

На правах рукописи



Боровиков Александр Александрович

**Методика оптимизации конструктивно-силовой схемы блока космического
аппарата для обеспечения динамической совместимости
с ракетой-носителем**

Специальность 2.5.13.

«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация
летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тушев Олег Николаевич

Официальные оппоненты: **Болдырев Андрей Вячеславович**,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
конструкции и проектирования летательных аппаратов,
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика
С.П. Королёва», Самарская область, г. Самара

Кузнецов Дмитрий Александрович,
доктор технических наук, заместитель начальника отдела,
Акционерное общество «Научно-производственное объединение
им. С.А. Лавочкина», Московская область, г. Химки

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-
исследовательский институт машиностроения», Московская
область, г. Королёв

Защита состоится «19» декабря 2024 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, 125993.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке:
https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182442

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.327.09, к.т.н.

Стрелец Дмитрий Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время с ростом числа частных космических компаний резко возросла конкуренция на рынке космических услуг. Чтобы сохранять конкурентоспособность, необходимо сокращать время разработки космических аппаратов (КА) и высокими темпами наращивать космические группировки, что нашло своё отражение в Федеральной космической программе на 2016–2025 годы, утверждённой постановлением правительства РФ № 230 от 23 марта 2016 г.

При разработке КА одной из важнейших и времязатратных задач является разработка конструктивно-силовой схемы (КСС) КА с адаптером (далее – блок космического аппарата (БКА)) с учётом удовлетворения требований динамической совместимости КА с ракетой-носителем (РН). Данное требование предъявляется разработчиками РН для ограничения динамической связи КА с РН, которое заключается в ограничении частот собственных колебаний БКА, жёстко закреплённого по стыку адаптера с верхней ступенью РН или разгонным блоком (РБ). Невыполнение требований динамической совместимости приводит к необходимости дополнительного моделирования системы управления РН с учётом упругости КА, результатом которого может стать изменение штатных настроек системы управления РН. Это увеличивает время проектирования и может снизить надёжность запуска.

Особенностью разработки КА на ранних стадиях проектирования является высокая степень неопределённости и изменчивости исходных данных (как правило, меняется компоновка, состав приборов и конструкция), что приводит к необходимости использования методик, позволяющих оперативно получать решения по КСС БКА.

Одним из способов сокращения времени разработки КСС БКА является использование методов конечно-элементной (КЭ) оптимизации, в частности топологической оптимизации, которая позволяет в короткий срок сформировать КСС БКА на основе достаточно строгих и обоснованных формализаций.

В связи с этим в настоящее время актуальна задача оперативного определения КСС БКА.

Степень разработанности темы исследования

Развитию и использованию методов топологической оптимизации посвящено значительное число исследований, опубликованных в научных статьях и монографиях. В настоящее время разработан ряд различных методов топологической оптимизации. Метод тела переменной плотности (ТПП) предложен В.А. Комаровым и в дальнейшем развит А.В. Болдыревым. Гомогенизационный метод представлен М.Р. Bendsøe и N. Kikuchi. Развитием эволюционных методов занимались Y.M. Xie, G.P. Steven, G.I.N. Rozvany, X.Y. Yang, O.M. Querin, W. Prager. Метод Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) предложен М.Р. Bendsøe. Метод Level set или установки уровня разработан S. Osher и J.A. Sethian. Метод топологической производной представлен J. Sokolowski, A. Zochowski. Метод фазового поля разработан В. Bourdieu и А. Chambolle. Генетическими алгоритмами занимались J.H. Holland, C.D. Chapman, K. Saitou, M.J. Jakiela. Топологическую оптимизацию в вероятностной постановке активно исследовали G. Kharmanda, J. Lógó, P.D. Dunning, H.A. Kim, A. Csébfalvi, G. Mullineux, J.K. Guest, T. Igusa. Проблемой интерпретации результатов топологической оптимизации занимались Д.К. Лукомский, С.А. Фрейлехман, К.С. Брюхова, П.В. Максимов, К.В. Фетисов, Г.Г. Шелякина, Д.Д. Попова, Н.А. Самойленко и др.

Несмотря на большое количество методов топологической оптимизации, их применение, как правило, ограничивается определением конструкции силовых деталей, например, кронштейнов, лопаток турбины, корпусных деталей и т.д. В авиационной отрасли представлен ряд работ по определению КСС крыла. Однако, проведённый анализ публикаций показывает, что методическая база для определения КСС БКА методами топологической оптимизации на настоящий момент практически отсутствует.

Объектом исследования является перспективный КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), представленный на Рисунке 1, прототипом которого выступает КА «Кондор-ФКА-М» (Рисунок 2).

Предметом исследования являются проектные параметры КСС БКА с перспективным КА.

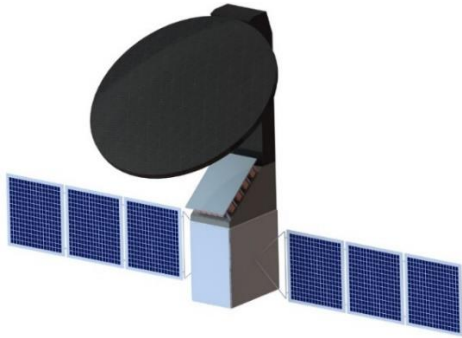


Рисунок 1 – Объект исследования

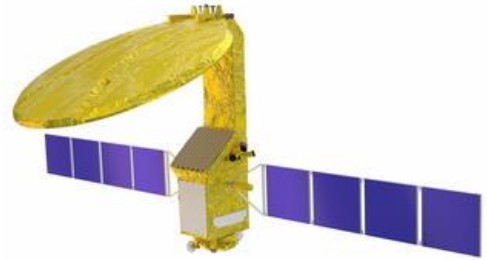


Рисунок 2 – Прототип объекта исследования – «Кондор-ФКА-М»

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методики оптимизации конструктивно-силовой схемы блока космического аппарата для обеспечения динамической совместимости с ракетой-носителем.

Методика должна быть комплексной, позволяющая оперативно определять КСС БКА с использованием топологической оптимизации.

Задачи исследования, сформулированные для достижения поставленной цели диссертационной работы:

1. Разработка методики определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА с использованием топологической оптимизации.
2. Разработка специального программного обеспечения (СПО) по определению расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА.
3. Разработка методики определения КСС адаптера КА с использованием топологической и параметрической оптимизаций.
4. Определение КСС БКА с перспективным КА с помощью разработанных методик и СПО.

Научная новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые использована топологическая оптимизация для определения количества и мест установки межпанельных кронштейнов корпуса КА.

2. Разработана модификация метода SIMP, позволяющая значительно сократить размерность задачи оптимизации.

3. Предложен подход к применению топологической оптимизации, отличающийся от традиционного тем, что результатом оптимизации является не конструкция несущих элементов, а их количество и расположение. Это позволяет устранить ряд недостатков, присущих традиционному использованию топологической оптимизации и значительно ускорить процесс проектирования БКА.

4. Найдено новое конструктивное решение силовой схемы адаптера, отличающееся наличием локальных обшивок в местах крепления КА, позволяющее увеличить жёсткость адаптера.

Теоретическая значимость

В работе сформированы теоретические основы проектирования КСС БКА. Построена комплексная методика на основе достаточно строгих и обоснованных формализаций выбора проектных параметров КСС БКА с использованием результатов топологической оптимизации. В работе разработана модификация метода SIMP топологической оптимизации, а также предложен новый подход к применению топологической оптимизации, отличающийся от традиционного тем, что результатом оптимизации является не конструкция несущих элементов, а их расположение в КСС. Всё это позволяет устранить ряд недостатков, присущих традиционному использованию топологической оптимизации и значительно ускорить процесс проектирования КСС БКА.

Практическая значимость

1. Разработанное СПО DILIB для определения мест установки межпанельных кронштейнов, соединяющих тепловые сотовые панели (ТСП) корпуса КА, внедрено в АО «ВПК «НПО машиностроения».

2. Основные результаты работы были внедрены в АО «ВПК «НПО машиностроения» и используются при проектировании перспективных КА.

3. Предлагаемая методика была применена при проведении курсовых и дипломных проектов в учебном процессе на кафедре «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методология и методы исследования

Основными методами исследования являются метод SIMP топологической оптимизации, алгоритмы нелинейного программирования для задачи Каруша-Куна-Таккера, метод конечных элементов (МКЭ), метод Ланцоша для решения задачи на собственные значения.

Положения, выносимые на защиту

1. Комплексная методика оперативного определения КСС БКА для удовлетворения требований динамической совместимости КА с РН с использованием топологической оптимизации.

2. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА с использованием топологической оптимизации.

3. Методика определения КСС адаптера КА с использованием топологической и параметрической оптимизаций.

4. Результаты определения КСС БКА с перспективным КА с использованием разработанных методик и СПО DILIB.

Достоверность научных результатов обеспечивается корректным использованием математических методов, проведением поверочных расчётов получаемых КСС в известном конечно-элементном комплексе MSC.Nastran, применением разработанных методик в практических задачах, сравнением полученных результатов с традиционным проектированием, а также сравнением с результатами испытаний, полученных в процессе внедрения.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на восьми международных и всероссийских научно-технических конференциях: XLI–XLVI Академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика

С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022–2017 гг.; XXI Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов – Королёв, РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, 30 октября – 3 ноября 2017 г.; II Российская научно-практическая конференция «Инженерные технологии MSC Software для высших учебных заведений» (MSC-ВУЗ-2016) – Москва, МАДИ, 14 апреля 2016 г.

По теме работы автором опубликовано шесть статей, из них четыре – в рецензируемых изданиях Перечня ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.13.

Личный вклад. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включён лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и пяти приложений. Полный объём диссертации составляет 149 страниц (с приложениями 182 страницы), включая 70 рисунков и 23 таблицы. Список литературы содержит 131 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится общая характеристика работы.

В **первой главе** показаны преимущества подхода «точного попадания» над традиционным при разработке КСС БКА, основанного на использовании топологической оптимизации.

Проведён подробный анализ методов топологической оптимизации, который показал, что наиболее подходящим методом для решения поставленных задач является метод SIMP. В данном методе проектными переменными являются виртуальная плотность каждого КЭ из проектной области, которая меняется в пределах от 0 до 1, где «0» соответствует пустоте, а «1» – наличию материала. Для

учёта изменения массовых и жесткостных характеристик КЭ в зависимости от проектных переменных, плотность ρ_i и модуль упругости E_i в каждом КЭ задаётся следующим образом:

$$\begin{aligned}\rho_i &= x_i \cdot \rho_{mat}, \\ E_i &= x_i^p E_{mat},\end{aligned}\tag{1}$$

где ρ_{mat} – плотность материала конструкции, p – параметр штрафа, E_{mat} – модуль упругости материала конструкции.

Результатом оптимизации при использовании метода SIMP является распределение виртуальной плотности от 0 до 1 по проектной области. При обработке результатов удаляют элементы ниже выбранного значения (как правило ниже 0,3) и далее сглаживают границы, тем самым получая рациональную КСС.

В конце главы представлена общая математическая формулировка задачи выбора проектных параметров КСС БКА для удовлетворения требований динамической совместимости КА с РН с использованием методов КЭ оптимизации:

$$\begin{aligned}\min_X M_K, \\ g_{f_i}^H(X) = \bar{f}_i^H - f_i \leq 0, \quad i \in \mathbb{N}, \\ g_{f_i}^B(X) = f_i - \bar{f}_i^B \leq 0, \quad i \in \mathbb{N},\end{aligned}\tag{2}$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ – вектор проектных переменных, n – количество проектных переменных, M_K – масса конструкции БКА, $g_{f_i}^H$ и $g_{f_i}^B$ – нижнее и верхнее ограничение на частоту i -го тона собственных колебаний соответственно, \bar{f}_i^H и \bar{f}_i^B – нижнее и верхнее значение допустимого диапазона частоты i -го тона собственных колебаний соответственно, f_i – частота i -го тона собственных колебаний.

При необходимости, задача (2) может дополняться и другими ограничениями, например, на прочность, устойчивость, геометрические размеры.

В работе показано, что данную задачу можно разделить на две, используя метод Данкерли:

- определение параметров КСС корпуса КА (характеристики силовых сотовых панелей, количество и положение межпанельных кронштейнов и т.д.);
- определение параметров КСС адаптера (материал, конструкция шпангоутов, характеристики силового набора, толщина обечайки и т.д.).

В первом варианте задача решается для упругого КА на жёстком основании, во втором – для упругого адаптера на жёстком основании с абсолютно жёстким КА. Такое разделение позволяет независимо друг от друга разрабатывать КСС адаптера и корпуса КА, что позволяет упростить конечно-элементные модели (КЭМ), тем самым сокращая время на разработку. Стоит отметить, что в конструкторских бюро нередко корпус КА проектируется отдельно от адаптера, и их разработка сильно разнесена по времени, поэтому использование двух независимых методик выгодно и в практическом смысле.

В работе показано, что задачу определения КСС корпуса КА можно привести к задаче определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА.

Таким образом, с учётом метода Данкерли предложена комплексная методика оперативного определения КСС БКА для удовлетворения требований динамической совместимости КА с РН, состоящая из двух частей:

- 1) методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА с использованием топологической оптимизации (методика 1);
- 2) методика определения КСС адаптера с использованием топологической и параметрической оптимизаций (методика 2).

После определения КСС адаптера и корпуса КА по методикам 1 и 2, проводится параметрическая оптимизация полной КЭМ БКА с целью уточнения толщин силовых элементов адаптера. Далее проводятся поверочные расчёты. Общая схема использования комплексной методики представлена на Рисунке 3.

Стоит отметить, что решение задачи по определению мест установки межпанельных кронштейнов и решение задачи по определению КСС адаптера не зависят друг от друга, поэтому если не требуется проектировать адаптер, а используется стандартный, то можно определять только расположение

межпанельных кронштейнов корпуса КА, используя только методику 1. С другой стороны, если уже известно расположение межпанельных кронштейнов корпуса, например, используется унифицированная космическая платформа, и необходимо разработать новый адаптер, например, под более тяжёлый КА, то можно воспользоваться только методикой 2. Также комплексная методика допускает включение в неё дополнительных задач, например, задачу усиления узлов крепления полезной нагрузки (ПН).

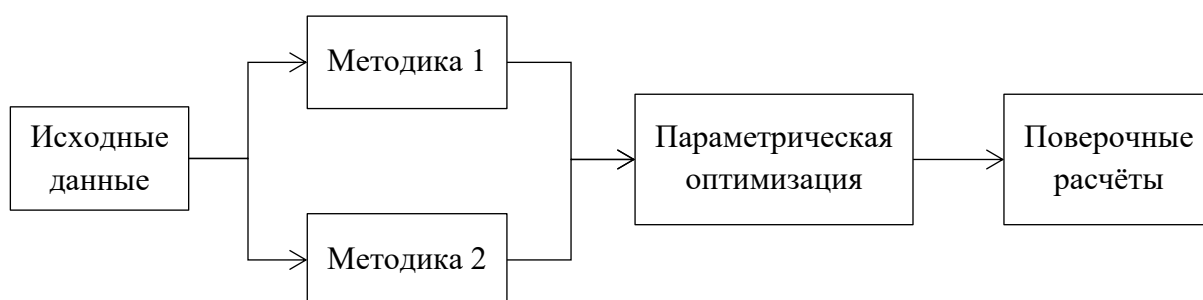


Рисунок 3 – Схема применения комплексной методики

Во **второй главе** предложена методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА с использованием топологической оптимизации (методика 1). Она предназначена для оперативного определения минимального необходимого количества межпанельных кронштейнов и мест их установки с целью удовлетворения требований динамической совместимости КА с РН. Конструкция межпанельных кронштейнов не определяется. Методика построена таким образом, чтобы при изменении исходных данных корректировка КЭМ была минимальна, что позволяет значительно ускорить выдачу рекомендаций по КСС корпуса КА в условиях высокой неопределённости на начальных этапах проектирования. Получаемые результаты используются для определения нагрузок и дальнейшей разработки конструкции межпанельных кронштейнов.

Исходными данными для использования методики являются: компоновочная схема КА; габаритные размеры ТСП; механические характеристики ТСП (характеристики материалов, форма и размеры ячейки, толщины обшивок и сотового заполнителя); области возможной установки

межпанельных кронштейнов корпуса КА; массовые, центровочные и инерционные характеристики (МЦИХ) приборов; координаты узлов крепления приборов; координаты узлов крепления кронштейнов, предназначенных для установки КА на адаптер; МЦИХ КА.

Суть методики заключается в моделировании области возможной установки межпанельных кронштейнов КЭ типа НЕХ, где каждый кронштейн моделируется простой геометрией и состоит из минимального числа КЭ. Далее проводится топологическая оптимизация этой области, результатом которой являются места установки межпанельных кронштейнов.

Методика написана в двух вариантах:

– для использования в программном комплексе MSC.Nastran, где каждый кронштейн моделируется несколькими проектными переменными, число которых равно числу КЭ, описывающих этот кронштейн (Рисунок 4а);

– для использования в разработанном СПО «Determination of Installation Locations for Interpanel Brackets (DILIB)», где каждый кронштейн моделируется одной проектной переменной (Рисунок 4б).

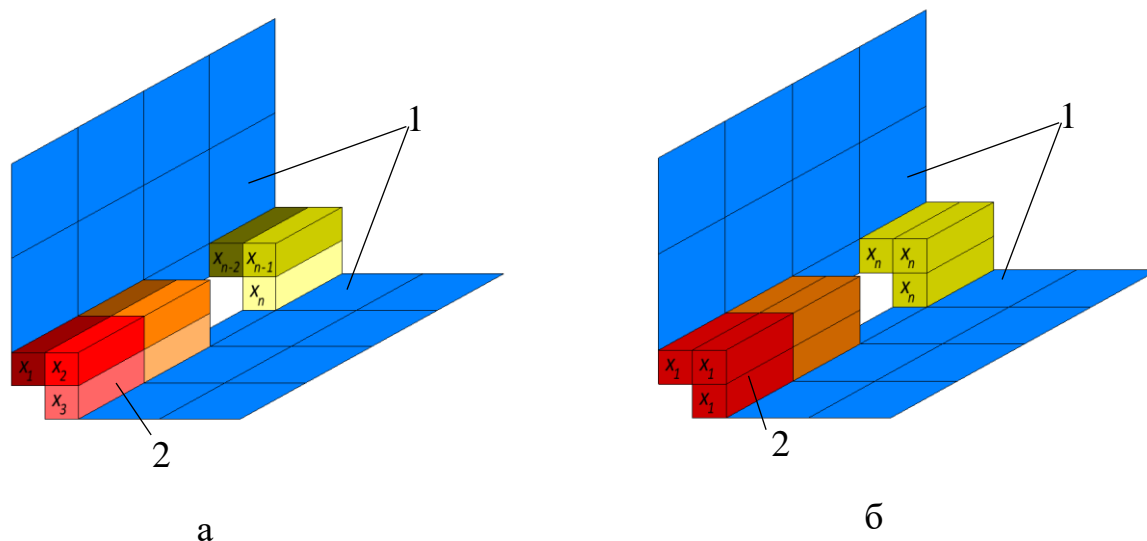


Рисунок 4 – Схема КЭМ для двух вариантов методики:

а – в MSC.Nastran; б – в СПО DILIB

1 – КЭМ ТСП; 2 – КЭМ возможной установки межпанельных кронштейнов (проектная область)

Разделение на два варианта обусловлено тем, что в известных КЭ пакетах типа MSC.Nastran нет возможности либо слишком сложно задавать одну проектную переменную на несколько КЭ в задачах топологической оптимизации, с другой стороны, СПО DILIB предназначено для решения задач только определённого типа, что не позволяет при необходимости добавлять другого рода ограничения, например, ограничения на прочность, устойчивость.

Для определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА рекомендуется применять вариант для СПО DILIB, в случае невозможности его использования или необходимости объединения данной задачи с другими (введения дополнительных ограничений) следует воспользоваться вариантом для MSC.Nastran.

Общая формулировка решаемой задачи записывается в виде

$$\begin{aligned} & \min_X m, \\ & g_{kl}(X) = \bar{\xi}_t^{kl} - \xi_t^{kl}(X) \leq 0, \quad kl = 1, 2, \dots, ql, t \leq N, \\ & g_{ku}(X) = \xi_t^{ku}(X) - \bar{\xi}_t^{ku} \leq 0, \quad ku = 1, 2, \dots, qu, t \leq N, \end{aligned} \quad (3)$$

где m – масса элементов проектной области, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ – вектор проектных переменных, kl и ku – номер ограничения частоты собственных колебаний снизу и сверху соответственно, t – номер тона, на который накладываемое ограничение, $\bar{\xi}_t^{kl}$ и $\bar{\xi}_t^{ku}$ – ограничение на собственное значение t -го тона, соответствующего kl -ому и ku -ому ограничению соответственно, ξ_t^{kl} и ξ_t^{ku} – собственное значение t -го тона, на которое накладываемое kl -ое и ku -ое ограничение соответственно, ql и qu – число нижних и верхних ограничений соответственно, N – число степеней свободы задачи.

Для реализации второго варианта, ввиду использования одной проектной переменной для изменения свойств нескольких КЭ, необходима модификация метода SIMP.

Для модифицированного метода SIMP с учётом соотношения (1) масса проектной области определяется по формуле

$$m(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{s_i} \rho_i V_{ij} = \rho_{mat} \sum_{i=1}^n \left(x_i \sum_{j=1}^{s_i} V_{ij} \right), \quad (4)$$

где j – номер КЭ в i -ой группе КЭ, соответствующей i -ой проектной переменной; V_{ij} – объём j -го КЭ в i -ой группе КЭ, соответствующей i -ой проектной переменной, s_i – число КЭ в i -ой группе КЭ.

Решение задачи (3) решается с использованием функции Лагранжа и необходимых условий Каруша-Куна-Таккера

$$\begin{aligned}
 L(X) &= m(X) + \sum_{kl=1}^{ql} \lambda_{kl} g_{kl}(X) + \sum_{ku=1}^{qu} \lambda_{ku} g_{ku}(X), \\
 \frac{\partial L(X^*)}{\partial x_i} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\
 \lambda_{kl} g_{kl}(X^*) &= 0, \quad kl = 1, 2, \dots, ql, \\
 \lambda_{ku} g_{ku}(X^*) &= 0, \quad ku = 1, 2, \dots, qu, \\
 \lambda_{kl} &\geq 0, \quad kl = 1, 2, \dots, ql, \\
 \lambda_{ku} &\geq 0, \quad ku = 1, 2, \dots, qu,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $\lambda_{kl}, \lambda_{ku}$ – неопределённые множители Лагранжа, X^* – оптимальная точка в пространстве проектных переменных.

Решая систему (5), используя соотношения (1), а также формулировку обобщённой задачи на собственные значения и теорию МКЭ, получим критерий оптимальности в виде

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{1}{\frac{\partial m}{\partial x_i}} \left(\sum_{kl=1}^{ql} \lambda_{kl} \frac{\partial g_{kl}}{\partial x_i} + \sum_{ku=1}^{qu} \lambda_{ku} \frac{\partial g_{ku}}{\partial x_i} \right) = 1, \\
 \frac{\partial m}{\partial x_i} &= \rho_{mat} \sum_{j=1}^{s_i} V_{ij}, \\
 \frac{\partial g_{kl}}{\partial x_i} &= \frac{1}{x_i} \xi_t \{\bar{W}_t\}^T \sum_{j=1}^{s_i} [B_{ij}]^T [M_e^{ij}] [B_{ij}] \{\bar{W}_t\} - \frac{p}{x_i} \{\bar{W}_t\}^T \sum_{j=1}^{s_i} [B_{ij}]^T [K_e^{ij}] [B_{ij}] \{\bar{W}_t\}, \\
 \frac{\partial g_{ku}}{\partial x_i} &= \frac{p}{x_i} \{\bar{W}_t\}^T \sum_{j=1}^{s_i} [B_{ij}]^T [K_e^{ij}] [B_{ij}] \{\bar{W}_t\} - \frac{1}{x_i} \xi_t \{\bar{W}_t\}^T \sum_{j=1}^{s_i} [B_{ij}]^T [M_e^{ij}] [B_{ij}] \{\bar{W}_t\},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где \bar{W}_t – нормированный собственный вектор t -го тона относительно матрицы масс, M_e^{ij} – матрица масс ij -го КЭ, K_e^{ij} – матрица жёсткости ij -го КЭ, B_{ij} – булева матрица ij -го КЭ для включения его матрицы жёсткости и матрицы масс в матрицу жёсткости и матрицу масс системы.

Стоит отметить, что соотношение (6) справедливо и для первого варианта методики. В этом случае число КЭ в i -ой группе КЭ s_i равно 1.

Для реализации второго варианта методики была разработана итерационная схема и СПО DILIB.

Для подтверждения правильности работы алгоритма была разработана тестовая задача № 1, КЭМ которой представлена на Рисунке 5, и определены места установки межпанельных кронштейнов с использованием двух вариантов методики (Рисунок 6). Также для данной задачи была проведена проверка сеточной сходимости.

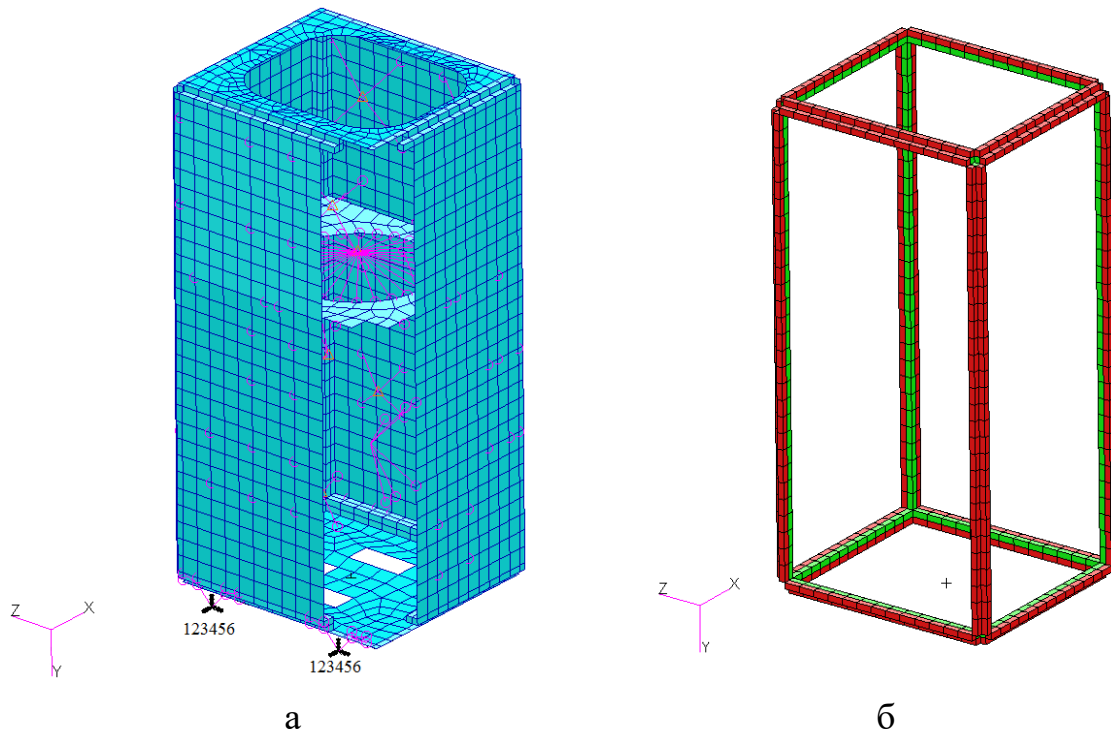


Рисунок 5 – КЭМ тестовой задачи № 1:

а – КЭМ КА (часть КЭМ не показана); б – КЭМ проектной области (красным цветом обозначены КЭ соприкасающиеся с КЭ ТСП, зелёным – центральные КЭ)

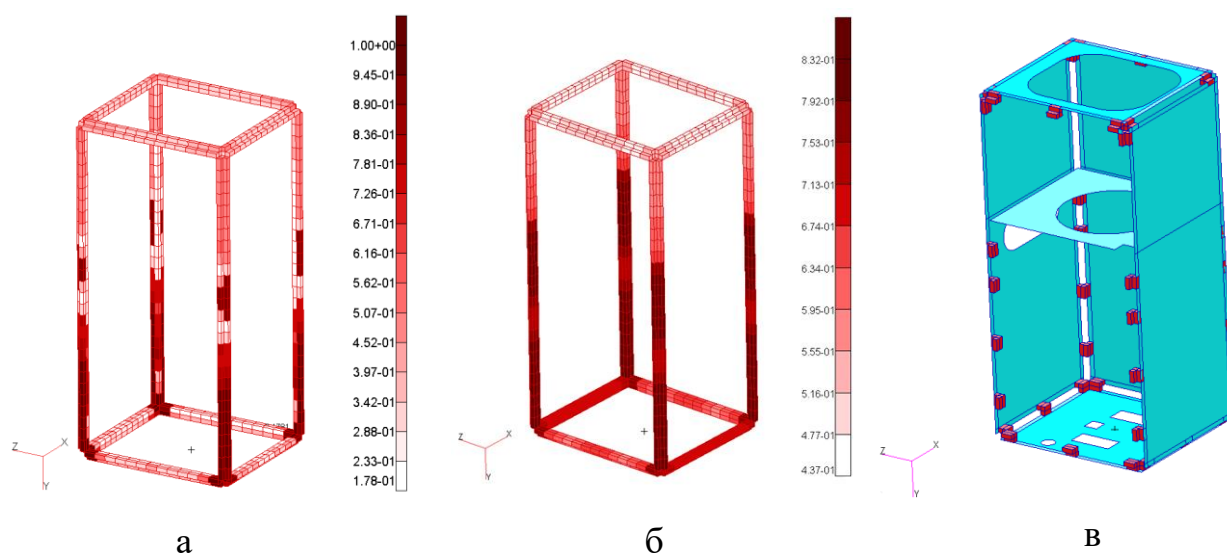


Рисунок 6 – Результаты расчёта тестовой задачи № 1:
 а – вариант методики с MSC.Nastran, б – вариант методики с СПО DILIB
 в – определённые места установки межпанельных кронштейнов

В **третьей главе** представлена методика определения КСС адаптера с использованием топологической и параметрической оптимизаций. Рассматриваемая методика предназначена для оперативного определения КСС адаптера одиночного запуска КА, состоящего из двух шпангоутов, соединённых металлической обечайкой, подкреплённой силовым набором, и обеспечивает выполнение требований динамической совместимости КА с РН. Благодаря этому исключается необходимость вводить какие-либо дополнительные изменения в конструкцию, связанные с заданными требованиями. Полученная информация о КСС используется для детальной проработки конструкции адаптера.

Для применения методики необходимы следующие исходные данные: МЦИХ КА; характеристики материалов, используемых в конструкции адаптера; диаметры верхнего и нижнего шпангоутов, их минимальная строительная высота (определяется механическими интерфейсами средства выведения и КА, а также из условия прочности крепёжных узлов); высота адаптера КА (определяется компоновкой КА); требования динамической совместимости КА с РН; нагрузки, действующие на БКА на всех этапах эксплуатации.

Определение КСС адаптера состоит из нескольких последовательных этапов:

1) определение мест установки силового набора с использованием топологической оптимизации, где целевой функцией является масса конструкции, которая минимизируется, ограничения накладываются на собственные частоты и напряжения для наиболее критических случаев нагружения;

2) определение типа и количества элементов силового набора с использованием топологической оптимизации, где целевой функцией является первый основной (с наибольшей модальной массой) тон собственных колебаний, которая максимизируется, ограничения накладываются на массу проектной области;

3) определение предварительных толщин элементов КСС с помощью параметрической оптимизации, где целевой функцией является масса конструкции, которая минимизируется, ограничения накладываются на собственные частоты, напряжения и запасы устойчивости для наиболее критических случаев нагружения;

4) оптимизации шпангоутов с помощью топологической оптимизации, где целевая функция и ограничения аналогичны второму этапу;

5) уточнение толщин элементов КСС с помощью параметрической оптимизации, где целевая функция и ограничения аналогичны третьему этапу.

Такое разделение процесса оптимизации обусловлено увеличением скорости расчёта, а также исключением проблем, возникающих при одновременном использовании оптимизаций различного рода.

Для иллюстрации эффективности разработанной методики в работе приведено решение тестовой задачи № 2. На Рисунке 7 представлена начальная КЭМ и полученный результат. Также для данной задачи была проведена проверка сеточной сходимости.

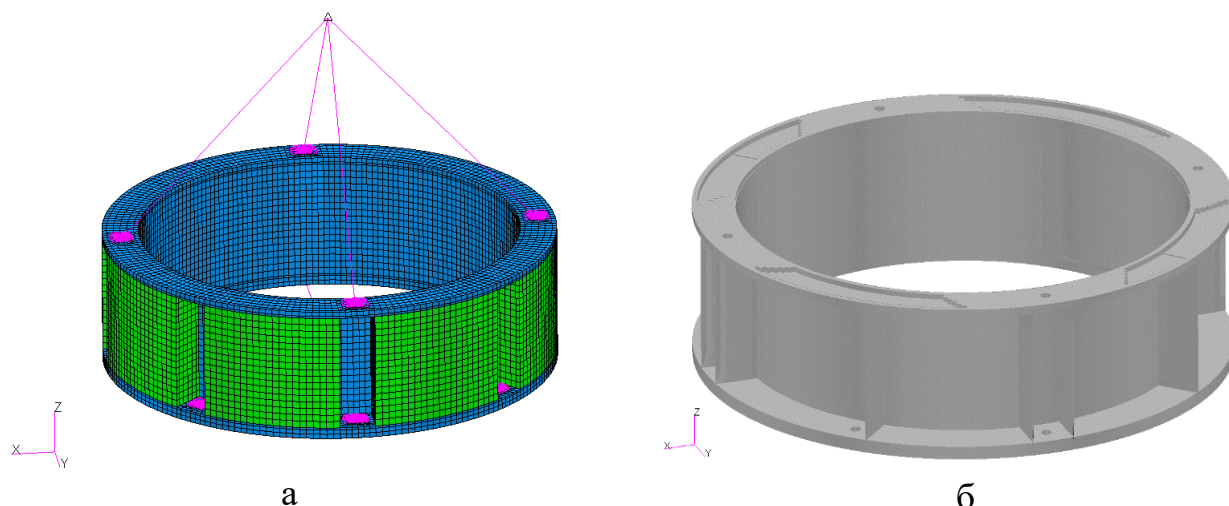


Рисунок 7 – Тестовая задача № 2:
а – начальная КЭМ, б – полученная КСС адаптера

В четвёртой главе представлено применение разработанной комплексной методики к КСС БКА с перспективным КА ДЗЗ.

Общая схема БКА показана на Рисунке 8. БКА с КА массой 2020 кг выводится на орбиту на РН «Союз-2.1а». В соответствии с требованиями, предъявляемыми разработчиком РН, низшая основная частота поперечных колебаний БКА относительно жёсткого основания, совпадающего с плоскостью стыка адаптера с РБ «Фрегат» (РБФ) должна быть не ниже 12 Гц, продольная – не ниже 28 Гц.

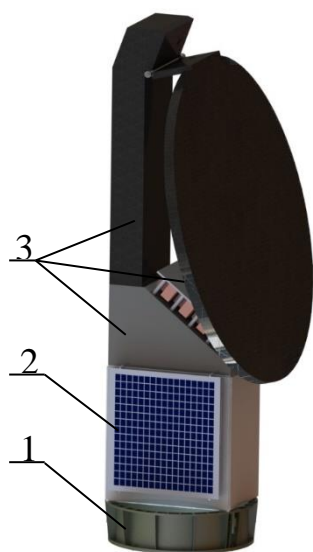


Рисунок 8 – Общая схема БКА:
1 – адаптер; 2 – корпус КА; 3 – ПН

Ввиду высокой неопределённости исходных данных и упрощённости КЭМ повышены требования динамической совместимости таким образом, чтобы низшая основная частота поперечных собственных колебаний БКА относительно жёсткого основания, совпадающего с плоскостью стыка адаптера с РБФ была не ниже 13,5 Гц, продольная – не ниже 32 Гц.

Полётные нагрузки принимаются в соответствии со справочником пользователя на РН, нагрузки при наземной эксплуатации, а также коэффициенты безопасности на всех этапах эксплуатации принимаются в соответствии с ГОСТ Р 56514-2015.

Решение задачи по определению мест установки межпанельных кронштейнов представлено на Рисунке 9. Решение задачи по определению КСС адаптера представлено на Рисунке 10.

С использованием полученных результатов разработана КЭМ БКА (Рисунок 11) и проведена параметрическая оптимизация для уточнения толщин силовых элементов адаптера. После чего был проведён поверочный расчёт.

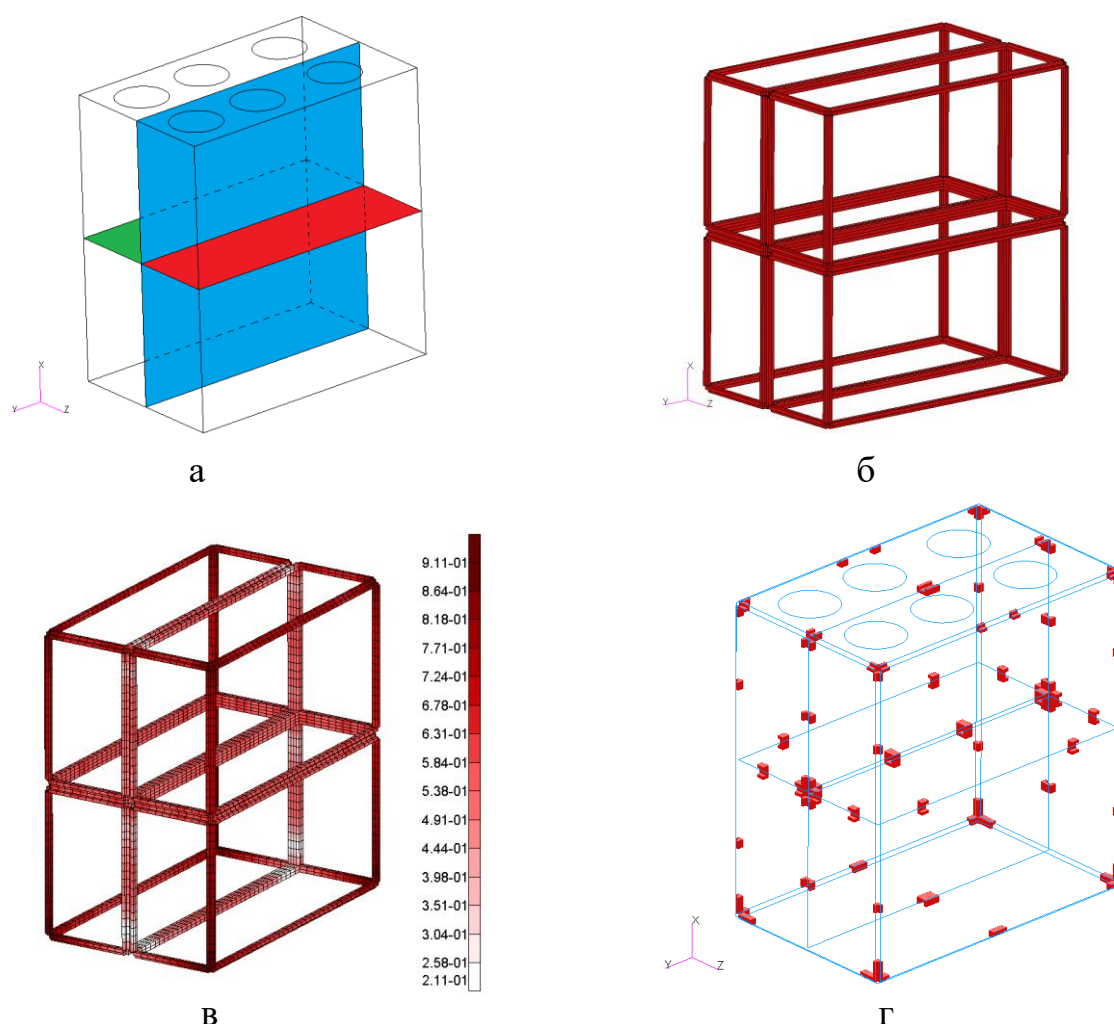


Рисунок 9 – Определение мест установки межпанельных кронштейнов:
 а – общая схема корпуса КА (цветом закрашены внутренние ТСП);
 б – проектная область; в – результаты топологической оптимизации;
 г – определённые места установки межпанельных кронштейнов

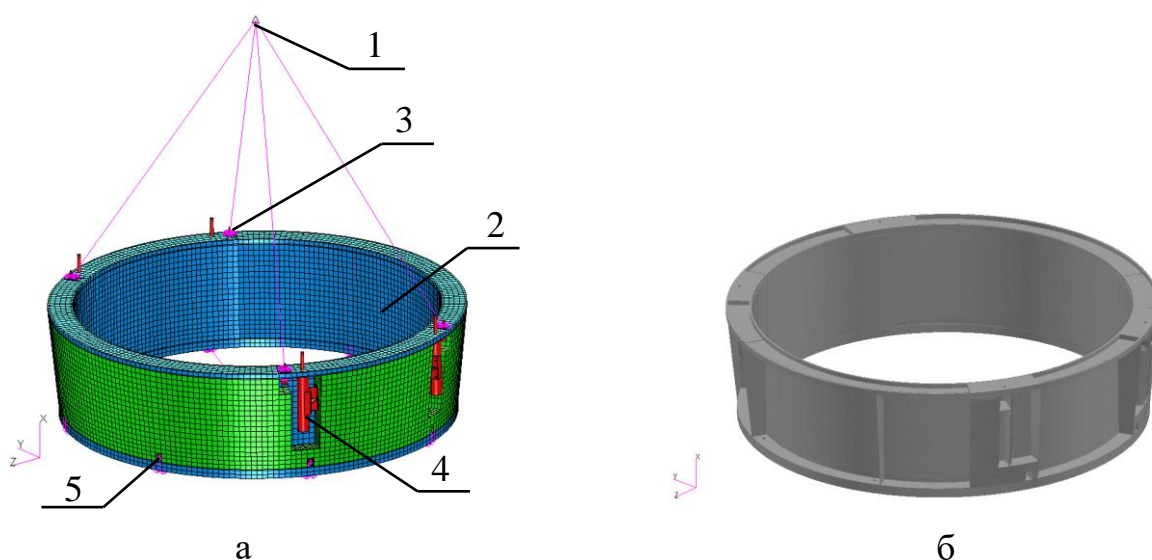


Рисунок 10 – Определение КСС адаптера:
 а – начальная КЭМ, б – полученная КСС адаптера
 1 – КА; 2 – адаптер; 3 – пироболт; 4 – толкатель; 5 – шпилька с гайкой

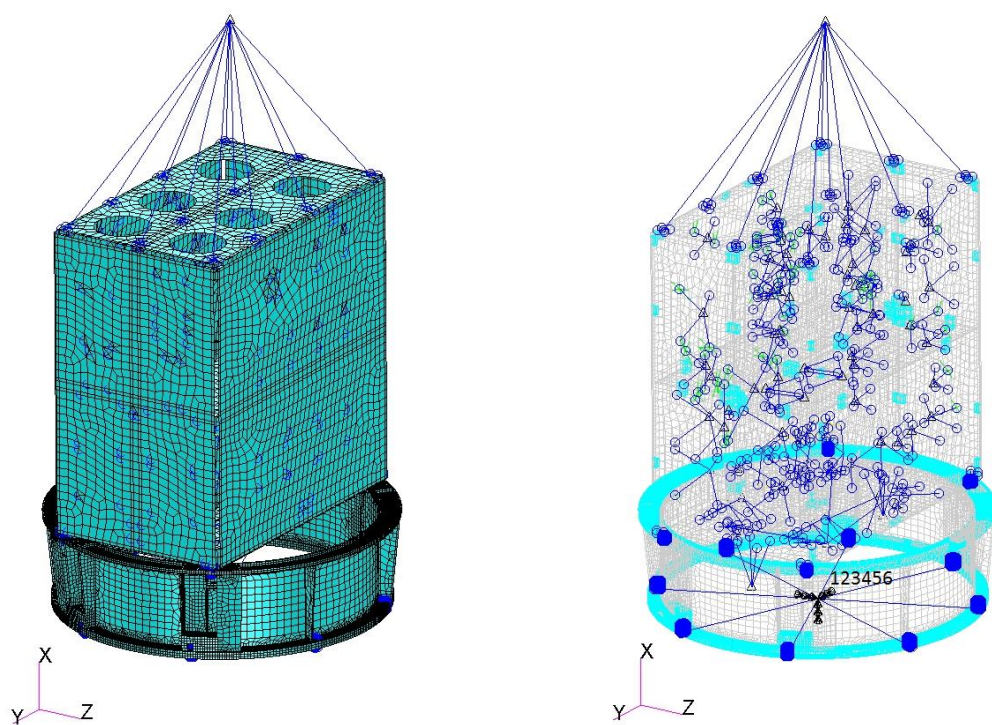


Рисунок 11 – КЭМ БКА

Поверочный расчёт показал, что низшая частота поперечных собственных колебаний БКА относительно жёсткого основания составляет 13,5 Гц, низшая продольная частота – 62,4 Гц. Таким образом, требования динамической совместимости для выведения БКА на РН «Союз-2.1а» выполнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика оптимизации конструктивно-силовой схемы блока космического аппарата для обеспечения динамической совместимости с ракетой-носителем.

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Разработана **методика** определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса КА с использованием топологической оптимизации.

В разработанной методике **впервые** использована топологическая оптимизация для определения количества и мест установки кронштейнов корпуса КА и предложена **новая модификация метода SIMP**, позволяющая значительно, **в три раза**, сократить размерность задачи оптимизации в сравнении со стандартным методом.

2. Разработано **специальное программное обеспечение** «Determination of Installation Location for Interpanel Brackets (DILIB)» по определению расположения межпанельных кронштейнов.

3. Разработана **методика** определения КСС адаптера КА с использованием топологической и параметрической оптимизаций, в которой **впервые** предложен подход к применению топологической оптимизации, отличающийся от традиционного тем, что результатом оптимизации является не **конструкция** несущих элементов, а их **количество и расположение**.

4. С помощью разработанных методик и СПО DILIB определена КСС БКА с перспективным КА для удовлетворения требований динамической совместимости с РН «Союз-2.1а», при использовании которых, найдено **новое конструктивное решение** силовой схемы адаптера, отличающееся наличием локальных обшивок в местах крепления КА и позволяющее увеличить жёсткость адаптера.

5. Разработанный комплекс методик применён при проектировании КА «Бауманец-3» и «Кондор-ФКА-М» в АО «ВПК «НПО машиностроения». При использовании методик установлено, что время проектирования КСС БКА **сокращено в два раза**, масса адаптера КА «Кондор-ФКА-М» **сокращена на 29,5 %**.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода может быть ориентировано на объединение метода SIMP топологической оптимизации с методом ESO или BESO, что позволит ещё сократить время на проектирование КСС БКА. Для этого необходимо решить проблему появления сингулярных матриц.

В ПРИЛОЖЕНИИ к диссертационной работе представлены правила заполнения карт СПО DILIB; результаты расчёта второго и четвёртого этапа определения КСС адаптера; формы основных тонов колебаний БКА; Акты о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ВПК «НПО машиностроения» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные научные результаты диссертации изложены в работах, опубликованных соискателем учёной степени:

Научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации

1. Боровиков, А.А. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием модифицированного метода SIMP топологической оптимизации / А.А. Боровиков, О.Н. Тушев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 1. – С. 1-12.

2. Боровиков, А.А. Методика формирования конструктивно-силовой схемы адаптера космического аппарата для удовлетворения требований динамической совместимости методами топологической и параметрической оптимизации / А.А. Боровиков, О.Н. Тушев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 12. – С. 1-17.

3. Боровиков, А.А. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием топологической оптимизации / А.А. Боровиков, А.Г. Леонов, О.Н. Тушев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 4-19.

4. Боровиков, А.А. Разработка силовой конструкции космического аппарата с использованием топологической оптимизации для двух вариантов технологии изготовления / А.А. Боровиков, О.Н. Тушев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 9. С. 1-13.

Научные статьи в других изданиях

1. Боровиков, А.А. Топологическая оптимизация переходного отсека КА / А.А. Боровиков, С.М. Тененбаум // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2016. – № 5. – С. 16-30.

Научные статьи в материалах всероссийских и международных конференций

1. Боровиков, А.А. Актуальность использования конечно-элементной оптимизации для разработки изделий РКТ / А.А. Боровиков // Ракетные комплексы и ракетно-космические системы. Проектирование, экспериментальная отработка, лётные испытания, эксплуатация: Труды секции 22 имени академика В.Н. Челомея XLII Академических чтений по космонавтике. – 2018. – Вып. 6. – С. 88-93.

Материалы всероссийских и международных научных конференций

1. Боровиков, А.А. Методика формирования конструктивно-силовой схемы адаптера космического аппарата для удовлетворения требований динамической совместимости космического аппарата с ракетой-носителем / А.А. Боровиков, О.Н. Тушев // XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2022 – С. 504–506.

2. Боровиков, А.А. Модифицированный алгоритм топологической оптимизации на основе метода SIMP / А.А. Боровиков // XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2022 – С. 507–510.

3. Боровиков, А.А. Методика оптимизации конструктивно-силовой схемы адаптера космического аппарата / А.А. Боровиков // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2021 – С. 445–447.

4. Боровиков, А.А. Модифицированный блочный алгоритм Ланцоша со стратегией выбора сдвига для решения симметричной задачи на собственные значения / А.А. Боровиков // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2020 – С. 654–656.

5. Боровиков, А.А. Особенности использования топологической оптимизации при проектировании космических аппаратов с точки зрения оптимальности упругих динамических характеристик / А.А. Боровиков, О.Н. Тушев // XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2019 – С. 324–325.

6. Боровиков, А.А. Апробация нового подхода в проектировании на примере переходного отсека космического аппарата / А.А. Боровиков // XLII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2018 – С. 417.

7. Боровиков, А.А. Пошаговое проектирование конструкции переходного отсека КА с использованием топологической оптимизации / А.А. Боровиков, С.М. Тененбаум // XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства. – Москва, 2017 – С. 38–39.

8. Боровиков, А.А. Разработка конструкции переходного отсека КА с использованием методов конечно-элементной оптимизации / А.А. Боровиков // XXI Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника. – Королёв, 2017. – С. 108–109.