УДК 534.1

ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ КОРПУСОВ ТЕРМИНАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ КОММУТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СООБЩЕНИЙ ДЛЯ АВИАДИСПЕТЧЕРОВ

© Георгий Константинович Корендясев¹, Михаил Юрьевич Асатуров²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

korenduba@gmail.com

²Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Алмаз»
имени академика А.А. Расплетина» (ПАО «НПО «Алмаз»), Москва, Россия

dmd204@yandex.ru

Аннотация. Данная работа посвящена повышению виброустойчивости тонкостенных перфорированных корпусов терминального оборудования систем коммутации речевых сообщений для авиадиспетчеров. Проведено аналитическое и конечноэлементное моделирование колебаний решеток охлаждения терминальных устройств. По результатам моделирования предложены пути к повышению собственных частот корпусов и снижению помех при воспроизведении речевой информации.

Ключевые слова: собственные частоты колебаний, системы коммутации речевых сообщений, терминалы связи, колебания перфорированных оболочек, конечноэлементная модель, перфорированный лист, охлаждение.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект № 19-19-00065.

ENHANCEMENT OF VIBRATION STABILITY OF TERMINAL EQUIPMENT CASES OF VOICE COMMUNICATION CONTROL SYSTEMS (VCCS) FOR AIR TRAFFIC CONTROLLERS

© G.K. Korendyasev¹, M.U. Asaturov²

¹Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

korenduba@gmail.com

²PJSC "ALMAZ R&P", Moscow, Russia

dmd204@yandex.ru

Abstract. The following research focuses on the enhancement of vibration stability of thinwalled perforated cases of terminal equipment of voice communication control systems (VCCS) for air

traffic controllers (ATC). Analytical and finite-element modelling of oscillation of cooling grills of terminal equipment was carried out. Based on the results of the modelling certain ways of increasing natural frequencies of cases and reducing voice reproduction interference are presented here.

Keywords: *natural oscillation frequency, voice communication control system (VCCS), telecommunication terminals, oscillations of perforated shells, finite-element model, perforated sheet, cooling.*

Acknowledgements. *The research supported by Russian Science Foundation, project No 19-19-00065.*

Одной из особенностей цифровых систем коммутации речевой связи (СКРС) [1], применяемых для управления воздушным движением является низкий уровень шума терминального оборудования. Нормы шума, установленные для рабочего места авиадиспетчера не должны превышать 50 дБ. Высокие требования к надежности СКРС определяют их архитектуру. Наиболее надежным является сочетание сетевой распределенной архитектуры и децентрализованной терминальной архитектуры. Подобная структура предполагает, что функции по установлению соединения телефонной и радиосвязи и управлением этим соединением (включая обработку речевой и сигнальной информации) выполняются индивидуальными процессорами терминала и интерфейсным оборудованием, участвующим в этом соединении. Значительный объем вычислительных операций, выполняемых терминальным оборудованием обуславливает существенную загрузку процессора материнской платы терминала, что приводит к тепловыделениям равным примерно 100 Ватт на каждом терминале. При температуре более 60° С производительность процессора начинает резко снижаться и вероятность отказа оборудования увеличивается. Следовательно, для стабильной работы процессора требуется эффективное охлаждение. Ресурс терминального оборудования составляет не менее 10 лет. Это условие в сочетании с требованиями низкого уровня шума не позволяют использовать для охлаждения процессора терминала активные устройства (вентиляторы, элементы Пельтье и т.д. Водяное охлаждение или охлаждение с помощью элементов Пельтье является дорогостоящим и ненадежным. Таким образом оптимальным решением для данного типа устройств является пассивное охлаждение. Пассивное охлаждение определяет специфические конструктивные особенности корпусов:

- применение алюминиевых или медных радиаторов с большой площадью теплоотвода;
- применение тепловых интерфейсов между деталями корпуса;
- применение тонкостенных конструкций, в ряде случаев выполненных из перфорированного металла, для создания конвективного теплообмена с внешней средой.

Конструктивно корпуса выполнены в виде моноблока, изготовленного из алюминиевого сплава (рис.1). Таким образом, весь корпус терминала выполняет функцию радиатора.

Такое решение позволяет получить большую поверхность теплоотвода, а следовательно эффективное охлаждение процессора материнской платы. Отсутствие стыков в моноблочной конструкции существенно снижает термическое сопротивление корпуса. Для вывода тепла из внутренних полостей корпуса используются решетки из перфорированного листового металла (рис 1). Суммарная площадь отверстий в перфорированном листе должна обеспечивать эффективный конвективный теплообмен с окружающей средой. При выборе типа перфорации и толщины листа становится актуальной задача определения собственных

частот деталей из перфорированного листового металла и установлению зависимостей между параметрами перфорации и частотными характеристиками конструкции.

Рис.1. Общий вид терминала связи.

Собственные частоты моноблочного корпуса как правило находятся выше полосы пропускания голосового канала, тогда как собственные частоты нежестких элементов корпуса, таких как решетки из перфорированного металла часто попадают в голосовой диапазон частот создавая помехи при воспроизведении звука.

В телефонии используется голосовой диапазон частот с полосой пропускания от 300 до 3400 Гц [2], однако наибольшее влияние на помехоустойчивость терминалов связи вызывают частоты от 20 до 700 Гц. Поэтому при проектировании терминалов необходимо учитывать, что собственные частоты конструкции должны быть не ниже 700Гц.

Расчет собственных частот колебаний вентиляционных решеток, изготовленных из перфорированного листа является нетривиальной задачей. Теоретические основы расчета собственных частот колебаний оболочек с отверстиями приведены в работе [3,4,5]. Уравнение свободных поперечных колебаний для модели пластинки переменной жесткости записывается в следующем виде

$$D\nabla^4\omega + \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + 2 \frac{\partial D}{\partial x} \left(\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial y^2} \right) + 2 \frac{\partial D}{\partial y} \left(\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} \right) + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) + 2(1 - \mu) \frac{\partial^2 D}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} + \frac{y h}{g} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = W = 0, \quad (1)$$

где ω - функция нормального прогиба; x, y - прямоугольные координаты, направленные соответственно вдоль сторон a и b ; μ - коэффициент Пуассона; h - толщина пластинки; t - время; g - ускорение свободного падения; D и γ - переменные параметры, характеризующие изгибную жесткость и плотность эквивалентной пластинки - модели, определяемые по формулам:

$$D = D_0 \lambda; \quad \gamma = \gamma_0 \lambda; \quad D_0 = E_0 h^3 / [12(1 - \mu^2)]. \quad (2)$$

γ_0, E_0 - плотность и модуль упругости материала пластинки; λ - коэффициент.

$$\lambda = 1 + \sum_{i=1}^k \left\{ \sum_{j=1}^r \left[-\Gamma_0(x - x_{1ji}; y - y_{1ji}) + \Gamma_0(x - x_{2ji}; y - y_{1ji}) + \Gamma_0(x - x_{1ji}; y - y_{2ji}) - \Gamma_0(x - x_{2ji}; y - y_{2ji}) \right] \right\}, \quad (3)$$

k - число круглых вырезов; r - число прямоугольных вырезов, с помощью которых представляется отверстие произвольной формы; $\Gamma_0(x - x_{ji}; y - y_{ji})$ - единичная функция Хевисайда [6], $x_{1ij}, x_{2ij}, y_{1ij}, y_{2ij}$ - координаты i -го кругового отверстия (рис.2).

Для прямоугольной оболочки, закрепленной по контуру, а именно такие граничные условия наиболее точно описывают закрепление вентиляционных решеток терминалов связи, функция, описывающая свободные поперечные колебания, будет выглядеть следующим образом

$$\omega = \omega_1(x, y)\omega(t) = f \sin^2 \alpha x \sin^2 \beta y \sin \omega t, \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{m\pi}{a}$; $\beta = \frac{n\pi}{b}$, m, n - число полуволн, образующихся вдоль осей x и y ; ω - основная круговая частота колебаний, f - частота.

Рис.2. Расчетная схема решетки.

С учетом (1) формула для квадрата частоты колебаний пластинки

$$\omega^2 = \frac{64gD_0}{\gamma_0 h} \left\{ c_1^* (S - S_1) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{1}{\alpha\beta} \left[-\frac{c}{8} (2\rho + m_{1ji}m_{2ji}) + 2(1 - \mu)\alpha^2\beta^2\rho^* + (\alpha^4 - \rho^4)\bar{\rho} + \frac{c - 4\mu\alpha^2\beta^2}{8} m_{1ji}m_{2ji} + \frac{c}{64} (4\rho^* - n_{1ji}n_{2ji}) - \frac{(1-\mu)\alpha^2\beta^2}{4} \rho^* + \frac{\alpha^4}{8} n_{1ji}(b_{ji}^*\beta + m_{2ji}) + \frac{\beta^4}{8} n_{2ji}(a_{ji}^*\alpha + m_{1ji} + \frac{\mu\alpha^2\beta^2}{8} m^*) \right] \right\} \left\{ 9(S - S_1 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{1}{\alpha\beta} [-2(3\rho + 2m_{1ji}m_{2ji}) + \frac{1}{16}(12\rho^* - n_{1ji}n_{2ji}) + \frac{1}{2}m^*] \right\} \left\{ 9(S - S_1 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{1}{\alpha\beta} [-2(3\rho + 2m_{1ji}m_{2ji}) + \frac{1}{16}(12\rho^* - n_{1ji}n_{2ji}) + \frac{1}{2}m^*] \right\}^{-1} \quad (5)$$

Где a, b - длина и ширина пластинки соответственно.

Здесь введены следующие обозначения:

$$c = (\alpha^2 + \beta^2)^2; S = ab; S_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r a_{ji}^* b_{ji}^*; S_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r a_{ji}^* b_{ji}^*; a_{ji}^* = x_{2ji} - x_{1ji}; b_{ji}^* = y_{2ji} - y_{1ji}; m_{1ji} = \sin 2\alpha x_{1ji} - \sin 2\alpha x_{2ji}; m_{2ji} = \sin 2\beta y_{1ji} - \sin 2\beta y_{2ji}; \rho = m_{1ji}b_{ji}^*\beta + m_{2ji}a_{ji}^*\alpha; c_1^* = \frac{3}{4}c - \alpha^2\beta^2; n_{1ji} = \sin 4\alpha x_{1ji} - \sin 4\alpha x_{2ji}; n_{2ji} = \sin 4\beta y_{1ji} - \sin 4\beta y_{2ji}; \bar{\rho} = m_{2ji}a_{ji}^*\alpha - m_{1ji}b_{ji}^*\beta; \rho^* = n_{2ji}a_{ji}^*\alpha + n_{1ji}b_{ji}^*\beta; m^* = m_{1ji}n_{2ji} + m_{2ji}n_{1ji}. \quad (6)$$

Данные соотношения служат для расчета собственных частот прямоугольной пластинки с произвольным количеством отверстий и зафиксированными краями. Можно увидеть, что

даже для случая прямоугольной пластинки уравнения получаются громоздким. Их решение возможно только численными методами. В случае пластинки и отверстий произвольной формы, аналитическое решение уравнений не представляется возможным. Для расчета собственных частот таких деталей удобно применять метод конечных элементов [7,8,9,10].

На 1 этапе исследования был проведен расчет собственных частот прямоугольной перфорированной решетки корпуса терминала методом конечных элементов и проведено сравнение результатов с результатами аналитических расчетов и натурного эксперимента. Натурный эксперимент проводился с помощью измерителя частот собственных колебаний с датчиком-акселерометром.

На рисунке 3 представлен чертеж решетки из листовой углеродистой стали, используемой для охлаждения терминала. Решетка жестко зафиксирована по контуру в корпусе терминала.

Рис.3. Чертеж вентиляционной решетки.

Конечноэлементная сетка построена на базе треугольных оболочечных конечных элементов. На кромках решетки установлено ограничение перемещений и поворотов узловых точек. На рисунке 4 изображены первые 4 формы колебаний.

Рис.4. Собственные формы колебаний решеток.

В таблице 1 представлено сравнение значений собственных частот, соответствующих данным формам колебаний, полученных экспериментально, аналитически и с помощью метода конечных элементов.

Таблица 1

№ гармоники	эксперимент, Гц	аналитический расчет, Гц	метод конечных элементов, Гц
1	654	648	656
2	710	700	714
3	820	810	821
4	1205	1995	1209

Как видно из таблицы 1, различие результатов, полученных с помощью кэ-модели и эксперимента, не превышает 0,5%, что указывает на корректность конечноэлементной модели. Первая собственная частота попадает в голосовой диапазон частот. На практике это проявляется в появлении призывков при воспроизведении высокого женского голоса. Наиболее простым способом повышения собственной частоты решетки является увеличение толщины решетки. Было проведено конечноэлементное моделирование для решеток различной толщины (0,5; 0,8; 1; 1,5 мм). Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

толщина решетки, мм	первая собственная частота, Гц
0,5	656
0,8	1050
1	1312
1,5	1968

При толщине решетки 0,8 мм и более, первая собственная частота превышает 1000 Гц. Испытания терминала с решеткой толщиной 0,8 мм подтвердили, что характерный призывок, появляющийся ранее при частоте возбуждения 700 Гц исчез.

На 2 этапе исследования был произведен анализ влияния параметров перфорации решетки на значение первой собственной частоты. Увеличение суммарной площади отверстий в решетке приводит к улучшению теплоотвода корпуса терминала и как следствие снижению температуры процессора, поэтому увеличение этого параметра на практике имеет важное значение. Расчеты производились при одинаковой толщине решетки равной 0,8 мм и различных параметрах перфорации (таблица 3).

Таблица 3

параметры перфорации	суммарная площадь перфорации, мм ²	первая собственная частота, Гц
круглое отверстие $\varnothing$ 2, шаг 2,5	3927	1050
круглое отверстие $\varnothing$ 3, шаг 5	5872	1026
круглое отверстие $\varnothing$ 5, шаг 8	5400	1026
квадратное отверстие 5x5, шаг 8	5000	934
квадратное отверстие 6x6, шаг 9	6300	870

Сравнение результатов моделирования колебаний решеток с различными параметрами перфорации показывает, что при постоянном шаге перфорации значение первой собственной

частоты напрямую связано со значением суммарной площади перфорации и практически не зависит от формы отверстий. Данный результат дает основание опираться при выборе типа перфорации на требуемую для эффективного охлаждения устройства суммарную площадь отверстий, а также требования технической эстетики по внешнему виду решетки. Форма отверстий практически не влияет на частотные характеристики решеток.

Полученные модели позволили повысить виброустойчивость корпусов терминалов связи с пассивным охлаждением, применяемых в системах коммутации речевых сообщений для авиадиспетчеров. В ходе расчетов и конечноэлементного моделирования были получены значения собственных частот решеток охлаждения терминалов связи. По результатам расчетов были внесены изменения в конструкцию решеток терминалов, что позволило улучшить качество воспроизведения речевой информации при сохранении качества охлаждения процессора.

Список литературы

1. Levin E, Zaynal S. Voice communication system for air traffic control. Development and evaluation of a prototype. Master of Science Thesis in Software Engineering and Technology. Chalmers University of Technology University of Gothenburg Department of Computer Science and Engineering, Göteborg, Sweden, October 2011, 100 p.
2. Richard V. Cox; Simao Ferraz De Campos Neto; Claude Lamblin; Mostafa Hashem Sherif. Itut coders for wideband, superwideband, and fullband speech communication. IEEE Communications Magazine. Volume: 47, Issue: 10, October 2009, pp 106-109.
3. Преображенский И.Н. Устойчивость и колебания пластинок и оболочек с отверстиями. – М.: Машиностроение, 1981. - 191 с.
4. Kurpa, L.V. Natural vibrations of plates with holes, Soviet Applied Mechanics 15(2) (1979) 173-175.
5. Hegarty, R.F., Elasto-dynamic analysis of rectangular plates with circular holes, Int. J. Solid Struc. 11(7-8) (1975) 895-906
6. Немировский Б.Я, Преображенский И.Н. Динамические задачи теории пластинок и оболочек с отверстиями. В книге: Конструирование и расчет зданий и сооружений для научных исследований. - М.: Наука, 1973. - С. 61-71.
7. H. Hakula , M. Laaksonen. Frequency Response Analysis of Perforated Shells with Uncertain Materials and Damage. Applied Sciences. 2019, 9, 5299; doi:10.3390/app9245299.
8. Frulloni E., Kenny J., Conti P., Torre L. Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications. *Composite Structure*, 2007, Vol. 78, P. 519–528.
9. Chapelle, D.; Bathe, K.J. The Finite Element Analysis of Shells; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003.
10. Jhung, M.J.; Yu, S.O. Study on modal characteristics of perforated shell using effective Young's modulus. Nucl. Eng. Des. 2011, 241, 2026–2033.

Дата поступления: 23 ноября 2021 г.