На правах рукописи

Яскевич Андрей Владимирович

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ СТЫКОВКИ И ПРИЧАЛИВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 01.02.01 - «Теоретическая механика»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Королев - 2021

Работа выполнена в публичном акционерном обществе "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"

Научный консультант:	Голубев Юрий Филиппович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом №5 ФГУ "ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН"
Официальные оппоненты:	Лапшин Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики ФГБОУ ВО "Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)"
	Кобрин Александр Исаакович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"
	Брискин Евгений Самуилович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет"
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики

Защита состоится «18» мая 2021 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01, созданного на базе ФГУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН", расположенного по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

им. А.Ю. Ишлинского РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и на сайте диссертационного совета http://keldysh.ru/council/1/.

Автореферат разослан «___»___2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.024.01, кандидат физико-математических наук

М.Г. Широбоков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Стыковка и причаливание космических аппаратов (КА) являются двумя способами их соединения на орбите. Стыковка представляет собой управляемый механический процесс, который выполняется с использованием системы стыковки, включающей активный и пассивный стыковочные агрегаты (СтА) и их блоки управления. Стыковка начинается после завершения работы системы сближения КА, в момент первого контакта их СтА и состоит из следующих этапов: достижение сцепки, поглощение энергии сближения, выравнивание и стягивание, образование жесткого соединения. Относительные рассогласования СтА при дальнейшем сближении уменьшаются за счет контактов их направляющих элементов. Активный агрегат имеет три типа механизмов. Относительно его продольной оси равномерно распределены наборы плоских, с одной степенью свободы механизмов защелок, обеспечивающих сцепку, и механизмов крюков, реализующих жесткое соединение СтА. Наиболее сложным является пространственный стыковочный механизм (СтМ), который имеет, как правило, шесть степеней свободы. Он перемещает механизмы защелок для достижения сцепки, поглощает энергию сближения КА, выравнивает и стягивает СтА до положения, в котором обеспечивается зацепление крюков. Наведение КА для соединения с помощью космического робота-манипулятора, управляемого оператором, называется причаливанием. Данный способ предусматривает выполнение манипулятором функций системы сближения.

Математические модели динамики стыковки необходимы для оценки правильности проектных решений, формирования программ наземных испытаний и интерпретации их результатов, для расчета нагрузок при реальных стыковках по данным телеметрии, для анализа нештатных ситуаций. Они должны описывать движение как стыкуемых КА, так и СтМ, упругие и демпфирующие свойства которых определяют характер изменения контактных сил, значительно превышающих силы реактивных двигателей сближения и ориентации. Звенья СтМ с устройствами демпфирования и приводом образуют пространственные системы тел, число степеней свободы которых, вплоть до жесткого соединения СтА, всегда больше числа независимых связей, налагаемых при контактах. Корректное моделирование возможно только при описание их движения дифференциальными уравнениями динамики (УД), отражающими законы механики. СтМ имеют незначительную по сравнению с КА инерцию и их движение может быть описано отдельными дифференциальными уравнениями. В этом случае необходимо вычислять силы и моменты, действующие в основании СтМ на КА. Звенья и передачи СтМ являются упруго деформируемыми с проявлением гистерезиса.

Начальные условия (НУ) стыковки в момент первого контакта СтА являются случайными величинами, распределение которых зависит от свойств системы сближения. На этапе проектирования качество стыковки оценивается на множестве различных сочетаний НУ, число которых достигает нескольких сотен, часто нескольких тысяч. Поэтому необходимо обеспечить высокую **вычислительную эффективность** моделирования, то есть обеспечить расчет динамики с помощью минимального числа операций.

Используемые до настоящего времени различные СтМ были в основном разработаны в 70-х – начале 80-х гг. ХХ века. При их создании основным методом проверки уже реализованных технических решений были динамические испытания на различных стендах. Объем таких испытаний и число измеряемых параметров ограничены по различным техническим причинам. Математические модели динамики стыковки того времени описывали только начальную фазу процесса, при этом стыковочные механизмы моделировались некорректно, кинематическими соотношениями и гипотезами о последовательности движения звеньев. При корректном моделировании динамики стыковки, когда функционирование СтМ описывается дифференциальными уравнениями, возможна разработка детальных моделей, структура и параметры которых учитывают все особенности реальных конструкций, определяющих динамику процесса их взаимодействия. Такие детальные модели позволят получить гораздо больший, чем при испытаниях, объем информации уже на этапе проектирования. Они должны быть дополнены средствами визуализации, позволяющими оперативно проанализировать большой объем данных моделирования. До настоящего времени публикации посвященные таким моделям, практически отсутствуют.

В том случае, когда при причаливании манипулятором соединение модулей обеспечивают стыковочные механизмы со сложной кинематикой, то на этапе проектирования необходимо оценить возможность выполнения таких операций. Их моделирование, с учетом работы операторов, должно выполняться в реальном времени. Для этого необходимо применять не только вычислительно эффективные алгоритмы, но и новые подходы к моделированию.

В теории динамики механических систем многих тел существуют алгоритмы расчета отдельных кинематических цепей с помощью минимального числа векторно-матричных операций, для редукции уравнений при наличии кинематических контуров. При разработке моделей СтМ необходимы их модификация, дополнение и комбинированное использование. Модели и алгоритмы для расчета контактного взаимодействия сложных поверхностей при выполнении сборочных операций отсутствуют. Корректное моделирование в реальном времени динамики космических манипуляторов с учетом упругих деформаций их звеньев 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, представляется актуальной.

<u>Целью диссертационной работы</u> является разработка теоретических основ корректного, детального и вычислительно эффективного компьютерного моделирования динамики стыковки и причаливания КА. <u>Основные задачи исследования</u>, решаемые для достижения поставленной цели, состоят в разработке:

- компьютерных алгоритмов, требующих минимального числа векторноматричных операций для расчета динамики различных классов СтМ как систем тел, для расчета сил и моментов, действующих в их основании на КА, и методов оптимизации вычислений при реализации этих алгоритмов;
- компьютерных алгоритмов расчета деформаций звеньев и передач к устройствам демпфирования СтМ на основе математических моделей, параметры которых определяются с высокой точностью по экспериментальным данным;
- уравнений взаимного движения стыкуемых КА с учетом их контактного взаимодействия, алгоритмов расчета упругих деформаций их конструкции на основе параметров, получаемых из детальных конечно-элементных моделей;
- компьютерных алгоритмов определения координат и параметров точек контакта, требующих минимального объема вычислений и детально учитывающих особенности геометрии сложных направляющих поверхностей стыковочных агрегатов и специализированных устройств причаливания;
- компьютерных моделей полного процесса стыковки при использовании СтА различных типов;
- методики гибридного моделирования на 6-степенном динамическом стенде причаливания космических аппаратов с использованием компьютерной модели для расчета в реальном времени движения механической системы «манипулятор – перемещаемый полезный груз;
- наглядного метода компьютерной визуализации результатов моделирования контактного взаимодействия и функционирования стыковочных механизмов при стыковке и причаливании.

<u>Методы исследований.</u> В работе использованы уравнения аналитической механики, алгоритм составного тела и алгоритм сочлененного тела вычислительной механики, методы теории деформируемого свободного тела, аналитической геометрии, линейной алгебры, теории структур больших наборов данных и теории автоматического управления.

<u>Научная новизна</u> работы состоит в разработанной впервые общей методологии создания корректных, детальных и вычислительно эффективных компьютерных моделей динамики стыковки КА, в разработке компьютерных моделей процессов с использованием существующих и новых СтА различных типов, в предложенном впервые методе гибридного моделирования причаливания КА, реализованном на 6-степенном динамическом стенде.

<u>Достоверность результатов</u> 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 программы компьютерного моделирования.

Результаты, выносимые на защиту

1. Компьютерные алгоритмы формирования и решения уравнений контурных связей, расчета динамики СтМ центрального и периферийного типа как систем твердых тел с параллельной структурой, требующие выполнения минимального числа векторно-матричных операций. Методика оптимизации вычислений на основе выполнения этих операций в символьном виде.

2. Компьютерные алгоритмы расчета деформаций с гистерезисом звеньев и передач к различным устройствам СтМ, использующие модели, основанные на экспериментальных данных.

3. Уравнения движения стыкуемых КА с учетом их контактного взаимодействия, алгоритмы расчета упругих деформаций их конструкции.

4. Компьютерные алгоритмы определения координат и параметров точек контакта СтА специализированных устройств для причаливания КА, позволяющие детально учесть форму их направляющих поверхностей.

5. Компьютерные модели динамики стыковки с использованием СтМ центрального типа с различными вариантами кинематических схем, а также с использованием нового, упруго-адаптивного периферийного СтМ.

6. Методика гибридного моделирования причаливания КА на 6степенном динамическом стенде, использующая оригинальные уравнения движения космического манипулятора, перемещающего груз большой массы.

7. Метод компьютерной визуализации результатов моделирования стыковки и причаливания.

Все приведенные в диссертации результаты получены лично автором.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что разработанные компьютерные модели и полученные с их помощью результаты использованы:

- для анализа динамики, в том числе нештатных ситуаций, на этапе проектирования процессов стыковки корабля ATV, перспективного транспортного корабля, модулей МЛМ и НЭМ к Международной космической станции (МКС);
- при составлении программ и при анализе данных наземных динамических испытаний процессов стыковки указанных кораблей и модулей;
- при восстановлении контактных нагрузок по данным телеметрии, получаемой в ходе летных испытаний систем стыковки кораблей «Союз» и «Прогресс» для расчета израсходованного ресурса прочности МКС;
- при экспериментальной отработке причаливания к МКС российского модуля МИМ-1 манипулятором SSRMS, а также при создании математического стенда реального времени для тренировки операторов, управляющих процессом причаливания, выполняемого манипулятором ERA, при разработке новых компьютерных средств наведения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Всесоюзное совещание "Методы компьютерного конструирования моделей классической и небесной механики", Ленинград, 1989 г.; - International workshop 'New Computer Technologies in Control Systems, NCTCS-95', August 13-19, 1995, Pereslavl-Zalessky, Russia;

- 2-й Международный симпозиум "Интеллектуальные системы", INTELS'96, Санкт-Петербург, 1996 г.;

- Международная конференция «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении», Саратов (1997 г., 2002 г.);

- Международная конференция "Информационные средства и технологии", Москва, 1999 г.;

- 5-й (2004 г.), 6-й (2007 г.) Международный симпозиум по классической и небесной механике. Великие Луки, Россия;

- 6-я (2008 г.), 8-я (2013 г.) Международная конференция по механике и баллистике «Окуневские чтения», Санкт-Петербург;

- EUROMECH Colloquium 495. Advances in simulation of multibody system dynamics, 2008, Bryansk, Russia;

- 6-е Поляховские чтения. Международная научная конференция по механике, Санкт-Петербург, 2012 г.;

- COMPDYN 2013. 4th ECCOMAS thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 2013;

- International Astronautical Congress, IAC-65, Toronto, Canada, 2014;

- Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург (2013 г., 2014 г., 2017 г., 2018 г., 2019);

- XI (Казань, 2015 г.), XII (Уфа, 2019 г.) Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики»;

- CLAWAR 2020. 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Moscow, Russia, 2020.

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 по специальности «Теоретическая механика», а также в трудах 3 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 машинописного текста, 5 рисунков.

Содержание работы

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, поставлена цель и определены задачи диссертации, отражены научная новизна и результаты, выносимые на защиту, практическая значимость полученных результатов. Представлены сведения об апробации работы и публикациях. В главе 1 решается задача разработки способа описания динамики СтМ с помощью минимального числа переменных. Ей предшествует анализ кинематики, то есть особенностей структуры связей этого класса механических систем (MC) тел. Все СтМ представляют собой пространственные MC, в которых единственное узловое тело связано с основанием несколькими параллельными кинематическими цепями (КЦ) с устройствами демпфирования, поглощающими энергию сближения КА, или приводами, обеспечивающими их выдвижение или втягивание. Узловое тело в СтМ центрального типа принадлежит центральной КЦ, которая связана с основанием и имеет структуру дерева. В периферийных СтМ оно не связано непосредственно с основанием и может рассматриваться условно как свободное.

Параллельные КЦ, соединяющие узловое тело с основанием, не изменяют число степеней его свободы (функциональность СтМ), являются зависимыми. Их соединение с узловым телом обеспечивают сферические или универсальные шарниры соответственно с тремя или четырьмя ограничениями на относительные перемещения. Соответственно зависимые КЦ имеют не более четырех степеней подвижности в своих шарнирах и ограниченный набор структур: $U_k P_k S_k$, $S_k P_k U_k$, $U_k C_k U_k$, $R_k U_k S_k$, $R_k S_k U_k$, $U_k U_k U_k$, где P_k , R_k , U_k , S_k – призматический, простой вращательный, универсальный и сферический шарниры k – й зависимой КЦ, их последовательность приведена, начиная от основания СтМ. Возможны также вторичные зависимые, плоские КЦ $R_k P_k R_k$ и $R_k R_k R_k$.

Для описания МС минимальным составом переменных обычно используются шарнирные переменные, соответствующие относительным перемещениям в шарнирах. При этом движение каждого тела КЦ определяется через движение предшествующего с помощью рекуррентных соотношений. Имеющиеся кинематические контуры размыкаются, их отдельные шарниры замещаются уравнениями связей. В работе показано, что при описании СтМ меньший объем вычислений при расчета матрицы обобщенной инерции и меньшее число уравнений контурных связей обеспечиваются при замещении шарниров, соединяющих зависимые КЦ с узловым телом. В результате преобразованная МС имеет одну независимую КЦ со свободным телом и фиктивным 6-степенным шарниром (для периферийных СтМ), с линейной или древовидной структурой (для СтМ центрального типа) и имеет нулевой номер. Все зависимые КЦ имеют только линейную структуру, пространственную или плоскую. Их номера равны номерам «разрываемых» кинематических контуров. Отсутствие у СтМ сингулярных конфигураций гарантирует возможность использования метода разделения переменных, который позволяет исключить из уравнений динамики зависимые шарнирные переменные..

Далее вводится система обозначений для описания геометрических и инерционных свойств тел КЦ, их относительных движений и абсолютных движений. На ее основе записываются все последующие кинематические и динамические рекуррентные соотношения. Для всех видов замещаемых шарниров записаны условия замыкания контуров. На их основе с помощью рекуррентных соотношений, в которых декартовые векторы скоростей и ускорений тел выражаются через шарнирные скорости и ускорения с помощью матриц парциальных скоростей, формируются матрицы $\mathbf{C}_{k}^{(i)}$ и $\mathbf{C}_{k}^{(d)}$ уравнений контурных связей относительно скоростей и ускорений

$$\mathbf{C}_{k}^{(i)}\mathbf{u}_{N} = \mathbf{C}_{k}^{(d)}\dot{\mathbf{p}}_{k}, \quad \mathbf{C}_{k}^{(i)}\dot{\mathbf{u}}_{N} = \mathbf{C}_{k}^{(d)}\ddot{\mathbf{p}}_{k} + \mathbf{c}_{k}$$

где \mathbf{u}_N – вектор скоростей узлового тела, $\dot{\mathbf{p}}_k$ – вектор относительных скоростей в шарнирах k – й зависимой КЦ.

Вектор независимых скоростей узлового тела для СтМ центрального типа равен $\mathbf{u}_N = \boldsymbol{\omega}_N$, а для периферийного $\mathbf{u}_N = [\mathbf{v}_N^T, \boldsymbol{\omega}_N^T]^T$, соответственно матрицы $\mathbf{C}_k^{(i)}$ имеют размерность $(m_k \times 3)$ и $(m_k \times 6)$. Матрицы $\mathbf{C}_k^{(d)}$ и векторы \mathbf{c}_k имеют размерность $(m_k \times m_k)$ и $(m_k \times 1)$, где $m_k \in \{3, 4\}$ в зависимости от вида замещаемого шарнира. Уравнения связей всегда имеют решение

$$\dot{\mathbf{p}}_{k} = [\mathbf{C}_{k}^{(d)}]^{-1} \mathbf{C}_{k}^{(i)} \mathbf{u}_{N} = \mathbf{H}_{k} \mathbf{u}_{N}, \quad \ddot{\mathbf{p}}_{k} = [\mathbf{C}_{k}^{(d)}]^{-1} (\mathbf{C}_{k}^{(i)} \dot{\mathbf{u}}_{N} + \mathbf{c}_{k}) = \mathbf{H}_{k} \dot{\mathbf{u}}_{N} + \mathbf{h}_{k}.$$
(1)

Зависимые шарнирные координаты могут быть вычислены в общем случае итерационным методом Ньютона

$$\mathbf{p}_{k}^{(i+1)} = \mathbf{p}_{k}^{(i)} - [\partial \mathbf{f}_{k} / \partial \mathbf{p}_{k}]^{-1} \mathbf{f}_{k}^{(i)} = \mathbf{p}_{k}^{(i)} - [\mathbf{C}_{k}^{(d)}]^{-1} \mathbf{f}_{k}^{(i)}, \qquad (2)$$

вид $(m_k \times 1)$ – вектора **f** $_k^{(i)}$ определяется видом шарнира, *i* – номер итерации.

Но с учетом ограниченного множества структур зависимых КЦ для каждой из них получено вычислительно более эффективное аналитическое решение. Например, для k-й зависимой КЦ $U_k P_k S_k$ с шарнирными переменными $p_{k,1}, p_{k,2}, p_{k,3}$ оно имеет вид

$$p_{k,3} = L_{S,k} - L_S(0), \qquad ctg \ p_{k,1} = -l_{S,k}^{(k)} / n_{S,k}^{(k)}, \\ \sin p_{k,1} = sign \ (ctg \ p_{k,1}) / \sqrt{1 + ctg^2 p_{k,1}}, \qquad \cos p_{k,1} = \sqrt{1 - \sin^2 p_{k,1}}, \\ \sin p_{k,2} = m_{S,k}^{(k)} / L_{S,k}, \qquad \cos p_{k,2} = \sqrt{1 - \sin^2 p_{k,2}},$$

где $L_{S,k}$ – длина вектора $\mathbf{r}_{S,k}^{(0)} = [l_{S,k}, m_{S,k}, n_{S,k}]^T$ из центра универсального шарнира в центр сферического, выраженного в системе координат (СК) основания; $L_S(0)$ – эта же длина в исходном положении СтМ перед стыковкой; $l_{S,k}^{(k)}, m_{S,k}^{(k)}, n_{S,k}^{(k)}, -$ компоненты вектора $\mathbf{r}_{S,k}^{(k)} = \gamma_{0,k} \mathbf{r}_{S,k}^{(0)}$ в СК, связанной с первой осью вращения универсального шарнира ($\gamma_{0,k}$ – постоянная матрица).

Здесь вычисляются разложением в ряд три математические функции, в то время как в решении (2) для общего случая необходимо вычислять четыре тригонометрические функции двух углов на каждой итерации. Для вторичных зависимых КЦ уравнения связей составляются и решаются аналогично.

В главе 2 определяется и разрабатывается набор алгоритмов, обеспечивающих наиболее эффективный расчет динамики различных классов СтМ. Метод разделения переменных, позволяющий исключить из УД зависимые

переменные, применим, если используется замкнутая форма этих уравнений. Входящие в них матрица обобщенной инерции и вектор обобщенных сил могут быть вычислены на основе различных алгоритмов. Наиболее эффективным из них для простых КЦ является алгоритм составного тела. Этот метод совместим с методом разделения переменных. УД в замкнутой форме могут быть редуцированы на основе метода разделения переменных, то есть явного решения уравнений связей, но они не позволяют рассчитать силы и моменты, действующие на основание СтМ. Кроме того эффективность алгоритма снижается при расчете динамики МС с древовидной структурой. Для моделей периферийных механизмов, в которых узловое тело в преобразованной МС не связано непосредственно с основанием, предлагается дополнительно разработанный алгоритм для расчета этих сил и моментов.

С учетом особенностей кинематики СтМ алгоритм составного тела используется для расчета для k – й зависимой, простой КЦ из n_k тел матрицы \mathbf{A}_k обобщенной инерции и вектора \mathbf{b}_k обобщенных сил в УД, записанных в форме, замкнутой относительно зависимых шарнирных ускорений $\ddot{\mathbf{p}}_k$. С помощью блочных матриц он представляется в следующем компактном виде

$$j = \overline{1, n_k} \begin{cases} \mathbf{a}_{j,k}^{l} = \mathbf{P}_{j,k}^{rel} \\ \mathbf{f}_{j,k}^{I,l} = \mathbf{M}_{j,k} \mathbf{a}_{j,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{j,k}^{I,l} = \mathbf{M}_{j,k} \mathbf{a}_{j,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{j,k}^{I} = \mathbf{M}_{j,k} \mathbf{a}_{j,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{i,k}^{I} = \mathbf{M}_{i,k} \mathbf{a}_{i-1,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{i,k}^{I} = \mathbf{M}_{i,k} \mathbf{a}_{i,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{i,k}^{I} = \mathbf{M}_{i,k} \mathbf{a}_{i,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{i,k}^{I} = \mathbf{M}_{i,k} \mathbf{a}_{i,k}^{l} \\ \mathbf{f}_{i,k}^{I} = \mathbf{M}_{i,k} \mathbf{a}_{i,k}^{I} \\ \mathbf{f}_{i-1,k}^{I} = \mathbf{f}_{i-1,k}^{rel} \mathbf{f}_{i,k}^{I,l} \\ \mathbf{f}_{j-1,k}^{I} = \mathbf{f}_{j-1,k}^{I,n} + \mathbf{g}_{j,k}^{I} \mathbf{f}_{j,k}^{I,n}, j > 1 \end{cases}$$

где j – е тело характеризуют блочные $\mathbf{a}_{j,k} = [\dot{\mathbf{v}}_{j,k}^T, \dot{\mathbf{\omega}}_{j,k}^T]^T$ – вектор ускорений, $\mathbf{f}_{j,k}^I$ – вектор инерционных сил и моментов (верхние индексы l и n обозначают линейные и нелинейные компоненты); $\mathbf{P}_{j,k}^{rel} = [\mathbf{T}_{j,k}^{rel T}, \mathbf{R}_{j,k}^{rel T}]^T$ – матрица парциальных скоростей; $\mathbf{M}_{j,k}$ – матрица инерции; $\mathbf{\eta}_{j,k}$ – вектор составляющих ускорений, обусловленных скоростями предшествующих тел; $\mathbf{s}_{j,k}$ – вектор инерционных сил и моментов, обусловленных угловой скоростью текущего тела; $\mathbf{B}_{j,k}$ – матрица перехода от СК предшествующего тела к СК текущего; а также скалярная величина $g_{j,k}^J \in \{f_{j,k}^J, m_{j,k}^J\}$ – обобщенная активная сила, действующая вдоль оси предшествующего шарнира.

В периферийных СтМ узловое тело имеет шесть степеней свободы, его динамика относительно основания описывается уравнением

$$\mathbf{M}_{R}\dot{\mathbf{u}}_{R}=\mathbf{s}_{R},$$

где $\mathbf{M}_{R} = diag[m_{R}\mathbf{1}_{3},\mathbf{I}_{R}] - (6 \times 6)$ – матрица инерции; $\dot{\mathbf{u}}_{R} = [\dot{\mathbf{v}}_{R}^{T}, \dot{\boldsymbol{\omega}}_{R}^{T}]^{T} - (6 \times 1)$ – вектор ускорений; $\mathbf{s}_{R} = [\mathbf{f}_{R}^{ET}, (\mathbf{m}_{R}^{E} - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{R}(\mathbf{I}_{R}\boldsymbol{\omega}_{R}))^{T}]^{T}$ вектор внешних контактных и инерционных сил и моментов в декартовой системе координат.

На основе использования метода разделения переменных и решения (1) уравнений контурных связей редуцированная система уравнений динамики параллельного СтМ с шестью степенями свободы записывается в виде

$$\mathbf{A}_{R}^{*}\dot{\mathbf{u}}_{R} = \mathbf{b}_{R}^{*},\tag{3}$$

(4)

где

 $\mathbf{A}_{R}^{*} - (6 \times 6) -$ обобщенная матрица инерции, $\mathbf{b}_{R}^{*} - (6 \times 1) -$ вектор обобщенных инерционных и активных сил.

 $\mathbf{A}_{R}^{*} = \mathbf{M}_{R} + \sum_{k=1}^{6} \mathbf{H}_{k}^{T} \mathbf{A}_{k} \mathbf{H}_{k}, \quad \mathbf{b}_{R}^{*} = \mathbf{s}_{R} + \sum_{k=1}^{6} \mathbf{H}_{k}^{T} (\mathbf{b}_{k} - \mathbf{A}_{k} \mathbf{h}_{k});$

После вычисления ускорений $\dot{\mathbf{u}}_{R}$ из решения (1) определяются зависимые шарнирные ускорения $\ddot{\mathbf{p}}_{k} = \{p_{j,k}\}, k = \overline{1, n_{k}}$. Для определения вектора сил и моментов, действующих на основание периферийного СтМ, предлагается следующий рекуррентный алгоритм

$$\mathbf{f}_{0}^{S} = \mathbf{0}$$

$$k = \overline{1,6} \begin{cases} j = \overline{1,n_{k}} \begin{cases} \mathbf{a}_{j,k}^{rel} = \mathbf{P}_{j,k}^{rel} \ddot{p}_{j,k} \\ \mathbf{a}_{j,k}^{l} = \mathbf{B}_{j,k} \mathbf{a}_{j-1,k}^{l} + \mathbf{a}_{j,k}^{rel} \\ \mathbf{f}_{j,k}^{I} = -\mathbf{M}_{j,k} \mathbf{a}_{j,k}^{l} + \mathbf{f}_{j,k}^{n,0} \\ j = \overline{n_{k},1} \begin{cases} \mathbf{f}_{j-1,k}^{S(j)} = -\mathbf{P}_{j,k}^{rel} g_{j,k}^{J} + \mathbf{N}_{j,k}^{R} (\mathbf{f}_{j,k}^{I} + \mathbf{f}_{j,k}^{S}) \\ \mathbf{f}_{j-1,k}^{S} = \mathbf{B}_{j,k}^{T} \mathbf{f}_{j-1,k}^{S(j)} \\ \mathbf{f}_{0}^{S} = \mathbf{f}_{0}^{S} + \mathbf{f}_{0,k}^{S} \end{cases}$$

где $\mathbf{N}_{j,k}^{R}$ – постоянная матрица, определяемая типом шарнира; вектор $\mathbf{f}_{j,k}^{n,0}$ вычислен при расчете вектора \mathbf{b}_{k} ; $\mathbf{f}_{j,k}^{S}$ – вектор сил и моментов, действующих со стороны последующих тел ($\mathbf{f}_{j,n_{k}}^{S} = \mathbf{0}$).

В СтМ центрального типа узловое тело является звеном центральной независимой КЦ, которая непосредственно связана с основанием. В этом случае предлагается использовать комбинацию алгоритмов составного и сочлененного тела. Первый приводит динамику зависимых КЦ к узловому телу – качающемуся корпусу. Второй рассчитывает динамику независимой КЦ с учетом зависимых, то есть всего СтМ в целом. При этом силы и моменты, действующие на основание, вычисляются только для независимой КЦ. Корректирующие значения тензора инерции качающегося корпуса ΔI_N и действующего на него вектора суммарного инерционного и активного момента $\Delta \mathbf{m}_N^{\Sigma}$ определяются соотношениями, аналогичными (4)

$$\Delta \mathbf{I}_{N} = \sum_{k=1}^{4} \mathbf{H}_{k}^{T} \mathbf{A}_{k}^{(d)} \mathbf{H}_{k}, \ \Delta \mathbf{m}_{N}^{\Sigma} = \sum_{k=1}^{4} \mathbf{H}_{k}^{T} (\mathbf{b}_{k} - \mathbf{A}_{k}^{(d)} \mathbf{h}_{k})$$

Сначала выполняется расчет кинематики центральной независимой ветви со структурой дерева. После этого динамика инерция, инерционные, активные внешние и внутренние силы и моменты последующих тел в ходе обратного рекуррентного процесса алгоритма сочлененного тела приводятся к очередному j-му и ему предшествующему p(j)-му (для компактности соотношения записаны в блочной форме)

$$\mathbf{M}_{j}^{*} = \mathbf{M}_{j} + \sum \Delta \mathbf{M}_{k}, \qquad \mathbf{s}_{j}^{*} = \mathbf{s}_{j} + \sum \Delta \mathbf{s}_{k}, \ k \in S_{j},$$

$$a_{I,j} = \mathbf{P}_{j}^{rel T} \mathbf{M}_{j}^{*} \mathbf{P}_{j}^{rel},$$

$$\mathbf{N}_{j} = \mathbf{M}_{j}^{*} - \mathbf{M}_{j}^{*} \mathbf{P}_{j}^{rel} a_{j}^{-1} \mathbf{P}_{j}^{rel T} \mathbf{M}_{j}^{*},$$

$$\mathbf{n}_{j} = \mathbf{N}_{j} \mathbf{\eta}_{j} + \mathbf{M}_{j}^{*} \mathbf{P}_{j}^{rel} a_{I,j}^{-1} (g_{j}^{J} + \mathbf{P}_{j}^{rel T} \mathbf{s}_{j}^{*}) - \mathbf{s}_{j}^{*},$$

$$\Delta \mathbf{M}_{p(j)} = \Delta \mathbf{M}_{p(j)} + \mathbf{B}_{j}^{T} \mathbf{N}_{j} \mathbf{B}_{j}, \qquad \Delta \mathbf{s}_{p(j)} = \Delta \mathbf{s}_{p(j)} - \mathbf{B}_{j}^{T} \mathbf{n}_{j}. \qquad (5)$$

Обобщенные ускорения определяются в результате прямых соотношений (от корневого тела к терминальным)

$$\mathbf{a}_{j}^{*} = \mathbf{B}_{j} \mathbf{a}_{p(j)} + \mathbf{\eta}_{j},$$

$$\ddot{q}_{j} = a_{I,j}^{-1} [\mathbf{P}_{j}^{rel T} (-\mathbf{M}_{j}^{*} \mathbf{B}_{j} \mathbf{a}_{j}^{*} + \mathbf{s}_{j}^{*}) + g_{j}^{J}],$$

$$\mathbf{a}_{j} = \mathbf{a}_{j}^{*} + \mathbf{P}_{j}^{rel} \ddot{q}_{j}.$$
(6)

В реальности вместо блочных используются векторно-матричные соотношения отдельно для поступательных и угловых движений тел. Это позволяет учесть их индивидуальные особенности при оптимизации вычислений с помощью записи алгоритмов в виде последовательностей эквивалентных скалярных математических выражений.

В главе 3 описаны разработанные модели деформации СтМ, их КЦ и отдельных звеньев с учетом гистерезиса, учет которого позволяет обеспечить соответствие результатов моделирования динамики стыковки экспериментальным данным. Все деформации могут быть описаны для отдельных степеней подвижности, соответствующих изгибу, кручению, сжатию или растяжению. Прямые и обратные ветви гистерезиса для сложных конструктивных сборок, состоящих из большого числа неоднородных по материалу, форме и размерам деталей, при различных знаках деформаций определяются экспериментально, в результате статических измерений. Предлагаемые модели описывают их в виде кусочно-линейной аппроксимации наборами отрезков. При смене знака скорости деформации переход между прямой или обратной ветвями определяет отрезок, жесткость которого соответствует упору в деформируемой КЦ. Все ветви гистерезиса нумеруются, и состояние модели деформаций определяется этими номерами. Текущее состояние определяется перед началом шага численного интегрирования и зависит от предшествую-

щего, знака деформации и ее скорости. Возможные варианты смены состояний записываются в табличной форме.

При переходе от положительной прямой ветви к обратной (рисунок 1) значение деформации убывает. Поэтому точка $(x_{E,3}, y_{E,3})$, соответствующая текущей деформации, является также конечной точкой переходного отрезка. Из этих координат определяется вторая точка $(x_{0,3} = x_{E,3} - y_{E,3}/k_3, y_{0,3} = 0)$ линии переходного отрезка, расположенная на оси абсцисс, и параметры $A_3 = m_3 = y_{E,3}$, $B_3 = -l_3 = -y_{E,3}/k_3$, $C_3 = -A_3 x_{0,3}$ этой прямой.



Рисунок 1. Определение параметров переходного отрезка

Далее для каждого очередного *i* – го отрезка, $A_2 x + B_2 y + C_2 = 0$ обратной ветви, где $A_2 = m_{2,i} = y_{E,2,i} - y_{B,2,i}$, $B_2 = -l_{2,i} = -x_{E,2,i} + x_{B,2,i}$, $C_2 = -A_2 x_{B,2,i} - B_2 y_{B,2,i}$ решается система уравнений

$$\begin{cases} A_2 x + B_2 y = -C_2 \\ A_3 x + B_3 y = -C_3 \end{cases}$$

и определяется точка его пересечения (x_C, y_C) с линией переходного отрезка. При выполнении условий $x_{B,2,i} < x_C < x_{E,2,i}$, $y_{B,2,i} < y_C < y_{E,2,i}$, $(i = \overline{1, N_P})$ она является начальной точкой переходного отрезка, то есть $(x_{B,3} = x_C, y_{B,3} = y_C)$. При переходе от положительной обратной ветви к прямой, при переходе между отрицательными ветвями гистерезиса параметры отрезка определяются аналогично.

С помощью моделей гистерезиса с постоянными параметрами описываются деформации изгиба и кручения штыря, боковых демпферов, СтМ центрального типа. В КЦ вращения его осевого демпфера используется один или два фрикционных тормоза, их диски могут «проскальзывать» друг относительно друга. В этом случае абсциссы отрезков, аппроксимирующих ветви гистерезиса, изменяют свои значения на величину необратимого хода. Описаны две модификации соответствующих моделей осевого демпфера с переменными параметрами.

В главе 4 представлены уравнения динамики стыкуемых КА, которые описываются как свободные твердые или деформируемые тела. При стыковке на близкой к круговой орбите небесного тела предполагается, что они движутся с постоянной угловой скоростью, а их положение до сцепки поддерживается системами ориентации. В этом случае их орбитальная угловая скорость добавляется в начальные условия движения. Влияние гравитационных моментов и аэродинамического сопротивления верхних слоев атмосферы на КА не учитывается вследствие относительной кратковременности процесса стыковки. В используемой системе обозначений при записи УД предполагается, что активный СтА установлен на первом КА, а пассивный СтА – на втором, каждый из которых может быть активным или пассивным. Число точек контакта СтМ и пассивного СтА может быть произвольным, но конечным. На активный и пассивный КА кроме контактных сил действуют также силы и моменты, создаваемые их системами управления движением и ориентацией.

Орбитальные космические станции имеют несколько стыковочных портов с различной ориентацией относительно строительной СК, в которой определяются особенности и модель упругих колебаний конструкции. Для описания относительного движения КА при стыковке используются связанные с их центрами масс расчетные СК, оси которых согласованы. Пассивный СтА и соответственно СтМ имеют собственные СК, в которых определяются геометрия направляющих элементов их буферных звеньев и ориентация КЦ. Положение и ориентация этих СК относительно строительной задается векторами и матрицами преобразования, которые учитывают как геометрию твердого тела, так и упругие деформации.

Динамика *s* – го КА как твердого тела описывается уравнениями Ньютона-Эйлера

$$\mathbf{m}_{s} \dot{\mathbf{v}}_{C,s}^{(I)} = \mathbf{A}_{C,s}^{T} (\mathbf{f}_{D,s}^{(C,s)} + \mathbf{f}_{C,s}^{(C,s)}),$$

 $\mathbf{I}_{s}^{(C,s)} \dot{\mathbf{\omega}}_{s}^{(C,s)} = -\widetilde{\mathbf{\omega}}_{s}^{(C,s)} (\mathbf{I}_{s}^{(C,s)} \cdot \mathbf{\omega}_{s}^{(C,s)}) + \widetilde{\mathbf{r}}_{CD,s}^{(C,s)} \mathbf{f}_{D,s}^{(C,s)} + \mathbf{m}_{D,s}^{(C,s)} + \mathbf{m}_{C,s}^{(C,s)},$
где $\mathbf{v}_{C,s}^{(I)} = \dot{\mathbf{r}}_{C,s}^{(I)}, \, \mathbf{\omega}_{s}^{(C,s)} - \text{скорость ЦМ и угловая скорость } \mathbf{f}_{D,s}^{(C,s)} = \mathbf{A}_{CD,s}^{T} \mathbf{f}_{D,s}^{(D)},$
 $\mathbf{m}_{D,s}^{(C,s)} = \mathbf{A}_{CD,s}^{T} \mathbf{m}_{D,s}^{(D)} - \text{силы и моменты, действующие на КА со стороны их СтА;}$
 $\mathbf{f}_{D,s}^{(D)}, \mathbf{m}_{D,s}^{(D)} - \text{силы и моменты, действующие со стороны СтА (в основании СтМ или контактные); $\mathbf{f}_{C,s}^{(C,s)}, \mathbf{m}_{C,s}^{(C,s)} -$ векторы силы и момента, создаваемые системой управления; $\mathbf{A}_{C,s}, \mathbf{A}_{CD,s} = \mathbf{A}_{SD,s}\mathbf{A}_{SC}^{T}, \mathbf{A}_{SD,s} -$ матрицы преобразования из инерциальной СК в расчетную, из расчетной в СК СтА, из строитель-$

ной в СК СтА с учетом угловых деформаций конструкции в месте его установки; $\mathbf{A}_{SC} = const$; $\mathbf{\tilde{r}}_{CD,s}^{(C,s)}$ – вектор из расчетной в начало СК СтА с учетом колебаний конструкции КА.

Для описания КА как деформируемых тел используется модальное представление вследствие его универсальности и корректности для отдельных тел-конструкций. Кроме того, оно используется при отработке алгоритмов управления упругими КА, маневры которых, выполненные непосредственно перед стыковкой, могут быть учтены в качестве начальных условий модели. УД упругих колебаний конструкции *s* – КА в его строительной СК записываются относительно обобщенных деформаций

$$\ddot{\mathbf{q}}_{s}^{f} + \mathbf{C}_{s} \dot{\mathbf{q}}_{s}^{f} + \mathbf{\Lambda}_{s} \mathbf{q}_{s}^{f} = \mathbf{f}_{s}^{q}. \tag{7}$$

$$\mathbf{M} \qquad \mathbf{C}_{s} = diag [c_{s,i}]; \qquad \lambda_{s,i} = \omega_{s,i}^{f\,2} \qquad \mathbf{M}$$

где $\Lambda_s = diag [\lambda_{s,j}]$ и $C_s = diag [c_{s,j}];$ $\lambda_{s,j} = \omega_{s,j}^{\prime}$ и $c_{s,j} = 2\delta_{s,j} \omega_{s,j}^{f} / \sqrt{4\pi^2 + 1}, \quad \omega_{s,j}^{f} -$ круговая частота j – собственной формы колебаний; $j = \overline{1, N_s^f}$. Величина логарифмического декремента затухания $\delta_{s,j}$ каждого тона колебаний определяется на основе экспертных оценок для различных диапазонов собственных частот. Обобщенные силы в УД определяются соотношением

$$\mathbf{f}_{s}^{q} = \mathbf{T}_{D,s}^{f T} \mathbf{f}_{D,s}^{(S,s)} + \mathbf{R}_{D,s}^{f T} \mathbf{m}_{D,s}^{(S,s)} + \sum \mathbf{T}_{e,s}^{f T} \mathbf{f}_{e,s},$$

в котором $(3 \times N_s^f)$ – матрицы собственных форм колебаний $\mathbf{T}_{D,s}^f$, $\mathbf{R}_{D,s}^f$ заданы в характерной точке, соответствующей началу СК СтА; $\mathbf{f}_{D,s}^{(S,s)} = \mathbf{A}_{SD,s}^T \mathbf{f}_{D,s}^{(D)}$, $\mathbf{m}_{D,s}^{(S,s)} = \mathbf{A}_{SD,s}^T \mathbf{m}_{D,s}^{(D)}$ - векторы, действующие со стороны СтА и выраженные в строительной СК; $\mathbf{T}_{e,s}^f$ – значения собственных форм в точках установки e – го двигателя реактивной системы управления; $\mathbf{f}_{e,s}$ – вектор его тяги.

Для УД (7) получено аналитическое решение на текущем шаге численного интегрирования в предположении постоянства на нем внешних сил, которое позволяет не вводить большое число уравнений (несколько тысяч тонов) в общую схему интегрирования динамики механической системы, сократить объем вычислений

$$\mathbf{q}_{s}^{f}(t + \Delta t) = \mathbf{C}_{1,s} \,\mathbf{q}_{s}^{f}(t) + \mathbf{C}_{2,s} \,\dot{\mathbf{q}}_{s}^{f}(t) + \mathbf{C}_{3,s} \,\mathbf{f}_{s}^{q}(t),$$
$$\dot{\mathbf{q}}_{s}^{f}(t + \Delta t) = \mathbf{C}_{4,k} \,\mathbf{q}_{s}^{f}(t) + \mathbf{C}_{5,s} \,\dot{\mathbf{q}}_{s}^{f}(t) + \mathbf{C}_{6,s} \mathbf{f}_{s}^{q}(t).$$

где C_{1,s},..., C_{6,s} – постоянные диагональные матрицы.

Шаг интегрирования УД стыковки изменяется не автоматически, а принимает либо минимальное, либо максимальное значение, в зависимости от изменяющейся жесткости СтМ. Для этих двух значений вычисляются два набора констант на основе значений собственных форм и частот, содержащихся в стандартном файле системы MSC NASNRAN, и файла с экспертными оценками логарифмического декремента затухания для различных частот.

При моделировании контактного взаимодействия СтМ и пассивного СтА контактные реакции вычисляются на основе определения взаимного внедрения тел и являются известными величинами. Поэтому классическая теория удара, описывающая мгновенное перераспределение энергии, не используется. Каждая точка контакта (ТК) соответствует максимальной величине внедрения. Эта величина контролируется, если она превышает максимально допустимую, то процесс моделирования завершается с выдачей диагностического сообщения. В этом случае требуется уменьшить шаг численного интегрирования. Такой метод обеспечивает высокую точность, так как контактная податливость СтМ на порядки ниже, чем у стыкуемых КА. Он является вычислительно наиболее эффективным, так как при его использовании сохраняется исходная структура обыкновенных дифференциальных уравнений динамики КА и СтМ, в точках контакта вычисляются скорости, а не ускорения, реакции являются декартовыми векторами, что упрощает их интерпретацию и учет контактного трения, возможен учет произвольного числа ТК без определения линейно зависимых векторов.

Для каждой ТК вычисляются единичный вектор нормали к поверхностям буферных звеньев СтМ и пассивного СтА, векторы ее положения на звене и СтА и соответствующие абсолютные скорости, скорость взаимного внедрения и тангенциальная скорость, модуль контактной реакции и модуль силы трения, полная контактная сила, действующая на буферное звено СтМ и пассивный СтА. Суммарные контактные силы и моменты, действующие на буферные звенья, входят в УД СтМ, а действующие на пассивный СтА – в УД соответствующего КА. Приводятся кинематические соотношения, описывающие относительное движение СтМ и пассивного СтА и основанные на описанной выше модели стыкуемых КА.

При первом контакте СтА число параметров НУ относительного движения двух КА как независимых тел становится равным одиннадцати. Это две компоненты бокового промаха (смещения центров СтА), три угла их относительной ориентации и компоненты линейных и угловых скоростей активного КА относительно пассивного. Приводятся кинематические соотношения, позволяющие по НУ вычислить все векторы и матрицы, входящие в УД. При этом инерциальная СК в момент первого контакта совпадает с СК КА, на котором установлен пассивный СтА. Вводятся понятия статистических НУ, получаемых из моделирования процесса сближения, и экспертных, формируемых для оценки предельных возможностей СтА.

В главе 5 описаны модели и компьютерные алгоритмы для расчета параметров контактного взаимодействия СтА, основанные на следующих основных положениях: 1) каждая область контакта представляется одной точкой, соответствующей максимальному внедрению, число таких точек может быть произвольны, но конечным; 2) поверхности направляющих элементов пассивного СтА и буферных звеньев СтМ могут быть представлены произвольным, но конечным множеством простейших геометрических примитивов; 3) параметрами геометрических примитивов являются координаты их характерных точек (XT), а также величины радиусов окружностей сфер, цилиндров, усеченных конусов; 4) пары контактирующих примитивов выбираются таким образом, чтобы расчет внедрения вдоль нормали и координат ТК можно было выполнить с помощью простых аналитических выражений, каждое из которых выводится для допустимого диапазона рассогласований СтА; 5) множеством однотипных примитивов можно аппроксимировать более сложную направляющую поверхность, и в таком случае эффективное определение наличия контакта обеспечивает итерационный метод дихотомии. Это исключает необходимость решения трансцендентных уравнений.

Выделены следующие пары контактирующих геометрических примитивов: 1) сфера или точка – усеченный конус; 2) сфера или точка – линия граничной окружности; 3) активная сфера или точка – пассивный цилиндр; 4) сфера или точка – фрагмент плоскости; 5) отрезок прямой – граничная окружность; 6) отрезок прямой – отрезок прямой.

Для примера приводится определение параметров контакта сферы радиуса R_S с центром в точке $P_S = (x_S, y_S, z_S)$ и усеченного конуса, расположенного вдоль оси X_{PU} СК $X_{PU}Y_{PU}Z_{PU}$ пассивного СтА (рисунок 2). Постоянными параметрами конуса являются радиусы R_{CB,max} и R_{CB,min} большего и меньшего оснований; а с – угол между осью и образующими конуса, абсцисса x_T точки P_T их пересечения (вершины конуса), $n_{CX} = \sin \alpha_C$, $n_{CL} = \cos \alpha_C$ – осевая и боковая компоненты единичного вектора реакции $\mathbf{n}_{R} = [n_{X}, n_{Y}, n_{Z}]^{T}$, нормального к поверхности конуса. Постоянными параметрами модели являются также характерные размеры – минимальное и мак $d_{L,\min} = R_{CB,\min} - R_S \cos \alpha_C$ симальное расстояния И $d_{L,\max} = R_{CB,\max} - R_S \cos \alpha_C$ от P_S до оси конуса, минимальная и максимальная абсциссы центра $P_S = (x_S, y_S, z_S)$ сферы $x_{C,\min} = R_{CB,\min} \operatorname{ctg} \alpha + R_S \sin \alpha_C$, $x_{C,\max} = x_{CB,\max} + (R_{CB,\max} - R_{CB,\min}) ctg \alpha$. При выполнении хотя бы одного из условий $x_S < x_{C,\min}$, $x_S > x_{C,\max}$, $d_L < d_{L,\min}$, $d_L > d_{L,\max}$, где $d_L = \sqrt{y_S^2 + z_S^2}$ контакт невозможен и анализ завершается. В противном случае уточнение его наличия и определение его параметров выполняются следующим образом.

- 1. Вычисляются расстояния $d_{SX} = x_T d_L \operatorname{ctg} \alpha_C$ от центра $P_S = (x_S, y_S, z_S)$ сферы до поверхности конуса вдоль его оси и $d_S = d_{SX} \sin \alpha_C$ вдоль нормали к его поверхности $d_S = d_{SX} \sin \alpha_C$. Если $d_S > R_S$, то контакт этого типа отсутствует, и анализ завершается.
- 2. Вычисляются расстояния $d_{SX} = x_T d_L \operatorname{ctg} \alpha_C$ от центра $P_S = (x_S, y_S, z_S)$ сферы до поверхности конуса вдоль его оси и $d_S = d_{SX} \sin \alpha_C$ вдоль нормали к его поверхности $d_S = d_{SX} \sin \alpha_C$. Если $d_S > R_S$, то контакт этого типа отсутствует, и анализ завершается.
- 3. Вычисляется величина $\Delta_n = R_S d_S$ внедрения вдоль нормали к поверхности конуса, если $\Delta_n < 0$, то контакт отсутствует, и анализ завершается. Если она превышает максимально допустимую величину, то

есть $\Delta_n > \Delta_{n, \max}$, то моделирование завершается с выдачей соответствующего диагностического сообщения о превышении допустимой величины внедрения.

4. При наличии контакта $(0 < \Delta_n < \Delta_{n,\max})$ вычисляются переменные компоненты $n_X = n_{CX}$, $n_Y = n_{CL} y_S / d_L$ и $n_Z = n_{CL} z_S / d_L$ единичного вектора реакции и координаты точки контакта в СК $X_{PU} Y_{PU} Z_{PU}$, определяемые вектором $\mathbf{r}_{P,k}^{(PU)} = [x_S + n_X R_S, y_S + n_Y R_S, z_S + n_Z R_S]^T$.



Рисунок 2. Контакт сферы с усеченным конусом

Параметры контакта для других упомянутых выше пар примитивов определяются аналогично. Далее на этой основе разрабатываются модели контактного взаимодействия СтМ и пассивных СтА, а также устройств для причаливания с помощью манипулятора. На рисунке 3 показаны ХТ, примитивы и их постоянные параметры, описывающие поверхности буферных звеньев СтМ и пассивного СтА центрального типа.

Защелки и датчики имеют очень малую массу, поэтому их положение и силы сопротивления, создаваемые их пружинами, рассчитываются итерационно после завершения очередного шага численного интегрирования УД. Углы их поворота постепенно увеличиваются на малую величину до тех пор, пока внедрение в парах примитивов не станет отрицательным. Например, для защелки парами таких примитивов являются «ХТ 2 – усеченный конус», «отрезок – граничная окружность», «ХТ 2 – цилиндр» (рисунок 4). Защелка 3 головки 4 при попадании ее ХТ 2 внутрь паза считается сработавшей, ее пружина не создает силу сопротивления, характерный отрезок ее обратной стороны контактирует с отрезками граней паза 5 гнезда 6, при этом контактная сила определяется уже величиной их внедрения. Срабатывание всех четырех защелок означает сцепку.







Рисунок 3. Системы координат, характерные точки и геометрические примитивы, описывающие поверхности буферных звеньев СтМ и пассивного СтА центрального типа: а) качающегося корпуса, б) головки штыря, защелок и датчиков; в) приемного конуса и пазов гнезда



Рисунок 4. Модель защелки: а) контакты отрезка защелки до ее срабатывания; б) определение срабатывания защелки по попаданию ее XT 2 внутрь паза приемного гнезда; в) контакты защелок с пазами гнезда после сцепки

Аналогично определяются силы сопротивления до сцепки, которые создают датчики захвата головки. После сцепки они контактируют со стенками гнезда приемного конуса. Их суммарная сила трения определяется экспериментально и также учитывается в уравнениях динамики.

Периферийные СтА имеют одинаковую геометрию единственного буферного звена – стыковочного кольца 1 с направляющими выступами 2, на которых установлены механизмы защелок 3 (рисунок 5а). При сцепке защелки зацепляются за соответствующие упоры 7, установленные на пассивном агрегате. Стыковочные кольца обладают симметрией относительно одной поперечной оси (оси Z_{AR} и Z_{PR}) и обратной симметрией относительно другой (оси Y_{AR} и Y_{PR}). При контакте с направляющей поверхностью упора 7 защелка 3 утапливается внутрь своего направляющего выступа, а после прохождения его грани восстанавливает свое выдвинутое положение. При совмещении плоскостей колец все защелки заходят за соответствующие упоры, образуется первичная механическая связь СтА – сцепка.

Геометрия активного стыковочного кольца описывается набором следующих примитивов: характерные отрезки боковых граней и конических поверхностей боковых выступов, характерные точки плоскости кольца, характерные отрезки защелок (рисунок 5б). Конические поверхности направляющих выступов аппроксимированы наборами из $2^N + 1$ отрезков-образующих (рисунок 5в). Координаты начальных точек и параметры векторов отрезковобразующих формируются автоматически в зависимости от заданного числа N, которое определяет точность аппроксимации и число итераций при поиске точки контакта. Геометрическая модель пассивного кольца описывается аналогично, только вместо характерных отрезков защелок задаются геометрические параметры упоров.

При анализе контакта конической поверхности каждого направляющего выступа и граничной окружности ответного кольца применяется итерационный метод дихотомии, который реализуется следующим способом (рисунок 6). На очередной итерации для двух крайних и одного среднего аппроксимирующих отрезков текущего сектора с индексами *i*_B, *i*_E и *i*_M соответственно определяются характерные расстояния от точек их пересечения с ответной окружностью до центра этой окружности. На первой итерации значения индексов крайних и среднего аппроксимирующих отрезков равны $i_B = 1$, $i_{E} = i_{B} + 2^{N}$, $i_{M} = i_{B} + 2^{N-1}$. Если характерные расстояния для всех трех точно равны между собой, то параметр контакта определяется для среднего, так как в этом случае ось аппроксимированной конической поверхности совпадает с осью ответной окружности. В противном случае из этих трех отрезков выбираются два с максимальными характерными расстояниями. Индексам *i*_B и *i*_E присваиваются новые значения, и сектор поиска сужается в два раза. Вычисляется индекс $i_M = (i_B + i_E)/2$ нового среднего отрезка и осуществляется переход к следующей итерации.



Рисунок 5. Характерные отрезки и точки в модели активного кольца: а) геометрия кольца; б) грани направляющих выступов, защелки и плоскость кольца; в) конические поверхности направляющих выступов

В

E_{1.2}

б



Рисунок 6. Оценка возможности контакта усеченной конической поверхности направляющего выступа и грани-окружности ответного кольца

21

Процесс заканчивается, когда в секторе поиска разность индексов двух крайних образующих равна единице и дальнейшее его деление пополам невозможно. Из двух оставшихся отрезков выбирается один с максимальным характерным расстоянием, для него определяются параметры контакта. Общее число шагов дихотомии не превышает N. Единственность решения обеспечивается выпуклыми формами фрагмента аппроксимированной конической поверхности направляющего выступа и охватывающей его ответной окружности. На рисунке 6 в результате третьей итерации определяется отсутствие внедрения и соответственно контакта.

Инерция звеньев механизма защелок сопоставима с инерцией звеньев СтМ. Для численного интегрирования их УД используется неявный метод Эйлера. Контактные силы, действующие на защелки до и после сцепки, определяются на основе внедрения их характерных отрезков в усеченную коническую поверхность и граничную окружность упоров.

Геометрия пассивных устройств соединения при причаливании описывается усеченным конусом, цилиндром и гранью-окружностью. Элементы активных устройств могут быть сферами или иметь более сложную форму, которая аппроксимируется множествами одинаковых примитивов (рисунок 7). Для определения их контакта применяется метод дихотомии.



Рисунок 7. Аппроксимация геометрическими примитивами поверхностей устройств причаливания: а) головки захвата; б) замка фиксации

В главе 6 представлены компьютерные модели динамики стыковки КА с использованием СтА центрального типа. Сначала рассматривается модель эксплуатируемого в настоящее время СтМ. Его центральная, независимая кинематическая цепь включает в себя штырь с головкой и качающийся корпус с осевым демпфером, приводом и устройством выравнивания (рисунок 3а,б). Поступательные движения штыря через шарико-винтовой преобразователь (ШВП) связаны с вращением устройств осевого демпфера – магнитных тормозов (МТ), пружинного механизма (ПМ), фрикционного тормоза (ФрТ) и привода. ФрТ в зависимости от знака разности углов поворота его входного и выходного вала имеет два уровня момента сопротивления: меньший ограни-

чивает силу сопротивления при поглощении энергии сближения, больший – силу стягивания при жестком соединении СтА. Он также «развязывает» движение осевого демпфера и привода, которые описываются независимыми УД. Вращения всех устройств осевого демпфера приводятся к гайке ШВП. Ее УД имеют вид

$$I_{Nut}^{tot}\ddot{\varphi}_{Nut} = m_{NutScrew} - m_{FR}(\varphi_{FR}, \dot{\varphi}_{FR}) - sign(\varphi_{Nut})m_{MB}(|\dot{\varphi}_{Nut}|)$$

где I^{tot}_{Nut} – суммарный момент инерции, приведенный к гайке ШВП; m_{NutScrew} – момент, передаваемый гайке от штыря-винта, на головку которого действует внешняя осевая контактная сила; $m_{FR}(\varphi_{FR},\dot{\varphi}_{FR})$ – приведенный к оси гайки сопротивления ΠМ ΦpT : переменный момент И $\varphi_{FR} = i_{Nut,FR} (\varphi_{Nut} - \varphi_{Dive} / i_{Nut,Drive}) -$ угол поворота входного вала ΦpT относительно его выходного вала; $\dot{\varphi}_{FR}$ – скорость изменения этого угла; φ_{Dive} и $\dot{\varphi}_{Dive}$ – угол поворота и скорость вращения выходного вала привода, связанного с выходным валом ФрТ; *m*_{MB} – приведенный к оси гайки ШВП момент сопротивления двух осевых магнитных тормозов; $i_{Nut,FR}$, $i_{Nut,Drive}$ – коэффициенты передачи от гайки к входному валу ФрТ и к выходному валу привода соответственно.

В приводе СтМ (рисунок 8) два дублирующих электродвигателя (1) связаны с выходным валом (5) через стопорные муфты (2), планетарный механизм (дифференциал) (3) и две планетарные передачи (4). Стопорные муфты предотвращают передачу движения от основных колес дифференциала (фактически от выходного вала привода) к электродвигателям.



Рисунок 8. Кинематическая схема: а) привода; б) планетарного механизма; в) планетарного редуктора

УД вращения отдельных колес планетарного механизма с помощью решения уравнений связей для водила и сателлитов методом разделения переменных преобразуются в систему уравнений $A\ddot{q} = Q$, в которой элементы постоянной (2×2) – матрицы обобщенной инерции и (2×1) – вектора обобщенных сил равны

$$\begin{split} \mathbf{A}_{1,1} &= I_a + \left(R_a^2 / 4R_H^2\right) I_H + n_g \left(R_a^2 / 4R_g^2\right) I_g, \\ \mathbf{A}_{12} &= R_a R_b \left(\left(I_H / R_H^2\right) - n_g \left(I_g / R_g^2\right)\right) / 4, \\ \mathbf{A}_{2,2} &= I_b + \left(R_b^2 / 4R_H^2\right) I_H + n_g \left(R_b^2 / 4R_g^2\right) I_g, \\ \mathbf{Q}_1 &= m_a + \left(R_a / 2R_H\right) m_H, \ \mathbf{Q}_2 &= m_b + \left(R_b / 2R_H\right) m_H. \end{split}$$

где $R_a, R_b, R_H, R_g, I_a, I_b, I_H, I_g$ – радиусы и моменты инерции колес; n_g – число сателлитов.

При неподвижных колесах b_G планетарных редукторов их суммарный коэффициент передачи и момент на оси водила H дифференциала равны $i_{PG} = (R_{G,a}/2R_{G,H})^2$; $m_H = -(m_{FR} (\varphi_{FR}, \dot{\varphi}_{FR})/(\eta_{red} i_{Nut,Drive}))/i_{PG}$, где $\eta_{red} - \kappa.п.д.$; момент $m_{FR} (\varphi_{FR}, \dot{\varphi}_{FR})$, создаваемый фрикционом, описывается моделью гистерезиса с переменными параметрами, представленной в главе 3.

Полый штырь обладает большой податливостью на изгиб, которая описывается фиктивным вращательным шарниром с сосредоточенной жесткостью на выходе из качающегося корпуса. Расчетные углы поворота СК головки корректируются с учетом теории изгиба балки. Это позволяет использовать при описании СтМ алгоритмы моделирования динамики систем твердых тел. Моменты, противодействующие изгибу и кручению штыря, описываются моделями деформации с гистерезисом, представленными в главе 3.

Боковой демпфер имеет четыре параллельных КЦ, связывающих качающийся корпус с основанием СтМ. Эти зависимые КЦ имеют структуру соответственно $U_1P_1S_1$, $U_2P_2S_2$ для боковых ПМ и $R_3U_3S_3$, $R_4U_4S_4$ для боковых МТ. Силы, создаваемые ПМ, рассчитываются на основе модели с учетом гистерезиса, описанной в главе 3. Структура МС твердых тел, описывающей угловые движения СтМ представлена в виде графа на рисунке 9.



Рисунок 9. Граф МС твердых тел описывающей угловые движения СтМ

На нем каждому телу соответствует вершина, а каждому шарниру – ребро. Шарниры, замещаемые уравнениями связей, обозначены пунктирными линиями. Динамика этой МС рассчитывается по алгоритмам, описанным в главах 1 и 2. Всего СтМ имеет шесть степеней свободы: пять в угловых движениях и одну вдоль своей продольной оси. Далее в главе приводятся УД осевой деформации крышки переходного люка, на которой устанавливается СтМ. Эта деформация учитывается при сопоставлении результатов моделирования с данными наземных испытаний. В реальном полете жесткость крышки велика из-за внутреннего атмосферного давления в КА и не принимается во внимание.

Управление стыковкой осуществляется в цикловом режиме, наиболее простом и эффективном в условиях быстротекущего случайного процесса. Приводится упрощенная циклограмма, в которой отражены события, влияющие на динамику взаимодействия СтА.

Сопоставление результатов моделирования с данными испытаний позмодели. Приводится уточнить параметры краткое воляет описание 6-степенного динамического стенда для гибридного моделирования стыковки с использованием реальных СтА и математической модели движения стыкуемых КА. Сравниваются расчетные и экспериментальные силы и моменты контактного взаимодействия, относительные положения и скорости КА. Фрагмент такого сопоставления контактных сил при стыковке приведен на рисунке 10. Цифрами обозначены: 1 – первый контакт головки штыря с конусом; 2 – вход головки в приемное гнездо; 3 – контакт головки с дном гнезда, сопротивление осевого ПМ и МТ; 4 - сопротивление ФрТ; 5 - обратное движение, возврат энергии, накопленной в ПМ при сопротивлении МТ.



Рисунок 10. Фрагмент сопоставления результатов моделирования и данных испытаний на 6-степенном стенде

При анализе результатов моделирования процессов стыковки и причаливания предлагается принципиально новый способ их компьютерной визуализации с использованием динамических мнемосхем. Для модели с существующим СтМ центрального типа такая мнемосхема показана на рисунке 11. Она отображает учитываемые в модели связи между элементами системы, их изменение во времени и пространстве, основные численные параметры. Все данные отображаются в трех окнах, объединенных в одну экранную форму. В верхнем окне в двух проекциях демонстрируется пространственная каркасная (для обеспечения прозрачности) модель контактного взаимодействия, в среднем – условное изображение деформируемых звеньев, устройств осевого и бокового демпферов. В нижнем окне графики любых указанных в диалоге параметров модели движутся, справа налево относительно желтой вертикальной оси текущего времени. Синхронно с этим изменяются изображения в верхних окнах и численные значения указанных в них параметров. Такие мнемосхемы значительно облегчают анализ большого объема информации (более 300 параметров) о пространственных контактных процессах.





На основе большого объема моделирования и опыта экспериментальной отработки предложены две модификации кинематики СтМ. В первой изменяется конструкция устройств демпфирования. В осевом демпфере исключаются МТ, а ПМ заменяется на ФрТ с ограниченным ходом, меньшим уровнем сопротивления и обратной настройкой (сопротивление при просадке штыря меньше, чем при втягивании). Для расчета силы сопротивления используется модель с гистерезисом, описанная в главе 3. В результате энергия накапливается только в КЦ, ее малая величина значительно снижает амплитуду контактной силы при отдаче и контакте защелок с упорами гнезда. Приведение этого ФрТ в исходное состояние происходит на завершающей стадии стягивания (моделируется весь процесс стыковки до начала жесткого соединения

СтА) за счет сил сопротивления толкателей, предназначенных для расстыковки. В боковом демпфере существующего СтМ (рисунок 12а) линия действия контактной силы проходит через центр шарнира 3, не создавая момента вращения и вызывая большие нагрузки при нештатной стыковке. В первой модификации СтМ (рисунок 12б) шарнир смещен к основанию, а КЦ ПМ 4 и МТ 5 развернуты навстречу контактной реакции.



Рисунок 12. Модификации кинематики СтМ: а) существующий; б): изменение ориентации КЦ бокового демпфера; в) введение в конструкцию подвижного ограничителя; г) различные типы пассивных СтА

Вторая модификация (рисунок 12в) связана с необходимостью стыковки к пассивным СтА с различной конфигурацией приемного конуса (рисунок 12г). В кинематическую схему СтМ введен подвижный ограничитель, перемещающийся вдоль оси качающегося корпуса 6 под действием пружин 7 и контактных сил 8. Дополнительным преимуществом такой схемы стало исключение из нее чувствительных к нагрузкам рычагов выравнивания. Пружины ограничителя могут накапливать энергию, приводящую к росту нагрузок, только при экстремальных, практически невероятных НУ стыковки.

Целесообразность модификаций и правильность выбора параметров СтМ при их реализации подтверждены большим объемом моделирования (несколько тысяч вариантов). В главе приводятся отдельные графики изменения сил и основных кинематических параметров, а также динамические мнемосхемы, разработанные для этих модификаций. СтМ с подвижным ограничителем будет использован для стыковки перспективного КА.

В главе 7 описана компьютерная модель динамики стыковки КА с использованием нового, упруго-адаптивного периферийного СтМ, который соответствует международному стандарту систем стыковки и отличается от других подобных простотой конструкции и более широкими функциональ-

ными возможностями. Основой его кинематики является платформа Гью-Стьюарта, штоки ее штанг представляют собой винты, поступательное движение которых преобразуется во вращение валов спиральных ПМ. СтМ имеет три фиксированных положения: конечное (КП), в котором штоки полностью втянуты; переднее (ПП), в котором они максимально выдвинуты и исходное (ИП) – некоторое промежуточное перед началом стыковки. Фиксация в конечном или исходном положении обеспечивается блокировкой отдачи ПМ. Втягивание СтМ в КП обеспечивается тремя тросами, приводимыми в движение одним электроприводом. При этом ПМ штанг накапливают энергию, которая впоследствии используется для приведения СтМ из КП в ИП, а затем при достижении сцепки – из ИП в ПП. Непосредственно перед стыковкой СтМ находится в ИП. При первом контакте колец СтА блокировка отдачи всех ПМ снимается, штоки всех штанг выдвигаются, и кольцо механизма быстро перемещается вперед. Его адаптивная подстройка под положение кольца пассивного СтА для сцепки с ним обеспечивается за счет энергии ПМ. После сцепки отдача пружин вновь блокируется, энергия сближения КА аккумулируется без возврата в механическую систему (штоки штанг только втягиваются). На упрощенной кинематической схеме одной пары штанг СтМ (рисунок 13) показаны: 1 – универсальные шарниры, 2 – корпуса штанг, 3 – штоки-винты, 4 – ШВП, 5 - спиральные ПМ, 6 – управляемые обгонные муфты (УОМ), 7 – контактные устройства, 8 – стыковочное кольцо с направляющими выступами, 9 – датчик совмещения колец, 10 –корпус механизмов защелок, 11- трос, 12 – барабан намотки троса, 13 – силовой редуктор, 14 – электропривод устройства стягивания.



Рисунок 13. Упрощенная кинематическая схема пары штанг периферийного упруго-адаптивного СтМ

УОМ 6 имеют два состояния, соответствующие включенной или выключенной блокировке отдачи ПМ. Вместе с ПМ они образуют устройства аккумулирования энергии. Блок управления обеспечивает обработку сигналов датчиков, переключение УОМ, включение и выключение электропривода.

Для увеличения хода штоков и стыковочного кольца из ИП и соответственно для улучшения сцепки в ШВП исключена блокировка вращения винта. Он становится дифференциальным, его шарнирные ускорения (также как углы и скорости) связаны уравнением $\ddot{x}_{Screw} = (\ddot{\varphi}_{Nut} - \ddot{\varphi}_{Screw})/(2\pi/t)$, где $x_{Screw}, \varphi_{Screw}$ – поступательное и угловое движение винта, φ_{Screw} – угол поворота гайки, который выбирается в качестве зависимой переменной. Тогда каждая k – я зависимая КЦ периферийного СтМ имеет структуру $U_k C_k U_k$, ее (4×1) – вектор шарнирных переменных \mathbf{p}_k составляется из углов вращения $\mathbf{p}_k(1)$, $\mathbf{p}_k(2)$ в универсальном шарнире, поступательного перемещения $\mathbf{p}_k(3)$ и вращения $\mathbf{p}_k(4)$ винта. Граф преобразованной таким образом МС тел периферийного СтМ (с учетом гаек) приведен на рисунке 14, на котором $B_{1,0} = B_R$ обозначает стыковочное кольцо



Рисунок 14. Граф МС периферийного упруго-адаптивного СтМ

Матрица \mathbf{A}_k обобщенной инерции и вектор \mathbf{b}_k обобщенных сил этой КЦ вычисляются по алгоритму составного тела, описанному в главе 2. Решение уравнений связей в ШВП методов разделения переменных имеет вид $\ddot{p}_{N,k}^{(d)} = \mathbf{H}_N \ddot{\mathbf{p}}_k$ ($\mathbf{H}_N = [0,0,i_N,1]$, $i_N = 2\pi/t$, $k = \overline{1,6}$), соответственно матрица \mathbf{A}_k и вектор \mathbf{b}_k аналогично (4) корректируются по соотношениям

где

 I_{Nut}^{Σ} – приведенный к гайке суммарный момент инерции всех передач вращения; $m_{Nut,k}$ – суммарный действующий на гайку момент пружины и управляемой обгонной муфты при включенной или выключенной блокировке.

После выполнения этой коррекции по соотношениям (3) и (4) осуществляется расчет коэффициентов УД периферийного СтМ относительно независимых обобщенных ускорений.

Далее в главе описывается модель устройства накопления энергии, которая учитывает гистерезис ПМ и КЦ с помощью кусочно-линейной аппроксимации его прямой и обратной ветвей. Жесткость переходного участка соответствует упору или включенной блокировке. Сила вытягивания штоков ограничивается ФрТ, входящим в конструкцию УОМ. Таким образом, модель гистерезиса имеет переменные параметры. Ее состояния и условия перехода между ними представляется в табличной форме, аналогичной той, что описана в главе 3.

После завершения поглощения энергии сближения кольцо СтМ находится в некотором произвольном положении и свободные части тросов устройства стягивания имеют различную длину. Упрощенная схема с двумя тросами, показанная на рисунке 15, справедлива и для трех.



Рисунок 15. Положение кулачков барабанов при стягивании

Вращение с выходного вала привода 1 передается гибкими валами 2 на входы трех силовых редукторов 3, каждый из которых связан со своим барабаном 4 намотки троса 9 устройства стягивания. Для выборки их избыточной длины выходные валы силовых редукторов связаны с барабанами через кулачки 5 – 7. Разводящая пружина 8, связывающая выходной вал силового редуктора с валом барабана, обеспечивает небольшое натяжение ослабленного троса за счет отведения кулачков 6, 7 от 5. Связь между силовым редуктором и барабаном становится жесткой при контакте всех кулачков, когда разводящая пружина полностью сжата натянутым тросом. При выдвижении СтМ из КП в ИП силовые редукторы и барабаны вращаются и освобождают тросы, которые вытягиваются кольцом 11, движущимся под действием спиральных пружин в штангах 10. При достижении ИП отдача пружин штанг блокируется, кольцо останавливается. Привод продолжает работать, создавая запас длины тросов для выдвижения кольца из ИП вперед для достижения сцепки, но длины свободной части тросов не изменяются (кулачки расходятся).

Угол поворота кулачка *i* – го барабана $\varphi_{CamR,i} = (d_{RR,i} - L_{Cable}^{RP})/R_{Roll}$ определяется длиной $d_{RR,i}$ – свободной части *i* – го троса (L_{Cable}^{RP} – длина свободной части троса в КП; R_{Roll} – радиус барабана). Угол поворота кулачка редуктора с коэффициентом передачи i_{Gear} равен $\varphi_{CamG,i} = (\varphi_{Drive} - \Delta \varphi_{FS,i})/i_{Gear}$, где φ_{Drive} – угол поворота выходного вала привода; $\Delta \varphi_{FS,i}$ – деформация гибкого вала. Условие совместного вращение *i* – х редуктора и барабана:

$$\varphi_{CamG,i} < \varphi_{CamR,i} + 2\Delta\varphi_{Cam}, \qquad (8)$$

где $\Delta \varphi_{Cam}$ – угловой размер одного кулачка.

С момента времени $t_{Join,i}$ начала их совместного вращения для i-го троса нарастают суммарные изменение расстояния $\Delta d_{RR,i}^{\Sigma}$ между точками его схода с барабана и крепления на кольце, его длина $\Delta l_{Cable,i}^{\Sigma}(t)$, намотанная на барабан, и деформация $\Delta_{Cable,i}^{Def}$

$$\Delta d_{RR,i}^{\Sigma}(t) = \sum_{t_{Join,i}}^{t} \left(d_{RR,i}(t) - d_{RR,i}^{prev} \right), \quad \Delta l_{Cable,i}^{\Sigma}(t) = R_{Roll} \sum_{t_{Join}}^{t} \left(\varphi_{CamG,i}(t) - \varphi_{CamG,i}^{prev} \right),$$
$$\Delta_{Cable,i}^{Def} = \Delta d_{RR,i}^{\Sigma}(t) - \Delta l_{Cable,i}^{\Sigma}(t). \tag{9}$$

При выдвижении из КП в ИП приращения длин свободных частей всех тросов положительны, при втягивании – отрицательны, но в обоих случаях из-за разности модулей этих сумм $\Delta_{Cable,i}^{Def} \ge 0$ (тросы натянуты). Скорость изменения деформаций *i* – го троса равна

$$v_{Cable,i}^{Def} = v_{RR,i}(t) - v_{L,Cable,i}(t) = \mathbf{n}_{Cable,i}^{T} \left(\mathbf{v}_{R} + \boldsymbol{\alpha}_{R}^{T} \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{R} \mathbf{l}_{CableR,i} \right) - \omega_{CamG,i} R_{Roll},$$

где $\mathbf{n}_{Cable,i}$ и \mathbf{v}_R – единичный вектор свободной части натянутого троса и скорость центра стыковочного кольца в СК основания СтМ; $\boldsymbol{\omega}_R$, $\mathbf{l}_{CableR,i}$ – угловая скорость кольца и вектор из его центра в точку крепления троса, выраженные в СК кольца; $\boldsymbol{\alpha}_R$ – матрица преобразования из СК основания СтМ в СК кольца; $\boldsymbol{\omega}_R$ – угловая скорость кольца; $\boldsymbol{\omega}_{CamG,i}$ – скорость вала редуктора.

Сила натяжения i-го троса $f_{\text{Retr},i}^{\text{Tens}} = k_{Cable}^{S} \Delta_{Cable,i}^{Def} + c_{Cable}^{S} v_{Cable,i}^{Def} > 0$ (k_{Cable}^{S} , c_{Cable}^{S} – коэффициенты жесткости и демпфирования) создает момент $m_{Gear,i}^{\text{Tens}} = f_{\text{Retr},i}^{\text{Tens}} R_{Roll}$ на выходных валах редукторов. Сумма моментов $m_{Drive}^{Load} = (\sum m_{\text{Retr},i}^{\text{Tens}})/i_{Gear}$ входит в УД привода (описаны в главе 6).

Сила и момент действия тросов на кольцо равны

$$\mathbf{f}_{R}^{Cable} = \sum_{i=1}^{3} (-\mathbf{f}_{\operatorname{Re}tr,i}^{Tens}) = -\sum_{i=1}^{3} (\mathbf{n}_{Cable,i} f_{\operatorname{Re}tr,i}^{Tens}), \quad \mathbf{m}_{R}^{Cabke} = -\sum_{i=1}^{3} \mathbf{l}_{CableR,i} \times (\boldsymbol{\alpha}_{R} \mathbf{f}_{\operatorname{Re}tr,i}^{Tens}).$$

Векторы силы и момента, действующие на основание СтМ, определяются аналогично.

Угловые деформации гибких валов равны $\Delta \varphi_{FS,i} = (m_{\text{Retr},i}^{Tens} / i_{Gear}) / k_{FS,i}$, где $k_{FS,i}$ – жесткость гибкого вала на кручение, определяемая его длиной. В процессе стягивания СтА происходит постепенный набор угловых скоростей стыкуемых КА вследствие их инерции. Это может привести к тому, что отдельные тросы, наматываемые на свои барабаны слабыми пружинами 8, будут иметь нулевую деформацию. В этом случае при нарушении условия (8) времена $t_{Join,i}$ начала совместного вращения кулачков и суммы (9) обнуляются, силы натяжения тросов не вычисляются. При восстановлении контакта кулачков их вычисление возобновляется.

При штатном сближении упруго-адаптивный периферийный СтМ надежно, с большим запасом, выполняет свои основные функции: обеспечивает сцепку, поглощает энергию сближения активного КА при незначительных интерфейсных нагрузках, стягивает и выравнивает активные и пассивные СтА и КА. Приводятся результаты моделирования для некоторых наихудших НУ стыковки, допустимых международным стандартом. Для облегчения их анализа, как и ранее, разработана специальная динамическая мнемосхема (рисунок 16) для компьютерной визуализации процесса стыковки.



Рисунок 16. Динамическая мнемосхема, визуализирующая функционирование упруго-адаптивного периферийного СтМ

Графики изменения сил и моментов, кинематических параметров показывают, что все нагрузки находятся в допустимых пределах, а сцепка достигается в широком диапазоне НУ. Критичным является сочетание максимального бокового промаха с максимальной боковой скоростью в этом же направлении, которое приводит к преждевременному выдвижению кольца. В этом случае сцепка невозможна без создания дополнительной силы «дожатия». Впрочем, такое сочетание НУ является практически невероятным.

Глава 8 посвящена описанию моделирования причаливания КА с использованием космических манипуляторов. Приводится краткий исторический обзор спроектированных и реально выполненных операций. Впервые причаливание необходимо было выполнить в рамках программы орбитального корабля «Буран». Автором диссертации в 1989 г. было впервые предложено осуществить ее экспериментальную отработку на основе гибридного моделирования с использованием 6-степенного стенда. Была разработана динамическая модель манипулятора, переносящего полезный груз (ПГ), упрощенная с учетом мощности компьютера того времени. Первый этап отработки был выполнен в июле 1991 г., но вскоре программа «Буран» была закрыта.

Более подробно рассматривается модель космического манипулятора SSRMS, выполняющего причаливание КА к МКС. В модели станция считается неподвижным основанием вследствие ее очень большой массы. Высокочастотные колебания звеньев исполнительного механизма (ИМ) манипулятора практически не влияют на движение переносимого ПГ большой массы. Модели приводов шарниров ИМ с цифровыми регуляторами скорости разработаны на основе доступной справочной информации. Алгоритм пересчета сигналов с рукояток управления в требуемые скорости приводов разработан самостоятельно (в работе не описывается). УД МС основаны на следующих положениях. Инерция всех звеньев ИМ учитывается для воспроизведения люфтов в редукторах. Общая деформация ИМ без учета люфтов описывается (6×6) – матрицей жесткости, которая вместе с блочной (6×6) – матрицей инерции ПГ определяет частоты 6-степенного осциллятора.

Для расчета динамики ИМ как системы твердых тел используется алгоритм сочлененного тела, описанный в главе 2. Но вместо расчета ускорений в соотношении (6) он обеспечивает приведение инерционных и активных моментов к осям вращения в приводах шарниров (слагаемые в выражении для \ddot{q}_j без учета g_j^J). Большие передаточные отношения редукторов и малая скорость движения ИМ позволяют приближенно считать эти параметры постоянными на очередном шаге интегрирования уравнений привода. Вращение валов электродвигателя и редуктора в каждом j-м приводе описывается отдельными линеаризованными УД, для интегрирования которых используется неявный метод Эйлера. Разность углов и скоростей их поворотов позволяет вычислить момент g_j^J , действующий в шарнире и входящий в соотношения (5) для расчета динамического воздействия последующих тел на предшествующие, и обобщенное ускорение \ddot{q}_j , используемое в соотношении (6) для расчета абсолютных декартовых ускорений звеньев. Углы q_j и скорости \dot{q}_j , поворота используются для расчета кинематики ИМ.

Упругие свойства каждого звена ИМ описываются последовательностью его деформируемых и недеформируемых сегментов нулевой массы, в пределах которых коэффициенты изгибной и крутильной жесткости полагаются постоянными. Линейные и угловые деформации конца k – го сегмента j – го звена длины l_{ik} в его локальной СК определяются соотношениями

$$\Delta \mathbf{I}_{j,k}^{(j,k)} = \Psi \mathbf{1}_{j,k} \, \mathbf{f}^{(j,k)} + \Psi \mathbf{2}_{j,k} \, \mathbf{m}_{j,k}^{(j,k)}, \ \Delta \varphi_{j,k} = \Psi \mathbf{3}_{j,k} \, \mathbf{f}^{(j,k)} + \Psi \mathbf{4}_{j,k} \, \mathbf{m}_{j,k}^{(j,k)},$$

где $\mathbf{f}_{j,k}^{(j,k)}$, $\mathbf{m}_{j,k}^{(j,k)}$ – сила и момент, действующие на конце сегмента

$$\Psi \mathbf{1}_{j,k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{1,j,k} & 0 \\ 0 & 0 & c_{1,j,k} \end{bmatrix}, \quad \Psi \mathbf{2}_{j,k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{2,j,k} \\ 0 - c_{2,j,k} & 0 \end{bmatrix}, \\ \Psi \mathbf{3}_{j,k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{2,j,k} \\ 0 & c_{2,j,k} & 0 \end{bmatrix}, \quad \Psi \mathbf{4}_{j,k} = \begin{bmatrix} c_{3,j,k} & 0 & 0 \\ 0 & c_{4,j,k} & 0 \\ 0 & 0 & c_{4,j,k} \end{bmatrix}$$

для балочного сегмента с жесткостями $GJ_{j,k}^{p}$ на кручение и $EJ_{j,k}^{x}$ на изгиб

$$c_{1,j,k} = l_{j,k}^3 / 3 E J_{j,k}, \ c_{2,j,k} = l_{j,k}^2 / 2 E J_{j,k}, \ c_{3,j,k} = 1 / G J_{j,k}^p, \ c_{4,j,k} = l_{j,k} / E J_{j,k};$$

для твердотельного сегмента с фиктивным шарниром и жесткостями k_x^t на кручение и k_{yz}^b на изгиб

$$c_{1,j,k} = l_{j,k}^2 / k_{yz}^b, \ c_{2,j,k} = l_{j,k} / k_{yz}^b, \ c_{3,j,k} = 1 / k_x^t, \ c_{4,j,k} = l_{j,k} / k_{yz}^b;$$

для недеформируемого сегмента все элементы матриц равны нулю.

Вследствие последовательного соединения сегментов сила и момент, приложенные к концу КЦ, однозначно определяют силу и момент, действующие на конец каждого отдельного сегмента и соответственно его деформацию. Суммирование деформаций отдельных сегментов позволяет определить обусловленные ими линейные и угловые перемещения конечной точки ИМ, к которой прикладываются сила и момент. При поочередном задании шести отдельных компонент силы и момента, действующих на конец цепи, вычисляется (6×6) – матрица податливости ИМ (без учета люфтов редукторов), в результате обращения которой получается приведенная к схвату манипулятора матрица жесткости.

Динамика ПГ как твердого тела относительно основания описывается уравнениями Ньютона-Эйлера поступательного и вращательного движений. На ПГ действуют силы и моменты контактного взаимодействия реальных СтА, измеряемые датчиками стенда, а также силы и моменты, действующие со стороны манипулятора. Для этого с помощью рекуррентных кинематических соотношений вычисляются положение и скорости такелажного элемента ПГ относительно схвата жесткого ИМ и соответственно линейные и угловые «деформационные» смещения. Силы и моменты, противодействующие этим деформациям, входят в УД жесткого ИМ и ПГ с обратными знаками.

Далее в главе описывается процесс гибридного моделирования на 6степенном стенде причаливания к МКС модуля МИМ-1 с помощью манипулятора SSRMS. В этой операции СтА и манипулятор имеют различные уровни допустимых нагрузок. При гибридном моделировании СтА представлены реальными образцами, а манипулятор и ПГ – математическими моделями. Схема стенда показана на рисунке 17.





Рисунок 17. Схема 6-степенного стенда для отработки причаливания КА

Относительное пространственное перемещение СтА (1) обеспечивает 6степенная платформа (2) с управляемыми гидроприводами (3). Один из агрегатов устанавливается на подвижной платформе, другой – на устройстве (4) измерения контактных сил и моментов (6), расположенном на силовой ферме (5). Программы управляющего компьютера (7) интегрируют УД манипулятора и ПГ и вычисляют требуемые относительные положение и скорости СтА, и соответственно требуемые линейные перемещения и скорости (10) штоков (9) гидроприводов. Оператор двумя ручками управления (11) задает требуемые линейные и угловые скорости движения телекамеры (13) относительно мишени (12), наблюдая ее на мониторе (14). Угловая ориентация СтА и КА контролируется с помощью обзорных телекамер (15) и мониторов (16).

Подвижная платформа по программе выводится в положение, соответствующее заданным НУ для СтА. Далее управление осуществляется на основе решения УД манипулятора и перемещаемого КА с учетом измеренных контактных сил и моментов, а также сигналов управления, задаваемых оператором. Были исследованы варианты грубого и точного управления.

Анализ результатов отдельных испытаний осуществлялся с использованием разработанной по проекту автора динамической мнемосхемы (рисунок 18). В ее верхнем окне отображаются кинематические параметры относительного движения и каркасная модель контактного взаимодействия СтА, показания датчиков СтМ; в среднем – сигналы с рукояток управления, движение манипулятора и модуля относительно станции; в нижнем – графики изменения всех величин, фиксируемых в процессе испытаний.



Рисунок 18. Динамическая мнемосхема, визуализирующая процесс причаливания модуля МИМ-1

В главе приводятся графики изменения сигналов управления, относительного положения СтА, сил и моментов контактного взаимодействия для одного из вариантов точного управления. Результаты экспериментальной отработки подтвердили возможность выполнения причаливания при точном управлении, а также корректность тренировок операторов на математическом стенде реального времени NASA, в котором использовались упрощенные модели СтА. Причаливание на орбите было успешно выполнено в мае 2010 г.

Оборудование, доставляемое и устанавливаемое на борту КА с помощью манипулятора, не обязательно является новым модулем, соединяемым с помощью стыковочных агрегатов. Устройства для их соединения, разработанные специально для причаливания, могут иметь небольшие размеры, определяемые малыми промахами манипулятора. В результате ограничивается их видимость с помощью обзорных телекамер, не всегда могут быть использованы прицельные телекамеры и мишени. Это создает трудности для оператора, управляющего манипулятором при наведении. Для выбора параметров команд управления манипулятором и последовательности их выполнения под руководством автора был разработан компьютерный стенд моделирования причаливания в реальном времени. В нем была использована программно-реализованная математическая модель манипулятора ERA и графического интерфейса его управления в супервизорном режиме, разработанная к тому времени Дмитровским филиалом МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автором диссертации определены задачи и структура моделирующего стенда, разработаны кинематические соотношения для расчета относительного движения и модели контактного взаимодействия соединяемых устройств (описаны в главе 5), определен облик дополнительных компьютерных графических моделей, которые предложено использовать для анимации взаимного положения и контактов этих устройств, а также для целей управления.

Приводится общий вид этого стенда, визуальная информация, доступная операторам, результаты оценки динамики причаливания с использованием специализированных агрегатов, а также устройств соединения без податливости. Они иллюстрируются графиками изменения кинематических параметров, сил и моментов контактного взаимодействия при установке. Для точного наведения автором предложено использовать дополнительные компьютерные каркасные графические модели, отображающие контактное взаимодействие соединяемых механических интерфейсов (рисунок 18). Они позволяют обеспечить сцепку даже в условиях ограниченной видимости.



Рисунок 18. Каркасные графические модели, отображающие контактное взаимодействие механических интерфейсов при использовании специализированных агрегатов (а) и устройств соединения без податливости (б)

В Приложении описана структура данных и алгоритмы ее обработки, предназначенные для символьной реализации матричных алгоритмов расчета динамики СтМ, рассмотренных в главах 1 и 2, с целью повышения их вычислительной эффективности путем исключения избыточных операций. На основе анализа существующих способов компьютерного представления скалярных математических выражений (СМВ) в системах символьных преобразований, а также анализа свойств СМВ в упомянутых алгоритмах предложен способ их кодирования и выполнения скалярных и матричных операций с использованием нескольких взаимосвязанных таблиц.

При выполнении математических операций вместо символьных идентификаторов используются их целочисленные коды, что значительно упрощает алгоритмы. Таблица IDT описания идентификаторов обеспечивает такое кодирование. Ее строки содержат параметры: n_{IDT} – число символов, образующих идентификатор; S_{IDT} – массив символов для хранения идентификатора; D_{IDT} , T_{IDT} – длина одномерного массива и тип переменной, обозначаемой идентификатором; $E_{IDT} = 1$ признак внешней переменной.

В строках таблицы МРТ хранятся параметры всех матриц: C_{MPT} – код идентификатора, равный номеру описывающей его строки в таблице IDT; I_{MPT}^{\max} , J_{MPT}^{\max} – максимальные значения индексов; T_{MPT} – тип матрицы; $n_{MET,B}$, $n_{MET,E}$ – номера начальной и конечной строк в таблице МЕТ описания элементов матриц. Эти описания включают параметры L_{MET} – индекс элемента матрицы в одномерном массиве, N_{MET} – вещественное число; C_{MET} – код идентификатора; I_{MET} – индекс промежуточной переменной.

СМВ представляются последовательностями элементарных выражений, содержащих только одну бинарную операцию (сложение, вычитание, умножение и деление). В троках таблицы SET содержатся параметры: N_E – вещественное число; $C_{1,E}$, $I_{1,E}$, $C_{2,E}$, $I_{2,E}$ коды идентификаторов и индексы операндов; O_E – символ математической операции (("+", "-", "*", "/"); U_{SET} – кратность использования СМВ; а также параметры, необходимые для оптимизации символьного кода формируемой вычислительной процедуры.

При выполнении операции сложения, вычитания, умножения и деления, строки $\langle N_{O,1}, C_{O,1}, I_{O,1} \rangle$, $\langle N_{O,2}, C_{O,2}, I_{O,2} \rangle$ операндов в преобразуются в строку результата, где $N_{O,1}, N_{O,1}, N_R$ – это вещественные числа; $C_{O,1}, C_{O,2}, C_R$ – коды идентификаторов операндов и результата; $I_{O,1}, I_{O,2}, I_R$ – их индексы ($C_{O,i} = 0$ - численная константа, $C_{O,i} \neq 0$ - символьная переменная: скалярная ($I_{O,i} = 0$), элемент матрицы или массива ($I_{O,i} > 0$)). При скалярном сложении параметры строки-результата определяются непосредственно параметрами операндов только при выполнении следующих условий

Если
$$C_{O,1} = 0, C_{O,2} = 0$$
: $N_R = N_{O,1} + N_{O,2}, C_R = 0, I_R = 0,$
Если $N_{O,1} = 0.0, C_{O,1} = 0, C_{O,2} \neq 0$: $N_R = 0.0, C_R = C_{O,2}, I_R = I_{O,2},$
Если $N_{O,2} = 0.0, C_{O,1} \neq 0, C_{O,2} = 0$: $N_R = 0.0, C_R = C_{O,1}, I_R = I_{O,1}.$

Во всех остальных случаях промежуточным результатом сложения будет закодированное скалярное выражение, представленное параметрами $N_C, C_{1,C}, I_{1,C}, O_C, C_{2,C}, I_{2,C}$. Их значения определяются условиями

$$\begin{array}{ll} \textit{Если } N_{0,1} \neq 0, \ C_{0,1} = 0, \ C_{0,2} \neq 0: \\ & \left\{ \begin{matrix} N_R = 0.0, \ N_C = N_{0,1}, \\ C_{C,1} = 0, \ I_{C,1} = 0, \ I_{C,2} = I_{0,2} \\ O_C = '+', \\ C_{C,2} = C_{0,2} \end{matrix} \right\} ecлu \ C_{0,2} > 0 \\ & \left\{ \begin{matrix} N_R = 0.0, \ N_C = 0.0, \\ O_C = '+', \\ C_{C,2} = C_{0,2} \end{matrix} \right\} ecлu \ C_{0,2} > 0 \\ & O_C = '-', \\ C_{C,2} = -C_{0,2} \end{matrix} \right\} ecлu \ C_{0,2} < 0 \\ \hline \\ \textit{Если } N_{0,2} \neq 0, \ C_{0,1} \neq 0, \ C_{0,2} = 0 \\ - \textit{выполняется аналогично} \end{array} \right.$$

Этот промежуточный результат $N_C, C_{1,C}, I_{1,C}, O_C, C_{2,C}, I_{2,C}$ будет обозначаться скалярной переменной – элементом массива с кодом идентификатора C_{TSV} , то есть $C_R = C_{TSV}$. Для определения индекса этого элемента его необходимо сравнить с параметрами $N_E, C_{1,E}, I_{1,E}, O_E, C_{2,E}, I_{2,E}$ всех строк, ранее записанных в таблицу SET. При наличии строки-аналога ее номер присваивается индексу I_R результата операции. В противном случае параметры $N_C, C_{1,C}, I_{1,C}, O_C, C_{2,C}, I_{2,C}$ записываются в первую свободную строку таблицы SET, номер которой становится индексом I_R результата. Алгоритмы выполнения всех остальных скалярных операций имеют аналогичную сложность.

В отличие от численных, программируемых вручную алгоритмов символьные матрицы не являются индивидуальными символьными индексируемыми переменными, из них нельзя образовать массивы, которые обеспечивают регулярность вычислений под управлением операторов цикла. Регулярность записи вычислений с использованием символьных матриц обеспечивают три дополнительные таблицы. Первая из них АВТ состоит из четырех строк и описывает ветвления в алгоритме в виде последовательности элементарных ветвей и реальные индексы векторов и матриц в этих ветвях. Ветвления возникают в алгоритме сочлененного тела при древовидной структуре МС, а в алгоритме составного тела при вычислении столбцов матрицы обобщенной инерции. Число элементов в каждой строке (столбцов таблицы) определяется числом ветвлений и числом последовательных шагов вычислений в каждой ветви. Элементы первой строки (А) содержат значения номера элементарных («линейных») ветвей, элементы второй (В) – реальные индексы математических объектов в элементарных ветвях. Элементы третьей строки (С) содержат номера узлов, в которых начинается (или завершается) очередная последовательность прямых (или обратных) вычислений; элементы четвертой (D) – номера ветвлений вычислений в соответствующих узлах. Индексы столбцов в таблице соответствуют последовательности вычислений. Если в алгоритме или кинематической цепи ветвления отсутствуют, то имеется одна ветвь вычислений, элементы строки В содержат последовательно нарастающие значения индексов, а элементы строк С и D равны нулю.

Вторая таблица АМТ описывает последовательность элементарных матричных операций в отдельной ветви. Все матричные формулы нумеруются и их номера соответствуют строкам таблицы, которые описывают операцию и номера операндов. Номера матриц играют роль их идентификаторов и позволяют описать содержательную часть алгоритма без использования индексов матриц и без номеров описания символьных матриц в МРТ.

Третья таблица AST связывает две предшествующие (то есть содержательное описание алгоритма и индексы объектов) с таблицей описания символьных матриц. Номер ее строки равен номеру матричной формулы в AMT, а номер столбца в ABT, то есть номеру тела ветви, к которому она применена, значение элемента равно номеру описания матрицы результата в таблице описания матриц. Для каждой элементарной матричной операции алгоритма сначала в таблицах МРТ и МЕТ формируется описание с нулевыми элементами результирующей матрицы, способ вычисления которой описан в i-й строке таблицы АМТ, а индекс определен значением j-го элемента строки В таблицы АВТ. Ее номер в МРТ присваивается элементу (i, j) таблицы АST. Ненулевые элементы матрицы-результата определяются впоследствии при выполнении в символьном виде скалярных операций в соответствии с заданным способом ее вычисления.

Заполнение таблиц при расчете УД зависимой ветви из четырех звеньев по алгоритму составного тела показано на рисунке 19. При вычислении матрицы обобщенной инерции алгоритм содержит внешний (c=1) и два внутренних – прямой (c=2) и обратный (c=3) циклы. Число выполняемых внутренних циклов зависит от параметров внешнего. На рисунке 19а они показаны разными цветами, а направления вычислений – стрелками. Вычисление вектора обобщенных сил выполняется последовательно в трех циклах. В первом прямом (c=1) вычисляется кинематика, во втором прямом (c=2) и в обратном (c=3) вычисляется искомый вектор (рисунок 196).



Рисунок 19. Структура заполнения таблицы AST при реализации алгоритма составного тела для: а) для (4×4) – матрицы обобщенной инерции; б) для (4×1) – вектора обобщенных сил

Далее в приложении коротко описывается этап оптимизации вычислений, на котором исключаются неиспользуемые СМВ, а индексируемые элементы матриц преобразуются в скалярные переменные. При формировании в символьном виде исходного кода вычислительной процедуры однократно используемые промежуточные переменные заменяются элементарными СМВ, которые они обозначают.

Заключение

В диссертации впервые разработаны общие методические основы создания корректных, детальных и вычислительно эффективных компьютерных моделей динамики стыковки и причаливания космических аппаратов, при этом получены следующие научные результаты.

- 1. Определены общие структурные особенности стыковочных механизмов, разработаны компьютерные алгоритмы формирования и решения уравнений контурных связей, расчета динамики стыковочных механизмов центрального и периферийного типов как систем твердых тел.
- 2. Разработаны компьютерные алгоритмы расчета деформаций с гистерезисом звеньев и передач к различным устройствам СтМ, использующие модели, основанные на экспериментальных данных.
- 3. Получены уравнения динамики стыкуемых космических аппаратов с учетом их контактного взаимодействия, вычислительно эффективный способ расчета упругих колебаний их конструкции.
- 4. Определен способ описания сложных контактирующих поверхностей стыковочных агрегатов, разработаны алгоритмы определения координат и параметров точек контакта. Разработаны модели контактного взаимодействия стыковочных агрегатов центрального и периферийного типа, специализированных устройств для выполнения причаливания.
- 5. Разработана компьютерная модель динамики стыковки с использованием существующих агрегатов центрального типа. Предложены модификации кинематической схемы стыковочного механизма, снижающие нагрузки и расширяющие его функциональные возможности, исследована динамика их функционирования.
- Предложены новый принцип функционирования и кинематическая схема периферийного стыковочного механизма, разработана его компьютерная модель и исследованы особенности динамики стыковки космических аппаратов при его использовании.
- Впервые предложен и реализован способ гибридного моделирования в реальном времени на 6-степенном стенде причаливания космических аппаратов. Для этого разработаны уравнения динамики космического манипулятора и переносимого им полезного груза большой массы.
- 8. Предложен и реализован новый принцип визуализации результатов моделирования пространственного контактного взаимодействия и функционирования СтМ при стыковке и причаливании.

Основные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1. Яскевич А.В. Математическая модель космического манипулятора для полунатурной отработки операций причаливания полезного груза. // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2004. №4. С. 157-176.
- Яскевич А.В. Комбинированные уравнения движения для описания динамики стыковки космических аппаратов с помощью системы «штырьконус». //Изв. РАН. Космические исследования. 2007. Том 45. №4. С. 325 336.
- 3. Яскевич А.В. Изменения параметров стыковочного механизма, обеспечивающие снижение нагрузок при стыковке космических кораблей с международной космической станцией. // Космонавтика и ракетостроение. 2008. №2 (51). С. 93-101.

- 4. Яскевич А.В. Математическая модель периферийного стыковочного механизма. Часть 1. Уравнения движения дифференциальных механизмов. //Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7. С. 63-70.
- 5. Лесков А.Г., Яскевич А.В., Илларионов В.В., Морошкин С.Д., Чернышев И.Е. Математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе причаливания. // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва). 2013. №9 (21). С. 57 (13 С.).
- 6. Яскевич А.В. Математические модели гистерезиса, описывающие деформации механизмов для стыковки космических аппаратов. // Электронный журнал «Труды МАИ». Труды МАИ. №83. 2015. 23 С.
- 7. Яскевич А.В. Кинематическая схема стыковочного механизма типа «штырь-конус» для перспективных космических кораблей. //Космическая техника и технологии. 2017. № 4 (19). С. 95-100.
- 8. Яскевич А.В. Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 1. Алгоритмы для механических систем со структурой дерева. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Том 19. №1. С. 58 – 64.
- 9. Яскевич А.В. Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 2. Алгоритмы для кинематических контуров. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Том 19. №2. С. 139 – 144.
- 10. Яскевич А.В. Алгоритмы определения параметров контакта при моделировании стыковки и причаливания космических аппаратов. // Космическая техника и технологии. 2018. №2 С. 80-92.
- 11. Яскевич А.В. Контактные силы в уравнениях движения космических аппаратов при стыковке и причаливании. // Космическая техника и технологии. 2018. №3. С. 90-102.
- 12. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Уравнения динамики периферийных стыковочных механизмов как параллельных манипуляторов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 59. 32 С.
- Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерное моделирование динамики периферийного упруго-адаптивного стыковочного механизма космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 76.35 С.
- 14. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерное моделирование динамики стыковочных механизмов центрального типа для космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 89. 40 С.
- 15. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Гибридное моделирование на 6-степенном стенде причаливания космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 117. 24 С.
- 16. Яскевич А.В. Математическая модель динамики периферийного стыковочного механизма с накоплением энергии сближения космических аппаратов. // Космическая техника и технологии. 2019. № 3. С. 98-108.
- 17. Яскевич А.В. Особенности динамики стыковки космических аппаратов при использовании периферийного механизма с накоплением кинетиче-

ской энергии сближения. // Космическая техника и технологии. 2019. № 4. С. 109-120.

- Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерные модели контактного взаимодействия стыковочных агрегатов космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 4. 40 С.
- Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Гибридное моделирование причаливания космических аппаратов. // Изв. РАН. Теория и системы управления. №4. 2020 г. С 136 – 150.
- 20. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Оптимизация вычислений в процедурах расчета динамики систем твердых тел. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 22. 44 С.
- 21. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В., Мирхайдаров В.М. Оценка динамики причаливания на компьютерном стенде моделирования в реальном времени. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 84. 24 С.

Результаты исследований защищены патентами РФ на новые кинематические схемы и принципы функционирования стыковочных механизмов:

- Патент № 2706639. Российская федерация. Стыковочный механизм космического аппарата. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Шепелкин Н.А., Бурцев М.А., Чернышев, И.Е., Рассказов Я.В; заявитель и патентообладатель – ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 19.11 2019 г.; приоритет от 20.10.2016 г.
- Патент № 2662605. Российская федерация. Стыковочный механизм космического аппарата. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Шепелкин Н.А., Бурцев М.А., Чернышев, И.Е., Рассказов Я.В; заявитель и патентообладатель ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 26.07 2018 г.; приоритет от 20.10.2016 г.
- Патент № 2657623. Российская Федерация. Периферийный стыковочный механизм. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Чернышев И.Е. Рассказов Я.В., Земцов Г.А., Карпенко А.А.; заявитель и патентообладатель — ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 14.06 2018 г.; приоритет от 01.06.2017 г.
- 4. Патент № 2706741. Российская Федерация. Устройство стягивания периферийного стыковочного механизма. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Рассказов Я.В., Чернышев И.Е., заявитель и патентообладатель ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 20.11 2019 г.; приоритет от 25.12.2018 г.

Подписано в печать 17.03.2021 г. Формат А5 Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 60 экз. Типография Абрис-М 141070 г. Королев Московской обл., ул. Карла Маркса, д.1а Тел. +7 (495) 516-82-14