

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА АМПЛИТУДЫ ВИБРАЦИЙ

Ряд агрегатов, присутствующих на космических аппаратах (КА), вызывают вибрации конструкции. Это агрегаты с вращающимися частями, такие как вентиляторы и насосы системы терморегулирования, а также силовые гироскопы. Существуют КА, нормальное функционирование которых может быть нарушено небольшими по амплитуде вибрациями чувствительных к ним элементов КА (ЧЭ). Примером могут служить КА наблюдения с телескопами высокого разрешения, КА для проведения микрогравитационных экспериментов и др. Вибрации конструкции КА могут моделироваться на основе метода конечных элементов. Однако необходимо выяснить насколько влияют на величины амплитуд вибраций ЧЭ небольшие отклонения параметров конструкции, такие как отклонения толщины листа проката от номинальной величины или размерные погрешности механической обработки.

Реальная конструкция КА может обладать большим числом параметров, значения которых могут изменяться в достаточной мере, чтобы повлиять на вибрации конструкции. Рассчитать вибрации конструкции при различных сочетаниях отклонений параметров затруднительно ввиду большого количества этих сочетаний. Многие исследователи предлагают для снижения количества вычислений применять статистический энергетический анализ. Этот метод позволяет преобразовать подробную динамическую модель в систему уравнений с небольшим количеством степеней свободы с сохранением приемлемой точности. При снижении числа неизвестных в модели количество вычислений снизится, однако останется весьма большим. Предположим, что в конструкции есть n параметров, влияние отклонений которых на вибрации необходимо учесть. Предположим также, что амплитуды вибраций в зависимости от параметров конструкции в области возможных отклонений меняются монотонно, и максимальные изменения амплитуд будут наблюдаться для крайних значений отклонений. Тогда сочетание отклонений параметров с максимальной амплитудой вибраций надо искать среди вариантов, составленных из максимальных и минимальных значений параметров, то есть каждый параметр может приобретать только два значения. Число таких вариантов равно 2^n . Если число параметров конструкции равно 10, то мы должны выполнить расчёт вынужденных колебаний для 1024 вариантов, а если параметров 20, то число расчётов превысит 10^6 . Даже при использовании экономичного метода, такого как статистиче-

ский энергетический анализ, объём вычислений будет велик, если учесть, что в реальных конструкциях число параметров, которые существенно влияют на высокочастотные вибрации, может быть значительно выше 20.

Решить эту проблему предлагается, отказавшись от простого перебора вариантов сочетаний отклонений и применив алгоритм численной оптимизации. Проектными переменными являются отклонения параметров конструкции от номинальных значений, а ограничениями – допуски на них. Критерий оптимизации – максимизация функции от амплитуд перемещений ЧЭ при вынужденных колебаниях конструкции (целевой функции). Таким образом, отыскивается самое неблагоприятное сочетание отклонений параметров с точки зрения требований по вибрациям к конструкции КА. Значение же критерия оптимизации для найденной точки будет характеризовать самые неблагоприятные для ЧЭ амплитуды вибраций. Поиск наилучшего сочетания отклонений выполнялся с помощью градиентного метода оптимизации, реализованного в системе MSC.Nastran. Запишем выражение для компонентов градиента целевой функции в пространстве проектных переменных для анализа вынужденных колебаний. Допустим, что начальные значения проектных переменных равны x_0 . Значение отклика системы для начального значения проектных переменных – u_0 (в нашем случае амплитуды и фазы колебаний точек конструкции). Изменение вектора проектных переменных на δx приведёт к следующему изменению целевой функции [1]:

$$\delta F(x_0, u_0) = \left\{ \frac{\partial F}{\partial u}(x_0, u_0) \cdot \left(- \left[\frac{\partial h}{\partial u}(x_0, u_0) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, u_0) \right) + \frac{\partial F}{\partial x}(x_0, u_0) \right\} \cdot \delta x, \quad (1)$$

где x – вектор проектных переменных, u – вектор откликов системы (в рассматриваемом случае амплитуды и фазы колебаний точек конструкции), $F(x_0, u_0)$ – целевая функция, $h(x_0, u_0)$ – левая часть уравнения состояния системы:

$$\left[-\omega^2 M + i\omega \cdot B + K \right] \cdot \{u\} - \{P\} = 0. \quad (2)$$

Здесь M , B и K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жёсткости конструкции. ω – круговая частота возбуждения, $\{P\}$ – вектор амплитуд узловых сил. Введём обозначение: $A(x) = \left[-\omega^2 M + i\omega \cdot B + K \right]$. Замечаем, что матрица A не зависит от отклика, а функция цели не зависит непосредственно от проектных переменных. Подставим (2) в (1) и получим:

$$\delta F(u_0) = \left\{ \frac{\partial F}{\partial u}(u_0) \cdot \left(- [A(x_0)]^{-1} \cdot \frac{\partial A}{\partial x}(x_0, u_0) \right) \right\} \cdot \delta x. \quad (3)$$

В (3) $\frac{\partial F}{\partial u}(u_0)$ известна из определения целевой функции; $[A(x_0)]^{-1} = u_0 \cdot P^{-1}$;

$\frac{\partial A}{\partial x}(x_0)$ отыскивается при формировании матриц M , B и K ; u_0 отыскивается при решении системы уравнений (2). Видим, что всё необходимое для нахождения компонентов градиента целевой функции получаем при решении уравнения (2) для конструкции с заданными значениями проектных переменных x_0 . Таким образом, для одного шага оптимизации нужно составить одну систему линейных уравнений и решить её.

Методика апробирована на конструкции реального КА наблюдения. На конечно-элементной модели конструкции КА, созданной в системе MSC.Nastran, рассчитывались амплитуды колебаний линз и зеркал телескопа под действием возбуждения со стороны силовых гироскопов, насосов и вентиляторов. Проведена оценка влияния отклонений некоторых параметров конструкции на колебания одной из линз телескопа. Оценка проводилась для возбуждения со стороны одного из силовых гироскопов, имеющего частоту вращения 166 Гц. Допускалось отклонение параметров от номинальных значений на $\pm 5\%$. Расчёт показал, что при неудачном сочетании отклонений параметров амплитуда колебания линзы может превышать амплитуду при номинальных значениях параметров конструкции на 27%. Оптимальное решение было найдено за шесть итераций. Малое количество расчётов делает критерий быстродействия при выборе метода расчёта вибраций незначительным. В частности, применить метод конечных элементов может оказаться целесообразнее, чем статистический энергетический анализ, по причине его простоты и универсальности.

На рис. 1 показаны деформации конструкции в одинаковых фазах колебаний для конструкции с номинальными и с наихудшими параметрами. Из рисунка видно, что форма колебаний при отклонениях существенно меняется. Это обусловлено тем, что на высоких по сравнению с первыми тонами частотах соседние собственные колебания разделены малыми частотными интервалами, и при изменении параметров конструкции собственные частоты могут сильно менять своё положение относительно частоты возбуждения. Для получения представления, до какой степени могут влиять отклонения параметров конструкции на амплитуду колебаний точек конструкции, был выполнен ряд расчётов для возбуждений с разными частотами. На рис. 2 показано, увеличение амплитуды колебаний линзы при наихудших отклонениях по сравнению с конструкциями с номинальными параметрами. Из рисунка видно, что разница может достигать сотен процентов.

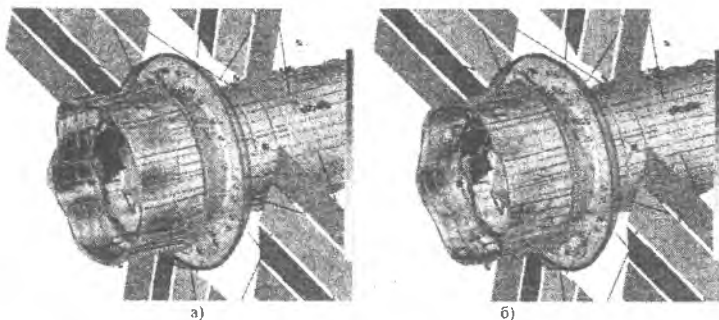


Рис. 1. Деформации конструкции с номинальными значениями параметров (а) и с наилучшими с точки зрения вибраций отклонениями (б) на одной фазе колебаний от возбуждения со стороны силового гироскопа

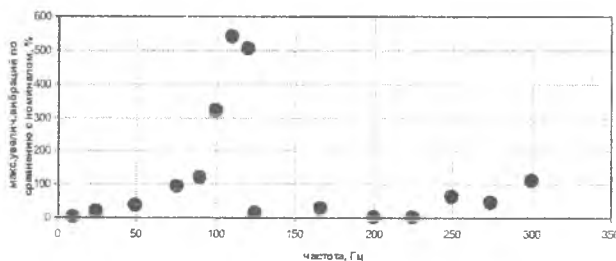


Рис. 2. Увеличение амплитуды колебаний при наилучших отклонениях по сравнению с исходной конструкцией для нескольких частот возбуждения

Предложенная методика позволяет учитывать отклонения параметров конструкции от номинальных при моделировании высокочастотных вибраций. Расчёты реальной конструкции КА показали, что отклонения могут вызвать изменение амплитуды колебаний в несколько раз.

Библиографический список

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