

Основы модальных испытаний и анализа

Метод модального анализа (определение собственных частот и форм (мод) собственных колебаний) — важное средство изучения вибрационных характеристик механических конструкций. Суть его в том, что сигналы вибрационного возбуждения и измеренные сигналы отклика сложной конструкции, трудные для непосредственного восприятия, преобразуются в набор легко прогнозируемых модальных параметров. Физико-математическая подоплека этого метода не проста, но с помощью приведенных здесь теоретических сведений и примеров можно легко уяснить его основную идею и способы применения.

Модальное представление

Модальное представление, или представление собственных колебаний, — один из возможных способов рассмотрения вибрации конструкций. Вибрация и деформации конструкций при механическом возбуждении на собственных частотах характеризуются конкретными формами, которые называются собственными формами колебаний (колебательными модами). В типовых условиях эксплуатации характер вибрации будет сложным, включающим все собственные формы. Но если изучить каждую собственную форму отдельно, то с помощью этих знаний можно анализировать все имеющиеся типы вибрации. Кроме того, в ходе модального анализа сложная конструкция, которая трудно воспринимается в своей целостности, преобразуется в набор простых для понимания независимых систем с одной степенью свободы. Определение собственных частот, коэффициентов демпфирования и форм колебаний конструкции по результатам измерений частотной передаточной функции (ЧПФ) называется модальным анализом.

Например, свободно опертая балка, возбуждаемая на первой собственной частоте, деформируется в соответствии с первой (V-образной) собственной формой колебаний (рис. 1). В этом случае балка совершает двунаправленное циклическое перемещение из положения, показанного сплошной линией, в положение, представленное пунктирной линией. При возбуждении на второй собственной частоте деформация балки соответствует второй (S-образной) собственной форме колебаний. Если же возбуждение происходит на частоте, находящейся в промежутке между первыми двумя собственными частотами, деформация соответствует некоторой суперпозиции первых двух собственных форм. Третья собственная форма колебаний балки напоминает букву W. Чем выше номер собственной формы колебаний, тем больше узловых точек наблюдается.

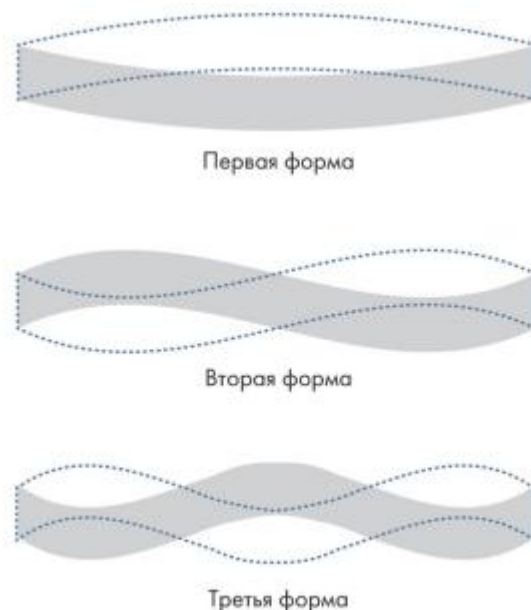


Рис. 1. Собственные формы колебаний свободно опертой балки

Для прогнозирования вибрационных характеристик проектируемой конструкции можно использовать динамический анализ методом конечных элементов. При таком анализе всю конструкцию представляют теоретически в виде набора пружин и масс, после чего можно составить систему матричных уравнений, описывающих конструкцию. Затем к полученным матрицам применяется математический алгоритм для определения собственных частот и форм колебаний конструкции. С помощью этого метода прогнозируют модальные параметры конструкции до ее изготовления, чтобы заблаговременно выявить возможные проблемы и устранить их на ранних стадиях процесса проектирования.

Далее, построив конструкцию или опытный образец, можно путем экспериментального модального анализа определить (подтвердить) фактические модальные параметры. Экспериментальный модальный анализ заключается в возбуждении конструкции некоторым способом и измерении ее ЧПФ во всех узловых точках расчетной сетки. Пример очень простой конструкции — вилочный камертон (рис. 2). Если измерить его ЧПФ в различных точках, результаты будут выглядеть так, как показано на этом рисунке. Собственные частоты индицируются пиками, возникающими на одной и той же частоте в каждой точке конструкции. Амплитуда пика в каждой точке описывает собственную форму колебаний на данной резонансной частоте, а острота пика показывает степень демпфирования каждой собственной формы.

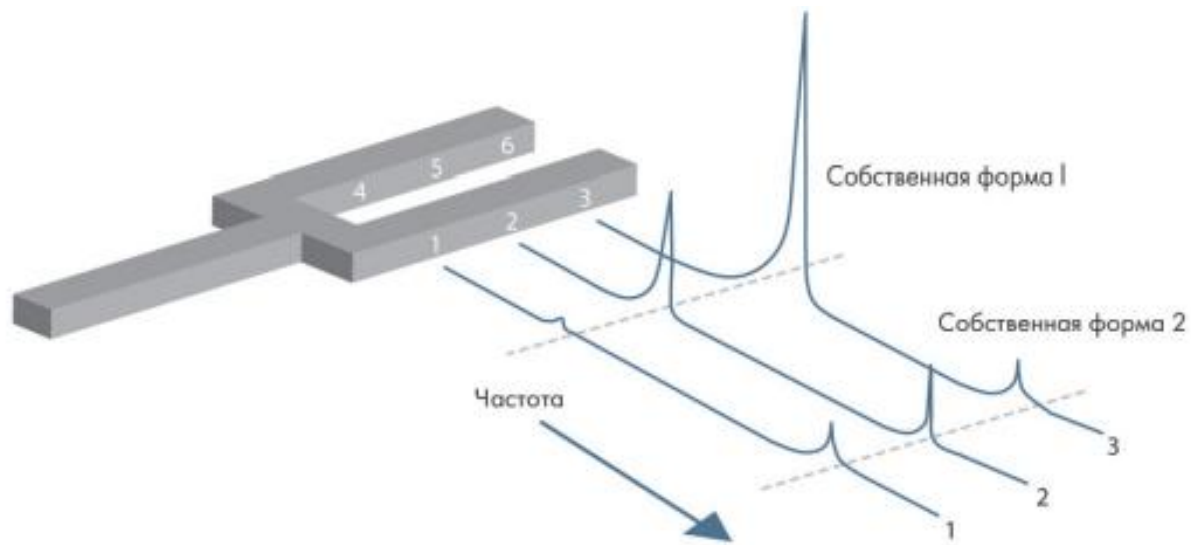


Рис. 2. Результаты модального анализа вилочного камертона

Приведенные на рис. 3 результаты показывают, что в случае первой собственной формы основание камертона зафиксировано, а конец его претерпевает максимальную деформацию, показанную на рисунке. Вторая собственная форма имеет максимальное отклонение в середине камертона.



Рис. 3.1. Первая и вторая собственные формы колебаний вилочного камертона

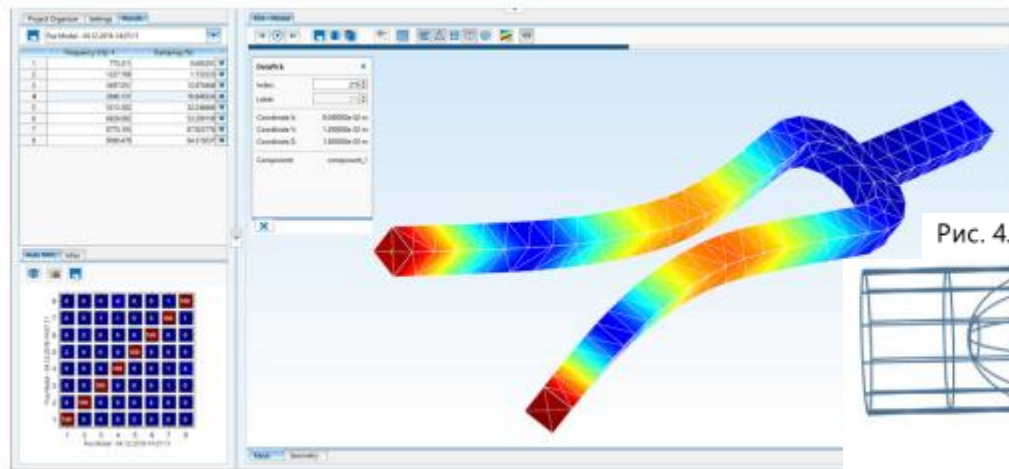


Рис. 3.2. Программная визуализация второй моды камертона



Рис. 4. Конечноэлементная модель космического летательного аппарата

Применения модального анализа

Собственные формы и частоты конструкции, называемые для краткости «модальные параметры», можно прогнозировать с помощью математических моделей, построенных методом анализа конечных элементов. Такая модель состоит из дискретных точек, соединенных между собой элементами, чьи математические свойства соответствуют характеристикам материалов конструкции. В модель вводятся граничные условия, задающие способ крепления конструкции к основанию или ее расположения на опорах, а также приложенные к ней нагрузки. К построенной модели применяется математический алгоритм, с помощью которого определяются собственные формы и частоты колебаний. Эти данные помогают инженерам проектировать конструкции и выяснять их вибрационные характеристики еще до изготовления. На рис. 4 показана конечноэлементная модель космического летательного аппарата с действующими на него нагрузками и граничными условиями.

После того как конструкция изготовлена, полезно проверить ее конечноэлементную модель методом экспериментального модального анализа. Сопоставление результатов этого анализа с теоретическими предсказаниями по конечноэлементной модели позволяет выявить и скорректировать ошибки в модели. Экспериментальный модальный анализ можно выполнять и без анализа по методу конечных элементов — просто для определения модальных параметров и, следовательно, вибрационных характеристик уже изготовленной конструкции.

Модальный анализ служит важным средством выявления и устранения проблем, связанных с вибрацией конструкций. Одна из распространенных проблем такого рода, которую позволяет обнаружить модальный анализ, — взаимодействие функции возбуждения с собственной частотой конструкции. В этом случае любое возбуждение, обусловленное, например, разбалансировкой вращающихся частей автомобильного двигателя, возвратно-поступательным движением в машине, широкополосным шумом ветра или дорожным шумом в транспортном средстве, заставляет конструкцию вибрировать, создавая как банальный дискомфорт для водителя и пассажиров, так и реальную угрозу движению. Функцию возбуждения можно проанализировать в частотной области для определения ее спектрального состава. Когда частота возбуждения совпадает с собственной частотой конструкции, результатом может стать очень сильная вибрация конструкции, что чревато ее усталостью и отказом.

С помощью модального анализа определяют собственные частоты, коэффициенты демпфирования и формы собственных колебаний конструкции. Если становится известно, что частота возбуждения совпадает с одной из собственных частот, определенных в ходе модального анализа, конструкцию можно пересмотреть в целом или скорректировать таким образом, чтобы отодвинуть ее собственную частоту от частоты возбуждения. В частности, можно дополнить конструкцию элементами жесткости, увеличить или уменьшить ее массу — тогда частота возбуждения более не будет совпадать с собственной частотой конструкции. Эти методы применимы для отстройки собственных частот от частоты вынуждающей силы. К другим методам виброзащиты относится повышение степени демпфирования конструкции за счет смены материала или покрытия поверхности конструкции вязкоупругим материалом. Конструкция может оснащаться динамическими виброгасителями, настроенными на частоту вынуждающей силы. В таком случае сильная вибрация возникает в самих виброгасителях, а вибрация конструкции ослабляется.

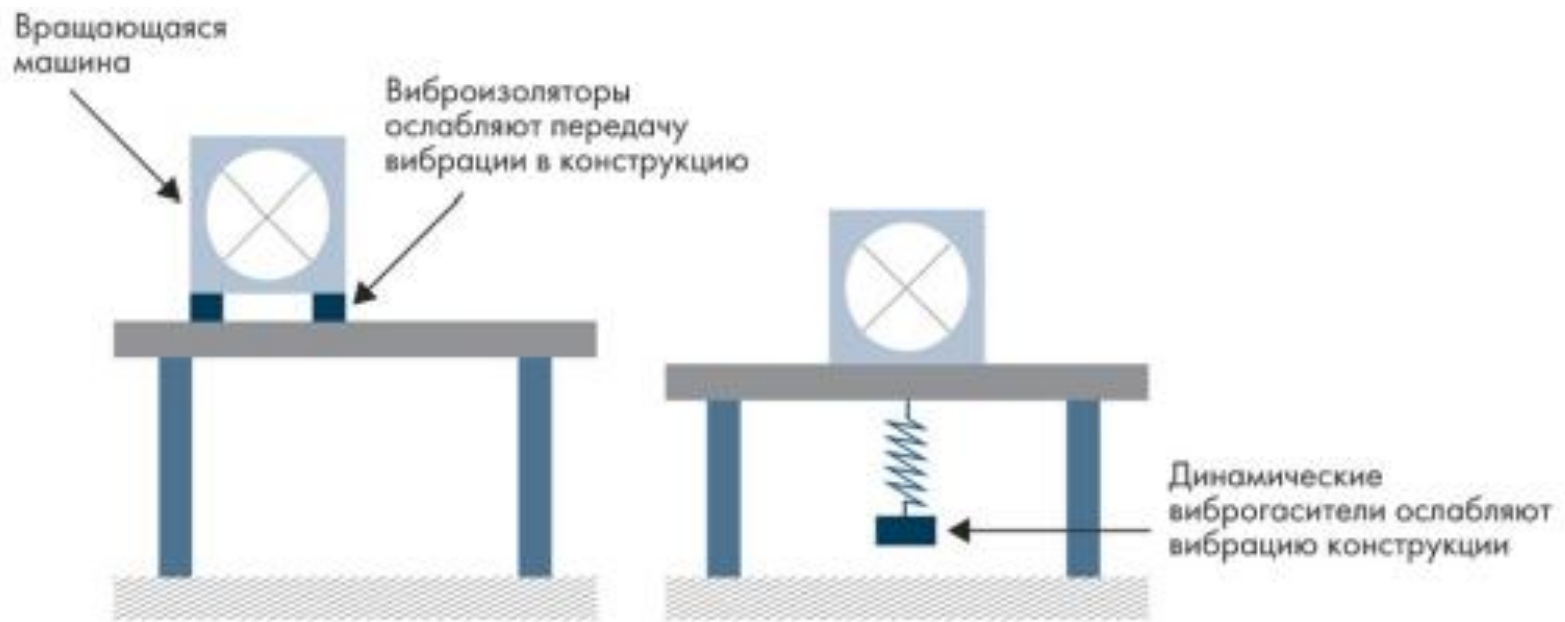


Рис. 5. Виброизоляция (слева) и динамическое гашение вибрации (справа) — методы пассивной виброзащиты

Если эти методы недостаточно эффективны, может применяться активная виброзащита, когда вибрация измеряется датчиками и по результатам измерений компьютер вырабатывает задающий сигнал для исполнительного механизма, противодействующего вибрации конструкции.

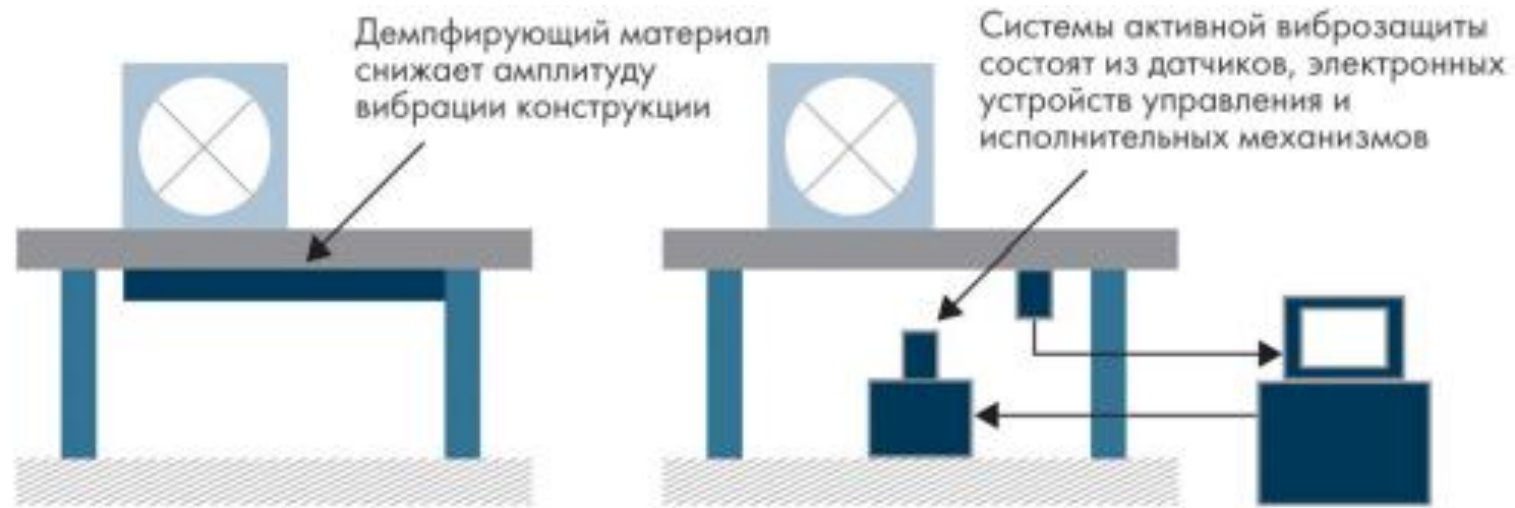


Рис. 6. Самый распространенный метод виброзащиты — демпфирование, самый дорогостоящий — активная виброзащита

Какой бы метод виброзащиты ни применялся, модальный анализ обычно служит отправной точкой для определения собственных частот, коэффициентов демпфирования и собственных форм колебаний конструкции. Модальные параметры помогают выявить причины нежелательной вибрации и найти действенное решение.

Регистрация данных для модального анализа

Первый этап экспериментального модального анализа — измерение возбуждения и отклика исследуемой конструкции. В конструкции возбуждается вибрация, после чего измеряются вынуждающая сила и вибрационный отклик конструкции (обычно виброускорение), и таким образом регистрируется набор данных ЧПФ. По этому набору данных можно определить модальные параметры, в том числе собственные частоты, коэффициенты демпфирования и собственные формы колебаний. Затем можно визуализировать собственные формы колебаний в анимационном виде.

Для того чтобы получить вибрационный отклик, необходимо возбудить вибрацию в конструкции. Есть два самых распространенных средства возбуждения вибрации: ударный молоток и модальный вибростенд. Ударный молоток, изображенный на рис. 7, — специализированное средство измерения, с помощью которого вызывается кратковременное возбуждение конструкции путем удара по ней в некоторой точке (рис. 8). Молоток оснащен тензодатчиком, вырабатывающим сигнал напряжения, пропорциональный вынуждающей силе. Так измеряется вынуждающая сила в ходе испытания. Ударный молоток часто используется для модального анализа простых конструкций или в случаях, где применение модального вибростенда нецелесообразно с практической точки зрения. Устанавливая на молоток ударные наконечники различной твердости, можно менять диапазон измерительных частот ударного воздействия. При необходимости выполнения измерений на низких частотах используется наконечник из мягкой резины, а на высоких частотах — из твердого металла.



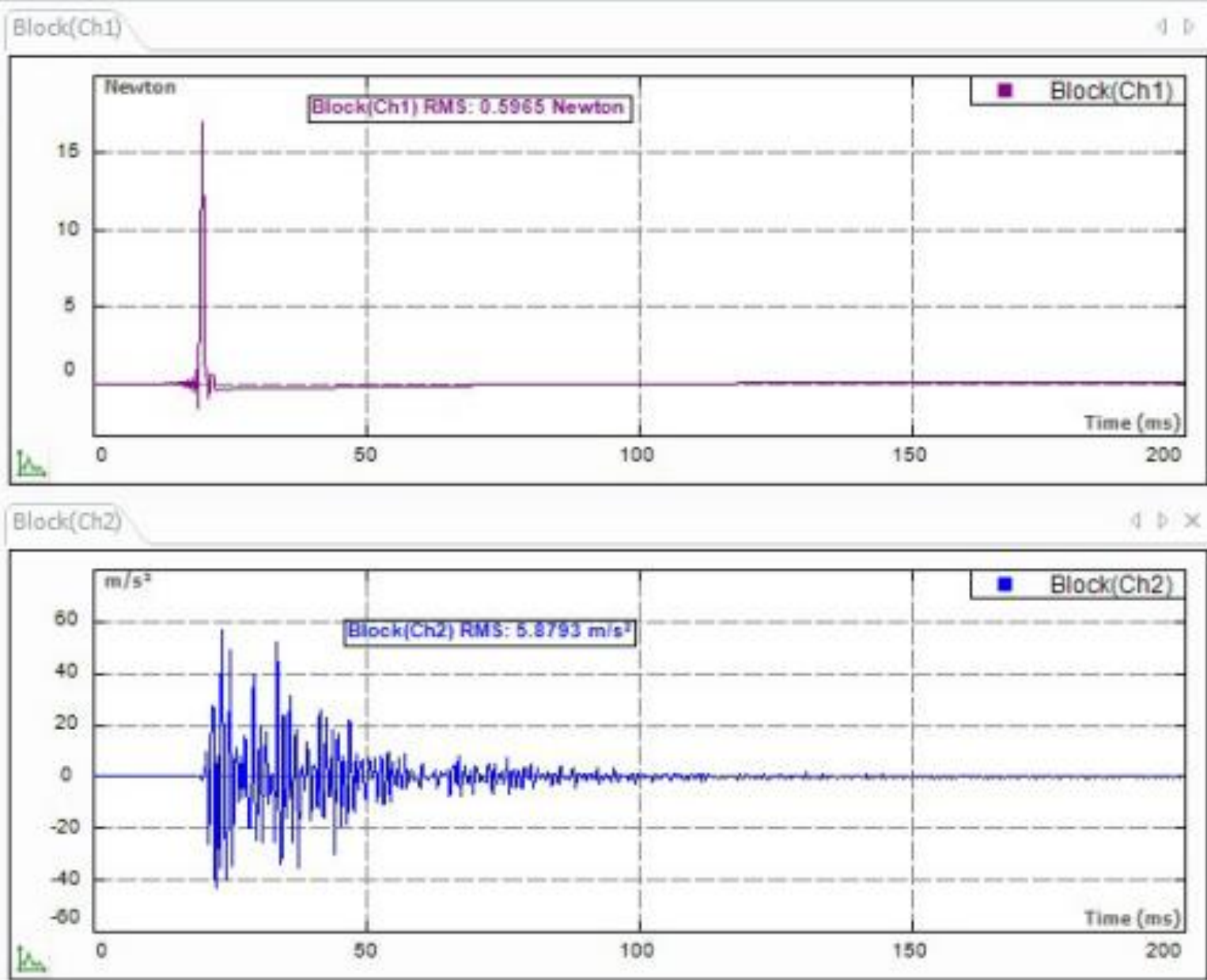


Рис. 8. Сигналограммы силы воздействия ударным молотком (input1) и отклика конструкции (input2)

Для лабораторных модальных испытаний часто используется модальный вибростенд. Такие системы характеризуются вынуждающей силой, которую они вырабатывают, и имеют разные размеры. Как правило, в режиме гармонической вибрации номинальная вынуждающая сила модальных вибростендов находится в диапазоне от десятков до сотен ньютонов. Выбор размера модального вибростенда зависит от вынуждающей силы, необходимой, чтобы получить достаточный уровень отклика от исследуемой конструкции.



Рис. 9. Модальные вибростенды используются при лабораторных измерениях и различаются по своим размерам

Обычно вибростенд соединяется с исследуемой конструкцией небольшим тонким металлическим стержнем, или штоком. В точке приложения вынуждающей силы к конструкции крепится тензодатчик, соединенный с одним из концов штока, — с его помощью измеряется вынуждающая сила. Довольно часто в точке приложения вынуждающей силы также крепится акселерометр для измерения виброускорения. Это легко осуществить с помощью импедансной головки (совмещенные тензодатчик и датчик ускорения).

Роль задающего генератора для вибростенда нередко играет цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) динамического анализатора сигналов — электронное устройство, вырабатывающее сигналы с точно заданными параметрами, которые затем усиливаются и преобразуются в сигналы возбуждения. Есть целый ряд типов профилей сигнала возбуждения: чисто случайный (белый шум), случайно-импульсный, псевдослучайный, случайно-периодический, ЛЧМ (импульсный ЛЧМ) и так далее.

Сигнал случайного профиля инициирует случайное возбуждение в широком диапазоне частот. При исследовании случайной вибрации в процессе регистрации данных можно применять оконные функции и усреднение. Одно из преимуществ случайной вибрации — возможность запрограммировать ее профиль таким образом, чтобы распределить энергию по всему спектру и тем самым оптимизировать измерения вибрации. На рис. 10-1 показаны сигналограмма случайной вынуждающей силы и вибрационного отклика (виброускорения), полученные в ходе модальных испытаний.

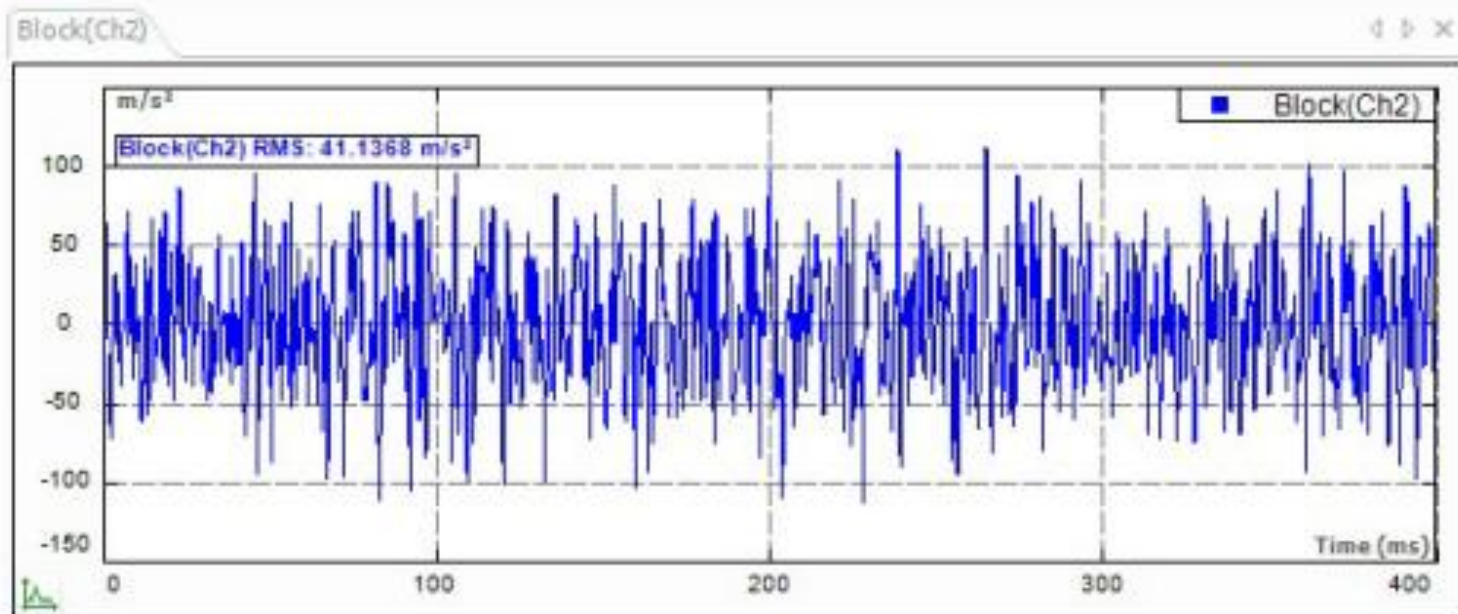
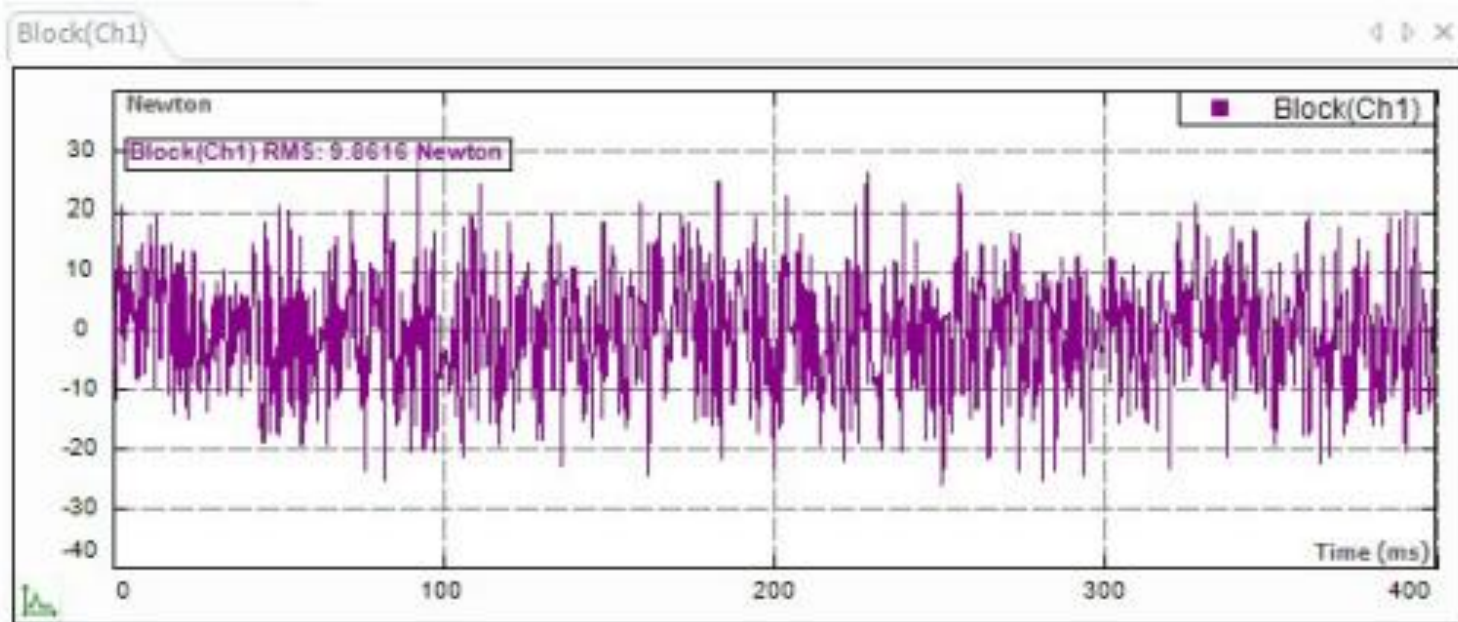


Рис. 10.1. Сигналограммы возбуждения вибрации случайным сигналом и вибрационного отклика полученные в ходе модальных испытаний на модальном вибростенде

Случайно-импульсный сигнал состоит из двух чередующихся временных интервалов, на первом из них возбуждается случайная вибрация, а на втором возбуждение отсутствует (пауза). Длительность обоих интервалов можно программировать так, чтобы вибрация конструкции затухала к окончанию паузы. Преимущество здесь в том, что не требуется применять оконные функции, поскольку возбуждение и отклик имеют периодический характер. Случайно-импульсное возбуждение в отличие от чисто случайного позволяет гораздо точнее измерять амплитуду отклика и коэффициент демпфирования.

Псевдослучайный сигнал — это эргодический сигнал, частотный спектр которого содержит только составляющие, кратные частотному инкременту БПФ (Δf). Спектр данного сигнала имеет единичный форм-фактор с постоянной амплитудой вдоль всей оси частот, но рандомизированной фазой. Хотя случайно-периодический сигнал также является эргодическим и содержит только составляющие, кратные частотному инкременту БПФ, в его частотном спектре случайно распределены как фаза, так и амплитуда.

При использовании случайных сигналов двух указанных выше типов, если оставить достаточно времени (то есть достаточно количество циклов задержки) в ходе измерения для затухания переходных процессов от начала каждой порции сигнала, получившиеся временные развертки входных воздействий и реализаций отклика системы будут периодическими относительно периода выборки. Для однократного усреднения спектра сигнал во временной области, полученный из вышеупомянутого частотного спектра, повторяется $(N_d + N_c)$ раз. Первые N_d повторов делаются в расчете на периодический отклик конструкции, а следующие N_c откликов измеряются и циклически усредняются (временное усреднение). Использование обоих типов случайных сигналов позволяет получить более достоверный «линейный эквивалент» конструкции, за что приходится платить значительно большей длительностью испытания.

ЛЧМ-сигнал — это короткий (обычно длительностью в 1 с или менее) синусоидальный сигнал, частота которого увеличивается по линейному закону. По достижении конечной частоты может следовать пауза, затем сигнал повторяется, и так далее. Длительность паузы можно запрограммировать так, чтобы отклик конструкции гарантированно затухал до окончания каждого временного промежутка. Тем самым обеспечивается периодичность сигналов возбуждения и отклика в пределах каждой временной выборки. Преимущество этого типа сигнала в том, что он создает возбуждение на всех частотах и имеет периодический характер — это избавляет от необходимости применять оконные функции, если только время выборки в анализаторе сигналов синхронизировано с ЛЧМ-сигналом. Кроме того, его характеризует более высокое отношение сигнал-шум по сравнению со случайным возбуждением. Типовые сигналограммы возбуждения конструкции импульсным ЛЧМ-сигналом и вибрационного отклика показаны на рис. 10.2.

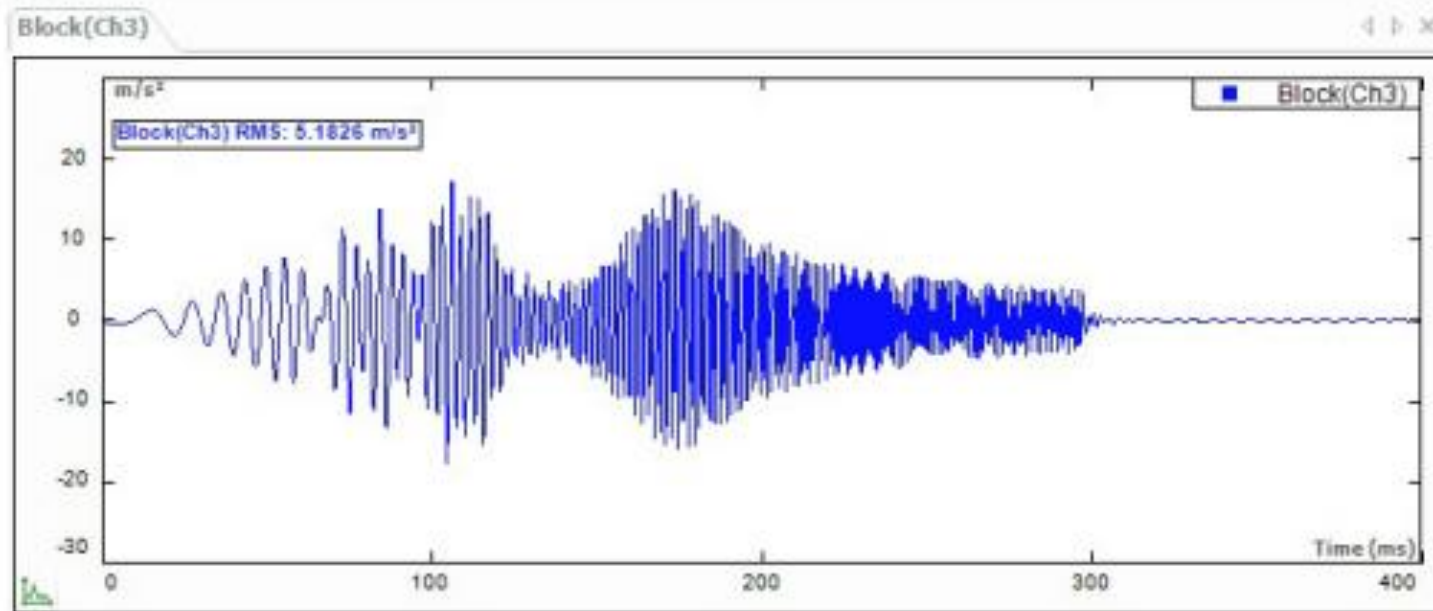
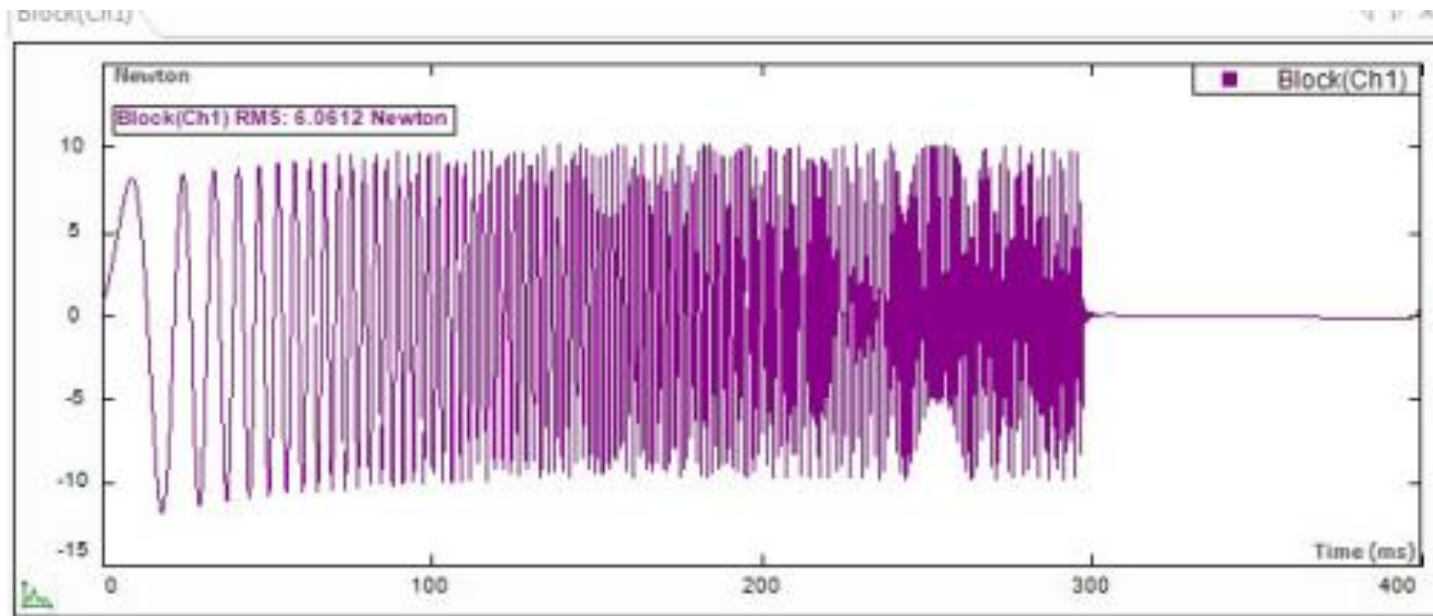


Рис. 10.2. Сигналограммы возбуждения вибрации импульсным ЛЧМ-сигналом и вибрационного отклика, полученные в ходе модальных испытаний на модальном вибростенде

Измерения: ЧПФ, функция когерентности, спектр

МОЩНОСТИ

Возбудив вибрацию в конструкции, необходимо далее измерить как само возбуждение, так и отклик. Обычно для этого на исследуемой конструкции крепят тензодатчики и акселерометры, чьи выходные сигналы регистрируются с помощью динамического анализатора сигналов. Акселерометр — это электронный измерительный датчик, преобразующий электрический сигнал в ускорение. Существуют одно- и трехосевые акселерометры. Трехосевой акселерометр в действительности представляет собой три акселерометра, ориентированные перпендикулярно друг к другу. Он обеспечивает измерение вибрации по всем трем пространственным осям. Динамический анализатор сигналов — это прибор, который регистрирует сигналы и измеряет их параметры, после чего вычисляет представление таких сигналов в частотной области.

Важный параметр при регистрации данных для модального анализа — необходимое количество контрольных точек на исследуемой конструкции. Если точек слишком много, результатом будет чрезмерно большой объем данных и лишняя трата времени. Если точек недостаточно, то конструкция не будет представлена надлежащим образом и есть риск не запечатлеть искомые собственные формы колебаний. Понадобится определенное инженерное здравомыслие, чтобы оценить вероятные собственные формы колебаний и выбрать такое количество точек, которое будет адекватно представлять исследуемую конструкцию.

Наиболее распространенные типы функций, используемых в модальном анализе, — это амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) (иначе — частотная передаточная функция, ЧПФ) и функция когерентности. По линейным спектрам можно рассчитать спектр мощности и взаимный спектр мощности. Чтобы ослабить влияние шума, производится усреднение по множеству результирующих БПФ. Оценку ЧПФ типа $H1$ можно рассчитать по данным зависимости G_{yx} от G_{xx} .

Амплитудно-фазовая частотная характеристика

АФЧХ рассчитывается по двум сигналам: выходному сигналу отклика и входному сигналу возбуждения. ЧПФ описывает отношение одного сигнала к другому в представляющем интерес диапазоне частот. Она используется в модальном анализе, где измеряется ответное виброускорение конструкции относительно вынуждающей силы, воздействующей на нее при возбуждении ударным молотком или модальным вибростендом. Измеренный сигнал ЧПФ является комплексным и имеет две составляющих: либо амплитуду и фазу, либо вещественную и мнимую части. На рис. 11 показана типовая ЧПФ, представленная в логарифмическом масштабе в виде амплитуды и фазы (ЛАФЧХ).

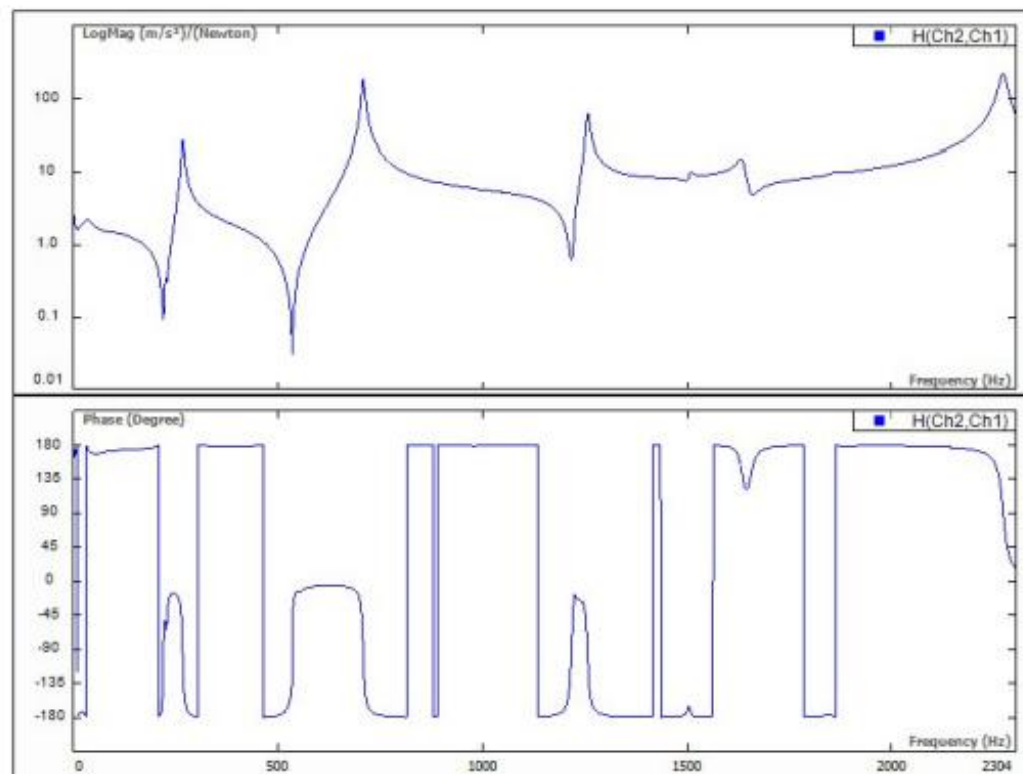


Рис. 11. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ): верхний график — амплитуда, нижний — фаза

Функция когерентности связана с ЧПФ и показывает, какую часть отклика можно приписать возбуждению. Это функция частоты с областью допустимых значений от нуля до единицы. В модальном анализе по сигналу функции когерентности оценивается качество измерения. При качественном возбуждении вибрационный отклик идеально коррелирует с вынуждающей силой, о чем говорит близкое к единице значение функции когерентности во всем диапазоне частот. Функцию когерентности следует контролировать в процессе регистрации данных, чтобы обеспечить их корректность. В целом функция когерентности должна принимать значения, близкие к единице, во всем диапазоне частот. Вместе с тем нормально, если она принимает малые значения в точках антирезонанса или в тех узлах конструкции, где вибрационный отклик очень слаб (рис. 12).

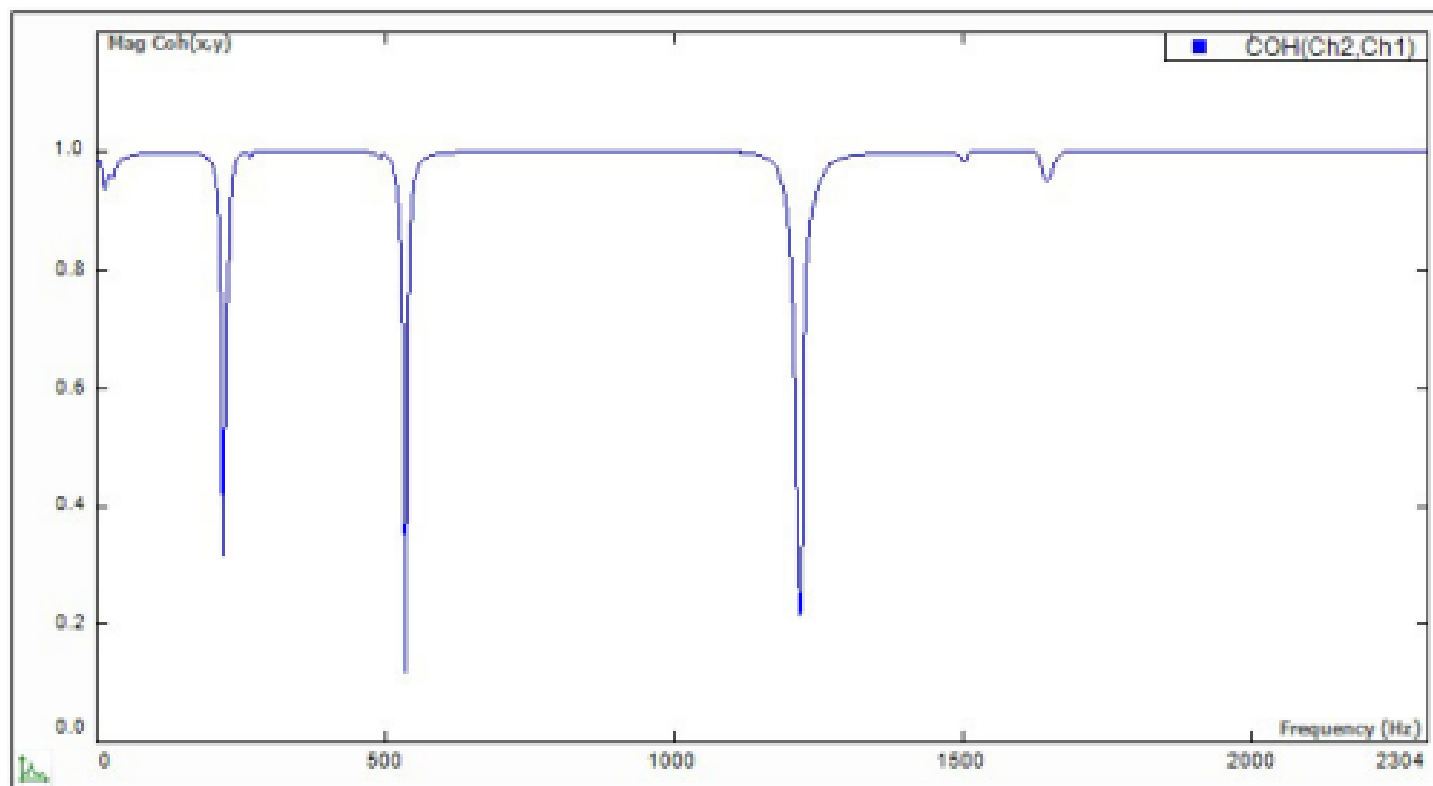


Рис. 12. Функция когерентности показывает качество данных ЧПФ