

ОТЗЫВ

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

Диссертация имеет ярко выраженный прикладной характер и связана с решением актуальной научно-технической задачи исследования и разработки систем стыковки и причаливания космических аппаратов. Поэтому тема диссертационного исследования, посвященная разработке корректных, детальных и вычислительно эффективных компьютерных моделей стыковки и причаливания космических аппаратов, является актуальной.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, списка литературы и приложения. Введение содержит обзор, в котором проведен анализ возможностей и недостатков существующих методов моделирования динамики систем твердых и деформируемых тел, и их контактного взаимодействия.

В главах 1 – 5 разработана методика моделирования динамики стыковки космических аппаратов, которая обеспечивает, прежде всего, выполнение требований корректности и детальности этих моделей. При этом стыковочный механизм рассматривается как система твердых тел. Его движение, вследствие относительно малой инерции, описывается системами дифференциальных уравнений, отдельными от уравнений динамики стыкуемых космических аппаратов, на которых он установлен.

В главе 1 получены дифференциальные уравнения движения стыковочных механизмов, которые корректно определяют изменение их конфигурации под действием внешних контактных и внутренних демпфирующих сил и моментов. Автор проанализировал структурные особенности этих многоконтурных механизмов, выбрал наиболее эффективные известные алгоритмы учета постоянных связей и расчета ускорений, предложил оригинальную комбинированную схему их совместного использования, дополненную собственным алгоритмом расчета сил и моментов, действующих на космический аппарат.

В главе 2 рассмотрен метод описания движения двух классов стыковочных механизмов уравнениями минимальной размерности на основе комбинированного применения векторно-матричных алгоритмов расчета динамики кинематических цепей. Для периферийных механизмов разработан новый алгоритм расчета сил и моментов, действующих в основании механизма стыковки.

В главе 3 предложена методика расчета деформаций в звеньях и устройствах демпфирования стыковочных механизмов с учетом гистерезиса на основе кусочно-линейной аппроксимации экспериментальных данных.

В главе 4 динамика стыкуемых космических аппаратов описывается уравнениями Ньютона-Эйлера для свободных твердых тел и уравнениями упругих деформаций в обобщенных координатах, определенных на собственных формах колебаний конструкции аппаратов. Новизна при расчете деформаций

состоит в использовании в их уравнениях параметров, получаемых из детальных конечно элементных моделей реальных конструкций, а также в применении специально разработанных соотношений, заменяющих процесс численного интегрирования более простыми вычислениями, что существенно при учете нескольких тысяч тонов колебаний. Применительно к стыковке новизна состоит во введении в расчетную схему нескольких дополнительных систем координат и кинематических соотношений, описывающих контактное взаимодействие стыковочного механизма и пассивного стыковочного агрегата, установленных на стыкуемых объектах. Для расчета контактных реакций используется метод, основанный на определении величины их взаимного внедрения вдоль общих нормалей к контактирующим поверхностям. Это позволяет сохранить исходную структуру обыкновенных дифференциальных уравнений, уменьшить объем вычислений. Контакты предполагаются точечными, для них определяются координаты, величина нормального внедрения и его скорость, вектор направления относительной тангенциальной скорости. Эти параметры позволяют рассчитать векторы контактных реакций, входящие в уравнения динамики стыковочного механизма и стыкуемых космических аппаратов. Моделирование динамики стыковки начинается с момента первого контакта, для которого предлагается алгоритм расчета начального относительного положения объектов.

В главе 5 описываются модели и алгоритмы для расчета параметров контакта поверхностей стыковочных механизмов и стыковочных агрегатов. Ее новизна заключается в использовании для этого произвольных, но конечных наборов простых геометрических фигур. Для определения возможности контакта и расчета его параметров для каждой пары таких фигур, принадлежащих различным поверхностям, получены простые аналитические соотношения.

Разработанная в главах 1-5 методология является основой для построения описанных в главах 6 – 8 моделей динамических процессов, отличающихся друг от друга видом используемых механизмов, формой их направляющих элементов, способами управления.

В главе 6 динамическая независимость осевого демпфера в стыковочных механизмах центрального типа учитывается использованием отдельного дифференциального уравнения его движения. Втягивающий и выдвигающий штангу привод с дублирующими двигателями и дифференциалом, используемый и в других стыковочных механизмах, описывается уравнениями динамики минимальной размерности, полученными с помощью метода разделения переменных. Показано хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Результаты моделирования процесса стыковки позволили выявить недостатки кинематической схемы существующего стыковочного механизма. Предложены его модификации, допускающие больший диапазон погрешностей по начальным условиям и обеспечивающие совместимость с различными вариантами пассивных агрегатов. Их работоспособность подтверждена математическим моделированием динамики.

В главе 7 предлагается новый принцип функционирования стыковочных механизмов, основанный на накоплении и управляемом освобождении

накопленной пружинами потенциальной энергии. Для потребовалось уточнить методику за счет учета особенностей дифференциальных шарниров, разработки новых моделей устройств накопления энергии и стягивания. Результаты моделирования показывают, что успешная стыковка обеспечивается в более широком диапазоне начальных условий по сравнению с механизмами, основанными на других принципах.

Несколько особняком в работе стоит глава 8, в которой исследуется причаливание космического аппарата. При этом наведение аппарата на место стыковки осуществляется с помощью космического манипулятора, управляемого оператором. Эта часть работы изначально осуществлялась в рамках проекта разработке многоразового космического аппарата «Буран». Для тех случаев, когда стыковочные механизмы имеют сложную кинематику, автор впервые предложил использовать гибридное моделирование на 6-степенном стенде, при котором используются реальные стыковочные агрегаты, а расчет их относительного движения выполняется на основе численного решения уравнений динамики исполнительного механизма манипулятора и перемещаемого им космического аппарата. В работе представлен последний из нескольких разработанных автором вариантов таких уравнений. В нем динамика исполнительного механизма как цепочки твердых тел рассчитывается с помощью рекуррентного алгоритма сочлененного тела, который объединен с дифференциальными уравнениями приводов с редукторами. Деформации механизма учитываются с помощью матрицы жесткости, для расчета которой разработан оригинальный алгоритм. Описана схема гибридного моделирования причаливания модуля МИМ-1 манипулятором SSRMS («канадская рука») к международной космической станции и отдельные результаты. Результаты моделирования послужили обоснованием окончательно выбора способ управления.

Для моделирования в реальном времени причаливания различного оборудования с использованием простых механических устройств соединения под руководством автора был создан новый компьютерный стенд. Для этого им были разработаны математические модели контактного взаимодействия используемых устройств и предложено использовать их компьютерную визуализацию для помощи оператору в процессе управления.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Автор в диссертации делает акцент на разработку вычислительно эффективных методов моделирования процесса стыковки космических аппаратов. В настоящее время эта цель, по-видимому, теряет свою значимость с учетом современного состояния вычислительной техники. Однако следует учитывать, что когда начинались работы по теме диссертации примерно тридцать лет тому назад, возможности вычислительной техники были существенно более скромными.

2. Мне не понравился стиль изложения материалов диссертации, который приводит к большой трудоемкости понимания текста со стороны читателя. Это большое количество (около 60) используемых аббревиатур. Нарушение последовательности изложения материала, когда используемые обозначения и приводимые формулы, объясняются заметно позже их первого места

использования. Постановка задачи дается только в главе 4 на 108 стр. диссертации. Целесообразно было бы ее сделать главой 1, а потом разбираться в подробностях ее решения, приводимых в главах 1-3.

3. В перечне мест апробации диссертации на странице 28 автор дважды отметил один и тот же 65-й международный конгресс по астронавтике (IAC-2014).

Оценивая работу в целом, следует отметить, что в ней разработана эффективная методика корректного и детального математического моделирования очень сложных с точки зрения механики процессов стыковки и причаливания космических аппаратов. Контактное взаимодействие начинается с процесса сближения стыкуемых космических аппаратов. Активный аппарат использует свои двигатели для сближения, и оба аппарата поддерживают свою ориентацию. После первого контакта аппаратов начинается процесс стыковки. Стыковочные механизмы имеют сложную конструкцию. Они состоят из большого количества подвижных элементов, соединенных в различные кинематические цепи, содержат активные сервоприводы, пружинные механизмы и фрикционные тормозные устройства, защелки, обеспечивающие жесткое соединение космических аппаратов в конце процесса стыковки. Процесс контактного взаимодействия аппаратов отличается большим количеством возможных вариантов динамики его протекания. Он существенно меняется при небольших изменениях начальных условий. Процесс контактного взаимодействия чрезвычайно сложен, при этом происходит изменение положения и количества точек контакта. В рассматриваемых моделях учитывается упругость конструкции космических аппаратов и отдельных элементов стыковочных механизмов. Большое внимание уделяется вычислительной эффективности, разработанных автором методик моделирования процессов стыковки и причаливания. На основе этих методик реализованы программные комплексы, а в 8 главе для процесса причаливания программно-аппаратный комплекс. В результате численного решения уравнений динамики в каждой разработанной модели вычисляется большое число параметров, характеризующих относительное пространственное положение стыкуемых объектов, контактирующих элементов стыковочных механизмов, функционирование датчиков, устройств демпфирования и приводов стыковочных механизмов. Анализ большого объема разнородных, изменяющихся во времени данных, облегчает новый метод компьютерной визуализации, названный автором динамической мнемосхемой. Для всех разработанных моделей автором определена структура отображаемой информации и способ программной реализации.

Диссертация является цельной работой, посвященной решению одной комплексной проблемы, имеющей важное для практики значение. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.01 «Теоретическая механика» и требованиям к диссертациям в области физико-математических наук.

Полученные автором результаты, несомненно, отличаются научной новизной и в достаточной степени обоснованы. Достоверность результатов моделирования подтверждается сравнением с данными динамических испытаний и результатами стыковки реальных космических аппаратов.

Полученные результаты опубликованы в 22 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, из них 3 статьи в журналах, входящих в базы данных Web of Sciences и Scopus, а также в трудах трех международных конференций и коллективной монографии, индексируемых в Scopus. Результаты работы прошли апробацию, они многократно докладывались и обсуждались на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях.

Все разработанные модели были использованы при проектировании и экспериментальной оценке процессов стыковки и причаливания различных существующих и проектируемых космических аппаратов, механизмов стыковки. Предложенные автором модификации стыковочных механизмов защищены 4 патентами РФ. Работа имеет ярко выраженную практическую направленность. Это определяет практическую ценность выполненного исследования.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям (п.9 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. в редакции Постановления Правительства РФ № 1024 от 28.08.2017 г.), а ее автор Андрей Владимирович Яскевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Официальный оппонент,
 профессор кафедры "Теоретическая механика"
 МГТУ им. Н.Э. Баумана,
 профессор, доктор физико-математических наук
 (01.02.01 – теоретическая механика)

Лам = и ф
12.04.21

В.В. Лапшин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э.Баумана).

Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ФН-3 "Теоретическая механика".

Тел.: +7 (499) 263-63-91, e-mail: lapshin032@bmstu.ru

Подпись В.В. Лапшина заверяю:



А. Г. Матвеев

ЗАМ. НАЧ УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ: 8499-263-67-69