

Проектирование и расчет

КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАСКРЫВАЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ MSC.Software

Одним из важных и бурно развивающихся направлений в области создания крупногабаритных космических конструкций является разработка раскрывающихся панелей солнечных батарей, а также антенн, устанавливаемых на космических аппаратах различного назначения.

Работоспособность таких конструкций определяется, главным образом, уровнем возникающих в них нагрузок и деформаций при разворачивании и эксплуатации. Обеспечение надежного раскрытия и функционирования этих систем связано с решением сложных конструкторских и технологических задач.

Особое место среди создаваемых сейчас крупногабаритных антенн занимают ферменные конструкции, разворачивание которых происходит автоматически за счет первоначально накопленной энергии в упругих элементах.

Основные требования, предъявляемые к антенному устройству, сводятся по существу к оптимизации габаритных и массовых характеристик в условиях общего ограничения по массе и точности рабочих поверхностей антенны.

Экспериментальная отработка изделий зачастую носит затяжной характер. На том или ином этапе конструктор может оказаться в непростой ситуации, столкнувшись с рядом проблем, для решения которых нет готовых методик. Велика цена ошибки при принятии решения. Каждое новое испытание — это дополнительные материальные затраты, причем немалые.

Замена натуральных испытаний виртуальными (хотя бы частично) приводит к существенной экономии времени разработки и снижению стоимости изделия. Большинство предприятий это осознаёт

и внедряет современные компьютерные системы проектирования и анализа, так называемые VPD-технологии (Virtual Product Development — виртуальная разработка изделий).

Современный подход к проектированию изделий включает несколько этапов:

1. Разработка трехмерной модели изделия в той или иной CAD-системе.
2. Переход от конструкции к расчетной схеме, выбор которой определяется целями расчета.
3. Расчет подготовленной задачи, получение результатов и их обработка.
4. Верификация модели на основе имеющихся экспериментальных данных и уточнение расчетной схемы.

Пункты 3 и 4 могут повторяться в цикле, пока не будет получена адекватная расчетная модель.

Имея скорректированную расчетную модель изделия, можно выполнить ряд численных экспериментов различного назначения. Например, оценить чувствительность модели к изменению того или иного параметра. Или смоделировать поведение конструкции в ситуациях, которые невозможно воспроизвести в условиях земного эксперимента, получить развернутую информацию по характеристикам движения конструкции и возникающим усилиям в ее элементах для любого момента времени и, наконец, оценить прочность узлов и компонентов. На основе полученных данных принимаются обоснованные решения по доработке и совершенствованию изделия.

Научный центр прикладной электродинамики (НЦПЭ, Санкт-Петербург) совместно с ФГУП "КБ "Арсенал"

(Санкт-Петербург) в течение 2008 года проводил исследовательскую работу по оценке электромагнитных свойств антенного устройства и моделированию динамического поведения антенны на разных стадиях функционирования. В качестве консультантов к работе привлекались специалисты ЗАО CSoft (Москва) и московского представительства компании MSC.Software.

Цели и задачи исследования включали:

- создание геометрической модели антенны;
- создание расчетной модели;
- моделирование процесса раскрытия антенны;
- расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции в процессе раскрытия.

Предметом исследования является антенна с отражающей поверхностью в виде параболоида и габаритными размерами в развернутом состоянии порядка двенадцати метров в длину и четырех в ширину.

Современные системы твердотельного моделирования располагают широкими возможностями создания сложных трехмерных объектов и их модификации. Первым этапом разработки расчетной модели является создание ее геометрического образа с помощью такой системы.

Антенны ферменной конструкции состоят из трехмерного пространственного каркаса и крепящейся к нему отражающей поверхности. Опорную конструкцию составляют структурные базовые элементы (тетраэдры), благодаря чему каркас приобретает необходимую жест-

кость и прочность в развернутом состоянии и обеспечиваются малые габариты в сложенном состоянии.

Общее представление о конструкции можно получить из рис.1-2.

Каркас антенны строится из прямолинейных стержней таким образом, чтобы аппроксимировать теоретическую поверхность с заданной точностью (рис. 2). Точность аппроксимации, как правило, регламентируется предельно допустимым среднеквадратичным отклонением.

Поскольку кривизна в разных точках параболоида различна, ячейки не являются идентичными. Стержни, образующие теоретическую поверхность, в разных ячейках имеют различную длину.

При раскрытии антенны ячейка из сложенного состояния переходит в развернутое. Под действием сжатых пружин шарнирно соединенные стержни разворачиваются по отношению друг к другу пока не встанут на упоры (рис. 3).

После перехода антенны в развернутое состояние шарнирно соединенные стержни образуют две поверхности. Вогнутая поверхность, аппроксимирующая параболоид, покрывается специальной сеткой (сетеполотном) и является отражающей. Каркас из жестких стержней обладает высокой устойчивостью и является оптимальным для антенных систем, к которым предъявляются повышенные требования, касающиеся точности отражающей поверхности.

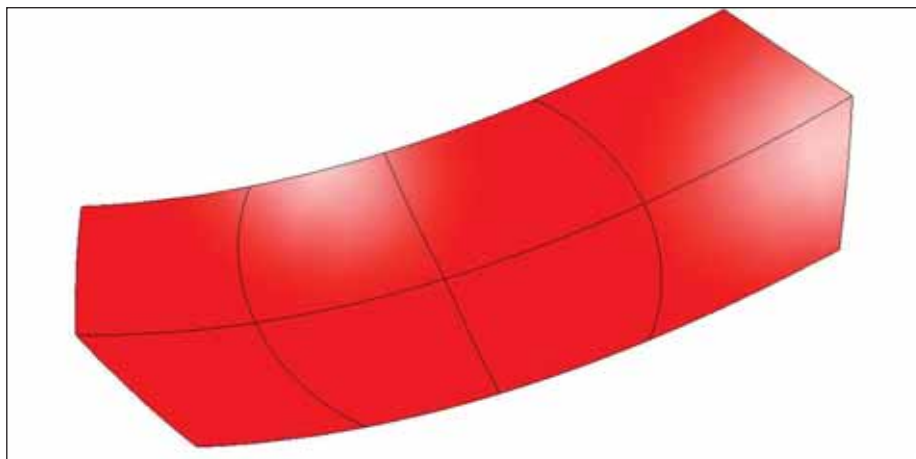


Рис. 1. Отражающая поверхность антенны в форме параболоида

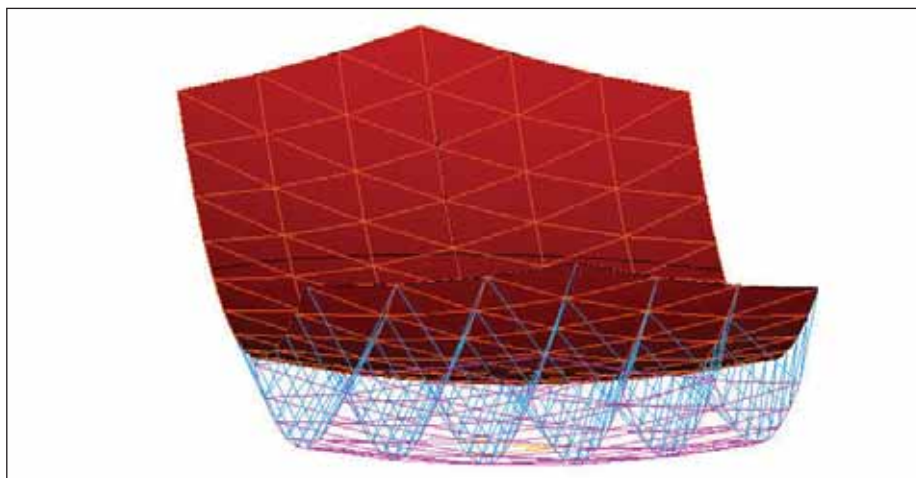


Рис. 2. Каркас антенны, аппроксимирующий теоретическую поверхность антенны

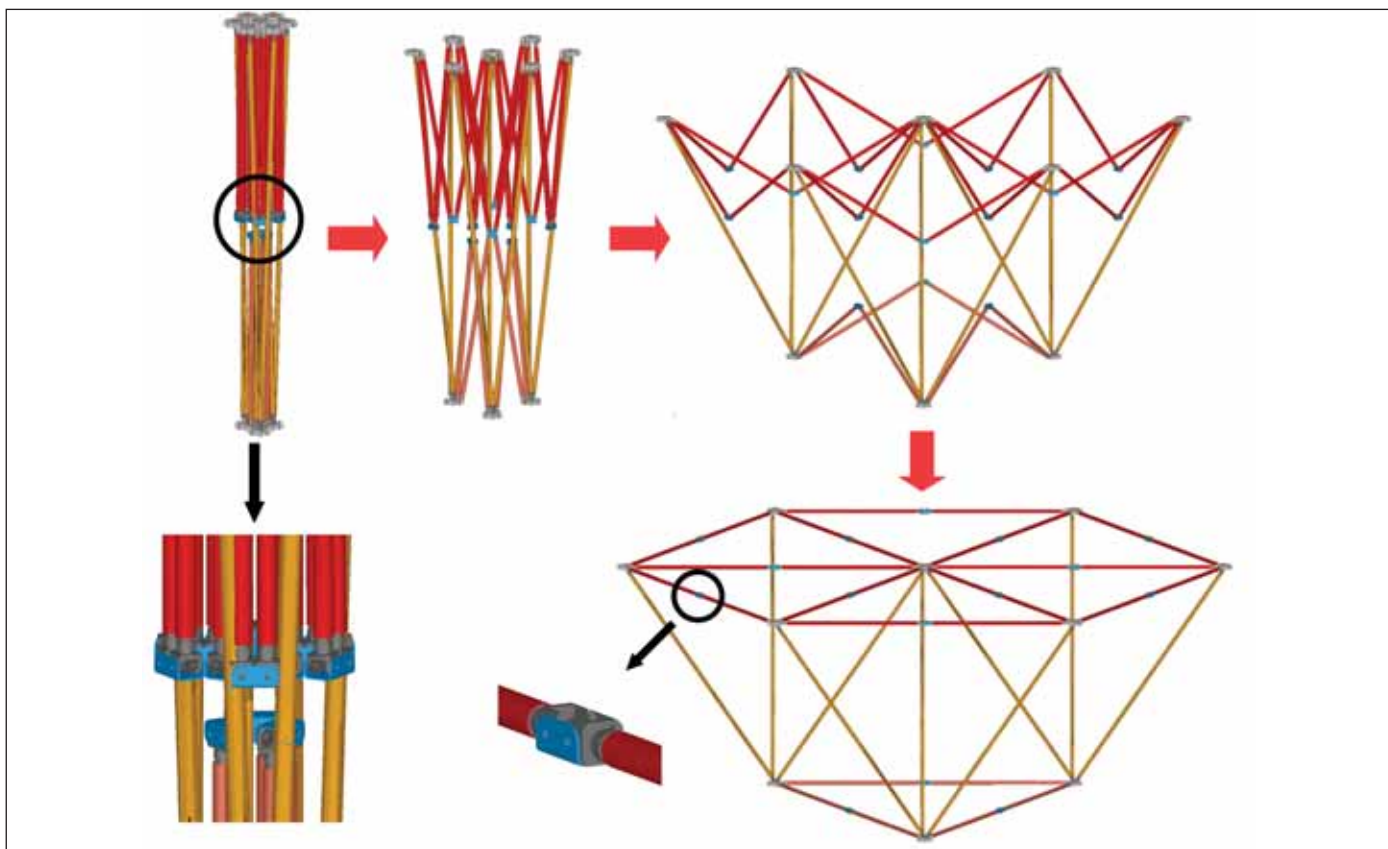


Рис. 3. Трансформация элементарной ячейки из сложенного состояния в развернутое

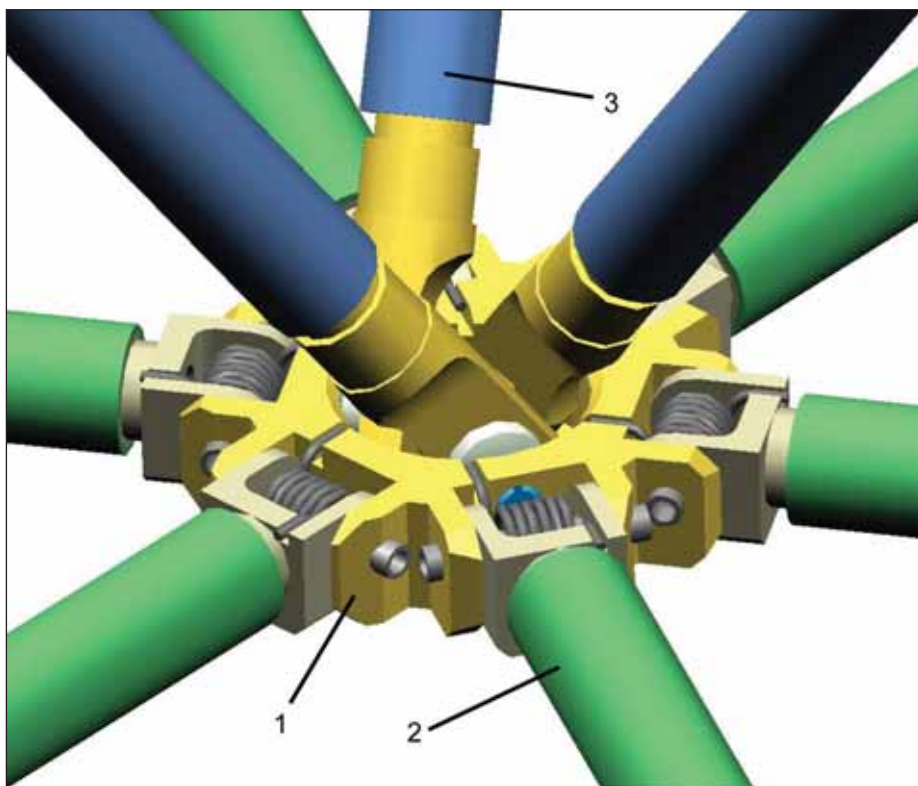


Рис. 4. Конструкция узла каркаса антенны

Основными элементами каркаса антенны являются узлы, конструкция которых представлена на рис. 4.

Узел состоит из корпуса-"паучка" (1), к которому шарнирно крепятся петли шести складывающихся стержней (2) и три петли диагональных стержней (3).

Петли диагональных стержней имеют сложную форму, благодаря чему достигается плотная укладка диагональных стержней (параллельно друг другу) при складывании антенны.

Возможность использования в конст-

рукции типового узла обусловлена тем обстоятельством, что треугольники, представляющие каркас антенны, близки к равносторонним. Небольшие перекосы выбираются за счет упругих деформаций стержней и осей шарниров, что было подтверждено ранее в процессе натурных экспериментов.

Высокая надежность разворачивания антенны обеспечивается многократным резервированием пружин. Это гарантирует раскрытие антенны даже при отказе нескольких пружин одновременно.

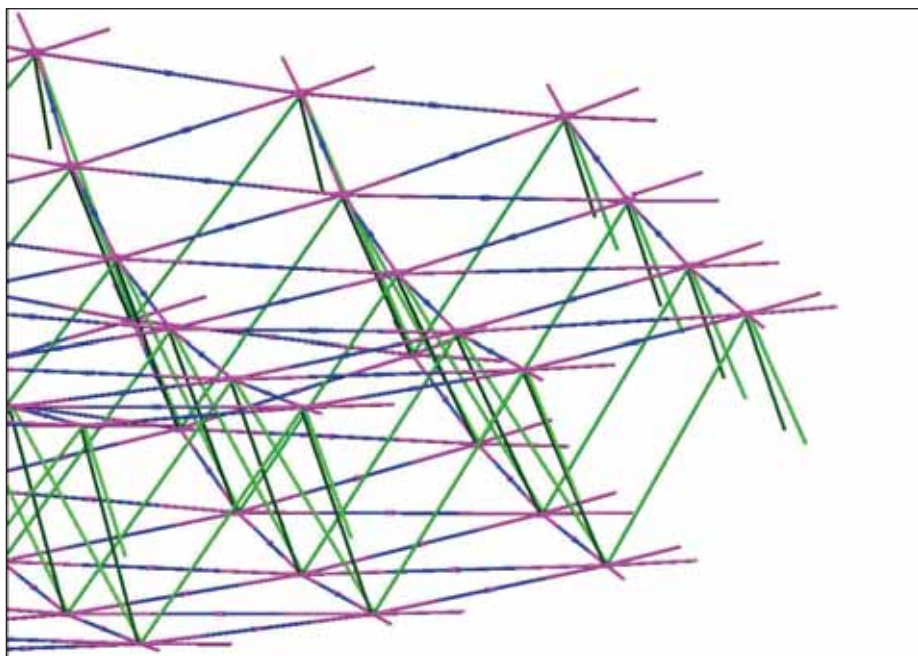


Рис. 5. Геометрия каркаса антенны, созданная в CAD-системе

Созданию моделей — геометрической и расчетной — предшествовал тщательный анализ возможных вариантов и способов построения.

Строить геометрическую модель антенны можно в любой CAD-системе среднего и высокого уровня (SolidWorks, Autodesk Inventor, Solid Edge, Unigraphics и др.). В данном случае использовался пакет I-DEAS. Эта же система оказалась полезной при подготовке расчетной модели для моделирования поведения системы при разворачивании.

В процессе электронной сборки геометрической модели определяются невязки и нестыковки ее элементов. Конструкция, как уже отмечалось выше, не является строго регулярной: от одного узла к другому меняются длины стержней, углы, направления нормалей к плоскости корпуса типового узла и др.

Поскольку число геометрических элементов велико, представлялось разумным автоматизировать процесс размещения типовых элементов. Время, затраченное на написание и отладку программы, с лихвой окупало себя в дальнейшем. Помимо ускорения процесса (в десятки раз!), автоматизированное размещение позволило избежать ошибок, которые были бы неизбежны при "ручном" способе. В результате получена модель, показанная на рис. 5.

Созданную твердотельную геометрию можно сохранить в формате Parasolid и затем импортировать в среду препост-процессора Adams/View, где имеется весь необходимый инструментарий для подготовки расчетной модели. Процесс подготовки включает в себя задание массово-инерционных характеристик элементам конструкции (можно воспользоваться опциями автоматического вычисления этих параметров), шарниров, силовых или кинематических воздействий, различных видов контакта и т.д. Далее выбираются тип расчета, подходящий решатель и выполняется сам расчет.

Но, как показал опыт, подготовку расчетной модели для определения динамики движения изделия все-таки лучше проводить в среде CAD-системы, где создавалась геометрическая модель, и делать это также программным путем. Основная сложность формирования расчетной модели в системе Adams состоит в определении точек привязки для элементов динамической модели (шарниров, контактных пар и т.д.) и надлежащей их ориентации. В средствах геометрического моделирования и инструментах геометрической привязки Adams, естественно, уступает развитым CAD-системам. Поэтому в данной задаче эта система использовалась в основном как решатель.

В CAD-среде автоматически создаются:

- шарниры "Revolute", имеющие одну вращательную степень свободы;
- линейные пружины кручения "Spring", соосные с шарнирами "Revolute";
- контактные пары (тип "Sphere to Sphere", "Sphere to Plane") для предотвращения взаимопenetрации компонентов конструкции и для моделирования контактного взаимодействия петель с накладками после полного раскрытия антенны, когда петли становятся на упор.

Для моделирования податливости стержней вводятся Bush-элементы с приведенными жесткостными характеристиками стержней. Использование Bush-элементов позволяет увеличить точность получаемых результатов и разрешить многократную статическую неопределимость конструкции.

На рис. 6 показан фрагмент динамической модели после введения всех связей и ограничений.

Затем модель экспортируется в Adams (рис. 7).

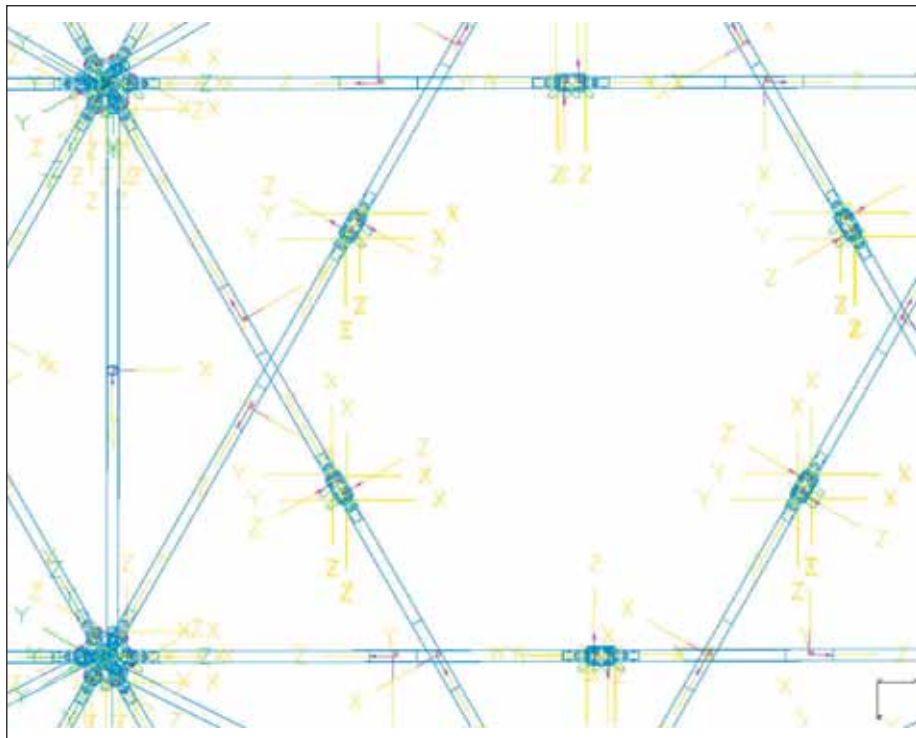


Рис. 6. Фрагмент динамической модели после введения всех связей и ограничений

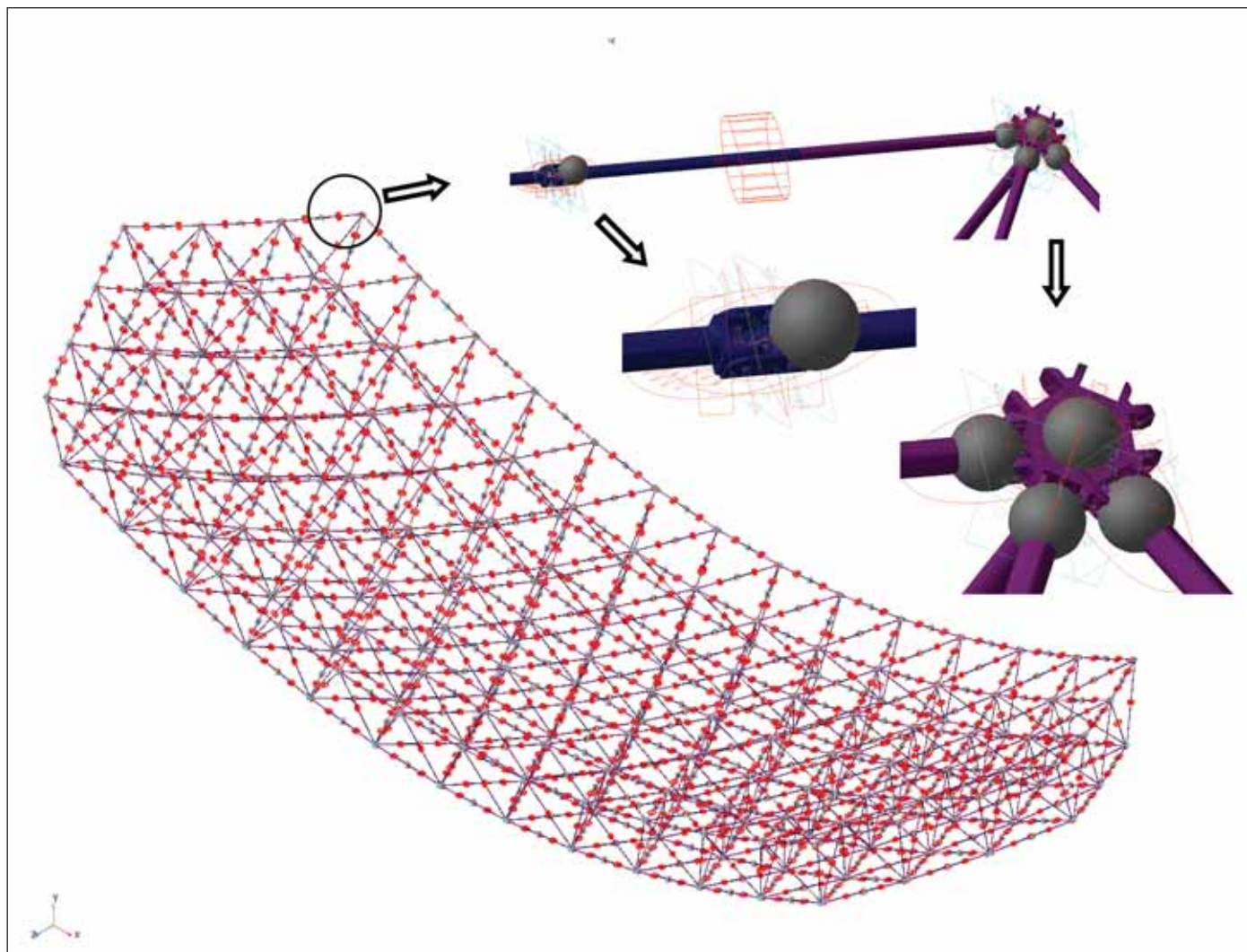


Рис. 7. Вид расчетной модели в Adams

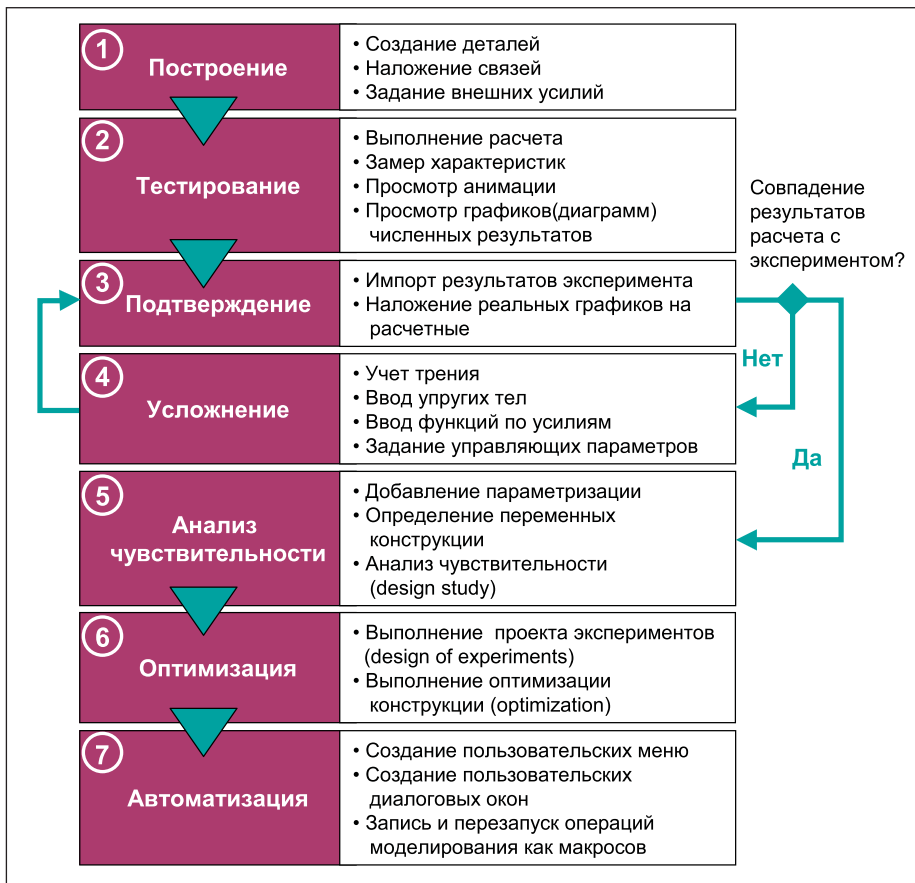


Рис. 8. Этапы моделирования в Adams

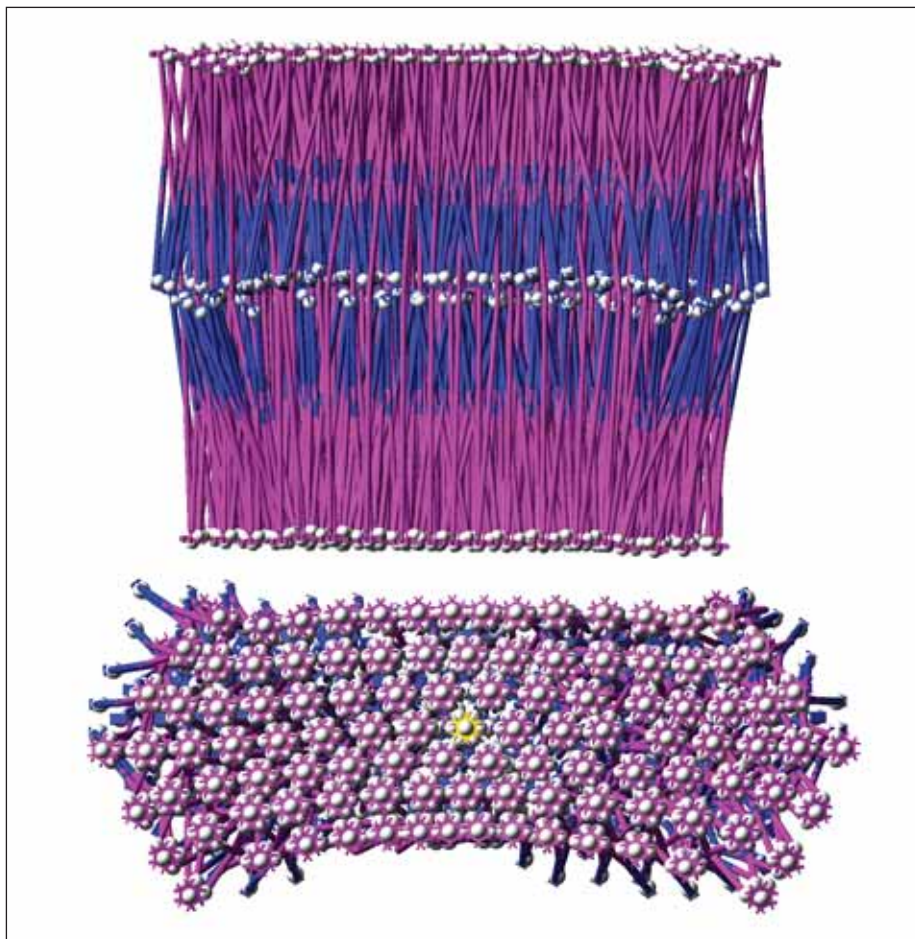


Рис. 9. Антенна в сложенном состоянии (после первого шага моделирования)

При моделировании динамического поведения антенны принимаются следующие допущения:

- конструкция находится в состоянии невесомости (на конструкцию не действует вес);
- в развернутом состоянии при отсутствии пружин в элементах конструкции антенны напряжений нет;
- пружины устанавливаются с определенным начальным моментом, чтобы обеспечить необходимую растяжку сетеполотна. Это ведет к появлению начальных усилий (сил и моментов) в элементах конструкции;
- центральный корпус каркаса антенны закреплен неподвижно в пространстве.

Для моделирования раскрытия антенны из транспортного положения необходимо прежде всего привести ее в это положение из исходного развернутого и учесть возникающие при этом деформации и усилия. Поэтому моделирование поведения конструкции осуществляется в два шага.

Первый шаг. Перевод антенны в транспортное (компактное) состояние. Для этого используется искусственный прием — в пружинах кручения задаются "отрицательные" начальные моменты (противоположные реально действующим). Под их действием каркас антенны складывается. Достигнутое состояние равновесия является исходным для второго шага.

Второй шаг. Значения начальных моментов меняются в пружинах на "правильные". Под их действием антенна из сложного состояния переходит в конечное — рабочее. На этом шаге должны наблюдаться ярко выраженные динамические эффекты и экстремальные нагрузки на элементы конструкции.

На основе полученных в Adams результатов (усилий, возникающих в шарнирах и Bush-элементах, сил инерции и т.д.) рассчитывается напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов конструкции и оценивается их прочность. Расчет НДС проводился с помощью систем Patran (препроцессор) и MSC Nastran (решатель). Поскольку MSC Nastran, Patran и Adams входят в линейку программ компании MSC.Software, механизм передачи данных из Adams в Patran эффективен, удобен и прост.

Полный цикл исследования прототипа изделия в системе Adams включает, как правило, семь основных этапов (рис. 8).

Следует обратить внимание на пункты 3 и 4, обязательные при проектировании изделия. Созданная расчетная модель нуждается в верификации, которая проводится на основе сопоставления результатов численного и натурного экспе-

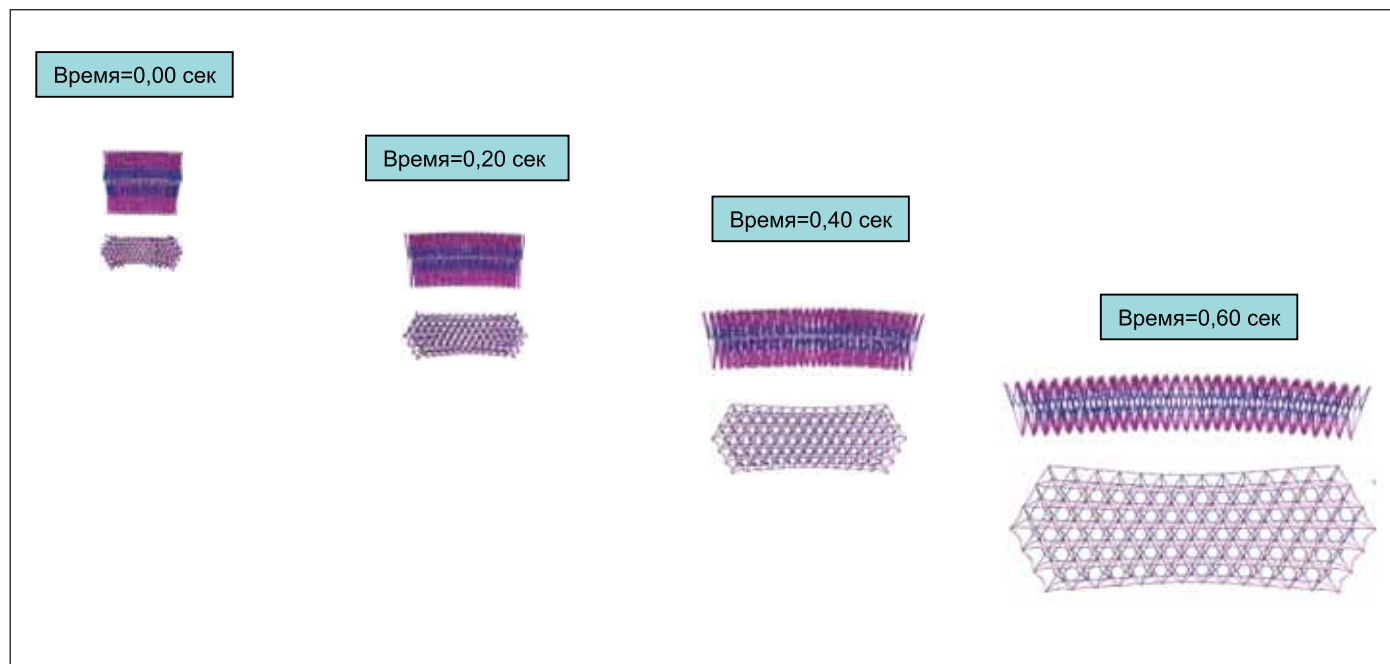


Рис. 10. Динамика раскрытия антенны в интервале от 0 до 0,6 с

риментов с последующей калибровкой параметров модели. Это непростая работа, требующая наличия соответствующей измерительной аппаратуры, искусства интерпретации полученных данных и интуиции.

На рис. 9 показана конфигурация антенны после первого шага расчета, а

на рис. 10-12 представлены результаты моделирования раскрытия антенны из сложного состояния в рабочее.

Из анализа результатов динамического моделирования можно сделать вывод, что полученное решение качественно верно отражает особенности поведения конструкции.

Ко второй секунде с момента начала раскрытия антенны ее состояние стабилизируется, и дальнейшие колебания идут с небольшой амплитудой вокруг положения равновесия.

Помимо динамических характеристик изделия, важным и зачастую определяющим является вопрос прочности его

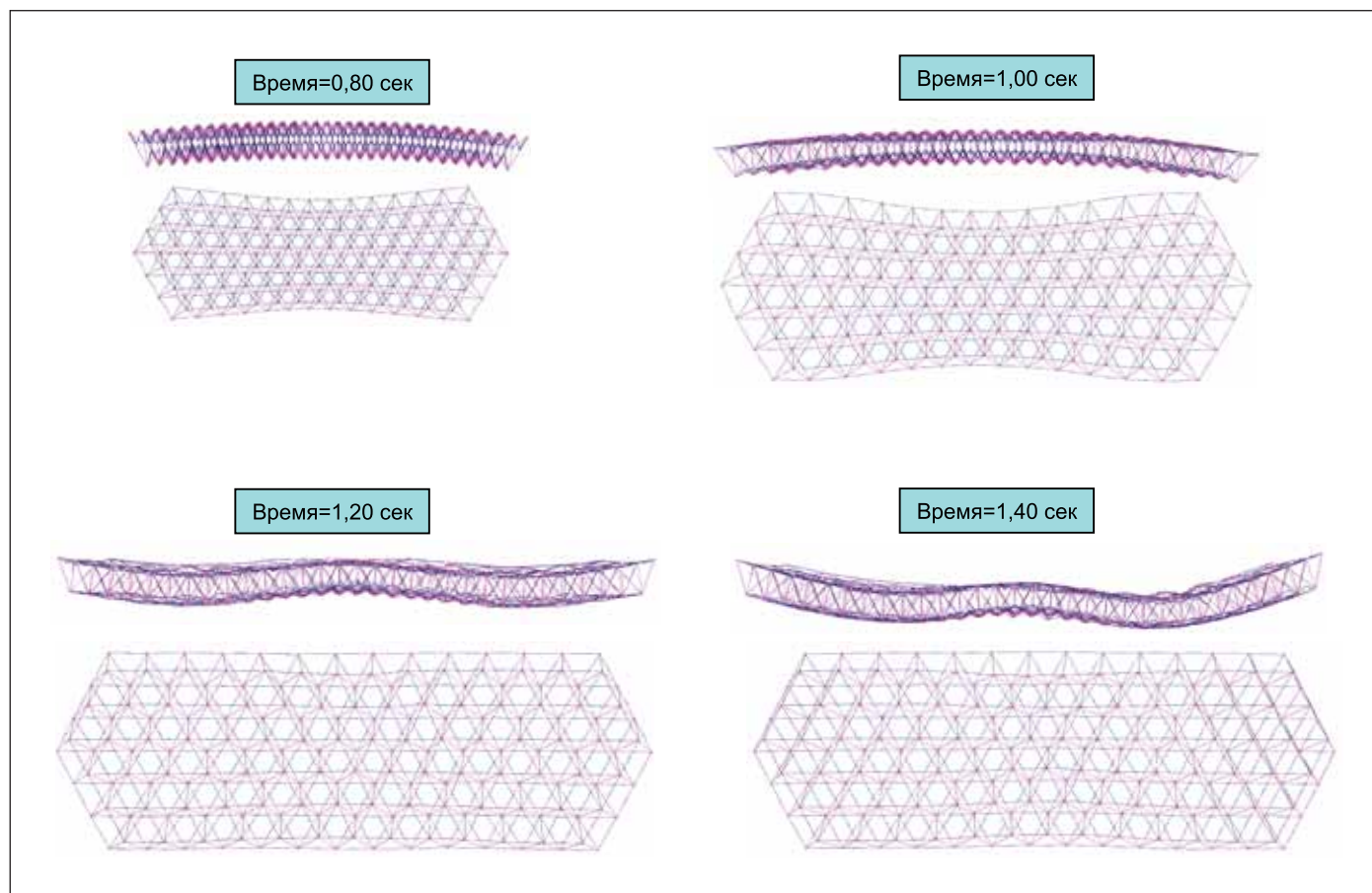


Рис. 11. Динамика раскрытия антенны в интервале от 0,8 до 1,4 с

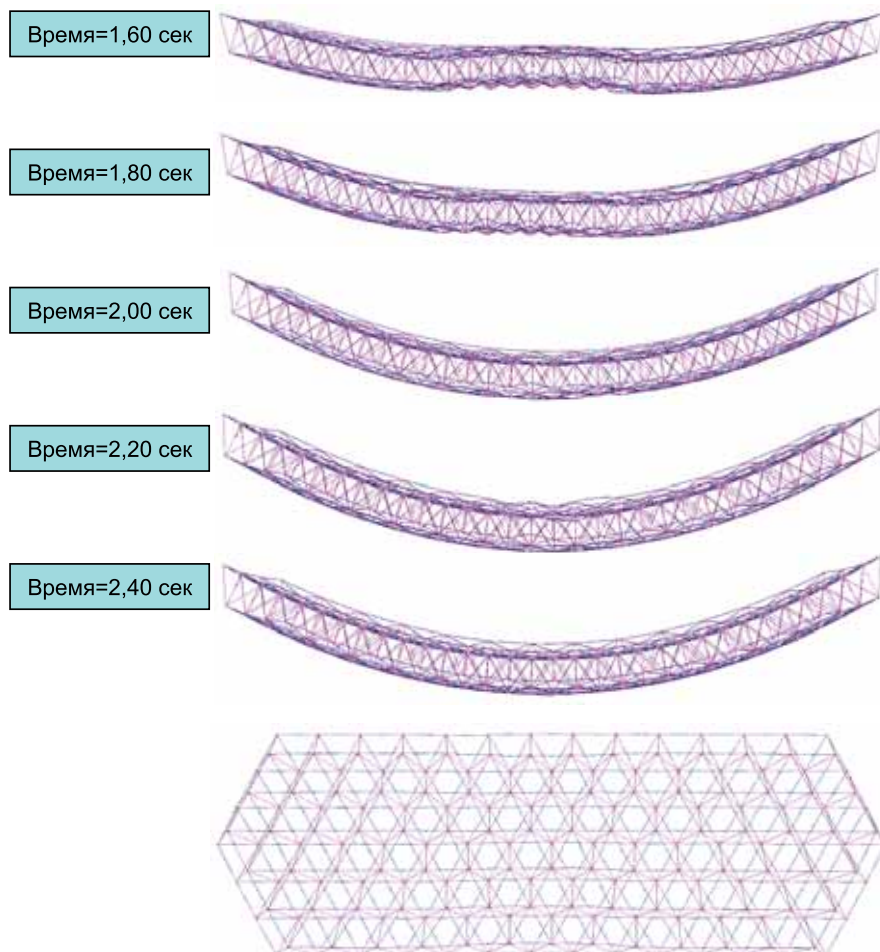


Рис. 12. Динамика раскрытия антенны в интервале от 1,6 до 2,4 с

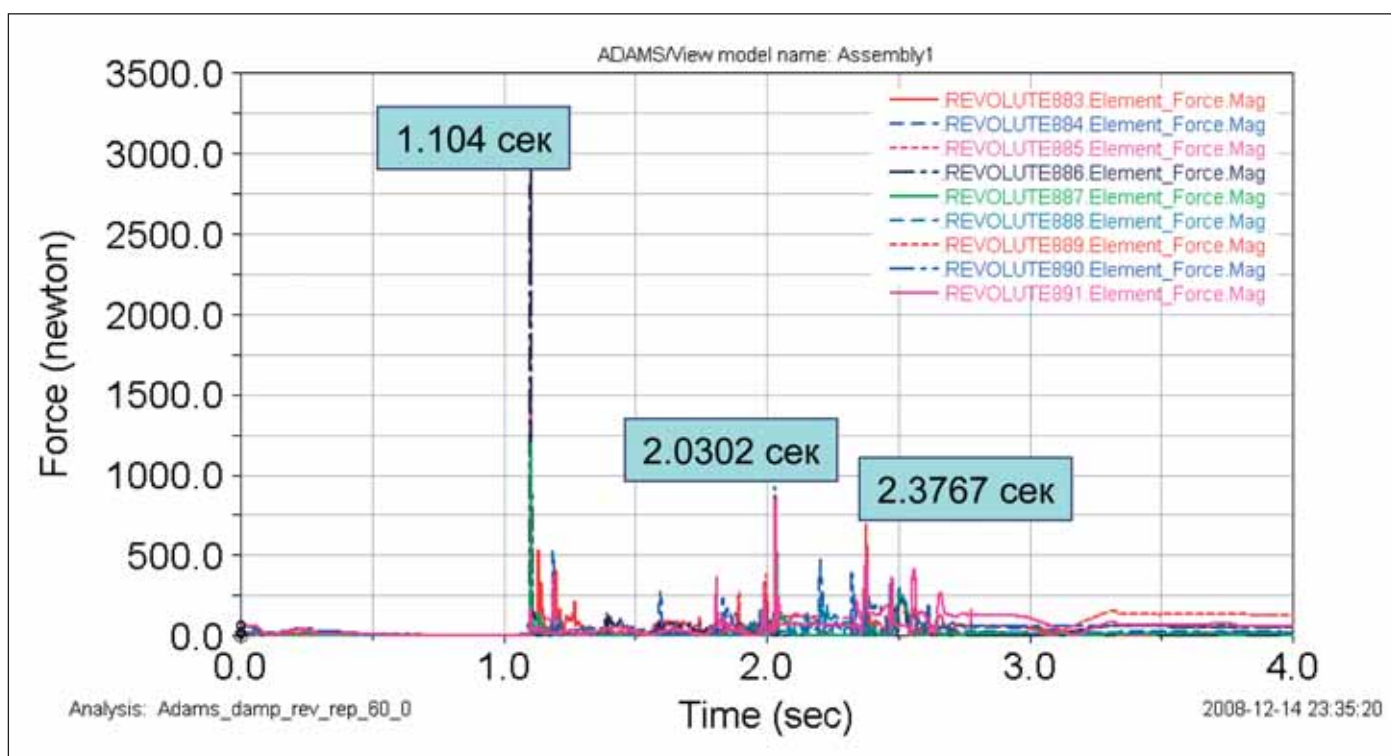


Рис. 13. Силы, действующие со стороны шарниров на центральный корпус

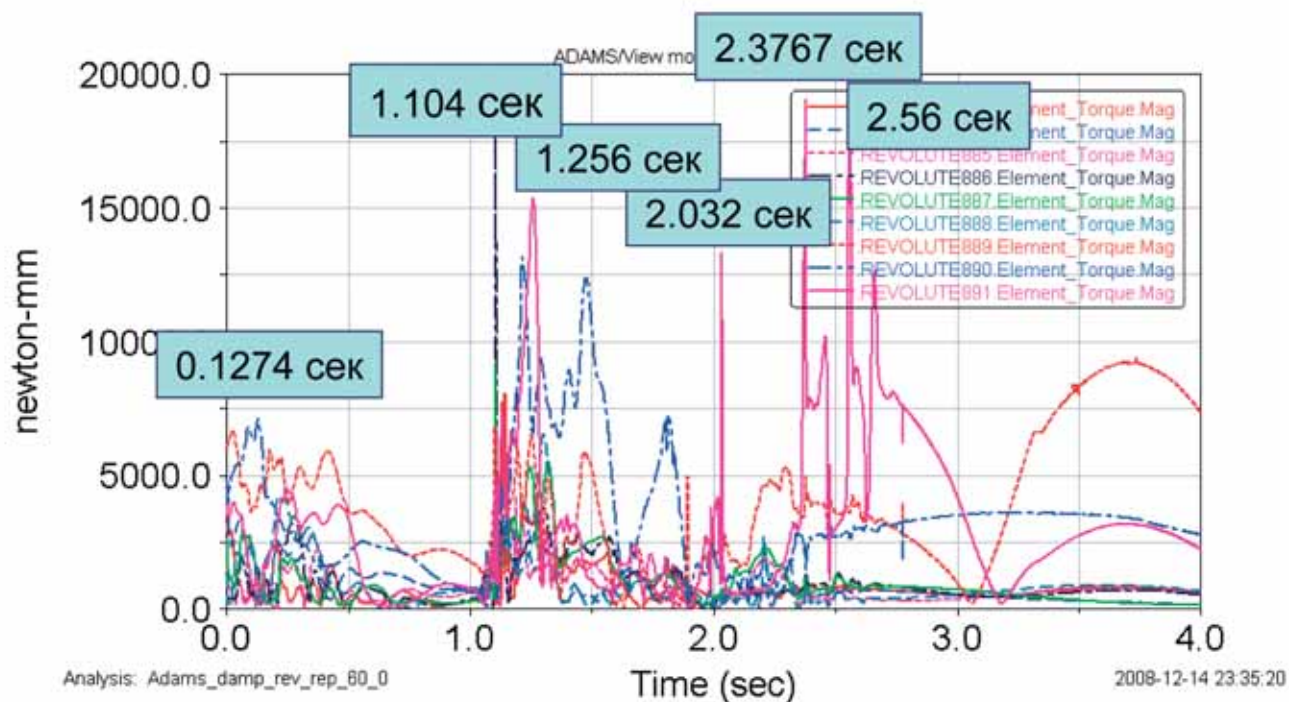


Рис. 14. Моменты, действующие со стороны шарниров на центральный корпус

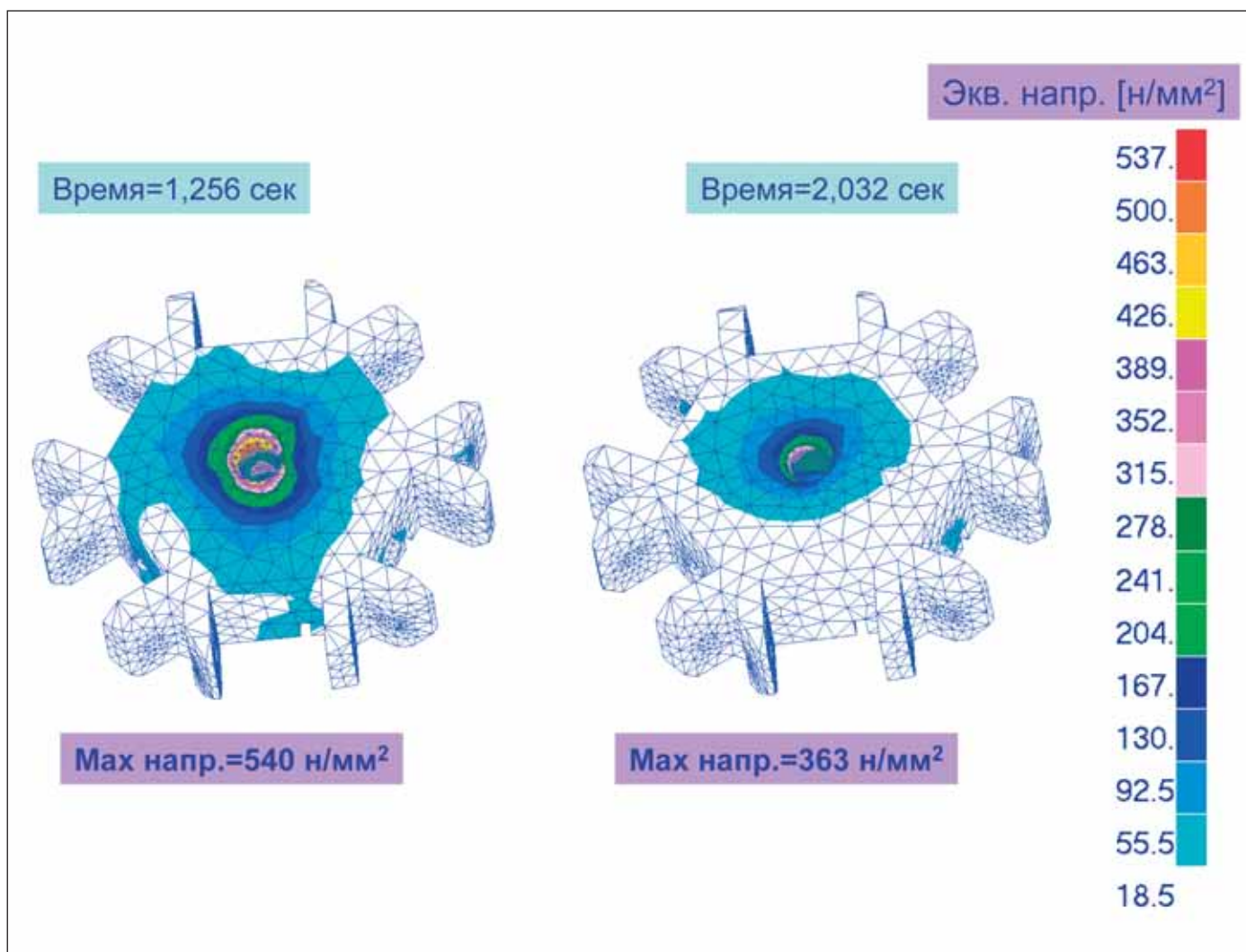


Рис. 15. Центральный корпус. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) для моментов времени 1,256 с, 2,032 с

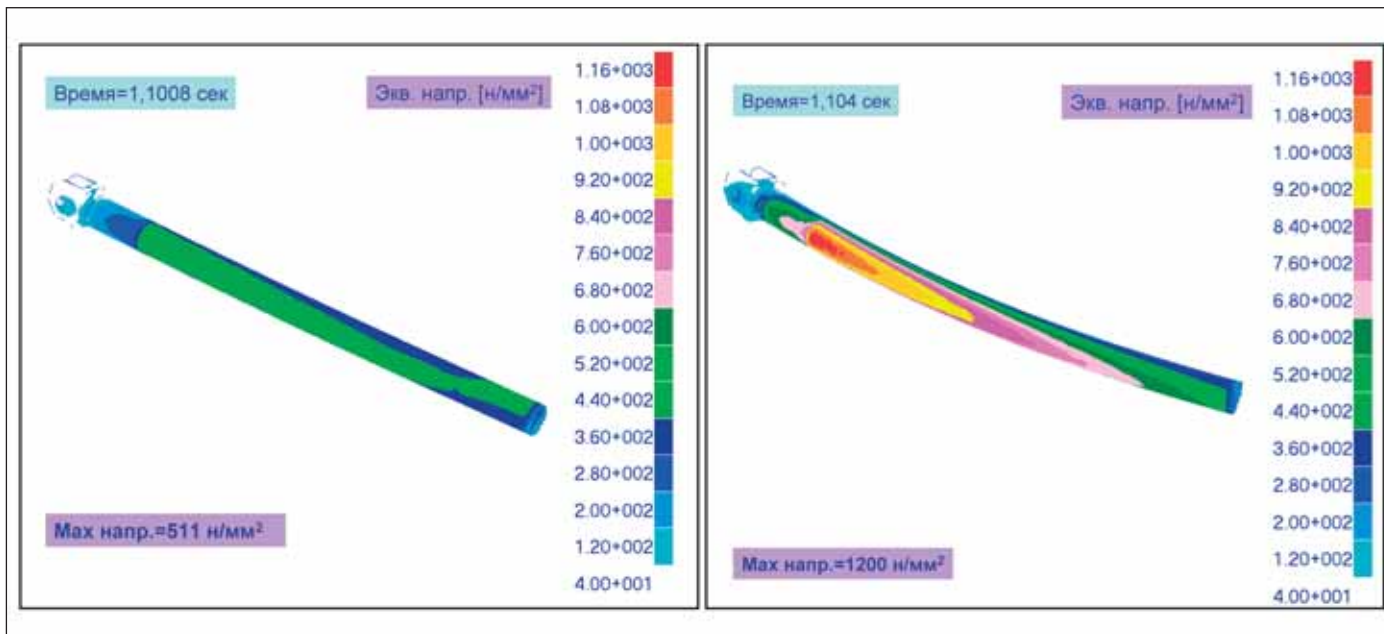


Рис. 16. Петля крепления и трубчатый стержень. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) для моментов времени 1,1008 с и 1,104 с

элементов на всех стадиях функционирования.

Анализ силовых факторов в элементах конструкции удобно проводить, используя возможности постпроцессора Adams.

На одном графике можно совместить одновременно несколько кривых, соответствующих тому или иному кинематическому или силовому фактору, и, таким образом, интегрально оценить диапазоны изменения интересующих величин. На рис. 13-14 показаны графики реакций со стороны шарниров, действующих на центральный корпус конструкции, закрепленный неподвижно в пространстве, и отмечены моменты времени, когда силы и моменты получают экстремальные значения.

Нагрузки, соответствующие выбранным моментам времени, используются для расчета НДС элемента конструкции. Подготовка конечно-элементной модели проводилась в системе Patran, а в качестве решателя использовался MSC Nastran.

На рис. 15 представлен ряд результатов — эквивалентные напряжения в центральном корпусе антенны (для двух моментов времени).

Аналогичные результаты получены для стержневых элементов (рис. 16).

Результаты расчета полей напряжений и деформаций позволяют оценить прочность элементов конструкции при экстремальных нагрузках и в случае необходимости внести соответствующие конструктивные изменения.

Таким образом, в рамках решения задачи по моделированию динамики раскрытия антенного устройства, отработана ме-

тодика, пригодная для решения целого класса задач, связанных с проектированием крупногабаритных космических конструкций, разворачиваемых непосредственно на орбите.

Проверена и подтверждена возможность одновременно оперировать тысячами кинематических связей, упругих элементов и контактов в рамках одной конструкции.

Особый интерес представляют возможность применения САД-модели с наложенными связями и ограничениями (шарниры, пружины, контакт и т.п.) и прямой экспорт модели в систему Adams. Это обеспечивает информационную преемственность и информационную неразрывность процесса проектирования и поверочных расчетов.

Использование инженерных систем одного разработчика (MSC Software Corporation) также увеличивает эффективность расчетного процесса, поскольку обмен данными между программными комплексами в этом случае максимально облегчен.

Вместе с тем необходимо отметить, что для уточнения и верификации расчетной модели следует проводить измерительные и испытательные работы как для отдельного конструктивного элемента антенной системы, так и для всей конструкции в целом.

Проведенная работа дает основания полагать, что применение численных методов моделирования раскрывающихся конструкций на основе отработанных и проверенных (путем натурных экспериментов) моделей, позволит существенно ускорить процесс разработки изделий и снизить материальные затраты.

Научный центр прикладной электродинамики
Сергей Щесняк
д.т.н., профессор
Тел.: 8 (921) 993-6551
E-mail: sergey@scaegroup.com

ФГУП "КБ "Арсенал"
Андрей Романов
к.т.н.,
главный конструктор направления
ракетно-космической техники
Тел.: (812) 542-2252
E-mail: kbarsenal@peterlink.ru

ЗАО "СиСофт"
Игорь Хитров,
ведущий специалист отдела
производственного инжиниринга

Сергей Девятков,
главный специалист отдела САПР
и инженерного анализа
Тел.: (495) 913-2222
E-mail: khitrov@csoft.ru
devyatov@csoft.ru

ООО "Эм-Эс-Си Софтвэр РУС"
(подразделение MSC Software Corporation в
России и СНГ)
Сергей Сергиевский
к.т.н.,
руководитель отдела по развитию бизнеса

Александр Георгиев,
технический эксперт
Тел.: (495) 363-0683
E-mail: sergey.sergievskiy@mscsoftware.com
alexander.georgiev@mscsoftware.com