

Пересылкин В.И., Иванова Е.А., Пересылкин К.В.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОЛОВНОГО БЛОКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Головной блок ракеты-носителя (РН) состоит из космического аппарата (КА), головного обтекателя (ГО), переходного отсека КА (ПХО КА) и переходного отсека ГО (ПХО ГО) (рисунок 1). На ГО во время полета действует аэродинамическая нагрузка, и ПХО ГО должен передавать эту нагрузку с ГО на РН. Причем из-за больших габаритов КА диаметр ГО больше диаметра последней ступени РН. Таким образом, силы нужно передать с большего диаметра на меньший и в связи с этим оболочка ПХО ГО получается конической. На КА во время полета действует инерционная нагрузка, и ПХО КА должен передавать ее с КА на РН. Здесь нужно отметить, что КА крепится за несколько узлов и поэтому нагрузка со стороны КА приходит сосредоточенная. Необходимо, чтобы ПХО КА, воспринимая со стороны КА сосредоточенную нагрузку, передавал бы на РН распределенную нагрузку. Прочность конструкции определяется не только напряжениями в элементах конструкции, но и жесткостью конструкции. В частности, при больших перемещениях ГО относительно КА последний может быть поврежден. Кроме того, при недостаточной жесткости крепления ГО могут возникнуть аэроупругие явления.

Наиболее тяжелым случаем нагружения для конструкции головного блока является случай несимметричного обтекания при развороте ракеты. В этом случае нагрузка, приходящая с ГО, состоит не только из осевой силы, но и из перерезывающей силы и изгибающего момента. Осевая и перерезывающая сила воспринимаются конической оболочкой ПХО ГО достаточно эффективно, хоть и не столь эффективно как цилиндрической оболочкой. Изгибающий момент воспринимается более сложным образом. Силы, возникающие в конической оболочке переходника под действием изгибающего момента, изображены на рисунке 2. Изгибающий момент не может быть уравновешен растяжением и сжатием на противоположных сторонах конической оболочки, поскольку линии действия этих сил пересекаются. Как видно из рисунка, при уравнивании сил, приходящих с ГО и РН, возникают дополнительные касательные усилия, которые образуют пару сил, уравнивающих изгибающий момент. Из этих рассуждений следует, что коническая оболочка работает при изгибе совсем не так как цилиндрическая, и пути передачи сил через коническую оболочку сложные и "искривленные".

ленные". Чтобы передать силы этим способом, конструкции придется испытать большие деформации и поэтому возникает проблема с ее жесткостью.

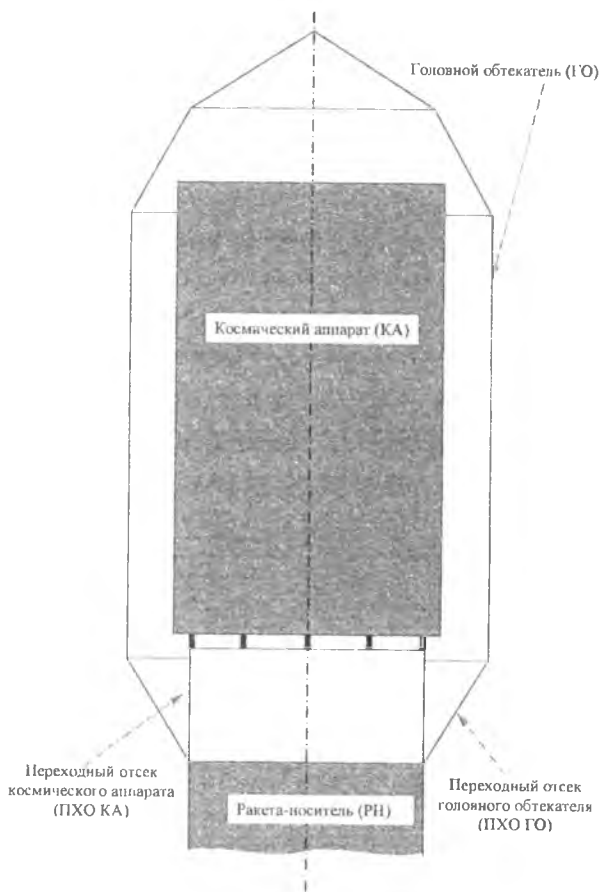


Рисунок 1 – Головной блок ракеты-носителя

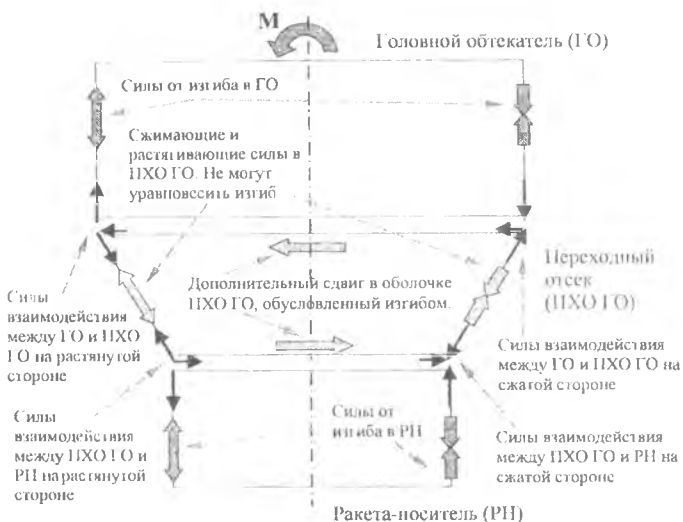


Рисунок 2 Работа на изгиб ПХО ГО в виде конической оболочки

Примем конструкцию ПХО КА в виде цилиндрической оболочки, снизу закрепленной на РН, а сверху имеющей несколько узлов крепления для установки КА. Если узел крепления будет вынесен с поверхности оболочки ПХО КА или внутрь оболочки или наружу, то сила от КА будет приходиться не по оси оболочки и восприниматься с местным изгибом. Это приведет к тому, что узел крепления КА будет обладать малой жесткостью. Расположим узел крепления на оболочке. Тогда сила сначала пойдет по оболочке вниз. По мере продвижения вниз в работу будет включаться все больший сектор оболочки ПХО КА (рисунок 3). Из рисунка видно, что нейтральная ось сектора оболочки не пересекается с осью действия силы с узла крепления КА. Поэтому оболочка будет работать опять на изгиб, и поэтому жесткость узла крепления опять будет низкой.

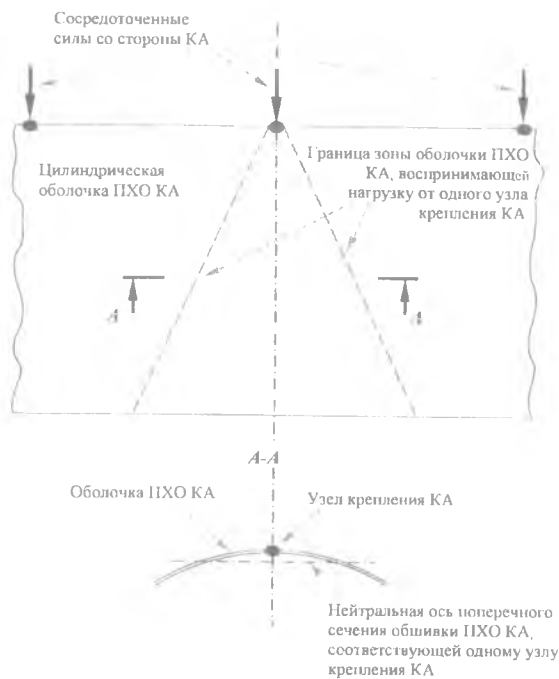


Рисунок 3 – Сектор оболочки ПХО КА, воспринимающий силу от одного узла крепления КА

Для решения этих проблем было предложено связать оболочки ПХО ГО и ПХО КА зашивкой (рисунок 4). Дополнительный сдвиг через зашивку передается на цилиндрическую оболочку ПХО КА и эффективно ей воспринимается (рисунок 5). С другой стороны, если вдоль зашивки напротив узлов крепления КА установить балки, то изгиб в зоне узлов крепления КА будет восприниматься ПХО ГО малой силой на большом плече (рисунок 6).

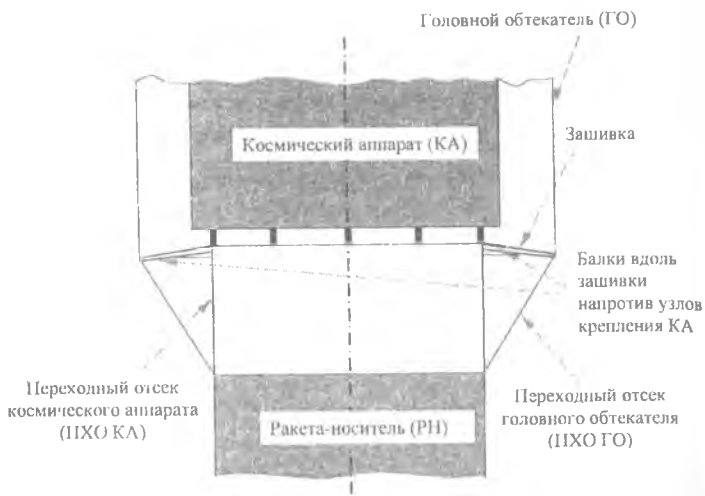


Рисунок 4 – Соединение оболочек ПХО ГО и ПХО КА зашивкой

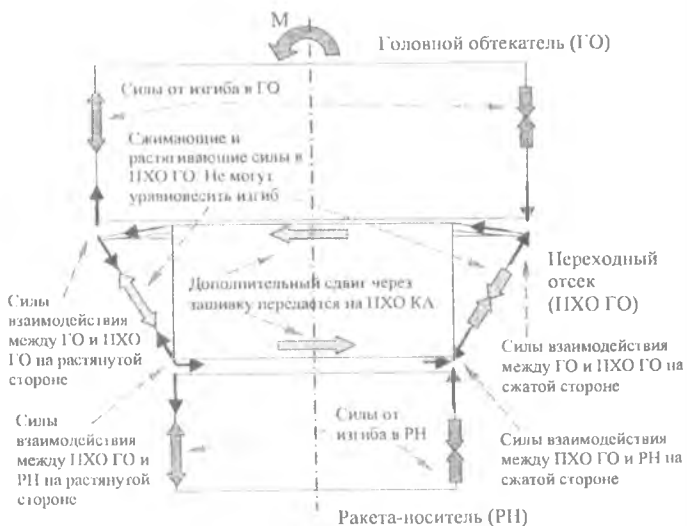


Рисунок 5 – Работа конструкции с зашивкой на изгиб

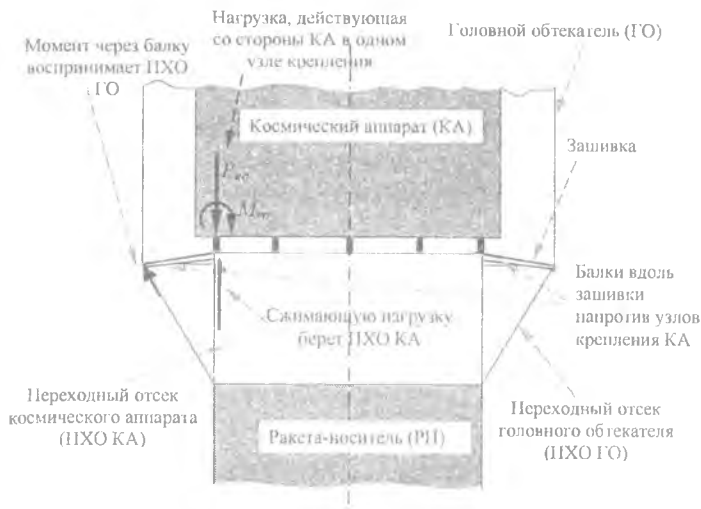


Рисунок 6 – Работа конструкции с зашивкой при нагружении со стороны КА

По результатам предварительных расчетов были выбраны конструктивные исполнения для элементов конструкции.

Конструкция ГО и ПХО ГО представляет собой трехслойные оболочки с несущими слоями из нескольких слоев однонаправленной углеродной ткани, уложенных под разными углами, и сотовым наполнителем. ГО состоит из двух половинок (створок), соединенных между собой дискретными замками, установленными на стыковочных профилях. Обтекатель опирается на переходный отсек посредством поперечного стыка, состоящего из дискретных замков, установленных на стыковочном шпангоуте.

Конструкция ПХО КА - цилиндрическая стрингерная оболочка.

Зашивка между ПХО КА и ПХО ГО – ферменная конструкция.

Назначить толщины оболочек и профили поперечных сечений подкрепляющих элементов для такой сложной конструкции не просто. К тому же необходимо удовлетворить жестким весовым лимитам и проектным ограничениям по прочности и жесткости. Для определения параметров этой конструкции была разработана конечно-элементная модель конструкции головного блока (рисунки 7, 8) и проведена серия расчетов с использованием алгоритмов численной оптимизации MSC/Nastran.

При моделировании трехслойных оболочек ГО и ПХО ГО использовался многослойный конечный элемент LAMINATE. Этот элемент может состоять из нескольких слоев, каждый из которых воспринимает мембранную, сдвиговую, изгибную нагрузки и поперечный сдвиг. Каждый из слоев может иметь свои толщину и свойства материала.

Металлические профили продольного и поперечного стыков створок ГО и шпангоуты ПХО ГО моделировались пространственной системой универсальных оболочечных элементов PLATE.

Дискретные замки в стыках моделировались специальным точечным элементом DOF SPRING, который реализует соединение двух степеней свободы узла с заданной жесткостью.

Цилиндрическая стрингерная оболочка (обшивка и стрингеры) моделировалась универсальным оболочечным элементом PLATE.

Ферменная зашивка моделировалась балочными BEAM.

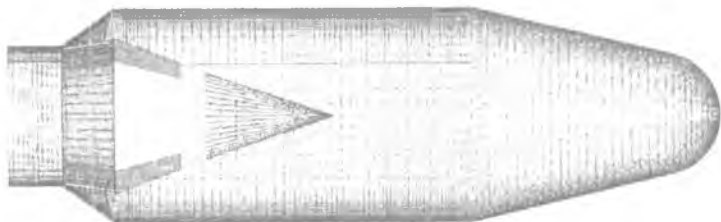


Рисунок 7 - Конечно-элементная модель головного блока

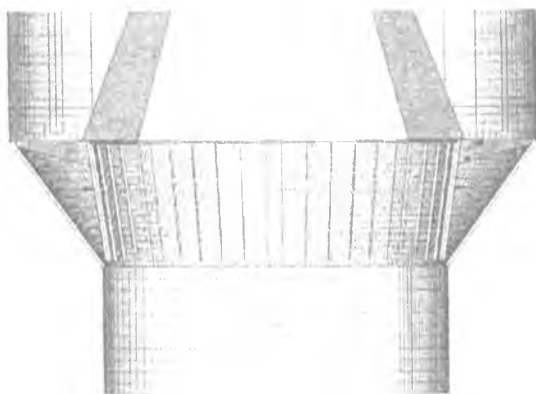


Рисунок 8 - Конечно-элементная модель ПХО

### *Постановка задачи оптимизации*

В качестве целевой функции принята масса конструкции.

Определены следующие проектные переменные:

- Толщины слоев углеленты по заданным направлениям в нескольких зонах постоянных толщин, назначенных по технологическим требованиям, в трехслойных оболочках ГО и ПХО ГО.
- Толщина обшивки ПХО КА.
- Площадь поперечного сечения стержней фермы.
- Толщины стенок балок в зашивке, воспринимающих силы со стороны узлов крепления КА.
- Толщины пластинчатых элементов, образующих сечения шпангоутов между ПХО ГО и ПХО КА, между ПХО ГО и зашивкой, между ПХО КА и зашивкой.

На конструкцию наложены следующие ограничения:

- Напряжения в элементах конструкции для нескольких случаев нагружения не должны превышать допустимых величин.
- Коэффициент критической нагрузки не меньше коэффициента безопасности.
- Первая собственная частота колебаний ГО не ниже определенной величины, соответствующей минимально допустимой жесткости конструкции.
- Ограничения на проектные переменные, обусловленные технологией изготовления элементов конструкции.

### *Результаты оптимизации*

В результате серии оптимизационных расчетов получены оптимальные параметры конструкции. Масса ГО по сравнению с начальным вариантом конструкции снижена на 9,7 %, масса ПХО - на 17,1 %. Активным ограничением являются ограничения по первой собственной частоте. В ходе расчетов ряд элементов конструкции (некоторые стержни зашивки) вырождается и при проведении заключительных расчетов эти элементы были удалены из модели.

На рисунках 9 и 10 приведены значения толщин и площадей поперечных сечений силовых элементов конструкции ПХО КА и зашивки между ПХО КА и ПХО ГО, полученных в результате оптимизации.



Выполнение проектных ограничений было проверено расчетами собственных форм колебаний конструкции (рисунок 11) и расчетами потери устойчивости конструкции в линейной постановке (рисунок 12).

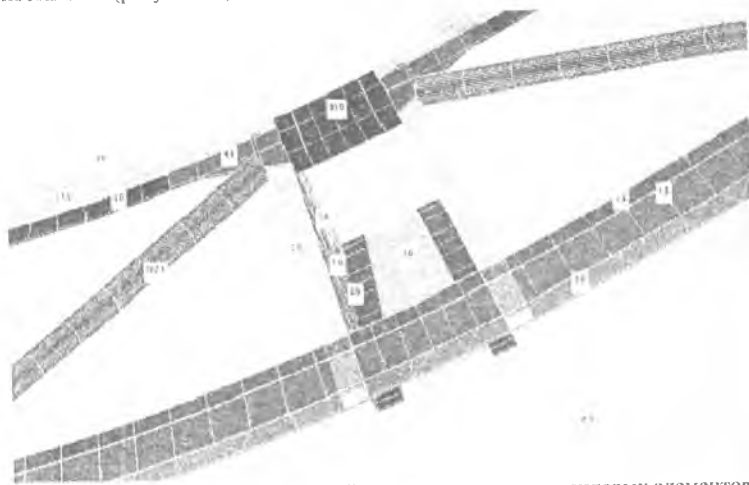


Рисунок 9 – Значения толщин и площадей поперечного сечения силовых элементов конструкции ПХО КА и заливки между ПХО КА и ПХО ГО, полученных в результате оптимизации

ции



Рисунок 10 – Значения толщин и площадей поперечного сечения силовых элементов конструкции ПХО КА и заливки между ПХО КА и ПХО ГО, полученных в результате оптимизации

ции

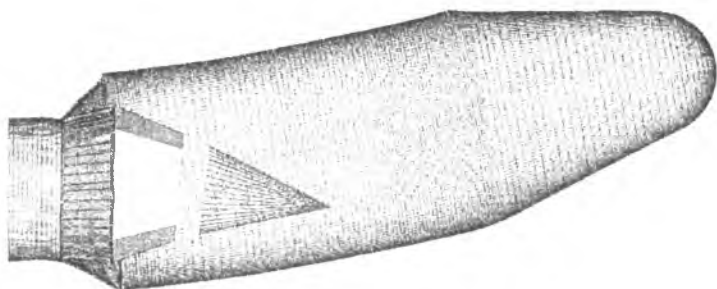


Рисунок 11 – Первая собственная форма колебания ГО с распределением материала после оптимизации. Значение частоты отвечает требованиям проекта

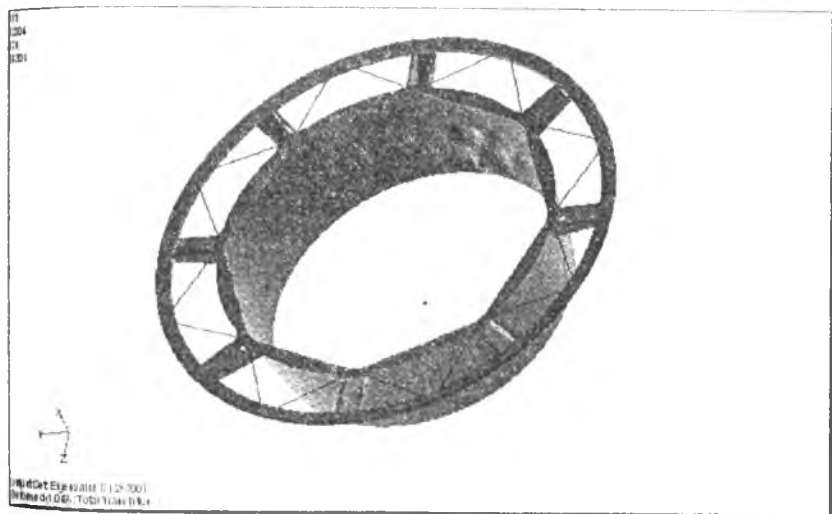


Рисунок 12 -- Первая местная форма потери устойчивости обшивки ЦХО КА. Коэффициент критической нагрузки не превышает заданных значений.

*Некоторые проблемы, возникшие при постановке задачи оптимизации*

Численная оптимизация конструкций требует продуманной постановки задачи оптимизации в том смысле, что целевая функция, проектные переменные и ограничения должны быть определены непротиворечиво и в удобном для оптимизационного алгоритма виде. В частности, при решении рассматриваемой задачи возник ряд связанных с этим проблем, которые хотелось бы обсудить.

При первых попытках решения задачи алгоритм оптимизации выполнял несколько итераций и после этого заканчивал свою работу без особого улучшения конструкции. При анализе процесса оптимизации выяснилось, что целевая функция (общая масса конструкции) менялась слабо относительно ее начальной величины. Это обусловлено тем, что масса головного блока составляет несколько тонн, а изменение массы в результате оптимизации – десятки килограмм. Такая ситуация требует изменения целевой функции, поскольку один из критериев сходимости к оптимальному решению основан на ее относительном изменении. Новая целевая функция была задана в виде разности текущей и начальной массы конструкции. После внесения этого изменения данная проблема была решена.

Следующая проблема заключалась в том, что на несколько нижних частот колебаний не удавалось повлиять изменением выбранных проектных переменных. Анализ соответствующих собственных форм колебаний показал, что эти собственные колебания являются скорее колебаниями КА, чем колебаниями ГО и ПХО. Учитывать же колебания КА нет смысла, поскольку, с одной стороны, эти колебания не будут возбуждаться внешней нагрузкой (аэродинамической нагрузкой на ГО), а, с другой стороны, повлиять на эти колебания все равно нельзя, поскольку проектируется ГО и ПХО, а не КА. Для подтверждения этого предположения средствами MSC/Nastran был проведен анализ вынужденных колебаний конструкции головного блока под действием гармонической нагрузки на ГО. Результаты этого анализа приведены на рисунке 13. Можно видеть, что в отображенном на этом рисунке частотном диапазоне значительные колебания ГО наблюдаются только в окрестности четвертого тона. Отсюда можно сделать вывод, что первые три тона являются колебаниями КА, а первым тоном колебания ГО является четвертый.

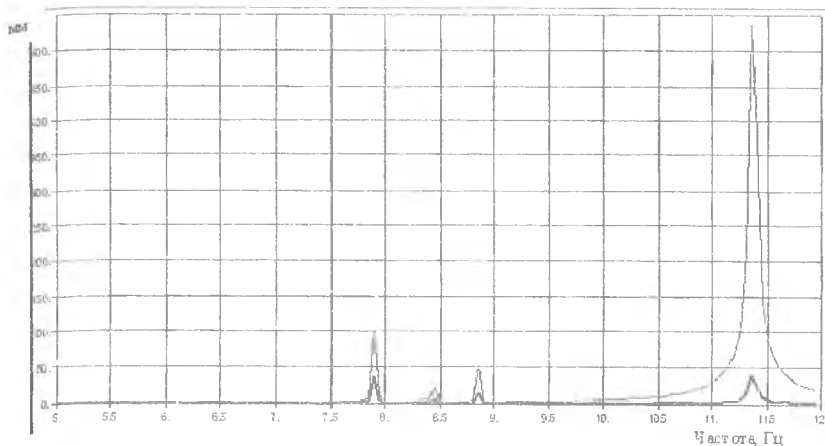


Рисунок 13 – Зависимость амплитуд колебаний точек КА и ГО от частоты гармонического возбуждения, приложенного к ГО, тонкая линия – амплитуда колебаний ГО, толстая линия – амплитуда колебаний КА

Первоначально задание ограничения по первой собственной частоте ГО заключалось в том, что она должна располагаться в диапазоне частот  $[f, F]$ . В такой постановке приемлемая конструкция найдена не была. В процессе анализа выходных данных выяснилось, что алгоритм оптимизации, повышая первую собственную частоту ГО, одновременно понижал вторую. Когда первая и вторая собственные частоты ГО поменялись местами, произошла резкая смена ограничений и алгоритму оптимизации пришлось резко менять направление поиска в пространстве проектных переменных (почти на обратное). После того, как первая частота ГО сменилась несколько раз, расчет прекратился, поскольку последние итерации были неэффективными с точки зрения уменьшения целевой функции. Поэтому рассматриваемое ограничение было изменено, и уже не одна, а пять нижних собственных частот ГО ограничивались диапазоном  $[f, F]$ . Однако в такой постановке решение закончилось сообщением о том, что конструкция, удовлетворяющая ограничениям, не найдена. Анализ выходных данных показал, что невозможно одновременно сделать первую частоту ГО больше  $f$  и пятую собственную частоту ГО ниже  $F$ . После увеличения  $F$  решение было найдено.