

УДК 621.039

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УНИМОДАЛЬНОГО И ПОЛИМОДАЛЬНОГО ПОДХОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ

С.В. Гусаров, С.И. Досько
(ФГБОУ ИГТУ «СТАНКИН»)
В.В. Баданин, С.А. Исаев
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Сравниваются унимодальный и полимодальный подходы при обработке результатов динамических испытаний на вибропрочность на примере испытаний динамического макета приборной платформы КА «Метеор-М», а также результаты идентификации частотных характеристик макета.

Ключевые слова: вибропрочность, идентификация, частотная характеристика, модальный анализ.

Традиционный подход к проведению, анализу и интерпретации результатов динамических испытаний авиационной, космической и военной техники базируется на следующих положениях ГОСТ [1]:

– механическая конструкция может быть представлена как совокупность одномассовых систем (резонаторов);

– для решения задач оценки вибропрочности и доводки конструкции достаточно иметь реакцию во временной области на внешнее воздействие или спектр (амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)) выходного сигнала по ускорению;

– АЧХ имеет доминирующий пик (максимум), по которому без учёта влияния соседних пиков можно простейшим способом получить значения добротности или логарифмического декремента;

– для прогнозирования реакции конструкции можно использовать добротность.

Поскольку традиционный подход не учитывает взаимодействие мод частотной характеристики (ЧХ), то его принято называть унимодальным. В то же время существует более современный подход к анализу ЧХ, который можно назвать полимодальным, поскольку он в полной мере учитывает взаимосвязь её мод. Полимодальный подход реализуется при использовании технологии обработки динамических характеристик конструкций, называемой экспериментальным модальным анализом [2 – 5, 7].

Возможности и преимущества полимодального подхода к анализу ЧХ рассмотрим на примере обработки результатов испытаний динамического макета (ДМ) приборной платформы космического аппарата (КА) «Метеор-М» (рис. 1). На испытательном оборудовании в ОАО «ВНИИЭМ» (г. Истра) были сняты АЧХ ДМ с регистрацией отклика по ускорению в

местах крепления аппаратуры и ответственных элементах конструкции. Для анализа были использованы ЧХ, снятые на антенно-фидерном устройстве (АФУ). Схема конструкции стенд-объекта исследования (динамический макет) представлена на рис. 2.

Модель испытываемой конструкции в частотной области. При испытаниях на вибростенде создается кинематическое воздействие, которое в местах крепления прикладывается к макету. Конструкция ДМ может быть представлена как система со многими входами и выходами. На рис. 3 представлена модель испытываемой конструкции в частотной области.

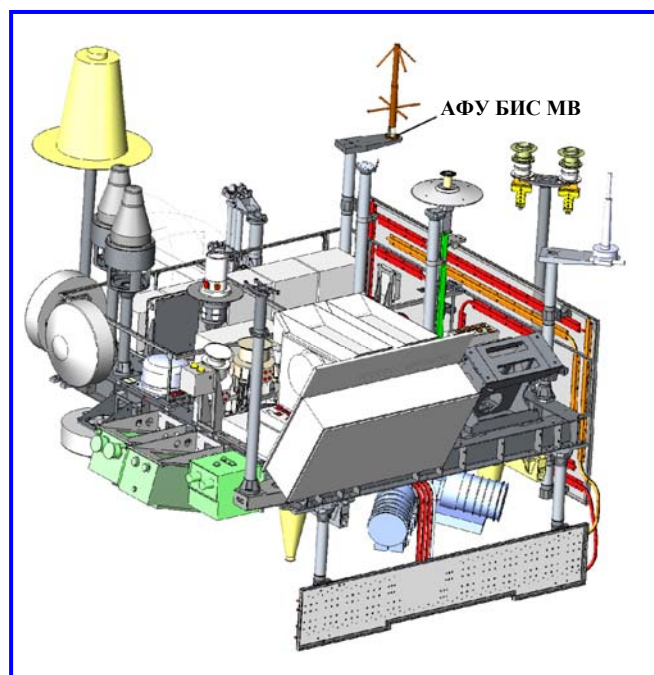


Рис. 1. Общий вид динамического макета приборной платформы КА «Метеор-М»

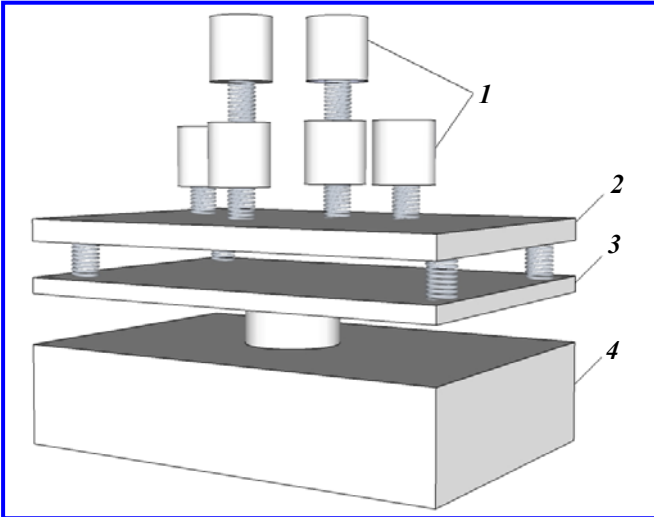


Рис. 2. Схема системы стенд-объекта испытаний: 1 – элементы ДМ; 2 – ДМ приборной платформы; 3 – переходный элемент; 4 – испытательный стенд

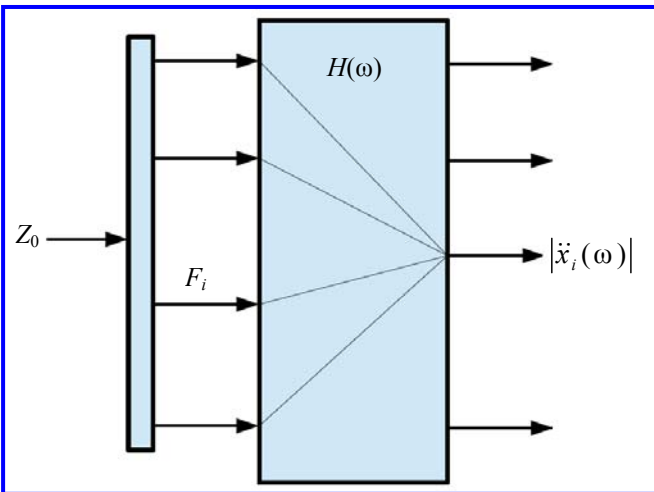


Рис. 3. Модель испытуемой конструкции в частотной области

Кинематическое воздействие z_0 от вибростенда через переходной элемент трансформируется в силовое F_i , прикладываемое к макету по нескольким входам, и по многим выходам определяются реакции $\ddot{x}(\omega)$. Вход это совокупность точки и координаты приложения силы, а выход – совокупность точки и координаты измерения реакции (отклика).

Комплексная амплитуда реакции по перемещению X_i в i -й точке конструкции по координате x при произвольном нагружении $F_j(\omega)$ может быть представлена в виде [2, 4]

$$X_i(\omega) = \sum_{j=1}^L h_{ij}(\omega) F_j(\omega),$$

спектр реакции по перемещению как

$$|X_i(\omega)| = \left| \sum_{k=1}^m \frac{e_{ik}}{1 - (\omega / \omega_{ok})^2 + 2i\xi_k(\omega / \omega_{ok})} \right|,$$

а спектр реакции по ускорению

$$|\ddot{X}_i(\omega)| = \left| \omega^2 \sum_{k=1}^m \frac{e_{ik}}{1 - (\omega / \omega_{ok})^2 + 2i\xi_k(\omega / \omega_{ok})} \right|,$$

где L – число точек крепления ДМ к переходному элементу; $h_{ij}(\omega)$ – элемент матрицы динамических податливостей $[H(\omega)]$ размерностью $L \times L$; m – число мод, проявившихся в заданном частотном диапазоне; e_{ik} – k -й модальный коэффициент влияния; ξ_k – k -й модальный коэффициент демпфирования; ω_{ok} – k -я собственная частота.

Модальный коэффициент влияния e_{ik} зависит от количества задействованных входов (мест

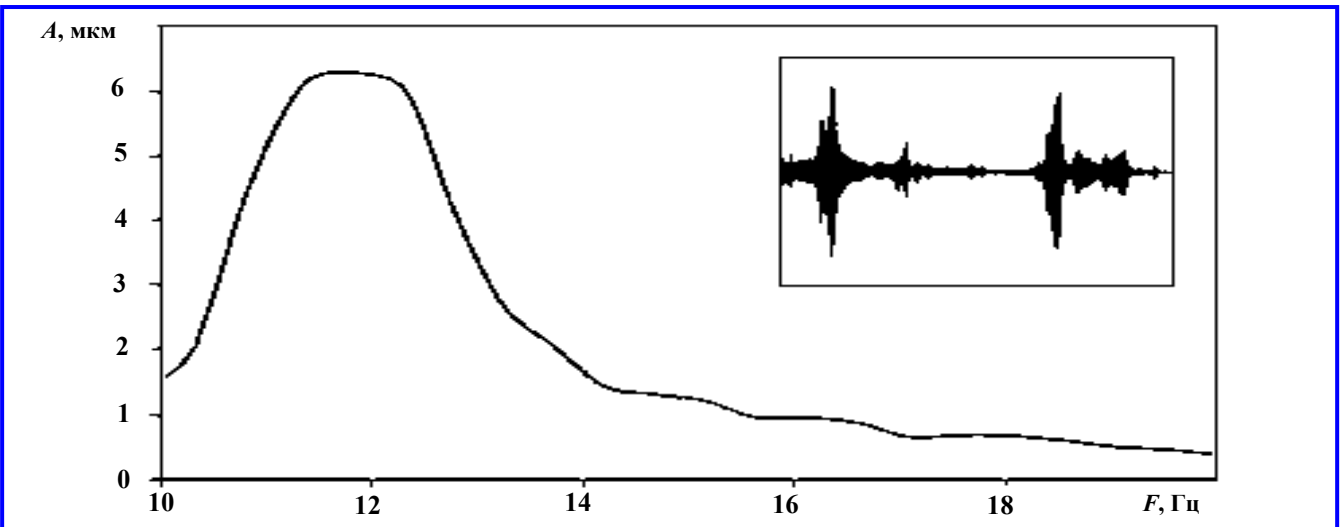


Рис. 4. Экспериментальная АЧХ по ускорению в диапазоне от 10 до 20 Гц и отклик по ускорению на ударное воздействие

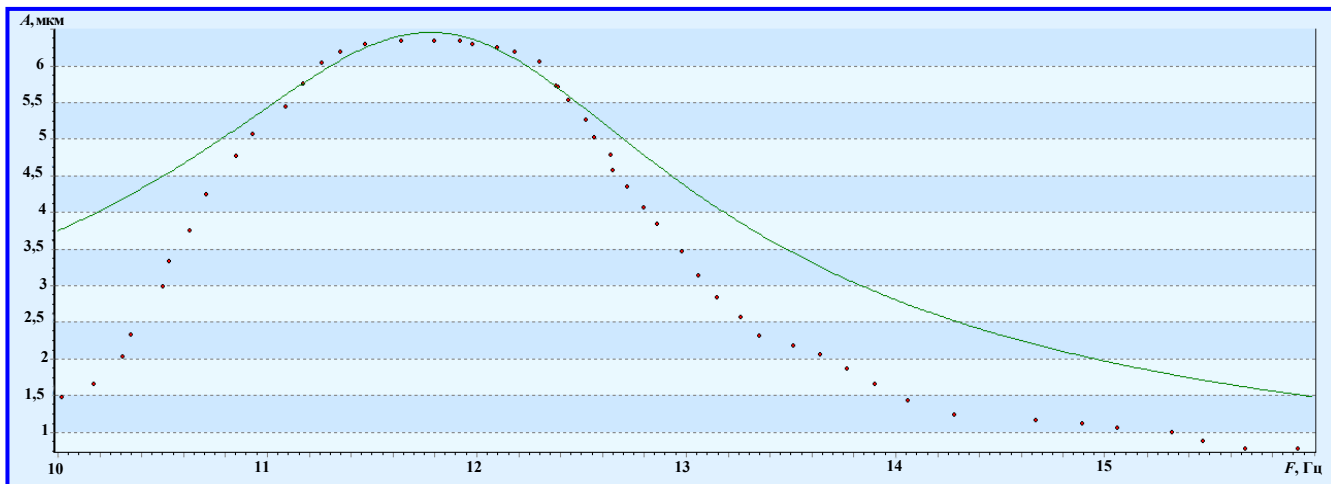


Рис. 5. Экспериментальная (оцифрованная) АЧХ по ускорению (точки) и результаты унимодальной идентификации (линия)

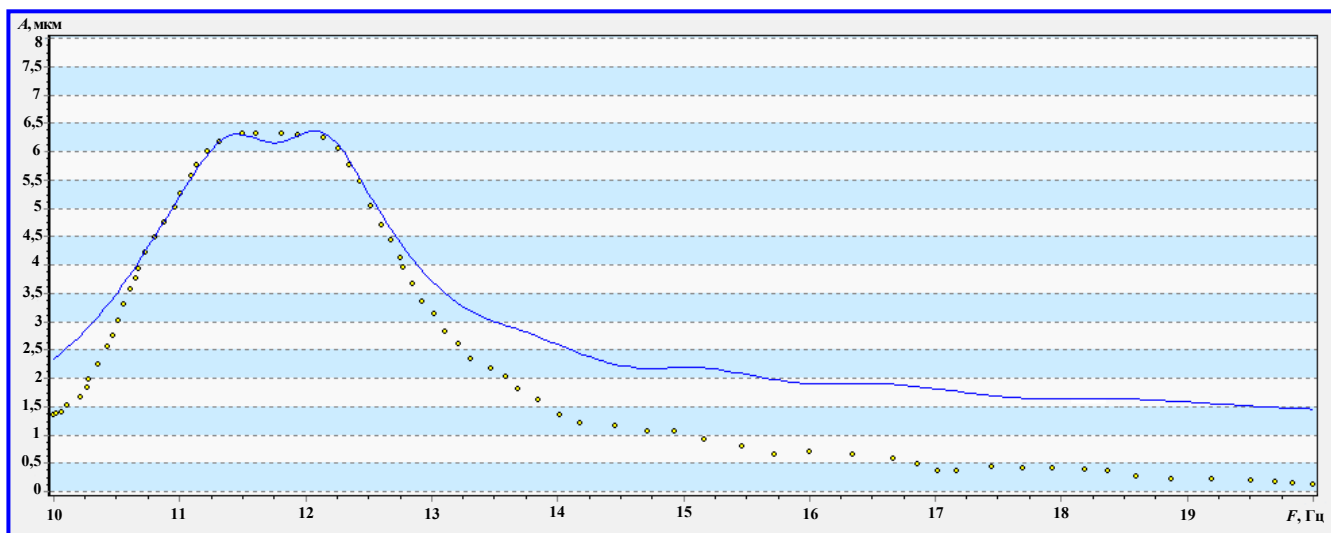


Рис. 6. Экспериментальная АЧХ по ускорению (точки) и результаты полимодальной идентификации (линия)

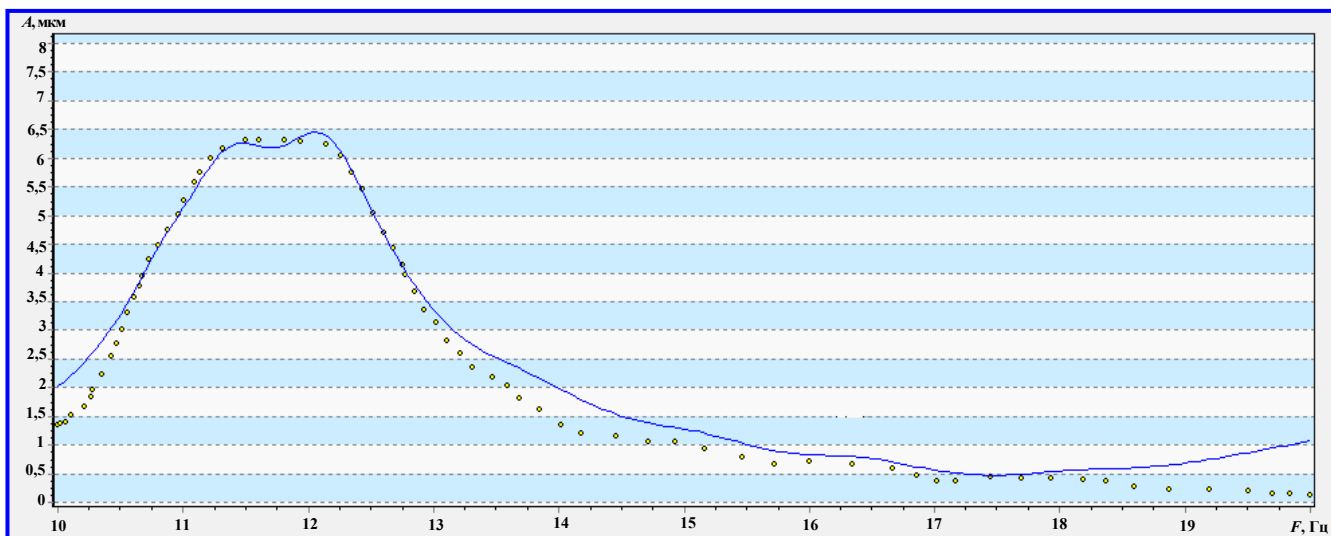


Рис. 7. Экспериментальная АЧХ по ускорению (точки), и результаты идентификации (линия) после введения «фиктивной» моды (37 Гц)

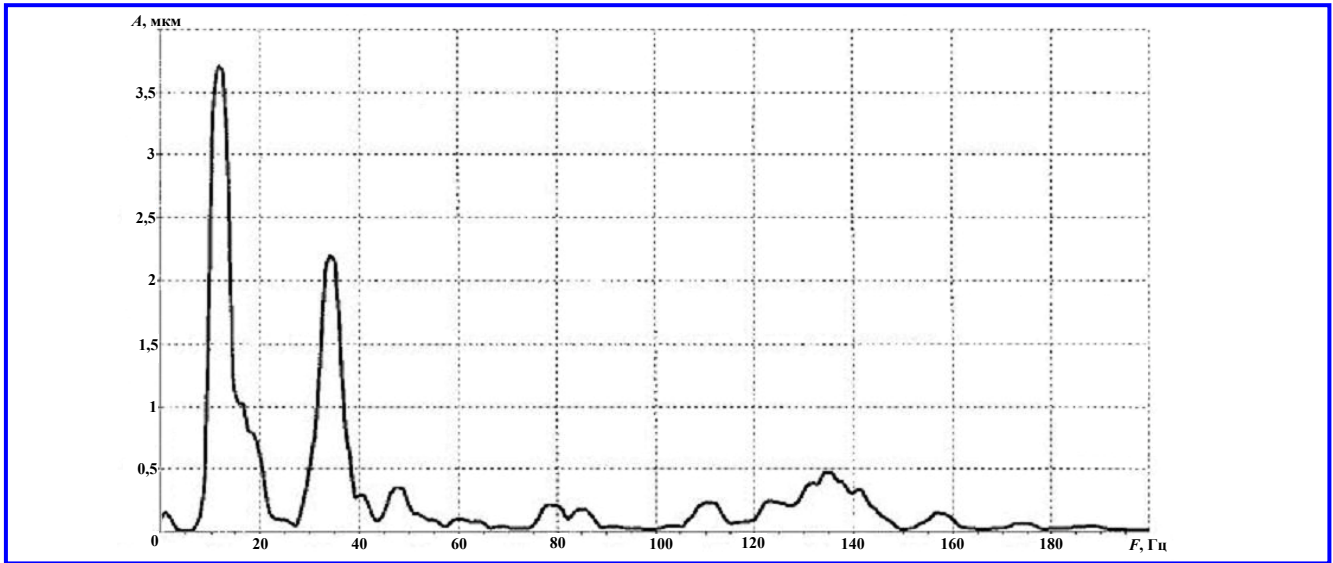


Рис. 8. Экспериментальная АЧХ по ускорению в диапазоне от 0 до 200 Гц

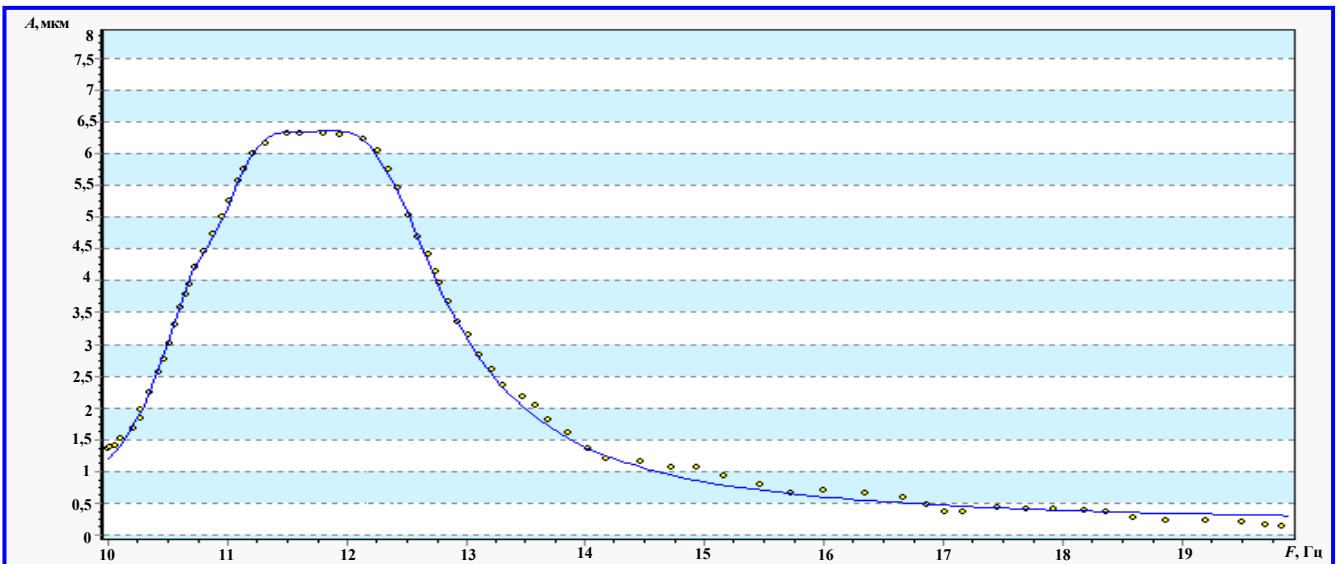


Рис. 9. Результаты идентификации АЧХ по ускорению после введения моды с отрицательным коэффициентом влияния

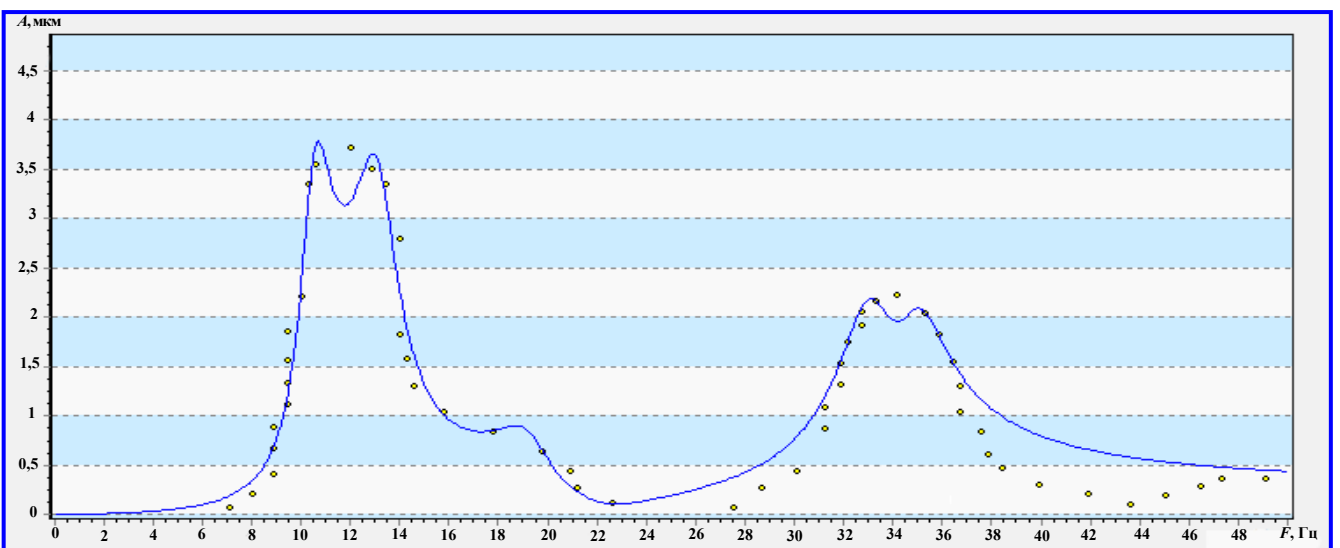


Рис. 10. Экспериментальная АЧХ по ускорению (точки) и результаты идентификации (линия)

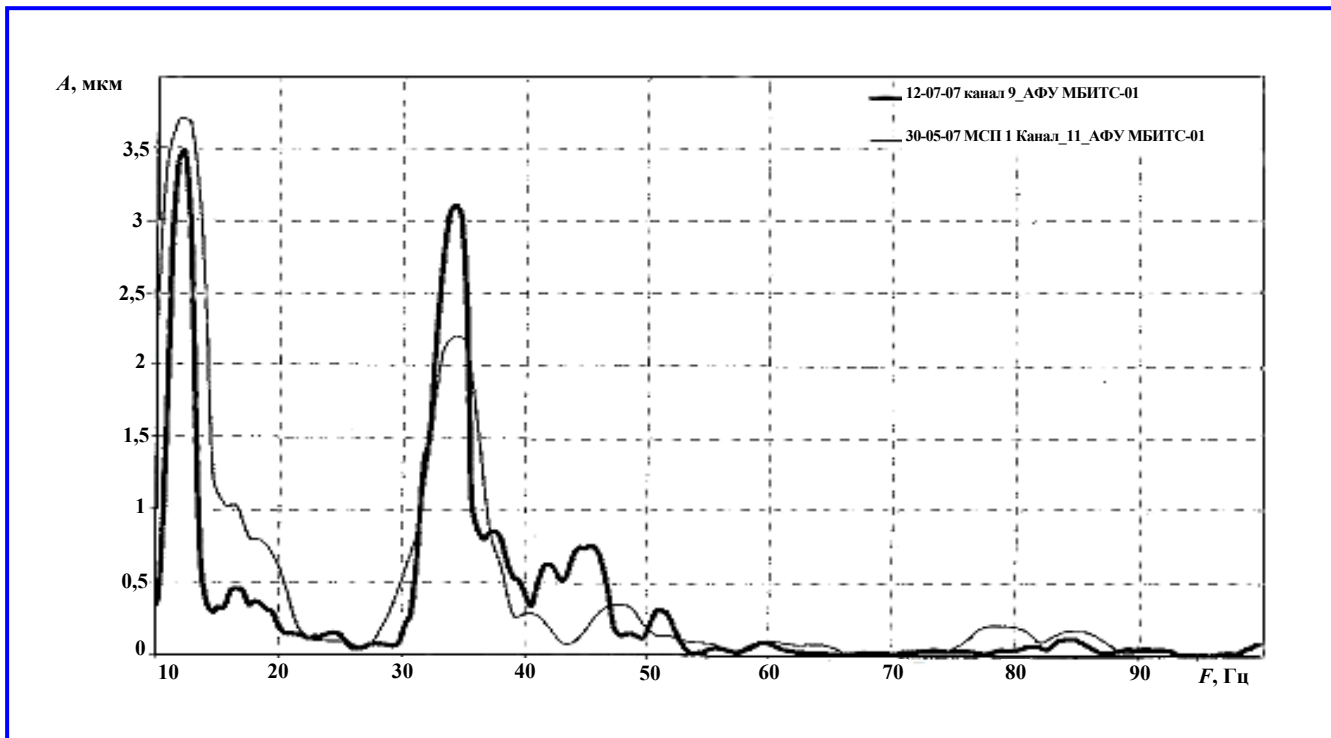


Рис. 11. Экспериментальные АЧХ по ускорению исходной (толстая линия) и модифицированной конструкции (тонкая линия)

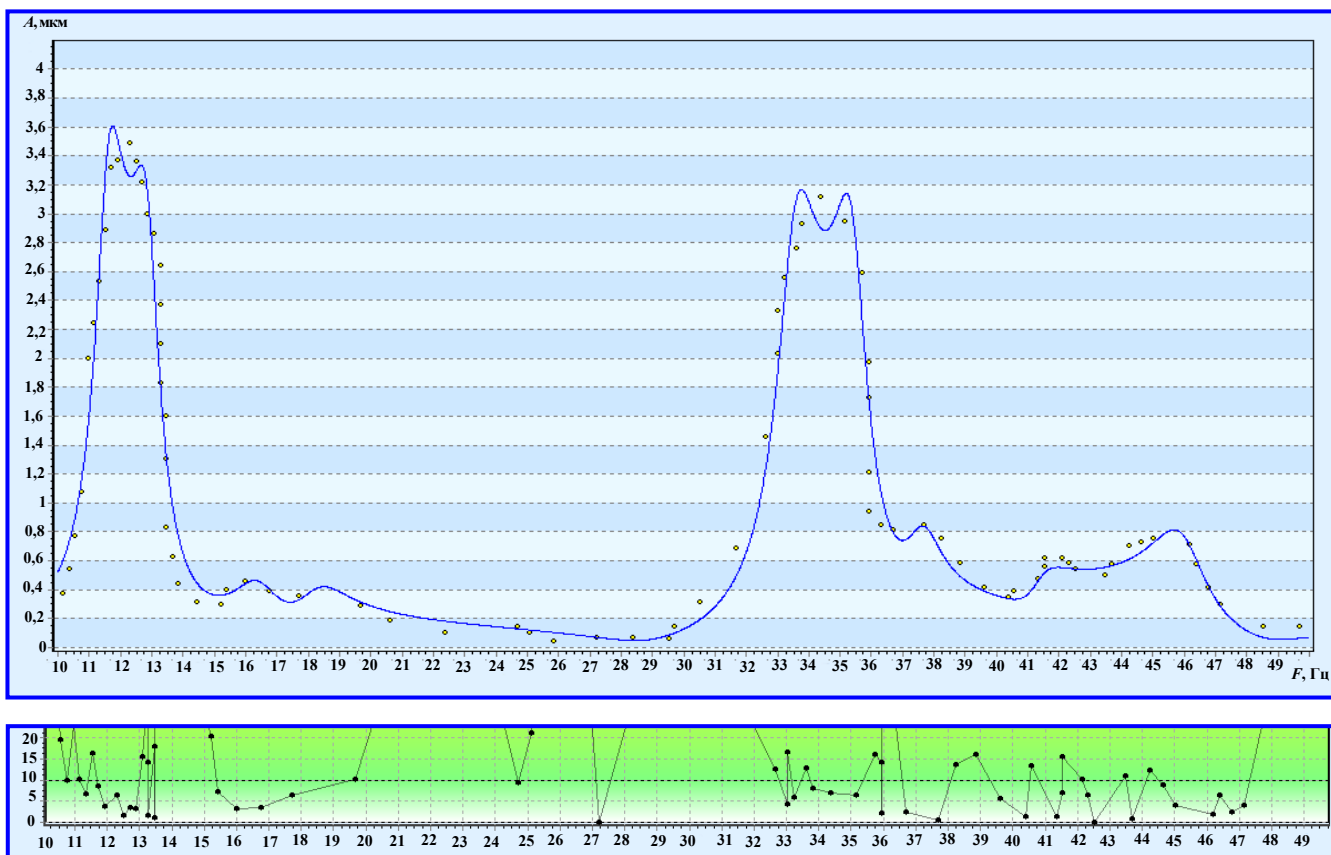


Рис. 12. Идентификация АЧХ по ускорению исходной конструкции и АЧХ относительной погрешности аппроксимации

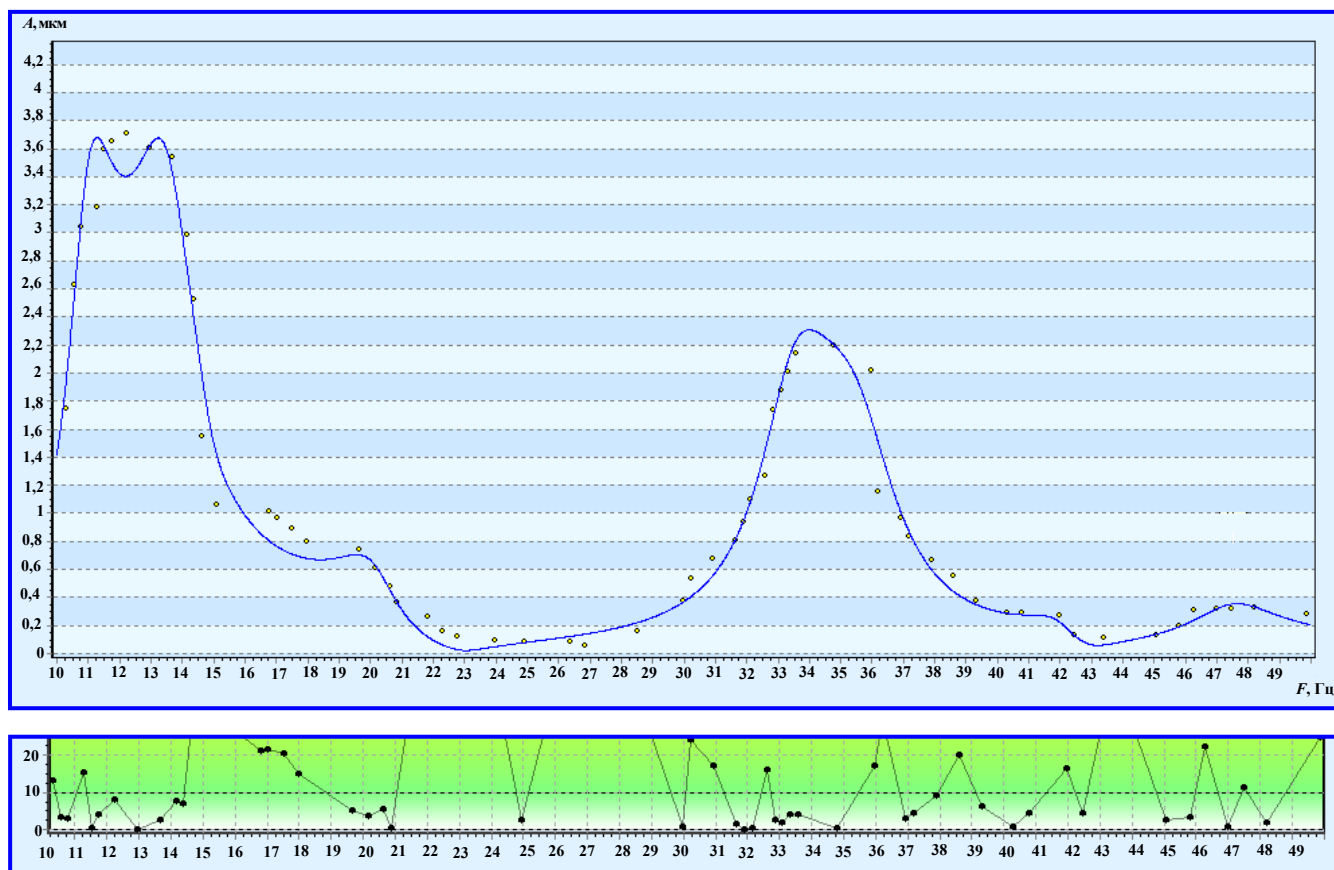


Рис. 13. Идентификация АЧХ по ускорению модифицированной конструкции и АЧХ относительной погрешности аппроксимации

крепления), вида тестирующего воздействия и точки измерения реакции, в рамках одного испытания они теоретически остаются постоянными и зависят только от точки измерения. Динамические свойства конструкции в целом характеризуют спектр собственных частот $\{\omega_{01}, \dots, \omega_{0k}, \dots, \omega_{0m}\}$ и спектр модальных коэффициентов демпфирования $\{\xi_{01}, \dots, \xi_{0k}, \dots, \xi_{0m}\}$ [2, 4, 5].

Сравнение результатов идентификации частотной характеристики в разных частотных диапазонах. На рис. 4 представлена экспериментальная АЧХ по ускорению (спектр по ускорению) исходной конструкции макета, снятая в диапазоне от 10 до 20 Гц на АФУ и отклик по ускорению на ударное воздействие. На рис. 5 представлена оцифрованная с помощью IMS-I экспериментальная АЧХ и результаты унимодальной идентификации в экспериментальном диапазоне [6]. Анализ результатов унимодальной идентификации показал, что с помощью одной моды в частотном диапазоне от 10 до 20 Гц качественной аппроксимации достичь невозможно.

Характер графика экспериментальной АЧХ и ширина пика позволяют предположить наличие сдвоен-

ных (нескольких) собственных частот в диапазоне от 11 до 12,5 Гц. На это же указывает и характер переходного процесса, который похож на совокупность биений, что позволяет предположить наличие близких собственных частот, возможно, в двух частотных диапазонах. Так же в диапазоне от 13 до 20 Гц можно предположить наличие нескольких «слабых» мод.

На рис. 6 представлены результаты идентификации АЧХ по ускорению с учетом двух мод в диапазоне от 11 до 12,5 Гц и четырех в диапазоне от 13 до 20 Гц. Даже визуально видно, что и в этом случае качество аппроксимации нельзя назвать удовлетворительным. Для повышения качества аппроксимации в роли компенсаторов возможного влияния неучтенных мод, были введены «фиктивные моды», последовательно, в низкочастотном (от 0 до 10 Гц) и высокочастотном диапазонах (от 20 Гц). Характеристики «фиктивных» мод подбирались «вслепую», исключительно из их влияния на качество аппроксимации в диапазоне от 10 до 20 Гц. Влияние «низшей» моды оказалось незначительным, а «высшая» мода с частотой 37 Гц позволила значительно повысить качество аппроксимации в диапазоне от 11 до 13 Гц (рис. 7).

На рис. 8 показана экспериментальная АЧХ по ускорению исходной конструкции макета, полученная на расширенном экспериментальном диапазоне (от 0 до 200 Гц) и другом уровне входного воздействия, из которой видно наличие значимых мод в диапазоне от 35 до 37 Гц. Таким образом, благодаря данному примеру была наглядно проиллюстрирована возможность процедуры экстраполяции модальных параметров, т. е. предсказания наличия и даже значений параметров мод, невидимых в экспериментальном диапазоне.

Однако, несмотря на ведение «фиктивных» мод, в диапазонах менее 10,5 и более 12,5 Гц качество аппроксимации нельзя считать хорошим, что может являться следствием не учёта знаков модальных коэффициентов влияния. Поскольку мы располагаем только АЧХ, которые из условий проведения эксперимента не являются прямыми частотными характеристиками (точки приложения силы и измерения реакции не совпадают), то вполне допустимо предположить наличие мод с отрицательными модальными коэффициентами влияния [4].

На рис. 9 представлены результаты аппроксимации АЧХ при введении отрицательной моды на частоте 12,29 Гц, визуальное качество аппроксимации очень высокое.

Далее только после предположения о возможности существования мод с близкими собственными частотами в диапазоне от 32 до 36 Гц удалось получить достаточно хорошую аппроксимацию в диапазоне от 10 до 50 Гц (рис. 10).

При обработке экспериментальных АЧХ программами Мера и Е440, в которых реализован унимодальный подход, в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц были получены только две собственные частоты 11 и 34 Гц. Если обработка результатов испытаний сводится к оценке коэффициентов динамичности конструкции, которые определяются как отношение максимального значения АЧХ к значению АЧХ на частоте близкой к нулю, тогда на первом сдвоенном максимуме с условной частотой 12 Гц при полимодальном подходе он будет

равен 19,5, а на втором с частотой 34 Гц – 11,6, что практически совпадает с результатами при унимодальном подходе. Однако дальнейший анализ ЧХ в целях диагностики при унимодальном подходе для данной конструкции не эффективен.

Анализ результатов модификации конструкции динамического макета (модальная диагностика). После проведения испытаний ДМ была проведена модификация его конструкции, заключающаяся в увеличении числа рёбер жёсткости кронштейнов АФУ, с целью снижения виброактивности наиболее нагруженных элементов. На рис. 11 представлены АЧХ по ускорению до и после модификации, измеренные на АФУ.

Экспериментальные АЧХ были обработаны с помощью программы IMS-I в интерактивном режиме. Результаты идентификации АЧХ по ускорению и погрешности аппроксимации для исходной и модифицированной конструкций представлены на рис. 12 и 13. Судя по АЧХ погрешности аппроксимации модели АЧХ по ускорению можно считать адекватными.

Для проведения модальной диагностики сопоставим спектры собственных частот, модальных коэффициентов демпфирования и модальных коэффициентов влияния исходной (А) и модифицированной конструкции (В), которые представлены соответственно на рис. 14, 15 и 16.

Результаты сопоставления представлены в таблице. Знаком «%» обозначено относительное изменение соответствующего параметра.

Выводы по процедуре модальной диагностики результатов модификации:

- *первый сдвоенный максимум.* Увеличение демпфирования на первой частоте на 4,45% и уменьшение на 20,92% на второй, снижение коэффициентов влияния на 20,18 и 9,94%. Таким образом имеются компенсирующие влияния близкие по значимости, в связи с чем, резонно было ожидать лишь небольшого уменьшения максимума;

- *второй сдвоенный максимум.* Уменьшение демпфирования на 18 и 20%, увеличение коэффициентов влияния на 23%.

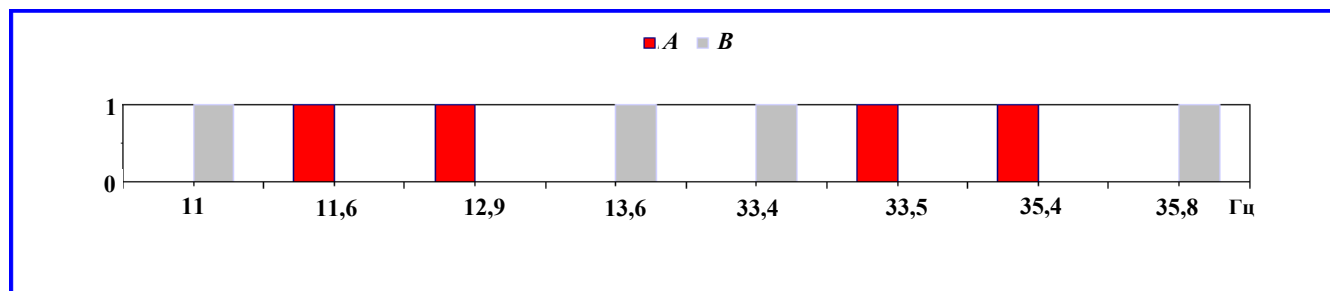


Рис. 14. Спектры собственных частот исходной (А) и модифицированной конструкции (В)

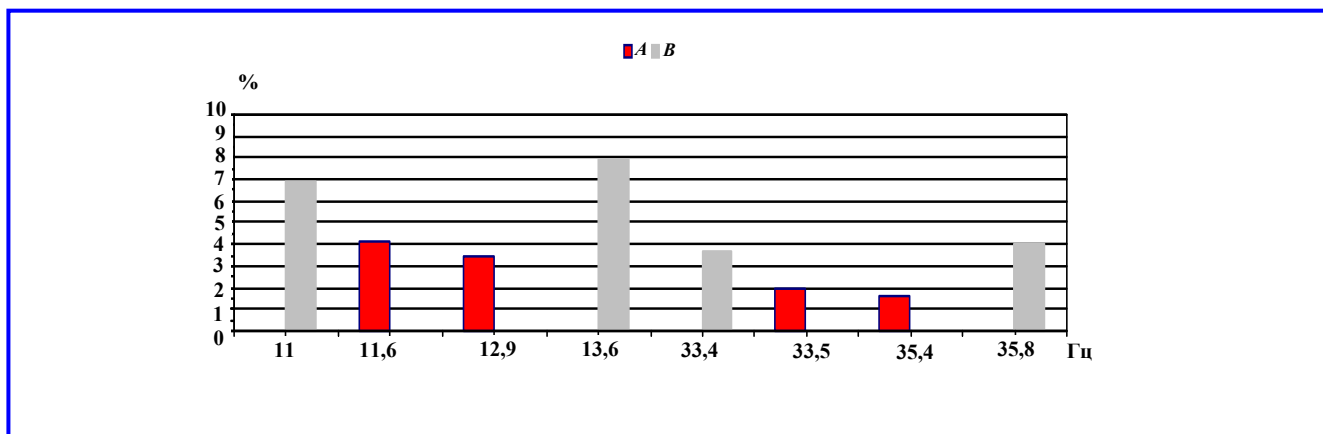


Рис. 15. Спектры модальных коэффициентов демпфирования исходной (A) и модифицированной (B) конструкции

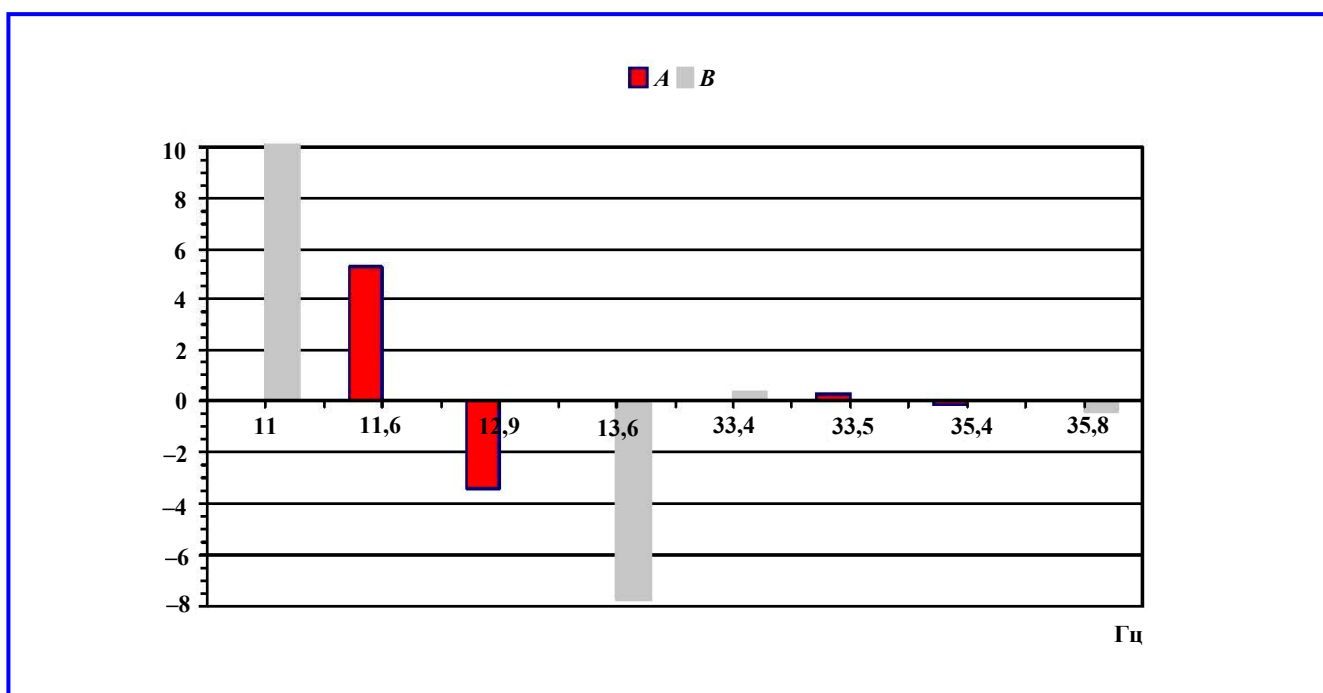


Рис. 16. Спектры модальных коэффициентов влияния исходной (A) и модифицированной (B) конструкции

Модальные параметры исходной и модифицированной конструкции

№ п/п	№ мод	Собственные частоты, Гц			Модальные коэффициенты демпфирования			Модальные коэффициенты влияния		
		f_0	f_m	%	ξ_0	ξ_m	%	e_0	e_m	%
1	1 ; 1	11,6	11,0	5,2	0,041	0,069	68,3	5,28	10,02	89,7
2	2 ; 2	12,9	13,6	5,4	0,035	0,079	125,7	-3,41	-7,74	127
3	4 ; 5	33,5	33,4	0,3	0,02	0,037	85,0	0,251	0,348	38,6
4	5 ; 6	35,4	35,8	1,1	0,016	0,040	150,0	-0,180	-0,362	101

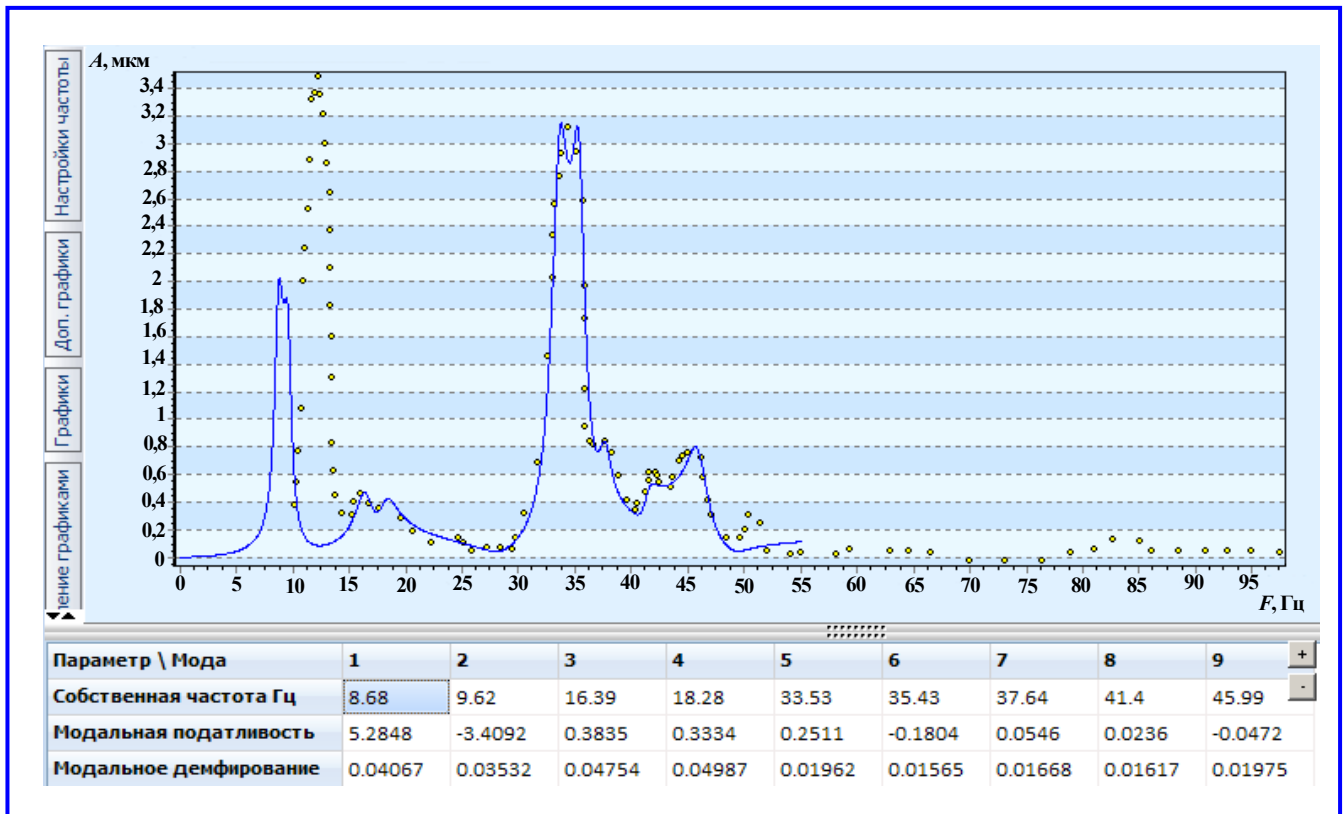


Рис. 17. Экспериментальная (точки) и синтезированная (линия) АЧХ по ускорению с уменьшенными собственными частотами

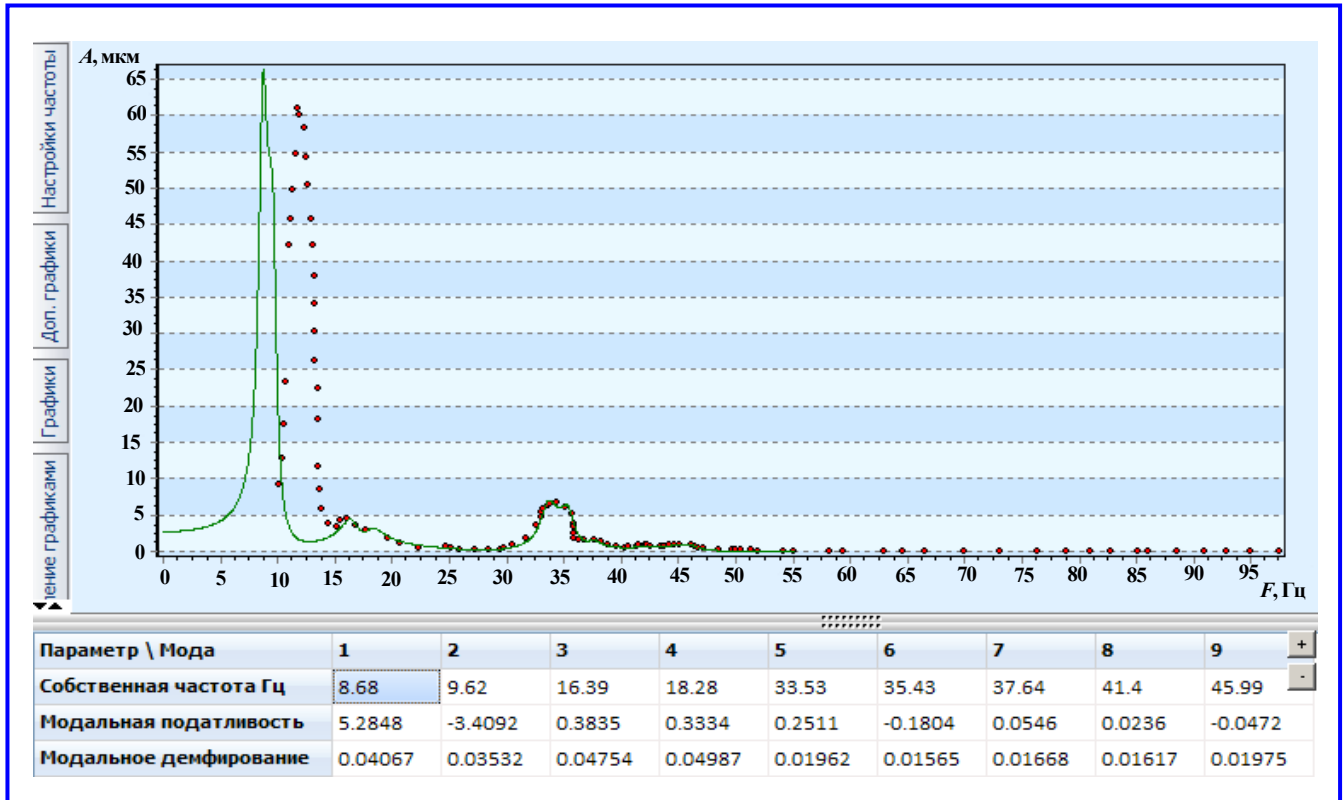


Рис. 18. Экспериментальная (точки) и синтезированная (линия) АЧХ по перемещению с уменьшенными собственными частотами

Поскольку обе моды имеют положительные коэффициенты влияния, то можно было бы прогнозировать увеличение максимума более чем на 40%.

Фактически в результате модификации первый максимум снизился примерно на 6%, а второй увеличился на 45,5%. Указанный выше механизм влияния на АЧХ собственных частот позволяет расширить область эффективных вариантов модификации конструкции.

Анализ чувствительности АЧХ к изменению модальных параметров. Рассмотрим влияние изменения модальных параметров на АЧХ исходной конструкции.

На рис. 17 представлена экспериментальная АЧХ по ускорению и синтезированная АЧХ с уменьшенными собственными частотами. Из графика видно, что уменьшение собственных частот на 3 Гц в 1,7 раза снижает максимум АЧХ по ускорению. Для АЧХ по перемещению (рис. 18) эта же модификация приводит даже к некоторому увеличению максимума. Увеличение собствен-

ных частот первого сдвоенного максимума приводит к увеличению максимума для АЧХ по ускорению и некоторому снижению для АЧХ по перемещению. Разнесение собственных частот приводит к снижению максимума до и к увеличению после исходных частот для АЧХ по ускорению (рис. 19). Противоположный результат для АЧХ по перемещению (рис. 20).

Полученные выше результаты показывают, что мероприятия по изменению параметров только одной моды сдвоенного пика не оказывают необходимого влияния на соответствующий пик АЧХ. Одновременное изменение параметров оказывается более эффективным, например, сближение частот при разных знаках и близких модулях модальных податливостей.

Выводы

1. Унимодальный подход к анализу частотных характеристик конструкций, хотя и позволяет с приемлемой точностью оценить коэффициенты динамичности, непригоден для более глубокого анализа.

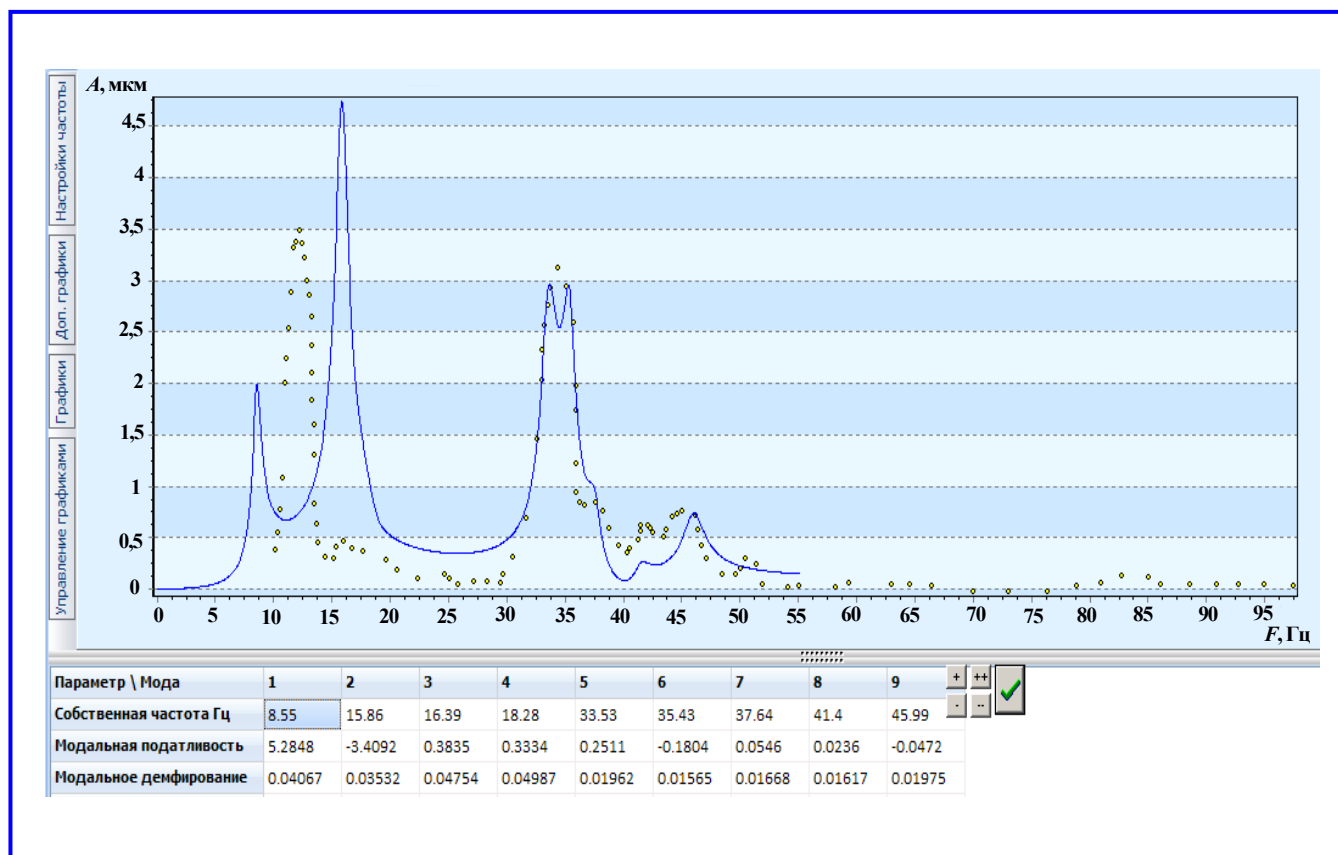


Рис. 19. Экспериментальная (точки) и синтезированная (линия) АЧХ по ускорению с разнесёнными собственными частотами

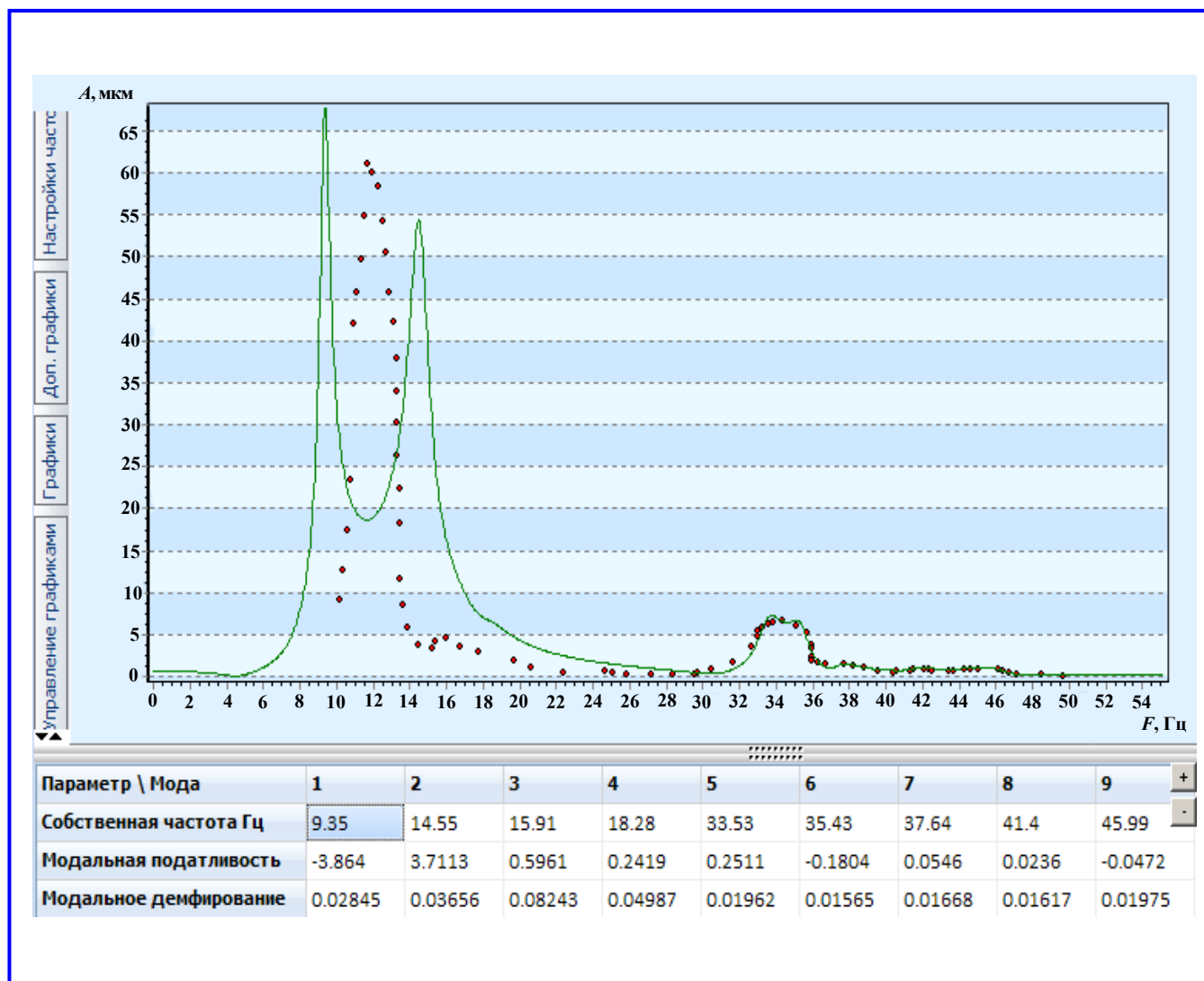


Рис. 20. Экспериментальная (точки) и синтезированная (линия) АЧХ по перемещению с разнесёнными собственными частотами

2. Полимодальный подход, реализуемый в экспериментальном модальном анализе, позволяет проводить глубокий анализ частотных характеристик, что повышает обоснованность квалификационных испытаний и создаёт предпосылки создания автоматизированной системы доводки конструкций и системы вибродиагностики [7].

Литература

- ГОСТ РВ 20.57.305-98 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства, и оборудование. Методы испытаний на воздействие механических факторов. – Введ. 1999–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
- Модальный анализ: теория и испытания: пер. с англ. / Вард Хейлен, Стефан Ламменс, Пол Сас. – М.: ООО «Новотест», 2010. – 319 с.
- Модальный анализ как основной метод получения динамических характеристик машин и механизмов / Т. И. Денисенко, Л. Г. Чистяков // Материалы семинара «Испытания и диагностика машин». – М. – 2007.
- Хомяков В. С. Идентификация упругих систем станков на основе модального анализа / В. С. Хомяков, С. И. Досько, Цзои Лю // Станки и инструмент. – 1988. – № 7. – С 11 – 14.
- Демпфирование колебаний: пер. с англ. / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
- Программа IMS-I для идентификации механических систем в частотной области (интерактивная версия) / С. В. Гусаров // Высокие технологии и фундаментальные исследования. Т. 1 : Сборник трудов Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» / под ред. А. П. Кудинова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 127 – 135.

7. Киренков В. В., Гусаров С.В., Досько С.И., Волков Н.В. Метод диагностирования состояния механических систем на основе модального анализа во временной области. Вестник МГТУ «Станкин», 1 (19) 2012.

Поступила в редакцию 02.11.2011

Гусаров Сергей Валерьевич, аспирант, старший инженер,
т. 8 (926) 128-25-15, e-mail: sergey-gusarov@yandex.ru.

Досько Сергей Иванович, канд. техн. наук, профессор,
т. 8 (926) 318-82-24, e-mail: dosko@mail.ru.

Баданин Вячеслав Викторович, инженер, т. 8 (917) 500-83-54,
e-mail: badaninslava@rambler.ru.

Исаев Сергей Александрович, аспирант, инженер-конструктор,
т. 8 (926) 204-39-80, e-mail: sis-serega@bk.ru.