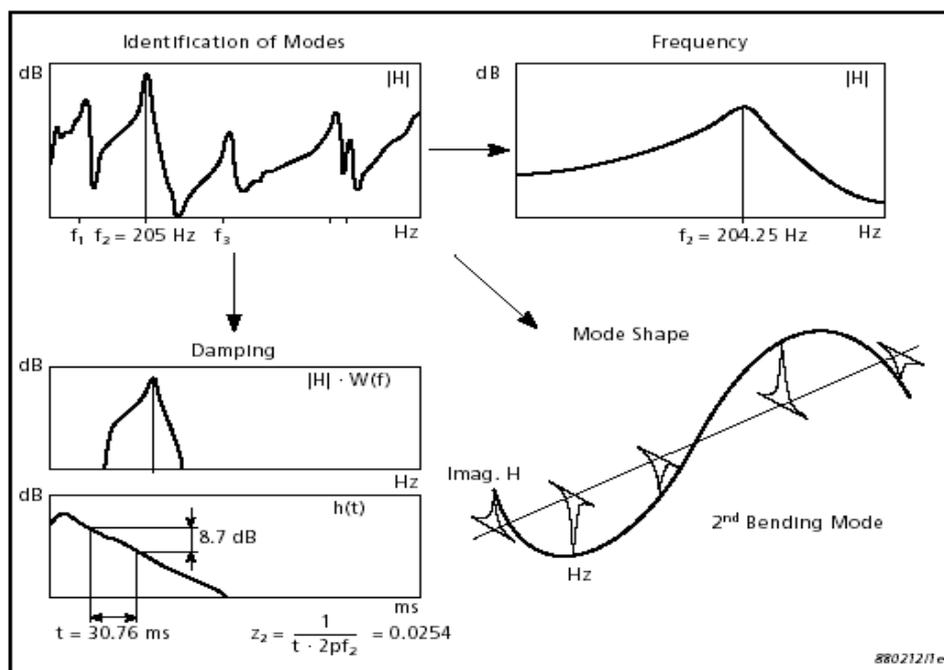


Определение модальных параметров простых конструкций

Авторы: Свенд Гейд, Хенрик Херлуфсен и Ханс Константин -Хансен, фирма Брюль и Кьер, Дания

Использование анализатора PULSE™, Многофункциональной системы анализа 3560, позволяет легко определить модальные параметры простых конструкций. В настоящей рубрике “Информация о применении” рассмотрены способы измерения модальной частоты путем исследования кривых функций АЧХ, определения модальной скорости затухания при помощи встроенной в анализатор функции частотного взвешивания и идентификации формы кривой вида колебаний посредством рассмотрения значения мнимой части функции АЧХ.

На кривой функции АЧХ конструкции можно выделить несколько видов колебаний. При помощи Многофункциональной системы анализа PULSE 3560 для каждого вида колебаний могут быть определены резонансная частота, скорость затухания и форма кривой.



а. выделение вида колебаний; б. частота; в. скорость затухания; г. форма кривой вида колебания; д. мнимое значение H; е. вид колебания 2-ого изгиба.

ВВЕДЕНИЕ

На практике почти все проблемы вибраций связаны с понятием “слабость конструкции”, которое подразумевает определенные резонансные свойства конструкции (т.е. возбуждаемые действующими силами собственные частоты). Совершенно очевидно, что динамические свойства всей конструкции (в заданном частотном диапазоне) можно рассматривать как сумму свойств отдельных видов вибраций, каждый из которых характеризуется такими параметрами, как собственная частота, скорость затухания и форма кривой. Используя эти, так называемые, модальные параметры для моделирования конструкций, можно исследовать и затем решать проблемы возникновения специфических резонансов.

На первом этапе создания динамической модели конструкции основная задача заключается в том, чтобы определить указанные выше модальные параметры:

- Резонансная или модальная частота
- Скорость затухания резонансных колебаний - модальная скорость затухания
- Форма кривой вида колебаний

Для определения модальных параметров следует выполнить ряд измерений АЧХ на участке между опорной точкой и несколькими измерительными точками. Такая измерительная точка, как рассматриваемая в настоящей статье, обычно называется “точка степени свободы (DOF)”. Значения модальной частоты и скорости затухания можно рассчитать на основе любого измерения АЧХ конструкции (кроме тех, для которых измерения возбуждающей силы или АЧХ выполняются в узловой

позиции, т.е. смещение равно нулю). Эти два параметра носят название “глобальные параметры”. Однако для того, чтобы создать наиболее точную динамическую модель конструкции, необходимо измерить соответствующие значения формы кривой и АЧХ с использованием как можно большего числа точек степени свободы; только так можно обеспечить полный охват исследуемой конструкции в процессе измерений.

На практике АЧХ измерения указанных типов легко выполнить при помощи двухканального анализатора сигналов, например, такого, как стандартная двухканальная конфигурация анализатора PULSE, Многофункциональной системы анализа 3560. Возбуждающая сила (созданная ударным молотком или возбудителем колебаний с встроенным устройством, генерирующим случайный или псевдослучайный звуковой сигнал) измеряется при помощи динамометрического преобразователя, а результирующий сигнал передается на один из входов. Если применяется возбудитель колебаний, модуль генератора должен быть установлен в анализаторе. АЧХ измеряется акселерометром, а результирующий сигнал передается на другой вход. Следовательно, значение АЧХ дает представление об ускорении конструкции, так как измеренное количество - это сложное отношение ускорения к силе в частотной области. При возбуждении конструкции посредством устройства ударного молотка позиция АЧХ акселерометра фиксирована и используется в качестве опорной позиции. Молоток перемещается относительно конструкции и применяется для возбуждения последней в каждой измерительной точке DOF, соответствующей точке DOF модели. При возбуждении конструкции посредством возбудителя колебаний фиксирована точка возбуждения, которая используется в качестве опорной позиции, в то же время АЧХ акселерометр перемещается относительно конструкции. Стандартная конфигурация оборудования приведена на рис. 1.

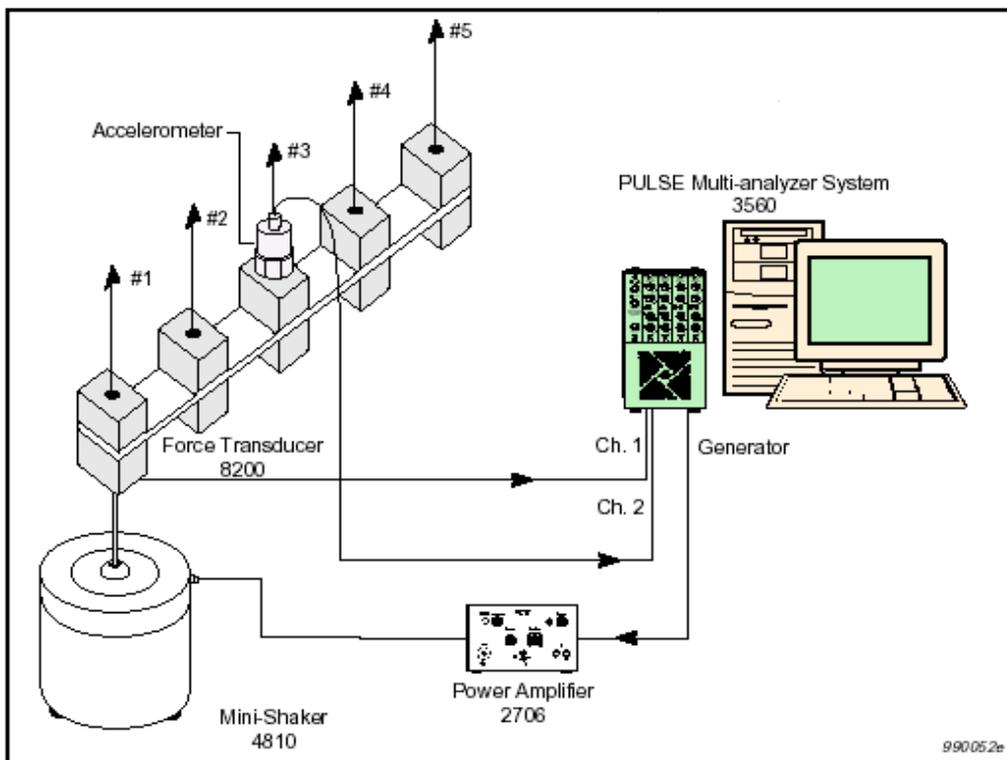


рис. 1 Конфигурация оборудования, в которой использован возбудитель колебаний, создающий возбуждающую силу посредством широкополосного псевдослучайного звукового сигнала.

- а. акселерометр; б. Динамометрический преобразователь 8200; в. Минивибратор 4810; г. Силовой усилитель 2706; д. канал 1,2; е. генератор; ж. Многофункциональная система анализа PULSE 3560.

При необходимости обследования структур с большим количеством точек DOF в состав Многофункциональной системы анализа 3560 может быть введено до восьми четырехканальных модулей (без увеличения физических размеров системы), что упрощает и ускоряет процедуру измерений. Кроме того, система способна одновременно выполнять измерения до 31 АЧХ сигнала и одного динамического входного сигнала, что значительно сокращает время, затрачиваемое на перемещение АЧХ акселерометра.

ПРОСТЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Конструкции, для которых характерны слабо взаимодействующие виды колебаний, обычно называются простыми конструкциями. Виды колебаний разнесены достаточно далеко и слабо демпфированы (см. рис. 2). При возникновении явления резонанса простые конструкции чаще всего ведут себя как системы первой степени свободы (SDOF) и модальные параметры таких систем можно определить сравнительно легко, используя Многофункциональную систему анализа PULSE 3560 фирмы Брюль и Кьер соответствующей конфигурации.

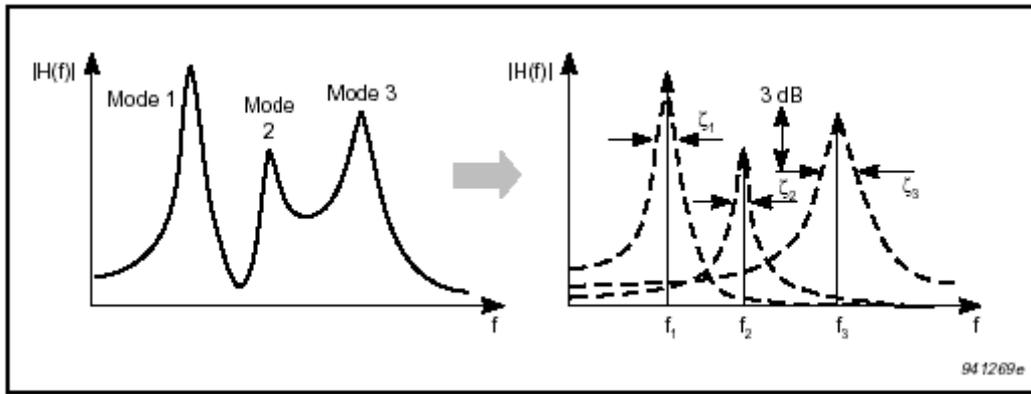
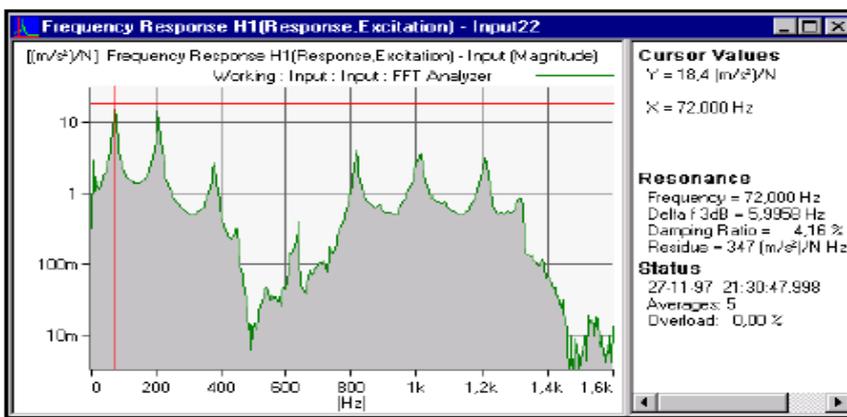


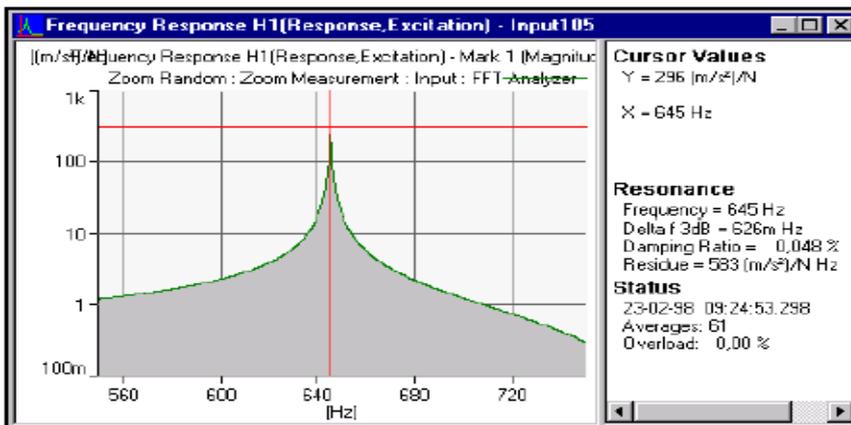
рис. 2 На кривой АЧХ простой конструкции можно выделить несколько видов колебаний, каждый вид будет иметь свойства системы первой степени свободы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДАЛЬНЫХ ЧАСТОТ



Резонансная частота - модальный параметр, который проще всего определить. Резонансное колебание имеет вид пика на магнитуде функции АЧХ, таким образом, значение частоты, соответствующей пику определяется при помощи курсора анализатора, см. рис. 3.

рис. 3 Магнитуда функции АЧХ (Ускорение) для исследуемой конструкции.



Точность измерения частоты определяется частотной разрешающей способностью режима анализа. Для достижения более высокой точности измерений можно или сократить частотный диапазон измерений в опорной полосе частот для резонансов, расположенных на низких частотах, или выполнить масштабируемые измерения в пределах заданной частоты, см. рис. 4.

рис. 4 Масштабируемое измерение, выполняемое для достижения более высокого частотного разрешения при определении резонансной частоты второго вида колебаний. Значение скорости затухания второго вида колебаний определяется точками половинной мощности и может быть считано в поле вспомогательного курсора.

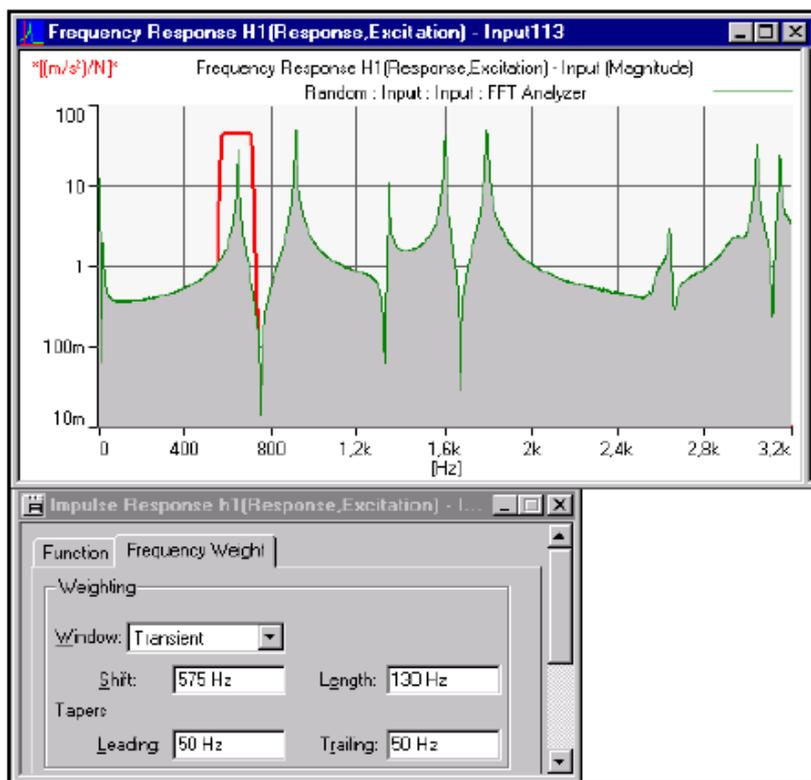
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЗАТУХАНИЯ

Классический метод определения скорости затухания резонансных колебаний при помощи частотного анализатора состоит в идентификации точек половинной мощности (-3 дБ) на магнитуде функции АЧХ (см. рис. 4). Для заданного периода колебаний скорость затухания ϵ_r можно вычислить при помощи следующего уравнения:

$$\epsilon_r = \frac{\text{дельта } f}{2f_r},$$

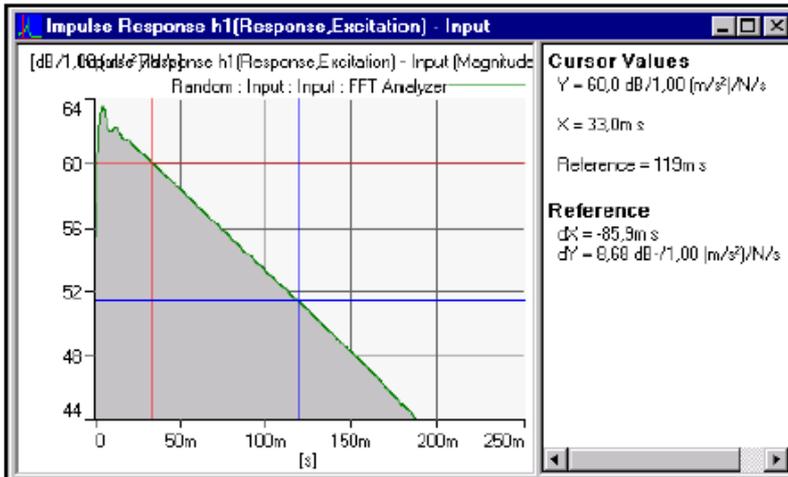
где $\text{дельта } f$ - ширина полосы частот между двумя точками половинной мощности, а f_r - резонансная частота. В состав Анализатора 3560 входит встроенное стандартное показание курсора, при помощи которого рассчитывается значение модальной скорости затухания.

Точность метода зависит от частотной разрешающей способности, используемой при проведении измерения, так как именно это значение определяет, насколько точно может быть измерена пиковая магнитуда. Для конструкций с незначительной скоростью затухания выполнение точного измерения пика возможно только при условии применения высокоразрешимого анализа, следовательно, для обеспечения достаточной точности измерений обычно требуется выполнение масштабируемого измерения для каждой резонансной частоты. Это означает, что для каждого резонанса следует каждый раз выполнять новое измерение.



Однако для определения скорости затухания можно использовать альтернативный метод, который позволяет избежать необходимости выполнения новых измерений для каждого резонанса, реализацию этого метода обеспечивает система PULSE. Если при помощи функции частотного взвешивания (окно) на кривой функции АЧХ выделить отдельный вид колебаний (см. рис. 5), оказывается довольно просто применить к этому отдельно взятому виду колебаний функцию временного импульса. Магнитуда (огibaющая) функции временного импульса может быть затем изображена на экране при помощи преобразующего устройства Гильберта, встроенного в анализатор.

рис. 5 Функция частотного взвешивания системы PULSE позволяет выделить на кривой функции АЧХ отдельный вид колебаний.



В связи с тем, что при каждом явлении резонанса простая конструкция ведет себя как система первой степени свободы, функция временного импульса резонанса, выделенного в окне, будет демонстрировать характерный экспоненциальный распад t . Посредством изображения магнитуды на логарифмической шкале временной импульс может быть представлен в виде прямой линии (см. рис. 6).

рис. 6 Для упрощения расчетов скорости затухания функция временного импульса выделенного вида колебаний может быть представлена магнитудой, изображенной на логарифмической шкале.

Зависимость между скоростью распада ω_r для выделенного вида колебаний и постоянной времени t_r выражена уравнением:

$$t_r = \frac{1}{\omega_r}$$

Скорость распада, соответствующая постоянной времени t_r , выражена в виде множителя e^{-1} или в дБ: $-20 \log_e = -8,7$ дБ.

Зависимость скорости затухания от скорости распада выражена уравнением:

$$\text{эпсилон}_r = \frac{\omega_r}{2\pi f_r} = \frac{1}{t_r \cdot 2\pi f_r}$$

Перемещая частотное окно по функции АЧХ и просматривая поочередно каждую функцию временного импульса, можно определить значение модальной скорости затухания для всех резонансов, выполнив всего одно измерение в опорной полосе частот. При помощи основного и эталонного курсоров (см. рис. 6) выполняется мгновенное определение модальной скорости затухания.

Использование возбудителя колебаний для создания псевдослучайного возбуждения конструкции и применение рассмотренного выше метода обеспечат высокую точность расчетов скорости затухания даже при низкой по сравнению с шириной резонансного пика разрешающей способностью. Более подробную информацию см. в разделе “Справочная литература” [1].

Скорость распада, рассчитанная на основе функции АЧХ, полученной при возбуждении конструкции устройством ударного молотка, будет преобразована с учетом эффективной скорости затухания экспоненциальной весовой функции, примененной к каналу АЧХ. Эта весовая функция была применена для того, чтобы снизить “звон” конструкции, вызванный ударами молотка. Однако указанная погрешность может быть легко компенсирована введением следующей поправки:

$$\omega_r = \frac{1}{t_r} - \frac{1}{t_u}$$

где t_u - постоянная времени экспоненциальной весовой функции.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ КРИВОЙ ВИДА КОЛЕБАНИЙ

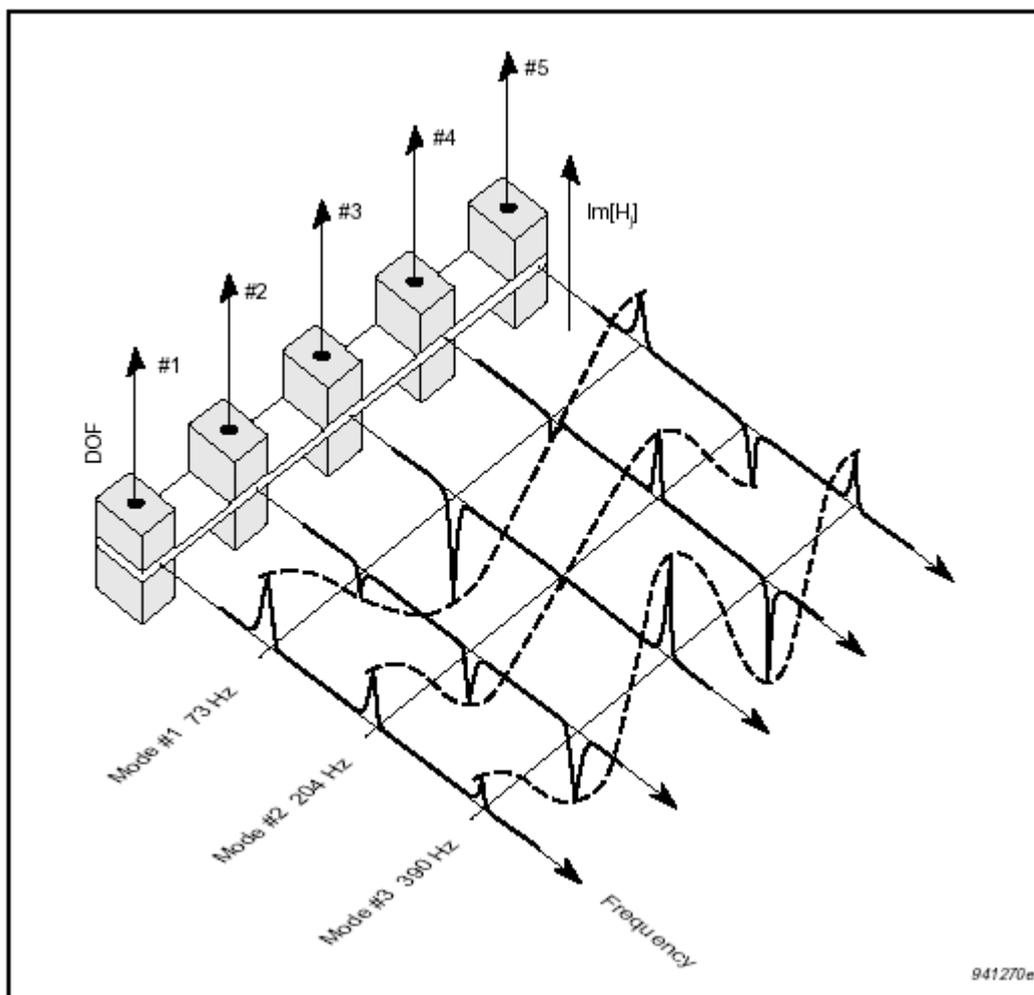


рис. 7 Первые три вида колебаний исследуемой конструкции. Значения модального смещения определены на основе мнимой части АЧХ функции.

Самый простой способ определения формы кривой вида колебаний для заданной конструкции состоит в применении метода квадратурного отбора. Метод квадратурного отбора основан на предположении, что взаимодействие видов колебаний достаточно слабое. На практике механические конструкции часто слегка демпфированы ($< 1\%$). Это означает, что виды колебаний взаимодействуют слабо. При любой частоте магнитуда функции АЧХ представляет собой сумму модальных параметров (для данной частоты) всех видов колебаний. Если между отдельными видами колебаний существует слабое модальное взаимодействие, то АЧХ конструкции при модальной частоте полностью контролируется этим видом колебаний, таким образом метод квадратурного отбора может быть применен для объяснения форм кривых видов колебаний.

Для систем первой степени свободы функция АЧХ (ускорение) для резонансов является чисто иллюзорной. В результате значение мнимой части функции АЧХ при резонансе для конструкций со слабо взаимодействующими видами колебаний пропорционально модальному смещению. Следовательно, исследуя магнитуду мнимой части функции АЧХ для нескольких точек конструкции, можно установить относительное модальное смещение для каждой точки. На основе значений этих смещений можно определить формы кривых видов колебаний. Указанная процедура может быть в дальнейшем неоднократно повторена для определения всех необходимых форм кривых. Выполняя измерения возбуждающей силы и АЧХ в одной и той же точке и в одном направлении, можно пересчитать форму кривой вида колебаний для выражения в абсолютных единицах.

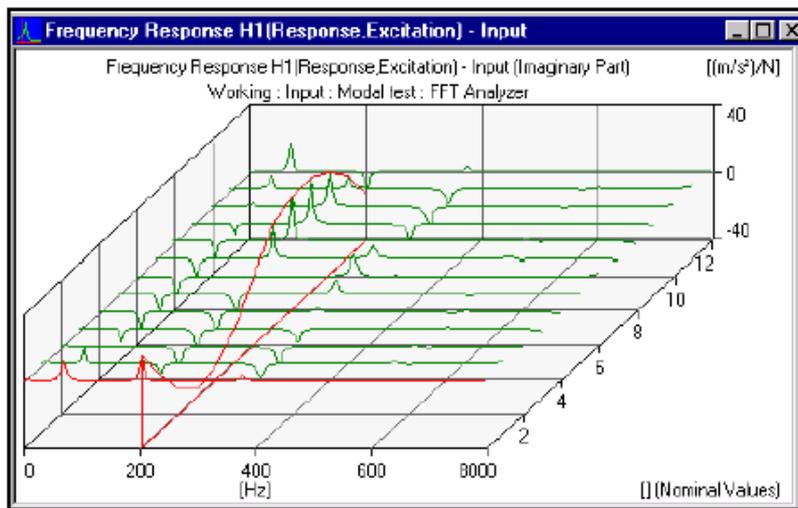


рис. 8 Трехмерная карта мнимой части функций АЧХ. Второй вид колебаний извлечен при помощи курсора.

ВЫВОДЫ

Анализатор PULSE, Многофункциональная система анализа 3560, в различных конфигурациях, представляет собой идеальный прибор для определения модальных параметров простых конструкций. Значения модальной частоты устанавливаются при помощи функции АЧХ. Модальная скорость затухания определяется по магнитуде функции временного импульса, которую при помощи функции частотного взвешивания можно изобразить на экране путем выделения отдельного вида колебаний на кривой функции АЧХ. Для получения формы кривой вида колебаний используется метод квадратурного отбора, позволяющий выполнить оценку модальных смещений для каждой заданной точки. Модальное смещение определяется на основе мнимой части функции АЧХ. Функции АЧХ можно сохранять в мультibuфере системы PULSE, что дает возможность в дальнейшем путем применения функции среза к данным мультibuфера изображать на экране кривые видов колебаний.

Дополнив систему необходимым программным обеспечением*, можно извлекать модальные параметры методом подбора эмпирической кривой. Этот метод позволяет разрабатывать геометрические модели и “оживлять” на экране ПК кривые видов колебаний. Можно также создать модель динамических характеристик конструкции, находящейся под действием возбуждающих сил, и даже более того, если виброхарактеристики прототипа, испытываемого при помощи основанной на использовании ПК модальной системы, не удовлетворяют требованиям пользователя, можно смоделировать последствия модификации значений фактической массы, жесткости и скорости затухания. Таким образом Многофункциональная система анализа PULSE 3560 может быть расширена до полностью документированной системы модального анализа.

Система обеспечивает перенос данных в нескольких форматах данных, например, таких, как Универсальный файл ASCII, Универсальный двоичный файл, Стандартный формат данных и Двоичный STAR. Возможно объединение с Программным обеспечением ME'score 7755A, что значительно упрощает передачу данных из системы PULSE в модальное программное обеспечение ME'score (7754), хотя самая высокая гибкость испытаний и переноса данных обеспечивается Программой-консультантом модальных испытаний 7753.

Фирма Брюль и Кьер располагает полным набором усовершенствованных пакетов программ модального анализа для персонального компьютера. Пакеты программ включают как программные модули, предназначенные для выполнения простого двухканального модального анализа, так и модули, обеспечивающие многоканальный модальный анализ. Кроме того возможно использование дополнительных программных модулей для моделирования динамических характеристик конструкции, находящейся под действием возбуждающих сил, а также создания моделей структурных модификаций.

Кривые видов колебаний можно нарисовать вручную или, что даже проще, функции АЧХ можно сохранить в мультibuфере системы PULSE и в дальнейшем изображать эти кривые на экране, предварительно выполнив срез сохраненных в мультibuфере функций АЧХ, см. рис. 8. Однако этот метод применим только для таких исследуемых конструкций, точки DOF которых расположены на прямой (т.е. для одномерных конструкций).

СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Гейд и Х. Херлуфсен “Сравнение методов цифровой фильтрации и БПФ, применяемых для измерения скорости затухания”, “Техническое обозрение фирмы Брюль и Кьер” N1, 1994.

фирма БРЮЛЬ И КЪЕР

**ВСЕМИРНАЯ ШТАБ-КВАРТИРА: ДК-2850 Нэрум, Дания Телефон: +4545800500 .
Факс: +4545801405 . <http://www.bk.dk> . Электронная почта: info@bk.dk**

Австралия (02)9450-2066 . Австрия 0043-1-8657400 . Бразилия (011)5182-8166 .
Канада (514)695-8225 . Китай (86) 1068029906 . Республика Чехия 02-67021100 .
Финляндия (0)9-755 950 . Франция (01)69906900 . Германия 06103/908-5 6 .
ГонКонг 25487486 . Венгрия (1)2158305 . Ирландия (01)450 4922 .
Италия (02)5760 4141 . Япония 03-3779-8671 . Республика Корея (02)3473-0605 .
Нидерланды (0)30 6039994 . Норвегия 66771155 . Польша (22)8409392 .
Португалия (1)4711453 . Сингапур (65)275-8816 . Республика Словакия 421 7 544 307 01 .
Испания (91)3681000 . Швеция (08)4498600 . Швейцария 01/9436070 .
Тайвань (02)7139303 . Объединенное Королевство Великобритания (0181)954-2366 .
США 18003322040
Региональные представительства и сервисные центры всего мира.