

УДК 004.94:629.78

ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КА «МЕТЕОР-М» № 2 НА ЭТАПЕ ВЫВЕДЕНИЯ

В.Я. Геча, Е.А. Канунникова,
И.А. Мещихин, И.Ю. Пугач
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассмотрены вопросы, возникающие в процессе создания динамических моделей космического аппарата (КА) «Метеор-М» №2 на этапе выведения, включая создание моделей отдельных подсистем КА, их верификацию по результатам испытаний, сборку единой динамической модели КА на основе метода суперэлементов, а также редуцирование полученной модели по методу Крейга-Бемптона для совместного анализа нагрузок.

Ключевые слова: космический аппарат, динамическая модель, метод конечных элементов, метод суперэлементов, конденсированная модель, совместный анализ нагрузок, массовые и жёсткостные характеристики.

Введение

При расчётной и экспериментальной обработке конструкции космического аппарата (КА) на прочность основным и наиболее сложным, с точки зрения действующих нагрузок, является этап выведения КА. На этом этапе действуют максимальные постоянные перегрузки в различных направлениях, а также значительные вибрации в широком частотном диапазоне, как передаваемые через адаптер, так и порождаемые акустическим полем. С точки зрения граничных условий, этап выведения также наиболее сложен, так как на нём уже сняты дополнительные опоры и крепления, используемые в процессе транспортирования.

Соответственно, с этим этапом связан и наибольший объём прочностных расчётов и испытаний, а именно:

- прочностной расчёт на действие статических нагрузок;
- расчёт собственных частот;
- испытания на действие статических нагрузок;
- вибропрочностные испытания;
- расчёт нагрузок на КА в составе средств выведения.

Для проведения расчётов используется большое количество конечно-элементных моделей отдельных элементов и сборок КА, выполненных разными разработчиками. Рациональным решением является объединение этих моделей в единую модель КА и использование её для проведения поверочных расчётов, а также формирования редуцированной модели и передачи разработчикам средств выведения для совместного анализа нагрузок. В этом случае прочностная и динамическая модель получают-

ся согласованными, и полученные в совместном со средствами выведения расчёте КА нагрузки могут быть корректно приложены к моделям подсистем для поверочного прочностного расчёта.

Однако на практике при таком объединении возникает ряд трудностей:

- несоответствие сеток и интерфейсов моделей отдельныхборок; расчёт собственных частот;
- размерность: каждая модель делается с максимально возможной подробностью моделирования, исходя из имеющихся вычислительных мощностей, поэтому их объединение на этих же мощностях уже невозможно; вибропрочностные испытания.

Логичным выходом здесь является применение суперэлементов – подхода, позволяющего уменьшить размерность общей модели, а восстановление подробных результатов проводить на моделях отдельных подконструкций. При всей привлекательности метода суперэлементов его применение сопряжено с решением дополнительных задач:

- суперэлементный подход не так распространён, как МКЭ, не столь подробно описан в литературе и требует определённого мастерства и осмотрительности, как при создании модели, так и при анализе результатов;

- ошибки, которые могут возникнуть в результате объединения (например, паразитные частоты, избыточные и недостающие связи), в суперэлементном представлении лишены наглядности и требуют дополнительных тестов при верификации модели.

В данной статье предложен подход и изложена процедура формирования и верификации единой

модели КА на основе суперэлементов на примере КА «Метеор-М», включающая:

- построение динамической модели КА «Метеор-М» № 2 на этапе выведения;
- построение суперэлементной модели КА «Метеор-М» № 2;
- оценки обобщённых жёсткостных характеристик конструкции КА и влияния основных конструктивных элементов на жёсткостные характеристики.

Динамическая модель КА используется для:

- совместного анализа нагрузок со средствами выведения;
- оценки собственных частот КА;
- формирования модели для отправки разработчику средств выведения.

Для моделирования элементов КА используется метод конечных элементов (МКЭ) [1, 2]. Для моделирования КА в сборе используется метод суперэлементов [3, 4], для подготовки модели совместно со средствами выведения используется метод динамических суперэлементов (внешних суперэлементов) [5]. Использование суперэлементов (СЭ) позволяет за счёт последовательного редуцирования матриц масс и жёсткостей существенно снизить размерность решаемой задачи (полная размерность – 1,75 млн. степеней свободы), а также производить отладку моделей подсистем по отдельности и оперативно их модифицировать без изменения структуры сборки суперэлементов.

Процедура создания единой модели

Для расчётов на прочность КА «Метеор-М» № 2 были созданы конечно-элементные модели отдельных сборок: адаптера, приборной рамы, гермокорпуса и приборной платформы. Эти модели используются в качестве суперэлементов для создания единой модели КА (рис. 1), причём гермокорпус используется в качестве остаточной структуры. Стрелками на рис. 1 показаны интерфейсные (внешние) узлы, которые связывают суперэлементы с остаточной структурой.

Полученная модель может использоваться для поверочных расчётов и для совместного анализа нагрузок на КА в составе средств выведения. Для этого модель должна быть редуцирована, т. е. представлена в виде совокупности приведённых к узлам интерфейса матриц жёсткости и масс в определённом формате и передана разработчикам средств выведения для расчёта. В этом случае уже модель КА используется в качестве суперэлемента, присоединённого через интерфейсные узлы (крепление адаптера) к разгонному блоку (РБ) и ракете-

носителю (РН). Подробно процедура редуцирования рассмотрена в [6].

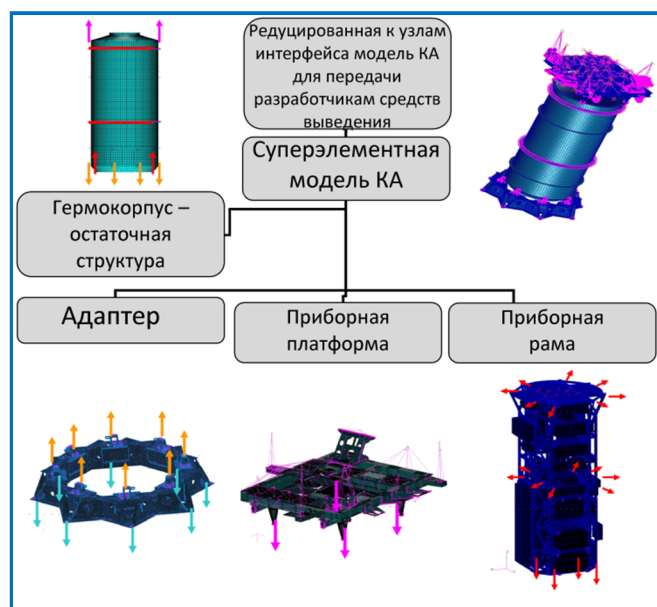


Рис. 1. Сборка суперэлементной модели КА

Верификация и проверка качества модели

Проверка качества единой модели КА и её достоверности при суперэлементном подходе становится ещё более актуальной, чем просто при применении МКЭ. Как видно на схеме, изображённой на рис. 2, она включает не только проверку конечно-элементных моделей, т. е. правильность выбора элементов, распределения масс и жёсткостей, но и проверку процедуры сборки и редуцирования единой модели.

Верификация конечно-элементных моделей отдельных сборок базируется на результатах испытаний. При наземной отработке КА «Метеор-М» были проведены статические испытания адаптера и динамические испытания приборной платформы с размещёнными на ней приборами и антенными устройствами [7]. Вообще, при организации расчётов и выборе суперэлементов следует стремиться к тому, чтобы они совпадали по составу со сборками, планируемыми для экспериментальной отработки, как и было сделано в данном случае.

Для адаптера проводилось сравнение расчётных и экспериментальных значений перемещений при приложении статической нагрузки. Как видно из табл. 1, результаты расчёта в горизонтальном направлении даже в линейной постановке хорошо соответствуют экспериментальным значениям, а в вертикальном с учётом разницы по растяжению-сжатию соответствуют в среднем.

Низшая собственная частота приборной платформы в направлении оси X составила 17,2 Гц, что неплохо согласуется с результатами испытаний, где собственная частота платформы составляет около 15 Гц. Отличие от расчётного значения на 12,65 % можно объяснить наличием податливости крепления стоек платформы, не учтённой в расчёте.

Кроме сравнения расчётных и экспериментальных значений применение суперэлементного подхода требует особых методов проверки, в числе которых:

- проверка нулевых частот;
- проверка энергии деформации нулевых форм;
- проверка по модальным массам;
- проверка собственных частот полной и редуцированной модели.

Проверка по нулевым частотам и энергии деформации

Численное значение нулевых частот является хорошим интегральным критерием для оценки качества как конечно-элементной модели, так и суперэлементной.

Как известно, нулевая форма собственных колебаний соответствует движению тела как абсолютно твёрдого. Если система координат подконструкций и сборки КА не согласованы между собой, то форма колебаний на нулевой частоте уже не будет линейной в окрестности некорректно соединённых интерфейсов подконструкций, а энергия деформаций ненулевой.

Таким образом, при неудовлетворительной проверке на нулевые частоты можно диагностировать дефекты в конечно элементных моделях (плохая обусловленность матрицы жёсткости, вырожденные элементы).

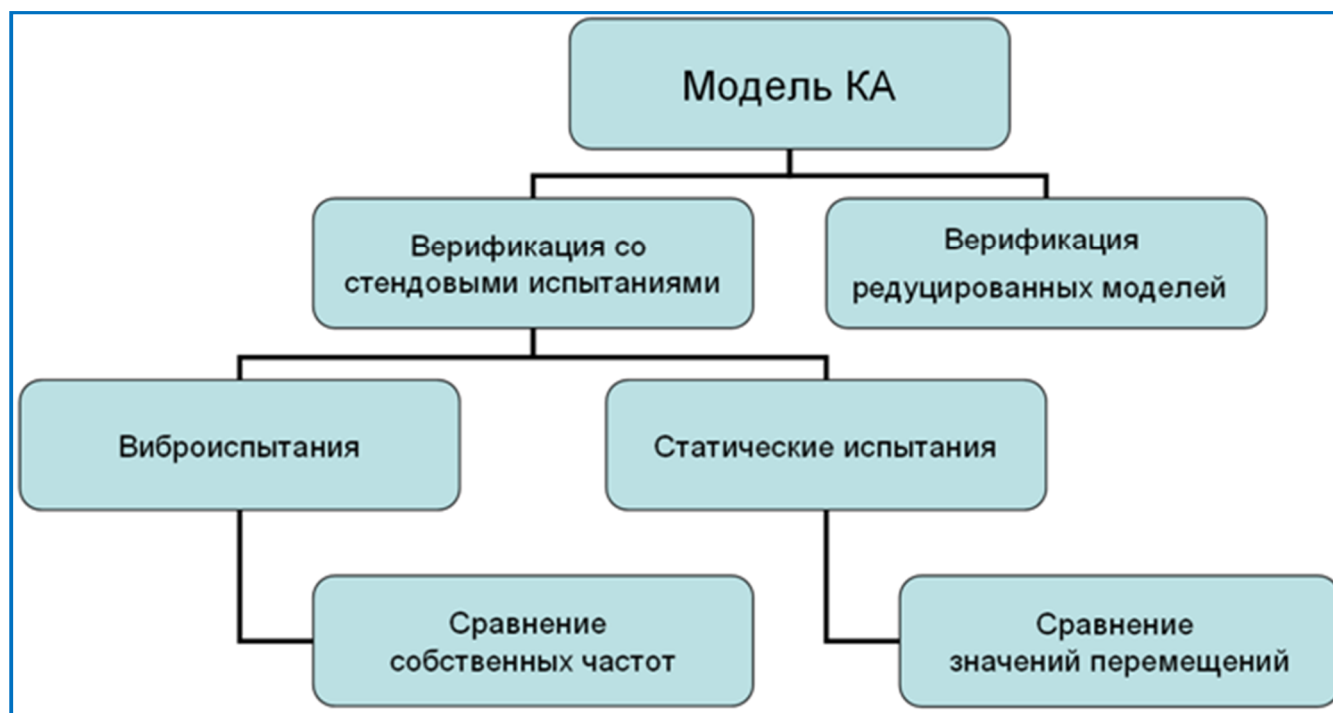


Рис. 2. Верификация модели КА

Таблица 1

Перемещения адаптера при статической нагрузке

Сравнение экспериментальных и расчётных данных	Вертикальные перемещения, мм		Горизонтальные перемещения, мм
	Сжатие	Растяжение	
Эксперимент	0,435	0,7	0,63
Расчёт в линейной постановке	0,64		0,66

При удовлетворении теста модели по нулевым частотам и неудовлетворительной проверке на нулевую энергию деформации можно диагностировать несогласованность систем координат при сборке подконструкций.

Качество редуцированных моделей может быть оценено по отношению наибольшей из нулевых частот незакрепленной модели к первой собственной частоте (отношение $f_i/f_0 > 10^4$). Эти соотношения для основных несущих элементов КА приведены в табл. 2.

Проверка по модальной массе

Так как динамический отклик КА ищется методом разложения по собственным формам, полнота полученного результата определяется количеством учитываемых собственных частот. При этом вклад каждой из форм можно оценить по модальной массе. Данный инструмент удобен, с одной стороны, как средство идентификации главных собственных частот по направлениям, что особенно актуально

при невозможности (без рестарта) увидеть форму собственных колебаний для всей конструкции. С другой стороны, таблица модальных масс позволяет оценить репрезентативность модели в заданном спектре частот динамического воздействия. С учётом этого вполне естественным выглядит требование по соответствию суммарной модальной массы величине не менее 95 % от полной массы.

При этом стоит отметить, что данное требование является общим требованием разработчика средств выведения. При расчётах данная величина может быть скорректирована в меньшую сторону с учётом спектра воздействия и метода суммирования собственных форм (в частности при применении метода модальных ускорений (ММУ)).

В табл. 3 представлены модальные массы первых шести тонов КА. Жирным выделены главные частоты по направлениям. Зависимость роста модальной массы от числа учитываемых тонов колебаний показана на рис. 3.

Таблица 2

Оценка качества редуцированных моделей

Суперэлемент	Нулевая частота f_0 , Гц	Энергия деформации нулевой формы	Первая ненулевая частота f_1 , Гц	f_1/f_0
Платформа	$2,06 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$	12,9	$6,27 \cdot 10^4$
Рама	$3,90 \cdot 10^{-4}$	$5,37 \cdot 10^{-5}$	28,9	$7,41 \cdot 10^4$
Адаптер	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$9,00 \cdot 10^{-5}$	97,2	$4,78 \cdot 10^5$
Гермокорпус	Не редуцировался (остаточная структура)			
Сборка КА	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-5}$	6,6	$6,60 \cdot 10^4$

Таблица 3

Идентификация собственных форм по модальной массе

№	f , Гц	Поступательные степени свободы, кг			Вращательные степени свободы, кг·м ²		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1	8,8	1342,6	1,9	0,0	22,4	16232,7	570,9
2	10,1	2,1	1464,1	0,3	17183,6	26,4	124,7
3	16,8	1,0	2,4	0,0	19,4	10,2	625,7
4	27,8	584,2	2,0	1,6	12,3	2231,3	234,4
5	29,4	1,2	355,9	268,0	1532,5	4,5	26,5
6	33,3	1,5	146,4	822,9	9,3	68,4	17,1

Проверка собственных частот полной и редуцированной моделей

Для проверки работоспособности единой редуцированной модели было проведено сравнение результатов расчёта собственных частот, полученных из решения нередуцированной динамической мо-

дели и суперэлементной (редуцированной) модели. Результаты расчёта приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что операция по редуцированию не вносит существенных искажений в значения собственных частот конструкции.

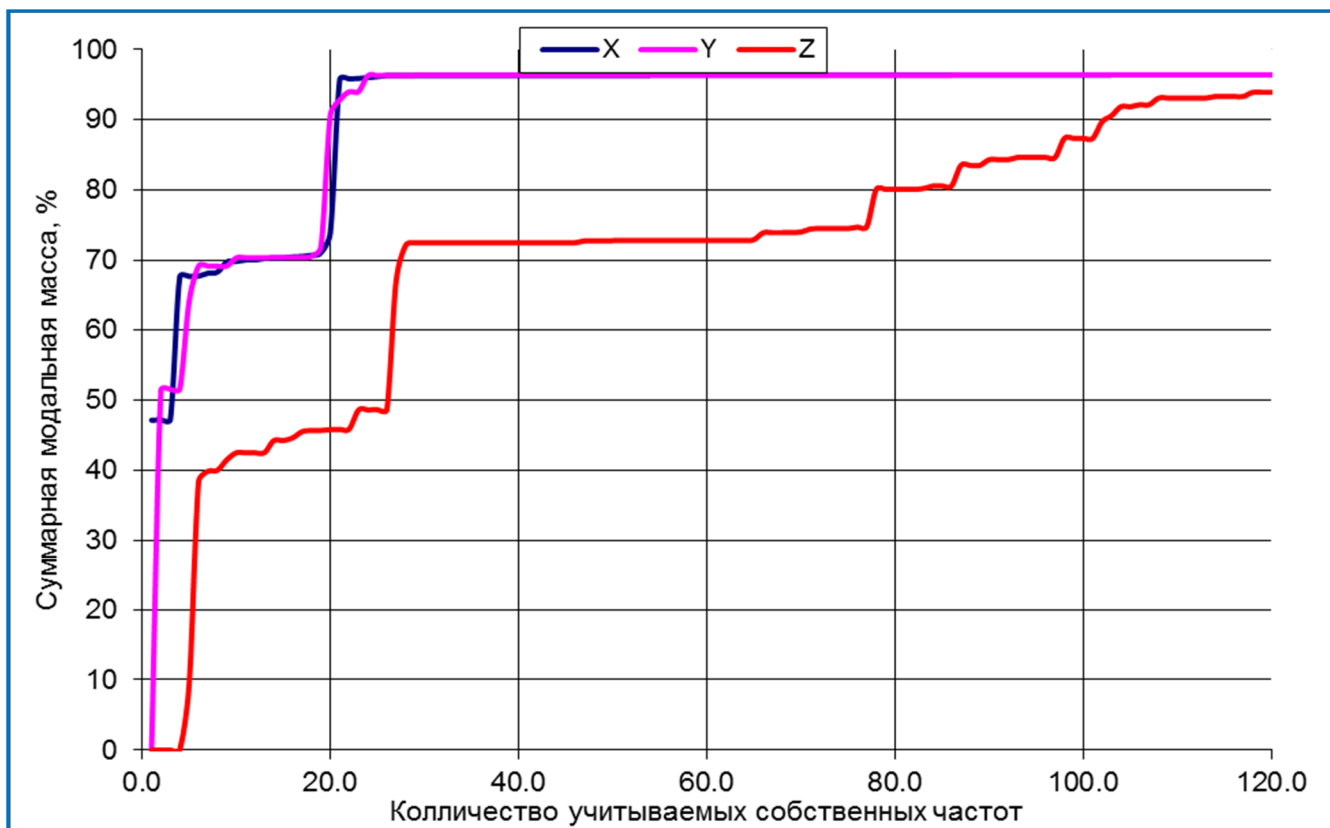


Рис. 3. Зависимость суммарной модальной массы поступательных степеней свободы (X, Y, Z) от количества учитываемых тонов

Таблица 4

Сравнение результатов расчёта собственных частот

№	Частота полной модели, Гц	Частота редуцированной модели, Гц	Описание формы колебаний
1	6,59	6,59	Поперечная в направлении оси X
2	6,65	6,65	Поперечная в направлении оси Y
3	11,66	11,62	Колебания платформы
4	12,144	12,12	
5	12,71	12,68	
6	13,3	13,29	

Результаты моделирования. Динамические характеристики

Для оценки влияния отдельных подсистем КА на динамические характеристики КА в целом был проведён расчёт частот этих подсистем. При этом все остальные элементы КА предполагаются абсолютно жёсткими с сохранением массовых и инерционных характеристик. Полученные результаты расчёта собственных частот для отдельных элементов КА сведены в табл. 5.

После редуцирования матриц масс и жёсткостей элементов конструкции КА к интерфейсным узлам был осуществлён расчёт собственных частот всей сборки.

Решение, полученное при совместном расчёте, представляет собой собственные формы гермокорпуса (остаточной структуры), а также значения собственных векторов в интерфейсных узлах платформы, рамы и адаптера, собственные формы которых восстанавливались с помощью рестарта.

Конструкцию КА можно представить как совокупность последовательно и параллельно соединённых жёсткостей и масс элементов. Цепочка жёсткостей и масс «адаптер – гермокорпус – платформа» соединены последовательно, а жёсткость и масса последовательности «приборная рама – гермокорпус» параллельно. Таким образом, результирующие продольные и поперечные жёсткости КА в сборке определяются преимущественно жёсткостями адаптера, гермокорпуса и платформы, а частоты приборной рамы существуют в результирующем спектре частот самостоятельно и, в масштабах КА, будут являться парциальными.

Низшие частоты КА даны в табл. 6, иллюстрация анализа связи частот отдельных элементов КА с частотами КА в целом показана на рис. 4.

Низшая собственная частота КА в поперечном направлении составляет 6,6 Гц, собственная частота КА в продольном направлении выше 35 Гц. Наибольший вклад в значение поперечных собственных частот КА вносят адаптер и приборная платформа.

Таблица 5

Частоты отдельных элементов КА

Элемент КА	Характер частоты	Частота, Гц	
		X	Y
Адаптер	Поперечные	8,7	8,7
Приборная рама	Поперечные	23,7	24,2
	Собственные отдельных приборов рамы	10,9	11,2
Гермокорпус	Поперечные	17,6	13,5
	Продольная	109	
Приборная платформа	Поперечные	17,2	20,3

Анализ размерности моделей, используемых на разных этапах

Как уже говорилось, для моделирования элементов КА используется метод конечных элементов, для моделирования КА в сборе используется метод суперэлементов, для подготовки модели совместно со средствами выведения ис-

пользуется метод внешних суперэлементов (метод Крейга – Бемптона). Как видно из приведённой схемы, размерность решаемой задачи снизилась от 1,75 млн. степеней свободы в полной конечно-элементной модели до 168 степеней свободы в редуцированной динамической модели.

Таблица 6

Низшие частоты КА

№	Частота, Гц	Характер формы
1	6,6	Колебания КА на адаптере по первой форме вдоль оси Y
2	6,7	Колебания КА на адаптере по первой форме вдоль оси X
3	11,7; 12,7	Колебания отдельных приборов рамы
5	13,3	Крутильная форма
6	12,7	Колебания приборной рамы в направлении оси X
7	17,4	Колебания приборной рамы в направлении оси Y

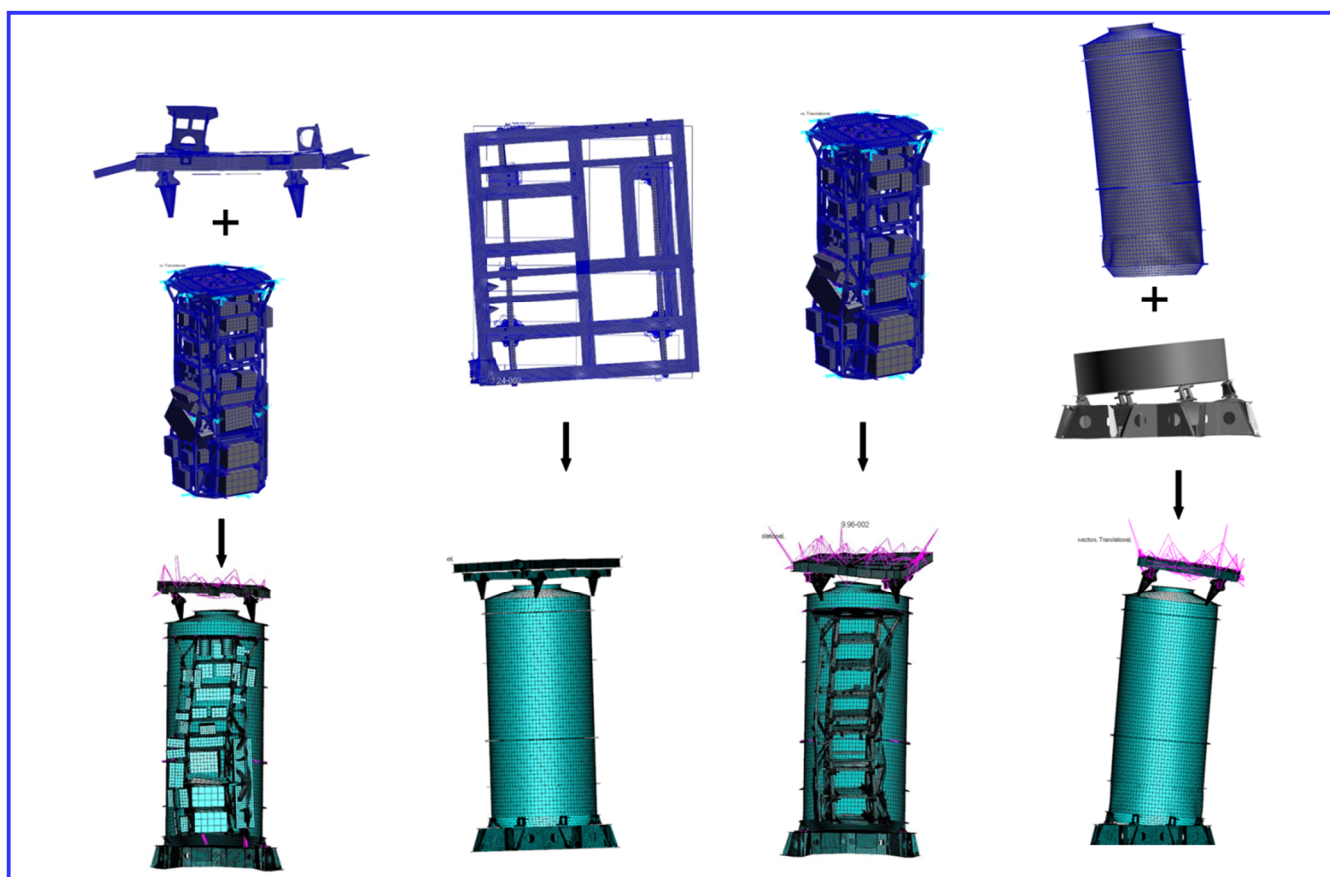


Рис. 4. Анализ влияния подсистем на собственные частоты КА

Выводы

1. Разработана единая динамическая модель КА типа «Метеор-М» на этапе выведения, предназначенная для определения прочностных и динамических характеристик КА в целом, передачи модели поставщику средств выведения.

2. Модель создана путём объединения в единую модель подробных моделей сборок; адаптера, приборной платформы, приборной рамы и гермокорпуса, разработанных для проведения прочностных расчётов, и позволяет проводить вычисления для модели в целом без потери детализации отдельных элементов.

3. Использование суперэлементов позволяет за счёт последовательного редуцирования матриц масс и жёсткостей существенно снизить размерность решаемой задачи от 1,75 млн. степеней свободы в полной конечно-элементной модели до 168 степеней свободы в редуцированной динамической модели, а также производить отладку моделей подсистем по отдельности и оперативно их модифицировать без изменения структуры сборки суперэлементов.

4. Для верификации и проверки качества редуцированных моделей использовались критерии по энергии деформации нулевых форм и нулевых частот, которые позволяют оперативно диагностировать качество сборки, и таблицы модальных масс для оценки полноты модели.

5. В результате проделанной работы были получены верифицированные динамические модели КА «Метеор» № 2, 2-1, 2-2 для последующего использования при анализе совместных нагрузок при выведении, что позволило получить актуальные уровни нагружения для КА «Метеор» № 2, 2-1, 2-2 и сформировать базу для дальнейших исследований.

6. Внедрение в расчётную практику предприятия предложенной процедуры формирования единой динамической модели КА на этапе выведения позволяет получать согласованные модели для расчёта КА на различных этапах отработки и суще-

ственно повысить точность выполняемых расчётов на имеющихся вычислительных мощностях.

Литература

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов / пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
2. Гаврюшин С. С., Барышникова О. О., Борискин О. Ф. Численный анализ элементов конструкций приборов и машин / С. С. Гаврюшин и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 479 с.
3. MSC.Nastran / Superelement User's Guide / MSC Software Corporation, 2001.
4. Постнов В. А. Метод суперэлементов в расчётах инженерных сооружений / В. А. Постнов. – СПб.: Судостроение, 1979. – 228 с.
5. Клайн К. А. Исследование динамического поведения конструкции с помощью усеченного базиса из собственных форм и векторов // Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 6. – С. 168.
6. Геча В. Я., Канунникова Е. А., Мещихин И. А., Бордадымов В. Е., Даниловский Н. Н. Создание редуцированных матриц жёсткостей и масс для совместного анализа нагрузок // Труды НПП ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики. – 2011. – № 121. – С. 39 – 45.
7. Канунникова Е. А., Пугач И. Ю./ Расчётно-экспериментальное исследование динамических характеристик антенных устройств космических аппаратов // Труды ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики. – 2009. – № 109. – С. 17 – 20.

Поступила в редакцию 15.12.2014

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, заместитель директора;
т. (499) 365-26-69.

Елена Александровна Канунникова, канд. техн. наук,
начальник лаборатории,
т. (495) 366-79-52.

Илья Александрович Мещихин, мл. научн. сотрудник,
т. (495) 366-33-61.

Игорь Юрьевич Пугач, мл. научн. сотрудник,
т. (499) 366-33-66.