

Моделирование крупногабаритных динамических конструкций

Е.И. Артамонов, А.И. Разумовский, В.А. Ромакин, А.Г. Чернявский, А.А. Чернявский

Аннотация. Рассмотрен метод организации математических компьютерных моделей крупногабаритных динамических конструкций. Сформулированы проблемы, и показана возможность создания обобщенной взаимосвязанной модели (ОВМ), включающей структурную объемную геометрическую модель, функциональную, конструкторскую и расчетные модели. На примере проектирования Большого космического рефлектора (БКР) показан принцип формирования ОВМ.

Математические модели на этапах жизненного цикла крупногабаритных динамических конструкций (КДК)

В CALS-технологиях [1] математические модели конструкций используются на всех этапах их жизненного цикла (ЖЦ) и являются основой для создания обобщенной взаимосвязанной модели (ОВМ), отражающей все аспекты конструкции, которые могут потребоваться на каждом из этапов.

На примере моделирования крупногабаритных динамических конструкций рассмотрим основные проблемы, возникающие при создании ОВМ, и, в частности, структуры данных ОВМ. Заметим, что CALS-стандарты не регламентируют структуры данных ОВМ. Для динамических конструкций, в отличие от статических, характерно изменение их конфигурации в процессе эксплуатации, а это на этапе структурного проектирования приводит к необходимости создания параметрических геометрических моделей, что существенно усложняет процесс формирования ОВМ.

На Рис.1 приведен перечень некоторых начальных этапов ЖЦ КДК, и указан набор моделей, используемых на этих этапах. Среди этапов выделены: разработка технического задания (ТЗ) на КДК, структурное и конструкторское проектирование, функциональное мо-

делирование, проведение прочностных, тепловых и динамических расчетов, разработка документации для технологической подготовки производства и изготовления КДК.

На этапе структурного проектирования формируется структурная объемная геометрическая модель (СОГМ), содержащая параметрическое описание геометрических размеров отдельных элементов и всей конструкции в целом, а также описание взаимосвязей между элементами, достаточных для моделирования особенностей функционирования КДК.

На этапе конструкторского проектирования создается объемная геометрическая конструкторская модель (ОГМ) на основе предварительно разработанных 3D-моделей отдельных элементов конструкции. ОГМ отличается от СОГМ фиксированными значениями всех параметров и большей степенью детализации описаний отдельных элементов, достаточных для изготовления конструкции с заданной точностью. На этом этапе формируется конструкторская документация в виде 2D- и 3D-моделей, необходимых на последующих этапах ЖЦ.

На этапах функционального моделирования, проведения прочностных, тепловых и динамических расчетов создаются соответственно функциональная (ФМ), прочностная (ПМ), тепловая (ТМ), динамическая (ДМ) модели.

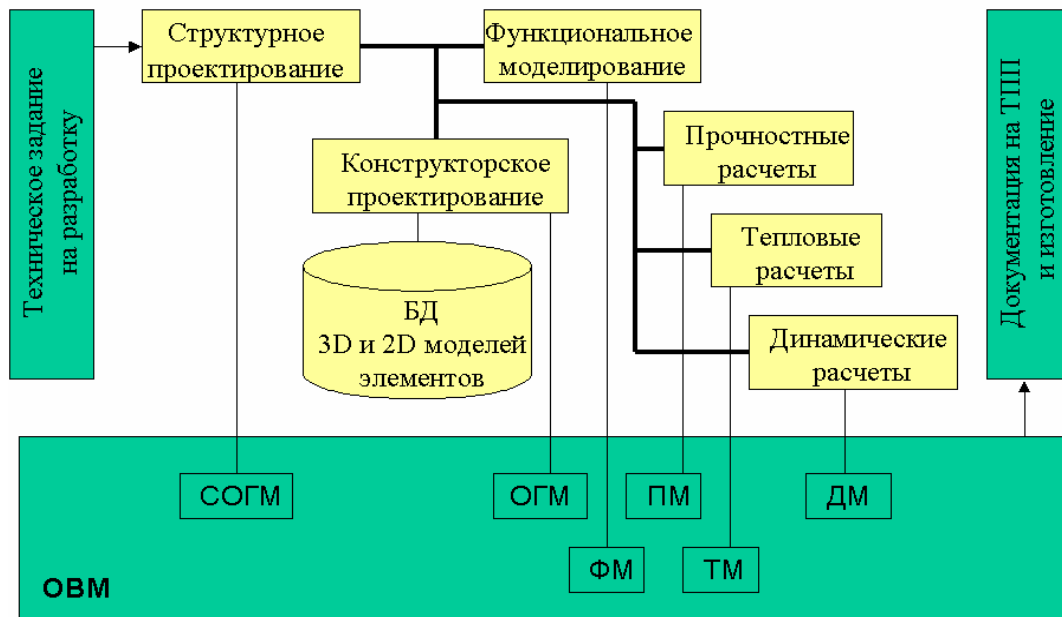


Рис.1

ФМ описывает алгоритмы функционирования динамических конструкций, а также при необходимости и алгоритмы функционирования датчиков, исполнительных механизмов, электрических приборов, расположенных на элементах конструкции. Для создания ФМ используются универсальные либо специализированные языки описания моделей и протекающих в них процессов.

Связь между этапами по информации на основе обобщенной взаимосвязанной модели (ОВМ) на Рис.1 показана толстыми линиями. Отсутствие направления передачи информации на линиях показывает итерационность процесса проектирования, т.е. возможность возврата информации с последующих этапов на предыдущие. Следует заметить, что описания ОГМ, ПМ, ТМ, ДМ и их форматы данных полностью зависят от используемых на этих этапах систем проектирования и систем проведения соответствующих расчетов. Например, на этапе функционального моделирования используются универсальные языки программирования либо специализированные типа VHDL-AMS [2], на этапе конструкторского проектирования – системы Компас 3D, ADEM, AutoCAD, CATIA, SolidWorks и др., на этапе прочностных и тепловых расчетов – NASTRAN, АСОНИКА [3] и т.п. Поэтому при создании ОВМ необходимо

согласование различных форматов, что в настоящее время решается путем создания преобразователей форматов [4], а также использованием стандартных форматов, например, IDF, PDF, IGES, STEP [5].

Таким образом, обобщенная взаимосвязанная модель (ОВМ) конструкции для всех этапов ее жизненного цикла представляет собой набор математических моделей, непосредственно связанных унифицированными структурами данных для передачи информации между моделями. Далее на примере проектирования Большого космического рефлектора (БКР) покажем принцип формирования структурной объемной геометрической (СОГМ), функциональной (ФМ) и обобщенной (ОВМ) моделей, а также способы их программной реализации.

Особенности механизма развертывания Большого космического рефлектора (БКР)

Моделируемая часть БКР представляет собой достаточно сложный механизм автоматического развертывания на орбите специального сеполопота, отражающего направленные на него радиосигналы к приемнику, расположенному в заданных координатах на местности. Основными узлами этого механизма являются

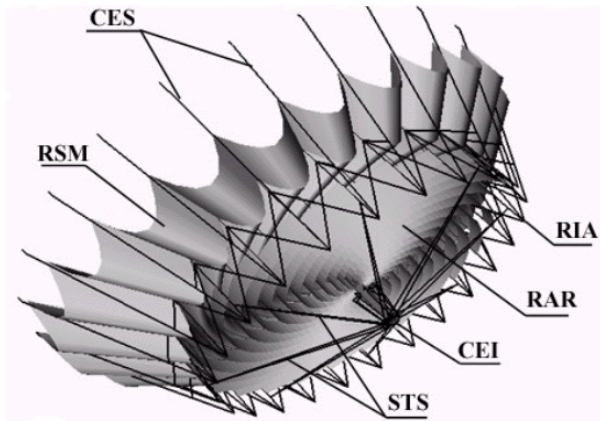


Рис. 2

(Рис.2): центральный узел (CEI), система радиальных лепестков (RAR), силовое кольцо (RIA), отражающая поверхность (RSM) и система жесткости (STS). Система радиальных лепестков, удерживающая отражающую поверхность, с одной стороны закрепляется на центральном узле, с другой (внешние концы лепестков) закрепляются за силовое кольцо, выполненное в виде пантографа. В сложенном состоянии лепестки закручены вокруг центрального узла, внутренний диаметр силового кольца принимает минимальный размер (диагонали пантографа вытянуты вдоль центрального узла). Отражающая поверхность удерживается в сложенном состоянии специальными консолями, закрепленными на силовом кольце. При этом весь механизм разворачивания принимает цилиндрическую форму.

Процесс разворачивания включает следующие основные этапы: самопроизвольное разворачивание за счет упругих сил деформированных лепестков; срабатывание электрических двигателей, поворачивающих диагонали пантографа и, тем самым, увеличивающих диаметр силового кольца; срабатывание системы жесткости и отключение двигателей.

Структура обобщенной взаимосвязанной модели (ОВМ)

На Рис.3 показана структура ОВМ, содержащая различные модели основных узлов механизма разворачивания БКР. Модели ФМ, СОГМ, ОГМ, ПМ, ТМ, ДМ представлены отдельными слоями для каждого узла БКР. Основные параметры на входах и выходах функциональных моделей узлов указаны на связях между узлами. При этом приняты следующие обозначения:

- r_0 – радиус центрального узла CEI,
- h_0 – высота CEI,
- s_0 – длина стойки CEI,
- T_0 – точка крепления сетеполотна на CEI,
- L_1 – длина лепестка,
- Φ – угол поворота силового кольца,
- $\{s_{ij}\}$ – множество длин стоек на лепестках,
- R – радиус силового кольца,
- $\{TR\}$ – множество точек крепления сетеполотна на стойках лепестков,
- L_2 – длина рычага силового кольца,
- H – высота силового кольца,

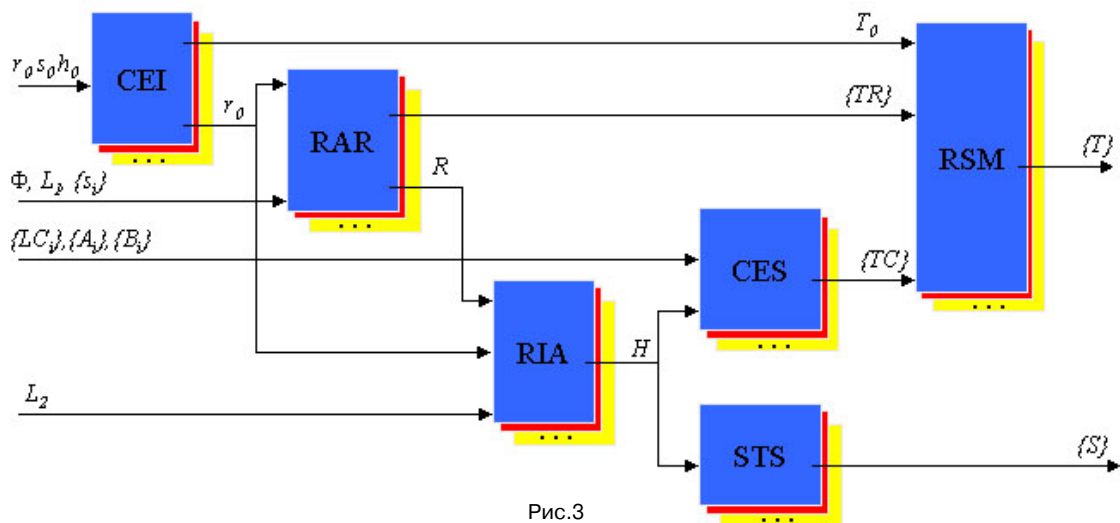


Рис.3

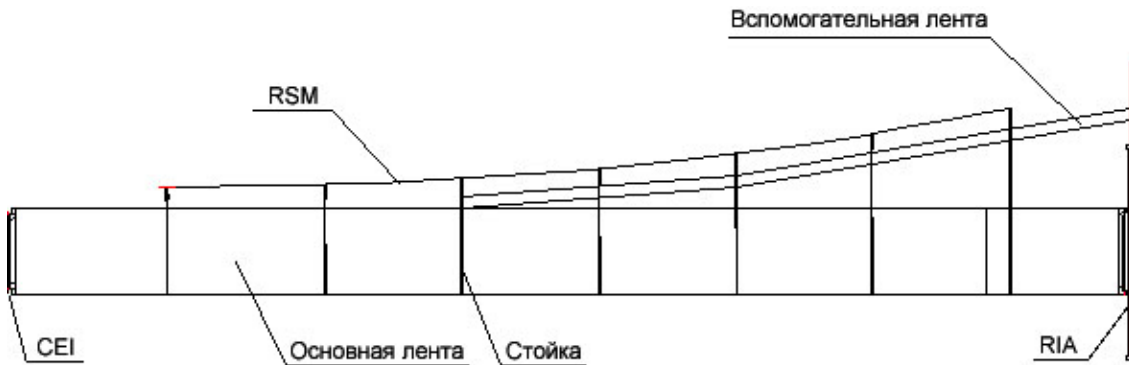


Рис 4. Конструкция лепестка

$\{LC_i\}$ – множество длин консолей,
 $\{TC\}$ – множество точек крепления сетеполотна на консолях,
 $\{T\}$ – множество точек провисания сетеполотна.

Далее рассмотрим примеры описания функциональной (ФМ) и структурной объемной геометрической моделей (СОГМ) для системы радиальных лепестков (RAR).

Функциональная модель RAR

Радиальные лепестки в количестве 24 штук предназначены для установки элементов крепления отражающей поверхности и поддержания заданной конфигурации поверхности. Каждый лепесток состоит из основной ленты прямоугольной формы, 8-ми стержневых стоек с узлами крепления отражающей поверхности и дополнительной ленты, соединяющей стойки между собой в непосредственной близости от узлов крепления. С одной стороны ленты лепестков крепятся за центральный узел, а с другой — за стойки силового кольца (Рис. 4).

В свернутом состоянии БКР ленты лепестков намотаны на центральный узел. В процессе разворачивания рефлектора они постепенно распрямляются и в развернутом состоянии становятся полностью прямыми.

В развернутом состоянии рефлектора основная лента лепестка аппроксимируется прямоугольником, а в свернутом и промежуточных состояниях рефлектора — Архимедовой спиралью (Рис. 5). Спираль в полярных координатах (r, φ) описывается следующей формулой:

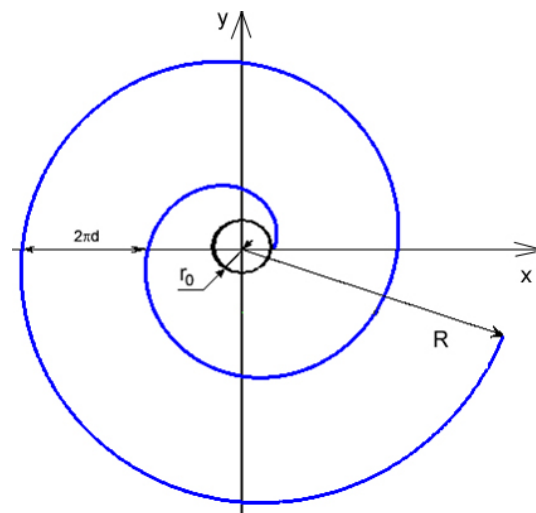


Рис. 5. Архимедова спираль

$$r(\varphi) = d\varphi + r_0, \quad (1)$$

где $d=d(t)$ – расстояние между соседними витками спирали в момент времени t , деленное на 2π ,

r_0 – радиус центрального узла,

$0 \leq \varphi \leq \Phi$, $\Phi=\Phi(t)$ – угол поворота силового кольца в момент времени t ,

$r_0 \leq r \leq R$, $R=R(t)$ – радиус силового кольца в момент времени t .

Заметим, что угол Φ известен из предварительных расчетов, поэтому неизвестными являются параметры d и R . Чтобы найти их, запишем уравнение для длины спирали L_S :

$$L_S = \int_0^{\Phi} \sqrt{r^2 + (r')^2} d\varphi = \frac{1}{d} \int_{r_0}^R \sqrt{r^2 + d^2} dr.$$

Далее воспользуемся табличным интегралом

$$\int \sqrt{x^2 + a^2} dx = \frac{x\sqrt{x^2 + a^2} + a^2 \ln|x + \sqrt{x^2 + a^2}|}{2},$$

откуда

$$L_S = \frac{r\sqrt{r^2 + d^2} + d^2 \ln(r + \sqrt{r^2 + d^2})}{2d} \Big|_{r_0}^R = \frac{(d\varphi + r_0)\sqrt{(d\varphi + r_0)^2 + d^2} + d^2 \ln((d\varphi + r_0) + \sqrt{(d\varphi + r_0)^2 + d^2})}{2d} \Big|_{\varphi=0}^{\varphi=\Phi} = L_S(\Phi, d)$$

Учитывая, что длина спирали L_S равна длине основной ленты лепестка L_R , получаем следующее уравнение:

$$L_S(\Phi, d) - L_R = 0 \quad (2)$$

Решая уравнение (2) численным методом, находим приближенное значение параметра d . Радиус силового кольца R вычисляется по формуле:

$$R = r(\Phi) = d\Phi + r_0.$$

Структурная объемная геометрическая модель RAR

Обозначим основные параметры:

L_R – длина основной ленты лепестка;

H_R – высота основной ленты лепестка;

S_{ij} – высота j -й стойки i -го лепестка, $0 \leq i < 24$, $0 \leq j < 8$;

D_j – линейная координата j -й стойки на лепестке.

Лента каждого лепестка разбивается на $M = 8 * N + 1$ прямоугольных частей, где N – число разбиений между двумя соседними стойками. Разбиение осуществляется так, чтобы длины всех частей между двумя соседними стойками были равны

$$l_{j+i} = (D_j - D_{j-1}) / N,$$

где $0 \leq j < 8$, $0 \leq i < N$.

Запишем формулы для декартовых координат k -й точки разбиения первого лепестка (x_{0k}, y_{0k}) , используя формулу спирали (1):

$$\begin{aligned} x_{0k} &= r_k \cos \varphi_k = (d\varphi_k + r_0) \cos \varphi_k \\ y_{0k} &= r_k \sin \varphi_k = (d\varphi_k + r_0) \sin \varphi_k \end{aligned}$$

где $0 \leq k < M$.

Для нахождения угла φ_k воспользуемся уравнением (2), для угла φ_k и длины спирали

$$L_k = \sum_{p=0}^k l_p :$$

$$L_S(\varphi_k, d) - L_k = 0 \quad (3)$$

Решая уравнение (3) численным методом относительно φ_k , находим приближенное значение параметра φ_k , и затем координаты (x_{0k}, y_{0k}) .

Декартовы координаты k -й точки разбиения i -го лепестка (x_{ik}, y_{ik}) , где $1 \leq i < 24$, находятся с помощью поворота точки (x_{0k}, y_{0k}) на угол $i\pi/12$ вокруг оси Z . Координаты точек крепления сетеполотна на стойках вычисляются по формуле:

$$T_{ij} = x_{i(j*N+N)} + S_{ij},$$

где $0 \leq i < 24$, $0 \leq j < 8$.

СОГМ каждого узла БКР содержит описание процесса их визуализации. Например, описание визуализации RAR, представленное в кодах реализации на Open GL выглядит следующим образом:

```
glBegin(GL_QUADS);
for(int i = 0; i < CORE_N - 1; i++)
{
    CalcVectorNormal(bottom[i].v, top[i].v, top[i+1].v, norm.v);
    norm.Normalize();
    glNormal3dv(norm.v);
    glVertex3dv(bottom[i].v);
    glVertex3dv(top[i].v);
    glVertex3dv(top[i + 1].v);
    glVertex3dv(bottom[i + 1].v);
}
glEnd();

for(int j=0; j < 8; j++)
    if(strut[j].fDraw) strut[j].Draw();
```

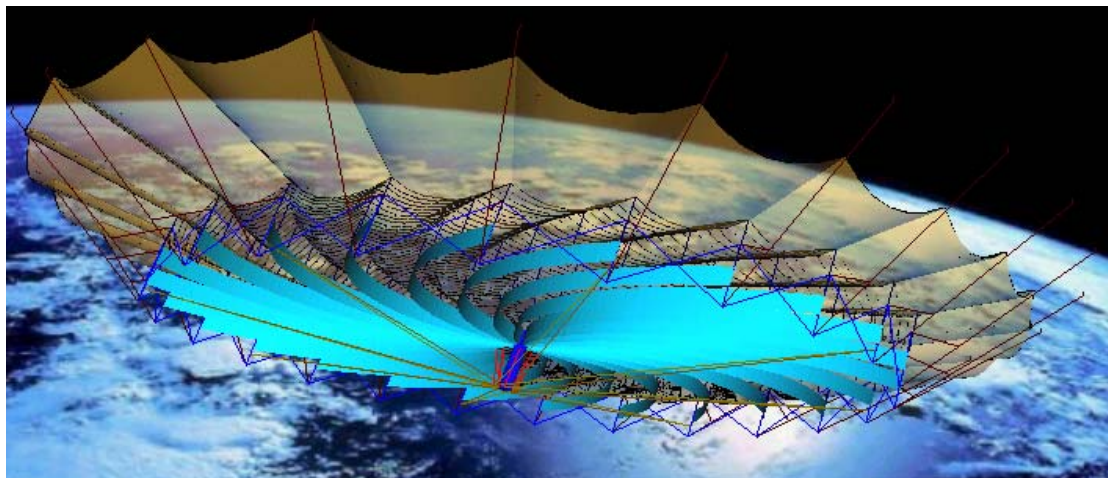


Рис.6

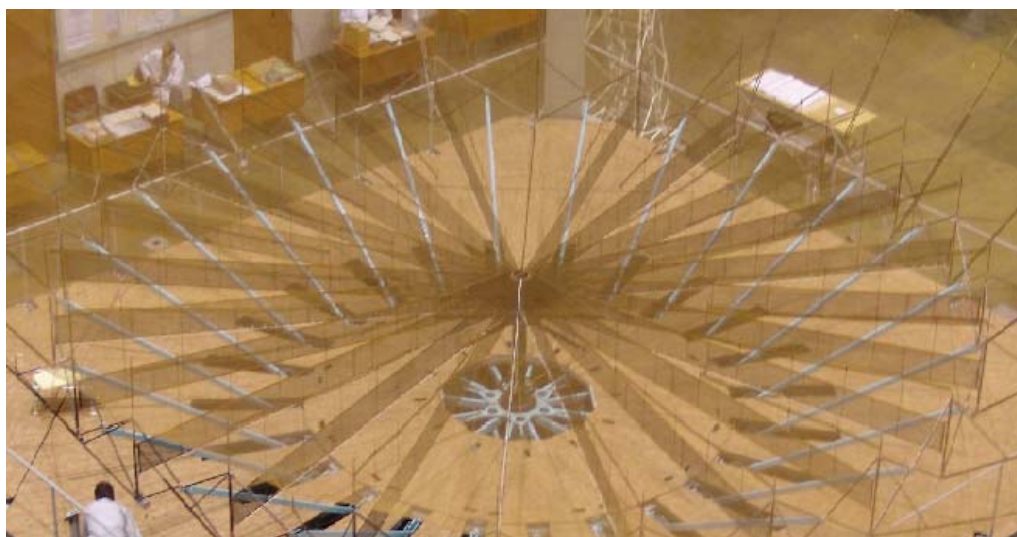


Рис.7

Визуализация общего вида СОГМ БКР представлена на Рис.6. По результатам проведенных исследований механизма разворачивания БКР разработан опытный образец (Рис.7).

Литература

1. Норенков И.П. CALS-стандарты. // Информационные технологии: Науч.-техн. Журн. – 2002. - № 2 – С. 47-51.
2. Analog and Mixed-Signal Modeling Using the VHDL-AMS Language. – New Orleans, 1999.
3. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования: Монография/ В.В.Гольдин, В.Г.Журавский, В.И.Коваленок и др.; под ред. А.В. Сарафанова. – М.: Радио и связь, 2003. – 456 с.
4. Артамонов Е.И. Проектирование структур программных средств CAD/CAM систем. Автоматизация проектирования, N2 ,1997 г.
5. STEP Product Data Representation and Exchange. ISO CD 10303-42. 1994.