

УДК 534.1: 629.73.

## **Вибрационное состояние авиационных изделий**

### **при полете с носителем**

М.В. Зарецкий, А.С. Сидоренко

#### **Аннотация**

Представлены результаты разработки численной модели и данные расчетной оценки характеристик случайной вибрации изделий авиационной техники в условиях совместного полета с носителем. Получены зависимости для спектральных характеристик и уровней виброускорения в различных точках конструкции изделия и определены зоны максимальных уровней вибрации для изделий, размещенных на внешней подвеске маневренного носителя. Сопоставлены результаты численных экспериментов с использованием динамических моделей изделий различного уровня сложности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-08-00519-а).

**Ключевые слова:** авиационный носитель; колебания; метод конечного элемента; балка, оболочка; динамическое состояние; виброускорение; стационарная вибрация, спектральная плотность.

#### **Введение**

Динамическое состояние изделий авиационной техники, транспортируемых на внешних подвесках авиационных носителей, является одним из основных факторов, влияющих на надежность и безопасность эксплуатации, как самих изделий, так и комплекса носитель – изделие.

Уровни вибрационных нагрузок, действующих на изделия авиационной техники в полете, зависят от многих факторов: режима полета, особенностей конструкции самолета и узлов подвески, условий размещения изделий и т.д. Особенности конструкции самолета – это конструктивно-силовая схема, распределение массы и жесткости, демпфирующие свойства конструкции самолета.

Определение характеристик динамического состояния конструкции изделий совместно с носителем на полетных режимах имеет практическое значение, так как уровни колебаний конструкции изделия являются определяющими при оценке и подтверждении характеристик долговечности изделия. Полетные нагрузки могут вызвать относительно высокий уровень напряжений в зонах нерегулярностей конструкции и могут дать существенный вклад в накопление усталостных повреждений. В некоторых случаях они являются определяющими при оценке прочности и надежности конструкции носителя и груза. Подобная задача возникает также при оценке возможности транспортирования изделия на других носителях или при более жестких режимах полета.

При отсутствии экспериментальных данных необходимые характеристики динамического состояния изделия могут быть получены расчетным путем. Эффективность использования расчетных методов для исследования реальных конструкций во многом определяется качеством расчетных моделей, т.е. степенью их адекватности реальным конструкциям и условиям эксплуатации, а также возможностью получения достоверных исходных данных.

Расчетные исследования колебаний конструкций летательных аппаратов и подвесных авиационных изделий в процессе полета представлены в книгах [1, 2, 3]. В этих исследованиях движение изделия обычно рассматривалось в рамках регулярной модели конструкции в виде балки на изолированной подвеске, к которой приложены внешние динамические воздействия в узлах соединения с носителем. Движение изделия определялось как поперечные колебания балки с переменными жесткостными и массовыми характеристиками в вертикальной плоскости при учете относительно небольшого количества форм колебаний. При этом предполагалось, что имеется достоверная информация о динамических нагрузках в узлах подвески для различных самолетов и конструкций узлов подвески.

Целью настоящей работы является разработка методики математического моделирования динамического состояния конструкций авиационных изделий при случайном пространственном кинематическом возбуждении. Модели конструкции формируются с учетом нерегулярностей (наличия соединений и односторонних связей, конструктивных особенностей узлов подвески). Модели должны описывать пространственное движение конструкции и составляющие ее пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей в рамках оболочечной модели.

### **Формирование численных моделей**

При расчете реальных конструкций со сложными зависимостями для распределения массы и жесткости применение приближенных аналитических методов связано с введением

существенных упрощающих предположений. Для определения низших форм колебаний часто используется метод последовательных приближений. После определения форм колебаний система дифференциальных уравнений в частных производных приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение системы дифференциальных уравнений проводится с использованием стандартных алгоритмов и программ численного интегрирования.

В настоящей работе расчетные исследования проводятся для изделий, находящихся на внешней подвеске маневренного самолета. Исходными данными для расчетной модели конструкции изделия являются геометрические характеристики конструкции, распределение массы не силовых элементов, таблицы центровки, механические характеристики материалов.

Реализация приближенных методов при учете относительно большого числа форм колебаний, что необходимо при рассмотрении конструкции изделия как нерегулярной оболочки с присоединенными узлами подвески, является весьма трудоемкой. В настоящее время наиболее рациональным путем решения задач о колебаниях сложных конструкций является использование метода конечных элементов (МКЭ), который реализован в виде компьютерных интерактивных систем для персональных ЭВМ.

Для моделирования динамического состояния изделия в данной работе выбрана универсальная система твердотельного моделирования и конечно-элементного расчета сложных конструкций SolidWork. Конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции в системе SolidWork строится в режиме диалога с использованием функционального меню. Разработаны КЭ модели с различными уровнями идеализации реального изделия: в виде составной подкрепленной оболочки, содержащей распределенные не силовые агрегаты (оболочечная КЭМ) и в виде балки с кусочно-постоянными упругими и массовыми характеристиками (балочная КЭМ).

Для проведения моделирования конструкции в качестве глобальной системы координат используется прямоугольная правосторонняя система координат, начало которой принимается в центре поперечного сечения, соответствующего центру масс изделия. Ось X совпадает с продольной осью изделия и направлена по полету; ось Y направлена вверх.

Моделирование конструкции выполнено с использованием конечных элементов SOLID (объемный элемент), BEAM3D (пространственная балка) и MASS (масса конечного размера).

Объемный изопараметрический двадцатиузловой элемент SOLID используется в трехмерных структурных и тепловых моделях для расчетов. Они подходят для моделирования конструкций содержащих нерегулярности и достаточно хорошо описывают изменения

напряжений и перемещений, полностью совместим с обычными квадратичными элементами и отображают деформацию тела как целого. Используется при расчетах на растяжение-сжатие, изгиб, кручение и сдвиг с учетом главных напряжений

Одноосный трехузловой элемент BEAM3D с расширенными возможностями используется в трехмерных структурных и тепловых моделях для расчетов на растяжение-сжатие, изгиб, кручение и сдвиг с учетом главных напряжений. Этот элемент допускает наличие несимметричного поперечного сечения при несовпадении центра сдвига с центром тяжести, а также несовпадение первых двух узлов и оси центров тяжести балки.

Используемый для моделирования массивных частей конструкции обобщенный одноузловой элемент MASS описывает массу, сконцентрированную в узлах моделей, и допускает до шести степеней свободы на узел (три перемещения и три угла поворота), определяемых в глобальной системе координат. Для каждого элемента задаются приведенные характеристики (компоненты массы по осям и соответствующие массовые моменты инерции).

При моделировании обеспечивается соответствие между КЭМ и реальной конструкцией по условиям закрепления, по геометрии, общей массе, положению центра масс и по величине момента массы относительно осей X и Z. Наиболее подробно воспроизводятся жесткостные и массовые характеристики тех частей конструкции, через которые передаются динамические нагрузки и которые оказывают основное влияние на динамическое состояние [4].

Демпфирующие свойства конструкции изделия описываются с использованием обобщенной модели Рэлея, описывающей действие внешних и внутренних диссипативных сил пропорциональных соответственно массе и жесткости конструкции. Диссипативный оператор имеет вид  $\alpha [M] + \beta [C]$ . Здесь первое слагаемое является линейной моделью вязкого внешнего трения. В этом случае диссипативный оператор пропорционален инерционному оператору  $[M]$ . Второе слагаемое соответствует использованию модели Фойхта для описания вязкоупругого поведения конструкции, когда диссипативный оператор пропорционален упругому оператору  $[C]$ . Помимо этого задаются величины внутреннего демпфирования для материалов элементов несущей конструкции.

Оболочечная КЭМ конструкции изделия, построенная с использованием конечных элементов SOLID и с автоматически генерируемой сеткой узлов показана на рис. 1. Изделие имеет два узла подвески, через которые на конструкцию передается кинематическое воздействие от носителя. Задний (по полету) узел обеспечивает жесткое закрепление по всем направлениям, передний – может свободно смещаться только в направлении оси  $x$ . Модель содержит 50929 элементов

На рис. 2 представлена балочная КЭМ изделия, построенная с использованием конечных элементов BEAM3D и MASS.

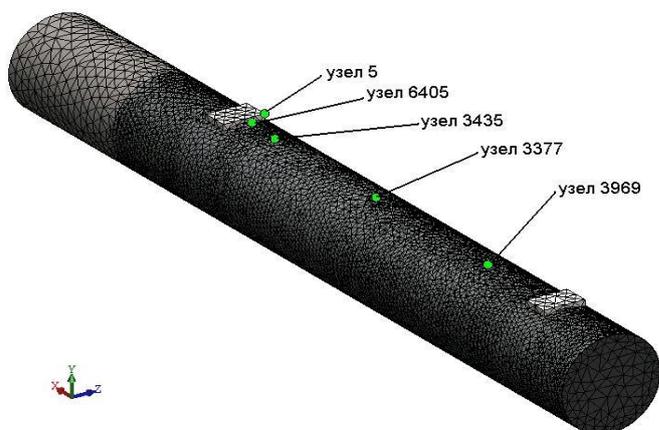


Рис. 1

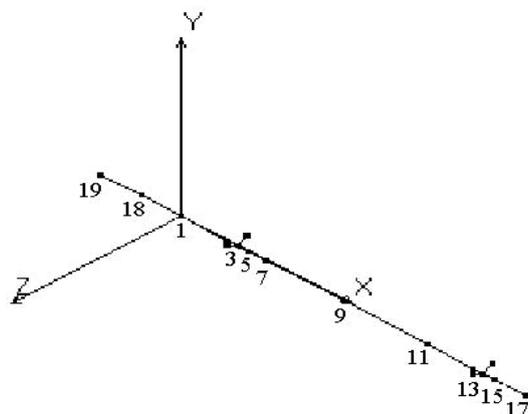
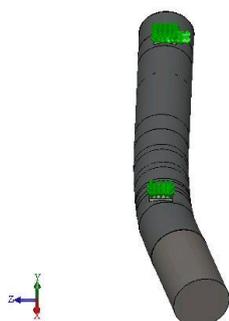
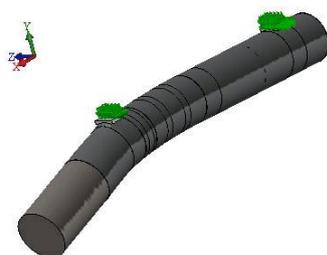


Рис. 2

На первом этапе расчета определяются собственные формы и частоты колебаний конструкции. Собственные формы колебаний и соответствующие значения частот полученные с использованием оболочечной КЭМ конструкции показаны на рис. 3 - 5. Видно, что колебания конструкции сочетают формы характерные как для оболочки, так и балочные формы, при которых контур оболочки не деформируется. Две низшие частоты соответствуют преимущественно балочным изгибным формам колебаний (рис. 3,4). Более высокие частоты соответствуют сочетанию и оболочечных и балочных форм изгиба и кручения (рис.5), либо преимущественно оболочечным формам.



Форма 1; частота 39,97 Гц  
Рис. 3



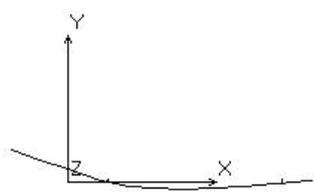
Форма 2; частота 40,42 Гц  
Рис. 4



Форма 4; частота 156,9 Гц  
Рис. 5

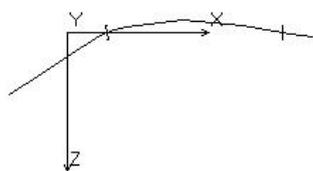
Для сравнения на рис. 6 – 9 приведены собственные формы и соответствующие значения частот, полученные для балочной КЭМ конструкции. Из сравнения следует, что первые две собственные формы полученные с использованием балочной и оболочечной КЭМ имеют между собой хорошее соответствие (рис. 6, 7 и 3, 4). Третья собственная форма (рис.

8) сочетает деформации изгиба и кручения. Пятая форма является преимущественно изгибной и имеет хорошее соответствие с четвертой собственной формой оболочечной КЭМ по характеру деформирования и значению частоты.



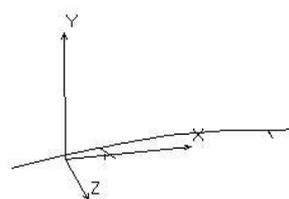
Форма 1;  
частота 35,38 Гц

Рис. 6



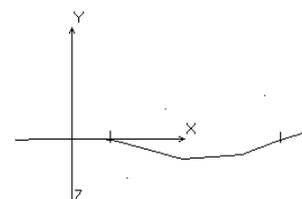
Форма 2;  
частота 36,16 Гц

Рис. 7



Форма 3;  
частота 83,43 Гц

Рис. 8



Форма 5;  
частота 157,0 Гц

Рис. 9

### Результаты численного анализа

Динамический расчет конструкции выполняется с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. В этом типе анализа используется разложение вектора узловых перемещений в ряд по собственным формам и последующее решение системы. При анализе задается количество учитываемых собственных форм и параметры пошагового динамического анализа – интервал и шаг интегрирования, метод и параметры процедуры интегрирования, характеристики демпфирования.

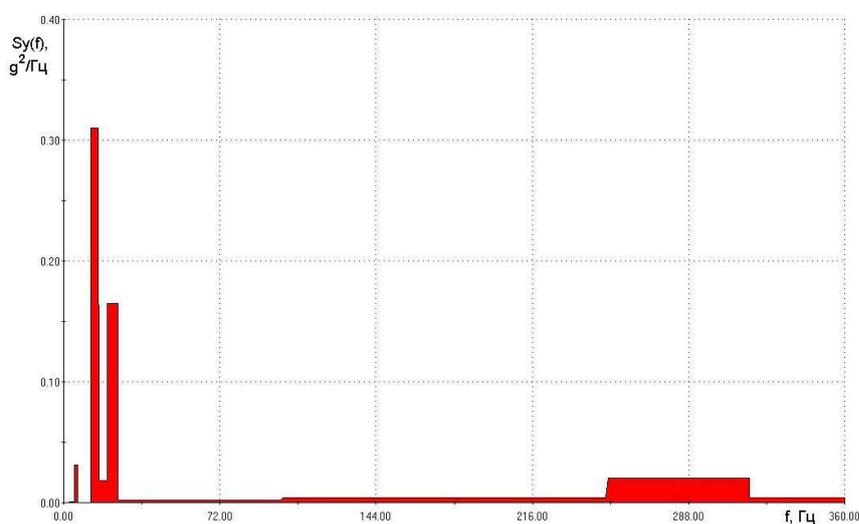


Рис. 10 Спектральная плотность ускорения в реальной эксплуатации

Расчеты выполнены для случаев нагружения, при которых колебания конструкции вызываются кинематическим возбуждением в узлах подвески на носителе в форме стационарного случайного процесса ускорения с заданной спектральной плотностью. Рассматриваются два вида спектральной плотности ускорения: модельная («белый» шум) и спектральная

плотность, соответствующая реальным условиям эксплуатации изделия совместно с носителем (рис. 10). Задаются составляющие спектральной плотности по осям изделия. При этом учитывается влияние постоянной гравитационной нагрузки на колебания конструкции.

Результаты вычислений спектральных характеристик динамического состояния в различных точках конструкции изделия, расположенных на образующей цилиндрического корпуса, представлены на рис. 11 - 19. Характеристики соответствуют узлам КЭМ, показанным на рис. 1: вблизи переднего по полету узла подвески при  $X = 398$  мм и 418 мм (узлы 5 и 6405 соответственно), в средней зоне при  $X = 1018$  мм (узел 3377) и в промежуточных зонах при  $x = 530$  мм и 1570 мм (узлы 3435 и 3969 соответственно),

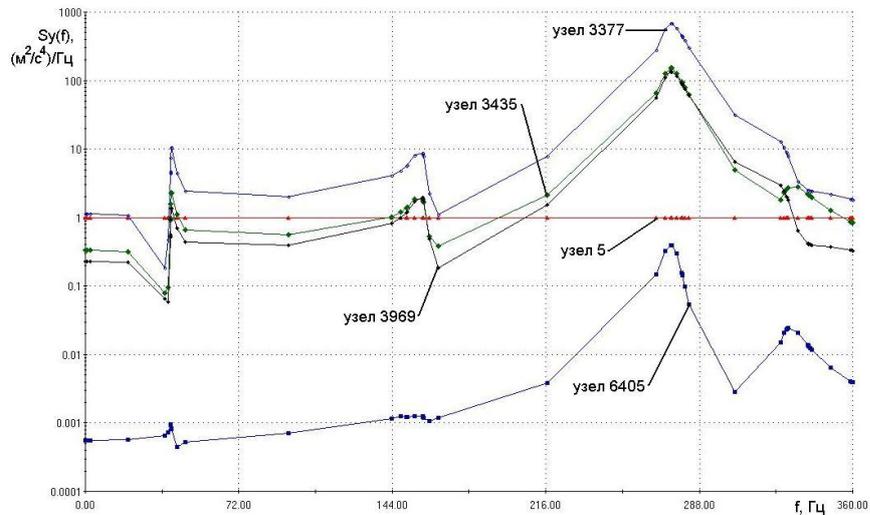


Рис. 11 Спектральные плотности ускорения по оси Y (оболочечная модель, «белый» шум)

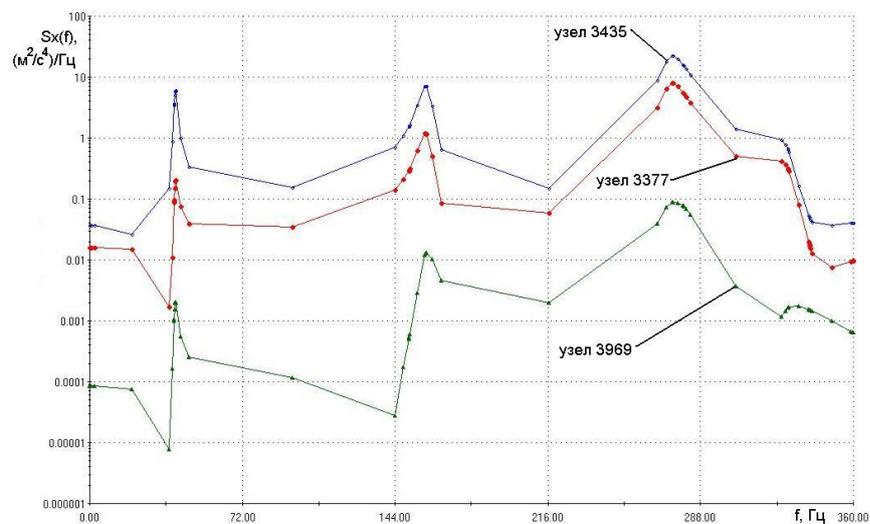


Рис. 12 Спектральные плотности ускорения по оси X (оболочечная модель, «белый» шум)

На рис. 11, 12 представлены спектральные плотности ускорений по направлению осей Y и X в узлах модели при кинематическом возбуждении изделия по оси Y «белым» шумом со значением спектральной плотности  $0.01 \text{ г}^2/\text{Гц}$  в диапазоне частот (0 - 360) Гц.

Видно, что наибольший уровень вибрации имеет место в средней зоне изделия (узел 3377). Среднеквадратическое значение ускорения здесь составляет  $\approx 80 \text{ м/с}^2$ . При возбуждении колебаний в направлении оси Y вследствие наличия продольных деформаций возникают составляющие колебаний в направлении оси X, но уровни вибрационного ускорения в направлении оси X в целом существенно ниже, чем в направлении оси Y и возрастают по мере удаления от заднего узла подвески.

Для сравнения на рис. 13 приведены спектральные плотности ускорения аналогичные спектральным плотностям, представленным на рис. 11 и полученные с использованием балочной модели изделия. Расположение узлов для этой модели показано на рис. 2. Переднему и заднему по полету узлам подвески здесь соответствуют узлы 3 и 13 КЭМ. Эти узлы соединены упругими связями с основанием (носителем), на котором задается кинематическое возбуждение. Узел 33 – один из узлов принадлежащих основанию. Между этими результатами имеется удовлетворительное соответствие по максимальным значениям спектральной плотности и распределению уровней ускорения в зависимости от координаты X.

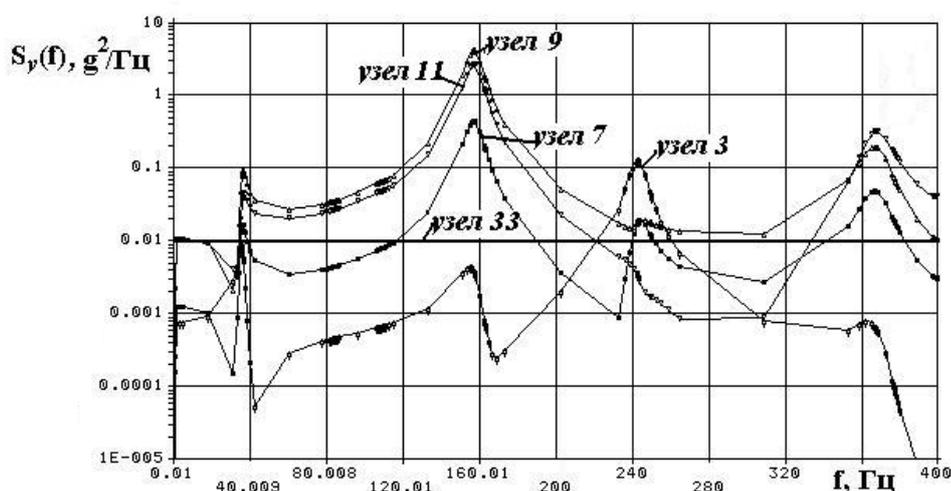


Рис. 13. Спектральные плотности ускорения по оси Y (балочная модель, «белый» шум)

На рис. 14 показаны спектральные плотности ускорения по направлению оси Y в узлах модели при возбуждении стационарным случайным процессом со спектральной плотностью, соответствующей условиям эксплуатационного нагружения (рис. 10) и с дисперсией составляющей  $\approx 450 \text{ м}^2/\text{с}^4$ .

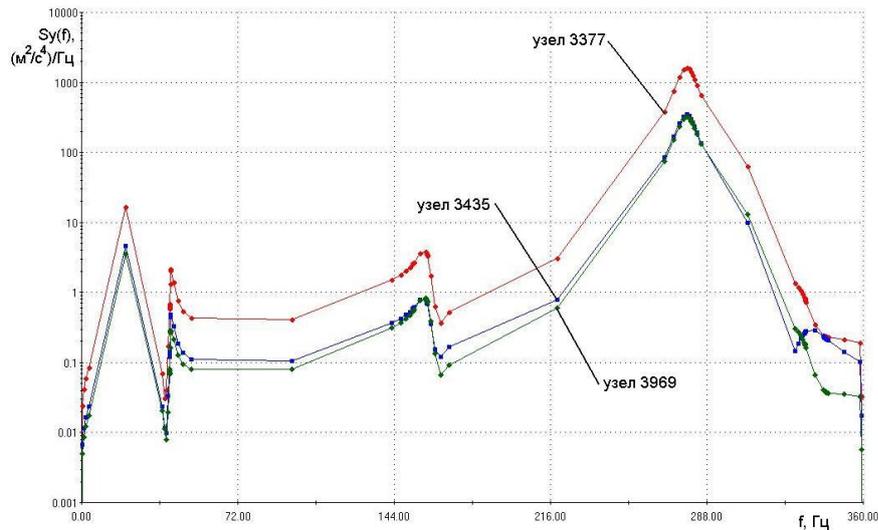


Рис. 14. Спектральные плотности ускорения по оси Y (оболочечная модель, эксплуатационная вибрация)

Для данных условий нагружения наибольшие значения уровней ускорения имеют место в средней зоне изделия (узел 3377). Максимальные значения дисперсии ускорения составляют  $\approx 4200 \text{ м}^2/\text{с}^4$ .

В качестве сравнения на рис. 15 приведены спектральные плотности ускорений аналогичные представленным на рис. 14 и полученные с использованием балочной модели изделия. Видно, что имеется удовлетворительное соответствие между этими результатами по максимальным значениям спектральной плотности, дисперсии и распределению уровней ускорения по координате X изделия.

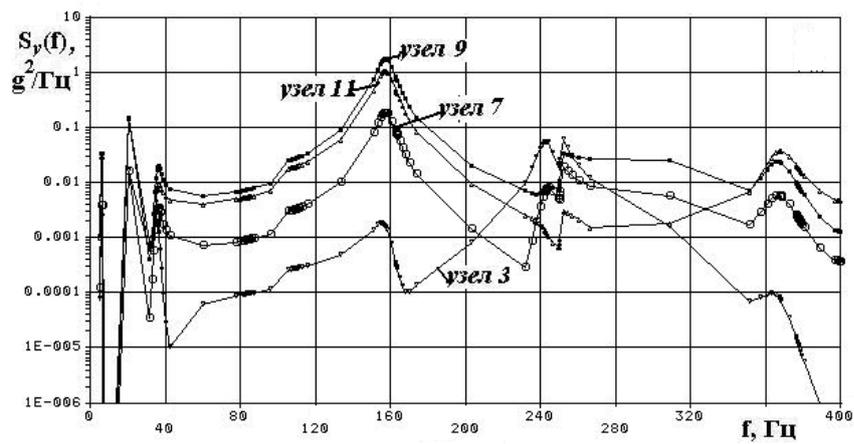


Рис. 15. Спектральные плотности ускорения по оси Y (балочная модель, эксплуатационная вибрация)

Спектральные плотности ускорений по направлениям осей X и Y при возбуждении изделия стационарным случайным процессом со спектральной плотностью, соответствующей

щей эксплуатационному нагружению (рис. 10) и с результирующей, направленной под углом  $45^\circ$  относительно осей X и Y и лежащей в плоскости XOY, представлены на рис. 16 и 17.

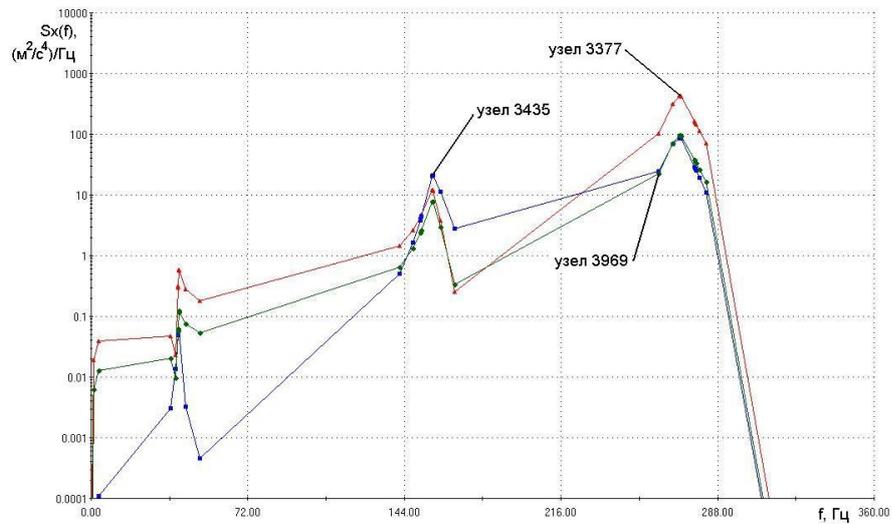


Рис. 16. Спектральные плотности ускорения по оси X (оболочечная модель, двухкомпонентное возбуждение)

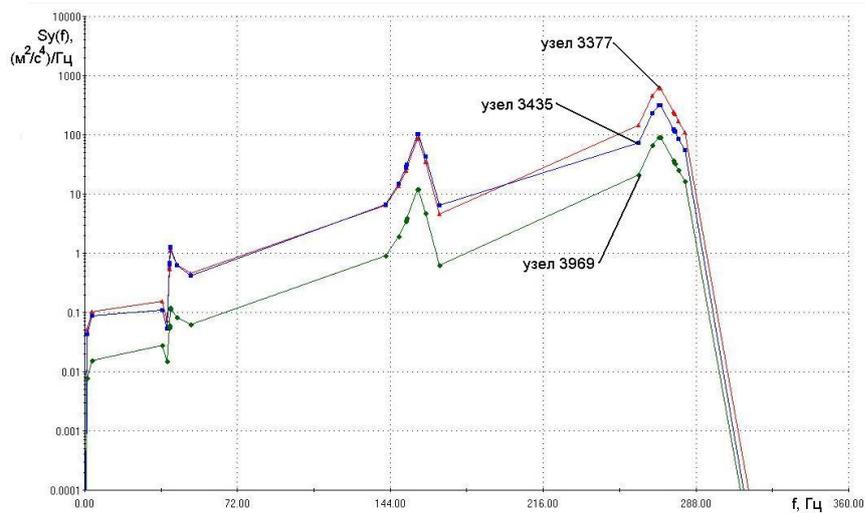


Рис. 17. Спектральные плотности ускорения по оси Y (оболочечная модель, двухкомпонентное возбуждение)

Этот случай соответствует воспроизведению двухкомпонентного вибрационного нагружения в лабораторно-стендовых испытаниях.

Спектральные плотности ускорений  $a_x$  и  $a_y$  по направлениям осей X и Y соответственно для случая двухкомпонентного вибрационного нагружения, полученные с использованием балочной модели помещены на рис. 18, 19.

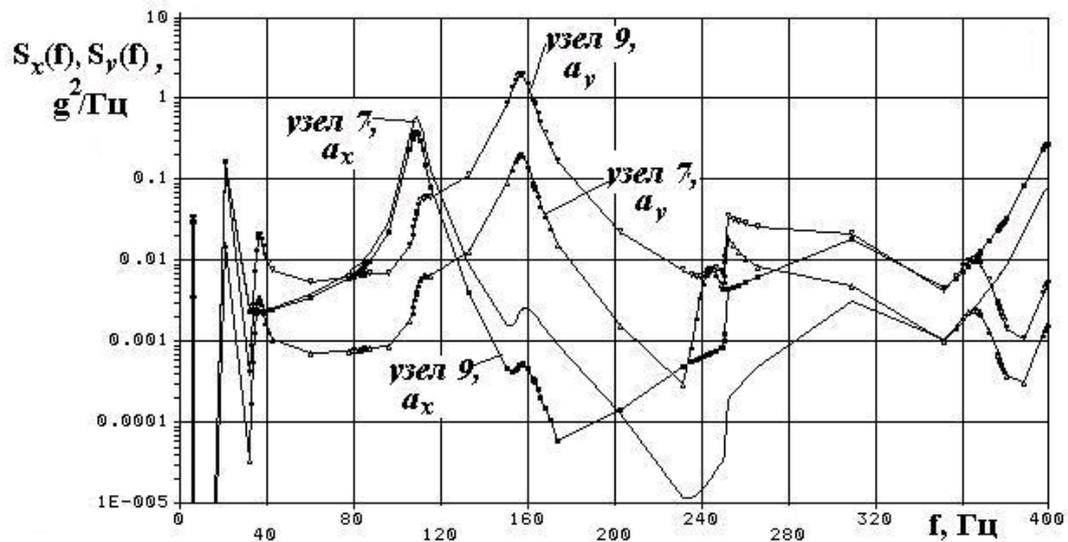


Рис. 18. Спектральные плотности ускорения по осям X и Y (балочная модель, двухкомпонентное возбуждение, средняя зона)

Полученные для обеих моделей результаты показывают, что в этом случае, так же, как и при однокомпонентном нагружении в направлении оси Y, максимальные уровни виброускорения наблюдаются в средней зоне изделия (узел 3377 и узел 9). В то же время при одинаковых уровнях возбуждения по осям X и Y имеется существенное различие уровней составляющих вибрации по этим осям в различных зонах конструкции изделия. В средней зоне уровень вибрации в направлении оси Y существенно выше, чем в направлении оси X, а в зоне переднего узла подвески (узел 3 балочной КЭМ) основной вклад в результирующий уровень вибрации вносит составляющая по оси X. В промежуточной зоне уровни составляющих вибрации по двум осям имеют одинаковый порядок.

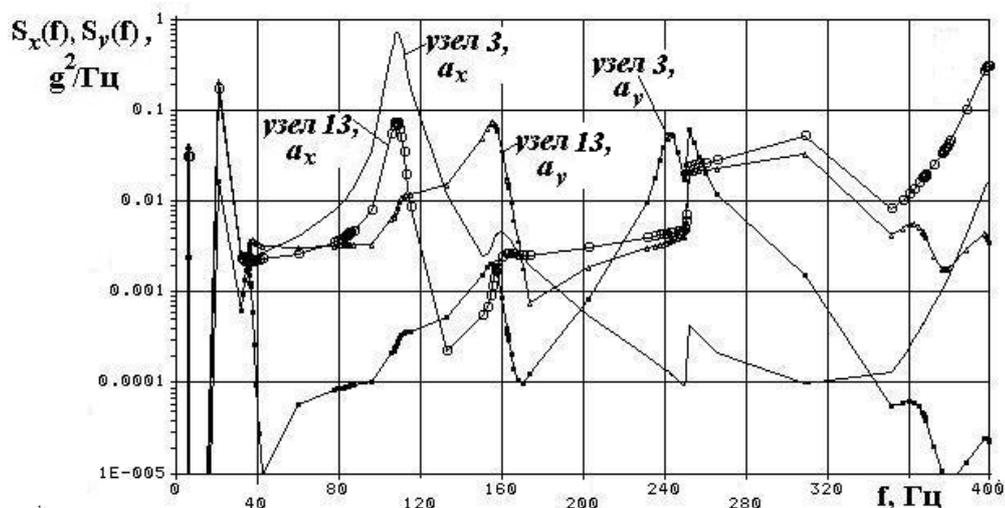


Рис. 19. Спектральные плотности ускорения по осям X и Y (балочная модель, двухкомпонентное возбуждение, узлы подвески)

## **Основные результаты и выводы**

Разработаны методики численного моделирования динамического состояния конструкций авиационных изделий при случайном пространственном кинематическом возбуждении. Модели, разработанные с использованием объемных и одномерных КЭ позволяют учитывать нерегулярности конструкции (соединения, односторонние связи, конструктивные особенности узлов подвески) и оценивать характеристики составляющих ее пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей.

На основе разработанных КЭ моделей определены динамические характеристики изделий и проведены расчетные исследования спектральных характеристик вибрационного состояния изделия при различных видах случайного кинематического нагружения.

Приведенные результаты расчетов показывают, что разработанные КЭ модели позволяют определять спектральные характеристики пространственных колебаний изделий при заданных условиях кинематического случайного нагружения, соответствующего этапу совместного полета изделий с носителем.

Выявлены особенности распределения составляющих уровней вибрации конструкции изделия при двухкомпонентном кинематическом возбуждении.

Адекватность моделей и работоспособность программ подтверждены физической корректностью результатов динамических расчетов, сходимостью значений собственных частот при дроблении разбиения, соответствием собственных форм и частот, полученных с использованием двух видов КЭ моделей.

Модели колебаний изделий могут быть использованы для оценки динамического состояния и вибрационной прочности изделий и узлов подвески при заданных условиях эксплуатационного нагружения.

## **Библиографический список**

1. Гудков А.И., Лешаков П.С. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 1968. 470 с.
2. Фигуровский В. И. Расчет на прочность беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
3. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. М.: Машиностроение. - Т. 1. Колебания линейных систем. Под ред. В.В. Болотина, 1978. 352 с. - Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова, 1980. 544 с.

4. Сидоренко А.С., Родионов Г.Л. Динамическое состояние летательного аппарата при аварии на этапе взлета // Труды МАИ (рубрика «Механика»): электронный журнал. URL: <http://www.mai.ru>, 2006, вып. № 26.

#### **Сведения об авторах**

Зарецкий Максим Владимирович, аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета);

Тел.:8-916-132-69-45; e-mail: XACE1987@mail.ru.

Сидоренко Александр Сергеевич, профессор Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н.,

Тел.:499-158-46-30; e-mail: k906@mai.ru.