

SimMechanics Matlab как средство моделирования динамики сложных авиационных робототехнических систем

К.М. Тихонов, В.В. Тишков

Аннотация

Рассматривается методика моделирования робототехнических систем, основанная на интеграции *SIMMECHANICS MATLAB* и систем автоматизированного проектирования (САД-системы). Использование САД-транслятора рассматривается как перспективный способ создание адекватных моделей механических систем.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ, грант 10-08-00897-а.

Ключевые слова

Авиационная робототехническая система, моделирование, информационная технология, динамика механизма.

Введение

Что такое SimMechanics

SIMMECHANICS – это средство исследования динамики системы твердых тел на основе построения модели такой системы в виде блочной диаграммы в среде *SIMULINK MATLAB*.

При помощи *SIMMECHANICS* осуществляется моделирование механических систем: как плоских механизмов, так и пространственных, как простых (с одной-двумя степенями свободы), так и сложных (со многими степенями свободы). Встроенные в *SIMMECHANICS* инструменты моделирования позволяют с высокой степенью точности описывать твердые тела с учетом их массово-инерционных характеристик, взаимного расположения, степеней свободы и связей между ними, а также измерять параметры их движения под действием приложенных сил и моментов в различных системах координат.

SIMMECHANICS обладает средствами визуализации, обеспечивающими пространственное представление механической системы как в начале, так и в процессе моделирования. При этом *SIMMECHANICS* в полной мере использует графические средства *MATLAB*. Отметим, что, помимо упрощенного графического отображения механической системы (в виде аппроксимирующих многоугольников или эквивалентных эллипсоидов), в *SIMMECHANICS* могут быть

использованы ресурсы *VR TOOLBOX* (пакета расширения виртуальной реальности, *VIRTUAL REALITY, VR*), которые позволяют связать модели твердых тел с соответствующими им *VRML*-файлами (*VRML - VIRTUAL REALITY MODELING LANGUAGE*) и обеспечивают наблюдение движения модели механизма в *VRML*-браузере[1]. Отметим также, что задача разработки виртуального мира для сложной механической системы, тем более со сложными по конфигурации деталями, очень трудоемка и требует специальной подготовки, не связанной по существу основной целью – исследованием механизма и его проектированием. Однако такая визуализация существенно повышает наглядность процесса. Это явилось одной из причин (хотя и не основной), побудивших разработчика *SIMMECHANICS* (компанию *MATHWORKS CORP.*) к созданию *CAD*-транслятора, обеспечивающего построение модели механизма на основе его *CAD*-модели (твердотельной модели, созданной в среде автоматизированного проектирования). В случае использования *CAD*-транслятора модель механизма может наследовать и графическое представление его деталей.

На рис. 1 представлено отображение модели промышленного робота с использованием *VR TOOLBOX* (пример из демонстрационной библиотеки *MATLAB*, файл *MECH_ROBOT_VR.MDL*). На рис. 2 – разработанная в *SOLIDWORKS* модель промышленного робота *MITSUBISHI RV-1A*, а на рис. 3 – отображение динамической модели указанного робота, созданной в среде *SIMMECHANICS* с использованием *CAD*-транслятора. Видно, что при использовании *CAD*-транслятора обеспечивается существенно более качественное графическое отображение модели.

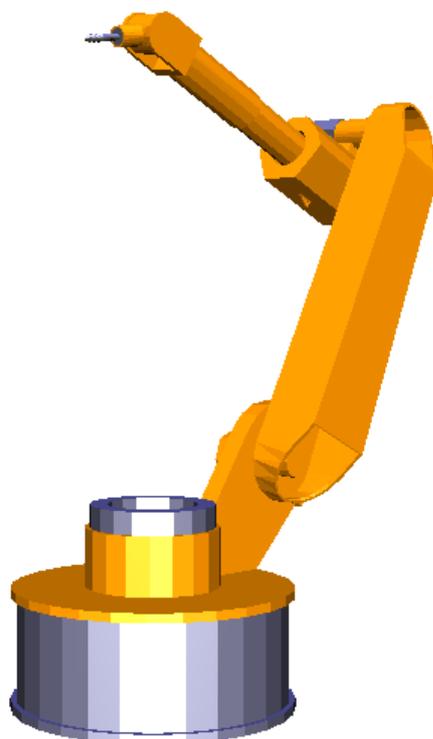


Рис. 1. Графическое отображение промышленного робота ,
выполненное с использованием *VR TOOLBOX*

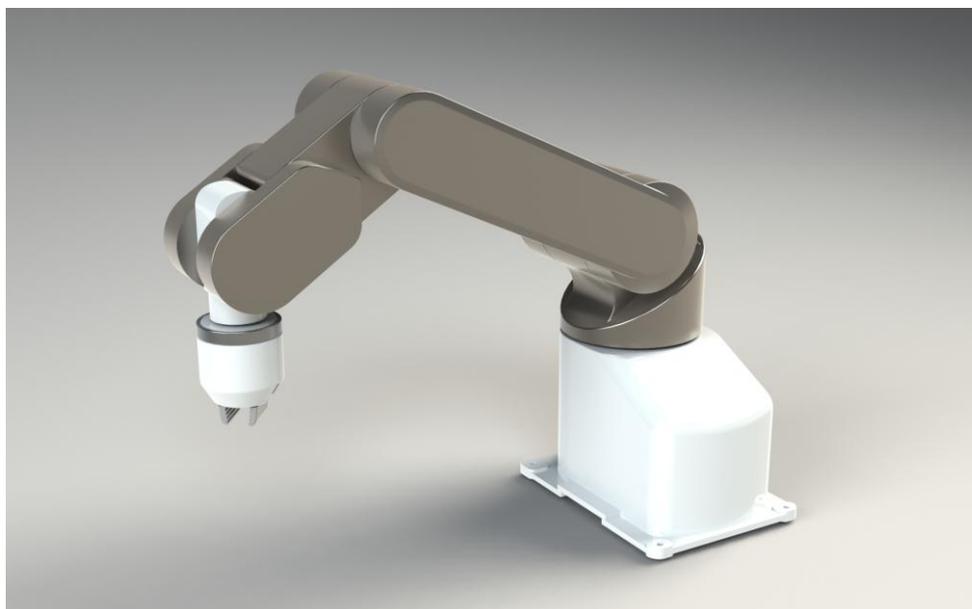


Рис. 2. *CAD*-модель промышленного робота *MITSUBISHI RV-1A* в среде *SOLIDWORKS*

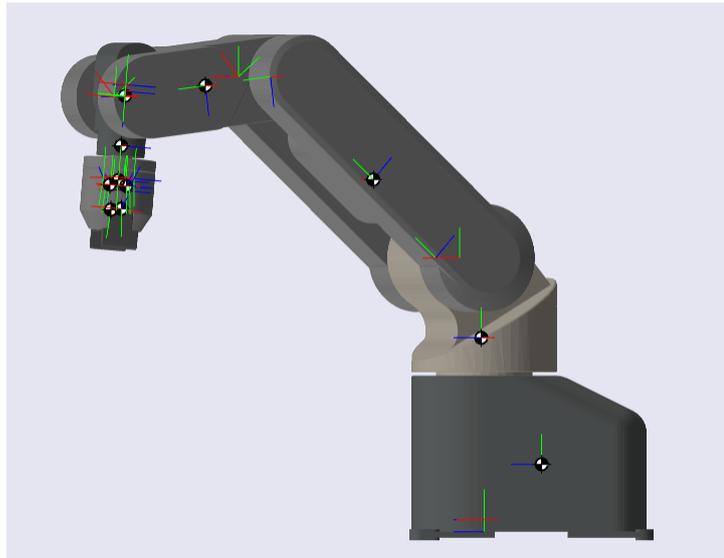


Рис. 3. Графическое отображение динамической модели промышленного робота *MITSUBISHI RV-1A*, созданной с использованием CAD-транслятора

SimMechanics и физическое моделирование

SIMMECHANICS реализует на платформе *SIMULINK* физическое моделирование, охватывающее моделирование систем на основе базовых физических принципов механики. Физическое моделирование реализуется непосредственно в среде *SIMULINK* в тесной связи с *MATLAB*. Но в отличие от блоков собственно *SIMULINK*, которые реализуют математические операции и операции над сигналами, блоки физической модели представляют материальные компоненты (твердые тела или их соединения). Иначе говоря, если в *SIMULINK* исследуемые процессы обезличены, и разработчик модели при ее создании должен четко представлять, каким физическим величинам соответствует сигнал в той или иной части модели, то в *SIMMECHANICS* они непосредственно связаны с физическими процессами, характерными для механики, т.е. каждый сигнал в модели имеет конкретное физическое содержание (перемещение, скорость, ускорение, сила или момент).

SIMMECHANICS представляет собой множество библиотек блоков и дополнительных средств моделирования механических систем. При этом реализация механической модели допускает в полной мере использование окружения *SIMULINK*. Связь физической модели с общими блоками *SIMULINK* осуществляется посредством специализированных блоков *SENSOR* и *ACTUATOR*. На рис. 4 представлена модель подвижной артиллерийской установки, где показаны: часть модели, полученная посредством CAD-транслятора из среды *SOLIDWORKS* (физическая модель механики установки), часть модели, созданная в среде *SIMULINK* (модели при-

- определение массово-инерционных характеристик твердых тел, их степеней свободы и ограничений в соответствии с системами координат тел;
- включение в модель виртуальных датчиков для измерения параметров и виртуальных двигателей для обеспечения движения механизма, а также присоединенных сил и моментов;
- запуск процесса моделирования (реализуется на платформе *SIMULINK*) и исследование движения до остановки его существующими ограничениями;
- визуализация процесса моделирования (движения механизма) во все время моделирования в специализированном графическом окне.

Твердые тела, системы координат, связи и ограничения

Наиболее ответственным и трудоемким является этап определения массово-инерционных характеристик тел, связей между ними и наложенных на движение ограничений, т.е., иными словами, создание механической физической модели. *SIMMECHANICS* поддерживает блоки (модели) твердых тел с установленными пользователем массово-инерционными характеристиками (массой и тензором моментов инерции). Модели тел соединяются одно с другим посредством блоков соединений (*JOINT*), устанавливающих допустимые относительные перемещения (степени свободы, *DOFs*). Допускается установка также ограничений относительного движения тел. Эти ограничения препятствуют перемещению тел в процессе моделирования и могут быть функциями времени.

Интерфейс *SIMMECHANICS* поддерживает различные возможности по установке параметров систем координат, ограничений, виртуальных двигателей, сил и моментов. Среди них:

- размещение систем координат (начала координат и углов поворота осей) в различных точках твердого тела для приложения в них сил и моментов или датчиков для измерения параметров движения;
- размещение комбинированных блоков соединений из библиотеки *SIMMECHANICS*;
- расширение существующих библиотечных соединений за счет объединения библиотечных примитивов;
- использование в модели блоков из других библиотек *SIMULINK* (например, из *SIMPOWERSYSTEMS*) и математических средств *MATLAB*.

Несмотря на большие возможности по созданию систем твердых тел (моделей механизмов), которые предоставляет интерфейс *SIMMECHANICS*, сборка модели вручную чрезвычайно трудна. Относительно легко собрать модель простого механизма, включающего 2-4

детали. Если же речь идет о создании модели механизма сложной пространственной робототехнической системы, разработать ее вручную практически невозможно. Это связано с необходимостью максимально точно рассчитывать координаты точек присоединения деталей (что является непростой задачей, тем более для пространственного механизма, а при наличии погрешностей механизм становится неработоспособным), знать тензор моментов инерции и т.д. Проблемы, сопровождающие ручную сборку механизма, изложены в [2], [3]. Учитывая существующие объективные трудности ручной сборки моделей механизмов, компания *MATHWORKS* разработала и внедрила специализированный *CAD*-транслятор, обеспечивающий создание динамических моделей механизмов в среде *SIMMECHANICS* на основе их твердотельных моделей в *CAD*-среде (на сегодня это *SOLIDWORKS*, *PRO/ENGINEER* и *AUTODESK INVENTOR*). Практические основы создания сборок в *CAD*-среде для последующей их трансляции в *SIMMECHANICS*, предъявляемые к *CAD*-моделям требования изложены в [3]. Таким образом, при применении *CAD*-транслятора вопросы обеспечения работоспособности моделей решаются в первую очередь в *CAD*-среде посредством установления правильных связей между деталями механизма, созданием узлов, сохраняющих относительную подвижность в модели и др., см. [3, 4]. Отметим, что тензоры моментов инерции и присоединительные размеры передаются из *CAD*-среды в *SIMMECHANICS* без искажений, что обеспечивает работоспособность динамической модели.

Несмотря на высокую эффективность применения *CAD*-транслятора, он обладает и существенными ограничениями. Эти ограничения касаются установленных в *CAD*-модели связей: модель, вполне работоспособная в *CAD*-среде, после трансляции может быть совершенно неработоспособной в среде *SIMMECHANICS*. Это происходит в силу того, что не все связи корректно компилируются. Рассмотрим примеры.

На рис. 5 представлена простая модель: шар на наклонной плоскости. В среде *SOLIDWORKS* эта модель вполне работоспособна: шар перемещается вдоль наклонной плоскости. Это достигается установлением двух сопряжений (связей): Совпадение – для справочных плоскостей, что обеспечивает центрирование шара на плоскости, а также Касательность – для поверхности шара и наклонной плоскости.

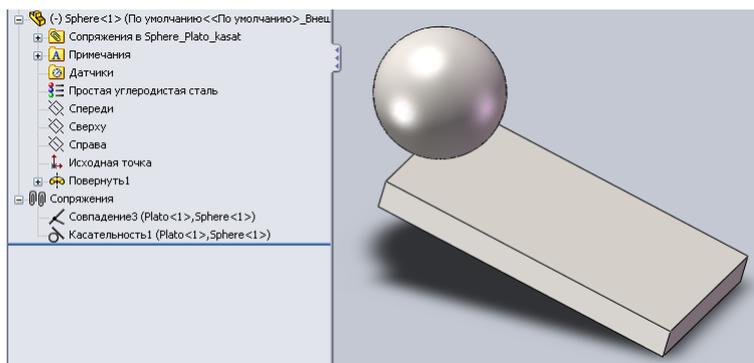


Рис. 5. Шар на наклонной плоскости

Но при трансляции этой модели возникает ошибка (см. рис. 6).

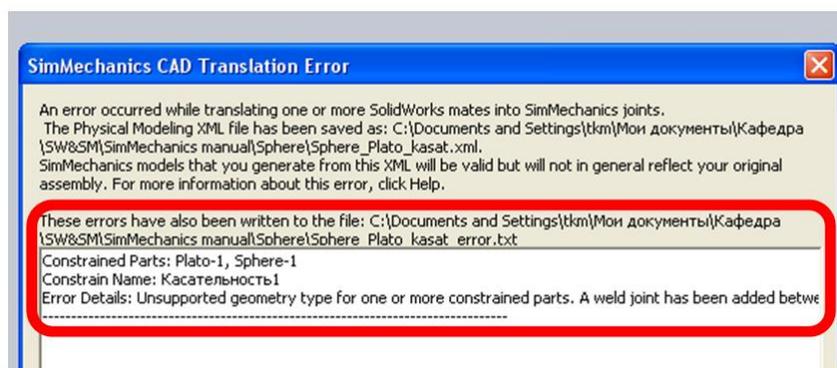


Рис. 6. Ошибка трансляции CAD-модели

Природа указанной ошибки в том, что сопряжение Касательность для плоскости и поверхности шара с учетом того, что установлено совпадение справочных плоскостей, обеспечивает две степени свободы. Транслятор не может распознать, будет шар катиться или скользить по плоскости, вследствие чего не может установить соответствующее соединение (*JOINT*). В этом случае транслятор генерирует сообщение об ошибке и устанавливает соединение *WELD* (жесткое соединение, сварка), исключаяющее в среде *SIMMECHANICS* движение шара. Устранить ошибку трансляции можно, исключив возможность качения шара (установив вместо сопряжения Касательность сопряжение Расстояние между справочными плоскостями, рис. 7). В этом случае трансляция завершается без ошибки, однако ясно, что характер движения шара становится неестественным.

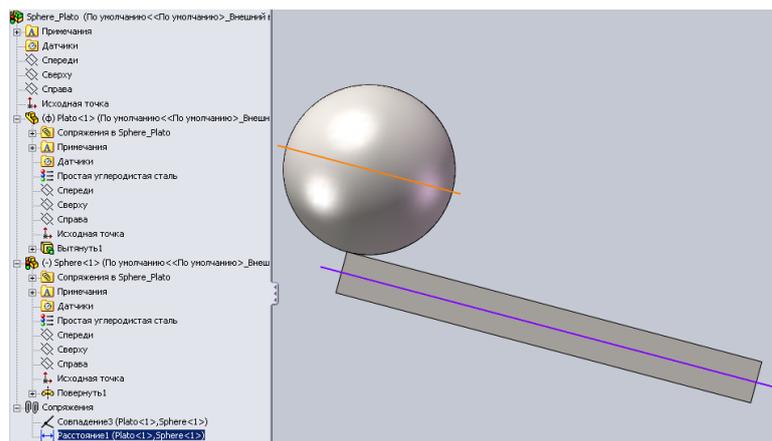


Рис. 7. Изменение характера сопряжения шара и плоскости, исключающее ошибки трансляции

Рассмотрим еще пример (рис. 8). Здесь требуется установить сферическое шарнирное соединение. Как видно из приведенного на рисунке сообщения транслятора (*SIMMECHANICS CAD TRANSLATION ERROR*), сопряжение Касательность для сферических поверхностей не транслируется.

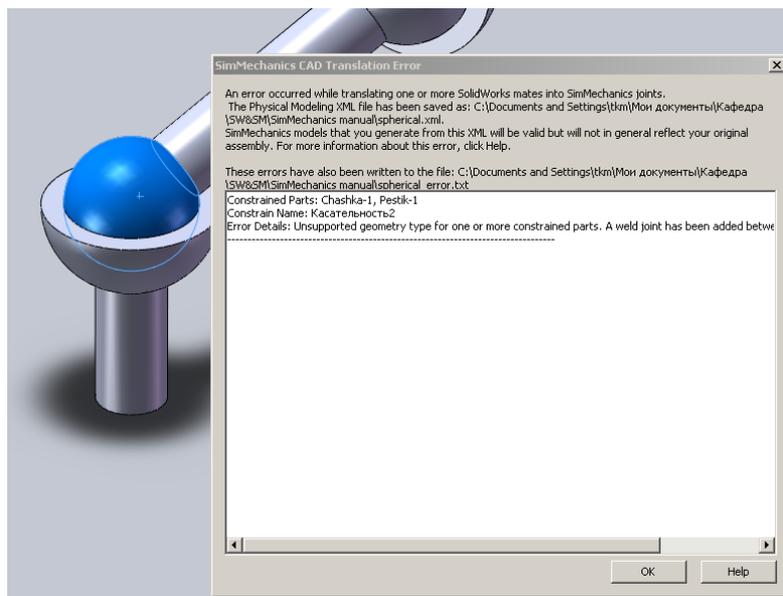


Рис. 8. Ошибка трансляции сопряжения Касательность для сферических поверхностей

Проблема решается, если в качестве сопряжения выбрать Совпадение для исходных точек сферических поверхностей двух деталей (рис. 9).

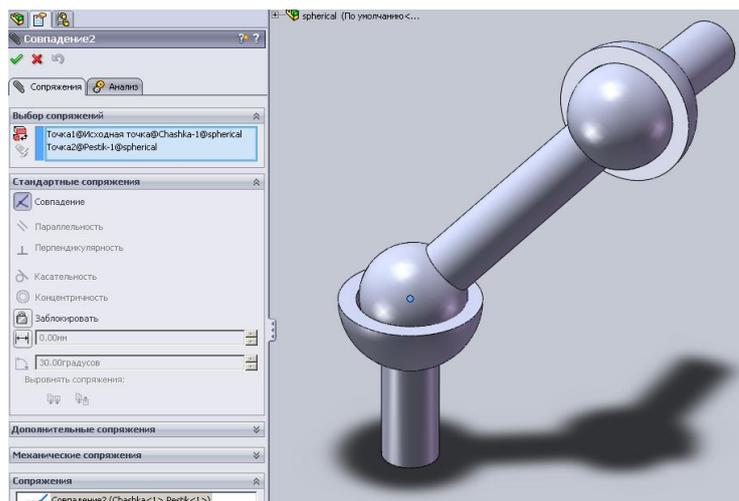


Рис. 9. Сопряжение Совпадение для исходных точек деталей обеспечивает возможность трансляции сферического шарнира

В ряде случаев только изменением сопряжений решить задачу работоспособности модели в среде *SIMMECHANICS* невозможно и требуется прибегать к изменению конструкции. На рис. 10 показан пример кулисного механизма, где установлено сопряжение Касательность для плоскости кулисы и цилиндрической поверхности штифта.

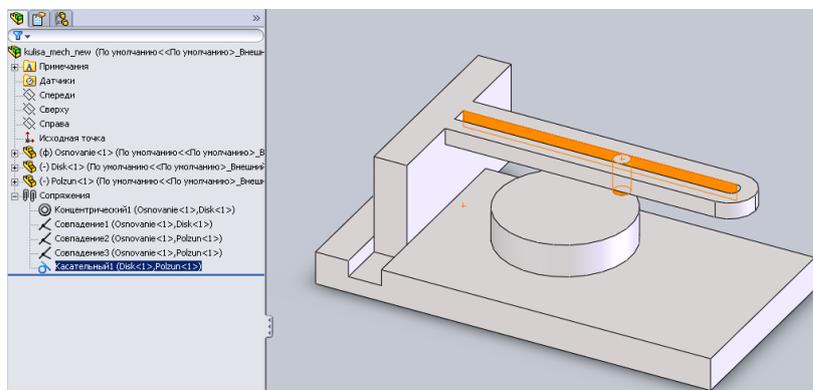


Рис. 10. Сопряжение Касательность между цилиндром и плоскостью не транслируется в *SIMMECHANICS*

Указанное сопряжение препятствует созданию работоспособной модели в *SIMMECHANICS*. Изменение конструкции, показанное на рис. 11 (включение в конструкцию промежуточной втулки между кулисой и штифтом), обеспечивает работоспособность модели.

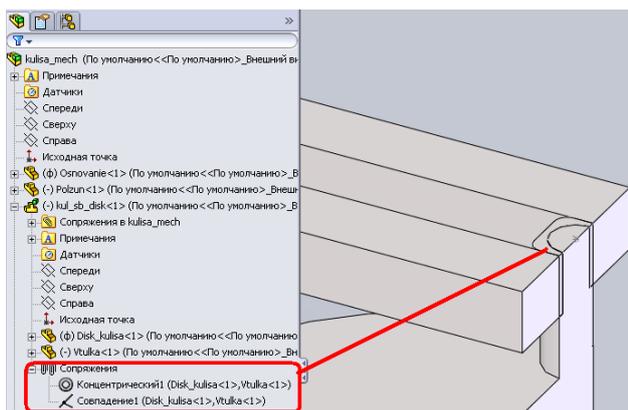


Рис. 11. Включение в конструкцию промежуточной втулки

Отметим еще одно свойство создаваемых при помощи *CAD*-транслятора в среде *SIM-MECHANICS* динамических моделей: механические связи в такой модели не могут быть разорваны. Например, в модели шара на плоскости последняя имеет ограниченные геометрические размеры. Очевидно, что в тот момент, когда шар переместится на расстояние, равное длине плоскости, он потеряет с ней связь и будет дальше двигаться свободно под действием силы тяжести с учетом начальных условий, определяемых параметрами движения шара в момент отрыва от плоскости. В динамической модели рассматриваемой системы, полученной при помощи *CAD*-транслятора, плоскость имеет бесконечные геометрические размеры, что приводит к движению шара далее вдоль плоскости, даже когда физически он потерял с ней контакт. Указанная механическая связь не может быть разорвана в процессе моделирования. На рис. 12 представлена *S*-модель системы и график изменения положения центра масс шара. Видно, что шар движется по прямой.

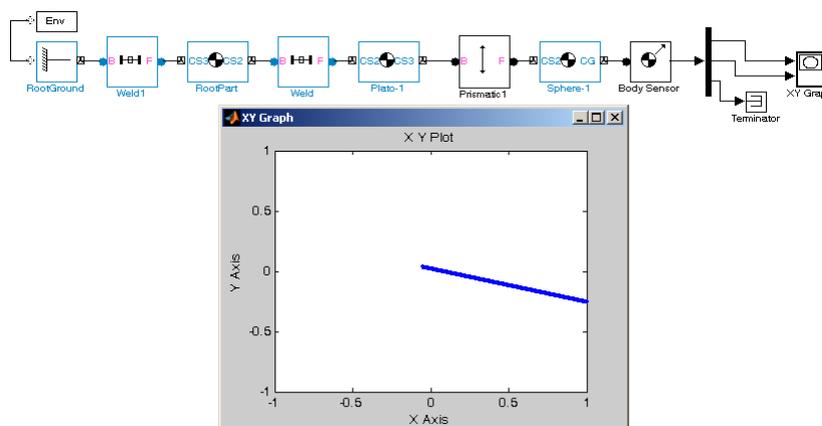


Рис. 12. *S*-модель системы «Шар на плоскости»

Таким образом, несмотря на большие удобства, которые предоставляет разработчику динамических моделей CAD-транслятор, он накладывает также и существенные ограничения. Учет этих ограничений необходим при разработке CAD-модели.

Определяемые пользователем системы координат

При создании модели *SIMMECHANICS* устанавливает инерционные характеристики и параметры систем координат в базовой инерциальной системе координат, называемой мировой (*WORLD*). При этом существует возможность устанавливать также локальные (связанные) системы координат (*LOCAL CSS*):

- *GROUND CSS* (системы координат заделки, стойки), связанные с блоками *GROUND* (стойка), неподвижными относительно мировой системы координат;
- *BODY CSS* (связанная система координат) - система координат, связанная с твердым телом, неподвижная относительно него и перемещающаяся вместе с ним.

При использовании CAD-транслятора указанные системы координат создаются автоматически. Как правило, существенная часть создаваемых систем координат, за исключением минимально необходимых для обеспечения целостности механизма, скрыта от пользователя. Но доступ к этим системам координат при необходимости возможен и достигается активизацией соответствующих портов. На рис. 13 показано окно настройки параметров блока *BODY* шара. В этом окне активизирована система координат, связанная с центром масс шара для присоединения к нему виртуального датчика, предназначенного для измерения параметров движения (в исходном состоянии указанная система координат погашена).

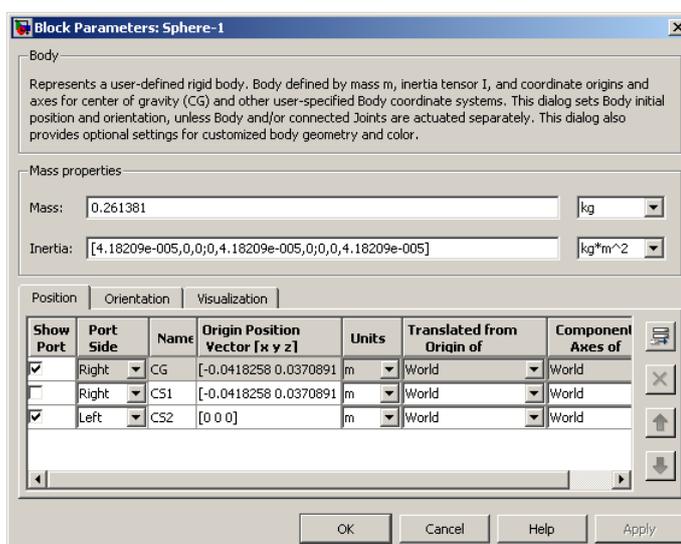


Рис. 13. Окно настройки параметров блока *BODY*

Окно настройки параметров блока *BODY* обеспечивает возможность добавлять системы координат (СК), если это необходимо. На рис. 14 представлена *S*-модель подвижной пушечной установки (ППУ) с нормальной главной осью с приводами вертикального и горизонтального каналов. Для коррекции привода используется напряжение, пропорциональное скорости вращения следящего вала. Как правило, эта скорость измеряется при помощи тахогенератора, размещенного на оси вращения (или связанного с ней передаточным отношением, равным 1). Таким образом, модель установки должна обеспечивать доступ к параметрам оси вращения для связи с ней виртуального датчика *BODY SENSOR*, обеспечивающего измерение в модели указанной угловой скорости.

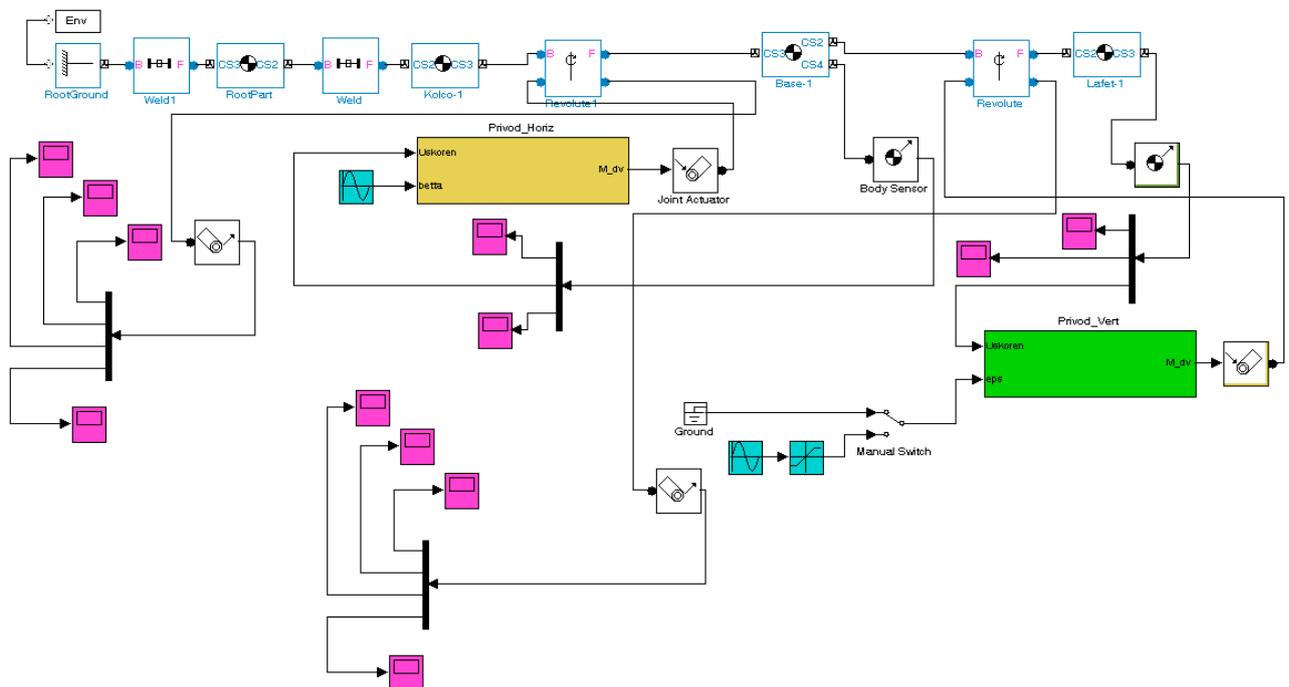


Рис. 14. *S*-модель подвижной пушечной установки с приводами вертикального и горизонтального каналов

На рис. 14 датчик *BODY SENSOR*, обеспечивающий измерение параметров движения подвижного основания *BASE-1* вокруг вертикальной оси, связан с СК *CS4*, параметры которой полностью совпадают с параметрами СК *CS3*. То, что *CS3* есть система координат, связанная с осью вращения, следует из установленной *CAD*-транслятором связи между ней и системой *CS3* блока *KOLCO-1* (неподвижное основание ППУ) через блок *REVOLUTE*, обеспечивающий одну вращательную степень свободы. Система координат *CS4* при создании модели отсутствует. Она создается дополнительно в блоке *BODY BASE-1* (см. рис. 15).

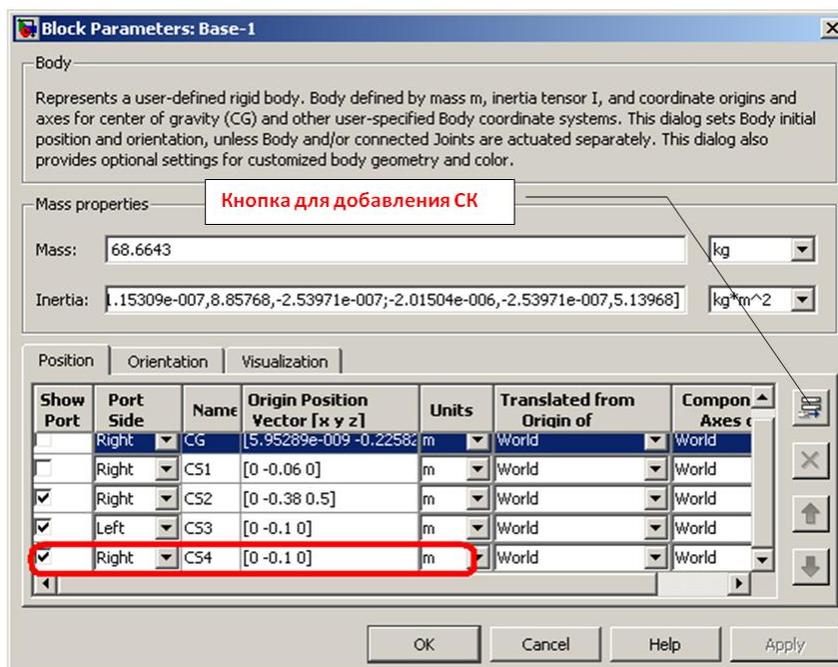


Рис. 15. Окно настройки параметров блока *BODY BASE-1*
(выделены параметры системы координат *CS4*)

Допустимые ограничения

Устанавливая функциональные алгебраические или кинематические связи между двумя твердыми телами, можно ограничивать их движение в составе механизма. Как правило, такие ограничения устанавливаются средствами *SIMULINK*. Например, в модели ППУ (рис. 14) задано ограничение движения лафета относительно подвижной боковой оси *Oz*. Указанное ограничение связано с установленными для лафета предельными значениями углов поворота (от 0° до 45°) и обеспечивается блоком *SATURATION* (насыщение) .

Виртуальные датчики, виртуальные двигатели и силовые элементы

Как указано выше, виртуальные датчики и двигатели используются для преобразования сигналов между блоками *SIMULINK*, не входящими в *SIMMECHANICS*, и блоками *SIMMECHANICS*. Пример применения виртуальных датчиков и виртуальных двигателей *Joint Sensor* и *Joint Actuator* представлен на рис.4. На рис. 14 представлен пример применения виртуального датчика *Body Sensor*. Рассмотрим пример применения виртуального двигателя *Body Actuator*.

При моделировании подвижных пушечных установок важным фактором является воздействие стрельбы из автоматического оружия (АО) на элементы конструкции и динами-

ку полета летательного аппарата. На рис. 16 представлена модель АО, учитывающая разрыв цепей стрельбы в случае, если угол поворота по одному из каналов достигает максимального значения (если это происходит, то срабатывает один из концевых выключателей ППУ, обеспечивающий разрыв цепей управления огнем). Важнейшей чертой модели АО является последовательность импульсов, амплитуда которых соответствует максимальному значению давления на дно канала ствола, а период и скважность определяются темпом стрельбы. Указанная последовательность импульсов передается на силовую часть модели, имитируя, таким образом, воздействие стрельбы. Для передачи указанной последовательности используется блок *BODY ACTUATOR* (см. рис. 16).

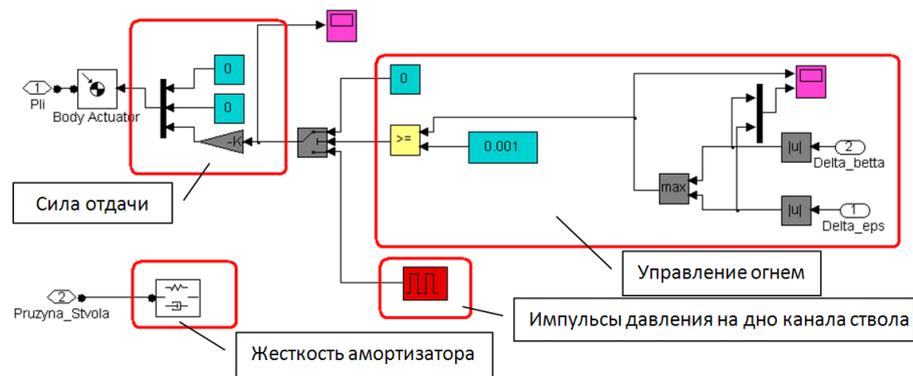


Рис. 16. Модель автоматического оружия

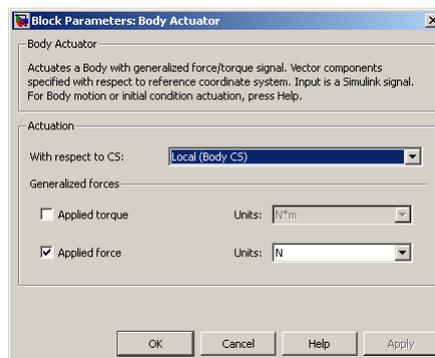


Рис. 17. Окно настройки параметров блока *BODY ACTUATOR*

На рис. 17 представлено окно настройки параметров блока *BODY ACTUATOR*. Видно, что блок настроен на передачу усилия (*APPLIED FORCE*). Но может, при необходимости, передавать и момент. Следует только помнить, что передаваемой блоком силовое воздействие является трехмерным вектором.

Силовые элементы обеспечивают моделирование внутренних сил, действующих между твердыми телами. На рис. 17 представлен один из таких элементов – *JOINT SPRING & DAM-*

PER  . Этот блок моделирует пружину (линейную или торсион – в зависимости от того, с какой степенью свободы связан), определяя ее жесткость, внутреннее демпфирование и предварительное поджатие.

Итак, блоки *SENSOR* (виртуальные датчики) обеспечивают измерение параметров движения тел и в соединениях. Существует возможность соединения блока *SENSOR* и блока *SCOPE SIMULINK* для визуализации параметров движения системы (измерения положения, скоростей, ускорений и т.д. в функции времени). Можно также данные с выхода блока *SENSOR* передавать другим блокам модели *SIMMECHANICS* посредством блоков *ACTUATOR* (виртуальный двигатель), определяя, таким образом, действующие моменты и силы.

В свою очередь, блоки *ACTUATOR* устанавливают параметры движения для твердых тел или в соединениях. Они обеспечивают преобразование сигналов сил и моментов, определяемых в *SIMULINK*, к виду *SIMMECHANICS* и передачу их к твердым телам (или в соединениях). Сам же сигнал *SIMULINK* может создаваться на базе измеренных датчиком *SENSOR* параметрах (например, это требуется при включении в модель относительного движения трения между телами). Блоки *ACTUATOR* также могут устанавливать начальные значения параметров движения, которые затем интегрируются в процессе моделирования.

Силовые элементы обеспечивают моделирование силовых взаимодействий между телами (например, пружины, торсионы). Внутренние силы зависят только от положения или скорости относительного перемещения тел, независимо от внешних воздействий (сигналов). Возможность использовать в модели силовые элементы (пружины) открывает перспективное направление исследований. Речь идет об исследовании упругих механизмов.

Дело в том, что *CAD*-модель по определению жесткая, поскольку в *CAD*-системах все тела твердые, недеформируемые. Однако есть возможность после трансляции твердых тел в среду *SIMMECHANICS* преобразовать их, если это необходимо, в упругие. Для этого требуется соответствующая подготовка *CAD*-модели. В [5] рассмотрен вариант исследования упругого механизма авиационного катапультного устройства АКУ-58. В этом АКУ важнейшую роль играют несущие рычаги, обеспечивающие удержание массивного груза (авиационной ракеты) и перевод его в состояние, когда он может отделиться от АКУ.

На рис. 18 представлена *CAD*-модель одного из рычагов. В этой модели искусственно сделан разъем по оси его вращения. При создании сборки все степени свободы удалены, так что рычаг представляет собой единое целое. В составе блоковой диаграммы *SIMMECHANICS* модель такого рычага состоит из двух частей с жестким соединением (*WELD*, рис. 19). В процессе моделирования жесткого механизма измеряются действующие усилия, на основании

чего выбирается расчетный случай. Он реализуется в *CAE*-среде, где определяются характеристики жесткости рычага. Далее в среде *SIMMECHANICS* блок *WELD* удаляется, вместо него устанавливается блок *REVOLUTE*, к которому присоединяется силовой элемент – торсион. С этого момента рычаг становится упругим (рис. 19).

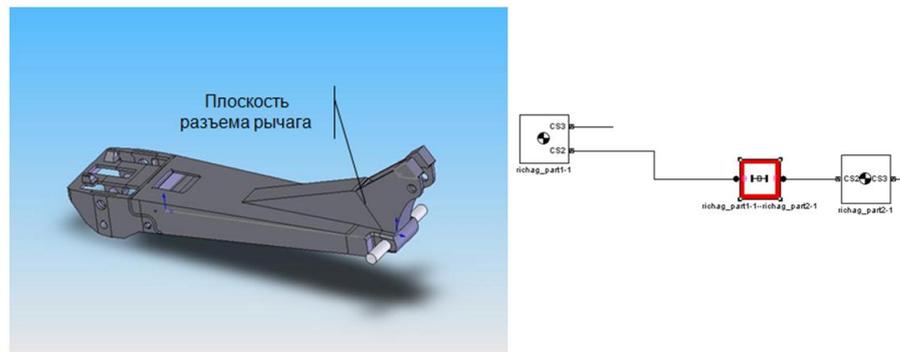


Рис. 18. Подготовка *CAD*-модели рычага для обеспечения упругости и вид модели в *SIMMECHANICS*

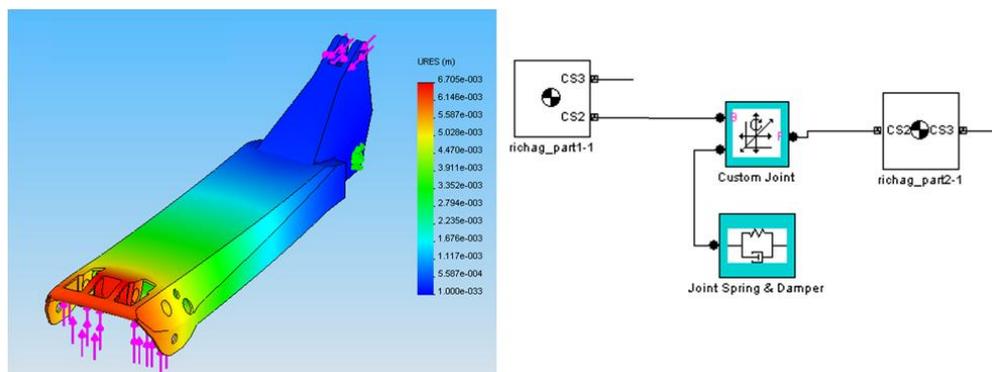


Рис. 19. Расчет параметров жесткости рычага в *CAE*-среде и обеспечение упругости в *SIMMECHANICS*

Моделирование и анализ параметров движения

Очевидно, любая модель создается для проведения исследований. Для механизмов авиационных робототехнических систем важным является исследование движения, определение действующих усилий и других параметров, обеспечивающих последующий прочностной расчет, расчет параметров эффективности применения и т.д. В этом смысле *SIMMECHANICS* предоставляет два метода анализа механических систем в процессе моделирования.

Прямой динамический анализ обеспечивает определение параметров движения под действием присоединенных сил и моментов и действующих ограничений. Следствием прямого динамического анализа является кинематический анализ.

Обратный динамический анализ обеспечивает определение сил и моментов, необходимых для реализации установленных параметров движения. В этом случае элементам модели передаются не усилия, а параметры движения (перемещения, скорости и ускорения). Такую возможность обеспечивают блоки *JOINT ACTUATOR*, именно при их помощи можно передавать либо силы и моменты, действующие в соединении, либо параметры относительного движения. Характер движения определит в этом случае силовое взаимодействие тел (усилия, возникающие в контакте, инерционные усилия и др.). Следствием обратного динамического анализа является возможность определения значений факторов, обеспечивающих равновесие системы.

Выводы

1. *SIMMECHANICS* является эффективным средством исследования механизмов, в том числе и авиационных робототехнических систем. Эффективность *SIMMECHANICS* обусловлена его основой – платформой *SIMULINK*, - и возможностью интеграции на указанной платформе систем различной физической природы (механики, электрики, гидравлики и т.д.). Кроме того *SIMMECHANICS* доступны возможности, предоставляемые ядром *MATLAB*.
2. Эффективность использования *SIMMECHANICS* существенно повышается, если динамическая модель создаётся на основе твердотельной *CAD*-модели с использованием *CAD*-транслятора.
3. Использование *CAD*-транслятора обязывает разрабатывать твердотельные модели, отвечающие ряду требований:
 - модель сборки должна быть иерархичной,
 - по возможности в составе модели сборки должна быть только одна фиксированная деталь
 - степень подвижности деталей в составе модели сборки механизма должна определяться исключительно накладываемыми на детали связями при установке сопряжений,
 - устанавливаемые сопряжения должны накладывать связи только в пределах соседних уровней иерархии,
 - в определении имен компонентов сборки (моделей деталей) не рекомендуется использовать кириллицу (имена компонентов должны быть правильными идентификаторами).

Библиографический список

1. <http://matlab.exponenta.ru/virtualreality/vrt.php#26>
2. Тихонов К.М., Доан Чан Нгок. Разработка методики моделирования механизмов авиационных катапультных устройств// Известия Тульского государственного университета. Серия «Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления». Выпуск 3 «Системы управления». Том 2. – Тула, Изд-во ТулГУ, 2006. С. 213-216.
3. А.И. Данеко, А.В. Косарев, К.М. Тихонов, В.В. Тишков. Применение современных интегрированных информационных технологий в моделировании авиационных робототехнических систем / Под ред. чл.-корр. РАН, д.т.н. Б.В. Обносова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010.-212с.
4. http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_sw2sm.html
5. Тихонов К.М. Разработка методики моделирования динамики квазиупругих рычажных механизмов АКУ/Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Сб. докл. VII-й Всерос. юбилейной науч.-техн. конф., Москва, Мос. авиац. ин-т, 25-27 мая 2005г./Редкол.: В.А. Полковников (пред). – М.: Изд-во МАИ, 2005. – С.18-22.

Сведения об авторах

Тихонов Константин Михайлович, декан факультета Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н., доцент

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993

Тел.: (499) 158-46-02, e-mail:

Тишков Виктор Васильевич, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993

Тел.: (499) 158-46-02, e-mail: kaf701mai@mail.ru

