

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШКАФАХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В ПОДСИСТЕМЕ АСОНИКА-М И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

© Авторы, 2011

Д.Б. Соловьев – аспирант, ОАО «РКК «ЭНЕРГИЯ» имени С.П. Королева»
E-mail: solovyov1986@mail.ru

А.С. Шалумов – Генеральный директор ООО «CALS-технологии», д.т.н., профессор,
зав. кафедрой информационных технологий, Владимирский филиал
Российской академии государственной службы при Президенте Российской Федерации
E-mail: ALS140965@mail.ru

Е.О. Першин – мл. науч. сотрудник ООО «CALS-технологии», аспирант при ОАО «ЦНИТИ «Техномаш»» (Москва)
E-mail: pershineo@yandex.ru

Показано, что при проведении структурного анализа радиоэлектронных средств используются различные испытания, которые требуют больших затрат времени и материальных средств. Предложено в рамках созданного интерфейса структурный анализ шкафа проводить в кратчайшие сроки с использованием подсистемы АСОНИКА-М.

Ключевые слова: шкаф, радиоэлектронное средство, моделирование, конечные элементы, механическое воздействие, идентификация, физико-механические параметры.

At present time, while carrying out the structural analysis of radio and electronical devices different experiments are used which demands a great amount of time and money. In newly constructed interface is possible to carry out structural analysis of box in shortest period of time with using system ASONIKA-M.

Keywords: case, radio electronic means, simulation, finite elements, mechanical effect, identification, physical and mechanical parameters.

Моделирование объекта радиоэлектронной аппаратуры на воздействие внешних механических факторов позволяет определить такие динамические характеристики объекта, как резонансные частоты, ускорения и механические напряжения и соответственно оценить прочность и устойчивость моделируемого объекта.

Точность полученной модели оценивается степенью совпадения значений параметров динамических характеристик реального объекта, полученных в ходе эксплуатации или натурных испытаний, и значений тех же параметров, полученных в процессе моделирования.

К внешним дестабилизирующим факторам относятся механические воздействия: вибрации, удары, линейное ускорение и акустический шум.

При вибрационных воздействиях возникают знакопеременные механические напряжения, что приводит к накоплению усталостных повреждений в материалах конструкций и при длительном воздействии вибрации может привести к потере работоспособности радиоэлектронной аппаратуры. Чем дольше продолжительность вибрационного воздействия, тем быстрее наступает потеря работоспособности аппаратуры.

Гармонической вибрацией называется колебательный процесс, описываемый уравнением

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi), \quad (1)$$

где A – амплитуда; $\omega = 2\pi \cdot f$ – круговая частота; $T = 1/f$ – период; f – частота; ϕ – начальная фаза.

При моделировании прибора начальная фаза не учитывается, а гармоническая вибрация задается в виде зависимости амплитуды виброускорения от частоты вибрации в диапазоне от нижнего f_n до верхнего f_v значения частоты. Полигармоническая вибрация в отличие от гармонической вибрации описывается более сложным законом изменения амплитуды виброускорения во времени. Моделирование прибора на воздействие такой вибрации осуществляется по аналогии с моделированием ударно-импульсного нагружения многократного действия.

Ударные воздействия возникают при транспортировке, монтаже, эксплуатации, при действии ударной волны. В процессе удара нагрузки к элементам конструкции прикладываются в течение короткого

промежутка времени, но зачастую имеют значительную амплитуду, вследствие чего, возникающие ускорения и напряжения элементов конструкции могут достигать больших значений и вызывать различные повреждения вплоть до механического разрушения. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса.

Одиночный ударный импульс, повторяющийся с определенной периодичностью, называется импульсным ударом многократного действия. При моделировании ударные воздействия задаются в виде графика (таблицы) зависимости ускорения ударного воздействия от времени.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне, торможении). Влияние линейных ускорений на элементы конструкций обусловлено инерционными силами, которые могут достигать и во много раз превышать силы тяготения. При движении объекта по криволинейной траектории, например по дуге окружности, элементы конструкции аппарата будут испытывать центробежное ускорение. Трудность борьбы с влиянием линейных перегрузок заключается в том, что они практически не поддаются ослаблению.

Случайную вибрацию разделяют на стационарную и нестационарную. Стационарные случайные вибрации имеют нормальный закон распределения. Отклонение закона распределения амплитуд ускорений от нормального распределения для нестационарных вибраций обусловлено наличием периодических вибраций в суммарном случайном процессе.

Мерой случайной вибрации является спектральная плотность, которая определяет распределение дисперсии или мощности процесса по частоте $S(f)$.

Случайная вибрация, имеющая постоянную спектральную плотность, называется «белым шумом». Это название принято в связи с аналогией с белым (естественным) светом: белый свет представляет собой сумму всех спектральных составляющих, имеющих одну и ту же интенсивность. «Белый шум» представляет собой сумму гармонических колебаний всех частот, имеющих одну и ту же дисперсию амплитуды. «Белый шум» представляет собой чисто случайный процесс, в котором реализации $x_k^{(t)}$ взаимно независимы для любого конечного множества значений времени t .

Моделирование нестационарной случайной вибрации требует большого числа реализаций функций зависимости ускорения от времени $x(t)$ и на практике не применяется.

Результатами моделирования являются значения прогибов, ускорений и напряжений в узлах конечно-элементной сетки при каждом значении времени или частоты.

Входными данными для подсистемы АСОНИКА-М являются чертежи конструкций, а также данные технического задания на разработку изделия. Подсистема АСОНИКА-М включает в свой состав базу данных с геометрическими и физико-механическими параметрами ЭРИ и конструкционных материалов.

Выходными данными подсистемы являются поля перемещений, ускорений, напряжений, а также графики зависимостей ускорений и перемещений от времени и частоты.

Интерфейс шкафа представляет собой приложение, позволяющее рассчитывать шкафы РЭС различной конфигурации. Для этого первоначально необходимо провести построение конструкции необходимой модели шкафа по имеющейся конструкторской документации на проектируемый прибор: задаем необходимое число этажей в конструкции; задаем размеры шкафа.

Далее переходим к заданию размера направляющих для блоков, входящих в состав шкафа. Также в конструкцию можно при необходимости добавить вырезы в любом месте.

Если в составе шкафа присутствуют несколько этажей то для задания параметров каждого конкретного этажа необходимо сначала задать параметры блока, находящегося на конкретном этаже а затем задать параметры плат, входящих в состав выбранного блока:

- расстояние от задней стенки шкафа;
- расстояние от низа шкафа;
- размеры блока по всем трем измерениям;
- число плат в блоке.

После того как модель построена (рис. 1), строим дерево конструкции, состоящее из всех деталей, входящих в ее состав. Если необходимо, то для удобства пользователя можно переименовать стандартное название деталей в те названия, которые соответствуют наименованиям элементов шкафа по конструкторской документации. По каждой детали задаем материал и размер дискрета конечноэлементной сетки. Имеется возможность задания сетки сразу для нескольких деталей или сразу для всех деталей де-

рева конструкции шкафа, а так же можно задавать сетку на каждую деталь в отдельности, что является очень удобным при работе с объемными моделями.

После построения модели в интерфейсе подсистемы необходимо обязательно задать крепление конструкции по любой из шести имеющихся граней. Также есть возможность выбрать конфигурацию элементов крепления круглого или прямоугольного сечения. Для этого необходимо ввести параметры крепления в пункте меню «Крепление». Для прямоугольного крепления этими параметрами являются две координаты центра и длина и ширина прямоугольника для цилиндрического крепления этими параметрами являются две координаты центра и радиус. Далее необходимо выбрать грань конструкции, на которую накладывается ограничение по степеням свободы. Крепления добавятся автоматически в указанные места.

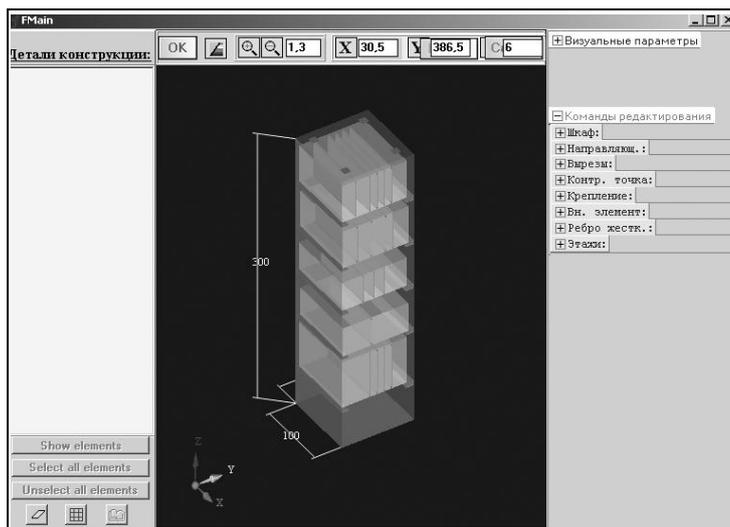


Рис. 1. Общий вид построенного в интерфейсе шкафа

Пользователь может добавить в конструкцию дополнительные внутренние элементы в виде массы. Технология добавления аналогична той, которая используется для добавления креплений конструкции. Можно также добавить ребра жесткости в конструкцию, где это является необходимым. После построения произвольной конструкции типового элемента «Шкаф твердотельный» в рамках интерфейса предоставляется механизм, который по выходным данным формирует входные макросы для проведения структурного анализа с использованием функционала подсистемы АСОНИКА-М:

InitShkaf.mac – макрос, в котором описаны все инициализирующие переменные, используемые для построения шкафа и всех элементов его конструкции, такие как длина, ширина, высота шкафа, число этажей, толщины всех стенок шкафа и блоков, входящих в состав шкафа;

BegData.mac – макрос, описывающих тип конечного элемента, использующегося для разбиения элементов конструкции;

BuildShkaf.mac – макрос, в котором производится расчет дополнительных промежуточных параметров, используемых при построении модели шкафа, а также непосредственное построение всех элементов шкафа, включая внутренние блоки, направляющие для них и все платы входящие в состав каждого блока;

Kreplenia.mac – макрос задающий все необходимые параметры крепления вновь построенного для расчета шкафа как прямоугольной, так и цилиндрической формы, параллельно с этим для каждой конкретной стенки шкафа производится предварительное преобразование рабочей системы координат;

Material.mac – макрос, описывающий все материалы, входящие в состав конструкции по каждой конкретной детали с точки зрения их механических параметров, таких как модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент демпфирования;

setka.mac – вспомогательный макрос, использующийся для дифференцирования объемов после проведения с ними определенных необходимых в приложении манипуляций.

После формирования вышеперечисленных макросов мы завершаем работу с интерфейсом шкафа и переходим непосредственно к интерфейсу подсистемы АСОНИКА-М для задания механического воздействия. После данных манипуляций системой формируется еще один очень важный макрос, участвующий в расчетах, это InitSolution.mac – макрос, задающий тот или иной тип механического воздействия, на которое необходимо произвести расчет, например одиночное ударное воздействие, гармоническая вибрация или случайная вибрация.

Далее проводится структурный анализ конструкции на то или иное механическое воздействие. Для расчета используется математический аппарат мощной расчетной системы ANSYS 11, для взаимодействия с которой используются специальные макросы. Макрос представляет собой набор команд ANSYS, сохраненных в отдельном файле. Одним из наиболее важных этапов при разработке данной подпрограммы является разработка макросов. Макросы представляют собой подпрограммы, написанные на

языке параметрического конструирования APDL системы ANSYS и запускающиеся на выполнение в пакетном режиме системы. Это позволяет в некоторой мере экономить возможности аппаратных ресурсов расчетной станции. При создании макросов были учтены все нюансы, полностью отражающие конструкцию в интерфейсе подсистемы.

Наиболее трудоемким этапом при создании данного интерфейса явилось непосредственное написание макросов для ANSYS, так как данная система является комплексной системой всех видов механических расчетов и требует определенной математической подготовки и знаний в области механических расчетов. В данном случае АСОНИКА-М является как бы наиболее удобным инструментарием для работы конструктора и удобным механизмом для взаимодействия с ANSYS.

После того, как расчет выполнен, пользователю подсистемы предоставляется возможность просмотреть результаты структурного анализа модели на то или иное механическое воздействие с использованием удобного интерфейса, и оценить прочностные характеристики созданной модели при действующих нагрузках, а также определить места конструкции, где возникает перегрузки и просмотреть нагрузки в каждом из имеющихся узлов конструкции, выяснить места, в которых имеется возможность провести оптимизацию конструкции. Результаты расчета приведены на рис. 2 и 3.

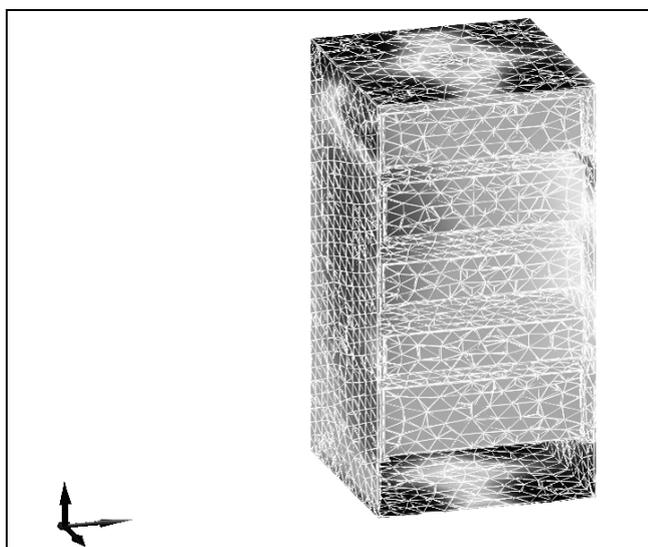


Рис. 2. Ускорения в модели шкафа

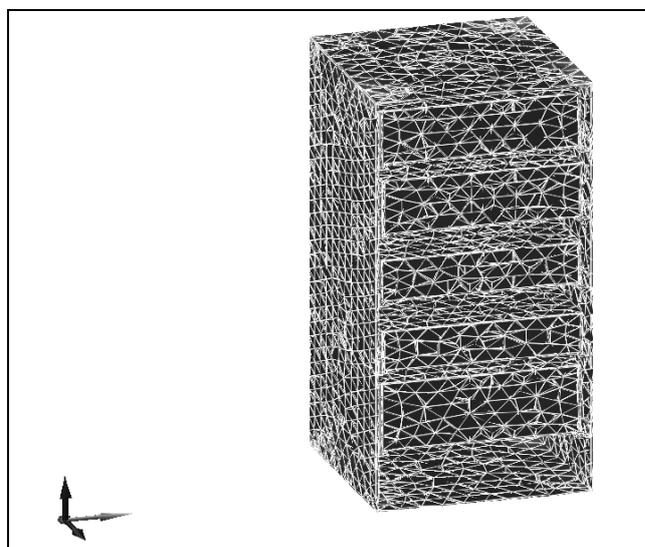


Рис. 3. Напряжения в модели шкафа

Вид целевой функции получим, исходя из следующих соображений. Часто при проектировании параметры конструкции берутся заранее с большими запасами по механическим характеристикам. Однако эти запасы могут оказаться неоправданно большими, т.е. требования по прочности могут выполняться и при значительно меньших значениях параметров, влияющих на массу изделия, например толщины стенки шкафа. В результате получаем завышенные значения массы конструкции. Чтобы этого не происходило, нужно определиться с предельным значением выходной характеристики и устремить разницу между расчетным значением выходной характеристики и ее предельным значением к нулю, т.е. минимизировать эту разницу, что может быть сделано путем варьирования выбранных параметров.

Для каждой выходной механической характеристики практически всегда есть предельное значение: для ускорения – это максимально допустимое ускорение; для перемещения – это расстояние между частями конструкции, между которыми возможны соударения; для механического напряжения – это предел прочности; для времени до усталостного разрушения выводов РЭС это суммарная длительность механических воздействий на аппаратуру в условиях эксплуатации.

Идентификация неизвестных физико-механических параметров

Для большинства материалов несущих конструкций РЭС в справочной литературе отсутствуют необходимые для моделирования физико-механические параметры: модуль упругости и коэффициент Пуассона, плотность и коэффициент механических потерь (КМП). Таким образом, требуется разработать методику идентификации параметров материалов конструкций РЭС.

В широком смысле идентификация – это установление соответствия между объектом, представленным некоторой совокупностью экспериментальных данных о его свойствах, и моделью объекта. В нашем случае требуется сопоставлением экспериментальных данных и данных математического моделирования определить неизвестные параметры материалов конструкций РЭС. Наиболее плодотворными и перспективными являются методы идентификации, построенные на принципе настраиваемой модели. Поскольку параметры материалов не зависят от вида механического воздействия, предлагается проводить идентификацию при гармонической вибрации.

Задача идентификации формулируется в следующем виде: необходимо найти такие значения параметров математической модели, которые удовлетворяют минимуму функции цели и лежат в области допустимых значений параметров, т.е. задача идентификации сводится к задаче оптимизации. Функция цели имеет вид

$$Q(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m (a_{0,i} - a_{p,i})^2,$$

где m – число точек измерения по частоте; $a_{0,i}$ и $a_{p,i}$ – экспериментальное и расчетное значения виброускорения на i -й частоте.

Оптимизация может проводиться многими методами. Однако, здесь отсутствуют функциональные ограничения, что позволяет не использовать методы штрафных функций и ограничиться методами безусловной оптимизации. Прямые ограничения выбираются из следующих соображений. По заданному материалу в справочнике находятся значения параметров и берется допуск $\pm 20\%$. Это и есть ограничения. Если параметры не найдены в справочнике, то идентификация проводится несколько раз при разных диапазонах изменения параметра идентификации, при этом каждый последующий раз необходимо сужать диапазон изменения.

Идентификация должна проводиться последовательно в определенном порядке, так как желательно иметь как можно меньше неопределенных параметров (в лучшем случае – один). Эту последовательность можно проследить на конкретных примерах при идентификации физико-механических параметров изделия: модуля упругости материала несущей конструкции и коэффициента Пуассона, КМП и коэффициента зависимости КМП от напряжения. Ряд параметров идентифицируется с учетом температуры. Для учета погрешности измерений определение температуры и зависимости амплитуды виброускорения от частоты гармонической вибрации повторяется несколько раз, а температура в эксперименте измеряется в нескольких точках платы и затем усредняется. Затем для значений, экспериментально полученных вибровоздействий и откликов на них определяются: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, доверительный интервал. Затем находится погрешность выходного ускорения для каждого значения частоты как погрешность результатов косвенных измерений.

Идентификация параметров материалов

Идентификация модуля упругости и коэффициента Пуассона материала несущей конструкции РЭС

1. Пластина из материала, идентичного используемому в несущей конструкции РЭС, жестко закрепляется винтами по четырем углам на столе вибростенда.

2. Экспериментально определяется первая резонансная частота пластины.

3. С помощью изменения параметров производится настройка модели механического процесса исследуемой пластины на экспериментально определенную резонансную частоту. Варьируемыми параметрами при оптимизации являются модуль упругости и коэффициент Пуассона. Коэффициент жесткости опор принимается бесконечно большим (10^{10} Н/м), так как винты максимально зажаты. Отсутствие данных по КМП не влияет на результаты идентификации, так как для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона достаточно только совпадение резонансных частот и совсем не обязательно совпадение амплитуд виброускорений. Это связано с тем, что в модели платы КМП практически не влияет на резонансные частоты. Предполагается, что остальные параметры – геометрические размеры, плотность – известны.

По результатам идентификации строится зависимость модуля упругости от температуры. Далее по методу наименьших квадратов определяются коэффициент зависимости модуля упругости от температуры:

$$E = E^{20} - K_E (T - 20),$$

где E – модуль упругости; E^{20} – модуль упругости при температуре 20 °С; K_E – коэффициент зависимости модуля упругости от температуры; T – температура.

Идентификация КМП

1. Пластина из материала, идентичного используемому в несущей конструкции РЭС, жестко закрепляется винтами по четырем углам на столе вибростенда.

2. С датчика в центре пластины снимается экспериментально зависимость амплитуды виброускорения от частоты.

3. С помощью программы идентификации проводится настройка ММП пластины на экспериментальную зависимость. При этом идентифицируются γ_0^{20} и k_{σ}^{20} .

4. По результатам идентификации строятся зависимости γ_0 и k_{σ} от температуры. Далее определяются коэффициенты зависимостей КМП и коэффициента зависимости КМП от напряжения от температуры соответственно:

$$\gamma_0 = \gamma_0^{20} - K_{\gamma} (T - 20),$$

$$k_{\sigma} = K_{k_{\sigma}}^{20} - K_{k_{\sigma}} (T - 20),$$

где γ_0 и k_{σ} – КМП и коэффициент зависимости КМП от напряжения; γ_0^{20} и K_{γ}^{20} – КМП и коэффициент зависимости КМП от напряжения при температуре 20 °С; K_{γ} и $K_{k_{\sigma}}$ – коэффициенты зависимостей КМП и коэффициента зависимости КМП от напряжения от температуры соответственно; T – температура.

Для практического решения задачи идентификации был разработан программный продукт (рис. 4), позволяющий максимально реализовать теоретические знания и математические выкладки приведенные выше. Интерфейс программы позволяет выбрать параметры, которые необходимо идентифицировать (модуль упругости и коэффициент Пуассона либо коэффициент механических потерь). Также в дальнейшем планируется включить в программу идентификацию коэффициента механических потерь, проведение идентификации при ударе и проведение идентификации параметров не только в точке, но и по графику.

Также для проведения расчета необходимо задать следующие параметры пластинки: длина, ширина, толщина; размер дискрета; число элементов крепления; диаметр элементов крепления; отступ от края пластинки.

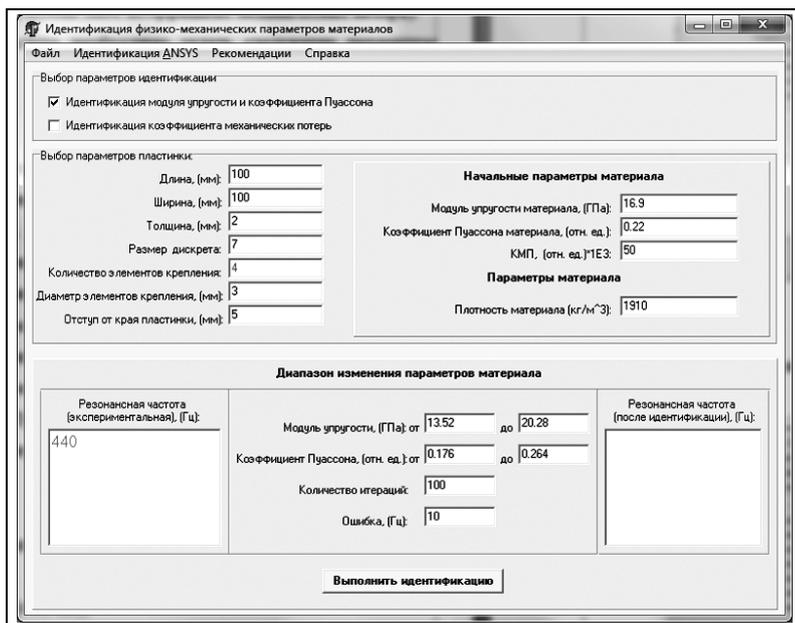


Рис. 4. Интерфейс программы идентификации

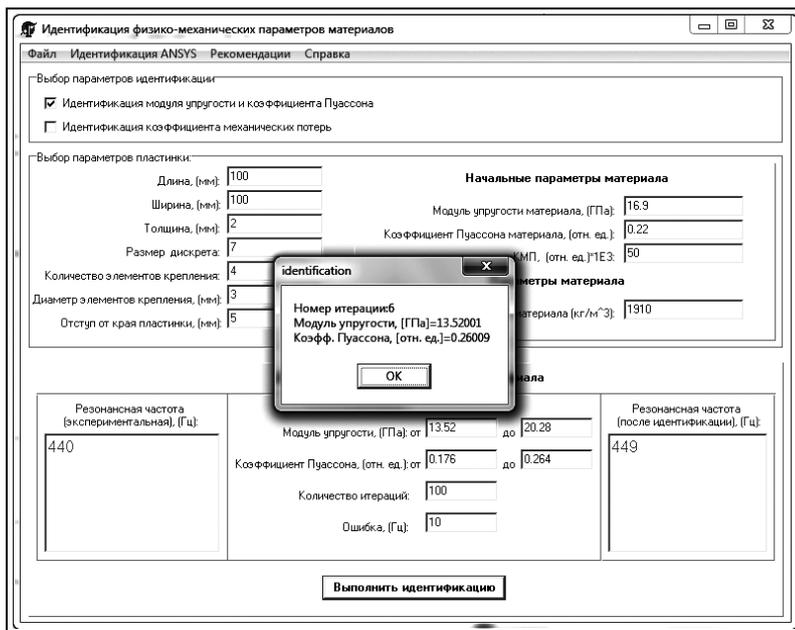


Рис. 5. Интерфейс программы идентификации после проведения расчета

После задания вышеперечисленного, задаем начальные параметры материала: модуль упругости материала; коэффициент Пуассона материала; коэффициент механических потерь.

Также задается плотность материала. Далее при выборе идентификации модуля упругости и коэффициента Пуассона задаются: резонансная частота (экспериментальная), (Гц); число итераций; ошибка, (Гц).

Кроме этого задаются диапазоны изменения: модуля упругости, (ГПа); коэффициента Пуассона, (отн. ед.).

После того как все параметры, необходимые для расчета введены, выполняем расчет и получаем результаты рис. 5.

- Таким образом, на основе полученных при идентификации параметров проводится моделирование механических процессов в шкафах РЭС в подсистеме АСОНИКА-М.

Рекомендованная литература

1. Прочность, устойчивость, колебания. Справ. в 3-х т. / под ред. *И.А. Бургера, Я.Г. Пановко*. М.: Машиностроение. 1968. Т. 3. 568 с.
2. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / под ред. *Р.Г. Варламова*. М.: Сов. радио. 1980. 480 с.
3. *Ильинский В.С.* Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. М.: Радио и связь. 1982. 296 с.
4. *Карпушин В.Б.* Виброшумы радиоаппаратуры. М.: Сов. радио. 1977. 320 с.
5. *Пановко Я.Г.* Основы прикладной теории колебаний и удара. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение). 1976. 320 с.
6. *Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А.* Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Фролова. М.: Радио и связь. 1984. 224 с.
7. *Шалумов А.С., Малютин Н.В., Кофанов Ю.Н., Способ Д.А., Жаднов В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С.* Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Том 1/ под ред. *Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова*. М.: Энергоатомиздат. 2007. 368 с.

Поступила 31 августа 2011 г.

MODELING OF MECHANICAL PROCESSES IN MODELS OF BOXES OF RADIO AND ELECTRONICAL MEANS WITH USING SUBSYSTEM ASONIKA-M AND IDENTIFICATION OF ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS

© Authors, 2011

D.B. Solovyov, A.S. Shalumov, E.O. Pershin

Modeling the objects of radio and electronical equipment on influence of input mechanical factors makes possible to determine such dynamic characteristics of object as resonance frequencies, accelerations and mechanical stress and state the stability of constructing object.

Process of modeling is automated transformation the description construction through geometrical model to finite elemental model and after that to mathematical model.

Generated geometrical model meshed in global case by means of not linear net on separate sub regions finite elements. For this means at first for every element of geometry model is necessary to appoint necessary attributes and material.

In frames of sub system ASONIKA-M was realized an interface, which allows to carry out the constructing of typical models of solid boxes in different configuration. Also in this article the possibility to carry out the of optimization of construction by means of adjusted purpose function. The sizes of box, the number of stories, the number of printed units on each story.

After the model building in the subsystem interface the displacement of construction is mentioned on each of six sides. It is also possible to choose the configuration of elements of displacement of circular or rectangular section. For this its necessary to input the parameters of displacement in item 'Displacement' and choose the side of construction. Further the built model is set to computing, which can take a lot of time.

After the calculation is carried out the user of subsystem can look through the results of structural analysis of model on this or that mechanical influence by means of comfortable interface, and state the strength characteristics of designed model on operation forces and also determine the places in construction where the overloads are possible and look through loads in each of having points of construction, find the places in which is possible to carry out the optimization of construction.