

УДК 629.78.01

## ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА УСИЛЕНИЯ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

© 2013 К. В. Пересыпкин<sup>1</sup>, М. С. Кожиченкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», г. Самара

Решается задача корректировки динамических характеристик при перепроектировании размеростабильной конструкции космического аппарата. Эта корректировка выполняется с применением численной оптимизации. Моделирование поведения конструкции осуществляется методом конечных элементов.

*Метод конечных элементов, собственные колебания, проектирование, численная оптимизация.*

Важным направлением разработки космической техники является разработка космического аппарата (КА) наблюдения с высокоточной оптической аппаратурой. Высокая разрешающая способность может достигаться либо оптической системой с большим объективом и, следовательно, большими габаритами, либо сопряжением нескольких оптических систем меньших размеров. Второй подход часто позволяет снизить размеры и массу КА. При пропорциональном увеличении размеров оптической системы поперечная площадь входного светового потока возрастает пропорционально квадрату линейного размера, а объём и масса системы возрастают пропорционально кубу линейного размера. Увеличение площади входного светового потока в два раза приведёт к увеличению массы в 2,83 раза. При использовании двух оптических систем увеличение площади входного светового потока в два раза приведёт к увеличению массы только в два раза.

Однако сопряжение двух оптических устройств может вызвать сложности. Для достижения степени разрешения оптической аппаратуры, заложенной в проекте КА, относительное положение оптических устройств и положение их оптических осей должно быть неизменным.

Причинами отклонений оптических устройств от требуемого положения мо-

гут быть различные факторы: пластические деформации, возникающие на этапах транспортировки и выведения КА в космос; деформации, вызванные изменением температуры конструкции КА; колебания на участке орбитального полёта, вызванные как манёврами КА, так и работой бортовых приборов КА, таких как насосы и гироскопы.

Для предотвращения изменений относительного положения оптических устройств и их оптических осей применяются специальные размеростабильные конструкции.

Размеростабильность таких конструкций достигается с помощью:

- а) высоких прочностных и жесткостных свойств материалов;
- б) низкого коэффициента температурного расширения материала конструкции или эффективной схемой стабилизации температуры в отсеке целевой аппаратуры;
- с) эффективной с точки зрения силовой работы геометрической конфигурацией конструкции.

Все элементы размеростабильной конструкции изготавливаются из углепластика, который отвечает требованиям из пунктов а) и б). Пункт с) должен быть реализован проектировщиком.

При проектировании конструкции КА остро стоит вопрос об экономии веса.

Каждый элемент конструкции имеет в проекте свой прогноз по массе, и превышение этой величины может приводить к ухудшению характеристик будущего КА и увеличению времени разработки.

Рассматривается перепроектирование углепластиковой размеростабильной конструкции, предназначенной для установки оптических элементов специальной аппаратуры космического аппарата. В качестве исходной конструкции взята конструкция, сходная с размеростабильной конструкцией реального КА наблюдения с двумя сопряжёнными объективами.

В связи с высокими требованиями по жёсткости масса этой конструкции значительна, и можно предположить существенное уменьшение этой массы при перепроектировании.

Облик размеростабильной конструкции определялся компоновкой и требованиями по жёсткости и прочности при трёх случаях нагружения: собственный вес, транспортировка и старт. Исходный вариант конструкции представляет собой трёхслойную плиту, усиленную балками. Масса конструкции – 95 кг.

Перепроектирование проводилось на основе проектных ограничений. Использовался тот же материал и та же технология изготовления, что и в исходном вари-

анте конструкции. В системе MSC.Nastran была создана конечно-элементная модель размеростабильной конструкции и выполнены линейные статические расчёты для рассматриваемых случаев нагружения. Полученные значения напряжений в элементах конструкции и прогибов в контрольных точках сравнили с ограничениями для этих откликов. По результатам этого сравнения толщины несущих слоёв плиты, а также толщины усиливающих балок были уменьшены. Кроме того, некоторые усиливающие балки и часть оболочки плиты были удалены, поскольку эти элементы конструкции не участвовали в силовой работе. В результате перепроектирования масса размеростабильной конструкции снизилась до 56 кг. Конечно-элементные модели исходного и облегчённого вариантов размеростабильной конструкции показаны на рис. 1.

Однако облегчённый вариант конструкции, удовлетворяя проектным требованиям, отличается от исходного по динамическим характеристикам. Конечно-элементное моделирование собственных колебаний исходного и облегчённого вариантов показало, что нижняя собственная частота у облегчённого варианта в два раза ниже (рис. 1).

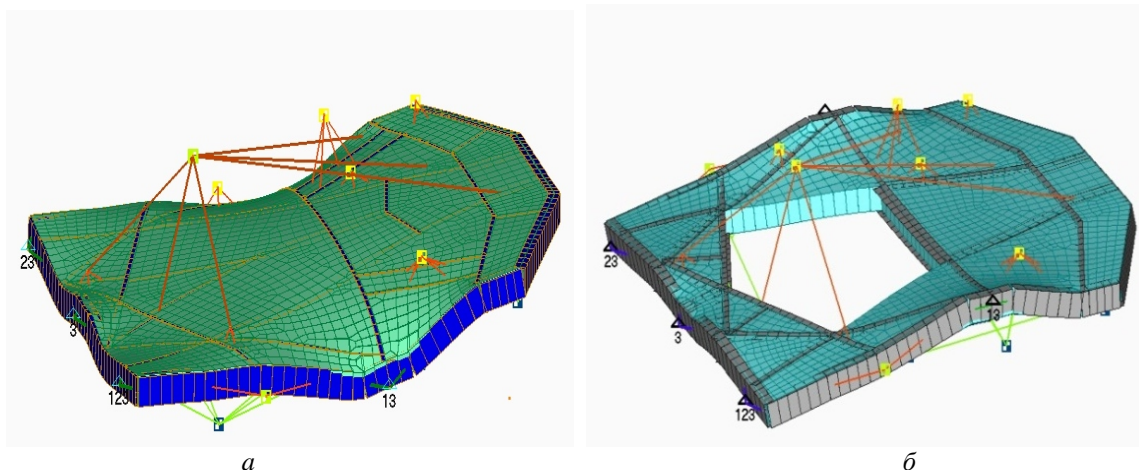
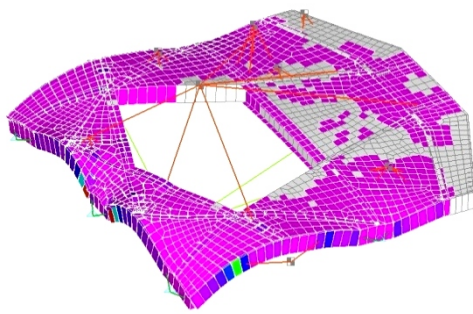


Рис. 1. Формы нижних тонов собственных колебаний: а – исходного и б – облегченного вариантов. Собственные частоты: для исходного варианта 41,6 Гц; для облегчённого – 20,9 Гц

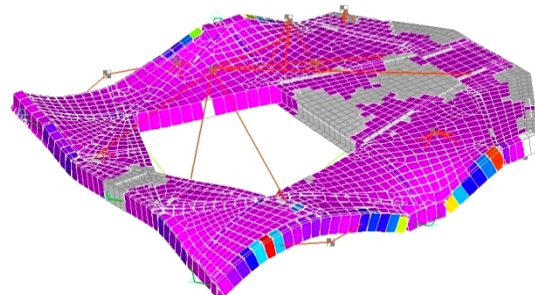
Отличие низших собственных частот говорит о том, что динамическое поведение исходной и модифицированной конструкций будет разным. КА с исходной конструкцией проверялся на различные динамические случаи нагружения, и его динамическое поведение было признано не нарушающим работоспособность КА в целом и его систем. Замена исходной конструкции на модифицированную с другими динамическими характеристиками меняет динамическое поведение КА.

Если амплитуды вибраций возрастут во время старта или транспортировки – это может привести к разрушению размеростабильной конструкции. Если амплитуды вибраций возрастут во время орбитального полёта, то в объективах может появиться явление вибросмаза.

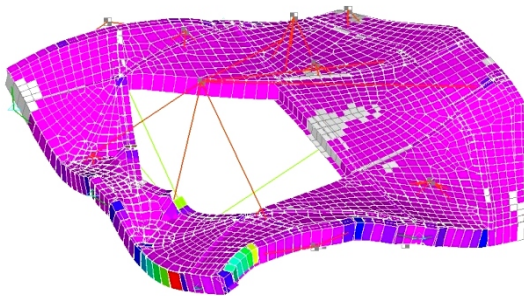
Динамические характеристики облегчённой конструкции нуждаются в корректировке. Будем повышать нижнюю собственную частоту облегчённой конструкции до величины, равной нижней собственной частоте исходной конструкции.



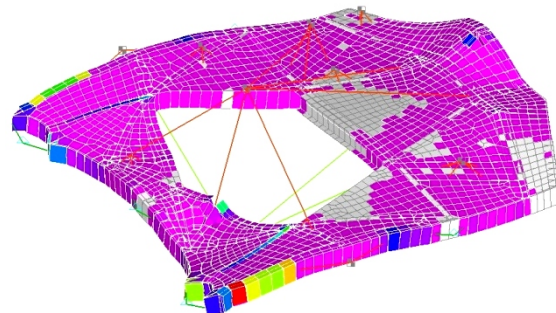
Второй тон. Собственная частота 36.4 Гц



Третий тон. Собственная частота 38.2 Гц



Четвёртый тон. Собственная частота 51.9 Гц



Пятый тон. Собственная частота 61.3 Гц

Рис. 2. Формы низших тонов колебаний облегченного варианта размеростабильной конструкции

Повысить нижнюю частоту собственных колебаний можно, увеличив жёсткость элементов размеростабильной конструкции, которые наиболее интенсивно деформируются при собственных колебаниях. Кроме первого тона колебаний еще несколько тонов имеют частоты ниже требуемой (рис. 2). Увеличение жёсткости размеростабильной конструкции должно быть таким, чтобы повысить частоты и этих тонов. Ставится задача по-

высить собственные частоты у пяти нижних тонов выше, чем 41.6 Гц.

Из рис. 1 и 2 видно, что сильным деформациям в нижних пяти тонах подвержены боковые окантовочные балки и нижний край конструкции. В первых трёх тонах колебаний наблюдается изгиб боковых окантовочных балок из плоскости платформы. Во втором и четвёртом тонах наблюдается изгиб нижней части платформы из плоскости платформы. В пятом

тоне наблюдается изгиб нижней части в плоскости платформы.

Увеличение жесткости основания платформы будем выполнять, увеличивая толщины полок нижней окантовывающей балки.

Судя по формам собственных колебаний, требуется увеличить изгибную

жёсткость из плоскости размеростабильной конструкции для боковых окантовочных балок. Чтобы масса усиления не была большой, увеличение изгибной жёсткости необходимо делать не за счёт увеличения толщин полок балок, а за счёт развития сечения балок из плоскости размеростабильной конструкции.

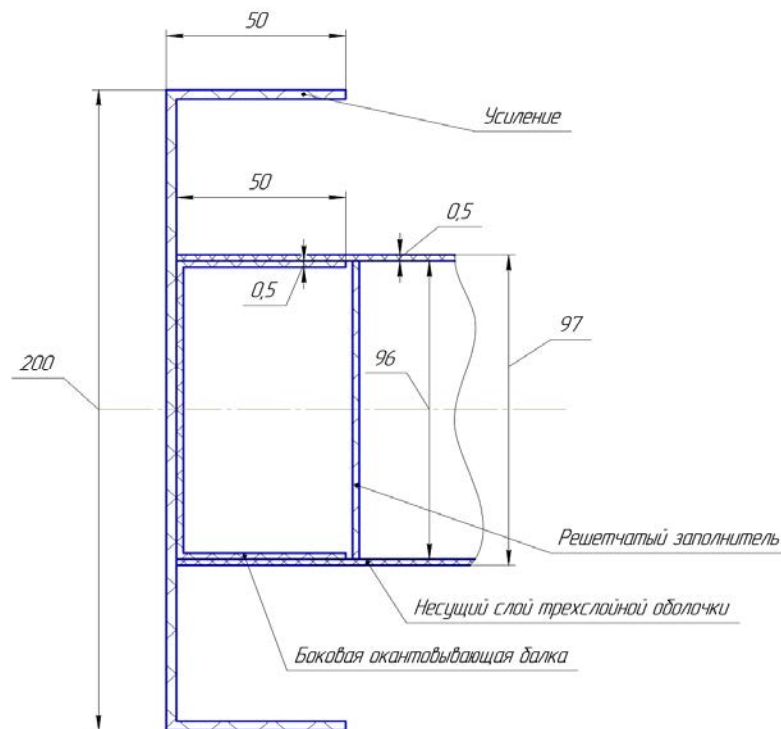


Рис. 3. Усиление боковых окантовывающих балок платформы

Компоновка не препятствует увеличению размеров поперечного сечения боковой окантовывающей балки по направлению из плоскости плиты, за исключением верхних боковых краев размеростабильной конструкции. Судя по формам нижних тонов колебаний, увеличение изгибной жёсткости с верхних краёв не требуется.

Конфигурация усиления и его размещение относительно размеростабильной конструкции показаны на рис. 3.

Толщину полок и стенки швеллера усиления будем менять так, чтобы увеличить значения собственных частот колебаний конструкции при минимизации массы усиления конструкции.

Материал усиливающего швеллера – квазиизотропный углепластик с четырьмя направлениями укладки волокон.

Параметры усиления определяются с помощью алгоритма численной оптимизации системы MSC.Nastran. Постановка задачи оптимизации:

– критерием оптимизации возьмём минимизацию массы усиления;

– проектными параметрами являются толщины полок и стенок усиления, а также толщины полок балки вдоль нижней стороны. Толщины усиления могут быть переменными по длине и ширине полок и стенки. В начальной точке толщины полок и стенки усиления постоянны и равны 10 мм;

– в качестве проектных ограничений примем: частоты пяти нижних тонов колебаний превышают нижнюю собственную частоту колебаний исходной конструкции.

Таким образом, имеем следующую задачу математического программирования:

$$\{d\} = \arg \min \left\{ M_{\text{усил}} = m_{\text{усил}}(d_i) \mid f_j \geq f_1^*, j = 1 \dots 5 \right\}, \quad (1)$$

где  $\{d\}$  – вектор проектных переменных (толщин);  $M_{\text{усил}} = m_{\text{усил}}(d_i)$  – целевая функция, зависящая от проектных переменных;  $d_i$ ,  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$  – проектная переменная, минимальное и максимальное значения проектной переменной;  $i$  – индекс, пробегающий все номера конечных элементов модели усиления;  $f_j$  –  $j$ -я собственная частота;  $f_1^* = 41.6$  Гц – нижняя собственная частота исходной конструкции.

В системе MSC.Nastran используется одна из разновидностей градиентного метода оптимизации [1]. Используется комбинированная целевая функция:

$$F' = \sum_i I_i g_i + F, \quad (2)$$

где  $F = m_{\text{усил}}$  – целевая функция (масса усиления);  $g_i = f_i - f_1^*$  – правая часть ограничения  $g_i(u, x) \leq 0$  (разность между требуемым и текущим значениями собственной частоты);  $i$  пробегает номера ограничений, на границе которых находится процесс;  $I_i$  – множители Лагранжа, которые подбираются так, чтобы минимизировать вектор-градиент целевой функции (2).

Поскольку масса зависит только от проектных параметров, коэффициенты вектора-градиента целевой функции отыскиваются согласно выражению:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F(u, x)}{\partial x}. \quad (3)$$

Коэффициенты вектора-градиента ограничений записываются в виде [1]:

$$\frac{\partial g_i}{\partial x} = - \frac{\partial g_i(u, x)}{\partial u} \left[ \frac{\partial h(u, x)}{\partial u} \right]^{-1} \frac{\partial h(u, x)}{\partial x} + \frac{\partial g_i(u, x)}{\partial x}, \quad (4)$$

где  $h(u, x)$  – левая часть уравнения состояния системы;  $u$  – отклики системы,  $x$  – проектные параметры.

При анализе собственных колебаний уравнение состояния системы имеет вид:

$$([K] - w_n^2 [M]) \cdot \{j_n\} = 0, \quad (5)$$

где  $[K]$  и  $[M]$  – матрицы жёсткости и масс соответственно;  $\{f_n\}$  – собственный вектор для  $n$ -го тона;  $w_n^2$  – квадрат круговой собственной частоты.

Подставив (5) в (4) и учитывая, что  $\nabla f_n = \nabla g_n$  и  $f_n = w_n / (2\pi)$ , получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_n}{\partial x_i} &= \frac{\partial f_n}{\partial x_i} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial w_n}{\partial x_i} = \\ &= \frac{1}{4\pi w_n} \cdot \{j_n\}^T \left( \frac{\partial [K]}{\partial x_i} - w_n^2 \frac{\partial [M]}{\partial x_i} \right) \{j_n\}. \end{aligned}$$

Алгоритм оптимизации достигает оптимальной точки за несколько итераций. На рис. 4 показаны изменения целевой функции (массы усиления), а на рис. 5 – изменения ограничений.

Можно видеть, что для начального варианта усиления ограничения выполняются. На первых трех итерациях значений функций ограничения растут и достигают нуля. Собственные частоты соответственно уменьшались до  $f_1^*$ . Начиная с четвертой итерации процесс оптимизации соответствует границе области реализуемых конструкций. Масса конструкции на протяжении всех 20 итераций уменьшалась. После 20-й итерации алгоритм оптимизации не смог найти способ дальнейшего снижения массы усиления и итерационный процесс был остановлен.



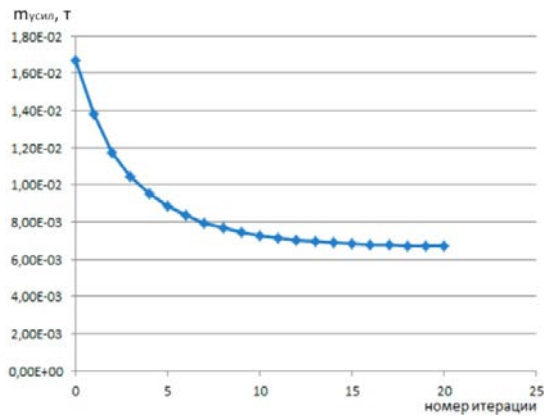


Рис. 4. Изменение целевой функции в процессе оптимизации

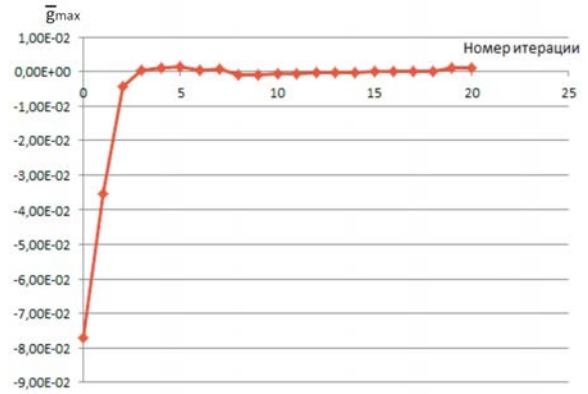


Рис. 5. Изменение максимального нормированного ограничения в процессе оптимизации

Оптимальное распределение толщин усиления показано на рис. 6, форма первого тона колебаний оптимизированной конструкции показана на рис. 7. Теоретическая масса оптимальной конструкции усиления составила 4,5 кг.

Получившееся распределение материала усиления носит беспорядочный характер.

Технологическими являются конструкции, элементы которых изготавливают из оболочек постоянной толщины и профилей постоянного сечения. Полученная в результате оптимизации конструкция таковой не является.

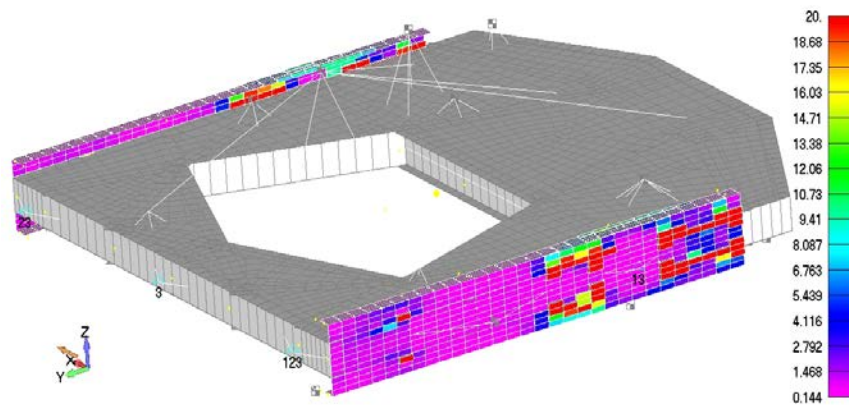
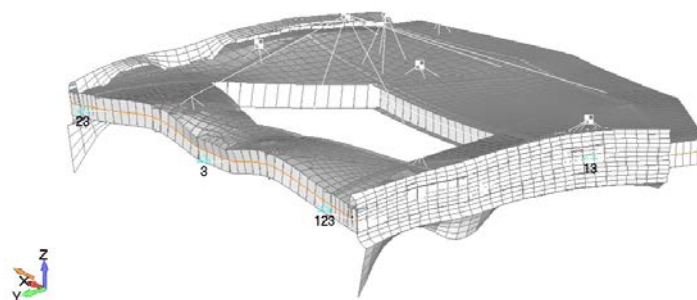


Рис. 6. Оптимальное распределение толщин в усилениях



Output Set: Mode 1, 42.33408 Hz, Deformed(2.568): Total Translation

Рис. 7. Форма первого тона колебаний оптимизированной конструкции. Собственная частота 42.9 Гц

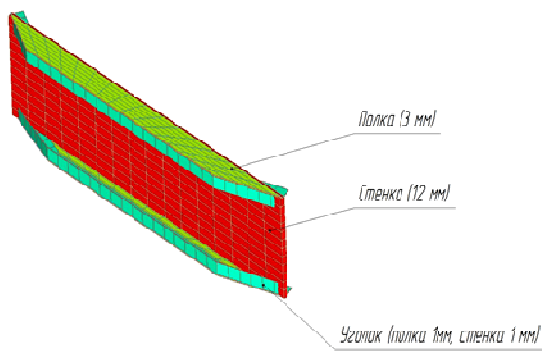


Рис. 8. Конструкция доработанного усиления

Следует преобразовать получившуюся конструкцию к удобному с технологической точки зрения виду. Используется следующий алгоритм этого преобразования:

1. Части оболочек полок и стенок, для которых получившаяся толщина меньше 0,7 мм, удаляются.

2. На оставшихся частях выделяются зоны с примерно постоянной толщиной, внутри этих зон толщина осредняется. Толщины полок станут равными 3 мм, толщины стенок – 12 мм.

3. Вдоль свободного края полки в результате оптимизации образовался пояс усиления, средняя толщина которого составляет 3 мм. Этот пояс преобразуется в окантовочный уголкового профиля с площадью поперечного сечения, равной площади этого пояса.

Получившаяся конструкция усиления изображена на рис. 8.

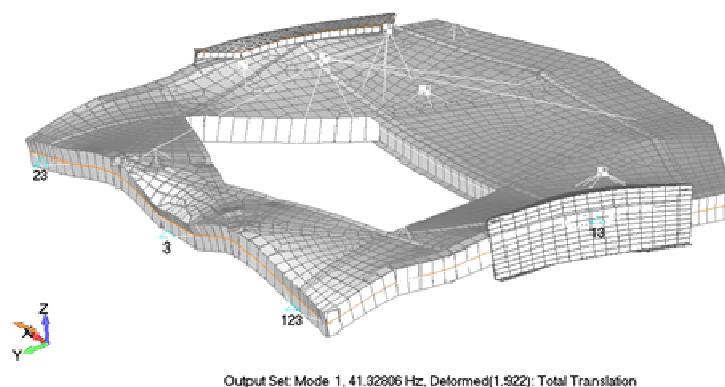


Рис. 9. Первый тон колебаний оптимизированной конструкции платформы с доработанным усилением

Для полученной конструкции проведён расчёт собственных частот колебаний (рис. 9). Первая собственная частота понизилась до 41,3 Гц, что примерно соответствует первой частоте исходной конструкции.

Масса усиления, доработанного с точки зрения технологии производства, увеличилась до 6,5 кг. Масса облегчённой размеростабильной конструкции с учётом

усиления составила 62,6 кг, что на 32,4 кг меньше, чем исходная конструкция.

### Библиографический список

1. Gregory, J. Moore, MSC/NASTRAN Version 68 Design Sensitivity and Optimization User's Guide, The MacNeal-Swendler Corporation, 1994.

**FORMING THE CONCEPTUAL STRUCTURE OF A DIMENSIONALLY STABLE PLATFORM BY NUMERICAL OPTIMIZATION**© 2013 K. V. Peresykin<sup>1</sup>, M. S. Kozhichenkova<sup>2</sup><sup>1</sup>Samara State Aerospace University<sup>2</sup>Space Rocket Center "TsSKB-Progress"

The paper presents a problem of adjusting the dynamic characteristics of a space vehicle that emerges in the course of restructuring its dimensionally stable structure. The adjustment is accomplished with the help of numerical optimization. The response of the structure is modeled by the finite element method.

*Finite element method, proper oscillation, designing, numerical optimization.*

**Информация об авторах**

**Пересыпкин Константин Владимирович**, ассистент кафедры летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [peresykin\\_kv@mail.ru](mailto:peresykin_kv@mail.ru). Область научных интересов: моделирование силовой работы конструкций.

**Кожиченкова Марина Сергеевна**, инженер-конструктор третьей категории, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара. E-mail: [bellana1588@mail.ru](mailto:bellana1588@mail.ru). Область научных интересов: проектирование космических аппаратов.

**Peresykin Konstantin Vladimirovich**, Assistant of Aircraft Design Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [peresykin\\_kv@mail.ru](mailto:peresykin_kv@mail.ru). Area of research: modeling of elastic behavior of structures.

**Kozhichenkova Marina Sergeevna**, design engineer, Federal State Unitary Enterprise "TsSKB-Progress", Samara. E-mail: [bellana1588@mail.ru](mailto:bellana1588@mail.ru). Area of research: spacecraft designing.