

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

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

Уже в своей кандидатской диссертации «Разработка методов автоматизированного формирования процедур расчета движения механических систем космических манипуляторов для полунатурного моделирования процессов управления» А.В. Яскевич продемонстрировал свой творческий заряд, решая задачу разработки методики автоматизированного формирования вычислительных процедур, гарантирующих расчет исполнительных механизмов космических роботов-манипуляторов с помощью минимального числа математических операций, в реальном масштабе времени. В докторской работе А.В. Яскевича целью является разработка теоретических основ корректного, детального и вычислительно эффективного компьютерного моделирования динамики причаливания и стыковки космических аппаратов. Сложность процессов, происходящих в реальных механических системах, действующих в обстановке активного контактного взаимодействия, требует значительной теоретической проработки. Она приводит к принципиальным трудностям при создании одновременно точных и достаточно скоростных алгоритмов решения современных механических задач. Корректное, детальное и вычислительно эффективное компьютерное моделирование становится одной из базовых проблем специальности 01.02.01 – теоретической механики. Именно это обстоятельство характеризует и обосновывает истинно докторский характер представленной диссертации.

В главе 1 диссертации решается задача разработки способа описания динамики стыковочного механизма с помощью минимального числа переменных. Ей предшествует анализ кинематики, то есть особенностей структуры связей этого класса механических систем тел.

В главе 2 разрабатывается набор алгоритмов, обеспечивающих наиболее эффективный расчет динамики различных классов стыковочных механизмов.

В главе 3 описаны модели деформации стыковочных механизмов, их кинематических цепей и отдельных звеньев с учетом гистерезиса.

В главе 4 представлены уравнения динамики стыкуемых космических аппаратов как свободных твердых или деформируемых тел.

В главе 5 описаны модели и компьютерные алгоритмы для расчета параметров контактного взаимодействия стыковочного агрегата.

В главе 6 представлены компьютерные модели динамики стыковки с использованием стыковочного агрегата центрального типа.

В главе 7 описана компьютерная модель динамики стыковки космических аппаратов с использованием упруго-адаптивного стыковочного механизма с параллельной кинематикой типа платформы Стьюарта.

Глава 8 посвящена описанию моделирования причаливания космических аппаратов с использованием космических роботоманипуляторов. Определены задачи и структура моделирующего стенда.

Представленные в диссертации алгоритмы расчета уравнений динамики параллельных манипуляторов могут служить основой для разработки математических моделей существующих и перспективных периферийных стыковочных механизмов. Эти алгоритмы не содержат избыточных векторно-матричных операций, а при их записи в виде последовательности скалярных математических выражений возможна дальнейшая оптимизация вычислений. В работе рассматривается состоящая из нескольких взаимосвязанных таблиц модель данных для компьютерного представления в символьном виде матриц и скалярных математических выражений. Она позволяет использовать произвольный состав переменных что облегчает исключение избыточных



операций при программировании рекуррентных алгоритмов расчета динамики систем твердых тел, обеспечивая их высокую вычислительную эффективность.

В диссертации представлен метод расчета относительного движения стыковочных агрегатов космических аппаратов, содержащий алгоритм вычисления реакций их контактного взаимодействия на основе определения направления и величины контактного внедрения. Формы направляющих элементов стыковочных агрегатов описываются наборами геометрических примитивов с точностью, достаточной для анализа динамического процесса стыковки. На этой методической основе разработаны вычислительно эффективные алгоритмы анализа контактного взаимодействия стыковочных агрегатов центрального и периферийного типов.

В работе описаны основные особенности кинематики и представлены разработанные автором математические модели динамики существующих и перспективных стыковочных механизмов, используемых в активных агрегатах системы стыковки центрального и периферийного типов для космических аппаратов. Представленная математическая модель существующего стыковочного механизма типа «штырь-конус» обеспечила сопровождение наземных динамических и летных испытаний и позволила выявить его кинематические и конструктивные ограничения. Модифицированные варианты модели были разработаны для новых, улучшенных версий механизмов. Первый из этих новых механизмов обеспечивает снижение нагрузок во всем диапазоне начальных условий стыковки. Второй позволяет реализовать заданные внешние проектные ограничения и возможность стыковки к агрегатам с различной формой приемного конуса. Предложен новый, упруго-адаптивный тип периферийного стыковочного механизма, разработана его математическая модель, исследована его динамика и определены предельные начальные условия стыковки.

В диссертации для отработки процесса причаливания и стыковки космических аппаратов, их соединения с использованием космического манипулятора представлен впервые предложенный и реализованный при участии автора в РКК “Энергия” способ экспериментальной отработки причаливания космического аппарата на основе гибридного моделирования на шестистепенном динамическом стенде. В этом методе динамика манипулятора и относительное движение соединяемых объектов вычисляются с помощью математической модели, а стыковочные агрегаты представлены реальными образцами. В ходе исследований была подтверждена возможность выполнения причаливания модуля с помощью стационарного манипулятора. Данная операция была успешно реализована на орбите. Полученный опыт используется в работе с МКС и может быть полезен при построении космических станций следующего поколения. В диссертации представлена математическая модель для расчета в реальном времени движения системы типа “подвижное основание - упругий манипулятор - полезный груз”, предназначенная для работы в составе системы управления гибридным стендом. Данная модель позволяет с высокой точностью воспроизводить первые шесть тонов упругих колебаний механической системы.

Для оценки динамики, когда агрегаты и устройства для соединения имеют простую кинематику, разработан компьютерный моделирующий стенд реального времени, который используется для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе операций причаливания, а также для тренировки операторов. Для информационной поддержки оператора при управлении манипулятором предлагаются дополнительные каркасные геометрические модели контактного взаимодействия этих устройств. Показано, что их использование позволяет при наведении оператором манипулятора уменьшить боковые промахи и угловые рассогласования, упростить управление наведением при причаливании. Выбранная структура математического стенда и принципы разработки математических моделей оборудования, взаимодействующего на контактной фазе причаливания,



позволили разработать программное обеспечение для моделирования в реальном времени.

Для каждой практической задачи в диссертации разработаны на общей методической основе специальные программные интегрированные средства визуализации динамических процессов, позволяющие оперативно анализировать большое число вычисляемых параметров. и контактное взаимодействие стыковочных агрегатов

#### **Актуальность избранной темы.**

При создании используемых до настоящего времени различных стыковочных механизмов основным методом проверки реализованных технических решений были динамические испытания на различных стендах. Объем таких испытаний и число измеряемых параметров естественно были ограничены по различным техническим причинам. Используемые математические модели динамики стыковки описывали только начальную фазу процесса, при этом стыковочные механизмы недостаточно корректно моделировались кинематическими соотношениями и гипотезами о последовательности движения звеньев. Да и в настоящее время, модели и алгоритмы для расчета контактного взаимодействия сложных поверхностей при выполнении сборочных операций во многих случаях отсутствуют. Корректное моделирование в реальном времени динамики космических манипуляторов с учетом упругих деформаций их звеньев весьма затруднено из-за большого объема вычислений. Таким образом, тема данного исследования, связанная с разработкой теоретических основ создания корректных, детальных и вычислительно эффективных компьютерных моделей динамики стыковки и причаливания, является актуальной.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Все положения, выносимые на защиту, получены строгими математическими методами. Текст работы содержит достаточно полное описание проведенных исследований, вывод формул и обоснование расчетных алгоритмов. Результаты, полученные с помощью численного

моделирования, верифицированы аналитически и экспериментально проверены.

### **Новизна.**

Научная новизна диссертации состоит в разработке общей методологии создания корректных, детальных и вычислительно эффективных компьютерных моделей динамики стыковки космических аппаратов, в разработке компьютерных моделей процессов с использованием стыковочных агрегатов различных типов, в предложенном методе гибридного моделирования причаливания космических аппаратов, реализованном на шестистепенном гибридном динамическом стенде. Моделирование причаливания аппаратов с помощью манипулятора с учетом работы операторов, должно выполняться в реальном времени. С этой целью в диссертации А.В. Яскевича впервые разработаны не только вычислительно эффективные алгоритмы, но и новые подходы к математическому моделированию систем многих твердых тел. При разработке компьютерных моделей стыковочных механизмов оказались необходимыми их существенная модификация, дополнение и комбинированное использование.

### **Достоверность.**

Достоверность результатов диссертации подтверждается соответствием результатов компьютерного моделирования экспериментальным данным, проверкой теоретических результатов посредством применения альтернативных форм записи алгоритмов, а также обеспечивается внутренними средствами тестирования, встроенными в авторские программы компьютерного моделирования.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 22 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 3 статьи в журналах, входящих в базы данных Web of Sciences и Scopus, 13 статей по специальности «Теоретическая механика», опубликованы в трудах трех международных



конференций и коллективной монографии, индексированных в Scopus. Результаты исследований защищены 4 патентами РФ.

### **Объем и структура работы.**

Основной текст диссертации содержит 340 страниц машинописного текста, 4 таблицы и 110 рисунков. Он включает в себя введение, восемь глав, заключение и выводы, список литературы, который состоит из 290 наименований. Приложение содержит 42 страницы текста, 5 рисунков.

### **Замечания.**

Мои замечания носят стилистический характер. Второй и третий результаты работы, выносимые на защиту, сформулированы в чересчур общей форме. Дело в том, что результаты диссертации в области построения компьютерных алгоритмов расчета деформаций с гистерезисом звеньев и методов учета контактного взаимодействия космических аппаратов являются новыми. Они действительно носят весьма общий, принципиальный характер и их более тщательное описание в качестве результатов только бы украсило работу.

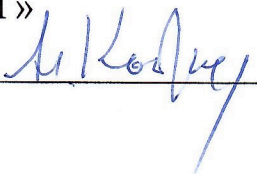
Отмечу также, что в весьма обширном и достаточно полном списке литературы нет книги Д.М.Гориневского, А.М.Формальского, А.Ю.Шнейдера «Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях»/Под ред. В.С.Гурфинкеля и Е.А.Девянина. В этой книге, был построен целый ряд алгоритмов управления движением манипуляционных систем с датчиками усилий, заслуживающих интерес и в настоящее время.

Указанные замечания, конечно, не умаляют значимости диссертации. Диссертация является научно-квалификационной работой, содержащей теоретические положения, совокупность, которых можно квалифицировать как значимое научное достижение в развитии перспективного направления теоретической механики – построения гибридных моделей динамики контактно взаимодействующих систем тел. В диссертации, помимо общих теоретических новых результатов автора, предложены также новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный

вклад в теорию и решение современных задач орбитального объединения космических аппаратов. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика» (по физико-математическим наукам). Ее содержание в соответствии с пунктами 4, 5, 7 паспорта специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика» охватывает следующие области исследований: механика систем твердых тел, колебания механических систем, механика робототехнических и мехатронных систем. Разработанная общая методология моделирования процессов стыковки и причаливания, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям по физико-математическим наукам.

Таким образом, соискатель Яскевич Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

**Официальный оппонент** доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ»

  
Кобрин Александр Исаакович

19.03.2021


Адрес: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Телефон: +7 495 362-77-19. E-mail [KobrinAI@mpei.ru](mailto:KobrinAI@mpei.ru)

Подпись профессора Александра Исааковича Кобриня заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО «НИУ» МЭИ»



  
И.В.Кузовлев