

УДК 539.3:621.396.67

А.С. Евдокимов, С.В. Пономарев, Ю.И. Буянов

СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ КОСМИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ

Рассматривается методика компьютерного моделирования трансформируемых параболических рефлекторов антенн космических аппаратов, позволяющая с необходимой точностью произвести расчет равновесной формы отражающей поверхности, учесть влияние напряженного состояния на электродинамические характеристики сетеполотна и диаграмму направленности.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, рефлектор, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, диаграмма направленности.

В настоящее время антенные системы широко используются в различных областях науки и техники. Для современной спутниковой связи требуются антенны с высокой точностью формы зеркала. Экспериментальная отработка таких изделий в наземных условиях требует больших материальных и временных затрат. Поэтому разработка компьютерного моделирования антенных конструкций является актуальным направлением.

В работе М.В. Гряника и В.И. Ломана [1] были рассмотрены классификация развертываемых антенн и вопросы расчета характеристик излучения зеркальных антенн зонтичного типа. Г. Тибертом [2] разработаны варианты конструкции крупногабаритных космических рефлекторов. Методы моделирования напряженно-деформированного состояния мембранных конструкций, в том числе и рефлекторов ободного и зонтичного типов, рассмотрены в [3, 4], а также в ряде других зарубежных публикаций. Однако в доступных публикациях не рассматривалось влияние напряженного состояния отражающей поверхности из металлического сетеполотна на электродинамические характеристики зеркальных антенн.

Рассматривается параболический рефлектор зонтичного типа (рис. 1) диаметром 4 метра. Силовая схема представляет собой конструкцию, состоящую из силовых и точностных спиц.

Моделирование конструкции производилось с позиций механики деформируемого твердого тела. При этом отражающая поверхность моделировалась безмоментными оболочечными элементами. В общем случае математическая модель может быть описана следующим образом:

Связь деформаций с перемещениями в элементах конструкции рефлектора рассматривается в виде

$$e_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha} + u_{\theta,\alpha}u_{\theta,\beta}).$$

Для моделирования механического поведения в напряженном состоянии, которое возникает в раскрытом рефлекторе, можно использовать упрощенные зависимости между напряжениями и деформациями.

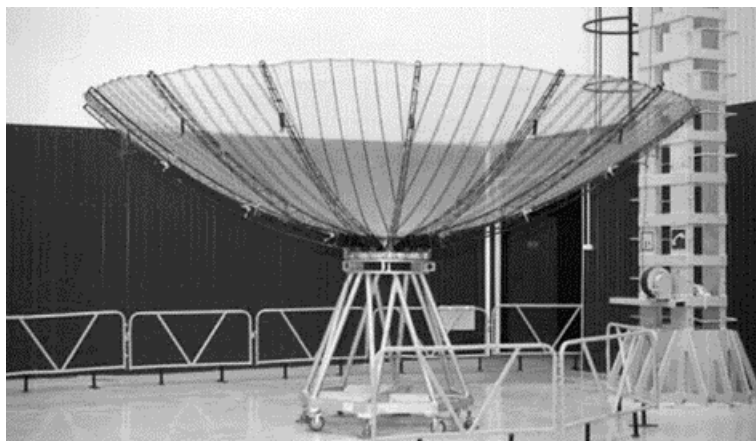


Рис. 1. Рефлектор для спутника «Луч»

Компоненты тензора напряжений Кирхгофа и компоненты тензора деформаций связаны зависимостью

$$\sigma^{ij} = a^{ij\alpha\beta} (e_{\alpha\beta} - e_{\alpha\beta}^T),$$

где $a^{ijkl} = a^{ijkl}(X, \sigma^{(0)ij})$ – элементы матрицы упругости, зависящие от принадлежности к разнородным элементам конструкции и уровня предварительных напряжений; $e_{\alpha\beta}^T = \vartheta \Delta T \delta_{\alpha\beta}$ – компоненты тензора температурных деформаций; ϑ – коэффициент линейного расширения; $\Delta T = T - T_0$.

Уравнения равновесия для зонтичной конструкции рассматриваются в виде

$$\left[(\delta_{ij} + u_{i,j}) (\sigma^{\theta j} + \sigma^{(0)\theta j}) \right]_{,\theta} + P_i = \rho \ddot{u}_i,$$

где P_i – компоненты вектора массовых сил; ρ – удельная масса материала; $\ddot{u}_i$ – компонента ускорения; $\sigma^{(0)ij}$ – компоненты тензора начальных напряжений в элементах конструкции. Задание требуемых напряжений в элементах вантовой конструкции необходимо для создания жесткости, обеспечивающей с достаточной точностью форму отражающей поверхности рефлектора. При этом важно, чтобы форма ответственных элементов напряженной вантовой конструкции мало отличалась от проектной для реализации требуемых радиотехнических характеристик антенны.

Добавление начальных и граничных условий делает постановку задачи с позиций механики деформируемого твердого тела полной. В результате такой постановки получается нелинейная задача. Граничные условия в перемещениях задаются на части поверхности S_u конструкции рефлектора, где имеет место крепление к космическому аппарату

$$u^i = \bar{u}^i,$$

на большей части поверхности конструкции S_σ , свободной от нагрузок:

$$\sigma^{\theta j} n_j + \sigma^{(0)kj} n_k u_j^\theta = 0.$$

Начальные условия

$$u_i(X, 0) = \bar{u}_i(0); \dot{u}_i(X, 0) = \bar{\dot{u}}_i(0).$$

Таким образом, задача считается поставленной в замкнутой форме, так как количество определяемых функций перемещений соответствует количеству разрешающих уравнений.

В приведенной постановке исходным состоянием является конфигурация рефлектора, вытекающая из технического задания с нулевыми напряжениями в элементах конструкции. После задания требуемых напряжений в элементах конструкции получается напряженная начальная конфигурация, находящаяся в состоянии статического равновесия с требуемой жесткостью, обеспечивающей с достаточной точностью проектируемую форму отражающей поверхности рефлектора.

Приведенной дифференциальной постановке соответствует эквивалентная вариационная постановка в виде принципа виртуальной работы [5]

$$\int_V \left\{ \left(\sigma^{(0)ij} + a^{ij\alpha\beta} (e_{\alpha\beta} - e_{\alpha\beta}^T) \right) \delta e_{ij} - \bar{P} \cdot \delta r + \rho \left(\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \right) \cdot \delta r \right\} dV = 0,$$

где δr – вариация вектора перемещений; $\mathbf{P}$ – вектор массовых сил, t – время. На части поверхности S_u заданы нулевые перемещения, что соответствует закреплению конструкции. Аналитическое решение подобных задач не представляется возможным.

Определение основных радиотехнических характеристик антенн связано с получением выражения для электромагнитного поля в дальней зоне, когда источниками поля являются заданные сторонние токи j на отражающей поверхности рефлектора. Система уравнений Максвелла имеет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= -i\omega\epsilon\mathbf{E} + j, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= i\omega\mu\mathbf{H}. \end{aligned}$$

Токовый метод определения направленных свойств антенны базируется на известном распределении поверхностных токов на внутренней поверхности зеркала. Вектор плотности тока с учетом коэффициента отражения в данной точке поверхности зеркала можно определить с учетом ориентации векторов $\mathbf{H}$ в падающей и отраженной волнах по формуле

$$\mathbf{j}_s = 2[\mathbf{n}_0 \mathbf{H}] R(\sigma),$$

где $\mathbf{j}_s$ – вектор плотности поверхностного тока в данной точке зеркала; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля, создаваемого падающей волной облучателя в данной точке на поверхности зеркала; $\mathbf{n}_0$ – орт нормали к поверхности зеркала в этой же точке; $R(\sigma)$ – коэффициент отражения, зависящий в основном от размера ячейки сетеполотна и отношения размера ячейки к диаметру нити при одинаковой величине натяжении σ вдоль рядов и вдоль столбцов структуры плетения сетеполотна.

Напряженность первичного магнитного поля облучателя определяется формулой

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} \frac{e^{-i\beta r}}{r},$$

где $\mathbf{B}$ – коэффициент, не зависящий от r и характеризующий направленные свойства облучателя; r – расстояние от фазового центра облучателя до точки, в которой определяется поле. Для построения картины токов, возникающих на отражающей поверхности рефлектора под влиянием поля облучателя, необходимо знать распределение вектора $\mathbf{B}$ в пространстве, то есть векторную диаграмму направленности (ДН) облучателя.

Зная распределение тока на поверхности зеркала, можно определить направленные свойства параболической антенны. Для этого необходимо проинтегрировать по всей поверхности зеркала выражение для напряженности поля, создаваемого элементом поверхности зеркала, рассматривая его как элементарный электрический вибратор.

Поле излучения параболоида можно представить в виде

$$E = -\frac{iZ_b \sin \gamma_x}{2r\lambda} e^{-i\beta r} \int_{S_a} j_{sx} e^{-iq} dS,$$

где S_a – поверхность параболоида, используемая в качестве антенны; E – напряженность поля, созданного токами основной поляризации. Угол q – определяется относительно луча, идущего прямо от облучателя до точки приема.

Для получения численного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии рефлектора использовался метод конечных элементов [6]. Алгоритм решения реализован на внутреннем языке программирования пакета ANSYS. Использование программного комплекса ANSYS является эффективным способом оценки прочности, прогнозирования и оптимизации конструкций. Конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции строилась исходя из следующих принципов:

- сетеполотно моделируется оболочечными мембранными элементами;
- веревочные элементы (шпангоут, оттяжки) моделируются линейными элементами, работающими только на растяжение;
- спицы (силовые, точностные) моделируются балочными элементами с заданным сечением.

Общий вид КЭМ (без сетеполотна) показан на рис. 2.

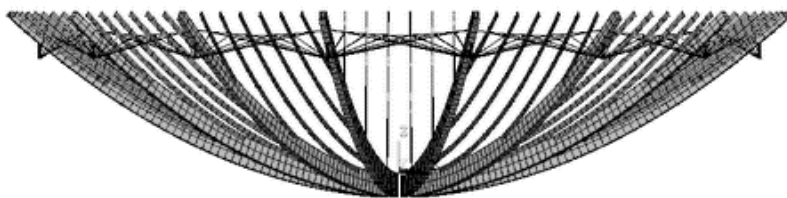


Рис. 2. Конечно-элементная модель рефлектора без сетеполотна

С использованием данной модели был проведен расчет напряженно-деформированного состояния рефлектора. Начальная форма спиц и отражающей поверхности задавалась в соответствии с формой теоретического параболоида. В точках, где силовые спицы крепятся к ступице, задаются следующие граничные условия: перемещения и вращения равны нулю. Шпангоут и оттяжки нагружались растягивающим усилием, равным 2 кгс и 0,1 – 0,2 кгс соответственно.

На рис. 3 представлены отклонения силовых спиц от параболического профиля. Эти отклонения обусловлены изгибающим моментом, который создается растянутым сетеполотном и натянутыми оттяжками. Максимальные отклонения достигают 0,7мм.

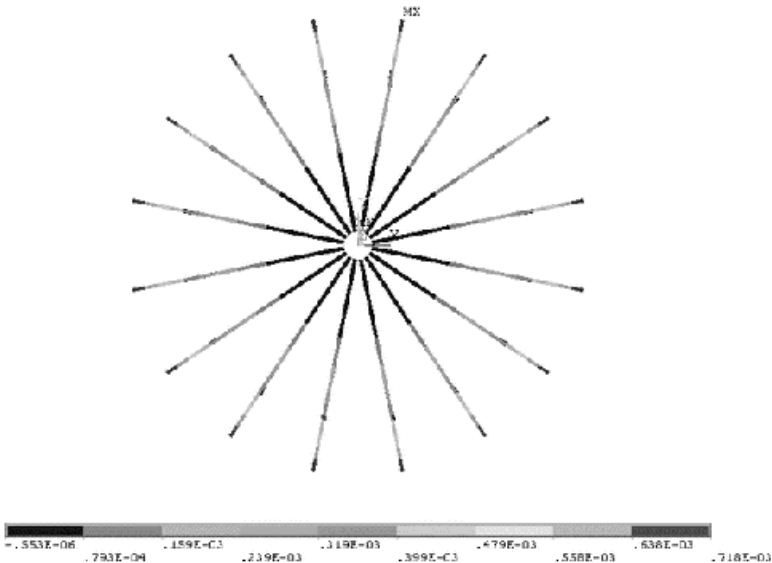


Рис. 3. Отклонения спиц по оси Z, м

На рис. 4 представлены перемещения отражающей поверхности. Максимальные перемещения, не считая периферии, достигают порядка 0,8 мм. Натяжение сетеполотна, за исключением края, соответствует номинальному (см. рис. 5). При этом среднеквадратичное отклонение (СКО) поверхности составило 0,56 мм.

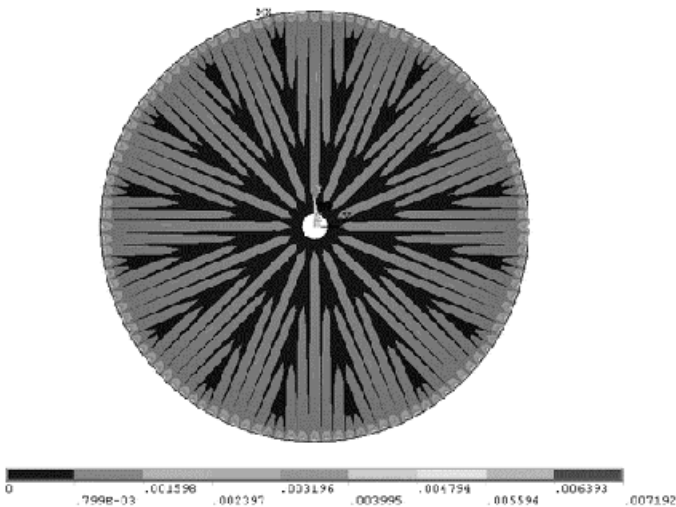


Рис. 4. Изолинии суммарных перемещений сетеполотна, м

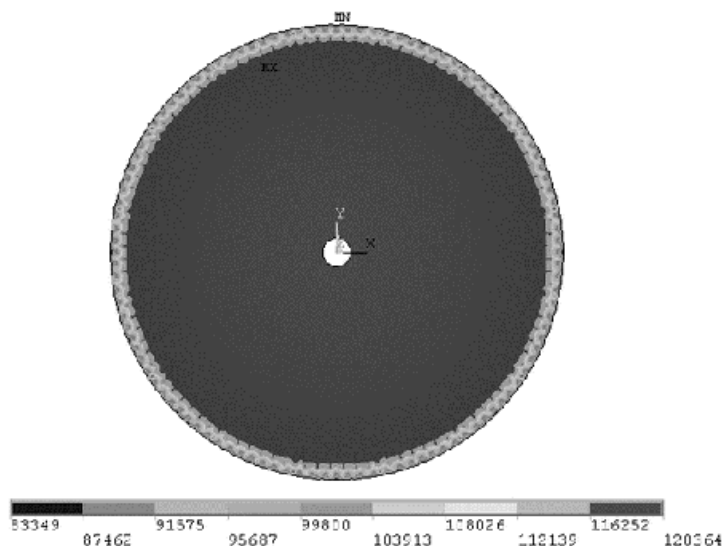


Рис. 5. Интенсивность напряжений, Па

Использование трикотажного металлического сетеполотна для отражающей поверхности трансформируемых космических антенн позволяет получить улучшенные удельные массовые характеристики для рефлекторов. Однако при этом появляется зависимость коэффициента отражения от напряженного состояния растянутого сетеполотна. Изменяется размер ячеек сетеполотна и профиль зеркала отклоняется от параболического, что приводит к изменению электродинамических характеристик зеркала: коэффициента отражения поля от поверхности сетеполотна и формы диаграммы направленности (ДН). Таким образом, возникает необходимость совместного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) и радиотехнических характеристик рефлектора.

Полученная в результате моделирования равновесная форма отражающей поверхности рефлектора использована для расчетов диаграмм направленности космического рефлектора методом физической оптики. Расчет проводился с помощью программного пакета для 3D-электромагнитного моделирования – FEKO. Главной особенностью программы FEKO является удачное сочетание базового метода моментов с приближенным аналитическим методом физической оптики. В рамках метода физической оптики ток приближенно вычисляется через магнитное поле падающей на объект волны. Именно его полагают равным удвоенному касательному магнитному полю падающей волны. Далее рассеянное поле вычисляется с помощью аппарата функций Грина через заданное распределение токов.

В качестве облучателя рефлектора использовался рупор, фазовый центр которого располагался в фокусе параболоида. При вычислении ДН рефлектора в программе FEKO ДН рупора вводилась в виде массива данных, полученных экспериментально. На рис. 6 и 7 представлены экспериментальная и расчетная диаграммы направленности рефлектора соответственно. Отклонения расчетной диаграммы направленности от экспериментальной диаграммы направленности составляет не более 10 %.

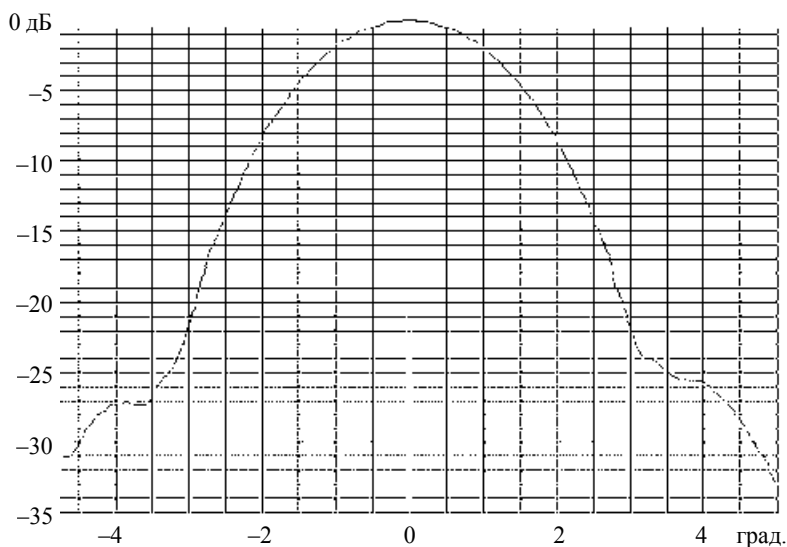


Рис. 6. Диаграмма направленности рефлектора (эксперимент.)

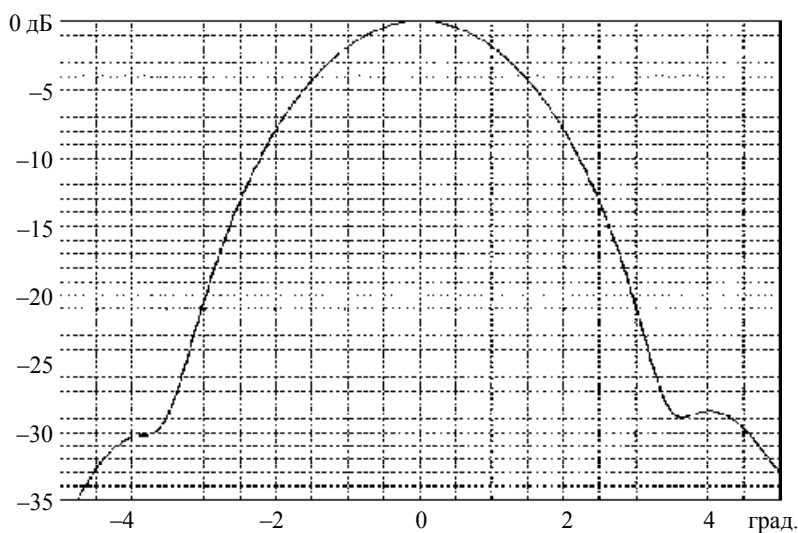


Рис. 7. Диаграмма направленности рефлектора (расчет в FEKO)

В настоящее время на телекоммуникационных спутниках широко используются многолучевые зеркальные антенны с вынесенной облучающей системой с разворачиваемым крупногабаритным рефлектором с диаметром более 10 м. Примером такого рефлектора является конструкция [7], показанная на рис. 8. Методика расчета напряженно-деформированного состояния для такого рефлектора рассмотрена в [4, 8].

Для рефлекторов большого диаметра измерение диаграммы направленности является очень трудоемким процессом. Поэтому рассматриваемая методика позволяет облегчить задачу определения электродинамических характеристик реф-

латоров большого диаметра. В качестве иллюстрации на рис. 9 представлены ДН рефлектора при различных значениях СКО, полученных расчетным путем для равновесной формы рефлектора.

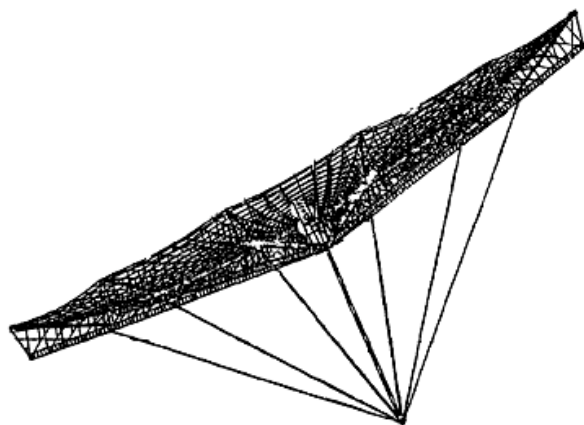


Рис. 8. Общий вид разворачиваемого рефлектора антенны космического аппарата

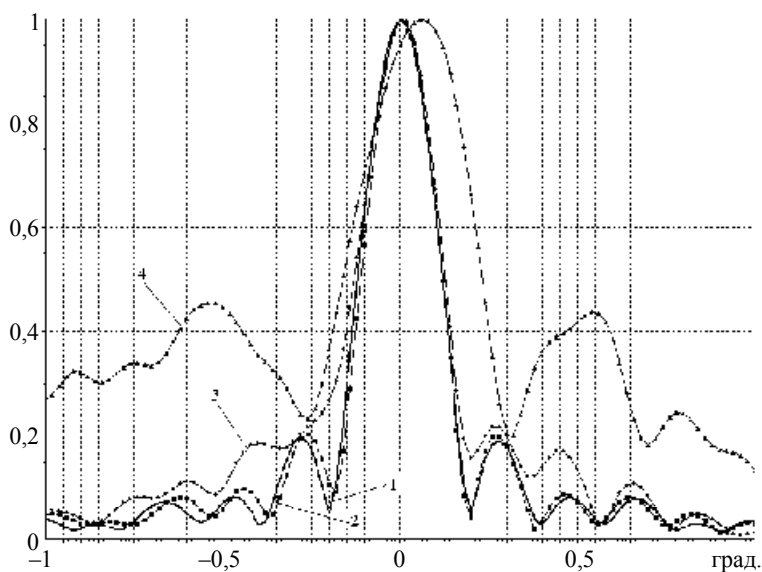


Рис. 9. Диаграмма направленности 12-метрового рефлектора, линейный масштаб: 1 – идеальный параболоид; 2 – СКО = 0,5 мм; 3 – СКО = 2,0 мм; 4 – СКО = 6,5 мм

В результате вычислений можно сделать вывод, что при увеличении СКО равновесной формы отражающей поверхности от параболической диаграмма направленности также увеличивает отличия от идеальной диаграммы 1. При этом возрастают боковые лепестки, смещается главный лепесток и падает коэффициент усиления антенны.

Полученные результаты показывают, что использование данной методики совместного компьютерного моделирования с позиций механики деформируемого твердого тела и электродинамики позволяет получить диаграммы направленности крупногабаритных рефлекторов без проведения технически сложных и затратных физических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М.: Радио и связь, 1987. 72 с.
2. Tibert G.A. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: PhD thesis. Stockholm, 2002. 220 p.
3. Усманов Д.Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого рефлектора: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2006. 179 с.
4. Бутов В.Г., Пономарев С.В., Солоненко В.А., Яцук А.А. Моделирование температурных деформаций рефлекторов космических аппаратов // Изв. вузов. Физика. 2004. № 10. С. 15–18.
5. Сахаров А.С., Альтенбах И. // Метод конечных элементов в механике твердых тел. Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. 480 с.
6. Зенкевич О., Победра Б.Е. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
7. Пат. 2350519 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/22, Н 01 Q 15/16. Развертываемый крупногабаритный рефлектор космического рефлектора / Тестоедов Н.А., Халиманович В.И. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева. № 2007122219/11; заявл. 13.06.2007; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. 19 с.:ил.
8. Бельков А.В., Бутов В.Г., Евдокимов А.С. и др. Компьютерное моделирование трансформируемых космических рефлекторов // Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. Серия: математика, механика, информатика. 2008. № 3(58). С. 284–293.

Статья принята в печать 01.02.2011 г.

Evdokimov A.S., Ponomarev S.V., Buyanov Yu.I. JOINT CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE AND ANTENNA PATTERNS OF SPACECRAFT REFLECTORS. The technique of computer modeling of transformable parabolic reflectors of spacecraft antennas is considered. The technique calculates the equilibrium form of the reflecting surface with necessary accuracy and takes into account the effect of the stress-strain state on electrodynamic characteristics of the mesh grid and on the antenna pattern.

Keywords: computer modeling, reflector, finite element method, stress-strain state, antenna pattern.

EVDOKIMOV Aleksandr Semenovich (Tomsk State University)

E-mail: eas1985@mail.ru

PONOMAREV Sergei Vasil'evich (Tomsk State University)

BUYANOV Yurii Innokent'evich (Tomsk State University)