

УДК 534.1:620.17

Влияние расположения задающих акселерометров на резонирующей оснастке при задании режима виброиспытаний

Стаценко Виктор Владимирович^()*

svv@bmstu.ru

Малыхин Федор Андреевич

malykhinfa@bmstu.ru

SPIN-код: 1073-2076

Лаухин Даниил Андреевич

laukhinda@bmstu.ru

SPIN-код: 2586-2980

Серов Сергей Анатольевич

sserov@bmstu.ru

Иванов Михаил Витальевич

mivanov@bmstu.ru

SPIN-код: 2174-9162

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье исследовано влияние выбора местоположения задающих акселерометров на формирование режима виброиспытаний для алюминиевой плиты-оснастки Д16Т размером 545×545×16 мм. По чертежу выполнена предварительная оценка резонансной частоты оснастки, затем результаты сопоставлены с экспериментальными АЧХ при десяти схемах задания режима при разном расположении задающих датчиков. Показано, что расчетная резонансная частота 480 Гц согласуется с экспериментальной резонансной областью 506...513 Гц с расхождением около 5,4...6,9 %. Наиболее репрезентативной схемой управления в диапазоне 10...2000 Гц является Эксперимент № 7, в котором задающими являются каналы 1, 2, 4 и 6; среднее отклонение измерительных каналов составляет 2,15 дБ, а доля точек в полосе ±3 дБ — 75,5 %

Ключевые слова: виброиспытания, задающий акселерометр, оснастка, АЧХ, резонансная частота, многоточечное управление, Д16Т

Influence of the location of the reference accelerometers on the tooling when setting the vibration test mode

Statsenko Viktor Vladimirovich^()*

svv@bmstu.ru

Malykhin Fyodor Andreevich

malykhinfa@bmstu.ru

SPIN-code: 1073-2076

Laukhin Daniil Andreevich

laukhinda@bmstu.ru

SPIN-code: 2586-2980

Serov Sergey Anatolyevich

sserov@bmstu.ru

Ivanov Mikhail Vitalievich

mivanov@bmstu.ru

SPIN-code: 2174-9162

BMSTU, Moscow, Russia

Annotation. The article investigates the effect of the location of the reference accelerometers on the vibration test mode for a 545 x 545 x 16 mm D16T aluminum tooling plate. A preliminary assessment of the tooling's resonant frequency was performed based on the

drawing, and the results were compared with the experimental frequency response curves obtained using ten different control schemes with different locations of the reference sensors. It was found that the calculated resonant frequency of 480 Hz is consistent with the experimental resonant region of 506-513 Hz, with a discrepancy of approximately 5.4...6.9 %. Experiment 7, where channels 1, 2, 4, and 6 are used as reference channels, is the most representative control scheme in the 10...2000 Hz range. The average deviation of the measurement channels is 2.15 dB, and the percentage of points within the ± 3 dB band is 75.5 %.

Keywords: vibration tests, setting accelerometer, equipment, frequency response, resonant frequency, multi-point control, D16T

Введение. Достоверность виброиспытаний определяется не только заданной программой нагружения, но и тем, в каких точках оснастки задается управляющий сигнал. Если плита оснастки в рабочем диапазоне частот имеет собственные формы колебаний, то отклик в различных точках может существенно отличаться по амплитуде и фазе [1]. В этом случае система управления формально поддерживает заданный режим в точках установки задающих акселерометров, однако фактическая нагрузка на изделие может быть неравномерной: одни зоны оказываются недоиспытанными, другие — переиспытанными. Поэтому выбор расположения задающих акселерометров является не вспомогательной операцией, а одним из факторов, определяющих корректность и воспроизводимость виброиспытаний.

Актуальность данной задачи подтверждается нормативными и методическими документами. В работе [2] отмечается, что контрольные акселерометры должны располагаться вблизи интерфейса изделия, а при наличии нескольких опорных зон может применяться многоточечное управление с усреднением сигналов. А в стандартах NASA выбор контрольных точек рассматривается как часть методики испытаний: один датчик допустим только для простой и достаточно жесткой системы, тогда как при пространственно разнесенных интерфейсах — требуется контроль нескольких точек на оснастке. Методические рекомендации Bruel & Кjaer указывают на необходимость предварительного низкоуровневого прогона, поскольку центр и периферия оснастки могут иметь различный отклик, особенно вблизи резонансов. Из этого можно сделать вывод, что установка задающего акселерометра в узловой или локально малоподвижной зоне приводит к искажению режима, так как система управления начинает компенсировать отклик нерепрезентативной точки. Близкие выводы получены в работах по оптимальному размещению датчиков для модальной идентификации. В работе [3] говорится, что точки измерения должны выбираться по их информативности относительно форм колебаний конструкции, а не по удобству монтажа. В работе [4] сопоставлены методы размещения датчиков и подтверждено, что качество модальной идентификации зависит от способности выбранных точек различать собственные формы колебаний. Исследования испытательной оснастки также показывают, что расчетная оценка собственных частот должна подтвер-

ждаться экспериментальной АЧХ: [5] указывают на необходимость проверки динамического поведения виброиспытательной оснастки, а в работе [6] показана важность расчетного и экспериментального подтверждения конструкции оснастки для виброиспытаний.

Таким образом, анализ источников показывает, что корректное задание вибрационного режима требует не только выбора уровня воздействия, но и обоснованного выбора точек управления. Научная значимость настоящей работы заключается в экспериментальной оценке того, как различные схемы расположения задающих акселерометров влияют на соответствие управляющего среднего фактическому отклику плиты-оснастки. Цель исследования — определить наиболее репрезентативную схему задания режима для плиты-оснастки и сопоставить экспериментально выявленную резонансную область с расчетной резонансной частотой.

Материалы и методы. Объектом исследования является плита оснастки из алюминиевого сплава Д16Т. По чертежу плита имеет размер 545×545 мм и толщину 16 мм; на плите предусмотрены 24 резьбовых отверстия М5-6Н и 32 сквозных отверстия М5-6Н, причем расположение отверстий несимметрично. Геометрия плиты и вид доработки показаны на рис. 1. Экспериментальная часть проводилась на вибростенде ES-20-320 фирмы Dongling Technologies. Сигналы снимались семью акселерометрами: каналы 1–3 — акселерометры РСВ модели 352C03, каналы 4–7 — акселерометры Globaltest модели AP2037-10. Регистрация и анализ сигналов выполнялись анализатором данных ВИСОМ ВС-407. Расположение акселерометров на плите показано на рис. 1. Серии экспериментов указаны в табл. 1.

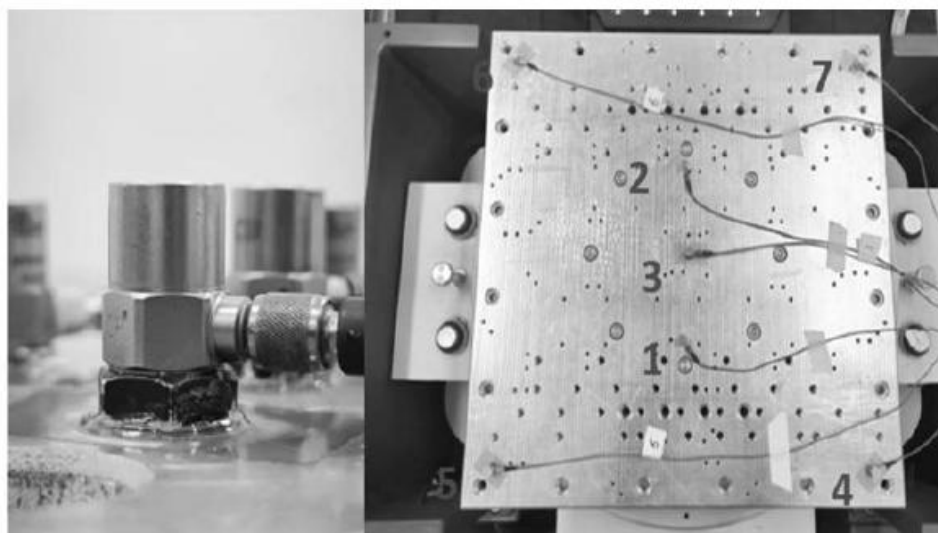


Рис. 1. Расположение каналов 1-7 на плите-оснастке

Для предварительной оценки использована классическая теория тонких изотропных пластин. В справочнике [7], по колебаниям пластин, указаны коэффициенты частот для различных граничных условий прямоугольных пла-

стин. Для предварительной оценки резонансной частоты использована упрощенная модель квадратной алюминиевой плиты, жестко связанной с силовым контуром оснастки. Реальная плита на вибростенде находится между этими идеализациями; при жестком креплении к основанию и наличии распределенных точек крепления оценка ближе к заземленной схеме, но без FEM и точной модели крепежа это остается инженерной оценкой.

Таблица 1

Нумерация экспериментальных схем при задании режима

Номер эксперимент	Задающие каналы	Измерительные каналы
1	3	1, 2, 4, 5, 6, 7
2	1, 2	3, 4, 5, 6, 7
3	3, 4	1, 2, 5, 6, 7
4	3, 4, 6	1, 2, 5, 7
5	1, 2, 3	4, 5, 6, 7
6	1, 2, 4	3, 5, 6, 7
7	1, 2, 4, 6	3, 5, 7
8	1, 2, 3, 4	5, 6, 7
9	3, 4, 5, 6, 7	1, 2
10	4, 5, 6, 7	1, 2, 3

Цилиндрическая жесткость плиты определялась по выражению

$$D = \frac{Eh^3}{[12(1-\nu^2)]}, \quad (1)$$

где D — цилиндрическая жесткость, Н·м; E — модуль упругости материала; h — толщина плиты; ν — коэффициент Пуассона.

Расчетная резонансная частота оснастки оценивалась по выражению классической теории пластин:

$$f_{0,\text{расч}} = \frac{\Omega_1}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (2)$$

где $f_{0,\text{расч}}$ — расчетная резонансная частота, Гц; $\Omega_1 = 35,99$ — безразмерный коэффициент для квадратной пластины с жестким силовым контуром по табличным решениям [7]; $a = 0,545$ м — сторона плиты; ρ — плотность материала.

При $E = 72$ ГПа, $\rho = 2780$ кг/м³, $\nu = 0,33$ и $h = 0,016$ м получено $D = 27,58$ кН·м и $f_{0,\text{расч}} = 480,2$ Гц. Учет 56 отверстий М5 как эквивалентного уменьшения площади дает ориентировочную долю удаленного материала около 0,37 % площади плиты; поэтому для первой оценки основное влияние на расхождение теории и эксперимента ожидается не от самих отверстий, а от реальных контактных и силовых условий установки.

Обработка экспериментальных данных выполнялась в диапазоне 10...2000 Гц. Для каждого эксперимента определялось управляющее среднее $A_{упр,k}$ как среднее значение амплитуд задающих каналов, после чего для каждого измерительного канала рассчитывалось отклонение от него в дБ. Для сравнения схем задания использовались среднее абсолютное отклонение незадействованных измерительных каналов, доля точек, попавших в полосу ± 3 дБ, ошибка управляющего среднего относительно уровня 0,3г и RMS-неравномерность по семи каналам. Основным критерием выбора оптимальной схемы считалось минимальное среднее отклонение измерительных каналов при приемлемом соответствии управляющего среднего заданному уровню 0,3г.

Результаты. В табл. 2 приведено сравнение всех десяти экспериментов по среднему абсолютному отклонению измерительных каналов от управляющего среднего в диапазоне 10...2000 Гц. Лучшая схема — Эксперимент № 7 (каналы 1+2+4+6 задающие): среднее отклонение составляет 2,15 дБ. Близкий результат дает Эксперимент № 6 (1+2+4), но у него меньше доля точек в полосе ± 3 дБ. Эксперимент № 10 (4+5+6+7) является наихудшим в полном диапазоне, так как управление только по периферии плохо представляет центральные каналы 1-3.

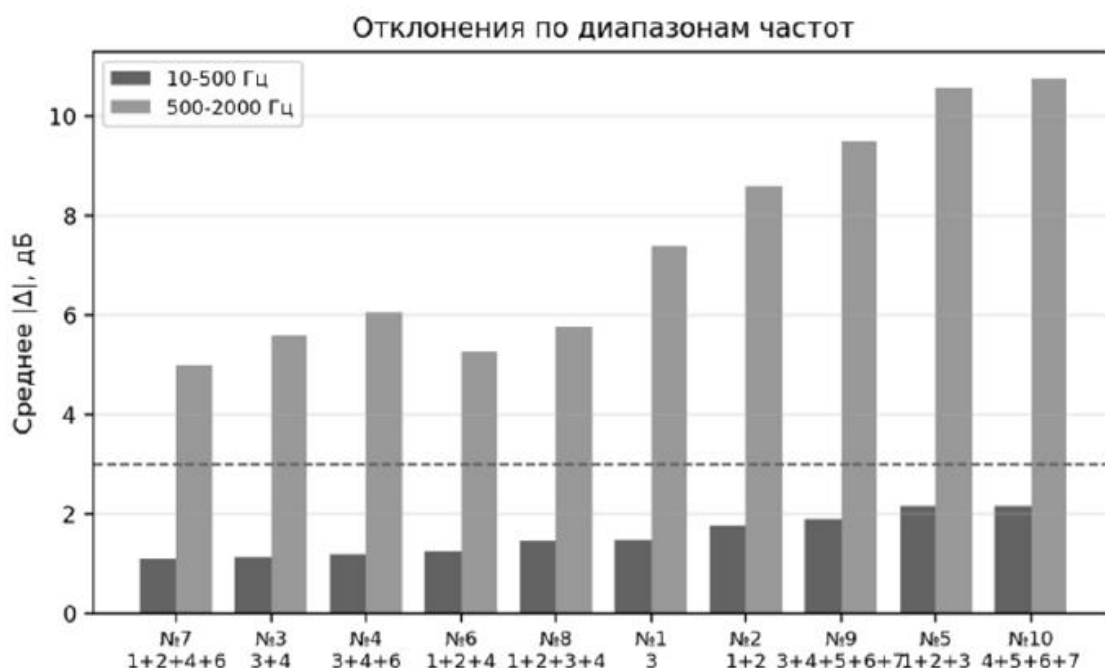


Рис. 2. Сравнение экспериментов по среднему отклонению измерительных каналов, по диапазонам 10-500 и 500...2000 Гц

После сравнения интегральных показателей по всему диапазону 10...2000 Гц целесообразно отдельно рассмотреть поведение оснастки до-после 500 Гц, поскольку именно в этой области начинается выраженное резонанс-

ное влияние плиты. Как показано на рисунке 2, в диапазоне до 500 Гц различия между лучшими схемами задания невелики: среднее отклонение для Эксперимента № 7 составляет 1,11 дБ, для Эксперимента № 3 — 1,13 дБ. Однако после 500 Гц разброс резко возрастает: у Эксперимента № 7 среднее отклонение равно 4,98 дБ, тогда как у Эксперимента № 10 достигает 10,75 дБ. Это указывает на то, что выбор задающих акселерометров становится определяющим именно в околорезонансной и высокочастотной областях. Для подтверждения данного вывода далее рассмотрена частотная зависимость RMS-неравномерности по всем семи каналам, представленная на рис. 3. Повторяющиеся пики в диапазонах 500...520 и 1430...1450 Гц свидетельствуют не о случайной погрешности измерений, а о модальном характере распределения ускорений по плите. При этом, как видно из рис. 4, даже при удержании управляющего среднего около заданного уровня 0,3g в отдельных частотных областях возникают отклонения более ± 3 дБ, поэтому соответствие среднего управляющего сигнала заданию не гарантирует равномерного нагружения всех точек оснастки. Окончательная проверка этого вывода выполнена по АЧХ семи каналов для лучшей и наихудшей схем, приведенных на рис. 5. Эксперимент № 7 обеспечивает более репрезентативное описание центральной и периферийной зон плиты, тогда как Эксперимент № 10 хуже отражает поведение центральных каналов в области 500...520 Гц.

Таблица 2

Сводные показатели по диапазону 10...2000 Гц

Номер эксперимента	$M \Delta $, дБ	Доля ± 3 , дБ, %	$M A_{упр, 3g} $, дБ
7	2.15	75.5	0.55
6	2.31	70.0	0.54
3	2.33	73.2	0.62
4	2.49	75.6	0.59
8	2.62	66.9	0.50
1	3.06	73.4	0.57
2	3.59	68.2	0.50
9	3.94	62.0	0.62
5	4.42	61.0	0.51
10	4.48	60.1	0.67

Обсуждение. Эксперимент № 7 оказался наиболее устойчивым по интегральному критерию, потому что объединяет две разные зоны плиты: внутреннюю область (каналы 1 и 2) и периферийную диагональ (каналы 4 и 6). Такая схема лучше отражает пространственный характер колебаний оснастки, чем управление только центральными или только угловыми точками. В области 500...520 Гц плита демонстрирует выраженное модальное поведение: одни

зоны работают как области повышенного отклика, другие — как области пониженного отклика. Поэтому усреднение только по каналам 4–7 в эксперименте № 10 приводит к худшему представлению центральных точек.

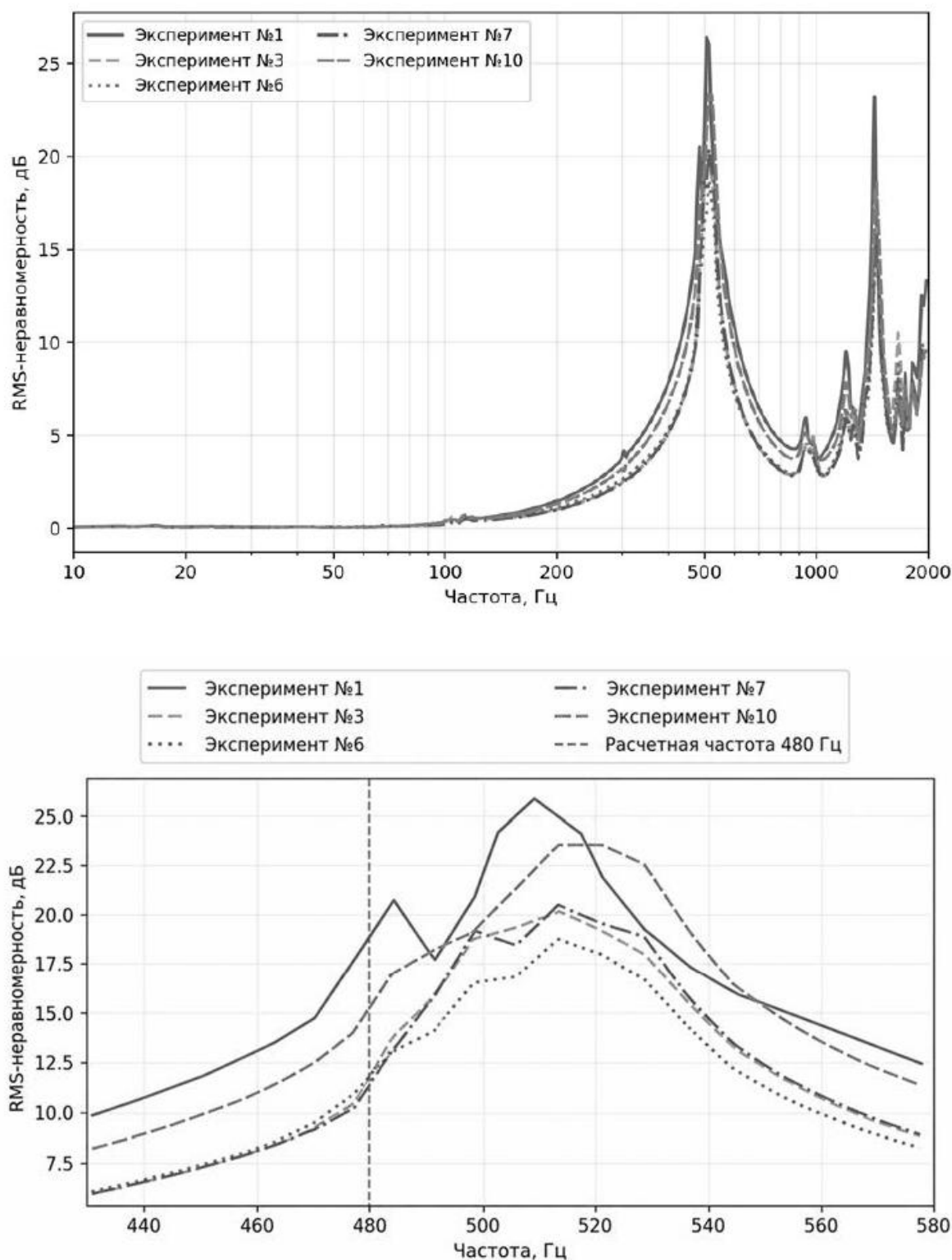


Рис. 3. RMS-неравномерность отклика по семи каналам

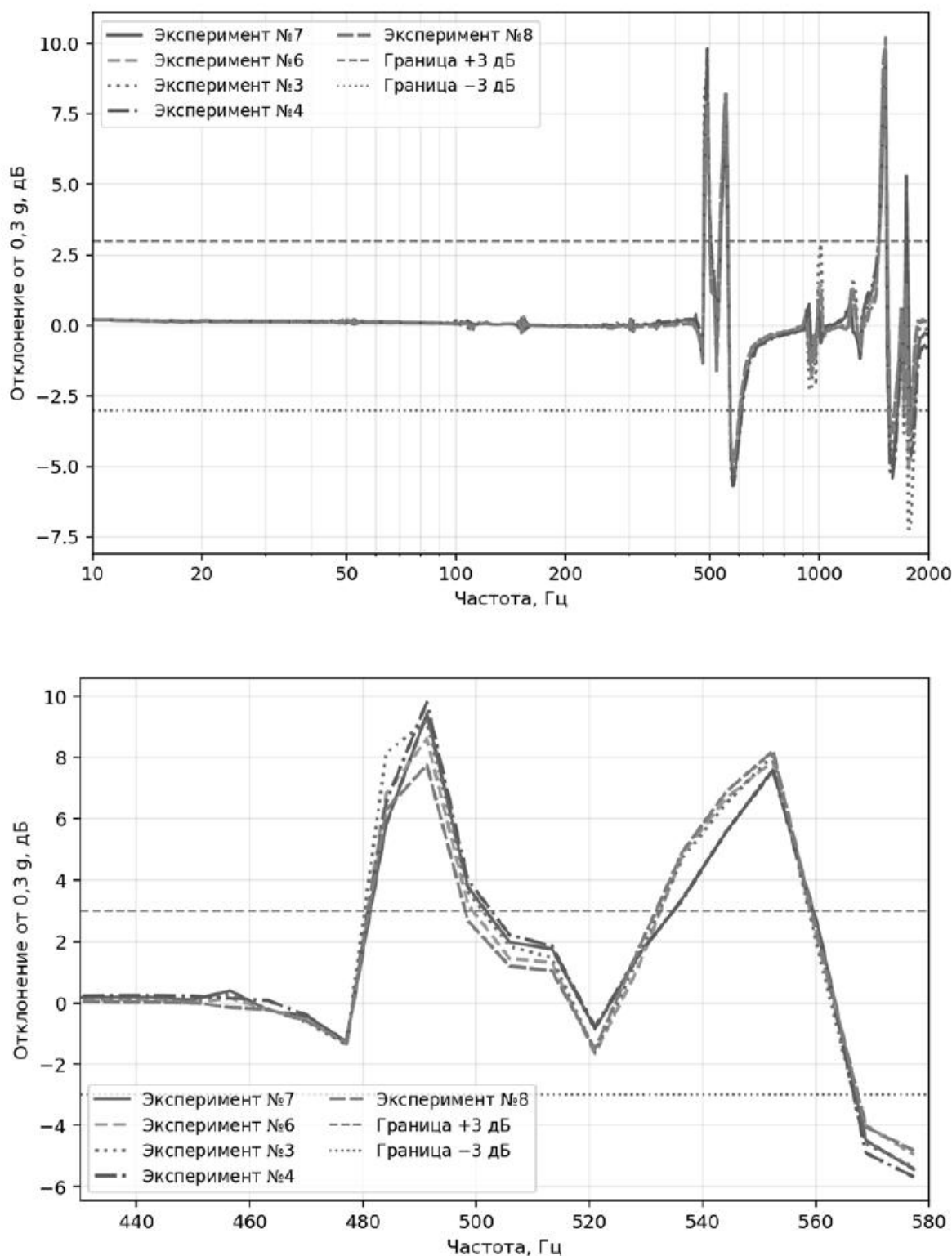


Рис. 4. Управляющее среднее для лучших конфигураций относительно задания 0,3g

Сравнение расчетной и экспериментальной частоты показывает, что инженерная модель оказалась физически полезной: расчет 480 Гц предупредил о резонансной области около 500 Гц, а эксперимент подтвердил максимальную неравномерность в диапазоне 506...513 Гц. Расхождение менее 10 % яв-

ляется ожидаемым, поскольку реальная плита имеет несимметричную перфорацию, контакт с переходной оснасткой, болтовое крепление, массу акселерометров, кабели и динамическое взаимодействие с вибростендом. Следовательно, теория хорошо показывает опасную область, но окончательный выбор задающих точек должен выполняться по АЧХ.

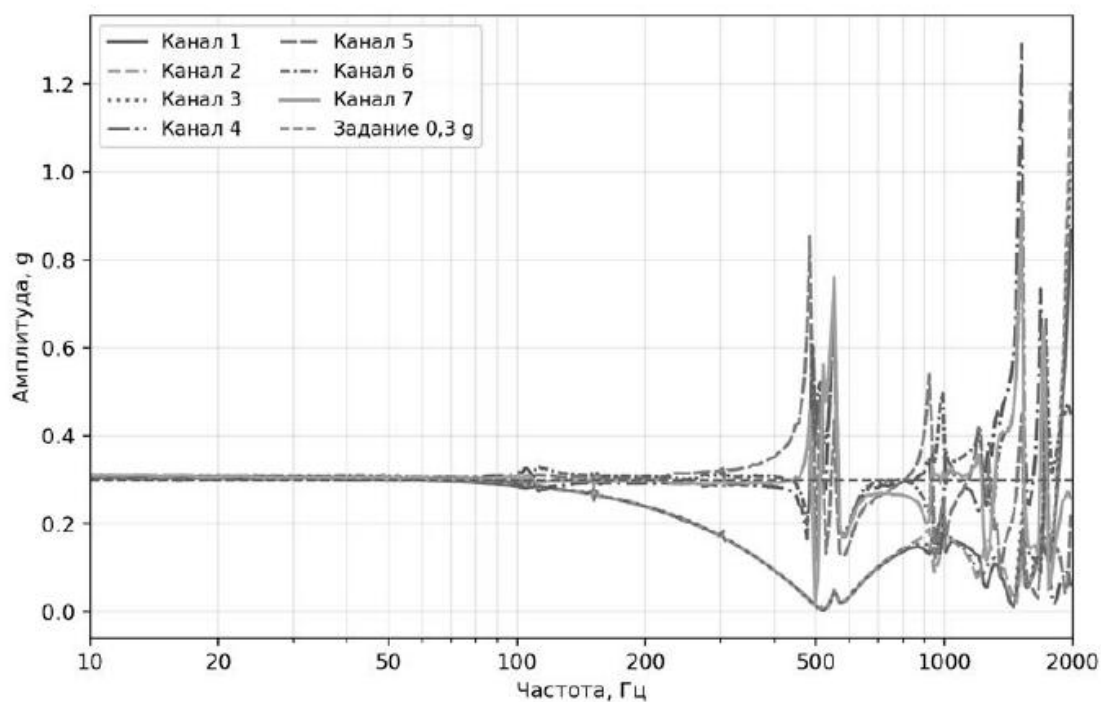
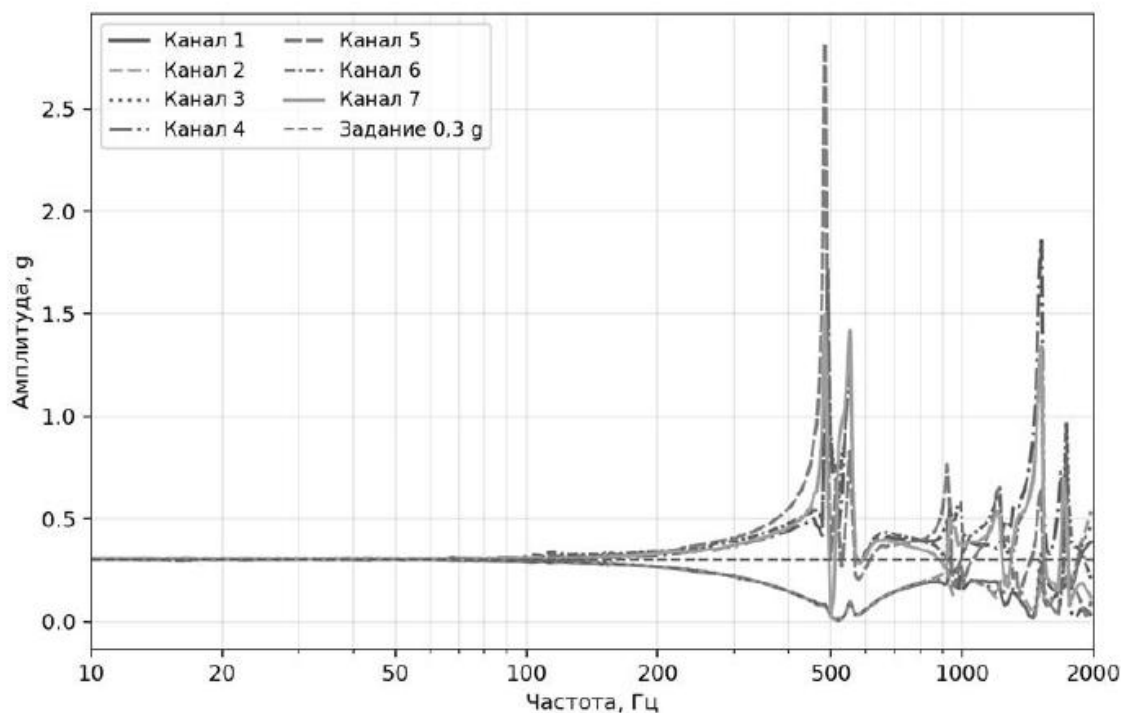


Рис. 5. АЧХ семи каналов в Эксперименте №7 (слева) и №10 (справа)

Полученные результаты согласуются с литературным обзором. Рекомендации [1–4] фактически сводятся к тому, что задающие датчики должны находиться в репрезентативных интерфейсных точках и не должны попадать только в локально удобные, но модально неинформативные зоны. Подходы оптимального размещения датчиков [5, 6] также подтверждают необходимость выбирать точки, различающие формы колебаний. Эксперимент № 7 соответствует этим принципам лучше, чем Эксперимент №1 с одним центральным датчиком и Эксперимент №10 с только периферийными датчиками.

Заключение. В ходе данной работы были получены следующие выводы:

1. Расчетная резонансная частота оснастки по инженерной модели жестко связанной плиты составляет 480,2 Гц. Экспериментальная резонансная область находится в частотах 506...513 Гц; расхождение 5,4...6,9 % показывает удовлетворительное схождение теории с экспериментом.

2. Экспериментальная АЧХ подтверждает, что плита в диапазоне около 500 Гц не является абсолютно жесткой. В этой области результат испытания существенно зависит от того, какие каналы назначены задающими.

3. По критерию репрезентативности для незадействованных измерительных каналов лучшая конфигурация — эксперимент № 7, то есть управление по каналам 1 + 2 + 4 + 6. В диапазоне 10-2000 Гц среднее отклонение составляет 2,15 дБ, а доля точек в полосе ± 3 дБ — 75,5 %.

4. Если испытание ограничено диапазоном до 500 Гц и требуется минимальное число задающих датчиков, допустимой инженерной альтернативой является Эксперимент № 3 (3 + 4), так как его среднее отклонение в диапазоне 10...500 Гц равно 1,13 дБ. Для диапазона до 2000 Гц эта схема уступает Эксперименту № 7.

5. Эксперимент № 10 (4 + 5 + 6 + 7) не рекомендуется для центрально установленного изделия на данной плите: схема хорошо контролирует периферию, но хуже представляет центральные каналы 1–3, особенно после 500 Гц.

6. Рекомендуемая схема для дальнейшего задания режима на этой оснастке — использовать каналы 1 + 2 + 4 + 6 как задающие, а каналы 3, 5 и 7 оставить как независимые измерительные/контрольные каналы с лимитами.

7. После изменения массы изделия, схемы его крепления или ориентации испытания необходимо повторять низкоуровневый прогон АЧХ, поскольку резонансная частота и форма распределения отклика могут измениться.

Список источников

- [1] Евтифьев М.Д. и др. Алгоритм анализа экспериментальных данных и расчета режима нагружения при вибрационных испытаниях космического аппарата. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2006, № 1 (8), с. 71–75.
- [2] Çalışkan B. Use of Different Additive Manufacturing Methods for the Fabrication of an X-Band Horn Antenna and its Compatibility with the Mil-Std-810h Standard. *Diss. Middle East Technical University (Turkey)*, 2022.
- [3] Kammer D.C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1991, vol. 14, no. 2, pp. 251–259.

-
- [4] Glassburn R.S., Smith S.W. Evaluation of sensor placement algorithms for on-orbit identification of space platforms. Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, NASA, 1994, vol. 2251, art. no. 205.
 - [5] De Barros E., Souto C.D.A. Evaluation of a vibration test fixture. International Journal of Acoustics and Vibrations, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 349–352.
 - [6] Wijaya Y.G. et al. Design and experimental Verification of Vibration Testing Fixture for Flight Control Panel. Indonesian Journal of Aerospace, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 157–168.
 - [7] Leissa A.W. Vibration of plates. NASA Technical Reports Server (NTRS). 1969, vol. 160.