятора потока газа, а также уменьшению массы затвора и минимизации сил сопротивления, препятствующих его движению [18, 19].

Цель работы — внесение конструктивных изменений подвижного элемента клапанного узла в целях увеличения быстродействия генератора звука.

Основным элементом звукового генератора, определяющим его мощность и частотные характеристики, является модулирующий клапан. Наиболее эффективной представляется конструкция высокочастотного модулирующего клапана, состоящая из двух концентрически-расположенных и вставленных друг в друга с малым зазором полых цилиндров (подвижного и неподвижного), изготовленных из легких сплавов и имеющих одинаковые щели для прохода рабочего газа (рис. 1). Щели расположены перпендикулярно оси цилиндров таким образом, чтобы при одном из положений подвижного цилиндра относительно неподвижного они полностью совпали, т.е. клапан будет открыт. При движении подвижного цилиндра щели начинают перекрываться до полного закрытия. За исходное выбрано такое положение клапана, при котором щели наполовину приоткрыты. В этом случае снижаются энергетические затраты на осуществление возвратно-поступательного движения клапана от открытого до закрытого состояния. Изменение пропускной способности клапанного узла по случайному закону приводит к колебанию потока газа, что порождает звуковой шум.

Рабочий газ под давлением поступает в клапанный узел из форкамеры (рис. 2). Промодулированный клапаном поток отводится через выходную трубу и рупор в испытательную камеру. Форкамера звукового генератора является ресивером, сглаживающим скачки давления, возникающие в результате работы клапанного узла.

Для приведения в движение подвижного цилиндра модулирующих клапанов высоко- и среднечастотных генераторов используют кондуктивный и индуктивный типы электромагнитных приводов, которые могут создавать переменное магнитное поле высокой частоты.

При индуктивном способе катушка возбуждения находится на неподвижной части статора клапанного узла и создает в рабочем зазоре магнитопровода переменное магнитное поле, в котором располагается часть подвижного цилиндра, представляющего собой короткозамкнутый элек-



Рис. 1. Модулятор электропневматического преобразователя WAS-3000

Fig. 1. Modulator of an electropneumatic converter WAS-3000

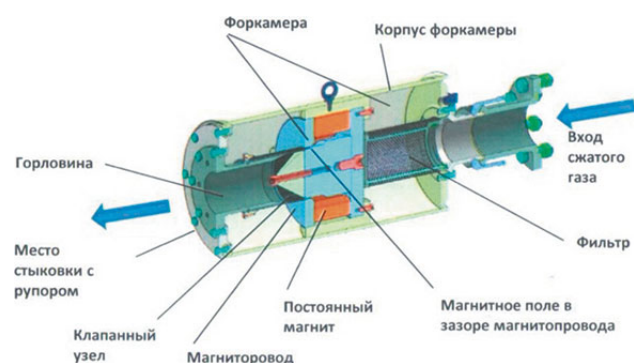


Рис. 2. Электропневматический преобразователь WAS-3000

Fig. 2. Electropneumatic converter WAS-3000

тропроводный виток. При подаче переменного тока в катушку возбуждения в короткозамкнутом витке подвижного цилиндра индуцируется переменный ток. Взаимодействие поля, создаваемого этим током, с магнитным потоком в зазоре магнитопровода приводит к возвратно-поступательному движению подвижного цилиндра — затвора клапанного узла модулятора.

Достоинство индуктивного способа — подвижный элемент не связан проводами с источником тока возбуждения, недостаток — в магнитном поле находится только один короткозамкнутый виток, на котором индуцируется ток, необходимый для движения затвора. Для достижения высокой частоты его перемещения требуется большой ток, что приводит к перегреву как затвора, так и самой катушки возбуждения. Чтобы уменьшить нагрев, необходимо разрабатывать дополнительные технические средства охлаждения, например, водяные, что существенно усложнит конструкцию генератора.

При кондуктивном способе катушка возбуждения располагается на подвижном цилиндре и состоит из большого количества витков, поэтому для получения большой движущей силы необходим значительно меньший ток, чем при индуктивном способе. В этом заключается большое преимущество кондуктивного способа. Недостаток его состоит в том, что катушка наматывается на подвижный элемент, увеличивает его массу и требует электрическую проводную связь с неподвижной частью модулятора. Однако большой выигрыш в движущей силе и уменьшении тока возбуждения делает кондуктивный способ предпочтительным.

Тем не менее для повышения частоты колебаний все-таки следует увеличить ток возбуждения, что приводит к росту температуры модулятора. На рис. 3 представлены зависимости тока возбуждения и температуры обмотки возбуждения генератора WAS-3000 от частоты перемеще-

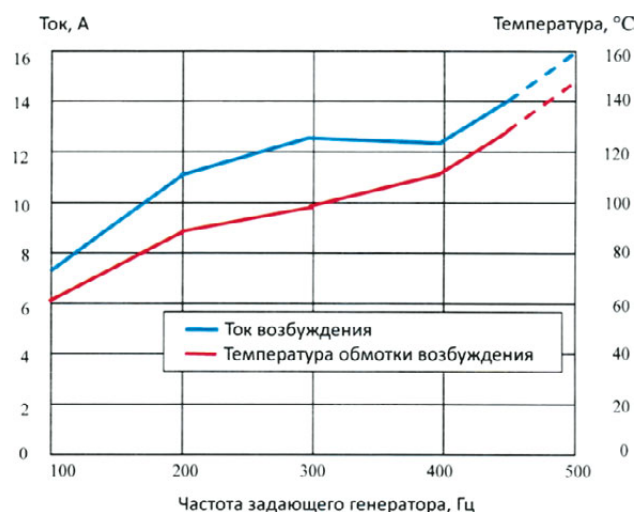


Рис. 3. Зависимость тока возбуждения и температуры модулятора от частоты при постоянной амплитуде колебаний

Fig. 3. Frequency dependence of the excitation current and modulator temperature at a constant oscillation amplitude

ния подвижной части клапанного узла (затвора) при постоянной амплитуде колебания.

Метод повышения частоты перемещений затвора генератора звука

Обмотка возбуждения и часть подвижного цилиндра (основа), на которую она намотана, движутся в магнитном поле зазора магнитопровода модулятора. В основе и самой обмотке возбуждения индуцируются токи Лоренца и токи Фуко, создающие сопротивление движению подвижного цилиндра. При допустимом токе возбуждения и выбранной максимальной движущей силе изменение параметров обмотки возбуждения невозможно, но выполнимо изменение конструкции основы, на которой она располагается. Рассмотрим конструкцию подвижного элемента, приведенного на рис. 4 (обмотки возбуждения, располагаемые по краям цилиндра, не показаны).

Подвижный элемент (полый цилиндр) имеет две группы щелей. Одна группа щелей перпендикулярна оси, проходящей по центру цилиндра. Эти щели при перемещении подвижного цилиндра во взаимодействии с щелями неподвижного цилиндра модулируют газовый поток. Другая группа щелей, параллельная оси подвижного цилиндра (см. рис. 4), находится по его краям на основе, на которую наматывается обмотка возбуждения, т.е. на той части цилиндра, которая перемещается в магнитном зазоре магнитопровода электромагнитного движителя. Перфорация этих участников подвижного цилиндра в разы уменьшила силы Лоренца и силы Фуко, которые препятствуют его движению, и на десятки процентов снизила массу цилиндра.

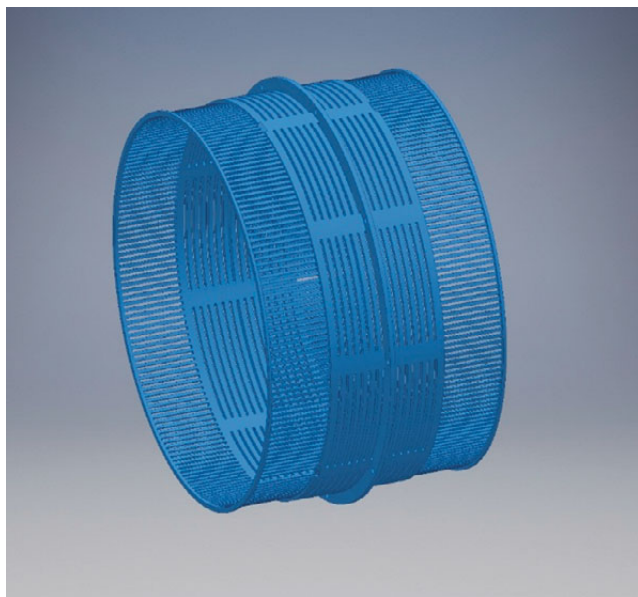


Рис. 4. Внешний вид подвижного цилиндра клапанного узла

Fig. 4. Appearance of the movable cylinder of a valve assembly

Перед определением эффекта от указанной перфорации был проведен прочностной расчет основы, на которой она выполнена.

Расчет на прочность подвижной части модулятора

Цель расчета — нахождение оптимальных размеров прорезей и перемычек в основе подвижного цилиндра в месте расположения обмоток возбуждения, т.е. определение минимальной ширины перемычек и их количества, обеспечивающих необходимую прочность.

Расчет вариантов подвижной части клапанного узла модулятора (ПЧМ) проводили методом конечных элементов. Определяли напряжения и деформации под действием усилия 200 кгс. Влияние витков обмотки на жесткость конструкции ПЧМ не учитывалось. Материал изделия — алюминиевый сплав АК4-1 (допускаемые напряжения $[\sigma] = 150$ МПа). Расчет проводили на фрагменте подвижного цилиндра.

Вариант первый. При расчетах нижними связями называли перемычки, образовавшиеся после перфорации основы, на которой размещается обмотка возбуждения, верхними связями — перемычки, образовавшиеся при изготовлении щелевого клапанного узла. Количество нижних связей — 36, верхних — 18. Скругления отсутствуют. Ширина отверстий — 5 мм, ширина нижних связей — 5 мм, ширина верхних связей — 4 мм. Усилие направлено вниз. Общий вид модели, распределения напряжений и перемещений показаны на рис. 5.

Максимальные напряжения $\sigma_{\max} = 92,65$ МПа, запас прочности по временному сопротивлению — 4,1.

Вариант второй. Исследовали модель с увеличенным количеством вертикальных связей. Количество нижних связей — 72, верхних — 18. Скругления имеются. Ширина отверстий — 3,5 мм; ширина нижних связей — 1,5 мм, верхних — 4 мм. Усилие направлено вниз. Общий вид модели, напряжения и перемещения показаны на рис. 6.

Максимальные напряжения $\sigma_{\max} = 65,84$ МПа, запас прочности по временному сопротивлению — 5,8. При этом масса подвижного цилиндра снизилась на 32,5 %.

Расчет собственных частот исходной модели

На рис. 7 для наглядности в гипертрофированном виде показаны формы собственных колебаний конструкции подвижной части модулятора (ПЧМ) и соответствующие значения частот. При наладке следует избегать продолжительной работы изделия на данных режимах.

Все рассмотренные варианты подвижной части модулятора с точки зрения их прочности могут быть использованы при создании демонстратора высокочастотного генератора звука. Оптимальный вариант ее конструкции следует выбрать после экспериментального исследования макетного образца на базе ПЧМ генератора ГЗ-3000.

Обсуждение результатов

Перфорация подвижного цилиндра в местах (основах), где располагаются обмотки возбуждения, входящие в кольцевые зазоры магнитопроводов модулятора, в разы снижает силы Лоренца и Фуко, препятствующие движению. Минимальная ширина перемычек между щелями при перфорации должна быть ограничена только условиями прочности подвижного цилиндра. В опытном образце ширина щели составляет 3,5 мм, а ширина перемычек — 1,5 мм, т.е. суммарная площадь всех перемычек равняется 33 % от площади неперфорированных основ. Следовательно, магнитный поток, равный произведению индукции на площадь, ею пронизываемую, сократится в три раза, снизится и ЭДС. Кроме того, в силу увеличения электрического сопротивления основ на 10 % уменьшается индуцируемый в них ток. В результате снижения магнитного потока и индуцируемого тока сила Лоренца, препятствующая движению цилиндра, уменьшается более чем в три раза.

Вихревые токи Фуко зависят от площади, пронизываемой переменным магнитным пото-

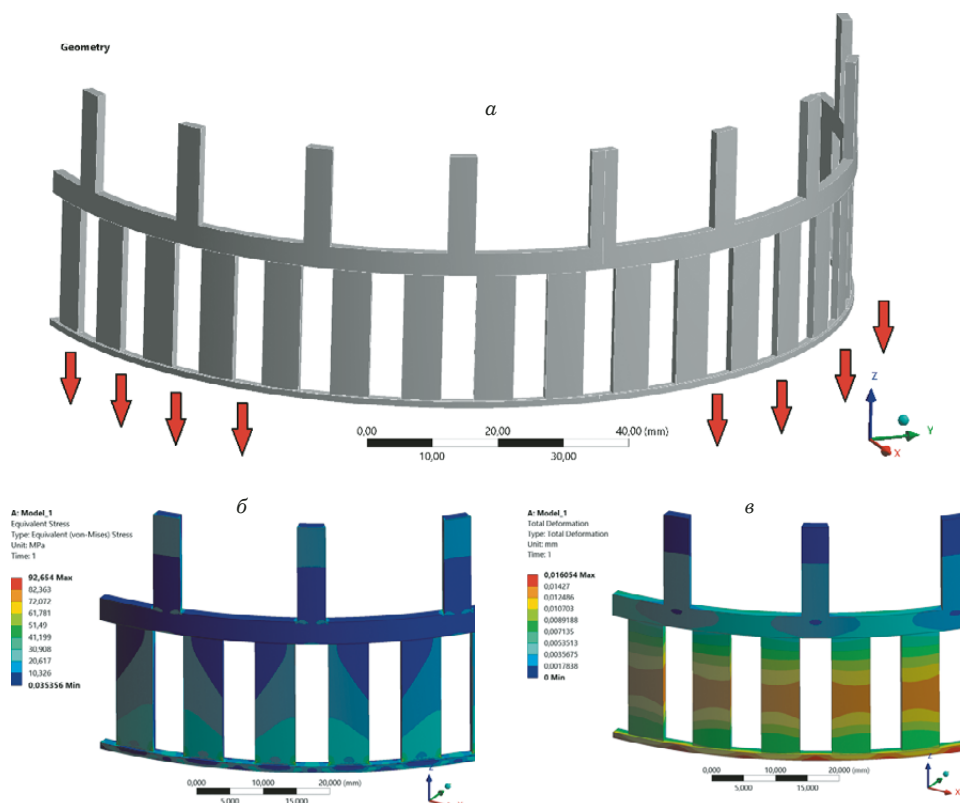


Рис. 5. Общий вид исходной модели (а), эквивалентные напряжения (МПа) (б) и суммарные перемещения (мм) (в)

Fig. 5. General view of the original model (a), equivalent stresses (MPa) (b), total displacements (mm) (c)

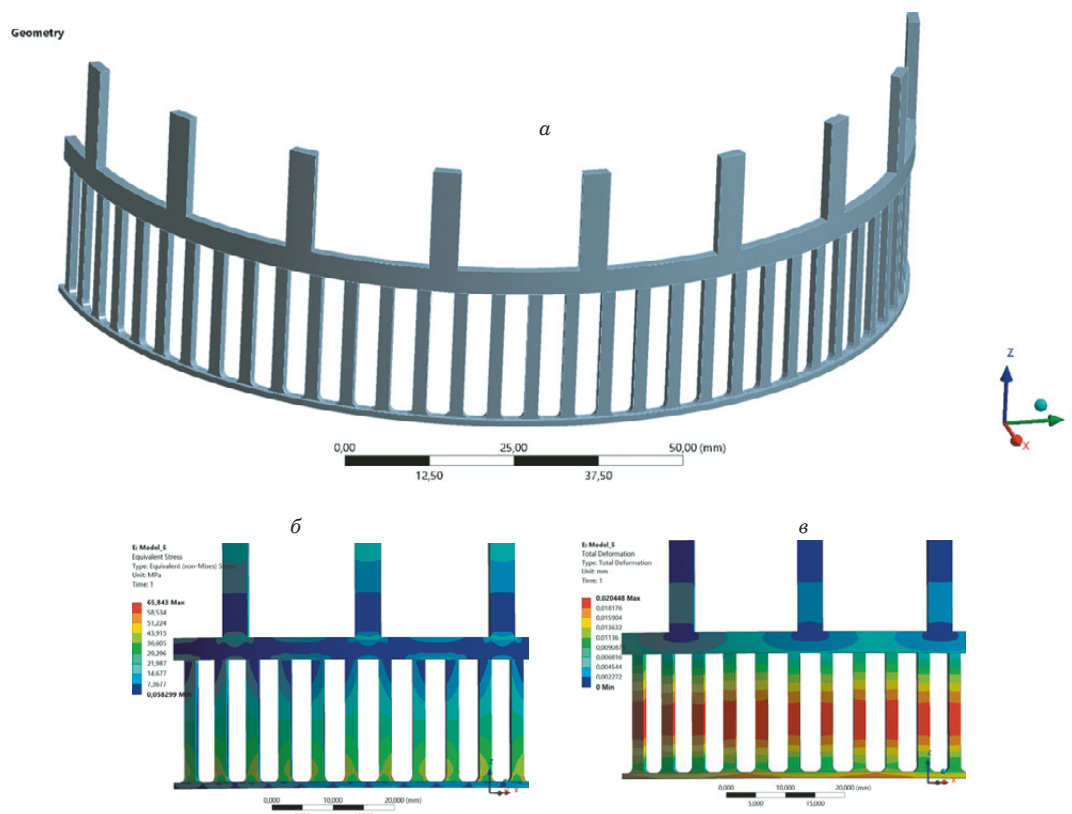


Рис. 6. Общий вид модели с увеличенным количеством связей (а), эквивалентные напряжения (МПа) (б) и суммарные перемещения (мм) (в)

Fig. 6. General view of the model with increased number of links (a), equivalent stresses (MPa) (b), total displacements (mm) (c)

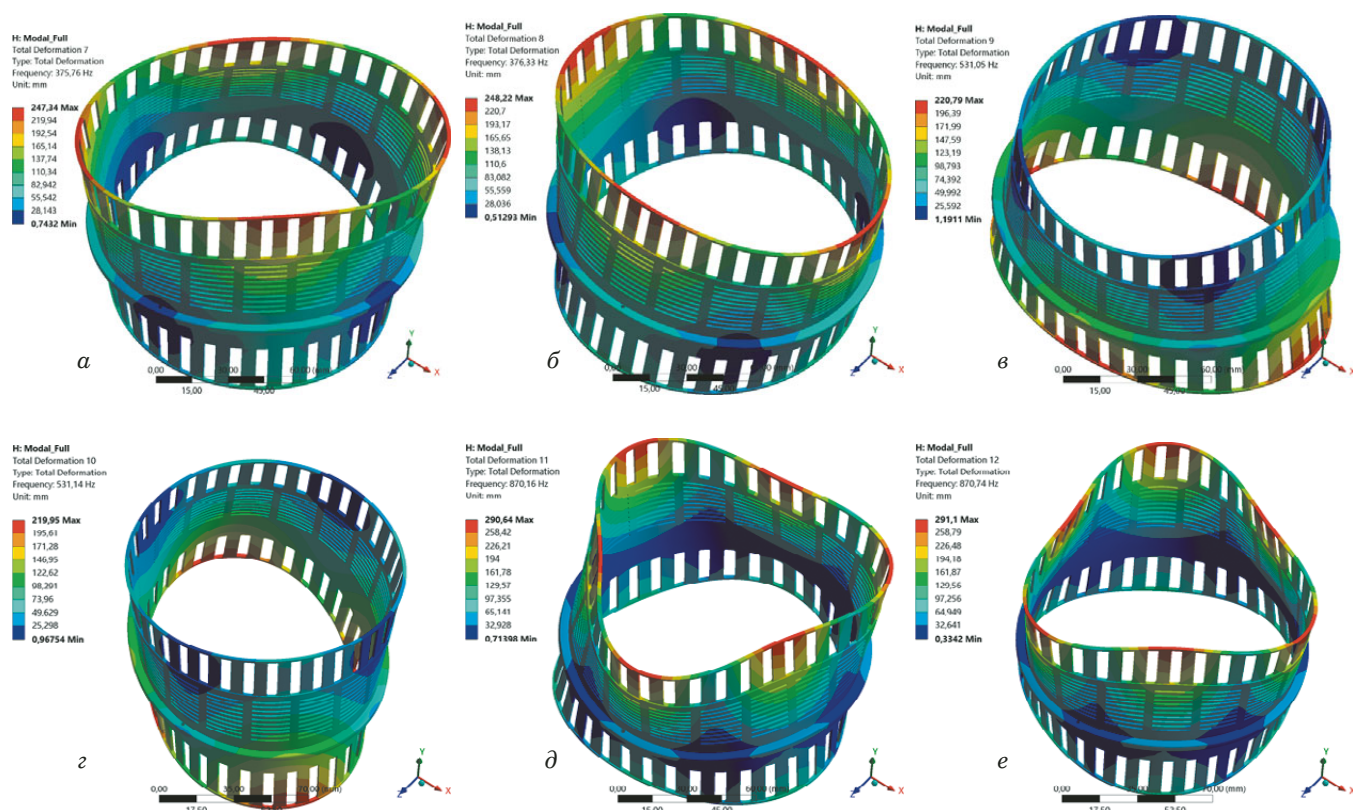


Рис. 7. Результаты расчета собственных частот исходной модели: а — 1-я (375,76 Гц); б — 2-я (376,33 Гц); в — 3-я (531,05 Гц); г — 4-я (531,14 Гц); д — 5-я (870,16 Гц); е — 6-я (870,74 Гц)

Fig. 7. Strength calculations for natural frequencies of the original model: а — the 1st (375.76 Hz); б — the 2nd (376.33 Hz); в — the 3rd (531.05 Hz); г — the 4th (531.14 Hz); д — the 5th (870.16 Hz); е — the 6th (870.74 Hz)

ком. При ширине перемычек 1,5 мм после перфорации диаметры вихревых токов по сравнению с токами в неперфорированной основе (шириной 20 мм) снижаются в 13 раз, т.е. токи Фуко резко падают. Снижение сил электромагнитного сопротивления подтверждено экспериментально (рис. 8).

Для определения сил сопротивления выбираем режим работы генератора в области резонанса. Из рис. 8 видно, что при неперфорированной основе резонанс на частоте 350 Гц малозаметен. Резонансный пик составляет не более 18,75 % при токе резонанса 6,5 А. При перфорированной основе пик резонанса достигает 75 % при токе резонанса, равном 2 А. С учетом резонансных пиков и резонансных токов в обоих случаях можно, предполагая линейность процессов, сделать вывод, что электромагнитное сопротивление уменьшилось в 13 раз, как и прогнозировалось расчетом.

При штатной работе генератора звука в режиме создания шумовой акустической нагрузки резонансные явления маловероятны. Практически они используются только в процессе испытаний при наладке генератора звука.

Из сказанного следует, что снижение сил сопротивления при перфорации основ, на кото-

рых намотаны катушки возбуждения, должно существенно повысить рабочие частоты генератора звука.

Заключение

Предложен принцип снижения сил электромагнитного сопротивления движению затвора (подвижного цилиндра) клапанного узла высокочастотного генератора звука. Расчетным и экспериментальным путем показано, что силы сопротивления снижаются более чем в 15 раз и появляется возможность повышения частоты колебаний генерируемого потока газа до величины ~1500 Гц.

Финансирование работы

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФАУ «ЦАГИ». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев В. С., Каурова Н. Ф. Установки для испытаний на акустическую прочность: обзор. — М.: ЦАГИ, БНТИ, 1968. Вып. № 565. — 254 с.
2. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории / Межгосударственный авиационный комитет. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2009. — 266 с.
3. Николаев В. С., Каурова Н. Ф. Испытания на акустическую прочность в реверберационных камерах и каналах бегущей волны. Обзор № 610. — М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1982. — 183 с.
4. Пат. 2040043. Российская Федерация. МКИ G10K7/00. Генератор звука / Тарчевский Е. П., Миодушевский П. В.; заявитель и патентообладатель ЦАГИ. — № 93027581/10; заявл. 13.05.93; опубл. 20.07.95. Бюл. № 10.
5. А. с. 917193 СССР, МКИ G10K7/06. Устройство для создания акустических волн / Васильев А. В., Ревнивцев В. С., Маслов Е. Н. (СССР). — № 2909113/18-10; заявл. 11.04.80; опубл. 30.03.82. Бюл. № 12.
6. Пат. SU 1651320, МКИ G10K7/06. Электропневматический генератор звука / Обер В. П., Колеников А. И., Патрикеев Л. И., и др.; заявитель и патентообладатель ЦАГИ. — № 4489994/10; заявл. 24.10.88; опубл. 23.05.91. Бюл. № 19.
7. Пат. RU 2040043, МКИ G10K7/06. Генератор звука / Миодушевский П. В., Тарчевский Е. П., заявитель и патентообладатель ЦАГИ. — № 93027581/10; заявл. 13.05.93; опубл. 20.07.95. Бюл. № 10.
8. Hughes W. O., McNelis M. E., Harman A. D., and McNelis A. M. The Development of the Acoustic Design of NASA Glenn Research Center's New Reverberant Acoustic Test Facility / NASA Glenn Research Center. — Cleveland, OH, 2011. — 344 p.
9. Hughes W. O., McNelis M. E., Harman A. D., and McNelis A. M. The Testing Behind the Test Facility: The Acoustic Design of the NASA Glenn Research Center's World-Class Reverberant Acoustic Test Facility. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, October, 2010. P. 2.
10. Stevens C. L. Measurement of Acoustic Power of High Intensity Sound Sources / J. Environm. Sci. 1976. Vol. 1 – 11. N 1. P. 7 – 74.
11. Spottswood M. S., Eason T. G., Chona R. A structural perspective on the challenges associated with analyzing a reusable hypersonic platform / Rasd 2013. 11 International Conference, 1 – 3 July, 2013, Pisa.
12. <http://www.sereme.com> (дата обращения: 21.04.2023).
13. Галеев А. Г., Захаров Ю. В., Макаров В. П., Родченко В. В. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. — М.: Издательство МАИ, 2014 — 283 с.
14. Пат. 2707587. Российская Федерация. МПК G10K7/06 (2006.01). Способ генерации звука для испытаний конструкций и устройство для его реализации / Стерлин А. Я., Фурман А. В., Ким С. К., Куценко С. А.; заявитель и патентообладатель ЦАГИ. — № 2018142903; заявл. 05.12.2018; опубл. 28.11.2019. Бюл. № 34.
15. Пат. 2696946. Российская Федерация. МПК G10K7/06 (2006.01). Электропневматический генератор звука / Стерлин А. Я., Фурман А. В., Ким С. К., Зверев Н. В., заявитель и патентообладатель ЦАГИ. — № 2018142901; заявл. 05.12.2018, опубл. 07.08.2019. Бюл. № 22.
16. Пат. 2742283. Российская Федерация. МПК G10K7/06 (2006.01). Модулятор потока газа / Стерлин А. Я., Фурман А. В.; заявитель и патентообладатель ЦАГИ. — № 2020120957; заявл. 25.06.2020; опубл. 04.02.2021. Бюл. № 4.
17. Стерлин А. Я., Фурман А. В., Ким С. К., Куценко С. А. Разработка высокочастотного генератора звука для акустических испытаний авиационных конструкций: Модели и методы аэродинамики / Международная школа-семинар. Евпатория, 4 – 11 июня 2019 г. — 148 с.
18. Стерлин А. Я. Принцип построения высокочастотных модуляторов звука для акустических испытаний на прочность и

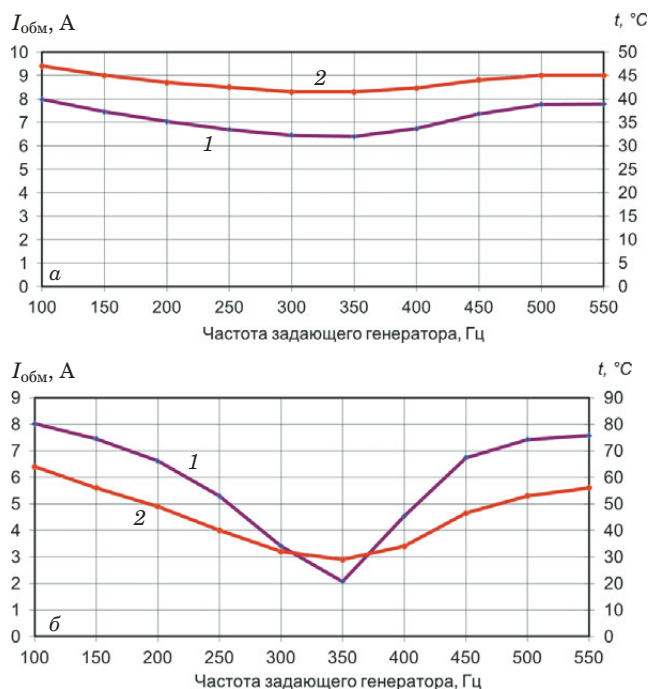


Рис. 8. Графики АЧХ (1) и температуры (2) модулятора без перфорации (а) и с перфорацией (б)

Fig. 8. Graphs of the modulator frequency response (1) and temperature (2) without perforation (a) and with perforation (b)

ресурс летательных аппаратов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 11. С. 60 – 66.
DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-11-60-66

19. Стерлин А. Я. Метод построения генератора звука для акустических испытаний на прочность механических конструкций / Ученые записки ЦАГИ. 2022. Т. LIII. № 4. С. 62 – 68.

REFERENCES

1. Nikolaev V. S., Kaurova N. F. Installations for acoustic strength tests: a review. — Moscow: TsAGI, 1968. Issue N 565. — 254 p. [in Russian].
2. Aviation rules. Part 25. Airworthiness standards for transport category aircraft / Interstate Aviation Committee. — Moscow: Aviaizdat, 2009. — 266 p. [in Russian].
3. Nikolaev V. S., Kaurova N. F. Acoustic strength tests in reverberation chambers and traveling wave channels: a review. — Moscow: TsAGI, SNTI, 1982. Vol. 610. — 183 p. [in Russian].
4. RF Pat. 2040043, MKI G10K7/00. Sound generator / Tarchevsky E. P., Miodushevsky P. V.; applicant TsAGI. — N 93027581/10; appl. 13.05.93; publ. 20.07.95 / Byull. Otkryt. Izobret. N 10 [in Russian].
5. Author's certificate 917193 USSR, MKI G10K7/06. Device for creating acoustic waves / Vasiliev A. V., Revnitssev V. S., Maslov E. N. (USSR). — N 2909113/18-10; appl. 11.04.80; publ. 30.03.82 / Byull. Otkryt. Izobret. N 12 [in Russian].
6. SU Pat. 1651320, MKI G10K7/06. Electropneumatic sound generator / Ober V. P., Kolennikov A. I., Patrikeev L. I. [et al.]; applicant TsAGI. — N 4489994/10; appl. 24.10.88; publ. 23.05.91 / Byull. Otkryt. Izobret. N 19 [in Russian].
7. RF Pat. 2040043, MKI G10K7/06. Sound generator / Miodushevskij P. V., Tarchevskij E. P., applicant TsAGI. — N 93027581/10; appl. 13.05.93; publ. 20.07.95 / Byull. Otkryt. Izobret. N 10 [in Russian].
8. Hughes W. O., McNelis M. E., Harman A. D., and McNelis A. M. The Development of the Acoustic Design of NASA Glenn Research Center's New Reverberant Acoustic Test Facility

- ity / NASA Glenn Research Center. — Cleveland, OH, 2011. — 344 p.
9. **Hughes W. O., McNelis M. E., Harman A. D., and McNelis A. M.** The Testing Behind the Test Facility: The Acoustic Design of the NASA Glenn Research Center's World-Class Reverberant Acoustic Test Facility. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, October, 2010. P. 2.
 10. **Stevens C. L.** Measurement of Acoustic Power of High Intensity Sound Sources / J. Environm. Sci. 1976. Vol. 1 – 11. N 1. P. 7 – 74.
 11. **Spottswood M. S., Eason T. G., Chona R.** A structural perspective on the challenges associated with analyzing a reusable hypersonic platform / Rasd 2013. 11 International Conference, 1 – 3 July, 2013, Pisa.
 12. <http://www.sereme.com> (accessed: 21.04.2023).
 13. **Galeev A. G., Zakharov Yu. V., Makarov V. P., Rodchenko V. V.** Design of set-up for testing objects of rocket and space technology. — Moscow: Izd. MAI, 2014. — 283 p. [in Russian].
 14. RF Pat. 2707587, MPK G10K7/06 (2006.01), Sound generation method for testing structures and device for its implementation / Sterlin A. Ya., Furman A. V., Kim S. K., Kutsenko S. A.; applicant TsAGI. — N 2018142903; appl. 05.12.2018; publ. 28.11.2019 / Byull. Otkryt. Izobret. N 34 [in Russian].
 15. RF Pat. 2696946, MPK G10K7/06 (2006.01) Electropneumatic sound generator / Sterlin A. Ya., Furman A. V., Kim S. K., Zverev N. V.; applicant TsAGI. — N 2018142901; appl. 05.12.2018; publ. 07.08.2019 / Byull. Otkryt. Izobret. N 34 [in Russian].
 16. RF Pat. 2742283, MPK G10K7/06 Gas flow modulator / Sterlin A. Ya., Furman A. V.; applicant TsAGI. — N 2020120957; appl. 25.06.2020; publ. 04.02.2021 / Byull. Otkryt. Izobret. N 4 [in Russian].
 17. **Sterlin A. Ya., Furman A. V., Kim S. K., Kutsenko S. A.** Development of a high-frequency sound generator for acoustic testing of aircraft structures; Models and Methods in Aerodynamics/ International School-Seminar. Evpatoriya June, 4 – 11, 2019. — 148 p. [in Russian].
 18. **Sterlin A. Ya.** The design concept of high-frequency sound modulators for acoustic tests for the strength and flying life on an aircraft / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 11. P. 60 – 66 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-11-60-66
 19. **Sterlin A. Ya.** Method of constructing sound generator for acoustic strength testing of mechanical structures / Uch. Zap. TsAGI. 2022. Vol. LIII. N 4. P. 62 – 68 [in Russian].