

Модальный анализ

Анализ мод колебаний является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций на основе результатов измерений и анализа вынужденных механических колебаний. Соединенные с анализатором датчик силы и акселерометр позволяют проводить одновременные измерения вынуждающей динамической силы и результирующих механических колебаний исследуемой конструкции. В результате обработки данных, осуществляемой анализатором, получается информация, необходимая для определения динамических характеристик исследуемой конструкции. Эта информация может быть использована для внесения изменений в конструкцию изделия. Также этот метод может быть использован при мониторинге конструкций. В результате эксплуатации в изделии могут происходить усталостные деформации, микротрещины в соединительных швах, которые не приводят к изменениям геометрических размеров изделия, но приводят к изменению динамических характеристик конструкции. Анализ этих изменений позволяет прогнозировать проведения регламентных работ по техническому обслуживанию. Этот метод эффективен в широкой области и используется при исследовании разного рода конструкций от лопаток турбин до железнодорожных вагонов.

Существует два метода модального анализа – традиционный и операционный. В традиционном модальном анализе создается контролируемое входное возбуждение и проводится анализ между выходным откликом и входным возбуждением. Источником входного возбуждения является ударный молоток со встроенным датчиком силы или электродинамический возбудитель со встроенным датчиком силы. Такой метод оптимален на этапе проектирования и изготовления какого-либо изделия, когда каждый элемент конструкции может быть подвергнут контролируемому воздействию. В реальных условиях эксплуатации для сложных конструкций с многомодовыми колебаниями, зачастую не имеется возможность провести традиционный модальный анализ. Операционный модальный анализ позволяет провести модальный анализ, используя только выходной отклик конструкции. Он сильно отличается от традиционного экспериментального модального анализа, который основывается на частотной характеристике между входным возбуждением и выходным откликом. Это означает, что испытательная установка для операционного модального анализа относительно проста. Достаточно измерить по времени отклик при нормальных эксплуатационных режимах. В результате усовершенствований алгоритма вычисления и огромного увеличения производительности рабочей станции, операционный модальный анализ превратился в высокоэффективный инструмент для авиационных приложений, при возбуждении конструкций внутренними и окружающими силами. Определение модальных параметров в рабочем режиме обладает огромной пользой, поскольку полученная модальная модель показывает фактические

силы и уровни вибрации при истинных граничных условиях. Это также позволяет проводить испытание механической системы, когда ее трудно возбудить искусственно и когда невозможно непосредственно измерить входные силы.

Многоканальный анализатор спектр A17 позволяет одновременно проводить анализ по 64 каналам. Мощная рабочая станция проводит измерения практически мгновенно одновременно по всем каналам и рассчитывает ряд собственных форм колебаний, собственные частоты, при которых вызываются колебания каждой формы, и коэффициент затухания, описывающий, как быстро затухает составляющая каждой формы колебаний. Программа рассчитывает погрешность каждого из полученных параметров и это определяет достоверность полученных результатов.

Надежные технологии определения параметров обеспечивают высокое качество и независимые от оператора результаты даже для сильносвязных высокодемпфированных структур. Встроенные процедуры позволяют повторно проводить испытательные процедуры в соответствии со стандартами качества. Возможности немедленного анализа сокращают время, необходимое для выработки инженерных решений при поиске недостатков конструкции или определении пригодности конструкции.

Основой для понимания сути модального анализа являются следующие теоретические предпосылки.

Простейшим случаем колебательного движения является колебание системы с одной степенью свободы. На рисунке схематично представлена колебательная система с одной степенью свободы: груз на пружине и демпфер.

Пусть входной процесс $F(t)$ есть приложенная к массе сила, которая вызывает на выходе системы смещение $y(t)$.

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = F(t)$$

Колебательная система включает груз массой m и упругий элемент, имеющий в направлении перемещения жесткость k . Отклонившись от равновесного положения, масса совершает периодические свободные колебания с частотой ω

$$\omega_c = \sqrt{k/m}$$

ω_c – собственная частота колебательной системы.

Под действием трения или демпфирования, свободные колебания затухают. Демпфирование характеризуется коэффициентом h , который иначе называют логарифмическим декрементом затухания. Такие колебания можно записать в виде:

$$A(t) = A_0 e^{i\omega t - ht}$$

В обычных системах этот коэффициент положителен, однако иногда в ряде случаев возникает особый механизм колебаний, при которых колеблющаяся система черпает из среды, в которой происходят колебания, дополнительную энергию, при этом коэффициент демпфирования отрицателен, колебания во времени нарастают, в таких случаях говорят, что система неустойчива.

Если на колеблющуюся систему действует периодическая сила, то возникающие при этом колебания называют вынужденными, процессы затухания и нарастания свободных колебаний являются переходными. В дальнейшем преимущественно будут рассматриваться установившиеся вынужденные колебания как наиболее распространенные.

Если к массе приложена периодическая сила с частотой ω

$$P = P_0 \cdot \sin \omega t$$

то возникают вынужденные гармонические колебания, амплитуда которых зависит от отношения ω / ω_c .

$$A = \frac{P_0 / c}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_c^2)^2 + (2h\omega / \omega_c^2)^2}}$$

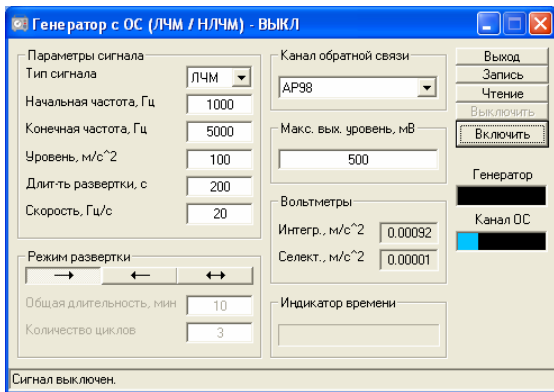
при $\omega = \omega_c$ возникает резонанс, которому соответствуют максимальные амплитуды вибрации. Отличие частоты, соответствующей максимуму амплитуды от ω_c тем больше, чем больше h . Оно также зависит от характера возбуждения (от того, как зависит P от частоты ω), от параметра вибрации (можно также рассматривать амплитудно-частотную характеристику виброскорости или виброускорения). Для реальных условий это отличие незначительно.

Фазовый сдвиг φ между возмущающей силой и перемещением может быть определен из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2h\omega}{\omega_c^2 - \omega^2}$$

При малых величинах декремента логарифмического затухания эту величину можно определить по амплитудно-частотной характеристике. Ширина пика на уровне 0.5 от максимума на резонансной частоте соответствует $2h$

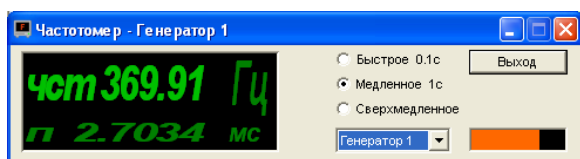
Модальный анализ, т.е. определение резонансных частот и декрементов логарифмического затухания конструкции может быть произведен на анализаторе спектра А17, электродинамическим возбудителем, набором вибродатчиков, микрофонов, датчиков силы и программами:



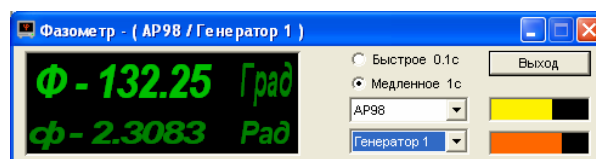
генератор с обратной связью линейно-частотно модулированных (ЛЧМ) сигналов



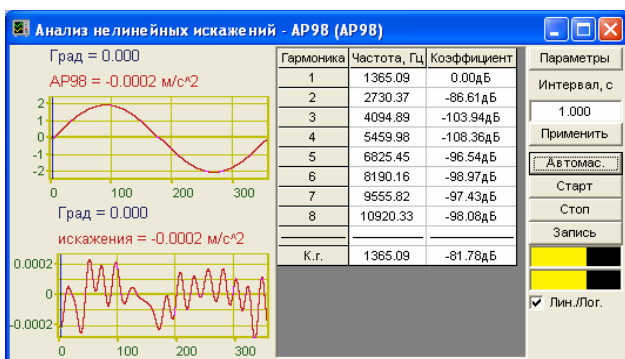
интегрирующий фильтр



частотомер



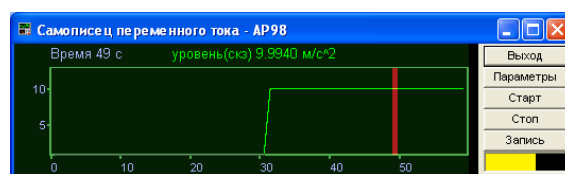
фазометр



измеритель нелинейных искажений



вольтметры переменного тока



самописцы уровня переменного сигнала



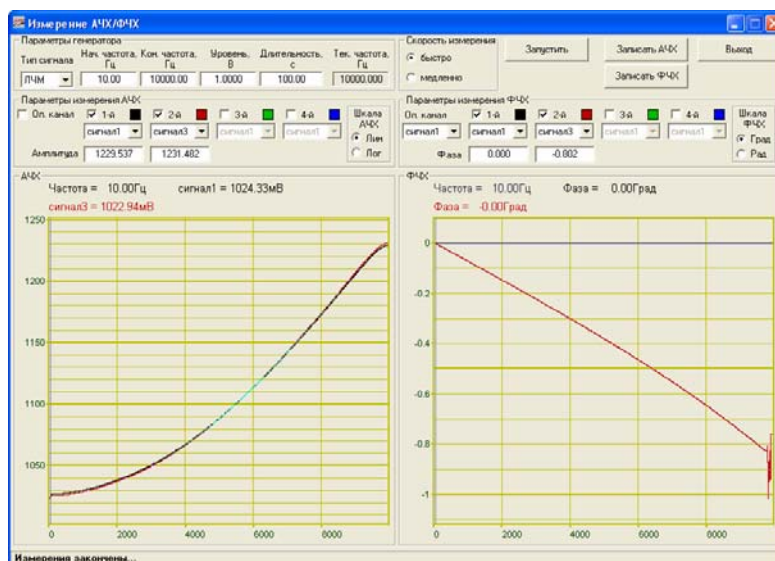
самописец частоты сигнала



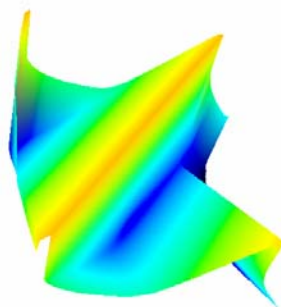
самописец разности фаз сигналов

Программа интегрирующего фильтра позволяет получать из сигналов акселерометров, которые отдадут сигнал пропорциональный ускорению, сигналы виброскорости и виброперемещения. Программа генератора с обратной связью обеспечивает заданный уровень виброускорения, виброскорости или виброперемещения на опорном вибродатчике и создает сканирующий сигнал. В программе задаются начальный и конечные частоты сканирования, время или скорость сканирования, уровень сигнала и канал обратной связи опорного вибродатчика – прямой или проинтегрированный. При помощи программ измерения нелинейных искажений производится контроль уровня нелинейных искажения на опорном и контрольных вибродатчиках. Программами вольтметров, частотомер и фазометров отображают

текущий уровень сигналов, частоту и разность фаз между опорным и контрольными каналами. Все эти программы могут быть собраны в одном проекте. После того как единожды происходит настройка всех программ, эта конфигурация запоминается в проекте и можно вызывать проект по мере необходимости.

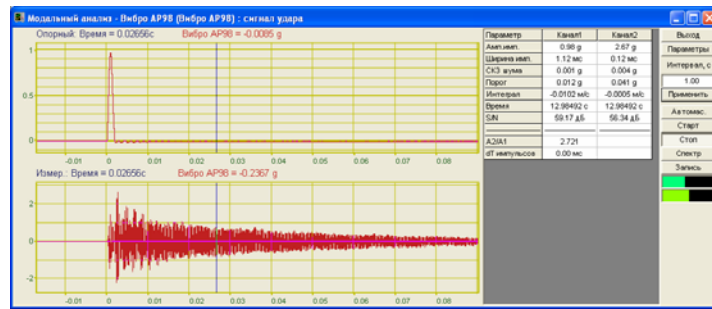


Также все эти программы интегрированы в одну программу измерения амплитудно-фазовых частотных характеристик с генератором с обратной связью. Полученные результаты переносятся в таблицы Excel или программы трехмерного моделирования для изучения мод колебания в конструкциях.

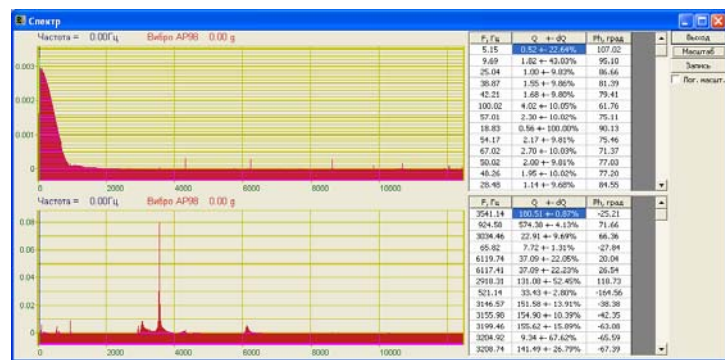


На рисунке показана резонансная мода колебаний квадратной пластины закрепленной за один угол.

Во многих реальных случаях такой вид анализа с использованием электродинамического возбудителя невозможен. В этом случае определение резонансных частот и декрементов логарифмического затухания может быть произведено при помощи ударного молотка со встроенным датчиком силы, набора вибродатчиков, микрофонов и программы модального анализа.

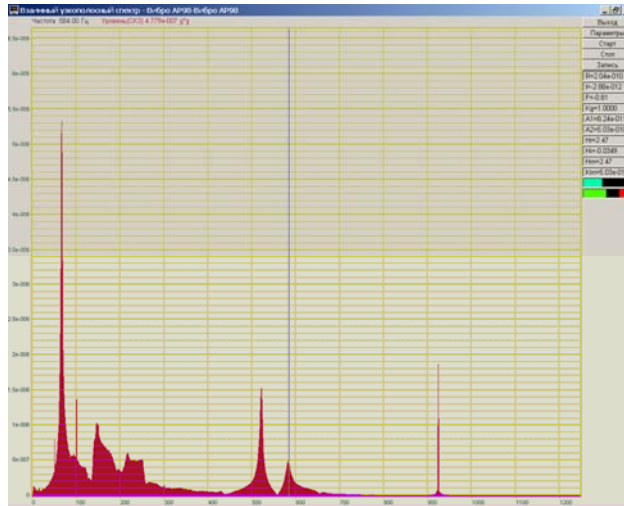


Вибродатчики устанавливаются на элементах конструкции, желательно на опорах, узловых точках конструкции, так чтобы датчики, по возможности не вносили погрешности в измерения за счет присоединенной массы. При помощи ударного молотка производятся удары по различным элементам конструкции под разными углами для возбуждения различных мод колебаний. Программа обнаруживает сигнал удара, рассчитывает амплитуды импульсов, длительность импульсов, интеграл импульса по времени (для датчиков ускорения это означает мгновенное изменение виброскорости), временную задержку между импульсами и отношение амплитуд импульсов. На рисунке представлены временные реализации сигналов датчика силы расположенном в ударном молотке и вибродатчика, расположенном на конструкции и результаты расчета параметров.

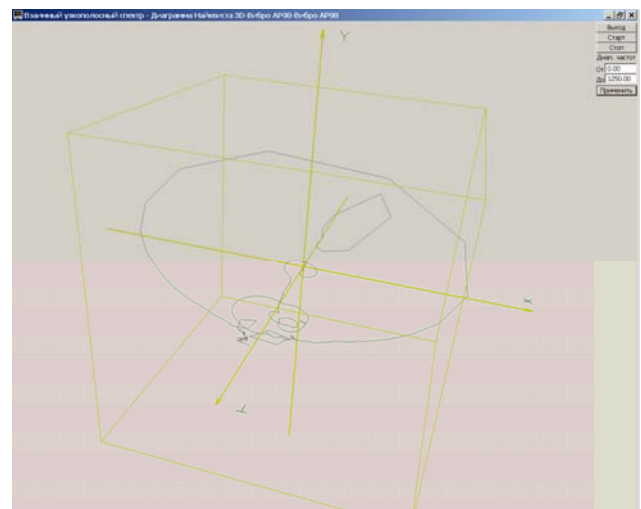
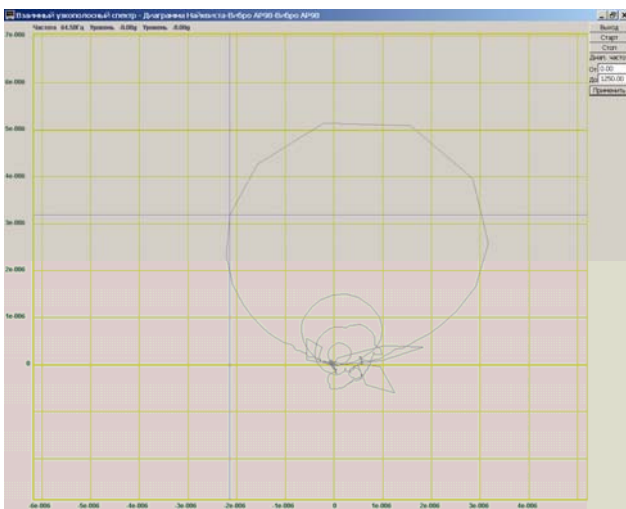


Программа также рассчитывает спектры ударных импульсов, резонансные частоты, добротность колебаний (обратная величина декремента логарифмических затуханий), погрешность вычисления добротности и фазу колебания относительно начала ударного воздействия. По полученным величинам можно определить и частоты собственных колебаний конструкции.

Совместно с программой модального анализа можно использовать программу взаимного спектра для построения диаграммы Найквиста.



На рисунке представлен модуль взаимного спектра двух процессов, ударного воздействия молотка и результирующего сигнала. На графике хорошо видны пики, которые могут быть связаны с резонансными явлениями или с тональными сигналами, которые наводятся на измерительный тракт. В соответствии с приведенными выше формулами вблизи резонансной частоты при изменении амплитуды в два раза, угол φ меняется на $\pi/2$. Если отобразить взаимный спектр в полярных координатах, то получится диаграмма Найквиста. Резонансы на диаграмме Найквиста представляются в виде окружностей. В сигналах, которые наводятся на измерительный тракт, разность фаз не меняется во время испытания и этим сигналам на диаграмме Найквиста соответствует отрезки радиальных прямых линий. Для того, чтобы найти коэффициент логарифмического затухания из центра полярных координат строятся две прямые линии под углом $\pi/4$ и $3\pi/4$. Точки пересечения с окружностью будут определять ширину резонансного пика во взаимном спектре на уровне 0.5 от максимума. По ширине пика определяется декремент затухания. Таким образом, можно определить резонансную частоту и добротность колебаний.



На рисунке справа для большей наглядности представлена диаграмма Найквиста того же процесса в трехмерном виде.