

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации Яскевича Андрея Владимировича
«Компьютерные модели динамики стыковки и причаливания
космических аппаратов», представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.01 – «Теоретическая механика»

Одними из главных динамических операций, выполняемых космическими аппаратами на орбите, являются их стыковка и соединение с помощью космических манипуляторов. Математическое моделирование является неотъемлемой частью их проектирования и экспериментальной отработки. Достоверность и практическая значимость моделей определяется их свойствами, прежде всего корректностью и детальностью описания динамических процессов. Полезным, а в случае моделирования причаливания необходимым, свойством является высокая скорость вычислений. Из-за отсутствия до настоящего времени публикаций, в которых модели динамики стыковки и причаливания, обладают такими свойствами, представленная к защите диссертация является, несомненно, актуальной.

Причиной некорректности разработанных ранее моделей стыковки является упрощенное, без учета динамики описание функционирования стыковочных механизмов. Поэтому в представленной работе, прежде всего, устраняется этот недостаток. Стыковочные механизмы в ней рассматриваются как системы твердых тел со сложной структурой, кинематическими контурами. Из-за малой по сравнению с космическими аппаратами массы звеньев их динамика описывается отдельными уравнениями, на космический аппарат действуют силы и моменты в их основании. Для получения эффективных способов расчета динамики стыковочных механизмов сначала определяются их общие структурные свойства, а для уменьшения размерности уравнений выбирается известный метод разделения переменных на независимые и зависимые, предлагаются алгоритмы формирования и решения уравнений связей между ними. Далее определяется и разрабатывается набор алгоритмов, обеспечивающих наиболее быстрый расчет ускорений. Предлагается оригинальная комбинация метода разделения переменных, и наиболее современных и эффективных алгоритмов составного и присоединенного тела. Для расчета реакций, действующих на космический аппарат со стороны механизмов периферийного типа, используется оригинальный алгоритм. Корректное описание динамики создает основу для детального моделирования всего процесса стыковки. В моделях деформации звеньев и устройств демпфирования стыковочных механизмов автор учитывает гистерезис для увеличения адекватности описания динамического процесса. Использование при этом линеаризованных моделей, основанных на экспериментальных данных, представляется оправданным вследствие сложности деформируе-

мых конструкций. Такие модели основаны на простых вычислениях и позволяют максимально точно отразить результаты фактических измерений. Стыкуемые космические аппараты рассматриваются как свободные тела, движущиеся под действием контактных сил, сил и моментов, создаваемых их системами управления. Динамика их движения как твердых тел описывается уравнениями Ньютона-Эйлера, динамика упругих деформаций их конструкций – уравнениями в обобщенных координатах, определенных на собственных формах колебаний. Новизна при реализации этого известного приема заключается, прежде всего, в интеграции параметров упругих деформаций с реальными конечно-элементными моделями космических аппаратов, а также в способе численного расчета обобщенных координат и скоростей на основе новых соотношений, полученных из аналитических решений для заданного размера шага интегрирования. Это позволяет сохранить эффективность вычислений и детально учитывать динамические свойства конструкции космических аппаратов.

Идея автора использовать наборы элементарных геометрических фигур для описания контактирующих поверхностей стыковочных агрегатов является плодотворной, так как позволяет заменить решение сложных трансцендентных уравнений аналитическими соотношениями и простой итерационной процедурой на основе метода дихотомии. Такой подход и выбранный набор фигур легко обеспечивают достаточную детальность описания геометрии конструкции. Временно налагаемые контактные ограничения учитываются без использования уравнений связей, через контактную жесткость. Благодаря этому отпадает необходимость составления и решения дифференциально-алгебраических уравнений, что увеличивает скорость моделирования. Далее рассматриваются модели динамических процессов с использованием различных типов стыковочных механизмов. В моделях механизмов центрального типа учитывается относительная независимость функционирования осевого демпфера и привода от устройств бокового демпфера, получены их уравнения динамики. Для привода с дифференциалом они имеют минимальную размерность благодаря использованию метода разделения переменных. Кратко демонстрируется хорошее совпадение результатов моделирования стыковки с данными испытаний на 6-степенном стенде. Проведенное исследование динамики позволило выявить недостатки существующей кинематической схемы. Предложены и исследованы ее модификации, новизна которых подтверждается двумя полученными патентами. Предложена новая, упруго-адаптивная схема периферийного стыковочного механизма. Уравнения его динамики учитывают наличие дифференциальных шарниров в кинематических цепях. Разработаны модели новых устройств демпфирования и стягивания. Проведенный анализ динамики стыковки показывает, что данный механизм обладает хорошей «устойчивостью» к критичным сочетаниям параметров начальных условий. Для анализа динамики причаливания космических аппаратов с использованием кос-

мических манипуляторов и стыковочных механизмов со сложной кинематикой впервые предложена и реализована схема гибридного моделирования на 6-степенном динамическом стенде. Приводится краткое описание оригинальной модели механической системы «манипулятор SSRMS - перемещаемый полезный груз», экспериментальной установки и ее функционирования при моделировании причаливания модуля МИМ-1 к международной космической станции.

Все разработанные математические модели реализованы в виде компьютерных программ и включают новые оригинальные средства компьютерной анимации, обеспечивающие максимальную интеграцию графической и численной информации для облегчения анализа динамических процессов. Пространственное контактное взаимодействие в них отображается с помощью каркасных графических образов. Эффективность такого способа демонстрируется при описании, разработанного под руководством автора компьютерного стенда моделирования в реальном времени причаливания различного оборудования с использованием манипулятора ERA и простых устройств соединения.

Общий подход к моделированию динамики стыковки и причаливания космических аппаратов, модели конкретных механизмов и выполняемых ими процессов, обладают безусловной научной новизной. Глубокий анализ и правильные выводы из современного состояния теории моделирования динамики систем многих тел определил обоснованность выдвинутых теоретических положений.

Достоверность полученных результатов моделирования подтверждается в случае стыковки их сопоставлением с экспериментальными данными, в случае причаливания – результатами моделирования на других стендах.

Таким образом, разработаны теоретические основы моделирования динамики стыковки, позволяющие сочетать детальность описания и высокую скорость вычислений. Все разработанные модели были использованы для анализа динамики стыковки и причаливания конкретных космических аппаратов с использованием конкретных механизмов, что определяет их практическую ценность.

По содержанию автореферата можно сделать следующие замечания.

1. Желательно было бы коротко пояснить, как выбирались значения параметров жесткости в моделях контактного взаимодействия.
2. Не показано, почему не учитывается влияние на динамику стыковки подвижности топлива в баках космических аппаратов.

Однако, это не снижает общую оценку диссертации, которая представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. Ее автор Яскевич Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Асланов Владимир Степанович

« 24 » 02 2021 г.



Почтовый адрес: 443086, г Самара,
Московское шоссе, д. 34
Тел. +7-927-688-97-91
E-mail: aslanov_vs@mail.ru