

<u>ИПМ им.М.В.Келдыша РАН</u> • <u>Электронная библиотека</u> <u>Препринты ИПМ</u> • <u>Препринт № 89 за 2019 г.</u>

ISSN 2071-2898 (Print) ISSN 2071-2901 (Online)

Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В.

Компьютерное моделирование динамики стыковочных механизмов центрального типа для космических аппаратов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: 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. doi:<u>10.20948/prepr-2019-89</u>

URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-89

Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М.В.Келдыша Российской академии наук

Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В.

Компьютерное моделирование динамики стыковочных механизмов центрального типа для космических аппаратов

Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В.

Компьютерное моделирование динамики стыковочных механизмов центрального типа для космических аппаратов

В настоящей работе описаны основные особенности кинематики и математические модели динамики стыковочных механизмов, используемых в активных агрегатах системы стыковки типа «штырь-конус» для космических аппаратов. Результаты компьютерного моделирования позволили предложить модификации кинематической схемы, которые исключили недостатки существующего механизма и обеспечили возможность стыковки к пассивным агрегатам с различными вариантами формы приемного конуса.

Ключевые слова: космические аппараты, стыковочные механизмы, система стыковки «штырь-конус», математическое моделирование

Golubev Y.P., Yaskevich A.V.

Computer simulation of dynamics of central type docking mechanisms for spacecrafts

This paper describes kinematic main features and dynamic math models of docking mechanisms used in active units of probe-cone docking system for spacecrafts. Computer simulation results allowed to propose some kinematical scheme modifications which eliminate shortcomings of existing mechanism and provide a docking possibility to passive units with different variants of receiving cone shape.

Key words: spacecrafts, docking mechanisms, probe-cone docking system, math simulation

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ: 19-01-00123)

Оглавление

Введение	3
1. Особенности кинематики стыковочных механизмов центрального типа	4
2. Математические модели динамики стыковочных механизмов	. 10
3. Модификация осевого и бокового демпферов	. 25
4. Подвижный ограничитель относительных поворотов	
стыкуемых космических аппаратов	. 34
Заключение	. 38
Библиографический список	39

Введение

Стыковка космических аппаратов реализуется активным и пассивным стыковочными агрегатами и начинается с момента их первого контакта. Для уменьшения начальных линейных и угловых рассогласований агрегаты имеют направляющие элементы, которые являются фрагментами конических, сферических или цилиндрических поверхностей. Эти элементы в стыковочных агрегатах центрального типа компонуются вдоль и вокруг их продольных осей. На одном из агрегатов основным направляющим элементом является головка подвижного штыря, а на другом – неподвижный конус с приемным гнездом. При сближении космических аппаратов головка после нескольких контактов с конусом попадает в приемное гнездо, при этом ее защелки заходят за упоры гнезда и образуется сцепка агрегатов. После этого происходит поглощение энергии сближения космических аппаратов, выравнивание и стягивание агрегатов, образование их жесткого соединения. При сцепке головка и гнездо образуют соединение, эквивалентное шарниру вращения с тремя степенями подвижности, вследствие этого агрегаты могут разворачиваться друг относительно друга. Амплитуда этих угловых движений максимальна на этапе поглощения энергии сближения. Ее необходимо ограничивать для предотвращения нежелательных контактов элементов конструкции стыкуемых космических аппаратов. На этапе стягивания стыковочные агрегаты должны выравниваться друг относительно друга, то есть их относительные угловые рассогласования должны постепенно уменьшаться практически до нуля для обеспечения совмещения конструктивных элементов на их стыковочных плоскостях и образования жесткого соединения. Ограничение боковых промахов и относительных разворотов осуществляется за счет контактов с конусом направляющих элементов ответного агрегата. Во время этих контактов должна поглощаться энергия относительного движения космических аппаратов. Поэтому направляющие элементы являются частью буферных звеньев, движению которых противодействуют устройства демпфирования. Эти звенья вместе с устройствами демпфирования образуют стыковочный механизм центрального типа. В состав этого механизма входят штырь с головкой и защелками для сцепки, устройство демпфирования поступательного перемещения штыря относительно корпуса, буферные звенья с демпфирующими устройствами, обеспечивающие ограничение разворотов и выравнивание, и привод, который выдвигает механизм в положение готовности к стыковке или втягивает его, совмещая стыковочные плоскости.

Агрегаты типа «штырь-конус» [1], используемые для стыковки российских кораблей и модулей, де-факто стали одним из стандартов в области космической техники. Уравнения динамики стыковки с использованием разработанного в 70-е годы прошлого века стыковочного механизма центрального типа рассмотрены в [2]. Ниже представлены результаты компьютерного моделирования динамики модификаций этого механизма с использованием более точных и эффективных алгоритмов и моделей его устройств.

1. Особенности кинематики стыковочных механизмов центрального типа

На начальном этапе разработки систем стыковки оценивалась возможность реализации различных концепций [3]. Использование гибкого штыря было признано неперспективным из-за сложности механического ограничения относительных перемещений космических аппаратов после сцепки, необходимости управления двумя объектами с упругой связью. Тем не менее, в предшествующее десятилетие компания Michigan Aerospace на основе такого подхода разработала действующие макеты стыковочных агрегатов типа «штырь-конус» для микроспутников [4], осуществила их компьютерное моделирование [5] и экспериментальную отработку в летающей лаборатории искусственной невесомости [6] (в условиях силы тяжести гибкий штырь провисал под собственным весом). Судя по публикациям, основное внимание уделялось разработке конструкции механизма, обеспечивающего сцепку за счет быстрого выдвижения гибкого штыря. Эксперименты показали, что выравнивание не гарантируется даже при малой массе стыкуемых аппаратов. Поэтому стыковочные механизмы с гибким штырем в данной работе не рассматриваются.

В первых стыковочных механизмах центрального типа, использованных для стыковки реальных космических аппаратов, жесткий или деформируемый штырь с головкой мог с целью демпфирования ударов перемещаться только поступательно относительно шарнира, жестко связанного с космическим аппаратом. Поэтому до сцепки контактное взаимодействие головки и конуса ослаблялось лишь частично, осевыми демпферами. Боковая по отношению к головке составляющая контактной силы действовала непосредственно на активный космический аппарат, заставляя разворачиваться его, а не малоинерционный стыковочный механизм. Вследствие этого для сцепки без отскока необходимо было осуществлять сближение с большей скоростью, что приводило к увеличению контактной силы.

Так, например, для стыковки космического корабля Аполлон с лунным модулем, а позднее со станцией Скайлэб использовался стыковочный механизм (рис. 1а) и приемный конус с отверстием для сцепки (рис. 1б). В стыковочном механизме [3, 7] после отпускания управляемой скобой 1 «уха» 2 штырь 3 в виде поршня выдвигался перед стыковкой из неподвижного корпуса 4 пружиной 5, которая являлась также осевым демпфером (рис. 1в). Головка 6 с тремя защелками для увеличения подвижности и ускорения сцепки была связана со штырем подпружиненным универсальным шарниром 7. Сцепка достигалась при входе защелок в отверстие в вершине приемного конуса. Для ограничения относительных разворотов механизма и приемного конуса после сцепки и их выравнивания при стягивании использовались три радиально расположенных плоских рычажных механизма. Три буферных звена 8 контактировали с приемным конусом. Каждое из них было связано с концом штыря шарниром вращения 9, а с неподвижным корпусом механизма – двумя кинематическими



Puc. 1. а) Стыковочный механизм космического корабля Аполлон, б) приемный конус, в) упрощенная кинематическая схема стыковочного механизма

цепями. Первая с демпфером 10 смягчала контактное взаимодействие при ограничении относительных поворотов космических аппаратов. Вторая с возможностью начального свободного хода и тарельчатой пружиной 11 обеспечивала окончательное выравнивание при стягивании стыковочного механизма с приемным конусом. После стыковки штырь втягивался обратно сжатым азотом из баллонов 12, защелки убирались ручным 13 или электрическим 14 приводом.

В первом российском стыковочном механизме [1] штырь также перемещался относительно неподвижного корпуса. Угловое выравнивание агрегатов выполнялось с помощью радиально расположенных рычагов, разворачиваемых при втягивании штыря приводом и упирающихся в приемный конус. Впоследствии в конструкцию стыковочного механизма был введен качающийся в произвольном направлении корпус, связанный с основанием универсальным шарниром и параллельными пространственными кинематическими цепями с демпферами и пружинами. Относительно этого корпуса поступательно перемещается штырь. Такая схема позволяет разворачивать при контакте головки с конусом, прежде всего, малоинерционный стыковочный механизм, а не космический аппарат. Вследствие этого уменьшаются контактные нагрузки и улучшается сцепка.

Для ограничения угловых разворотов космических аппаратов после сцепки стыковочный механизм должен иметь ограничитель, контактирующий с входной гранью приемного конуса (силовой частью конструкции) пассивного агрегата. Для поглощения энергии этих разворотов такой ограничитель устанавливается на качающемся корпусе и имеет форму усеченного конуса с углом образующей, не меньшим, чем такой же угол у приемного конуса. Обычно он является внешней частью конструкции качающегося корпуса. Его большее основание, расположенное ближе к шарниру стыковочного механизма, имеет радиус меньше радиуса входной грани приемного конуса. Ограничитель контактирует с приемным корпусом через свои силовые накладки, расположение которых соответствует его конической поверхности.

Во время стягивания качающийся корпус может разворачиваться относительно приемного конуса пассивного агрегата. Но их выровненное по всем трем углам положение должно быть обеспечено до сближения стыковочных плоскостей в течение времени, достаточного для поглощения оставшейся энергии относительного углового движения космических аппаратов. При выполнении этого условия агрегаты качаются друг относительно друга в универсальном шарнире стыковочного механизма и разворачиваются относительно своих продольных осей. Энергия такого вращения поглощается демпферами в параллельных кинематических цепях качающегося корпуса стыковочного механизма. Для демпфирования разворотов космических аппаратов относительно своих продольных осей специальные устройства, как правило, не используются из-за малых моментов инерции относительно этих осей, усложнения и увеличения габаритов конструкции стыковочных механизмов.

Если ограничитель является внешней частью конструкции качающегося корпуса, то его расстояние до шарнира механизма остается постоянным, и он не может отслеживать поверхность приемного конуса, приближающуюся к этому шарниру при стягивании агрегатов. Поэтому для выравнивания качающегося корпуса относительно оси приемного конуса требуется дополнительное устройство, которое может быть установлено только в этом же корпусе. Наиболее естественно реализовать его в виде рычагов, поворачивающихся в различных радиальных направлениях. Концы этих рычагов должны двигаться по траектории, соответствующей изменяющемуся в процессе стягивании расстоянию между центром шарнира стыковочного механизма и поверхностью приемного конуса. То есть эта траектория должна определяться длиной свободной части штыря. В процессе выравнивания концы отдельных рычагов (но не все одновременно) могут контактировать с поверхностью приемного конуса, обеспечивая близкое к соосному с ним положение качающегося корпуса.

Движение штырю относительно качающегося корпуса сообщает привод, который может находиться только внутри этого же корпуса. Так как траектория

движения концов выравнивающих рычагов однозначно определяется длиной свободной части штыря, то вращение от привода может быть передано на кулачок, задающий вид этой траектории.

Эти особенности кинематики стыковочных механизмов центрального типа характерны для конструкций, разработанных в 70-е годы прошлого века в Центральном конструкторском бюро машиностроения (ЦКБМ) [8, 9] и НПО (в настоящее время Ракетно-космическая корпорация – РКК) «Энергия» [1]. Стыковочные агрегаты РКК «Энергия» – активный со стыковочным механизмом (рис. 2а) и пассивный с приемным конусом (рис. 2б) с незначительными модификациями используются до настоящего времени. Упрощенная кинематическая схема стыковочного механизма приведена на рис. 2в.







В

Рис. 2. а) Активный стыковочный агрегат со стыковочным механизмом центрального типа (разработка РКК «Энергия»), б) пассивный агрегат с приемным конусом и гнездом, в) упрощенная кинематическая схема стыковочного механизма

Штырь 1, представляющий собой полый винт, имеет головку 2 сферической формы и через направляющие подшипники 3 входит в качающийся корпус 4, связанный универсальным шарниром 5 с неподвижным корпусом 6, основанием стыковочного механизма. Шарико-винтовой преобразователь 7 трансформирует поступательное движение штыря во вращательное, которое передается на спиральный пружинный механизм 8 с ограниченной величиной одностороннего хода, фрикционный тормоз 9 и магнитный тормоз 10 осевого демпфера 11. Выдвижение штыря в исходное перед стыковкой положение и втягивание его в качающийся корпус осуществляется приводом 12. Передача вращения от осевого демпфера на валы электродвигателей блокируется соединенными с этими валами стопорными муфтами. Датчик 13 исходного положения формирует сигнал на остановку привода при выдвижении штыря перед стыковкой. По периметру конической поверхности ограничителя качающегося корпуса установлены силовые накладки 14. Боковой демпфер 15 пространственных разворотов качающегося корпуса содержит радиально расположенные два пружинных механизма 16 и два магнитных тормоза 17. Их пространственные параллельные кинематические цепи не изменяют число степеней подвижности качающегося корпуса и имеют тип соответственно $U_k P_k S_k$ $(k = \overline{1,2})$ и $R_k U_k S_k$ $(k = \overline{3,4})$, где P_k – обозначает поступательный, R_k – вращательный, U_k – универсальный, S_k – сферический шарнир. Величины углов качания корпуса измеряются датчиками 18. Максимальные значения этих углов ограничены механическими упорами в пружинных механизмах и в кинематических цепях передачи движения к электромагнитным тормозам.

На заключительном этапе стягивания стыковочных агрегатов используются три рычага выравнивания 19, траектория движения которых определяется формой кулачка 20, вращение которого однозначно связано с поворотом гайки шарико-винтового преобразователя и длиной свободной части штыря. При выравнивании ролики этих кулачков могут контактировать с поверхностью 28 приемного конуса. На головке штыря имеются четыре защелки 21, которые приводятся в исходное положение перед стыковкой и убираются после нее приводом 22, установленным в задней части качающегося корпуса и связанным с ними тягой 23. На головке штыря также имеются датчики 24, 25 и 26, сигнализирующие о ее контакте с приемным конусом, дном гнезда и о наличии сцепки соответственно. Их показания используются при реализации циклового режима управления процессом стыковки. Неподвижный корпус 6 соединен с крышкой переходного люка 27, которая может быть открыта после стыковки при полностью втянутом штыре.

Траектория движения рычагов выравнивания при поступательных перемещениях штыря определяется формой кулачка 1 (рис. 3), вращение на который передается от гайки шарико-винтового преобразователя. Направляющий ролик 2 обкатывает кулачок, вращая ведущий рычаг 3 относительно своей оси. Это вращение через конические шестерни 4 передается на ведомые рычаги 5. На концах всех рычагов установлены ролики 6, которые могут контактировать с поверхностью приемного конуса. Замкнутая кривая, описывающая форму кулачка, заключена между двумя окружностями. При нахождении ролика 2 в ее секторе, совпадающем с окружностью меньшего радиуса, рычаги не выдвигаются. Вследствие передачи вращения от шарико-винтового преобразователя на кулачок 1 ролик 2 движется относительно последнего в направлении 7 при выдвижении штыря из полностью втянутого, конечного положения (КП) в исходное положение (ИП) перед стыковкой и в противоположном направлении 8 при поглощении энергии сближения и стягивании.



Рис. 3. Формирование траектории рычагов выравнивания при выдвижении штыря в исходное положение (ИП) перед стыковкой и при его втягивании в конечное положение (КП) при соединении стыковочных агрегатов

Геометрия гнезда 1 приемного конуса и головки 2 штыря, в отличие от отверстия в приемном конусе и головки механизма корабля Аполлон, позволяют выравнивать активный агрегат при его вращении относительно продольной оси пассивного (рис. 4). Головка штыря может целиком войти в гнездо и раскрыть



Рис. 4. Контакты защелок головки с пазами и упорами гнезда приемного конуса

свои защелки 3 внутри фигурных пазов 4 после прохождений ими упоров 5 (осуществить сцепку). После этого центр головки может двигаться в гнезде поступательно. Во время этого движения выравнивание активного агрегата относительно продольной оси пассивного осуществляется контактными силами защелок с гранями пазов за счет сужающейся формы этих пазов. После прохождения защелкой узкой части ответного паза она контактирует с соответствующим упором. При стягивании агрегатов (втягивании штыря) все защелки входят в узкую часть ответных пазов, осуществляя угловое выравнивание, и контактируют с плоскостями граней всех упоров. Полный контакт всех защелок с упорами возможен также при стыковке с нулевыми рассогласованиями. Точечные и плоскостные контакты показаны на рисунке красным цветом.

2. Математические модели динамики стыковочных механизмов

В данной работе, по сравнению со статьей [2], в расчетную схему стыковочного механизма введены новые степени свободы, уточняются уравнения динамики, коротко описываются способы расчета входящих в них внутренних сил и моментов.

Стыковочный механизм центрального типа имеет последовательнопараллельную структуру. Его центральная ветвь включает в себя штырь с головкой, качающийся корпус с осевым демпфером, приводом и устройством выравнивания и возможно подвижный ограничитель. Боковой демпфер имеет не менее четырёх параллельных кинематических цепей, связывающих качающийся корпус с основанием механизма. Полый штырь обладает податливостью такого же порядка, как и боковой демпфер. Распределенные упругие свойства его свободной части заменяются фиктивным шарниром с сосредоточенной жесткостью на выходе из качающегося корпуса. Это позволяет использовать при описании стыковочного механизма алгоритмы моделирования динамики систем твердых тел. В то же время штырь с головкой является последним звеном центральной ветви, поэтому его инерция в поступательном осевом движении практически не изменяется.

Уменьшение длины свободной части штыря $\Delta_{L,Pr} < 0$ под действием контактной силы вызывает поворот гайки шарико-винтового преобразователя на положительный угол $\varphi_{Nut} = -i_{Nut} \Delta_{L,Pr}$, где $i_{Nut} = 2\pi/t$, t-шаг винта. Гайка, в свою очередь, через передачу, пружинный механизм 8 и фрикционный тормоз 9 связана с выходным валом привода 12. Уравнения динамики осевого демпфера описывают вращение гайки с суммарным приведенным моментом инерции I_{Nut}^{tot} , учитывающим массу штыря, моменты инерции фрикционного и электромагнитных тормозов, а также передач

$$I_{Nut}^{tot}\ddot{\varphi}_{Nut} = m_{NutScrew} - m_{FR} \left(\varphi_{FR}, \dot{\varphi}_{FR} \right) - sign(\varphi_{Nut}) m_{MB} \left(|\dot{\varphi}_{Nut}| \right), \qquad (2.1)$$

(**a a**)

где $m_{NutScrew} = -\mathbf{f}_{H}^{E}(1)(1-sign(\dot{\Delta}_{L,\mathrm{Pr}})k_{NutFr})/i_{Nut}$ – момент, передаваемый гайке от винта штыря, на головку которого действует внешняя осевая контактная сила $\mathbf{f}_{H}^{E}(1)$; k_{NutFr} – коэффициент трения в шарико-винтовом преобразователе; $m_{FR}(\varphi_{FR},\dot{\varphi}_{FR})$ – приведенный к оси гайки момент сопротивления пружины и фрикционного тормоза; $\varphi_{FR} = i_{Nut,FR}(\varphi_{Nut} - \varphi_{Dive}/i_{Nut,Drive})$ – угол поворота входного вала кинематической цепи с фрикционным тормозом относительно ее выходного вала; $\dot{\varphi}_{FR} = i_{Nut,FR}(\dot{\varphi}_{Nut} - \dot{\varphi}_{Drive}/i_{Nut,Drive})$ – скорость изменения этого угла; φ_{Dive} и $\dot{\varphi}_{Dive}$ – угол поворота и скорость вращения выходного вала привода, связанного с выходным валом фрикционного тормоза; $m_{Nut,MB}$ – приведенный к оси гайки момент сопротивления двух осевых магнитных тормозов; $i_{Nut,FR}$, $i_{Nut,Drive}$ – коэффициенты передачи от гайки к входному валу кинематической цепи с фрикционным тормозом и к выходному валу привода соответственно.

Масса штыря, участвующего в поступательном перемещении, и соответственно величина I^{tot} считаются постоянными. Выбор такой формы уравнений обусловлен большим значением коэффициента передачи i_{Nut} шарико-винтового преобразователя. Масса всех кинематических цепей вращения осевого демпфера учтена в массе качающегося корпуса. Приведение инерции вращения этих цепей к поступательному перемещению штыря привело бы к появлению его большой дополнительной осевой массы, не участвующей в переносном движении механизма и искажающей описание его динамики. В то же время из-за большой величины *i_{Nut}* динамика осевого демпфера практически не зависит от пространственного переносного углового движения качающегося корпуса. Кроме того, описание вращения осевого демпфера хорошо согласуется с уравнениями динамики привода стыковочного механизма. В результате движение стыковочного механизма описывается двумя отдельными группами уравнений. Первая определяет ускорения вращения осевого демпфера и связанного с ним привода, вторая – угловые ускорения качающегося корпуса и ускорения угловых деформаций свободной части штыря.

Привод стыковочного механизма содержит два электродвигателя, связанные с выходным редуктором через дифференциал. Его модель, включающая уравнения динамики и соотношения для определения угла поворота φ_{Dive} и скорости вращения $\dot{\varphi}_{Dive}$ выходного вала, приведена в [10].

При выдвижении штыря в исходное положение перед стыковкой имеем $\dot{\phi}_{Dive} < 0$, $\phi_{Dive} < 0$ и соответственно $\phi_{FR} > 0$, $\dot{\phi}_{FR} > 0$. При этом спиральная пружина не закручивается, так как момент ее предварительного поджатия больше момента трения в редукторе. Момент $m_{FR} > 0$ не превышает момента поджатия пружины и создается деформацией кинематической передачи. В ре-

зультате получим $\ddot{\varphi}_{Nut} < 0$, $\varphi_{Nut} < 0$ и $\Delta_{L,Pr} > 0$ – штырь выдвигается до момента срабатывания контактного датчика исходного положения.

При поглощении энергии сближения космических аппаратов свободная длина штыря уменьшается, то есть $\Delta_{L,Pr} < 0$ и $\varphi_{Nut} > 0$. Вращение от выходного вала фрикционного тормоза на валы выключенных электродвигателей привода блокируется их стопорными муфтами, поэтому $\varphi_{Dive} = 0$. Соответственно $\varphi_{FR} > 0$, и пружинный механизм, а при исчерпании его хода – фрикционный тормоз создают положительный момент $0 < m_{FR} < m_{FR}^{max}$, противодействующий увеличению угла φ_{Nut} , то есть уменьшению длины свободной части штыря (рис. 2в).

При стягивании $\dot{\varphi}_{Dive} > 0$, $\varphi_{Dive} > 0$, при этом момент нагрузки на выходной вал привода создает сила $\mathbf{f}_{H}^{E}(1) > 0$ сопротивления, обусловленная контактным взаимодействием головки штыря с приемным гнездом. Она пересчитывается в момент $m_{Screw} < 0$, действующий на гайку, и в момент $m_{Screw} / i_{Nut,Drive} < 0$ передаваемый на выходной вал привода через редуктор и фрикционный тормоз. Эта сила стремится вытянуть штырь, то есть увеличить ΔS и соответственно уменьшить φ_{Nut} . Таким образом, при стягивании $\varphi_{FR} < 0$, $\dot{\varphi}_{FR} < 0$. При этом пружинный механизм выходит на упор и его спиральная пружина не деформируется, а фрикционный тормоз ограничивает отрицательный момент, передаваемый от привода на гайку, величиной m_{FR}^{min} (рис. 5а). Этот момент способствует увеличению угла φ_{Nut} и уменьшению свободной части штыря.



Рис.5. а) Идеализированная характеристика момента сопротивления, создаваемого пружинным механизмом (ПМ) и фрикционным тормозом (ФрТ), б) характеристика момента сопротивления с учетом гистерезиса и деформации передач

Для момента сопротивления кинематической цепи с фрикционом характерен эффект гистерезиса (рис. 56). Его модель в виде кусочно-линейной зависимости с переменными параметрами и алгоритм выбора ее очередного линейного участка описаны в [11].

Текущая величина момента сопротивления кинематической цепи с фрикционным тормозом определяется соотношением

$$m_{FR}(\varphi_{FR}, \dot{\varphi}_{FR}) = i_{Nut, FR} [m_{FR,i}^{Beg} + k_{FR,i}(\varphi_{FR} - \varphi_{FR,i}^{Beg}) + c_{D,FR} \dot{\varphi}_{FR}],$$

где $m_{FR,i}^{Beg}$, $\varphi_{FR,i}^{Beg}$, $k_{FR,i}$ – начальное значение момента сопротивления, начальный угол и угловая жесткость *i*-го линейного участка, соответствующего текущему углу φ_{FR} и его скорости $\dot{\varphi}_{FR}$; $c_{D,FR}$ – коэффициент конструкционного демпфирования.

Зависимость момента магнитного тормоза от скорости вращения его вала задается в исходных данных в виде массивов значений этих величин. При инициализации модели, перед интегрированием уравнений движения, они пересчитываются к гайке шарико-винтового преобразователя. Текущая абсолютная величина момента электромагнитного тормоза равна

$$m_{MB}(|\dot{\varphi}_{Nut}(t)|) = m_{MB}^{Beg} + k_{MB,i}(|\dot{\varphi}_{Nut}(t)| - \dot{\varphi}_{Nut,i}^{Beg}), \qquad (2.2)$$

где $\dot{\phi}_{Nut,i}^{Beg}$, m_{MB}^{Beg} – начальные значения скорости и момента, а $k_{MB,i}$ – коэффициент изменения последнего на *i*-м интервале зависимости, для которого $\dot{\phi}_{Nut,i}^{Beg} \leq |\dot{\phi}_{Nut}(t)| \leq \dot{\phi}_{Nut,i+1}^{Beg}$.

Все подвижные звенья устройства выравнивания связаны передачей с гайкой шарико-винтового преобразователя, поэтому их инерция учитывается в суммарном приведенном моменте инерции I^{tot}. Форма кулачка, управляющего движением рычагов выравнивания, задается в виде двух массивов значений – направляющих углов и соответствующих им радиусов. Между двумя соседними значениями углов величина радиуса изменяется линейно. При инициализации модели стыковочного механизма эти массивы пересчитываются соответственно в массивы углов поворота гайки и координат центров роликов всех выравнивающих рычагов относительно качающегося корпуса. На основе этих данных и текущего значения угла $\varphi_{Nut}(t)$ поворота гайки, получаемого в результате интегрирования уравнений динамики (2.1) осевого демпфера, вычисляются положения центров роликов рычагов выравнивания относительно приемного конуса. Далее определяются точки контакта этих геометрических объектов. При их наличии вычисляются реакции, действующие на приемный конус и качающийся корпус и входящие в уравнения динамики соответственно пассивного космического аппарата и стыковочного механизма. Изменение момента инерции качающего корпуса при выдвижении рычагов не учитывается из-за малой массы последних.

Качающийся корпус с боковым демпфером и деформируемый штырь стыковочного механизма представляются как пространственная система твердых тел с кинематическими контурами. Вычислительно наиболее эффективный способ описания такой системы основан на преобразовании структуры связей к древовидной посредством замещения отдельных шарниров уравнениями контурных связей. В данном случае замещаются шарниры, соединяющие качающийся корпус с не изменяющими его подвижность кинематическими цепями бокового демпфера. Эти кинематические цепи являются зависимыми, значения их шарнирных переменных определяются из решения уравнений контурных связей. Центральная кинематическая цепь, в которую входит качающийся корпус и деформируемый штырь, является независимой. В работе [2] описан способ комбинирования замкнутой и рекуррентной форм уравнений динамики при описании движения такой системы тел. Замкнутая форма уравнений обеспечивает приведение инерции, внутренних активных сил и моментов бокового демпфера к качающемуся корпусу - телу независимой центральной кинематической цепи. Рекуррентная форма уравнений, получившая название алгоритм присоединенного тела (Articulated Body Algorithm, ABA) [12-15], описывает динамику этой цепи и одновременно позволяет вычислять реакции в шарнирах, в том числе силы и моменты, действующие на основание стыковочного механизма, то есть на активный космический аппарат. Последнее является преимуществом по сравнению с уравнениями динамики в замкнутой форме. Силу и момент, действующие в основании механизма, достаточно вычислять только для одной, центральной независимой кинематической цепи, так как динамика бокового демпфера приведена к качающемуся корпусу.

Более точный и эффективный, по сравнению с [2], способ составления и решения уравнений контурных связей представлен в [16]. В обеих этих работах используется одинаковая система обозначений, которая здесь не приводится.

Качающийся корпус и кинематические цепи бокового демпфера образуют параллельный манипулятор, управляемое тело которого имеет две степени подвижности. В рекуррентном алгоритме присоединенного тела основные соотношения, описывающие поступательное и вращательное движения тел, условия равновесия сил и моментов, записываются в декартовой системе координат, а обобщенные ускорения степеней подвижности шарниров вычисляются в результате проецирования условий равновесия на единичные векторы относительных перемещений. Поэтому инерция зависимых кинематических цепей бокового демпфера должна приводиться к тензору инерции качающегося корпуса, а создаваемые им внутренние активные, а также инерционные силы и моменты – к вектору момента, действующего на этот корпус. Отсутствующая степень свободы корпуса, соответствующая его вращению относительно своей продольной оси, исключается в процессе реализации алгоритма присоединенного тела. В основании стыковочного механизма с центром универсального шарнира связана неподвижная декартова система координат $\mathbf{x}_0 \mathbf{y}_0 \mathbf{z}_0$, а в качающемся корпусе (управляемом теле) – вращающаяся декартова система координат $\mathbf{x}_C \mathbf{y}_C \mathbf{z}_C$. Для составления и решения уравнений контурных связей параллельного манипулятора, состоящего из качающегося корпуса и кинематических цепей бокового демпфера, используются алгоритмы, описанные в [16]. Но в отличие от последних (из-за отсутствия у управляемого тела поступательных перемещений) решения уравнений контурных связей относительно шарнирных скоростей и ускорений *k*-й кинематической цепи бокового демпфера, имеющей три степени подвижности, записываются в виде

$$\dot{\mathbf{p}}_{k} = [\mathbf{C}_{k}^{(d)}]^{-1} \mathbf{C}_{k}^{(i)} \boldsymbol{\omega}_{C} = \mathbf{H}_{k} \boldsymbol{\omega}_{C}, \qquad (2.3)$$
$$\ddot{\mathbf{p}}_{k} = [\mathbf{C}_{k}^{(d)}]^{-1} (\mathbf{C}_{k}^{(i)} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_{k}) = \mathbf{H}_{k} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{C} + \mathbf{h}_{k},$$

где $\mathbf{C}_{k}^{(i)} = -\boldsymbol{\alpha}_{C}^{T} \mathbf{\tilde{l}}_{C,k}$ и $\mathbf{C}_{k}^{(d)} - (3 \times 3)$ – матрицы, $\mathbf{c}_{k} - (3 \times 1)$ – вектор; $\mathbf{l}_{C,k}$ – векторы из центра универсального шарнира в центры замещаемых шарниров на качающемся корпусе; $\boldsymbol{\alpha}_{C}$ – ортогональная матрица преобразования из $\mathbf{x}_{0}\mathbf{y}_{0}\mathbf{z}_{0}$ в $\mathbf{x}_{C}\mathbf{y}_{C}\mathbf{z}_{C}$.

Вычислительно эффективные аналитические решения уравнений контурных связей для шарнирных координат зависимых кинематических цепей вида $U_k P_k S_k$ ($k = \overline{1,2}$) и $R_k U_k S_k$ ($k = \overline{3,4}$) также приведены в [16].

Уравнения динамики $k - \ddot{u}$ зависимой кинематической цепи бокового демпфера записываются в замкнутой форме. При этом элементы (3×3) – матрицы обобщенной инерции $\mathbf{A}_{k}^{(d)}$ и (3×1) – вектора $\mathbf{b}_{k}^{(d)}$ обобщенных сил вычисляются по алгоритму составного тела [16-18], более эффективному, чем используемые в [2] уравнения Кейна [19]. В результате применения метода разделения переменных [16, 20] вычисляются корректирующие значения тензора инерции качающегося корпуса $\Delta \mathbf{I}_{C}$ и действующего на него вектора суммарного инерционного и активного момента $\Delta \mathbf{m}_{C}^{\Sigma}$:

$$\Delta \mathbf{I}_{C} = \sum_{k=1}^{4} \mathbf{H}_{k}^{T} \mathbf{A}_{k}^{(d)} \mathbf{H}_{k}, \quad \Delta \mathbf{m}_{C}^{\Sigma} = \sum_{k=1}^{4} \mathbf{H}_{k}^{T} (\mathbf{b}_{k} - \mathbf{A}_{k}^{(d)} \mathbf{h}_{k}).$$
(2.4)

В центральной независимой кинематической цепи по сравнению с [2] добавлена еще одна степень подвижности, соответствующая кручению штыря под действием внешнего контактного момента. Это обусловлено получением новых экспериментальных данных, указывающих на значительный гистерезис при такой деформации. Учет этого фактора позволяет более точно описать затухание процесса контактного взаимодействия головки штыря и гнезда приемного конуса пассивного агрегата. В результате центральная простая кинематическая цепь имеет пять степеней подвижности – две описывают движение качающегося корпуса и три – изгибные и крутильные деформации штыря.

В последующей модификации стыковочного механизма будет введен подвижный ограничитель, перемещающийся поступательно относительно продольной оси качающегося корпуса. В расчетной схеме он является вторым телом, с учетом изгибающегося штыря, которое связано шарниром с этим корпусом. Поэтому вместо используемой в [2] блочно-матричной записи алгоритма присоединенного тела для простой кинематической цепи ниже приводится векторно-матричная форма этого алгоритма для механической системы с древовидной структурой. Она позволяет описывать динамику как существующего, так и модифицированного стыковочного механизма.

Переход от блочной к обычной векторно-матричной форме записи алгоритма обеспечивает исключение избыточных вычислений, не относящихся к виду текущего шарнира, однократное выполнение векторно-матричных операций, повторяющихся в различных частях алгоритма, заменой их результата промежуточными матричными переменными. Но главное – то, что от векторноматричной записи можно перейти к набору эквивалентных скалярных математических выражений, в которых операндами являются элементы векторов и матриц и в которых исключены избыточные скалярные операции сложения с нулями, умножения на нуль или единицу, сложения и умножения констант. Каждое не равное нулю или константе скалярное выражение обозначается скалярной промежуточной переменной, которая является операндом в последующих скалярных выражениях. При этом появляется возможность учета индивидуальных особенностей структуры выражений, описывающих поступательное и угловое движение тел, с целью дальнейшей минимизации объема вычислений. Благодаря такому представлению из полного набора скалярных выражений, реализующих алгоритм для конкретной механической системы, могут быть исключены те, которые не влияют на окончательный результат вычислений вследствие того, что в последующих математических выражениях обозначающие их переменные умножаются на ноль. Для этого с помощью обратных ссылок от результирующих выражений к исходным отмечаются те, которые используются в вычислениях, а остальные отбрасываются. Последовательность оставшихся выражений является скалярной записью алгоритма вычислений. Значительный выигрыш в быстродействии обеспечивается при отказе от использования индексируемых переменных. Для этого индексы матриц и их элементов вводятся непосредственно в идентификаторы скалярных математических величин.

При расчете движения механической системы по алгоритму присоединенного тела последовательно реализуются три рекуррентных процесса. В ходе первого, от корневого к терминальным телам, вычисляется кинематика тел. Вторым выполняется обратный, то есть от терминальных к корневому телу, рекуррентный процесс приведения инерционных свойств, сил и моментов последующих тел к предшествующим. Третьим реализуется прямой рекуррентный процесс расчета обобщенных ускорений в шарнирах.

В каждой ветви древовидной структуры механической системы используется последовательно возрастающая нумерация тел и их входных шарниров, соединяющих с предшествующими телами. Предполагается, что все шарниры имеют одну поступательную или вращательную степень подвижности, поэтому номера тел, ИХ входных шарниров и описывающих относительные перемещения обобщенных координат совпадают. Первой нумеруется ветвь, соединенная с основанием (тело 0). Индексы последних тел ветвей образуют терминальных Древовидная множество индексов тел. TB структура механической системы описывается задаваемой в исходных данных таблицей, каждая строка которой содержит номер j очередного тела ($j \in \overline{1, TB}$) и номер *p*(*j*) непосредственно ему предшествующего. В отдельной ветви в виде простой кинематической цепи имеем p(j) = j - 1. Из-за возможности ветвления индексация вектора \mathbf{l}_{j-1} и матрицы γ_{j-1} заменяется на $\mathbf{l}_{p(j),j}$ и $\gamma_{p(j),j}$, а индекс $j \in NB_i$, где NB_i – множество индексов i+1заменяется на тел, непосредственно следующих за телом *j*. Все остальные обозначения, введенные ранее в [2, 16], сохраняются.

Векторно-матричные соотношения первого рекуррентного процесса ($j = \overline{1, TB}$) вычисляют относительные положение и ориентацию, скорости и нелинейно зависящие от них составляющие поступательных и угловых ускорений очередного j – го тела кинематической цепи

$$\mathbf{r}_{p(j),j} = \mathbf{l}_{p(j),j} + \mathbf{\gamma}_{p(j),j}^{T} \mathbf{t}_{j}, \qquad \mathbf{\beta}_{j} = \mathbf{\alpha}_{j} \mathbf{\gamma}_{p(j),j}, \\ \mathbf{v}_{j}^{rel} = \mathbf{T}_{j}^{rel} \dot{\mathbf{q}}_{j}, \qquad \mathbf{\omega}_{j}^{rel} = \mathbf{R}_{j}^{rel} \dot{\mathbf{q}}_{j}, \\ \mathbf{\omega}_{p(j)}^{(j)} = \mathbf{\beta}_{j} \mathbf{\omega}_{p(j)}^{(p(j))}, \qquad \mathbf{\omega}_{j} = \mathbf{\omega}_{p(j)}^{(j)} + \mathbf{\omega}_{j}^{rel}, \\ \mathbf{w}_{j} = \mathbf{\beta}_{j} (\mathbf{\widetilde{\omega}}_{p(j)} \mathbf{\widetilde{\omega}}_{p(j)} \mathbf{r}_{p(j),j}) + 2\mathbf{\widetilde{\omega}}_{p(j)}^{(j)} \mathbf{v}_{j}^{rel}, \qquad \mathbf{\varepsilon}_{j} = \mathbf{\widetilde{\omega}}_{p(j)}^{(j)} \mathbf{\omega}_{j}^{rel}.$$

Здесь и далее верхний индекс в круглых скобках соответствует телу, в системе координат которого выражены матрицы или векторы. Он не указывается для объектов, описывающих движение текущего *j*-го тела.

Каждый шаг второго, обратного рекуррентного процесса (j = TB, 1)начинается с учета в матрицах инерции поступательного и вращательного движений очередного *j*-го тела вкладов $\Delta \mathbf{M}_{tr,k}^{(j)}$, $\Delta \mathbf{M}_{tr,k}^{(j)}$, $\Delta \mathbf{M}_{rr,k}^{(j)}$ всех непосредственно следующих за ним тел $(k \in NB_i)$ [21]

$$\mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} = m_j \mathbf{1}_3 + \sum_{k \in NB_j} \Delta \mathbf{M}_{tt,k}^{(j)}, \quad \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} = \widetilde{\mathbf{c}}_j^T + \sum_{k \in NB_j} \Delta \mathbf{M}_{tr,k}^{(j)}, \quad \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma} = \mathbf{I}_j + \sum_{k \in NB_j} \Delta \mathbf{M}_{rr,k}^{(j)},$$

где $\mathbf{c}_j = m_j \mathbf{d}_j$; $\Delta \mathbf{M}_{tt,i}^{(p(i))} = 0$, $\Delta \mathbf{M}_{tr,i}^{(p(i))} = 0$, $\Delta \mathbf{M}_{rr,i}^{(p(i))} = 0$ для $i \in TB$.

Далее вычисляются действующие на *j*-е тело суммарные векторы внешних активных, инерционных сил и моментов, а также активных и инерционных сил и моментов от всех тел, следующих за *j*-м

$$\mathbf{f}_{j}^{\Sigma} = \mathbf{f}_{j}^{E} - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{j} \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{j} \mathbf{c}_{j} + \sum_{k \in NB_{j}} \Delta \mathbf{f}_{k}^{(j)}, \quad \mathbf{m}_{j}^{\Sigma} = \mathbf{m}_{j}^{E} - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_{j} (\mathbf{I}_{j} \boldsymbol{\omega}_{j}) + \sum_{k \in NB_{j}} \Delta \mathbf{m}_{k}^{(j)}.$$

Вследствие использования в записи алгоритма шарниров с одной степенью подвижности только второе тело (качающийся корпус) и пятое (штырь) обладают инерцией. Остальные являются фиктивными. В приведенном тензоре инерции и векторе суммарного момента второго тела учитывается вклад (2.4) независимых кинематических цепей бокового демпфера

$$\mathbf{M}_{rr,2}^{\Sigma} = \mathbf{M}_{rr,2}^{\Sigma} + \Delta \mathbf{I}_{C}, \quad \mathbf{m}_{2}^{\Sigma} = \mathbf{m}_{2}^{\Sigma} + \Delta \mathbf{m}_{C}.$$

Матрицы \mathbf{T}_{j}^{rel} , \mathbf{R}_{j}^{rel} парциальных скоростей *j*-го шарнира имеют размерность (3×1) и содержат помимо нулевых только один единичный элемент: $\mathbf{T}_{j}^{rel}(i) = 1$ или $\mathbf{R}_{j}^{rel}(i) = 1$, где $i \in \overline{1,3}$ – индекс оси относительного движения. Поэтому масса (для поступательного) или момент инерции (для вращательного) текущего и всех последующих за ним тел, приведенные к этой оси, равны

$$m_j^* = \mathbf{T}_j^{rel T} \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} \mathbf{T}_j^{rel} = \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma}(i,i), \quad I_j^* = \mathbf{R}_j^{rel T} \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma} \mathbf{R}_j^{rel} = \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma}(i,i)$$

Внутренняя активная сила $f_{J,j}$ или момент $m_{J,j}$, развиваемые вдоль оси относительного движения в *j*-м шарнире, противодействуют не всем компонентам суммарной инерции, приведенной к очередному *j*-му телу. Соответственно вычисляются матрицы инерции этого тела с компонентами, которым не противодействуют внутренние активные силы и моменты в *j*-м и последующих за ним шарнирах. Для поступательного шарнира они определяются соотношениями

$$\mathbf{N}_{tt,j} = \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} - \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} \mathbf{D}_{t,j} \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma},$$

$$\mathbf{N}_{tr,j} = \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} - \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} \mathbf{D}_{t,j} \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma},$$

$$\mathbf{N}_{rr,j} = \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma} - \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma T} \mathbf{D}_{t,j} \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma},$$
(2.5.a)

где $\mathbf{D}_{t,j} = \mathbf{T}_{j}^{rel} m_{j}^{*-1} \mathbf{T}_{j}^{relT}$ – диагональная матрица, в которой не равен нулю только *i*-й элемент, равный m_{i}^{*-1} .

Для вращательного шарнира эти матрицы вычисляются аналогично

$$\mathbf{N}_{tt,j} = \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} - \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} \mathbf{D}_{r,j} \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma T},$$

$$\mathbf{N}_{tr,j} = \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} - \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} \mathbf{D}_{r,j} \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma},$$

$$\mathbf{N}_{rr,j} = \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma} - \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma T} \mathbf{D}_{r,j} \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma},$$
(2.5.6)

где $\mathbf{D}_{r,j} = \mathbf{R}_{j}^{rel} I_{j}^{*-1} \mathbf{R}_{j}^{rel T}$ – диагональная матрица, в которой не равен нулю только *i*-й элемент, равный I_{j}^{*-1} .

Эти матрицы преобразуются в систему координат предшествующего тела p(j)

$$\mathbf{N}_{tt,j}^{(p(j))} = \boldsymbol{\beta}_{j}^{T} \mathbf{N}_{tt,j} \boldsymbol{\beta}_{j}, \quad \mathbf{N}_{tr,j}^{(p(j))} = \boldsymbol{\beta}_{j}^{T} \mathbf{N}_{tr,j} \boldsymbol{\beta}_{j}, \quad \mathbf{N}_{rr,j}^{(p(j))} = \boldsymbol{\beta}_{j}^{T} \mathbf{N}_{rr,j} \boldsymbol{\beta}_{j}$$
(2.6)

и определяют вклад в его инерцию

$$\begin{split} \mathbf{N}_{1R,j}^{(p(j))} = & \mathbf{N}_{tt,j}^{(p(j))} \, \tilde{\mathbf{r}}_{p(j),j}^{T}, \qquad \mathbf{N}_{2R,j}^{(p(j))} = & \mathbf{N}_{tr,j}^{(p(j))T} \, \tilde{\mathbf{r}}_{p(j),j}^{T}, \\ \Delta & \mathbf{M}_{tt,j}^{(p(j))} = & \mathbf{N}_{tt,j}^{(p(j))}, \qquad \Delta & \mathbf{M}_{tr,j}^{(p(j))} = & \mathbf{N}_{1R,j}^{(p(j))T} + & \mathbf{N}_{tr,j}^{(p(j))}, \\ \Delta & \mathbf{M}_{rr,j}^{(p(j))} = & \tilde{\mathbf{r}}_{p(j),j} \mathbf{N}_{1R,j}^{(p(j))} + & \mathbf{N}_{2R,j}^{(p(j))} + & \mathbf{N}_{rr,j}^{(p(j))T} + & \mathbf{N}_{rr,j}^{(p(j))}. \end{split}$$

Из условия динамического равновесия для *j*-го тела следует, что силы и моменты (активные и реакций), действующие на него со стороны *j*-го шарнира, равны взятым с обратным знаком суммам его инерционных, а также всех активных сил и моментов, действующих на это тело и последующие за ним. Эти силы и моменты для поступательного шарнира определяются соотношениями

$$a_{J,j}^{t} = m_{j}^{*-1} (f_{J,j} + \mathbf{T}_{j}^{rel T} \mathbf{f}_{j}^{\Sigma}),$$

$$\mathbf{n}_{t,j} = \mathbf{N}_{tt,j} \mathbf{w}_{j} + \mathbf{N}_{tr,j} \boldsymbol{\varepsilon}_{j} + \mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} \mathbf{T}_{j}^{rel} a_{J,j}^{t} - \mathbf{f}_{j}^{\Sigma},$$

$$\mathbf{n}_{r,j} = \mathbf{N}_{tr,j}^{T} \mathbf{w}_{j} + \mathbf{N}_{rr,j} \boldsymbol{\varepsilon}_{j} + \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma T} \mathbf{T}_{j}^{rel} a_{J,j}^{t} - \mathbf{m}_{j}^{\Sigma},$$
(2.7.a)

где $a_{J,j}^t$ – проекция абсолютного поступательного ускорения *j*-го тела на ось *j*-го поступательного шарнира.

Силы и моменты, действующие на *j*-е тело со стороны *j*-го вращательного шарнира, вычисляются аналогично

$$a_{J,j}^{r} = I_{j}^{*-1} (m_{J,j} + \mathbf{R}_{j}^{rel \ T} \mathbf{m}_{j}^{\Sigma}),$$

$$\mathbf{n}_{t,j} = \mathbf{N}_{tt,j} \mathbf{w}_{j} + \mathbf{N}_{tr,j} \boldsymbol{\varepsilon}_{j} + \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} \mathbf{R}_{j}^{rel} a_{J,j}^{r} - \mathbf{f}_{j}^{\Sigma},$$

$$\mathbf{n}_{r,j} = \mathbf{N}_{tr,j}^{T} \mathbf{w}_{j} + \mathbf{N}_{rr,j} \boldsymbol{\varepsilon}_{j} + \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma} \mathbf{R}_{j}^{rel} a_{J,j}^{r} - \mathbf{m}_{j}^{\Sigma},$$
 (2.7.6)

где $a_{J,j}^r$ – проекция абсолютного углового ускорения *j*-го тела на ось *j*-го вращательного шарнира.

Приведение этих сил и моментов к предшествующему телу кинематической цепи осуществляется по соотношениям

$$\Delta \mathbf{f}_{t,j}^{(p(j))} = -\boldsymbol{\beta}_j^T \mathbf{n}_{t,j}, \qquad \Delta \mathbf{m}_j^{(p(j))} = -\boldsymbol{\beta}_j^T \mathbf{n}_{r,j} + \widetilde{\mathbf{r}}_{p(j),j} \Delta \mathbf{f}_{t,j}^{(p(j))}$$

Каждый шаг второго прямого рекуррентного процесса (j = 1, TB) начинается с вычисления переносных поступательного и углового ускорений очередного тела

$$\dot{\mathbf{v}}_{j}^{tr} = \boldsymbol{\beta}_{j} (\dot{\mathbf{v}}_{p(j)} + \widetilde{\mathbf{r}}_{p(j),j}^{T} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{p(j)}) + \mathbf{w}_{j}, \quad \dot{\boldsymbol{\omega}}_{j}^{tr} = \boldsymbol{\beta}_{j} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{p(j)} + \boldsymbol{\varepsilon}_{j}.$$

Относительное ускорение в *j*-м шарнире (обобщенное ускорение механической системы) определяется как разность спроецированных на его ось абсолютного и переносного ускорений *j*-го тела. Для поступательного и вращательного шарниров оно вычисляется по соотношениям

$$\ddot{q}_{j} = a_{J,j}^{t} - m_{j}^{*-1} \mathbf{T}_{j}^{rel T} (\mathbf{M}_{tt,j}^{\Sigma} \dot{\mathbf{v}}_{j}^{tr} + \mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{j}^{tr}), \qquad (2.8.a)$$

$$\ddot{q}_{j} = a_{J,j}^{r} - I_{j}^{*-1} \mathbf{R}_{j}^{rel T} (\mathbf{M}_{tr,j}^{\Sigma T} \dot{\mathbf{v}}_{j}^{tr} + \mathbf{M}_{rr,j}^{\Sigma} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{j}^{tr}).$$
(2.8.6)

Абсолютные ускорения *j*-го тела

$$\dot{\mathbf{v}}_{j} = \dot{\mathbf{v}}_{j}^{tr} + \mathbf{T}_{j}^{rel}\ddot{q}_{j}, \quad \dot{\boldsymbol{\omega}}_{j} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{j}^{tr} + \mathbf{R}_{j}^{rel}\ddot{q}_{j}$$

используются для расчета переносных ускорений следующих за ним тел.

Соотношения (2.5.а) и (2.5.б), (2.7.а) и (2.7.б), (2.8.а) и (2.8.б) вычисляются альтернативно, в зависимости от вида шарнира. Произведения с двумя одинаковыми векторными или матричными аргументами могут быть представлены последовательностью скалярных выражений, в которых исключены избыточные операции. В частности элементы матриц $\Omega_j = \tilde{\omega}_j \tilde{\omega}_j$ и векторов $\mathbf{m}_{\omega,j} = \tilde{\omega}_j (\mathbf{I}_j \omega_j)$ вычисляются совместно по соотношениям, в которых учитывается, что тела в расчетной схеме стыковочного механизма имеют нулевые центробежные моменты инерции

$$\mathbf{v}_{1} = \mathbf{\omega}_{j}(1)\mathbf{\omega}_{j}(1), \quad v_{2} = \mathbf{\omega}_{j}(2)\mathbf{\omega}_{j}(2), \quad v_{3} = \mathbf{\omega}_{j}(3)\mathbf{\omega}_{j}(3)$$

$$v_{4} = \mathbf{\omega}_{j}(1)\mathbf{\omega}_{j}(2), \quad v_{5} = \mathbf{\omega}_{j}(1)\mathbf{\omega}_{j}(3), \quad v_{6} = \mathbf{\omega}_{j}(2)\mathbf{\omega}_{j}(3)$$

$$\mathbf{\Omega}_{j} = \begin{bmatrix} -v_{3} - v_{2} & v_{4} & v_{5} \\ v_{4} & -v_{3} - v_{1} & v_{6} \\ v_{5} & v_{6} & -v_{2} - v_{1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m}_{\omega, j} = \begin{bmatrix} v_{6} cI1_{j} \\ v_{5} cI2_{j} \\ v_{4} cI3_{j} \end{bmatrix},$$

где $cI1_j = IZ_j - IY_j$, $cI2_j = IX_j - IZ_j$, $cI3_j = IY_j - IX_j$ – однократно вычисляемые константы для *j*-го тела; $v_1, ..., v_6$ – промежуточные переменные.

Все тела в расчетной схеме стыковочного механизма являются относительно осей, симметричными своих продольных на которых расположены центры их входных и выходных шарниров. Поэтому матрицы $\gamma_{p(j),j}$ являются единичными ($\gamma_{p(j),j} = \mathbf{1}_3$) и $\beta_j = \alpha_j$. В этом случае для поступательного шарнира $\beta_i = \mathbf{1}_3$ и соотношения (2.6) не реализуются, а для вращательных могут быть вычислены по оптимизирующим формулам, определяющим преобразование $\mathbf{R} = \boldsymbol{\alpha}_{i}^{T} \mathbf{A} \boldsymbol{\alpha}_{i}$ с помощью матрицы $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_{i,i}],$ i, j = 1, 3. А именно, если поворот в *j*-м вращательном шарнире осуществляется на угол q_i относительно k-й оси $(k \in \overline{1,3})$ и $k \oplus 1$ означает циклическую подстановку следующего за значения из {1,2,3}, а k $m = k \oplus 1$ И $n = m \oplus 1 = (k \oplus 1) \oplus 1$, то вычисление элементов матрицы **R** с помощью операций минимального числа осуществляется следующей последовательностью скалярных выражений.

$$v_{T,1} = cq_{j}cq_{j}, \quad v_{T,2} = sq_{j}sq_{j}, \quad v_{T,3} = sq_{j}cq_{j}$$

$$v_{A,1} = \mathbf{A}_{m,n} + \mathbf{A}_{n,m}, \quad v_{A,2} = \mathbf{A}_{m,m} - \mathbf{A}_{n,n}, \quad v_{A,3} = v_{T,3}v_{A,1}, \quad v_{A,3} = v_{T,3}v_{A,1},$$

$$\mathbf{R}_{k,k} = \mathbf{A}_{k,k}, \quad \mathbf{R}_{k,m} = cq_{j}\mathbf{A}_{k,m} - sq_{j}\mathbf{A}_{k,n}, \quad \mathbf{R}_{k,n} = cq_{j}\mathbf{A}_{k,n} + sq_{j}\mathbf{A}_{k,m}$$

$$\mathbf{R}_{m,m} = \begin{cases} v_{T,1}\mathbf{A}_{m,m} + v_{T,2}\mathbf{A}_{n,n} - v_{A,3}, & ecnu \ \mathbf{A}_{m,m} \neq \mathbf{A}_{n,n} \\ \mathbf{A}_{m,m} - v_{A3}, & ecnu \ \mathbf{A}_{m,m} = \mathbf{A}_{n,n} \end{cases},$$

$$\mathbf{R}_{m,n} = \begin{cases} v_{T,1}\mathbf{A}_{m,n} - v_{T,2}\mathbf{A}_{n,m} + v_{A,4}, & ecnu \ \mathbf{A}_{m,n} \neq \mathbf{A}_{n,m} \\ (v_{T,1} - v_{T,2})\mathbf{A}_{m,n} + v_{A4}, & ecnu \ \mathbf{A}_{m,n} = \mathbf{A}_{n,m} \end{cases},$$

$$\mathbf{R}_{n,n} = \begin{cases} v_{T,1}\mathbf{A}_{n,n} + v_{T,2}\mathbf{A}_{m,m} + v_{A,3}, & ecnu \ \mathbf{A}_{m,m} \neq \mathbf{A}_{n,n} \\ (v_{T,1} - v_{T,2})\mathbf{A}_{m,m} + v_{A,3}, & ecnu \ \mathbf{A}_{m,m} = \mathbf{A}_{n,n} \end{cases},$$

Если матрица **A** симметричная, то $\mathbf{R}_{m,k} = \mathbf{R}_{k,m}$, $\mathbf{R}_{n,k} = \mathbf{R}_{k,n}$, $\mathbf{R}_{n,k} = \mathbf{R}_{k,n}$, $\mathbf{R}_{n,k} = \mathbf{R}_{k,n}$, $\mathbf{R}_{n,k} = \mathbf{R}_{k,n}$, **R** $\mathbf{R}_{n,k}$

$$\mathbf{R}_{m,k} = cq_{j}\mathbf{A}_{m,k} - sq_{j}\mathbf{A}_{n,k}, \quad \mathbf{R}_{n,k} = cq_{j}\mathbf{A}_{n,k} + sq_{j}\mathbf{A}_{m,k},$$
$$\mathbf{R}_{n,m} = v_{T,1}\mathbf{A}_{n,m} - v_{T,2}\mathbf{A}_{m,n} + v_{A,4}.$$

Здесь $cq_j = \cos q_j$ $sq_j = \sin q_j$, а переменные $v_{T,k}, v_{A,l}, k = \overline{1,3}; l \in \overline{1,4};$ обозначают соответственно тригонометрические и арифметические выражения.

Моменты, действующие на качающийся корпус, создают пружинные механизмы и магнитные тормозы бокового демпфера, кинематические цепи которого распределены по периметру этого корпуса и ограничивают его относительные повороты в различных направлениях.

Две последовательно соединенные пружины – мягкая, витая и жесткая (пружина Бельвилля) объединены в пружинный механизм бокового демпфера (рис. 2в), который обеспечивает их сжатие при любом направлении движения входного штока, ход которого определяется из аналитического решения уравнений контурных связей для координат, приведенных в [16]. Идеализированная характеристика его жесткости приведена на рис. 6а. Каждая из пружин предварительно поджата соответствующим моментом. После исчерпания хода мягкой 1 и жесткой 2 пружин достигается механический упор 3, ограничивающий амплитуду угловых движений качающегося корпуса. Реальная характеристика жесткости пружинного механизма имеет гистерезис, который определяется экспериментально. Его модель в виде кусочно-линейной зависимости с постоянными параметрами и алгоритм выбора очередного линейного участка описаны в [11].



Рис. 6. а) Идеализированная характеристика жесткости пружинного механизма бокового демпфера, б) механические упоры в кинематической цепи магнитного тормоза бокового демпфера, ограничивающие угловые движения качающегося корпуса

Магнитные тормозы бокового демпфера аналогичны тем, которые применяются при поглощении энергии осевого сближения. Создаваемые ими моменты рассчитываются по соотношению вида (2.2), в котором скорость вращения гайки шарико-винтового преобразователя заменена на угловую скорость входного звена, которая вычисляется по соотношению (2.3). Угол поворота тягой 4 входного звена 5 (рис. 6, б) определяется из аналитического решения уравнений контурных связей для координат, приведенных в [16]. Он изменяется в пределах механических упоров 6 (рис. 6, б), которые ограничивают амплитуду угловых движений качающегося корпуса в направлениях расположения кинематических цепей магнитных тормозов бокового демпфера.

Моменты, действующие в шарнирах, моделирующих угловые деформации при изгибе и кручении штыря, приблизительно описываются линейной зависимостью, но с выраженным эффектом гистерезиса, величина которого определяется экспериментально. Его кусочно-линейные модели с постоянными параметрами и алгоритм выбора очередных линейных участков описаны в [11].

При втягивании штыря его жесткость как балки при изгибе возрастает обратно пропорционально его уменьшающейся длине $L_{\rm Pr}(t)$ [22], то есть изменение угловых жесткостей $k_{J,4}(t)$, $k_{J,5}(t)$ в шарнирах 3 и 4 центральной кинематической цепи определяется соотношением $k_{J,4}(t) = k_{J,5}(t) = k_{\phi,0} L_{\rm Pr}(0)/L_{\rm Pr}(t)$, в котором $L_{\rm Pr}(0)$, $k_{\phi,0}$ –длина и угловая жесткость штыря в исходном положении перед стыковкой. Чтобы не изменять параметры моделей гистерезиса при изгибе штыря, вычисляемые на их основе моменты сопротивления умножаются на коэффициент $k_{BendMod} = L_{\rm Pr}(0)/L_{\rm Pr}(t)$.

Угловая φ_E и боковая Δ_l деформации на конце изогнутой балки длины l связаны соотношением $\varphi_E = 1.5 \Delta_l / l$ [22]. При моделировании изгиба балки твердым телом и фиктивным шарниром величина боковой деформации определяется углом поворота φ_J в этом шарнире $\Delta_L = l \sin \varphi_J$. При этом угол на конце балки должен быть равен $\varphi_E = 1.5 \Delta_l / l = 1.5 \sin \varphi_J$. То есть к углу φ_J в фиктивном шарнире, который получается в результате моделирования, необходимо добавить угол $\Delta \varphi = \varphi_E - \varphi_J = 1.5 \sin \varphi_J - \varphi_J$.

Для сферической головки штыря такая дополнительная угловая деформация не имеет значения, но она учитывается при определении положения относительно гнезда приемного конуса задаваемых в системе координат головки датчиков и защелок, координаты которых корректируются с помощью дополнительной матрицы преобразования поворота

$$A_{HS} = \begin{bmatrix} \cos\Delta q_5 \sin\Delta q_5 & 0\\ -\sin\Delta q_5 \cos\Delta q_5 & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Delta q_4 & 0 & -\sin\Delta q_4\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\Delta q_4 & 0 & \cos\Delta q_4 \end{bmatrix},$$

где $\Delta q_4 = 1.5 \sin q_4 - q_4$, $\Delta q_5 = 1.5 \sin q_5 - q_5$.

Деформация кручения штыря равномерно распределяется по всей его длине, начиная от крестовины, блокирующей его вращение относительно качающегося корпуса, до головки. Поэтому при стягивании жесткость кручения и момент сопротивления кручению не корректируются.

Стыковочный механизм устанавливается на крышке переходного люка 27 (рис. 2в). В процессе стыковки на нее действует внутреннее атмосферное дав-

ление в космическом аппарате, вследствие чего она имеет большую жесткость, которую можно не учитывать при моделировании. Но при наземных динамических испытаниях на 6-степенном стенде из-за отсутствия такого давления крышка обладает податливостью, которая увеличивает интервалы времени между ударами головки в дно гнезда приемного конуса и обратными ударами защелок в упоры гнезда. Для согласования результатов моделирования с данными испытаний в расчетную схему временно может вводится модель осевой деформации (сжатии и растяжение) крышки, то есть основания стыковочного механизма, с которым связаны все его кинематические цепи. Для сохранения в неизменном виде уравнений динамики стыковочного механизма и гарантии устойчивости процесса численного интегрирования для уравнений динамики деформаций крышки используется неявный метод Эйлера. Его разностные формулы записываются в виде системы уравнений

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{hc_{CovX}}{m_{DM}} \frac{hk_{Cov,i}}{m_{DM}} \\ -h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{CovX}(t+h) \\ x_{Cov}(t+h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{CovX}(t) + (\mathbf{f}_{1R,I}(1) - f_{CovX,i}^{Beg} + k_{CovX,i}x_{Cov,i}^{Beg}) \frac{h}{m_{DM}} \\ x_{Cov}(t) \end{bmatrix},$$

решение которой методом Крамера определяет скорость $v_{Cov,x}$ и величину x_{Cov} деформаций

$$v_{Cov,x}(t+h) = \Delta_{1,Cov} / \Delta_{0,Cov}, \quad x_{Cov}(t+h) = \Delta_{2,Cov} / \Delta_{0,Cov}, \quad (2.9)$$

где

$$\Delta_{0, Cov} = 1 + (c_{Cov,x} + hk_{Cov,x})h/m_{DM},$$

$$\Delta_{1,Cov} = v_{CovX}(t) + [\mathbf{f}_{1R}(1) - f_{CovX,i}^{Beg} - k_{CovX,i}(x_{Cov} - x_{Cov,i}^{Beg})]\frac{h}{m_{DM}},$$

$$\Delta_{2,Cov} = x_{Cov}(t)(1 + c_{CovX}\frac{h}{m_{DM}}) + h [v_{CovX}(t) + (\mathbf{f}_{1R}(1) - f_{CovX,i}^{Beg} + k_{CovX,i}x_{Cov,i}^{Beg})\frac{h}{m_{DM}}].$$

В этих соотношениях m_{DM} – масса стыковочного механизма; $\mathbf{f}_{1R,I}(1)$ – осевая сила, действующая в его основании; $x_{Cov,i}^{Beg}$, $f_{CovX,i}^{Beg}$, $k_{Cov,i}$ – параметры текущего линейного участка модели гистерезиса при деформациях растяжения и сжатия; c_{CovX} – коэффициент конструкционного демпфирования; h – величина шага интегрирования. Величина x_{Cov} корректирует компоненты вектора из центра масс активного космического аппарата в центр основания стыковочного механизма. Вычисление соотношений (2.9) производится перед началом очередного шага интегрирования явным методом уравнений динамики стыковочного механизма и стыкуемых космических аппаратов.

3. Модификации осевого и бокового демпферов

По замыслу конструкторов, создававших существующих стыковочный механизм в 70-е годы XX-го века, пружина осевого демпфера должна была обеспечивать плотный, без отскока контакт головки штыря с приемным конусом (для надежного получения управляющего сигнала первого контакта) и восстановление свободной длины штыря после такого контакта. Основным элементом поглощения энергии осевого сближения считался фрикционный тормоз [1]. Позднее, по мере снижения скорости сближения, в большинстве случаев стыковки легких транспортных и грузовых кораблей энергоемкости пружины стало достаточно для полного торможения без срабатывания фрикционного тормоза и соответственно увеличения осевой силы сопротивления (рис. 5). Но даже в этих случаях энергия, накопленная в полностью деформированной пружине, вызывала обратное относительное осевое движение космических аппаратов и недемпфированный удар защелок головки о пазы и упоры гнезда приемного конуса с большой амплитудой контактной силы.

В начале 90-х годов XX-го века было экспериментально установлено, что податливость штыря при изгибе имеет тот же порядок, что и податливость пружин бокового демпфера. Математическое моделирование показало, что сила, создаваемая изгибающимся штырем и пружинами бокового демпфера, препятствует отскоку головки, обеспечивая плотный контакт ее датчиков контакта с приемным конусом. Этот факт определил возможность модификации осевого демпфера с целью снижения контактных сил при стыковке. В результате было решено заменить пружину и осевые магнитные тормозы, создающие совместно приблизительно постоянный момент сопротивления, одним дополнительным фрикционным тормозом (ФрТ1), с постоянным моментом сопротивления почти в четыре раза меньшим, чем момент основного фрикционного тормоза (ФрТ2) (рис. 7).



Рис. 7. Идеализированная, без учета гистерезиса характеристика нового осевого демпфера, содержащего два фрикционных тормоза (ФрТ1 и Фрт2)

Угловой ход ФрТ1 увеличен в 2.5 раза по сравнению с ходом пружины, что обеспечивает его повышенную энергоемкость при меньшей величине силы сопротивления. ФрТ2 гарантирует ограничение нагрузок при экстремальной скорости осевого сближения, но главное – ограничивает величину силы стягивания, что предохраняет привод при наличии каких-либо неожиданных препятствий. Оба тормоза являются фрикционными муфтами с шариковым регулятором, который обеспечивает два уровня сопротивления при различных направлениях вращения входного вала. ФрТ2 создает больший момент сопротивления в направлении вытягивания штыря, то есть при стягивании, а ФрТ1 – при просадке, то есть уменьшении его длины вне качающегося корпуса.

Потенциальная энергия в новом осевом демпфере накапливается только при деформации кинематических цепей передачи движения от штыря к фрикционным тормозам. Жесткость этих передач характеризуется гистерезисом, кусочно-линейная модель которого имеет переменные параметры. Для осевого демпфера с двумя фрикционными тормозами она имеет вид, аналогичный модели с пружиной и фрикционным тормозом, и из-за ее громоздкости здесь не приводится.

Эффект модификации осевого демпфера демонстрируют графики изменения контактных сил при стыковке корабля массы 20 тонн к международной космической станции (МКС) (рис. 8). Представлены результаты моделирования так называемого центрального удара, когда все боковые и угловые рассогласования активного объекта относительно пассивного и их скорости равны нулю.



Рис. 8. Контактные силы при стыковке (центральный удар со скоростью сближения Vx=0.15 м/сек)

В этом случае энергию сближения активного объекта со скоростью 0.15 м/сек поглощает только осевой демпфер. В существующем стыковочном механизме просадке штыря при ударе головки о дно гнезда (уменьшению его длины вне качающегося корпуса) противодействует сначала сила 1, создаваемая пружиной, а затем сила 2 фрикционного тормоза. Сила 3 соответствует удару защелок об упоры гнезда приемного конуса. Накопленная при этом энергия деформаций может приводить к повторным ударам головки о дно гнезда. Затухание процесса контактного взаимодействия обеспечивает также сила трения головки и ее датчиков о стенки гнезда. При стыковке с использованием механизма с модифицированным осевым демпфером сила сопротивления 4 просадке штыря создается фрикционным тормозом 1 и конструкционным демпфированием в кинематической цепи. Накопленная энергия ее деформации вызывает обратное движение с меньшей скоростью и удар защелок головки в упоры гнезда с меньшей амплитудой контактной силы 3.

В отличие от пружины фрикционный тормоз 1 с ограниченной величиной своего хода не может самостоятельно вернуться после снятия нагрузки в исходное состояние для последующей стыковки. Такой возврат может произойти только при втягивании штыря приводом и наличии силы сопротивления, приложенной к его головке и противодействующей этому втягиванию. При штатной стыковке эту силу создают механические толкатели, пружины которых обжимаются при достаточном сближении стыковочных плоскостей активного и пассивного агрегатов и накапливают энергию для их последующего разделения.

На этапе разработки существующих агрегатов "штырь-конус" детальный анализ динамики стыковки был практически невозможен из-за низкой производительности компьютеров и отсутствия эффективных алгоритмов моделирования механических систем твердых тел. Динамический процесс исследовался фрагментарно для отдельных видов ударного взаимодействия. Поэтому ориентация пружинных механизмов и магнитных тормозов была выбрана без анализа их расположения относительно шарнира вращения качающегося корпуса с ограничителем. В реальных стыковках это не вызывало никаких проблем. В то же время в наземных испытаниях по программе орбитальной станции «Мир», которые начались в середине 80-х годов на введенном в строй к этому времени 6-степенном динамическом стенде, многие варианты завершались преждевременно, аварийно из-за превышения заданной максимальной величины контактных сил. Причину этого удалось установить только в середине 90-х, когда перед началом реализации программы построения МКС была разработана корректная математическая модель стыковки, учитывающая пространственную динамику стыковочного механизма. Позднее ее модификация была описана в [2]. На начальной стадии анализа динамики первой для МКС стыковки Функционально-грузового блока к Служебному модулю с использованием агрегатов типа «штырь-конус» были выбраны так называемые экспертные варианты начальных условий стыковки с максимальными значениями отдельных параметров. Полученные результаты моделирования содержали ранее не наблюдавшиеся при анализе значения контактных сил с высокочастотными пиками значительной амплитуды. Разработанные средства анимации процесса стыковки указывали на то, что эти силы возникают при контакте ограничителя стыковочного механизма и приемного конуса. Путем сужения диапазонов изменения параметров начальных условий амплитуда этих пиков была снижена до приемлемой величины и соответствующие варианты были воспроизведены на 6-степенном динамическом стенде. Данные испытаний подтвердили результаты моделирования, после чего была установлена причина появления пиковых нагрузок: линия действия реакции 1 при контакте с приемным конусом ограничителя 2, направленная по нормали к поверхности последнего, проходит практически через центр 3 шарнира стыковочного механизма (рис. 9а).



Рис. 9. а) Плечо контактной силы ограничителя в существующем стыковочном механизме, б) в механизме с модифицированным боковым демпфером.

В результате эта сила не создает момента для поворота качающегося корпуса и не демпфируется пружинным механизмом 4 и магнитным тормозом 5. Ее амплитуда определяется скоростью сближения и конструктивной жесткостью в области контакта. Недемпфированный удар приводит к отскоку, то есть к потере контакта и силы реакции (рис. 10).

Вследствие серии недемпфированных высокочастотных ударов и относительного разворота космических аппаратов качающийся корпус стыковочного механизма постепенно поворачивается и пружинные механизмы бокового демпфера начинают создавать силу, прижимающую ограничитель к приемному конусу. При возникновении их плотного контакта силы, действующие на головку штыря и ограничитель, создают момент, изгибающий штырь и нагружающий пружинные механизмы бокового демпфера, и серия высокочастотных ударов завершается. Учет гистерезиса во всех деформациях стыковочного механизма позволил снизить расчетную амплитуду реакции при контакте ограничителя. При экспериментальной отработке стыковки этого не наблюдается из-за технических ограничений 6-степенного стенда.



Рис. 10. Контактные силы и моменты при стыковке (экспертный вариант начальных условий) к МКС корабля массы 20 тонн существующим стыковочным механизмом и механизмом с модифицированными осевым и боковым демпферами

Описанный выше эффект проявляется при близких к максимальным значениям отдельных параметров начальных условий стыковки, то есть вследствие нештатных ситуаций в процессе сближения. Он не наблюдается либо слабо выражен при штатном сближении, когда значения указанных кинематических параметров не превышают 30% от своих максимальных значений. Перенос шарнира в основание стыковочного механизма создает плечо 6 контактной силы ограничителя и позволяет развернуть пружинные механизмы и передаточные звенья магнитных тормозов бокового демпфера навстречу линии ее действия (рис. 9,6). В результате импульс силы с небольшой амплитудой возникает только при первом контакте ограничителя и приемного конуса, после этого происходит плавное демпфирование относительного поворота стыкуемых космических аппаратов (рис. 9).

Несмотря на то что общее число степеней свободы стыкуемых космических аппаратов и стыковочного механизма как системы твердых тел относительно невелико, в процессе моделирования вычисляется и запоминается в файлах результатов большое число кинематических и силовых параметров движения. Это позволяет быстро оценить все основные особенности их относительного движения и контактного взаимодействия. В данной работе результаты моделирования процесса стыковки представляются посредством анимации, обладающей большей наглядностью, чем графики изменения отдельных параметров во времени. Она приводится в виде динамической мнемосхемы процесса стыковки (рис. 11), которая отображает основные связи между элементами системы и их основные численные параметры. Кроме того, она показывает изменение этих связей во времени и пространстве, в частности изменение контактов головки штыря с защелками, ограничителя, роликов выравнивающих рычагов и приемного конуса с гнездом. Все данные отображаются в трех окнах, объединенных в одну экранную форму. В верхнем окне показываются перемещения стыковочного механизма относительно приемного конуса, численные значения кинематических параметров, сил и моментов, действующих на основание механизма; в среднем окне – состояние устройств стыковочного механизма; в нижнем окне – графики изменения выбранных кинематических или динамических величин. Открытие файлов результатов, соответствующих варианту моделирования, и выбор графиков, отображаемых в нижнем окне, осуществляется с помощью меню в верхней части экранной формы.

Изображение пространственной сцены в верхнем окне показано в двух проекциях: справа – вид сверху, а слева – проекция на плоскость Ld, проходящую через ось приемного конуса и центры шарнира стыковочного механизма и выходного фиктивного шарнира штыря. Для обеспечения прозрачности изображения, необходимой для отображения всех типов контактов, используются каркасные геометрические модели контактирующих элементов. В левой и правой частях окна отображаются численные значения параметров относительного движения: до сцепки – линейные и угловые скорости и положения штыря и его головки относительно приемного конуса, а после сцепки – скорость центра масс, угловые скорость и положение активного стыкуемого объекта относительно пассивного. Строка в нижней части окна показывает текущие значения сил и моментов, действующих на основание стыковочного механизма. При приближении головки штыря к гнезду приемного конуса появляются изображения защелок и ограничивающих их движение пазов гнезда. При выдвижении из качающегося корпуса выравнивающих рычагов отображаются их ролики. При контакте элементов стыковочного механизма с приемным конусом их изображения изменяют свой цвет на красный.



Рис. 11. Динамическая мнемосхема, визуализирующая процесс стыковки при использовании стыковочного механизма типа «штырь-конус». Анимация мнемосхемы доступна отдельно по ссылке https://keldysh.ru/e-boblio/golubev/probe-cone_1.mp4

В среднем окне условно отображается функционирование устройств осевого и бокового демпферов стыковочного механизма. Слева показываются боковые смещения головки штыря, углы изгиба свободной части штыря и поворота качающегося корпуса. Цифра 1 обозначает центр головки, 2 – центр фиктивного шарнира, моделирующего изгиб штыря, 3 – центр шарнира стыковочного механизма. В центре окна в виде горизонтальных прямоугольников условно отображается функционирование устройств осевого демпфера. В существующем механизме это пружина, фрикционный тормоз и магнитные тормозы. Прямоугольники в правой части окна отображают функционирование пружинных механизмов и магнитных тормозов бокового демпфера. Их относительное

положение соответствует виду со стороны головки штыря. Красный цвет, частично или полностью закрашивающий прямоугольники, соответствует положительным перемещениям и скоростям, синий – отрицательным.

В левой части нижнего окна приведена справочная информация – шаг смещения графика по оси времени (изменяемый параметр GraphStep), дата выполнения моделирования (переменная Run Date), комментарии к варианту, время сцепки (переменная T capture) и время завершения моделирования (переменная T Final). Ниже в отдельной рамке отображаются численные значения текущего времени (переменная T Current) и величин, соответствующих переменным – результатам моделирования, выбранным с помощью меню в верхней части экранной формы. Графики изменения этих переменных смещаются по оси времени справа налево с заданным шагом. Текущее время обозначается в окне вертикальной желтой линией. Ему соответствуют численные значения параметров в рамке слева и изображения во всех трех окнах экранной формы. Факт сцепки отмечается белой вертикальной пунктирной линией. Просмотр результатов может осуществляться в пошаговом режиме или в режиме «прокрутки» нажатием соответствующих управляющих клавиш.

Длительность моделируемого процесса от первого контакта до завершения стягивания составляет более 4 минут. Для сокращения объема видеофайлов, анимация процессов стыковки приведена для их отдельных временных интервалов, которым предшествуют кадры с комментариями. Видеофайл, кадр из которого приведен на рис. 11, отображает вариант стыковки с использованием существующего стыковочного механизма. Графики для этого варианта приведены на рис. 10. В течение его первого временного интервала происходят контакт головки штыря с приемным конусом и сцепка, поглощение энергии осевого сближения пружиной и фрикционом, обратный удар защелок в упоры гнезда, высокочастотные колебания сил при контакте ограничителя и приемного конуса. На втором интервале, соответствующем 177-180 сек. процесса, показаны высокочастотные колебания сил при контакте роликов рычагов выравнивания и приемного конуса, обусловленные тем, что линия действия этих сил проходит близко к центру шарнира стыковочного механизма. Завершение процесса стягивания в данном случае не показано для сокращения объема файла.

В динамической мнемосхеме, отображающей процесс стыковки при использовании стыковочного механизма с модифицированными осевым и боковым демпферами (рис. 12), в верхнем окне показано новое положение центра шарнира стыковочного механизма относительно центра шарнира, моделирующего изгиб штанги, а в среднем – угловой ход первого и второго фрикционных тормозов и новое относительное расположение магнитных тормозов и пружинных механизмов. Видеофайл отображает стыковку с теми же экспертными начальными условиями, которые были выбраны для иллюстрации особенностей существующего стыковочного механизма. Он также скомпонован из изображений, соответствующих отдельным временным интервалам, которым предшествуют кадры с комментариями.





Первые два интервала выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать эффект от модификации демпферов, то есть уменьшение амплитуды контактных сил. На втором интервале (178-181 сек.), в отличие от существующего стыковочного механизма, высокочастотные колебания этих сил при контакте роликов отсутствуют вследствие измененного положения центра его шарнира. Третий интервал (353-363 сек.) демонстрирует контакт с приемным конусом роликов рычагов выравнивания на завершающей стадии стягивания (контактирующие ролики показаны красным цветом). Траектория движения рычагов однозначно связана с поступательным перемещением штыря. Конструкцию устройства выравнивания, которая могла бы математически точно отследить поверхность реального приемного конуса, изготовить практически невозможно. Поэтому ролики выравнивающих рычагов движутся по траектории, отстоящей от этой поверхности на расстоянии нескольких миллиметров, и их одновременный контакт с нею невозможен. Возникновение такого контакта привело бы к заклиниванию при стягивании. Лабораторный образец стыковочного механизма с модифицированными осевым и боковым демпферами был изготовлен и испытан на 6-степенном стенде. Данные испытаний подтвердили правильность выбранных технических решений.

4. Подвижный ограничитель относительных поворотов стыкуемых космических аппаратов

В новом узловом модуле космической станции компактное расположение нескольких пассивных агрегатов обусловливает необходимость использования укороченного приемного конуса 1, с меньшей высотой и длиной образующей, чем у уже используемых агрегатов вида 2 для стыковки существующих кораблей и вида 3 для стыковки модулей (рис. 13,а). Рассмотренные выше стыковочные механизмы не обеспечивают ограничение относительных угловых поворотов космических аппаратов, так как их ограничители, зафиксированные на качающемся корпусе, будут выходить за пределы такого конуса, не контактируя с ним. Фиксация ограничителя на большем расстоянии от шарнира механизма обеспечит контакт с коротким приемным конусом, но будет препятствовать стягиванию стыковочных агрегатов. Поэтому в конструкцию рассмотренного ранее стыковочного механизма с модифицированным осевым и боковым демпфером (рис. 8б) было введено новое устройство – ограничитель 4 (рис. 13б), который может перемещаться вдоль продольной оси соединенного с шарниром 5 качающегося корпуса 6. Он обеспечивает как ограничение угловых движений при поглощении энергии сближения активного космического аппарата, так и выравнивание агрегатов при их стягивании без использования выравнивающих рычагов [23].



Puc. 13. а) Укороченный приемный конус пассивного агрегата, б) стыковочный механизм с подвижным ограничителем

С качающимся корпусом такой ограничитель связан тремя направляющими, содержащими пружины 7. Направляющие размещены на месте кулачка и рычагов выравнивания, исключенных из конструкции стыковочного механизма с модифицированными демпферами (см. раздел 3).

При полностью втянутом штыре его головка упирается в ограничитель, удерживая его во втянутом, конечном положении, а пружины в сжатом состоянии. Перед стыковкой штырь выдвигается, и ограничитель под действием пружин перемещается в свое выдвинутое, переднее положение. Осевая проекция действующей на него контактной реакции 8 с входной гранью приемного конуса 1 направлена к центру шарнира 5 стыковочного механизма. Пружины 7 препятствуют перемещению в этом направлении, обеспечивая выполнение функции ограничения угловых движений. В новом стыковочном механизме штырь движется независимо от ограничителя, поэтому параметры осевого демпфера не изменяются. Не изменяются также параметры бокового демпфера.

Основными параметрами подвижного ограничителя являются высота, больший и меньший радиусы его усеченной конической поверхности, а также ход пружин, сила их сопротивления в переднем и конечном положении. Подвижный ограничитель имеет такие же размеры, как и неподвижный в ранее рассмотренных стыковочных механизмах. В этом случае радиус большего основания его конической поверхности немного меньше радиуса входной грани укороченного приемного конуса. При полном контакте с ним он не выходит за его границы и не препятствует стягиванию (рис. 14а).



Рис. 14. а) Полный контакт подвижного ограничителя с приемным конусом, б) ограничение относительных поворотов стыковочных агрегатов (штырь максимально выдвинут, ограничитель в переднем положении)

Ограничитель после сцепки должен войти в контакт с входной гранью приемного конуса. Это обеспечивается выбором его переднего положения при максимальной свободной длине штыря и контакте защелок головки с упорами гнезда (рис. 14б). Осевое расстояние между передним и конечным, полностью втянутым положением ограничителя определяет максимальную длину его пружин. Она должна быть больше, чем расстояние между стыковочными плоскостями агрегатов в момент достижения полного контакта ограничителя и приемного конуса. Это необходимо для возможности открытия крышки люка переходного тоннеля, на которой установлен стыковочный механизм, после завершения стыковки. Данное требование обеспечивается соответствующей установкой механизма на активном агрегате.

Подвижный ограничитель, в отличие от выравнивающих рычагов, перемещается независимо от штыря стыковочного механизма. Чем больше сила сопротивления его пружин, тем меньше его просадка при контакте с приемным конусом и тем лучше выполняется функция ограничения угловых движений стыковочных агрегатов. Меньшая сила сопротивления создается в переднем положении, большая – в конечном. Их величина определяется конструктивными ограничениями, налагаемыми на диаметр и длину пружин. Выбор приемлемых значений осуществлялся на основе многократной корректировки конструкции и математического моделирования стыковки на множестве экспертных, наихудших начальных условий стыковки. Динамика стыковочного механизма с подвижным ограничителем, как системы тел со структурой дерева, описывается рекуррентными уравнениями, приведенными в разделе 2.

Пружины ограничителя накапливают энергию сближения активного космического аппарата с пассивным, и это является недостатком данной конструкции стыковочного механизма. Компьютерное моделирование показало, что контакт ограничителя с приемным конусом происходит всегда после сцепки, не препятствует ее достижению. Но при нештатном сближении этот контакт может происходить до удара головки штыря в дно гнезда приемного конуса. В таком случае пружины ограничителя накапливают часть энергии сближения активного космического аппарата, которую должен поглощать осевой демпфер. Последующее ее освобождение вызывает обратное движение головки и удар ее защелок в упоры гнезда приемного конуса. При определенных, маловероятных сочетаниях экстремальных значений параметров начальных условий стыковки пружины ограничителя отнимают основную часть энергии сближения, значительно уменьшая ход первого фрикционного тормоза осевого демпфера (рис. 6), который становится недостаточным для демпфирования энергии такого обратного удара. Если при этом из-за большой угловой скорости активного космического аппарата значительная энергия сближения накапливается также в пружинах бокового демпфера, то это может вызвать серию ударов защелок в упоры гнезда с большой амплитудой контактной силы. Исключить этот эффект можно было бы выдвижением подвижного ограничителя в переднее положение пружинами по команде блока управления только после сцепки через некоторое фиксированное время, достаточное для затухания осевой скорости сближения. Но тогда ограничитель из-за своей малой массы и большой силы сопротивления пружин приобретает большую скорость. Это приводит к высокочастотным пиковым нагрузкам при его контакте с приемным конусом даже при штатном сближении, что нежелательно. С учетом малой вероятности одновременного достижения экстремальных значений несколькими параметрами начальных условий ограничитель, как было описано выше, выдвигается предварительно, перед началом стыковки.

Особенности динамики стыковки с использованием механизма, имеющего подвижный ограничитель, иллюстрируются для экспертного варианта начальных условий, который был выбран с аналогичной целью для механизмов, ранее рассмотренных в разделе 3 (рис. 10). Анимация результатов моделирования представлена на динамической мнемосхеме (рис. 15). Она приведена для тех же отдельных временных интервалов, которые были выбраны для демонстрации ранее рассмотренных процессов стыковки (рис. 11 и 12). В верхнем ее окне, в отличие от мнемосхемы на рис. 12, отображается перемещение вдоль штыря подвижного ограничителя, в среднем с помощью горизонтального прямоугольника условно показан ход сжатия его пружин (отмечается численным значением параметра XLimD и красным цветом).



Рис. 15. Динамическая мнемосхема, визуализирующая процесс стыковки при использовании стыковочного механизма с подвижным ограничителем/ Анимация мнемосхемы доступна отдельно по ссылке https://keldysh.ru/e-boblio/golubev/probe-cone_3.mp4

Начальные условия в рассматриваемом варианте таковы, что первый контакт подвижного ограничителя с приемным конусом происходит непосредственно перед ударом головки штыря в дно приемного гнезда (фрагмент 1 видеоролика от начала до конца 12-й секунды). В результате первый фрикционный тормоз осевого демпфера накапливает ход практически одновременно со сжатием пружин ограничителя. Величина этого хода становится достаточной для ограничения осевой силы при обратном ударе защелок головки об упоры гнезда, вызванном освобождением энергии этих пружин. В боковом демпфере ход пружин соответствует первому участку их нелинейной характеристики (рис. 5а) и поэтому накопленная в них энергия мала. Вследствие всех этих факторов колебания сил контактного взаимодействия агрегатов невелики и затухают к 13-й секунде.

На втором интервале (177-180 сек.) при контакте ограничителя во время стягивания высокочастотные колебания силы реакции, возникающие при стыковке существующим механизмом, отсутствуют, как и при использовании механизма с модифицированными демпферами. Это обусловлено правильным расположением шарнира механизма относительно ограничителя.

Третий фрагмент (363-367 сек.) иллюстрирует заключительный этап стягивания, на котором силовые накладки на конической поверхности подвижного ограничителя полностью контактируют с приемным конусом (в отличие от роликов рычагов выравнивания в ранее рассмотренных процессах стыковки). На этом интервале пружинные толкатели расстыковки каждого агрегата (на мнемосхеме не показаны) упираются в стыковочную плоскость ответного. Сила их сопротивления, действующая в том числе и на головку штыря, препятствует его втягиванию и восстанавливает полный ход первого фрикционного тормоза осевого демпфера для последующей стыковки. Во время восстановления этого хода расстояние между стыковочными плоскостями агрегатов не изменяется и пружины подвижного ограничителя не сжимаются.

Укороченный приемный конус соответствует части уже используемых приемных конусов. Подвижный ограничитель стыковочного механизма контактирует с ним только после сцепки. Поэтому такой механизм совместим как с существующими в настоящее время пассивными стыковочными агрегатами, так с агрегатами, имеющими перспективную конструкцию приемных конусов. Это подтверждается результатами компьютерного моделирования, которые не приводятся из-за ограниченного объема данной работы.

Лабораторный образец стыковочного механизма с подвижным ограничителем был изготовлен и испытан на 6-степенном стенде. В настоящее время изготавливается его штатный экземпляр для перспективного транспортного корабля.

Заключение

Представленная математическая модель существующего стыковочного механизма центрального типа обеспечила сопровождение его наземных динамических и летных испытаний и позволила выявить его кинематические и конструктивные ограничения. Модифицированные варианты модели были разработаны для новых, улучшенных версий механизмов и использованы для выбора значений параметров их конструкции, экспериментальной отработки их лабораторных образцов. Первый из этих новых механизмов обеспечивает снижение нагрузок во всем диапазоне начальных условий стыковки. Второй позволяет реализовать заданные внешние проектные ограничения и возможность стыковки к агрегатам с различной формой приемного конуса за счет незначительного сужения множества допустимых сочетаний параметров из этого диапазона.

Библиографический список

- 1. Сыромятников В.С. Стыковочные устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение. 1984. 216 с.
- 2. Яскевич А.В. Комбинированные уравнения движения для описания динамики стыковки космических аппаратов с помощью системы «штырь-конус» //Изв. РАН. Космические исследования, 2007, том 45, №4, с. 325-336.
- 3. Langley R.D. Apollo experience report the docking system. // NASA Technical note, NASA TN D-6854, NASA, Washigton, D.C., 1972, 45 pp.
- 4. Tchoryk P., Jr., Pavlich J.C., Hays A.B., Wassick G., Ritter G. Michigan Aerospace Corporation. Docking system. Patent US 20110058892 A1, November 1, 2010. <u>http://www.google.com/patents/US20,110,058,892</u>
- 5. Hays A.B., Tchoryk P., Jr., Pavlich J. C., Wassick G. Dynamic simulation and validation of a satellite docking system // Space systems technology and operations. Proceedings of the SPIE, Vol. 5088, 2003, pp. 77-88.
- 6. Pavlich J. C., Tchoryk P., Hays A.B., Wassick G. KC-135 zero G testing of a micro satellite docking mechanism // Space systems technology and operations. Proceedings of the SPIE, Vol. 5088, 2003, pp. 31-42.
- 7. Paine T.O., Fentress C. E. Expanding center probe and drogue. Patent US3526372, 1970.
- Афанасьев И. Другой корабль //Новости космонавтики. 2002 г., №11 (238), С. 62-65.
- 9. Афанасьев И. Другой корабль //Новости космонавтики. 2003 г., №5 (244), С. 65-71.
- 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. doi:10.20948/prepr-2019-76

URL:http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-76

11. Яскевич А.В. Математические модели гистерезиса, описывающие деформации механизмов для стыковки космических аппаратов. – Электронный журнал «Труды МАИ», Выпуск №83, 2015 (23 стр.) – <u>http://mai.ru/science/trudy/index.php</u>, дата обращения 09.09.2019

- 12. Верещагин А.Ф. Метод моделирования на ЦВМ динамики сложных механизмов роботов-манипуляторов // Изв. АН СССР, Техническая кибернетика. 1974. – № 6. – С. 89-94.
- Armstrong W.W. Recursive solution to the equation of motion of an n-link manipulator // Proc. of 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, (Montreal, July, 1979). – 1979. – P. 1343-1346.
- 14. Featherstone R. The calculation of robot dynamics using articulated-body inertias // Int. Journal of Robotic Research. – 1983. Vol. 2, no. 1. – P. 13-30.
- 15. Brandl H., Johanni R., Otter M. An algorithm for the simulation of multibody systems with kinematical loops // Proceedings of the 7th World Congress on The Theory of Machines and Mechanisms. Sevilla. 1987. Vol. 2. pp. 407-411.
- 16. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Уравнения динамики периферийных стыковочных механизмов как параллельных манипуляторов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 59. 32 с. doi:10.20948/prepr-2019-59 URL:http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-59
- 17. Степаненко Ю.А. Алгоритм анализа динамики пространственных механизмов с разомкнутой кинематической цепью. – «Механика машин», М.: Наука, 1974, вып. 44, стр. 77-88.
- Walker M.W., Orin D.E. Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms // Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1982. – Vol. 104. – P. 205–211.
- 19. Kane T.R. Wang C.F. On the derivation of Equations of Motion, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1965, Vol. 13, №. 2, P. 487-492.
- Wehage R.A., Haug J.E. Generalized coordinate partitioning for dimension reduction in analysis of dynamical systems // Journal of Mechanical Design – 1982. № 104. – P. 247-255.
- 21. Голубев Ю.Ф. Функция Аппеля в динамике систем твердых тел // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 58. 16 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-58
- 22. Гастев В.А. Краткий курс сопротивления материалов. Изд. 2-е, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1977, 456 стр.
- 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.