

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Разработка численной модели узлов крепления ЖРД

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры»

Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы

по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)»

Соглашение № 2/11 от 03 июня 2013 г.

САМАРА

2013

УДК 621.454.2(075)
P177

Авторы: **Борисов Валерий Александрович,
Мелентьев Владимир Сергеевич,
Жижкин Александр Михайлович,
Гвоздев Александр Сергеевич**

Рецензенты:

главный инженер Отраслевой научно-исследовательской лаборатории вибрационной прочности и надёжности авиационных изделий Паровой Ф. В.,

зав. кафедрой «Теория двигателей летательных аппаратов», д.т.н., Матвеев В. Н.

Компьютерная верстка: Гвоздев А. С.

Разработка численной модели узлов крепления ЖРД [Электронный ресурс] :
электрон. учеб. пособие / В. А. Борисов и др.; М-во образования и науки РФ, Самар.
гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф.
дан. (10 Мб). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии рассмотрены вопросы создания численных моделей узлов крепления ЖРД, включающие в себя: 1. Параметрическую 3D-модель узлов крепления двигателя, созданную в САД-пакете; 2. Конечно-элементную модель узлов крепления, основанную на 3D-модели; 3. Динамическую модель качающегося подвеса ЖРД. Представленные модели в совокупности позволяют получать перемещения, скорости и ускорения деталей узлов крепления, нагрузки, деформации, напряжения. Проводить оптимизационные расчёты и подготовить конструкцию для расчёта на надёжность и оценку ресурса, а также использовать полученные модели в САМ-пакетах для технологического проектирования и последующего производства в рамках концепции "Виртуального ЖРД" по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)».

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (ГОС-2), изучающих дисциплину «Конструирование основных узлов и систем ракетных двигателей» в 9 семестре.

Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов СГАУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

Содержание

Введение	4
1. Конструкция креплений двигателя	5
1.1. Крепления для неподвижной установки двигателя	5
1.2. Крепление двигателя через раму	8
1.3. Крепления для подвижной установки двигателя	11
1.4. Пример конструкции крепления двигателя с шаровой пятой	16
1.5. Конструкция узла крепления ЖРД НК-33	21
2. Разработка численных моделей узлов крепления ЖРД	24
2.1. Численная модель узла крепления ЖРД НК-33	24
2.1.1 Основы параметризации 3D-моделей	
2.1.1.1 Ассоциативность 3D-моделей и библиотеки готовых компонентов. Классификация параметров	24
2.1.1.2 Принцип абстракции в параметрическом моделировании	34
2.1.1.3 Принцип наследования в параметрическом моделировании	35
2.1.1.4 Принцип инкапсуляции в параметрическом моделировании	37
2.2. Построение объёмной модели	41
2.3. Проведение расчёта	43
3. Разработка модели возможного подвижного крепления ЖРД НК-33	46
3.1 Конструкция подвижного крепления	47
3.2 Проверка необходимой подвижности камеры средствами CAD-пакета ADAMS	51
Заключение	168
Список использованных источников	169

Введение

На двигателе располагают крепления для его установки на летательном аппарате и передачи силы тяги. Обычно узлы крепления располагаются на камере, как основном тяговом агрегате.

Конструкция и расположение креплений должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать минимальные нагрузки на силовые элементы камеры и летательного аппарата, вызывающие незначительные их деформации;

- минимальные температурные напряжения в элементах конструкции;

- удобство монтажа и обслуживания.

Сами крепления должны иметь достаточную жесткость, чтобы обеспечить заданное взаимное расположение соединяемых агрегатов.

Для установки креплений на камере выполняются силовые элементы – опоры. Чтобы камера не включалась в силовую систему летательного аппарата, опоры на камере располагают в виде одного силового пояса. Число, место расположения и конструкция опор зависят от назначения, величины тяги, габаритов двигателя, назначения летательного аппарата и других факторов.

Особым требованием, предъявляемым к опорам камеры, является обеспечение высокой точности совпадения осей камеры и летательного аппарата или же заданной величины угла между этими осями. Это необходимо для получения расчетной траектории полета летательного аппарата непосредственно после старта, когда система управления ещё не в состоянии работать эффективно. В дальнейшем полёте это необходимо для снижения нагрузок на исполнительные органы управления ракетой. Указанное требование

выполняется за счет необходимой точности расположения опор относительно оси камеры.

1 Конструкция креплений двигателя

Крепления двигателя делятся на два вида:

- обеспечивающие неподвижную установку камеры относительно летательного аппарата;
- дающие возможность поворота камеры для создания управляющих моментов.

1.1 Крепления для неподвижной установки двигателя

При неподвижной установке двигателя на камере делают опоры в виде кронштейнов или приливов силового кольца головки, или же в виде отдельных сборочных единиц, состоящих из корпуса и втулки с отверстием под крепёжный болт. Обычно на камере устанавливают от двух до четырёх кронштейнов, передающих тягу. Необходимо иметь в виду, что с увеличением числа опор уменьшается местная нагрузка на корпус в месте крепления опоры и требуется меньшее его усиление. В то же время возрастают требования к точности установки опор, необходимой для получения равномерной нагрузки на опору. На рисунке 1 показан корпус камеры сгорания ЖРД РД- 219 с опорами для крепления.

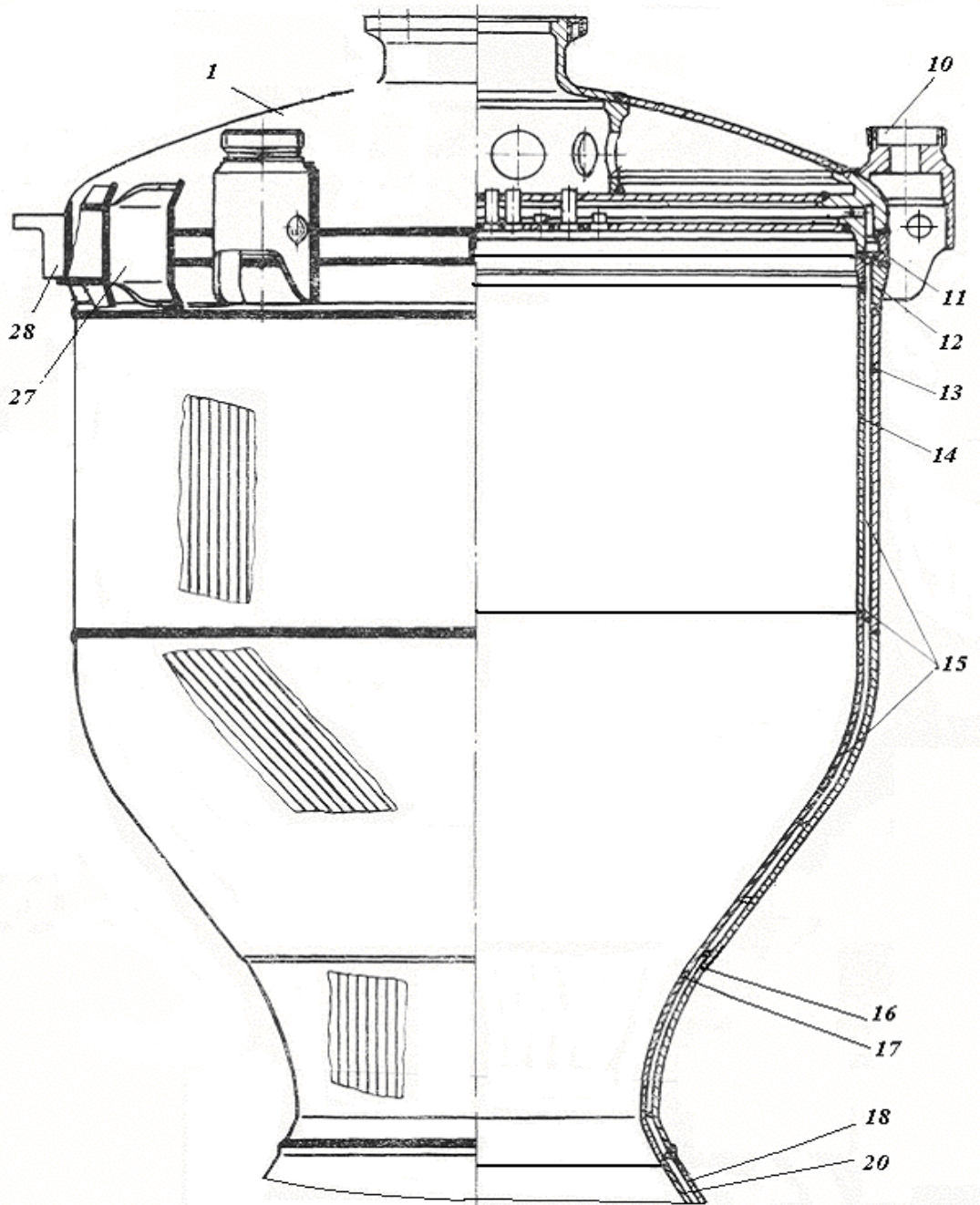


Рисунок 1 – Камера сгорания с опорами крепления

1- головка камеры; 10 – опоры крепления камеры; 11- соединительное кольцо; 12-переходное кольцо; 13,16,18- рубашка частей камеры; 14,17,20 – стенка камеры; 15- гофрированные проставки; 27,28- кронштейны для крепления агрегатов.

На камере в месте стыка форсуночной головки с цилиндрической частью установлено три стакана шаровых опор 10 для крепления к раме двигателя. Шаровое соединение камер с рамой двигателя позволяет производить

регулировку длины двигателя, выдерживать взаимную параллельность осей двух камер и требуемые расстояния между ними. Выполняется регулирование при сборке двигателя.

Опора (рис. 2) состоит из следующих деталей: шайбы 8, подпятника 7, втулки регулировочной 3, кольца регулировочного 2, пяты шаровой 1, контргайки 4, гайки накидной 5, шайбы контровочной 6. Регулировка длины двигателя достигается вворачиванием шаровой пяты в резьбовую втулку рамы. Радиальная центровка шаровой пяты в стакане осуществляется регулировочным кольцом 2 и регулировочной втулкой 3, имеющими эксцентриситет по 2 мм, путём вращения их относительно друг друга, что дает возможность получить смещение оси шаровой опоры 1 от оси стакана до 4 мм.

Контровочная шайба 6 заведена двумя усиками в пазы стакана опоры и исключает возможность проворачивания кольца 2 и втулки 3 при монтаже относительно друг друга.

На камере (рис. 1) имеются ещё опоры 27 для соединения с рамой ТНА и кронштейн для установки вибродатчика.

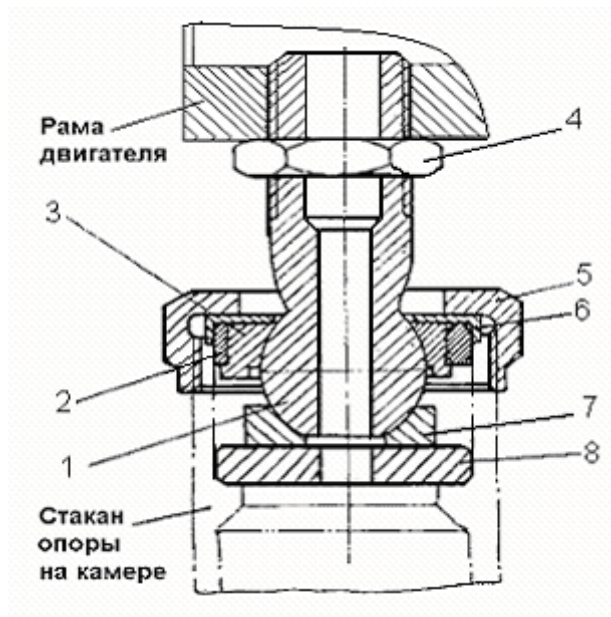


Рисунок 2 – Шаровая опора для крепления камеры

1-шаровая пята; 2-кольцо регулировочное; 3- втулка регулировочная; 4-контргайка; 5-накидная гайка; 6-шайба контровочная; 7-подпятник; 6-шайба.

1.2 Крепление двигателя через раму

Во многих случаях для неподвижного крепления двигателей к летательному аппарату используется промежуточный элемент – рама двигателя.

Она необходима в следующих случаях:

- при неподвижном креплении двигателя, если поперечные размеры камеры гораздо меньше размеров летательного аппарата;
- при использовании многокамерных двигателей;
- при необходимости равномерного распределения тяги по окружности корпуса летательного аппарата во избежание значительных его местных деформаций [1].

При этом назначение рамы заключается в следующем:

1. Воспринять силу тяги камер, входящих в двигатель, и передать эту силу корпусу ракеты, равномерно распределив ее по стыковочной плоскости или по стыковочным узлам.

2. Соединить все агрегаты двигателя в единую технологическую группу, удобную для транспортировки и монтажа двигателя на ракете.

3. Установить главную ось двигателя в заданном положении по отношению к оси ракеты.

Конструкция рамы зависит от числа камер или блоков, от способа их крепления, числа и размеров других агрегатов двигателя. Обычно она представляет собой ферменную конструкцию (рис. 3) и состоит из двух даже трех поясов. Верхний пояс служит для присоединения рамы к корпусу ЛА, нижний - для крепления к ней камер, а средний - для крепления ТНА и других агрегатов.

К рамам предъявляются следующие технические требования:

1. Положение центров опор 7 по отношению к оси рамы должно быть точным, чтобы ось двигателя занимала заданное положение по отношению к оси ракеты.

2. Верхние плоскости опор 7 должны находиться в стыковочной плоскости n (плоскости разъема), чтобы силу тяги двигателя распределить равномерно по всем опорам.

3. Места крепления опор камер должны находиться в заданном положении по отношению к опорам 7 рамы (местам крепления рамы к ракете).

4. Стержни рамы должны быть прямолинейны во избежание продольного прогиба под действием сжимающих сил.

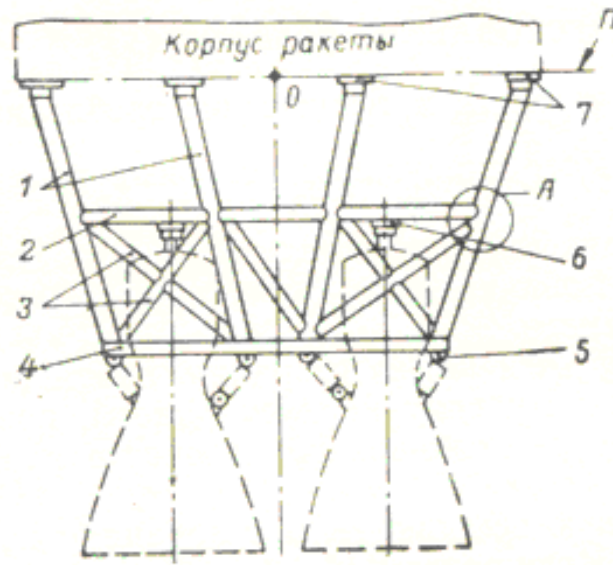


Рисунок 3 - Рама многокамерного двигателя с подвижными камерами

- 1 – силовые стойки; 2 – средний пояс рамы; 3 – раскосы;
 4 – нижний пояс рамы; 5 – гидроцилиндры; 6 – шарнирная опора камеры;
 7 – опоры верхнего пояса рамы

Конструктивно рамы состоят из отрезков труб, опор, косынок, кронштейнов и других элементов, которые соединяются сваркой. Конструкция соединения отрезков труб с другими элементами должна обеспечить получение сварного шва, равнопрочного с соединяемыми элементами. На рисунке 4 показано соединение конца трубы с опорой. Для получения необходимой длины сварного шва конец трубы формируется в штампе и делается прорезь, в которую входит часть опоры.

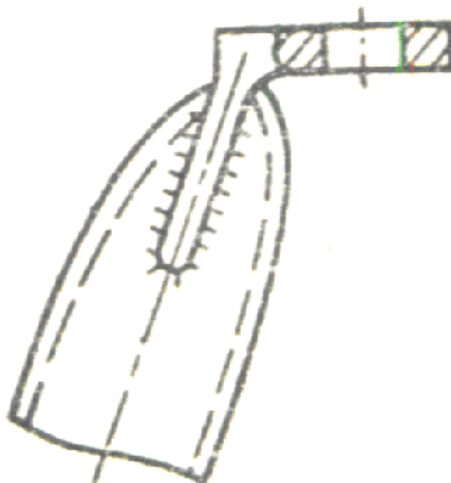


Рисунок 4 - Конструкция соединения отрезка трубы с опорой

К раме двигателя могут быть приварены кронштейны для крепления штоков поршней гидроцилиндров, а также других агрегатов

1.3 Крепления для подвижной установки двигателя

Если основной двигатель выполняет также и функции рулевого, то крепления должны обеспечить возможность его поворота в одной или двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В этом случае для крепления двигателя всегда нужен промежуточный элемент, который также часто представляет собой раму. Такие крепления располагают или сверху, в центре головки, или же по бокам камеры, обычно в конце цилиндрического участка корпуса, а иногда в зоне критического сечения сопла.

В первом случае крепление имеет меньшие размеры и массу, чем во втором, но при этом растет момент инерции поворота камеры, так как центр ее тяжести удален от оси поворота. Поэтому приходится увеличить мощность и, следовательно, массу привода. Во втором случае ось

поворота и центр тяжести камеры расположены значительно ближе друг к другу, но габариты и масса крепления будут большими.

Крепление, размещенное на головке и обеспечивающее поворот камеры только в одной плоскости, представляет собой шарнир (рис. 5,а). Если же необходимо обеспечить поворот камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то используют универсальный шарнир - кардан (рис. 5,б) или же шаровую пяту (рис. 5,в). Для уменьшения силы трения в шарнирах применяют подшипники скольжения в виде втулок, покрытых фторопластом, двухсернистым молибденом, или же подшипники качения.

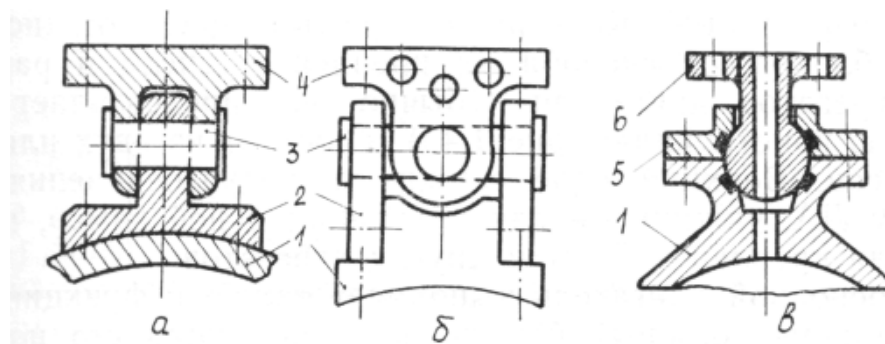


Рисунок 5 - Схемы конструкции креплений поворотных камер:

а – шарнир; б – универсальный шарнир; в – шаровая пята;

1 – наружное днище головки камеры; 2 – кронштейн (опора) на головке;

3 – ось; 4 – кронштейн рамы; 5 – крышка подпятника; 6- фланец шаровой опоры

На рисунке 6 показан двигатель с креплением на универсальном шарнире, установленном на головке камеры.

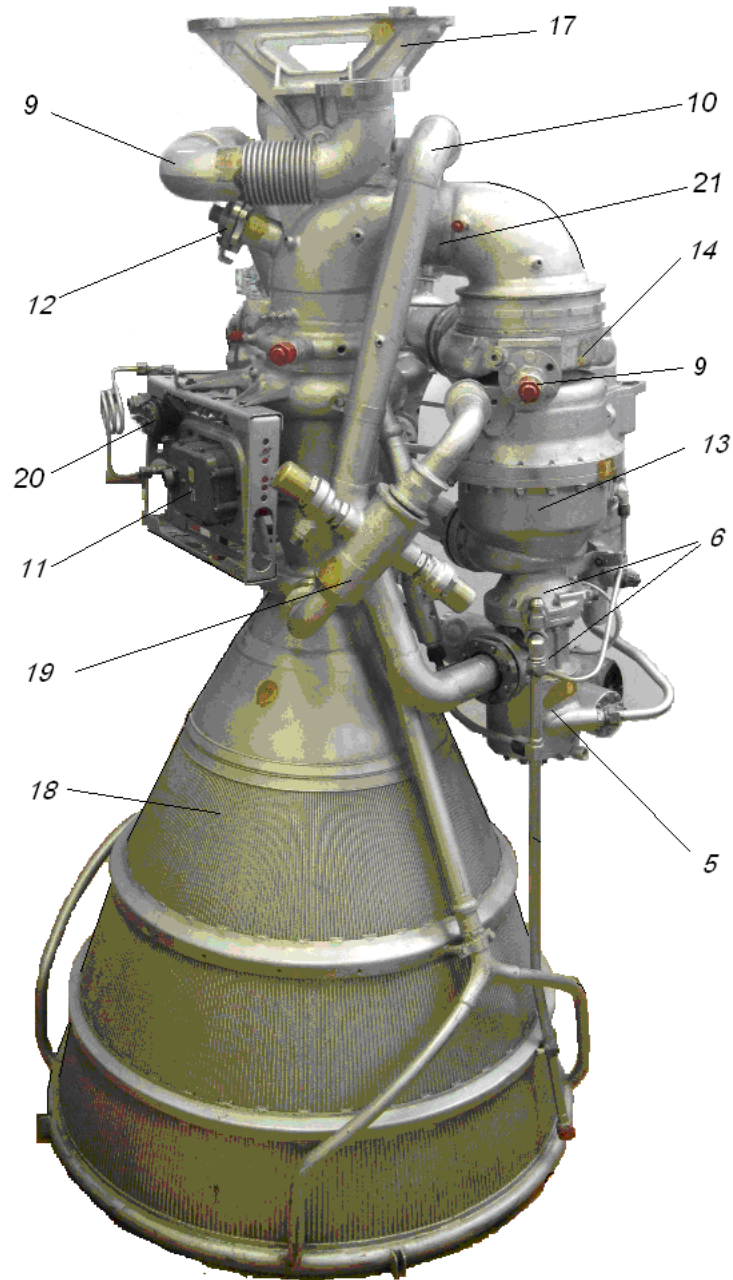


Рисунок 6 – ЖРД с креплением на кардане, установленном на головке двигателя.

1, 2 – обратные клапаны продувки камеры; 3 – главный клапан окислителя ЖГГ; 4 – регулятор расхода; 5, 6, 13, 14 – турбонасосный агрегат; 7 – главный клапан окислителя «О»; 8 – регулятор системы СОБ; 9, 10 – трубопроводы подачи «Г» и «О»; 11 – блок пневмореле ПРМ-1 и ПРМ-2; 12, 16 – пирозажигательные устройства; 15 – газогенератор; 17 – узел карданного подвеса двигателя; 18 – камера двигателя; 19 – главный клапан горючего; 20 – датчик давления; 21 – газовод;

Другую конструкцию имеют крепления, расположенные на корпусе камеры, обычно вблизи её центра тяжести.

При повороте в одной плоскости крепление представляет собой силовое кольцо, приваренное к средней части корпуса камеры, с двумя цапфами, которые могут вращаться относительно рамы двигателя (рис. 7).

Для уменьшения трения на цапфы устанавливаются подшипники качения, наружная обойма которых входит в гнёзда рамы двигателя.

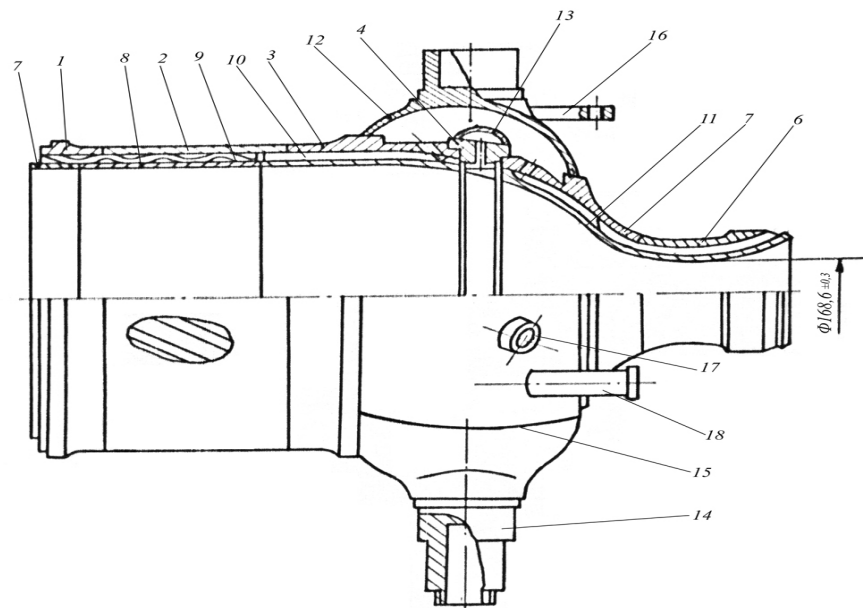


Рисунок 7 - Средняя часть камеры ЖРД с цапфами для подвижного крепления:
 1 – кольцо; 2 – рубашка цилиндра; 3- кольцо; 4 – кольцо завесы; 5 – рубашка коническая; 6 – кольцо сопловое; 7 – кольцо стенки; 8 – стенка цилиндра; 9 – проставка; 10, 11 – части оребренной оболочки; 12 – смесительный коллектор; 13 – коллектор завесы; 14 – цапфа; 15 – сварной шов коллектора; 16 – кронштейн; 17 – штуцер для установки дроссельной шайбы; 18 – патрубок подвода горючего

При повороте камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях приходится использовать промежуточную раму, в которой устанавливаются подшипники цапф камеры. Цапфы промежуточной рамы располагают под углом 90° к цапфам камеры и вращают в подшипниках рамы двигателя (рис. 8). С целью уменьшения габаритов и массы рамы такую опору размещают в зоне критического сечения камеры.

Промежуточная рама для облегчения выполняется сварной из пустотелых секций и имеет гнезда под подшипники. Поворот камеры относительно промежуточной рамы, как и поворот самой промежуточной рамы, относительно рамы двигателя осуществляется рулевыми машинками, которые часто представляют собой гидроцилиндры.

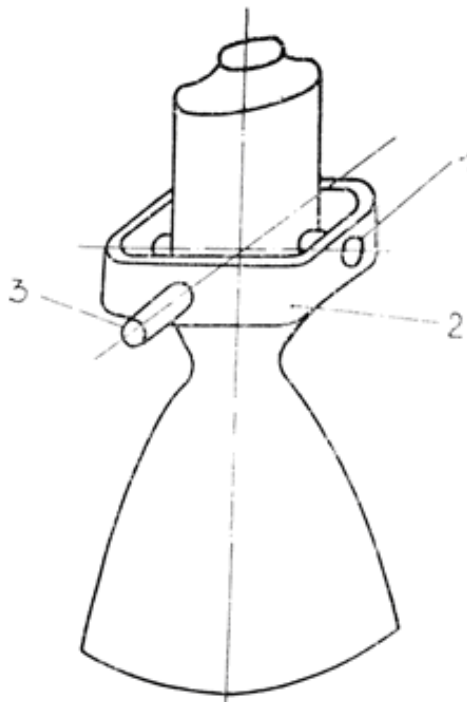


Рисунок 8 - Карданное крепление камеры:

1 – цапфа камеры; 2 – промежуточная рама; 3 – цапфа рамы

Определенную сложность представляет подвод компонентов к поворотным камерам. При карданном креплении подвод компонентов к камерам осуществляют с помощью гибких шлангов или сильфонов, которые устанавливают на стыках трубопроводов, идущих от баков, с трубопроводами или фланцами агрегатов, укрепленных на камере.

Эти стыки необходимо размещать возможно ближе к центру поворота камеры, чтобы уменьшить деформацию сильфонов, облегчить условия их работы и снизить мощность привода.

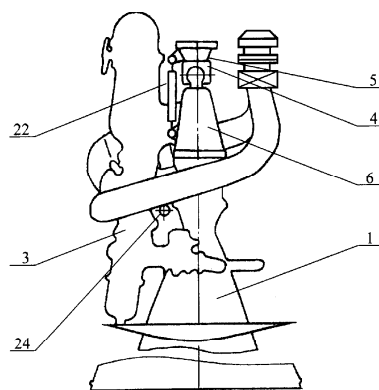
1.4 Пример конструкции крепления двигателя с шаровой пятой

Рассмотрим конструкцию крепления однокамерного ЖРД с дожиганием генераторного газа, обеспечивающего изменение вектора тяги за счет качания двигателя на карданном шаровом подвесе (пяте) [2].

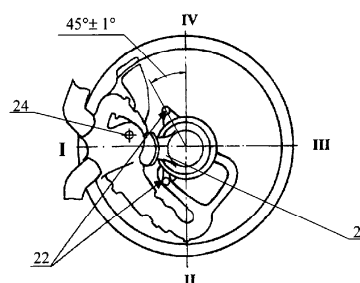
На рисунке 9 схематически представлен общий вид и вид сверху ЖРД с карданным подвесом в номинальном положении.

Конус 6 (рис. 10) состоит из скрепленных между собой болтовыми соединениями верхней части 9 и нижней части в виде разъемного кольца 10 с установленными на нем двумя нижними горизонтальными кронштейнами 11, разнесенными по окружности на прямой угол.

Жидкостный ракетный двигатель
с карданным подвесом



Фиг. 1



Фиг. 2

Рисунок 9 - Общий вид ЖРД с подвесом на шаровой пяте:

1- камера ЖРД; 2 – газовод; 3- турбонасосный агрегат; 4 – шаровой подвес; 5 – неподвижный опорный элемент (конус); 6 - конус, скреплённый с камерой; 22- силовые цилиндры; 24 – положение центра масс двигателя;

I – III – неподвижная ось кардана и II – IV - подвижная ось кардана (это оси стабилизации ракеты).

Напротив каждого кронштейна 11 в верхней части 9 подвижного конуса в вертикальных плоскостях 12 и 13, проходящих через ось камеры сгорания 14, в районе шарового подвеса 4 установлены верхние кронштейны 15. Кронштейны 11 и 15 соединены через шаровые шарниры раскосом 16, образуя тем самым совместно с подвижным конусом 6 как бы трехстержневую силовую ферму.

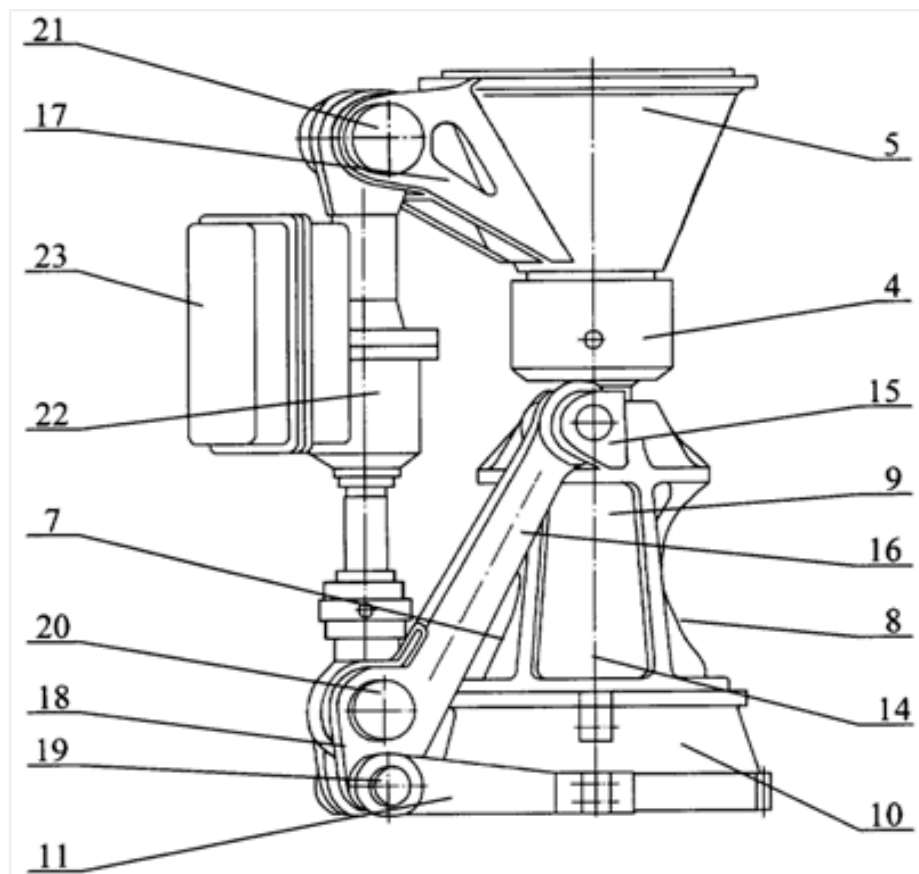
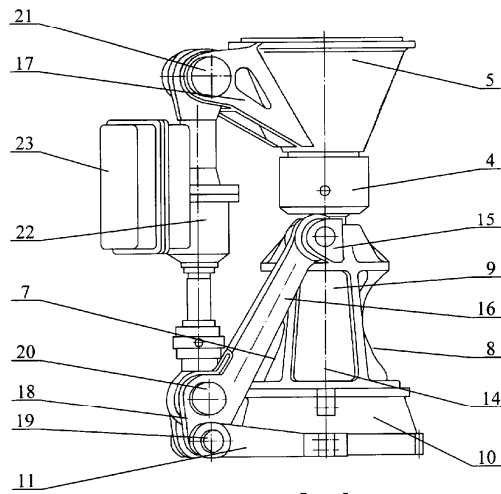


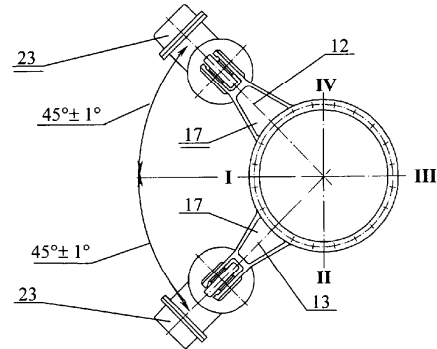
Рисунок 10 - Общий вид сборочной единицы карданного подвеса без камеры:
 4 – шаровой подвес; 5 – неподвижный опорный элемент, скреплённый с корпусом ракеты; 7, 8 – окна в корпусе подвижного конуса; 9, 10 – верхняя и нижняя части подвижного конуса; 11- нижние кронштейны; 14 – ось камеры; 15 – верхние кронштейны; 16 – раскос, соединяющий 11 и 15; 17 – кронштейны верхнего (неподвижного) конуса; 18 - вилки; 19 - оси шарниров; 20 и 21- шаровые шарниры; 22 – силовые цилиндры; 23 – рулевые машинки;

На конусе 5 в плоскостях качания установлены два кронштейна 17. На концах данных кронштейнов и на вилках 18 раскоса 15, расположенных непосредственно около шарнирных точек крепления 19 нижних кронштейнов 11 по плоскостям 12 и 13 закреплены, по их шарнирным точкам крепления в виде шаровых шарниров 20 и 21 силовые цилиндры 22 рулевых машин 23.

Жидкостный ракетный двигатель
с карданным подвесом



Фиг. 3



Фиг. 4

Рисунок 11 - Карданный подвес и вид на него сверху с угловой ориентацией рулевых машин относительно осей кардана (плоскостей стабилизации ракеты).

На рисунке 11 показано расположение рулевых машинок 23 по отношению к осям кардана I – III (неподвижная ось) и II – IV (подвижная ось). Причем рулевые машины установлены со стороны турбонасосного агрегата 3, то есть, в максимально возможном приближении к центру массы 24.

Такое расположение обоих силовых цилиндров позволяет снизить величину рабочего усилия и усилия торможения рулевых машин по

сравнению с известными выполнениями примерно в 1,3...1,4 раза и унифицировать эти рулевые машины. Кроме того, закрепление верхних точек крепления силовых цилиндров на неподвижном опорном конусе карданного подвеса позволяет уменьшить габариты двигателя в его верхней части, избежать дополнительных монтажных работ при установке двигателя на ракету и позволить производить контрольно-сдаточные испытания системы качания и всего двигателя независимо от ракеты.

В процессе работы ось камеры сгорания 14 (на рис. 11 это вертикальная ось) поворачивается вокруг каждой оси кардана на необходимый угол одновременно двумя рулевыми машинами 23. При одновременном повороте относительно двух плоскостей стабилизации ракеты мгновенная ось поворота качающейся части двигателя должна лежать в плоскости осей кардана, что обеспечивается программой управления рулевыми машинами. Постановка раскосов на подвижном опорном конусе улучшает схему передачи рабочих усилий цилиндров на головку камеры сгорания при увеличении жесткости системы и ее надежности.

1.5 Конструкция узла крепления ЖРД НК-33

НК-33 – однокамерный ЖРД с дожиганием генераторного газа был разработан в 1963...67 гг. и предназначался для первой ступени ракетно-космической системы Н1-Л3. Ниже приведены основные параметры двигателя [2]:

1. Тяга на земле, P	1510 кН
в пустоте, $P_{п}$	1656 кН
2. Удельный импульс на земле, $I_{у}$	2910 Н*с/кг
в пустоте, $I_{уп}$	3240 Н*с/кг
3. Компоненты топлива - кислород жидкий и керосин	
4. Расход топлива, m	512 кг/с
5. Массовое соотношение компонентов, k_m	2,55
6. Давление в камере, p_k	14,55 МПа
7. Давление на срезе сопла, p_a	0,049 МПа
8. Геометрическая степень расширения сопла, \bar{F}	28
9. Размеры камеры :	
диаметр камеры сгорания	430 мм
диаметр критики	281 мм
диаметр среза сопла	1498 мм
10. Максимальная продолжительность работы	365с.

На рисунке 12 показан общий вид камеры.



Рисунок 12 - Общий вид камеры ЖРД НК-33
(фотореалистичная модель камеры)

По типу это паяно-сварная камера с регенеративным охлаждением и дожиганием окислительного газогенераторного газа.

Окислитель – газообразный кислород с малым количеством продуктов сгорания керосина поступает по торообразному патрубку – газоводу.

Параметры окислителя перед форсунками: температура 565К, давление 16,7МПа.

Конструктивно камера состоит из ряда сборочных единиц (СЕ), каждая из которых отдельно изготавливается, проходит контроль и

технологические испытания, а затем при помощи сварки соединяется с другими СЕ. На смесительной головке камеры расположено силовое кольцо, к которому крепится рама двигателя. Через силовое кольцо и раму тяга передается на корпус ракеты.

Рама, установленная на головке ЖРД НК-33, показана на фотографии (рис. 13). ЖРД НК-33 с этой рамой использовался на ракете Н-1.



Рисунок 13 - Узел крепления ЖРД НК-33, представляющий собой раму, установленную на силовом кольце смесительной головки

Рама сварная и состоит из полых стержней, выполненных из стали 30ХГСА. Верхняя часть рамы из труб наружным диаметром 40 мм, внутренним – 30 мм образует квадрат со стороной 570 мм. По углам этого квадрата приварены цилиндрические опоры с отверстиями под крепёжные элементы, которые крепились к раме или шпангоуту летательного аппарата.

От каждой опоры идёт по два стержня-подкоса к четырём платам, которые служат для соединения с опорами двигателя. Длина подкосов – 530 мм, наружный диаметр – 60 мм, внутренний – 40 мм. Для восприятия всех нагрузок от двигателя на каждой плате имеются отверстия под штифт Ø14 мм и два отверстия под шпильки М18.

Соединение труб с платами и опорами производится через косынки–пластины, которые вставлены в прорези на концах труб и обварены.

2 Разработка численных моделей узлов крепления ЖРД

2.1 Численная модель узла крепления ЖРД НК-33

Построение численной модели узла крепления ЖРД состоит из нескольких этапов, главными из которых являются создание параметрической 3D-модели, кинематико-динамической, необходимая при наличии в системе подвижных узлов, в частности, качающейся камеры сгорания, а также прочностной модели, каждой из которых посвящён соответствующий раздел настоящего пособия. В целом, представленные модели открывают дорогу оптимизации конструкции узлов крепления ЖРД с последующей передачей на производство с применением САМ-технологий.

2.1.1 Основы параметризации 3D-моделей

2.1.1.1 Ассоциативность 3D-моделей и библиотеки готовых компонентов. Классификация параметров

В САПР под "ассоциативностью" обычно понимают такую взаимосвязь 2D-чертежа с 3D-моделью, в которой, при внесении изменений в модель, меняется и чертёж. В более широком смысле можно

говорить об ассоциативности деталей и сборок, когда при изменении деталей меняются связанные с ними сборки. Это справедливо и для САМ-систем среднего уровня, которые часто встраиваются в САД-пакеты, позволяя системе, при незначительных изменениях геометрии модели, самостоятельно корректировать результирующий код для ЧПУ.

Классифицировать "ассоциативность" можно по четырём основным направлениям:

1. По принципу работы

- а). Прямая
- б). Опосредованная

2. По направленности

- а). Однонаправленная (все размеры проставляются вручную)
- б). Двухнаправленная (размеры используются с модели)

3. По полноте

- а). Только измененная геометрия
- б). Численные параметры
- в). Геометрические взаимосвязи (перпендикулярность, касательность, равенство и др.)
- г). Обобщенные параметры (конструктивные элементы, свойства материала и др.)

4. По программной ориентации

- а). Внутри одного приложения
- б). С собственными и сторонними модулями, встроенными в программное приложение
- в). Со сторонними программами

Прямая ассоциативность наблюдается, когда при изменении одних объектов одновременно меняются и взаимосвязанные с ними. Когда для обновления модели необходимо совершить какие-то действия (например, нажать Rebuild Model, Update Parameter, повторно импортировать геометрию и т.п.), то речь идёт об опосредованной ассоциативности. Т.е., прямая ассоциативность отличается от опосредованной только тем, что в первом варианте программа сама "нажимает" на кнопку "Update".

Направленность означает возможность одностороннего или взаимного изменения ассоциативных объектов. Проще всего это демонстрируется на примере 2D-чертежей. Если чертёж меняется в зависимости от изменений 3D-модели, значит имеется ассоциативная связь между моделью и чертежом. Если при этом возможно вносить некоторые изменения на чертеже, и это служит сигналом к автоматическому изменению и модели, то ассоциативность является двунаправленной (в противном случае - ассоциативность однонаправленная). Следует заметить, что из наличия в CAD-пакетах возможности создания двунаправленной ассоциативности не следует, что всё, что они создадут будет таковым. Т.е. в Pro-Engineer, SolidWorks, Siemens NX, CATIA или КОМПАС вполне можно создать, как ассоциативный чертёж (одно- и двунаправленный), так и полностью автономный по отношению к модели. При этом, отсутствие возможности передачи каких-то параметров и изменений через ассоциативную связь, означает именно полное отсутствие. Однако относительно каких-то переменных параметров может быть прямая двунаправленная ассоциативность, а относительно других вообще может отсутствовать. Именно поэтому и введена классификация относительно того, что именно может изменяться через ассоциативную связь. Самый простой вариант – это передача геометрической информации модели. В этом случае нет необходимости в ручном режиме выполнять

операции импорта/экспорта. В случае же, когда передаваться будут различные параметры модели (например, допуски к размерным цепям для САМ-систем, технологические фичеры, массово-инерционные характеристики для САЕ-систем), то здесь и полнота будет уже достаточно большая. В то же время следует отметить, что в настоящее время добиться полной ассоциативности даже внутри одной программы не представляется возможным. Что же касается разных САПР, то здесь встает вопрос о том, какими параметрами можно обмениваться между программами и модулями и каким образом это происходит (XML, INI, API и т.д.).

Одним из основных инструментов для параметрического моделирования в современных САД-системах являются разнообразные библиотеки готовых компонентов. В них, в качестве компонентов могут выступать и 3D-детали, и под сборки. Некоторые САД-системы позволяют создавать библиотеки не только из уже полностью готовых компонентов, но и из различных элементов, таких как эскизы, блоки, группы операций (например, шпоночные пазы различной формы) и используются не столько при создании конечной сборки, сколько при создании конкретной детали. Общей чертой всех типов библиотек, является параметричность входящих в её состав моделей (рис. 14).

Среди лидеров по объему библиотек, поставляемых при покупке инженерного программного обеспечения, сейчас можно выделить такие САД-системы, как КОМПАС (особенно, библиотеки стандарта ГОСТ), T-FLEX CAD, Autodesk Inventor, SolidEdge, SolidWorks, Siemens NX.

Важным элементом в проектировании сложных технических систем является глубина параметризации модели, характеризующаяся количеством и типом параметров. Параметры модели можно

классифицировать по следующему типу – численные, геометрические, объектные и обобщенные. Также важным моментом является возможность их варьирования.

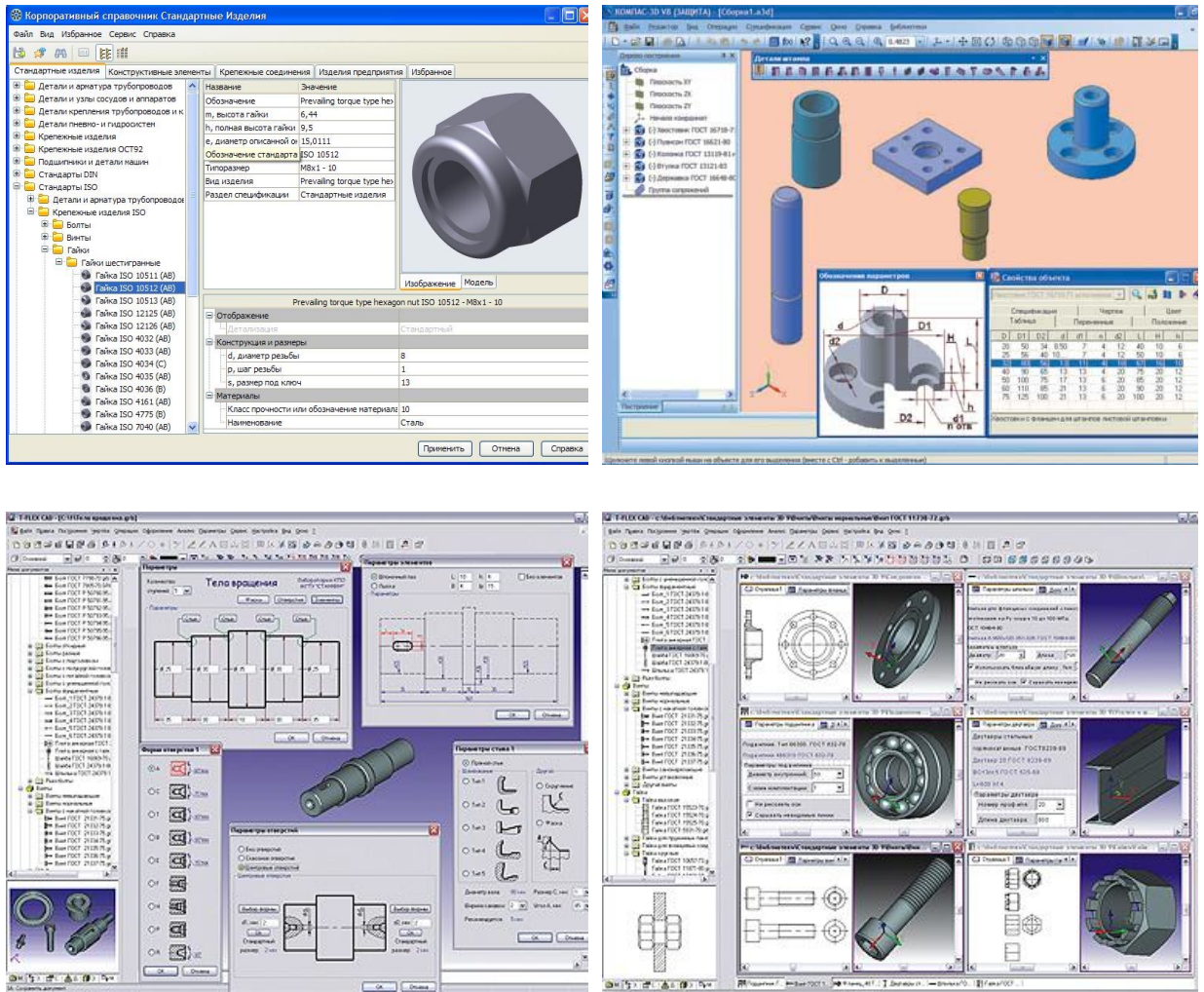


Рисунок 14 - Примеры библиотек готовых компонентов CAD-систем

Как известно из практики проектирования в CAD-системах, частью параметров можно управлять напрямую, а частью нельзя, т.к. они получаются на базе других параметров. Последние невозможно изменять непосредственно, хотя и возможно определить. В качестве примера можно привести треугольник, у которого заданы длины всех сторон. Тогда, длины сторон – это управляющие параметры, а углы – управляемые. При этом для указанного треугольника вполне возможно задать сторону и два угла,

как управляющие параметры - всё зависит от выбора проектировщика. Таким образом, управляющий параметр - это параметр или размер, который может изменяться пользователем, и сам влиять на другие параметры - управляемые. Управляемый параметр - это параметр, который вычисляется на базе других параметров.

Численные параметры подразделяются:

- а). Континуальные (непрерывные)
- б). Дискретные (например, количество отверстий в детали)
- в). Булевы

Известно, что большинство параметров является численными. При этом они делятся на постоянные и переменные численные параметры. Например, диаметр поршневого пальца. Это переменный параметр, но в текущей сборке, в конкретном месте он не будет изменяться при работе одной сборки - модели КШМ. Параметр может поменяться только при модификации объекта в другой - изменении геометрии КШМ или структурной схемы двигателя. В то же время, если попытаться описать в сборке работу КШМ, то ряд ее объектов будут менять своё положение. Это положение и является параметром, который может изменяться, без изменения самого сборочного объекта. Следовательно, численные параметры можно разделить ещё на постоянные (текущая геометрия элемента) и переменные (положение элементов в сборке).

Кроме численных параметров, могут быть геометрические. Речь идет о геометрических или кинематических граничных условиях, параллельности, перпендикулярности, концентричности и т.п. В большинстве САД-систем возможно ставить такие взаимосвязи исключительно в эскизах и сборках. В то же время, в системах с функцией

"Direct Modeling" есть возможность устанавливать подобные связи и в 3D-модели.

Таким образом, геометрические параметры объекта могут включать взаимосвязи эскиза, взаимосвязи сборки и взаимосвязи в 3D-модели. В то же время, сама геометрия может быть постоянной или переменной. Примером может служить клапанная пружина в процессе работы двигателя.

Геометрические параметры:

1. Постоянная геометрия (Constant Parameter)
2. Переменный параметр (Variable Parameter)
3. Переменная "податливая" геометрия (Variable/Soft Geom)

В первом случае геометрия в сборке (клапанная пружина) не претерпевает изменений при работе сборки (движении элементов ГРМ двигателя). Во втором случае, общий конструктив детали сохраняется, но при этом ряд параметров может быть зависимым от других элементов и параметров. В случае с клапанной пружинной – при работе ГРМ меняется её длина. В последнем случае геометрия объекта может сильно изменяться. В основном, третий вариант геометрических параметров необходим для описания объектов из податливых или гиперупругих материалов, таких как резина, или пластмасса, различных мембран и т.п.

Объектные параметры:

1. Подчиняются определённому закону (например, определение массива отверстий на базе эскиза)
2. Ссылаются на весь объект (деталь, грань, ребро, система кромок)

В первом случае САД-система включает заданную проектировщиком копию в те места модели, где определит наличие точки в эскизе, тем самым создавая массив элементов. При этом, количество точек и их положение на эскизе не важны, главное чтобы присутствовал сам эскиз (или объект, на который происходит привязка). Второй случай хорошо поясняется примером из практики использования популярного САД-пакета Pro-Engineer, когда средствами его инструментария можно задать автоматическое скругление кромок в местах пересечения булевых операций "Extrude" с объёмным телом (например, создание отверстий). Тогда, вне зависимости от конфигураций эскиза, тела и их взаимного положения, система постарается скруглить все элементы модели, подходящие под подобное определение.

Обобщённые параметры:

1. Конфигурации/исполнения
2. Наследственность

Последний классификационный тип включает всё то, что обычно плохо формализуется посредством числового и текстового описания. Например, в качестве обобщённого параметра ДВС можно задать схему газообмена, от которой будет зависеть целый ряд других параметров: форма камеры сгорания, конфигурация гильзы цилиндра, тип системы охлаждения, вид упрочняющей обработки др.

В таблице 1 представлена сводная информация по ориентировочным временным затратам для решения различных инженерных задач на базе параметрических 3D-моделей с разной глубиной параметризации. Несмотря на внушительное время, затрачиваемое проектировщиком на

создание качественной параметрической модели, этот процесс имеет смысл и несёт в себе несомненное преимущество.

Таблица 1 - Затраты времени на решение различных инженерных задач методом создания параметрических 3D-моделей с разной глубиной параметризации

Задача	Время, затрачиваемое на выполнение, мин.					Итого, мин.
	Создание эскиза	Задание взаимосвязей	Применение 3D-операций	Задание материала	Создание КД	
Создание подборки с параметризацией габаритных и посадочных размеров для дальнейшего включения в сборку более высокого уровня	15	5	5	-	-	25
Создание 3D-модели с параметрическим изменением массово-инерционных характеристик	15	5	5	15	-	40
Создание 3D-модели с геометрической и объектно-управляемой параметризацией с возможностью автоматизированного выпуска конструкторской документации	30	80	90	20	180	400

Согласно статистическим данным [7], на изменение параметров полностью параметризированной 3D-модели (см. задачу №3, табл. 1) идёт около 5 минут, при этом перестроение происходит в автоматическом режиме и длится от 15 до 90 минут на генерирование новой модели и выпуск САД-системой конструкторской документации.

Учитывая значительное время создания параметрических моделей возникает вопрос выбора целесообразного числа параметров, необходимых для описания модели и решающих поставленные перед проектировщиком задачи. В этой связи предлагается дополнить рассмотренную выше классификацию по глубине параметризации разделением моделей по количеству параметров, доступных для изменения:

1. Параметры для изменения не предусмотрены;
2. До 10-15 параметров;
3. 50-80 параметров;
4. До 200 параметров;
5. Более 300 параметров.

Другой вопрос заключается в том, что именно считать параметрами доступными для изменения. Не следует думать, что любую некубическую 3D-модель с количеством деталей 20-50 и количеством размеров более 300, можно считать верхним уровнем параметризации. Размер и параметр суть не одно и то же. В качестве изменяемых необходимо принимать "внешние параметры", которые управляют всей сборкой, а не общее количество внутренних размеров. В общих чертах, согласно предложенной классификации, ко второй группе относятся сборки до 10-20 относительно несложных деталей, к третьей - включающих 100-300 деталей; к четвёртой - сборки с количеством около 1000 компонентов; к последней - более 10000 деталей. Так как в сборках обычно присутствует лишь ограниченное число действительно сложных деталей (в процентном отношении), то эти пропорции сохраняются и для 3D-сборок с наличием сложных деталей. Следует отметить, что в данном случае количество параметров выбиралось упрощённо, методом простого подсчёта. Например, имеется 3D-модель

"Болт" у него существуют два основных изменяемых параметра, у ответной 3D-модели "Гайка" этих параметров тоже два. При связывании в общей сборке этих параметров, из четырех остается два, но всего в модели число внешних параметров принимается равным четырём. Это, так называемое, "полное количество параметров" в модели. Теперь подсчитывая только свободные параметры, оставшиеся после наложения в модели всех связей, общее количество независимых параметров резко сократится. Отсюда отношением количества внешних управляющих параметров сборки к количеству размеров или к количеству полных параметров модели можно определить степень необходимой в той или иной задачи параметризации. При этом необходимо учитывать, что нередко для достаточного описания модели требуется также включать в неё не только параметры, определяющие количество взаимосвязей, управляющих геометрией, но и "физические" параметры, указывающие на принцип работы механизма или изделия.

2.1.1.2 Принцип абстракции в параметрическом моделировании

Умение абстрагироваться и обобщать позволяет решать множество различных, в том числе и инженерных задач, поскольку любую из них возможно привести к набору некоторых типовых ситуаций. Так, создание параметрической 3D-модели ДВС является весьма сложным до тех пор, пока проектировщик не абстрагируется от частных деталей и не дойдёт до примитивов, лежащих в основе модели. Ведь сама суть геометрической модели - это та или иная степень упрощения исходного физического объекта. В данном случае, результат позволяет получить принцип абстракции, который сводится к тому, что она "разделяет способ использования функции и деталей её реализации в терминах более примитивных функций". Т.е., вместо детализированной 3D-геометрии

предлагается использовать её упрощённые аналоги. При этом рекомендуется разнести "взаимосвязи" и геометрию по разным уровням. Например, в программном пакете Pro-Engener, предлагается для создания подобных функциональных связей использовать поверхностную геометрию, а детали реализовывать в классическом твердотельном подходе на основе имеющейся поверхностной. Это связано с тем, что поверхностная геометрия не имеет объема и массы, она не участвует в булевых операциях как с твердыми телами, так и с поверхностями до тех пор пока проектировщиком не заданы соответствующие операции. Следовательно, привязки не могут потерять функционального значения вследствие удаления исходных объектов ссылки. Во всяком случае, это не так просто. Требуется отметить, что при создании параметрических моделей важно не столько то, как именно будет реализовываться абстракция, сколько то, что бы она вообще присутствовала в 3D-модели. Наиболее простым способом достижения этого является переложение абстракций, созданных для 2D-моделей на основе классификаций, конструктивных схем, ГОСТов, в основу проектируемой 3D-модели.

2.1.1.3 Принцип наследования в параметрическом моделировании

Любое 3D-моделирование с историей ("history-based modeling") в своей основе имеет отношение "родитель-потомок". Однако здесь существует ряд нюансов. Так, необходимо помнить, что "родителем" в 3D-моделировании может выступать любой объект, а "потомком" не может быть базовая (исходная) система координат. Что касается точки центра основной системы координат, трёх координатных осей и базовых плоскостей, то следует отметить, некоторые системы не имеют базовых осей, а некоторые "считают", что базовые плоскости и точка центра

основной системы координат являются "потомками" базовой системы координат.

Если объект является "родителем", то количество его "потомков" должно быть отличным от нуля. Соответственно, если объект является "потомком", то он должен иметь не менее одного "родителя" (прямого). При этом, "родителей" может быть сколь угодно, вплоть до базовой системы координат. Отсюда можно сделать вывод, что один и тот же объект может выступать и "родителем", и "потомком" одновременно. При этом, он может породить множество ветвей "потомков", как напрямую самостоятельно, так и опосредовано - через "потомков". Так, в процессе проектирования образуется "генеалогическое древо" 3D-модели.

Одним из важных свойств наследственных отношений в модели является правило, что "потомок" не может быть "родителем" своего "родителя". Несмотря на то, что некоторые САД-пакеты и позволяют пользователю обойти это правило, записав параметрическое уравнение, расстановкой ссылки более ранних размеров на более поздние, но обычно это приводит к тому, что программный структурный верификатор перестает воспринимать такую 3D-модель завершённой при любом количестве регенераций, что не позволяет закончить её создание. Поэтому мощность и удобство инструментария наложения и отслеживания взаимосвязей и отношений "родитель-потомок", во многом определяет то, насколько сложный объект возможно параметризовать в той или иной САД-системе. Принцип наследования в САД-системах предусматривает следующую модель поведения: в большинстве САД-пакетов можно сохранить текущий файл со всеми его настройками, системами единиц, созданными параметрами, чертёжными форматами и символами (в случае 2D-чертежа) и созданной 3D-геометрией (в случае файла модели) в

качестве шаблона. Далее этот шаблон возможно использовать в последующих работах. Т.е., для объектов, чье концептуальное представление известно, создаются подобные шаблоны, которые используются при начале новых работ. При этом, внешние ссылки организованы между разными концептами, а внутри модели всё ссылается на текущий концепт. В этом и будет заключаться принцип наследования в параметрическом моделировании.

2.1.1.4 Принцип инкапсуляции в параметрическом моделировании

Принцип инкапсуляции ("чёрного ящика") заключается в выделении в отдельные блоки основного содержания путём помещения всего второстепенного в некую условную капсулу - "чёрный ящик". Блоки, кроме описания функционала, т.е. геометрии, содержат точки входа и выхода, каждая из которых имеет свои параметры, которые могут быть разного типа. Метод основывается на том, что исходные данные подаются на вход блока, а на его выходе получаем некие результаты, являющиеся, одновременно, исходными данными для другого блока или блоков, которые подаются на его вход. Далее цикл может повторяться n-ое число раз. Таким образом, реализуется линейная структура. Однако она не всегда может удовлетворить потребности проектировщика. Поэтому, блоки должны согласовываться так, чтобы не было ни недостающих входных параметров, ни лишних выходных. Важно отметить, что при этом должен согласовываться и тип информации, следующей от входа к выходу блока. Для решения этой проблемы часто бывает необходимо создавать дополнительный блок - "переходник" ("преобразователь"). При грамотно построенной подобной схеме можно использовать принцип инкапсуляции на каждом блоке, так как в этом случае не имеет значения, что находится внутри любого из блоков. Главное требование - что бы он исправно

функционировал - т. е. принимал нужные исходные данные и выдавал ожидаемые результаты. Основным преимуществом принципа инкапсуляции является то, что в модели можно легко заменить один блок другим с подходящей спецификацией ("спецификация" в данном случае - это описание функционала и входных/выходных параметров) без потери работоспособности модели в целом.

На рисунке 15 показан схематический чертёж рамы НК-33 с обозначениями основных элементов, которые используются в расчете. В табл. 1 приведены численные значения этих элементов для НК-33.

Используя данные таблицы 2 можно выполнять расчёт конструкции рамы при различных размерах. Сравнивая варианты рамы между собой, можно подобрать вариант, наиболее отвечающий задачам снижения напряжений в конструкции, уменьшения веса или снижения величины деформации точек крепления.

Таблица 2 - Значения размеров рамы НК-33

№ п/п	Параметр	Значение, мм	№ п/п	Параметр	Значение, мм
1	A	550	16	L	90
2	B	480	17	M	20
3	C	450	18	N	235
4	D	595	19	P	180
5	E	550	20	Q	96
6	F1	60	21	R	10
7	F2	40	22	S	6
8	F3	38	23	T	172
9	F4	20	24	U	8
10	G	55	25	V	60
11	H	157,5	26	W1	50
12	I1	20	27	W2	68
13	I2	45	28	P _{тяги}	1470 кН
14	J	67,5	29	-	-
15	K	100	30	-	-

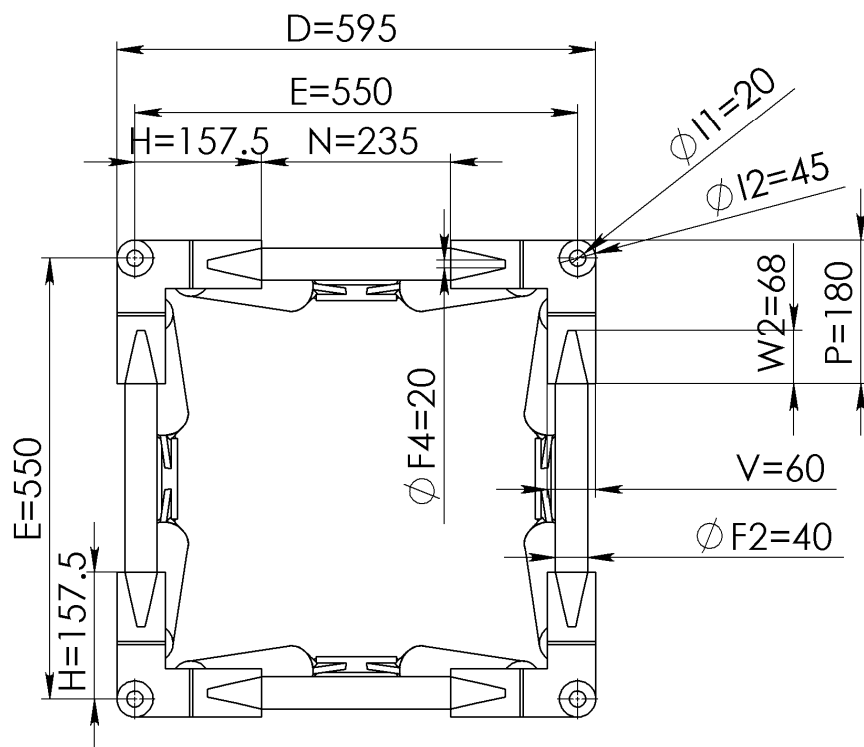
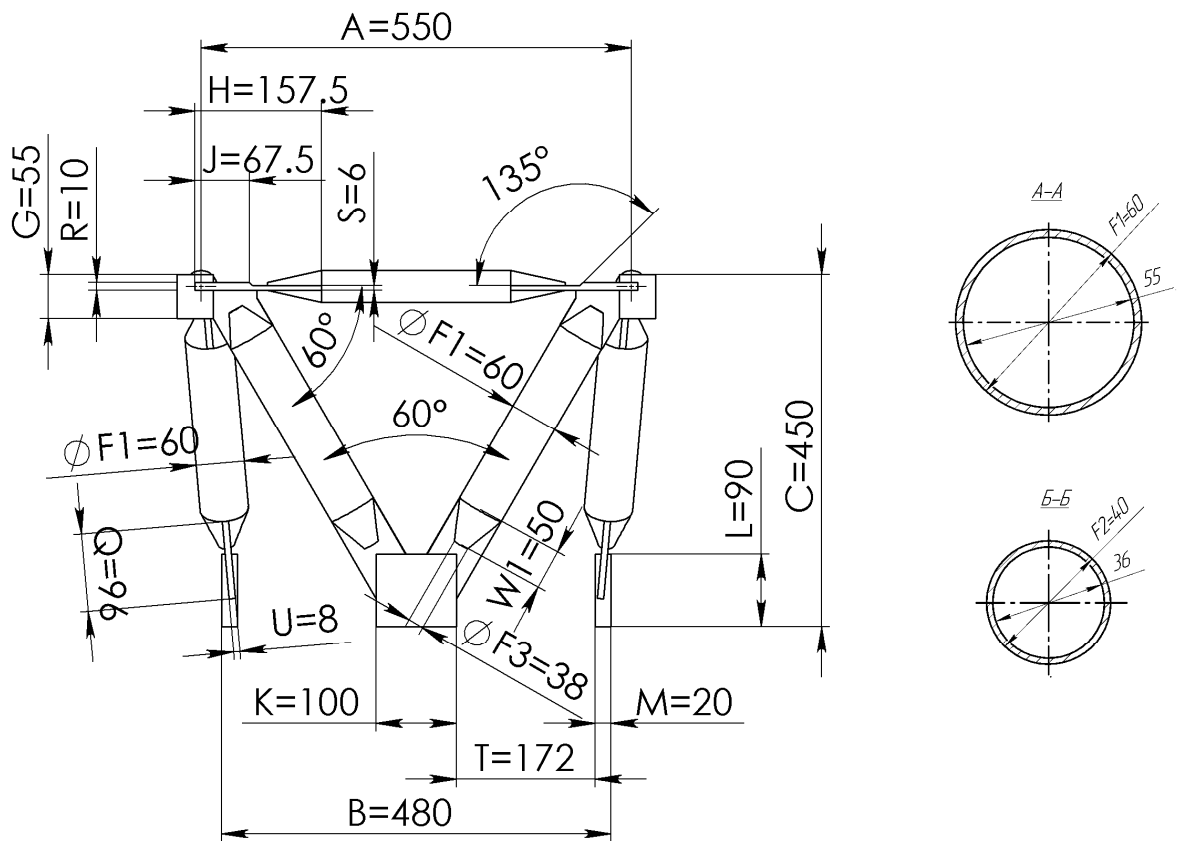


Рисунок 15 - Схематический чертеж рамы НК-33

2.2 Построение объёмной модели

Для построения объёмной модели можно использовать любой пакет 3D-моделирования, например, NX, SolidWorks, SolidEdge, КОМПАС и другие. Внешний вид модели показан на рисунках 16 и 17. В данной работе модель строилась с использованием пакета SolidWorks.

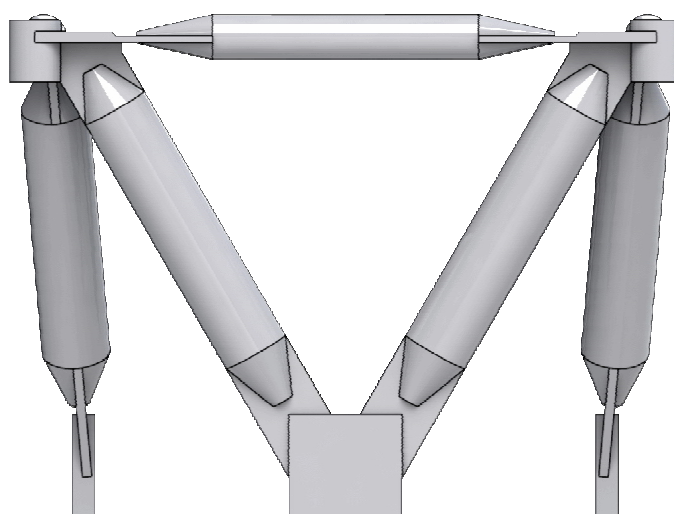


Рисунок 16 - Фронтальный вид рамы

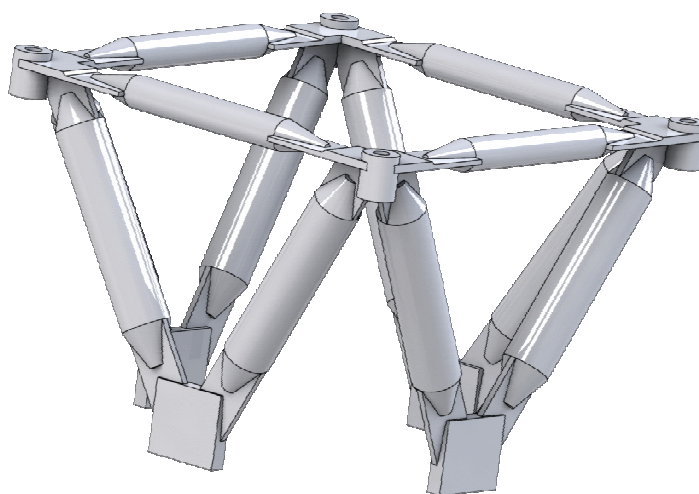










Рисунок 17 - Общий вид рамы

Модель имеет зеркальную симметрию относительно вертикальных плоскостей, проходящих через середины верхних стержней, поэтому для её построения достаточно использовать четверть рамы, как показано на рисунке 18, а затем создать её зеркальные отражения, используя инструмент . Для построения самой геометрии рамы достаточно использовать операции "Вытянутая бобышка/основание" , создающая объёмную геометрию за счёт вытягивания исходного эскиза вдоль направляющей, "Повёрнутая бобышка/основание" , создающая объёмную геометрию за счёт поворота исходного сечения относительно оси, а также "Вытянутый вырез"  для создания отверстий. По умолчанию для создания эскизов доступны плоскости  XY (спереди), XZ (сверху), YZ (справа), связанные с общей системой координат . Если требуется создать эскиз в другой плоскости, её нужно задать, используя инструмент "Справочная геометрия - Плоскость" . Подробнее о создании объёмных моделей смотри [1].




При создании модели основное внимание следует уделять сопряжениям между элементами, чтобы избежать появления лишних кромок и поверхностей, особенно небольшого размера, поскольку это приведёт к созданию концентраторов напряжений в конечно-элементной модели.

Массы и моменты инерции детали можно узнать с помощью инструмента "Массовые характеристики" .

2.3 Проведение расчёта

Расчёт созданной модели может быть произведён в любом конечно-элементном пакете, например, ANSYS, NASTRAN и т.д. В данной работе для расчёта использовался модуль ПО ANSYS WorkBench.

Модель импортируется в ПО ANSYS в формате Parasolid, позволяющем точно передать геометрию рамы. Для расчёта достаточно четверти рамы. Модель разбивается на конечные элементы Mechanical Tetrahedrons (тетрагональная сетка для расчёта конструкционной геометрии). Размеры подбираются вручную. Начать следует с Coarse (самая грубая сетка) и затем, если будет возможность, улучшить сетку. В качестве материала выбирается Structural Steel (Конструкционная сталь: Модуль упругости $E (EX) = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu (PRXY) = 0,33$, плотность $\rho (DENS) = 7800$ кг/м³).

В качестве граничных условий (рис. 19) используются жёсткие заделки (Fixed Support) A, B, C, D, E, F ; распределённые нагрузки (Pressure) G, H, I, J ; ограничения перемещений (Displacement) K, L, M, N , которые выбраны из условий работы рамы. Жёсткие заделки A, B, C, D, E, F представляют собой закрепления по всем шести степеням свободы нижних пластин вдоль горизонтальных плоскостей.

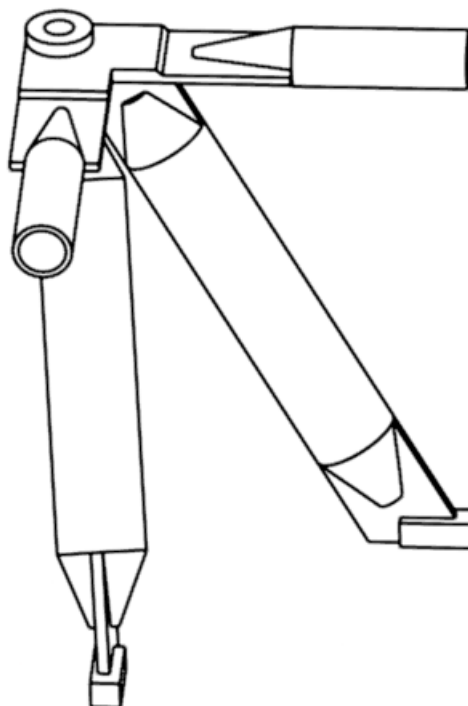


Рисунок 18 - Четверть рамы

Распределённые нагрузки G, H, I, J моделируют собой усилия от тяги двигателя. При этом усилие в 367500 делится на площадь, к которой приложена нагрузка. Такое приложение является более реалистичным, чем приложение вектора силы в одном узле, что могло бы создать в этом месте концентрацию напряжений. Ограничения перемещений K, L, M, N обеспечивают перемещение верхних площадок закреплений в строго вертикальном направлении, что также обусловлено, конструкцией рамы (в этом месте она крепится к массивной детали двигателя).

Расчёт выполняется в статической постановке (Nonlinear Effects: No или Small Displacement) без учёта нелинейности, вследствие малости деформаций конструкции. Для расчёта используется команда Solve ⚡. Подробнее о проведении прочностных и динамических расчётов с использованием готовой объёмной модели смотрите [2].

Итогом расчёта выступает диаграмма распределения эквивалентных напряжений по объёму конструкции (рис. 20).

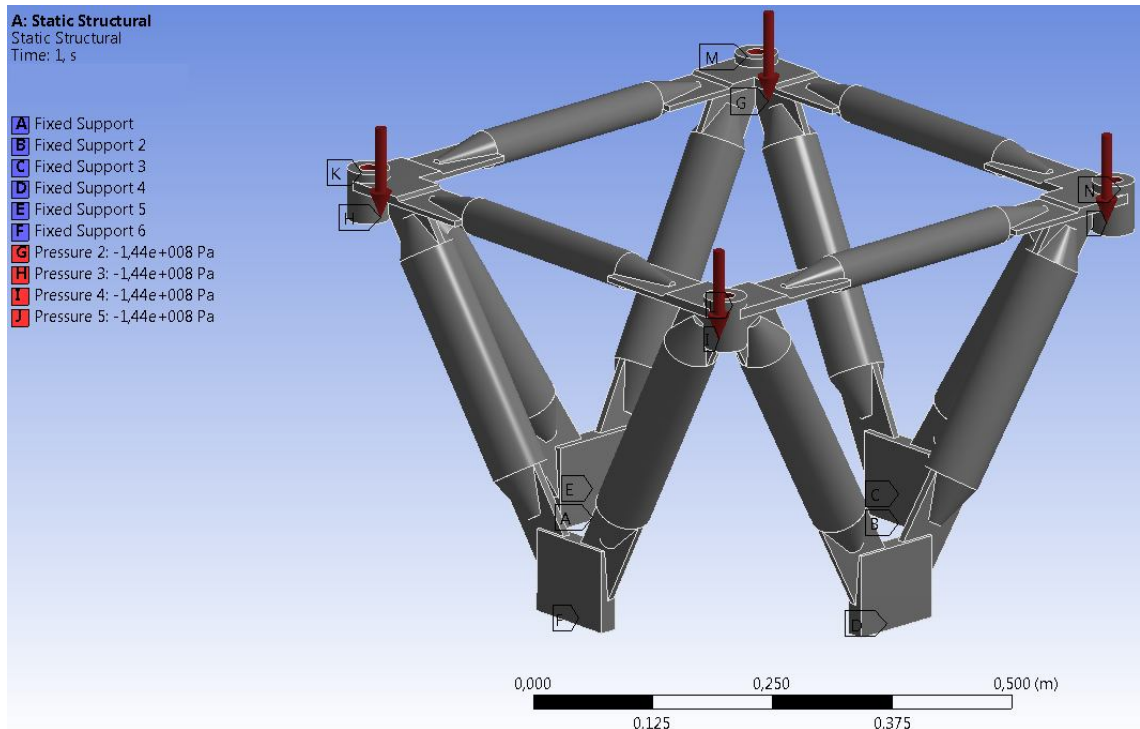


Рисунок 19 - Задание граничных условий

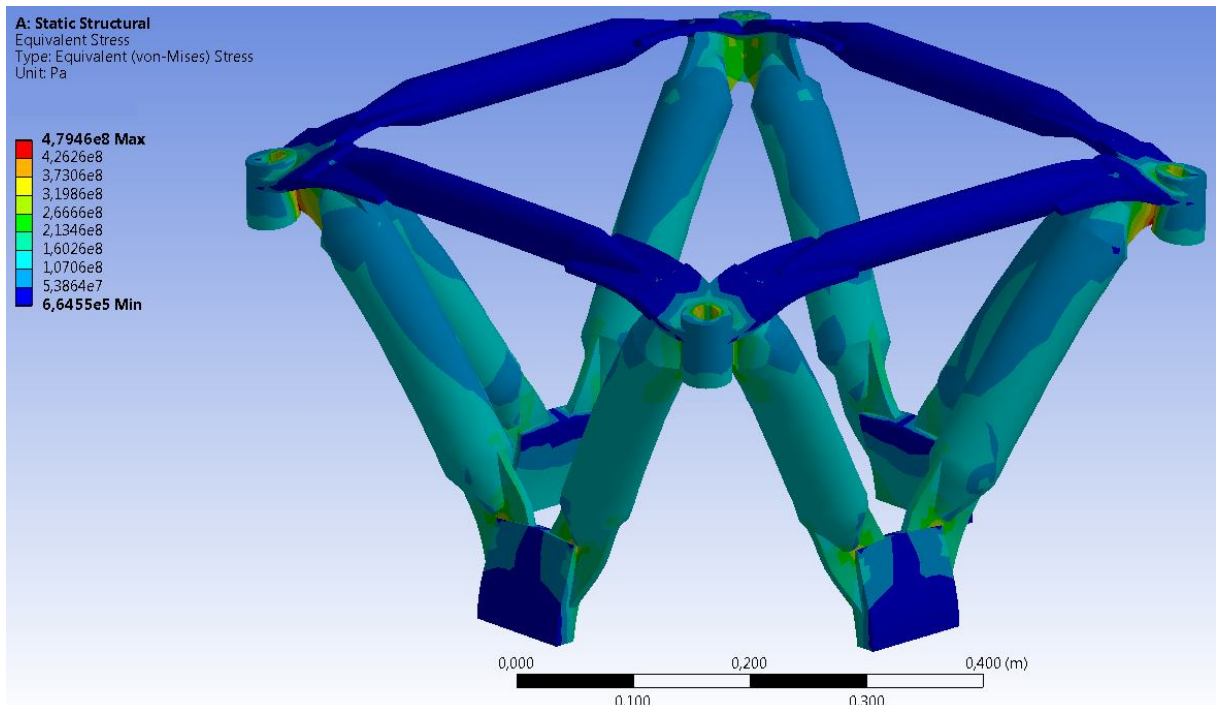


Рисунок 20 - Распределение эквивалентных напряжений по конструкции (Па)

На диаграмме (рис. 20) хорошо виден характер деформации рамы. Используя данную диаграмму, можно найти минимальные и максимальные значения напряжений в горизонтальных и наклонных стержнях конструкции, чтобы использовать их для расчёта устойчивости стержней по классическим формулам теории упругости.

3 Разработка модели возможного подвижного крепления ЖРД НК-33

Подвижность камеры позволяет управлять вектором тяги в полете, но при этом значительно усложняется конструкция. Для управления ракетой по тангажу и рысканью необходимо обеспечить качание двигателя в двух плоскостях. Если крепление расположено на головке камеры, то поворот двигателя в двух взаимно перпендикулярных плоскостях можно осуществить, используя шаровую пяту или универсальный шарнир (кардан). Возможно сочетание этих устройств, в котором тяга передается через шаровую пяту, а подвес двигателя сделан через универсальный шарнир. В этом случае подшипники шарнира разгружены.

Конструкция с шаровой пятой позволяет получить более компактное подвижное крепление, однако в этом случае имеет место трение скольжения по сферической поверхности. При применении универсального шарнира оси кардана обычно снабжают подшипниками качения, что позволяет уменьшить трение в опоре.

Была проработана конструкция подвижного крепления ЖРД НК-33 с универсальным шарниром.

Конструкция подвижного крепления должна передавать большое усилие (150 т), обеспечивать малое трение в шарнирах и иметь малую массу. В работе представлена возможная конструкция подвижного подвеса без оптимизации по всем этим параметрам. Ставилась задача определить возможность применения такой опоры и её геометрические характеристики.

3.1 Конструкция подвижного крепления

Для того чтобы установить узел крепления на силовое кольцо головки, предлагается использовать раму ЖРД НК-33. Кардан (крестовина) соединяется с рамой через подшипники качения. В связи с большой радиальной нагрузкой возникает необходимость применения роликовых подшипников. Поскольку кардан, образующий ось подшипников, при действии нагрузки деформируется, приходится применять бочкообразные роликовые самоустанавливающиеся подшипники.

Как видно из рисунка 21, исходная рама претерпела значительные изменения: рама разомкнута в направлении перпендикулярном оси подшипников, что позволяет опустить корпуса подшипников и снизить их массу; связь стержней рамы в осевом направлении подшипников также опущена, что обеспечивает выход вала за габаритные размеры подвеса.

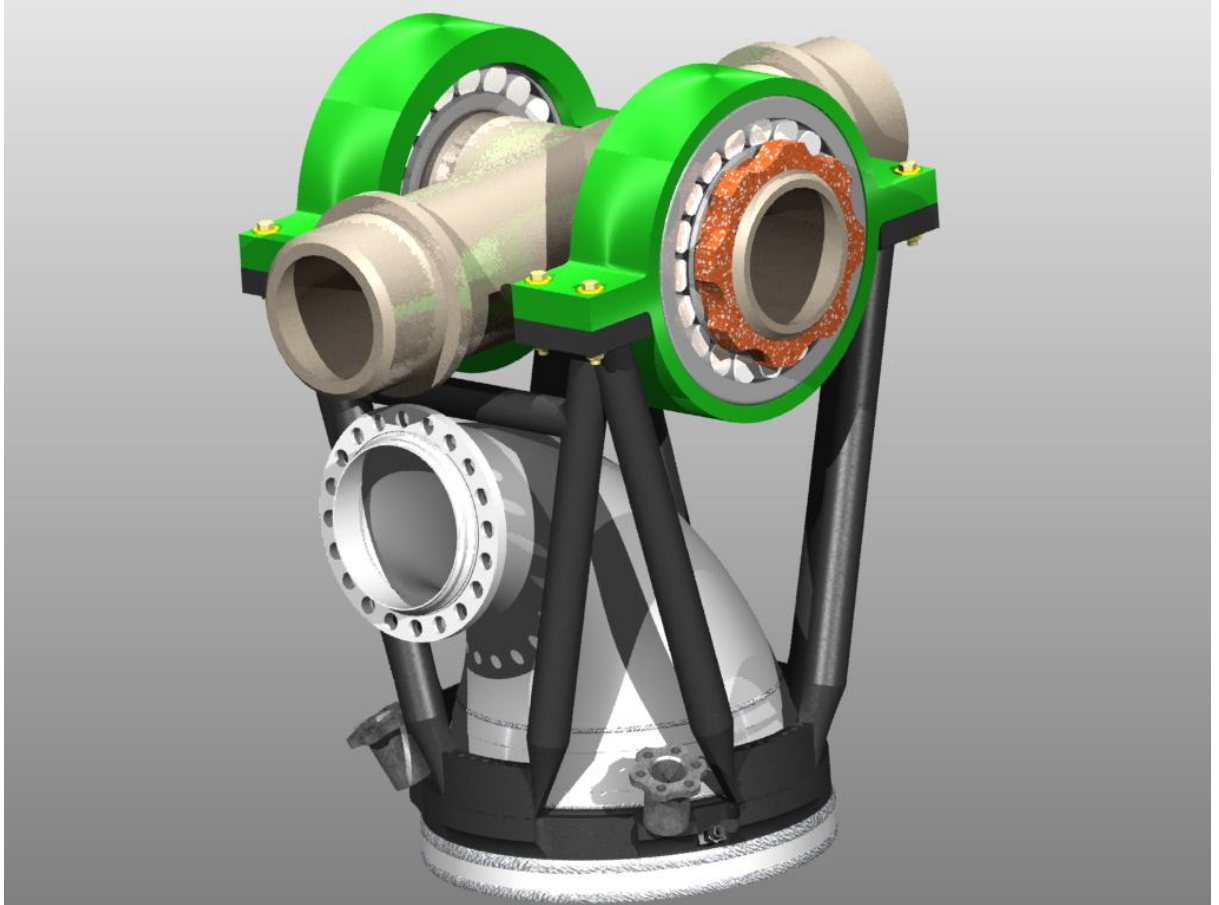


Рисунок 21 - Конструкция подвижного крепления ЖРД НК-33
на основе универсального шарнира (кардана)

Определённые трудности представлял подбор подшипника в соответствии с действующими стандартами. На одной оси кардана установлено по два подшипника, поэтому значение грузоподъемности для каждого из них должно быть в диапазоне 750 – 800кН (75000-80000 кгс) [5]. С учетом того, что подшипник должен быть роликовым, радиально-упорным (чтобы обеспечить поворот узла и закрепить его в осевом направлении), выбран подшипник по ГОСТ 5721-57 тип 3540 (рис. 22).

Грузоподъемность подшипника составляет 935 кН;

наружный диаметр $D = 360$ мм;

внутренний диаметр $d = 200$ мм;

ширина подшипника $B = 98$ мм;

масса подшипника $G = 45$ кг.

В карданной подвеске используется таких подшипников 4, которые надо установить на крестовину.

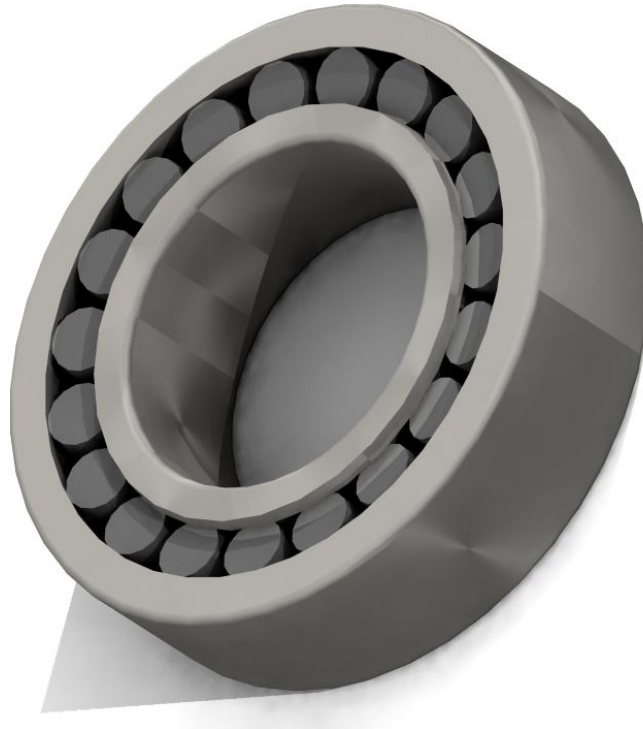


Рисунок 22 - Объемная модель выбранного по ГОСТу подшипника

Подшипники по наружным кольцам устанавливаются в цилиндрические корпуса подшипников, которые с помощью крепежных болтов устанавливаются на подвижной раме (закреплённой на двигателе) и неподвижной раме (связанной с ракетным блоком). Рамы соединяются между собой с помощью кардана (крестовины) через подшипники.

Конструкция узла подшипника, осевое закрепление колец подшипников и крепление корпуса подшипников к раме показано на рисунках 23, 24.

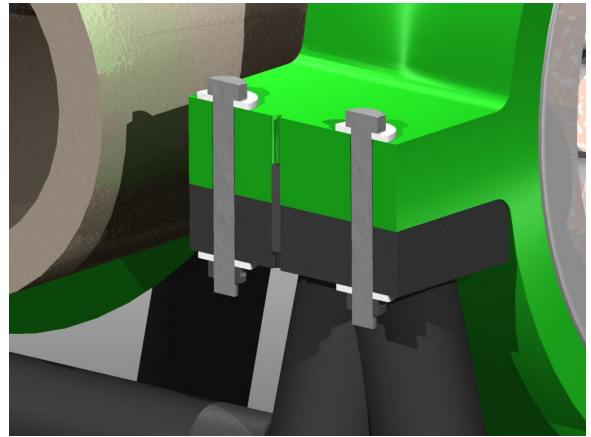


Рисунок 23 - Крепление наружной обоймы подшипник

Как видно, недостатком рассматриваемого варианта подвески является значительная масса. Причем основная составляющая веса подвески составляют подшипники.

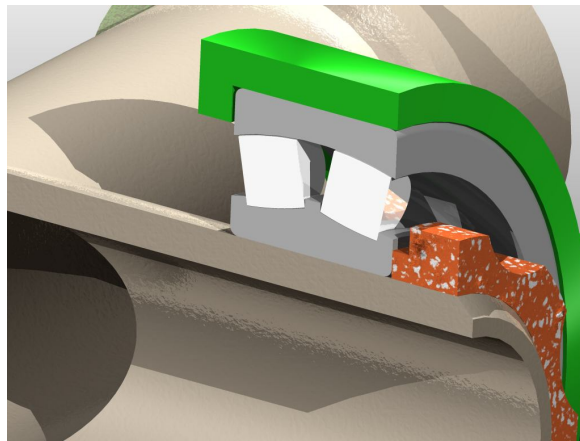


Рисунок 24 - Крепление подшипника на кардане

В ГОСТе представлены подшипники таких размеров для общего машиностроения, когда не предъявляются требования по минимальным массе и габаритам. Поэтому в данной конструкции целесообразно использовать специальные подшипники, например такие, как на двигателе РД-170.

В случае применения специальных подшипников, имеющих меньшие габариты и массу, а также оптимизации крепления подвески к смесительной головке можно значительно уменьшить габариты и массу

узла крепления двигателя (примерно в 1,5...2 раза). В таком случае такая подвеска может конкурировать по массе с шаровой пятой.

Выбор схемы конструкции подвески во многом определяется компоновкой конструкций самого ЖРД и двигательного отсека ракеты.

3.2 Проверка необходимой подвижности камеры средствами CAD-пакета ADAMS

Проверить возможные движения камеры с разработанным креплением можно, используя пакет программ ADAMS, предназначенный для кинематико-динамического анализа механических систем.

Первым этапом для создания аналитической сессии является импортирование файла объёмной модели в расчётную среду. Для этого в инструментарии пакета существует отдельный раздел команд - **Import**, предназначенный для перевода файлов с другими расширениями, так называемых «нейтральных файлов», в которых могут сохраняться данные разные программы, в бинарный формат. Процедура перевода различается, в зависимости от типа файлов, которые нужно преобразовать. Основные этапы: нажать *Import...* - выбрать файл для перевода – ввести имя модели в ADAMS, в которую вставляется файл – ввести дополнительные параметры – нажать *OK*. Импорт геометрии: STEP, IGES, DXF, DWS, Warefront, Stereolithography, Parasolid. Причем построение геометрии внутри ADAMS ведется по стандартам Parasolid.

ADAMS поддерживает для импорта файлы со следующими расширениями:

*.adm, *.req, *.gra, *.res, *.cmd, *.dac, *.xmt_txt, *.xmt_bin, *.stp, *.igs, *.dxf, *.dwg, *.obj, *.stl, *.slp, *.shp (еще, возможно, *.step).

*.adm – ADAMS/Solver Dataset – это файлы результатов расчета, сохраненные ADAMS/Solver на собственном программном языке. Для импорта этих данных необходимо создать новую модель, куда они будут помещены. При импорте создается полноправная модель, согласно описанию в Dataset (название файлов *.adm). Экспорт моделей, как ADAMS/Solver dataset – это удобный метод для передачи модели с одной компьютерной платформы на другую. При экспорте модели как ADAMS/Solver Dataset, ADAMS/View сохраняет имена из Database, записывая их как комментарии в ADAMS/Solver Dataset. Это позволяет импортировать Dataset позже, сохраняя оригинальные имена Database.

При импорте файла требуется указать, каким способом описывать имеющуюся в модели геометрию:

Use parasolid As is

Вся геометрия, которая без ошибок описывается языком Parasolid, записывается в этом формате, в то время как специфические тела (цилиндры, оболочки, пружины) записываются на языке ADAMS/View. Таким образом, создается командный файл со специфическими телами и файл с геометрией в формате Parasolid, на который командный файл ссылается.

Use parasolid Full

Вся геометрия записывается в формате Parasolid, в том числе геометрические примитивы, такие как цилиндр и оболочки. Однако многие тела, которые не могут быть описаны так, исключаются из модели. Например, пружины, силы и динамические схемы.

*.cmd – ADAMS/View Command File – это командный файл ADAMS. При его импорте ADAMS выполняет записанные в нем команды, например,

команды построения модели. Преимущество – минимальный размер (всего несколько килобайт) и текстовый формат (можно изменять в текстовом редакторе). Недостаток – при чтении могут возникать ошибки. После импортирования деталь появляется в главном окне. В файле содержатся: комментарии, описания сил, деталей и соединений; возможны системные команды и имена файлов. Каждая команда должна начинаться с новой строки.

Кроме того, при импорте следует указать ADAMS, как поступать с ошибками:

Ignore command – инструкция пропускать строку, в которой найдена ошибка и продолжать выполнять команды со следующей строки. Файл загрузится, однако результаты могут оказаться неверными.

Continue the command file execution – инструкция ADAMS продолжать обработку строки, выведя ее вам для ручного исправления. Вы можете подправить эту строку или любые другие в этом файле и продолжить импортирование.

Cancel the command file execution and abort file – инструкция ADAMS немедленно закрыть все командные файлы при малейшем признаке ошибки.

*.req, *.gra, *.res – ADAMS/Solver Analysis – это файлы ADAMS/Solver, в которых отражена какая-либо сторона одного расчета.

*.req – ADAMS Request File – содержит данные о перемещениях, скоростях, ускорениях и силах. При желании можно добавить информацию о давлении, работе, энергии, импульсе и других, полученных в течение одного расчета.

*.gra – ADAMS Graphics File – содержит графики одного расчета.

*.res – ADAMS Results File – в этом файле содержатся значения всех переменных. Однако при работе с ADAMS/View такой файл не создается.

Все импортированные таким способом результаты не требуют создания новой модели и не отображаются на экране. Вставляется новый анализ, который можно просмотреть в ADAMS/PostProcessor. При этом импортируются все три (или два для ADAMS/View) файла сразу. Нельзя вставить их по отдельности, если не использовать специальные методы. ADAMS, как правило, всегда сохраняет предыдущий расчет в самой Database (*.bin). Поэтому иногда она такая большая.

Test Data – этот файл не имеет фиксированного расширения. В нем хранятся результаты натуральных испытаний (эксперимента). Может только импортироваться. Идеально подходит обычный текстовый файл, в котором имеется один или несколько столбцов цифр. Туда могут входить, кроме того:

- а) ручные расчеты;
- б) расчеты, выполненные на другом программном обеспечении;
- в) расчеты, выполненные в предыдущих сессиях в ADAMS.

При импорте *Test Data* можно сравнить результаты с расчетом в ADAMS. При этом необходимо использовать следующие способы:

I Create Measures – добавление данных в виде графика датчика. Вы указываете только один столбец, который воспринимается, как ось X. Все остальные автоматически определяются по оси Y и отображаются как несколько графиков на одном поле.

II Create Splines – добавление данных в виде сплайна. Вы вводите номер столбца, который будет восприниматься как X во всех создаваемых

сплайнах (по одному на столбец). Столбцы нумеруются слева направо (1,2,3...).

Задайте *Unit* (Размерность), чтобы ADAMS мог опознать ваши данные и использовать. Например, если указать в *Unit* – «*Length*», то ADAMS будет автоматически их пересчитывать при переходе, скажем, от миллиметров к метрам. Если вам не нужна такая опция, используйте графу «*no_unit*». Пусть график будет безразмерным.

*.shl – Shell. Импортирует оболочечную геометрию, чтобы сделать более наглядную анимацию. При этом вы указываете *Reference Marker*, к которому крепится оболочка и вместе с которым она движется. Оболочечная модель не имеет массы и служит лишь для визуального отображения.

На основе представленных выше инструкций, разработанная конструкция крепления камеры ЖРД НК-33 была импортирована в пакет ADAMS. Далее, согласно методике создания численной модели камеры ЖРД, требуется задать массу деталей или характеристики конструкционных материалов, чтобы определить, в свою очередь, массово-инерционные характеристики всей модели. Кроме того, необходимо задать граничные условия для определения взаимного положения и перемещения деталей модели. Для этих целей требуется воспользоваться следующими разделами инструментальной панели ADAMS.

Меню Edit

Позволяет редактировать отдельные элементы модели. Необходимо использовать в дополнение к меню *Edit* другие специальные инструменты.

Modify...

Позволяет изменять параметры выбранной детали в специальном окне. Если ни один элемент не выбран, то выводится список всех элементов, присутствующих в вашей модели, давая возможность выбрать нужный.

Rename...

Позволяет изменить имя и, главное, принадлежность выбранной детали. Изменение принадлежности возможно, так как в окне указывается полное имя детали, начиная от имени модели, которой принадлежит деталь. Позволяет изменять и имя модели. Когда вы создаете объект в ADAMS/View, тот автоматически получает имя. Оно состоит из типа объекта и уникального ID. Например, *JOINT_1* (Шарнир_1). Полное имя включает еще и путь к объекту, оно всегда начинается с точки. Нельзя создать две части с одинаковыми именами в одной модели, но это вполне допустимо в разных моделях.

Кроме этого, можно отображать любой из этих типов имени для объектов (ID, Short, Full). Самый короткий – ID – это номер, под которым этот объект значится в *DataSet* для ADAMS/Solver.

Appearance...

Позволяет изменять видимость элемента (невидимый, полупрозрачный, полностью видимый). Действует как на отдельный объект, так и на группу объектов. Здесь же можно установить отображение каркасности элемента. Например, всегда отображать каркасно или всегда объемно. Можно напрямую менять прозрачность с помощью ползунка. Невидимые объекты можно найти с помощью Database Navigator из меню *Setting...*, а значит через команды *Modify...* и *Appearance...*, если нажать их, не выбирая предварительно деталь.

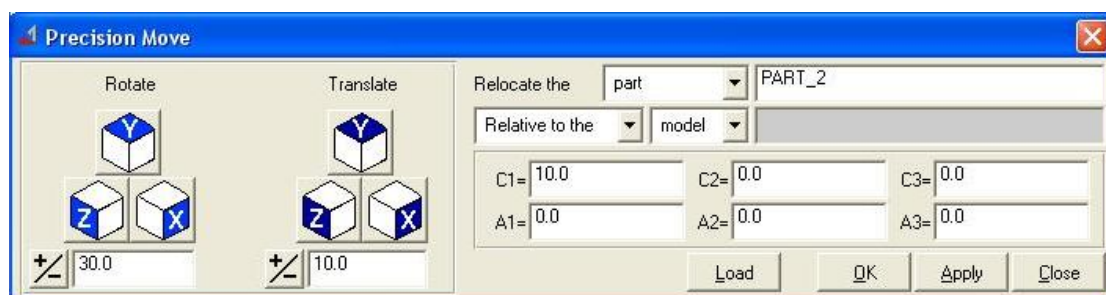
Copy

Копировать выделенный элемент или группу элементов. Если ни один элемент не выделен, то в появившемся списке можно будет выбрать необходимый. Если скопированные элементы имеют стандартное имя *Part_n*, то создается часть *Part_{n+1}*. Если вы переименовали деталь, то созданная деталь получит имя *Имя_1*, где «Имя» - название детали.

Delete

Удаляет выделенный элемент или группу элементов.

Move...



Позволяет поворачивать и перемещать деталь на рабочем поле относительно других деталей. Панель Precision Move делится на четыре основные части:

Rotate (Вращение), позволяет поворачивать детали вокруг определенных осей, подписанных на кнопках (X, Y, Z). На рисунке – это угловой шаг в выбранных для модели единицах (в данном случае, градусы).

Translate (Перемещение), позволяет перемещать детали по трем осям (X, Y, Z). Знак «±» меняет знак шага.

Настройки. *Relocate the* (Переместить...), показывает ADAMS, что вы хотите перемещать: маркер, часть, деформируемое тело, точку с массой,

геометрию, соединение, силу, группу или иное. В поле справа находится имя того, что ADAMS будет перемещать по вашей команде.

Relative to (Относительно), показывает, в какой системе координат будет происходить перемещение. По умолчанию, выбрана «*модель*», т. е. перемещение происходит относительно общих для всей модели координат. Используя эту функцию для поворотов деталей вокруг их осей, не забудьте совместить их с общим началом координат.

Кроме этого, доступны для выбора: часть, маркер, экран (т. е. поворот относительно текущей плоскости экрана), вид, другое (под другим понимается все, что угодно, вплоть до узла рабочей сетки или вектора гравитации).

About the (вместо *Relative to*), позволяет изменять не ориентацию тел, а поворачивать их относительно выбранного объекта. Например, используя команду *Relative to* для поворота маркера, вы будете поворачивать его на месте (без изменения положения), т. е. только изменяя ориентацию. Команда *About the* вызовет вращение маркера вместе с изменением ориентации.

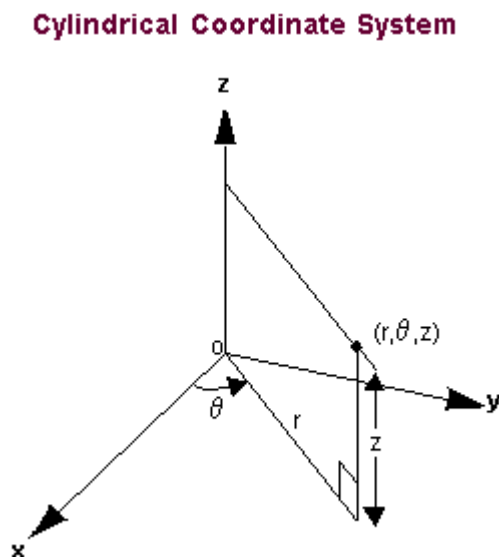
Поля координат. Содержат 6 координат, позволяющих сразу ввести те координаты деталей, которые необходимы. $C1, C2, C3$ обозначают линейные координаты, а $A1, A2, A3$ – угловые.

Следует отметить, что ориентацию и положение координатных систем следует предварительно настроить в соответствии с решаемыми задачами в меню **Settings**:

Coordinate System...

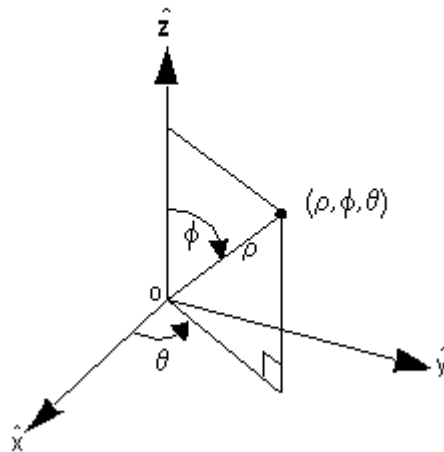
Задаёт координатную систему (декартова, цилиндрическая, сферическая). По умолчанию, ADAMS/View использует декартову (Cartesian) координатную систему с тремя осями X, Y, Z. Она соединена с «Землей», и относительно нее определяется положение всех других деталей.

В цилиндрической системе используются угол поворота в плоскости XY, радиус и координата Z. При этом маркер, находящейся в центре координат, всегда имеет нулевой угол поворота. Считается, что он не вращается. Угол поворота имеет значения от минус 180 до плюс 180 градусов. При достижении одного из этих пределов, он просто меняет свой знак на противоположный. Это угол можно использовать для отображения угловой ориентации, но никак не углового перемещения:



Сферическая система содержит радиус и два угла:

Spherical Coordinate System

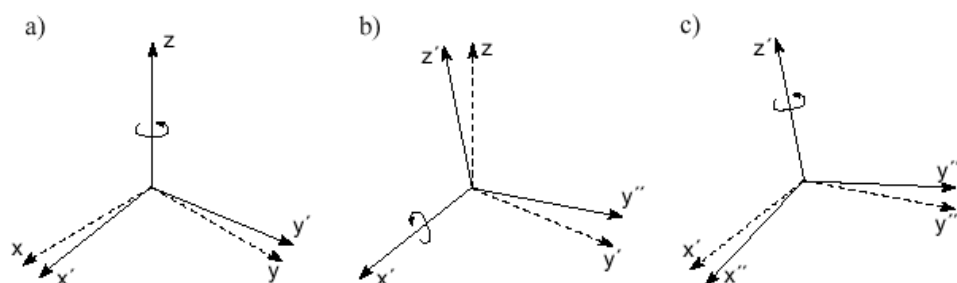


При этом можно выбирать положение осей. *Space Fixed* – оси фиксированы относительно начального положения в пространстве. *Body Fixed* – оси поворачиваются вместе с вращающимся телом.

Для ориентации твердого тела используются три угла поворота. В момент создания, ADAMS/View помещает тело в ЦСК и создает три оси вращения. В зависимости от условий, которые вы примете, вращение может происходить относительно осей, закрепленных в пространстве или на детали в любой последовательности относительно X, Y или Z. По умолчанию вам предложено тело с углами 3-1-3 (закрепление на теле Z, X, Z). Ориентация твердого тела задается одной из этих осей. ADAMS/View разрешает произвольное вращение относительно осей. Для задания оси необходимы две точки. Если вы задаете одну, то ось строится от предыдущей. По умолчанию, вы ориентируете ось Z, но, введя команду *X_AXIS_XY_PLANE* или *X_AXIS_XZ_PLANE*, вы сделаете главной ось X. Переключиться на настройки по умолчанию можно, используя команду *DEFAULTS ORIENT_AXIS_AND_PLANE_AXIS_AND_PLANE_SETTING*.

Вы задаете порядок, в котором оси вращаются, в виде последовательности трех цифр (1, 2, 3), которые соответствуют осям X, Y и Z. Например, вращение в порядке 3-1-2 происходит сначала вокруг оси Z, затем X, потом Y. ADAMS/View позволяет вам задать 24 последовательности вращения. Рисунок ниже показывает, в какой последовательности поворачиваются оси. Штриховыми линиями показаны начальные положения и сплошными линиями показана новая ориентация осей:

Example of Body-Fixed 313 Rotations



Первый угол поворачивает координатную систему относительно оси Z.

Второй угол поворачивает координатную систему относительно новой оси X.

Третий угол поворачивает систему относительно новой оси Z.

Направление вращения определяется правилом правой руки. Например, для начальной оси Z положительным будет вращение против часовой стрелки и отрицательным – по часовой стрелке.

Activate

Связано с понятием «*активного статуса*». Он определяет, будет ли деталь учитываться в процессе динамического расчета. При деактивации

деталь исключается из расчета. Чтобы вновь сделать деталь активной, применяется данная команда. При создании все детали автоматически имеют статус «*Активная*» и учитываются в расчетах.

Deactivate

Обратная команда, делает деталь неактивной.

Select List...

Создает список из тех элементов модели, которые соответствуют выбранным фильтрам. Например, можно потребовать у программы отобразить список всех шарниров в модели.

Меню Build

Позволяет осуществить создание и редактирование самых различных элементов как основных (деталей), так и вспомогательных (сплайнов, переменных, функций и т. д.).

Model

Позволяет создавать, удалять и переименовывать модели. В каждом файле ADAMS/View может находиться несколько моделей, не связанных друг с другом. Каждая имеет свою нумерацию, свои детали, силы и т. д. Модели можно объединять.

Bodies/Geometry...

Дублирует инструмент *Твердые тела* на *Панели инструментов*.

Point Mass

Создает точку, обладающую массой, но не обладающую моментами инерции или угловыми скоростями. Используется для расчетов, когда

вращение не очень важно. Например, вы можете использовать массовую точку для задания узлов в сети, соединив их пружинами. Имеются следующие **параметры**:

Name – уникальное полное имя точки.

Mass – масса точки в выбранных единицах (по умолчанию в кг).

Location – положение точки в пространстве.

Для точки можно назначить начальную скорость движения вдоль любой оси.

Materials

Позволяет редактировать существующие материалы и создавать новые. Задаются четыре характеристики:

а) *Name* (Название).

б) *Youngs Modulus* (Модуль упругости).

в) *Poissons Ratio* (Коэффициент Пуассона).

г) *Density* (Плотность).

Вторая и третья характеристики нужны для ADAMS/AutoFlex, чтобы верно преобразовывать твердые тела в деформируемые.

Joints...

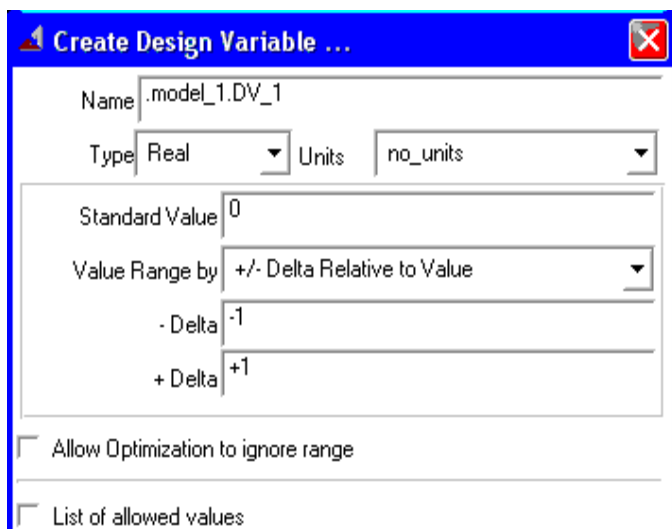
Дублирует инструмент *Соединения* на *Панели инструментов*.

Forces...

Дублирует инструмент *Силы* на *Панели инструментов*.

Design Variable

Позволяет осуществлять параметризацию модели, за счет создания независимых переменных, которые можно вставлять в поля размеров деталей и различные уравнения.



Name – полное имя модели.

Type – тип переменной.

Определяет значения, которые она может принимать. **Real** означает возможность принимать дробные значения.

Units – размерность, присваиваемая переменной. Можно оставить значение *no_units*, т. е. *безразмерная*.

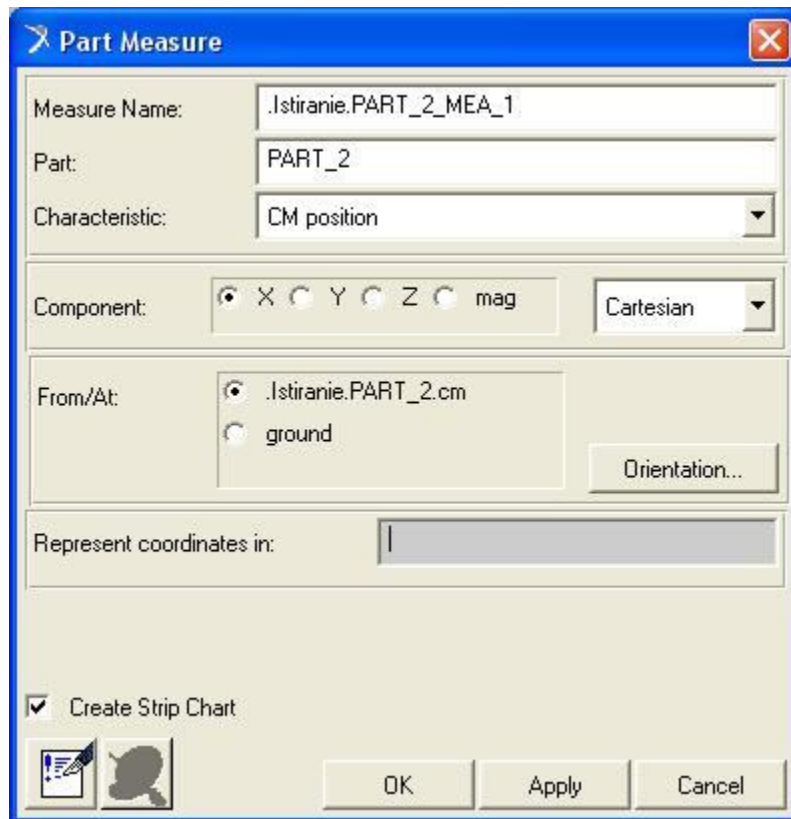
Value Range by – диапазон изменения переменной. Из этого диапазона ADAMS имеет право брать значения при автоматической оптимизации конструкции.

Standard Value – это и есть значение переменной.

Measure

Датчик. Простейший датчик, позволяющий измерить относительное перемещение элементов конструкции (углы и линейные перемещения). Результат выдает в виде графика на экране и отдельно в редакторе ADAMS/PostProcessor (клавиша F8). Для углов требуется указать три точки. Имя графика считается независимой переменной. Содержит следующие подпункты:

a) *Selected Object* – для выбранного объекта создается простейший датчик. Если выбрана часть, то все характеристики вычисляются для маркера центра масс.



Основные измеряемые характеристики [6]:

- 1) **CM_Position** – положение центра масс в ЦСК, [meter].
- 2) **CM_Velocity** – скорость центра масс в ЦСК, [meter/sec].
- 3) **CM_Acceleration** – ускорение центра масс в ЦСК, [meter/sec**2].
- 4) **CM_Angular_Velocity** – угловая скорость центра масс в ЦСК, [deg/sec].
- 5) **CM_Angular_Acceleration** – угловое ускорение центра масс в ЦСК, [deg/sec**2].
- 6) **Kinetic_Energy** – кинетическая энергия тела, вычисляется по формуле:

$$E = Translation_Kinetic_Energy + Angular_Kinetic_Energy, [newton*meter].$$

7) **Translational_Kinetic_Energy** – кинетическая энергия поступательного движения тела, вычисляется по формуле:

$$E = \frac{m \cdot (CM_Velocity)^2}{2}, [newton*meter].$$

8) **Angular_Kinetic_Energy** – кинетическая энергия вращательного движения, вычисляется по формуле:

$$E = \frac{J \cdot (CM_Angular_Velocity)^2}{2}, [newton*meter].$$

9) **Translation_Momentum** – импульс:

$$P = 2 \cdot \frac{Translation_Kinetic_Energy}{CM_Velocity} \text{ или } P = m \cdot CM_Velocity, [newton*sec].$$

10) **Angular_Momentum_About_CM** – импульс вращательного движения относительно центра масс:

$$P = J \cdot CM_Angular_Velocity, [newton*meter*sec],$$

где угловая скорость берется в рад/с.

11) **Potential_Energy_Delta** – это величина потенциальной энергии в поле гравитации. Вычисляется по формуле:

$$E = mgH = m \cdot g \cdot CM_Position, [newton*meter].$$

б) Point-to-Point – датчик измеряет разность положений двух точек.

Вычисляет только перемещение, скорость, ускорение, угловую скорость и угловое ускорение.

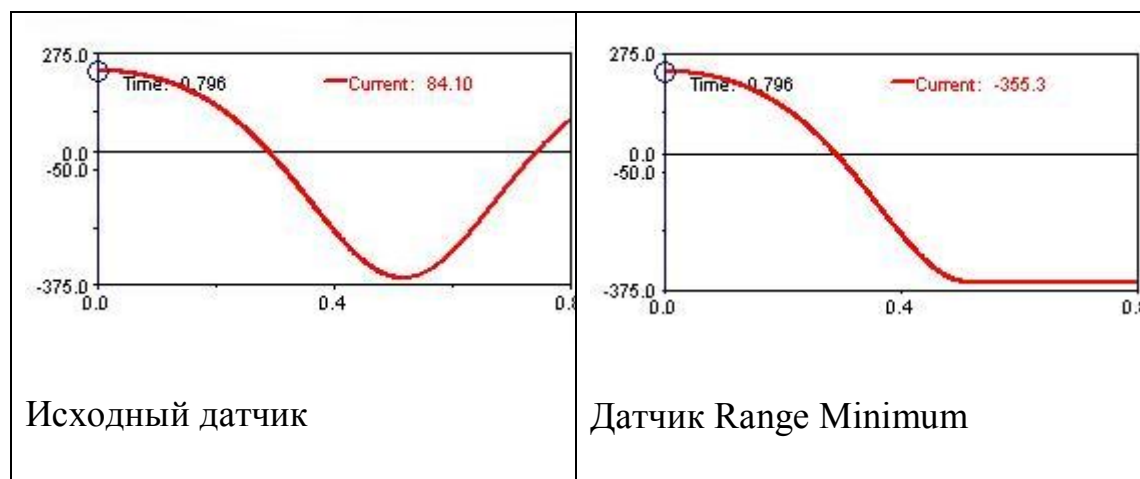
в) *Angle* – угол между указанными линиями. Задается тремя маркерами.

г) *Orientation* – датчик, который измеряет ориентацию маркера в одной из систем координат. Например, углы Эйлера (24 комбинации по 3 угла) или направляющие косинусы.

Далее идут сложные датчики, которые могут выполнять операции над простыми:

д) *Range* – датчик, оценивающий значения другого датчика и отбирающий заданные значения:

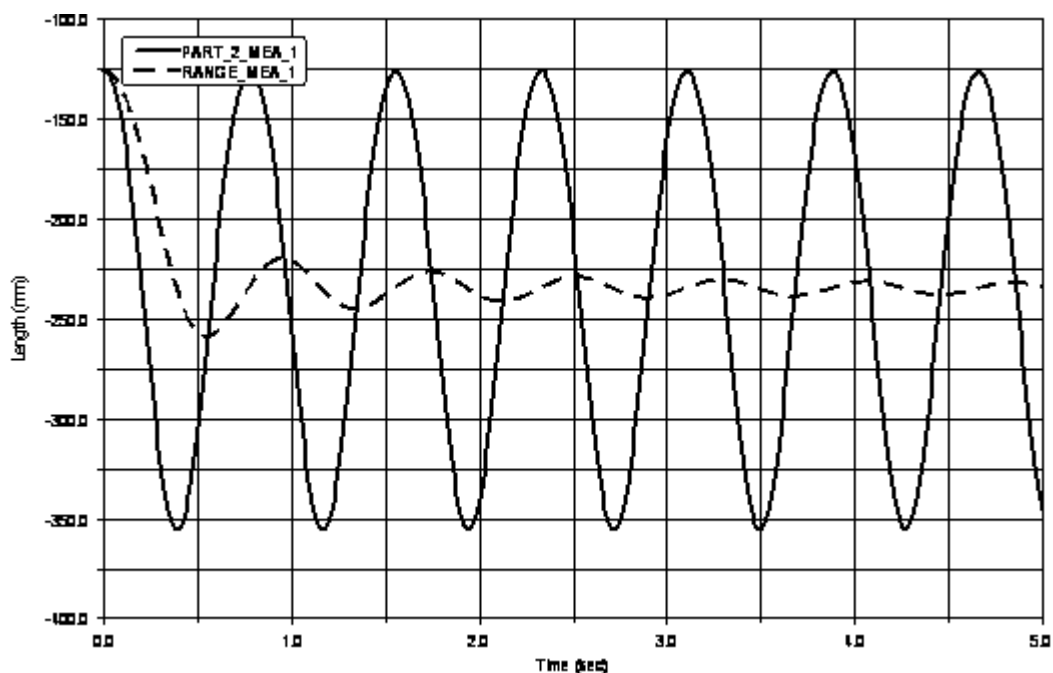
Minimum – на графике выводится минимальное на данный момент значение исходного графика. Например,



Пока исходная функция уменьшается, ее значение совпадает со значением *Range Minimum*. Когда функция начинает расти, *Range Minimum* сохраняет минимальное значение.

Maximum – на графике выводится максимальное на данный момент значение исходного графика.

Average – среднее значение графика. При этом функция только стремится найти среднее значение и тем ближе к нему, чем больше время расчета.



PART_2_MEA_1 – исходный график. *RANGE_MEA_1* – среднее значение.

Variation – выводит максимальную на данный момент разницу между наибольшим и наименьшим значением исходного датчика.

е) Computed – так называемый, «вычисляемый датчик». Т. е. датчик, способный математически обрабатывать данные конструкторских функций и строить их графики. «Конструкторскими» называются функции, действующие только на этапе проектирования модели и являющиеся константами или неактивными в процессе расчета. Это не датчик в прямом смысле слова, так как он *НЕ РАБОТАЕТ* в процессе расчета модели. Он работает только с конструкторскими функциями (матрицы, начальные координаты и положения частей, пользовательские функции, математические функции), но не может измерять, скажем, перемещения, скорости или ускорения.

ж) Function – функциональный датчик. Способен математически обрабатывать данные модельных или временных функций (перемещения,

скорости, ускорения, силы и т. д.), которые возникают в модели при расчете. Не работает с конструкторскими функциями!

з) Display... - отображение графика датчика на экране или его сокрытие. Независимо от установок, все графики датчиков можно посмотреть в ADAMS/PostProcessor.

и) Delete... - удаление датчиков.

к) REQUEST – создает запрос на вывод определенных параметров.

Function...

Открывает редактор функций, который позволяет создавать и рассчитывать огромное число функций, кроме отмеченных как *Run Time*, которые используются только при расчетах (т. е. конструкторских функций). При этом функции НЕ *Run Time* (т.е. не временные или модельные) в расчетах (в задании величин сил, например) использоваться не могут.

Два основных типа конструкторских функций:

а) User-Written Functions – функции, написанные пользователем.

б) System-Supplied Functions – функции, поддерживаемые системой (стандартные).

User-Written Functions в свою очередь делятся на:

1) Interpreted Functions – интерпретированные функции.

2) Compiled Functions – подчиненные функции.

Interpreted Functions содержат в выражении текст, когда ADAMS/View анализирует выражение. Вы можете создать эти функции в Command Window, используя команду *FUNCTION*. Когда вы создаете их, вы должны задать текст функции и имена параметров. Когда вы используете эту функцию, ADAMS/View ставит пользовательские параметры в тексте функции на место имен параметров.

Compiled Functions – вы можете написать их в C++ или FORTRAN, а затем связать с ADAMS/View и даже использовать их в выражениях ADAMS/View. Регистрируются они по запросу на построение подпрограммы в ADAMS/View. Вы должны разместить вызов подпрограммы в регистрационную подпрограмму, поддерживаемую в форме исходного кода в ADAMS/View.

Пользовательские функции обладают старшинством по сравнению со всеми другими поддерживаемыми системой функциями. Если вы зарегистрируете функцию с именем *SQRT*, тогда ваша новая функция будет вызываться, когда вы используете *SQRT* в выражении. Но вы не можете зарегистрировать функцию, имеющую имя константы, например, *PI*.

Data Elements

Создает специальные вспомогательные элементы.

Делится на подменю:

а) *Spline...* - позволяет создавать сплайн методом задания координат его точек (на двух или трех осях) с помощью *Point Table*. Теперь, чтобы задать этот сплайн в какую либо функцию в *Function Builder* необходимо задать *Spline* и выбрать какой-либо метод. Затем ввести имя созданного сплайна и независимую координату (например, *time* или *угол поворота* какого-либо

элемента). Сплайн может быть замкнутым и разомкнутым. Для построения разомкнутого сплайна достаточно четырех точек, для создания замкнутого – необходимо не менее восьми точек. Сплайн можно задать по точкам, а можно указать уже готовую линию, которая преобразуется в сплайн [6].

Метод интерполяции	Пригодные характеристики	Имя функции	Достоинства	Недостатки
<i>Cubic spline</i>	Глобальная	<i>CUBSPL</i>	<i>Точные производные</i> <i>Кривая</i> <i>Поверхность</i>	<i>Медленно</i> <i>Некоторая волнистость</i>
<i>B-spline</i>	Глобальная	<i>CURVE</i>	<i>Точные производные</i> <i>Может использоваться с CURSUB</i>	<i>Только кривые (не описывает поверхности)</i>
<i>Akima</i>	Локальная	<i>AKISPL</i>	<i>Быстро</i> <i>Кривая</i> <i>Поверхность</i>	<i>Неточные производные</i>

Akima-интерполяция имеет локальную пригонку. Локальный метод требует информации только о точках поблизости от интервала интерполяции, чтобы задать коэффициенты кубического полинома. Это означает, что каждая точка данных в *Akima*-сплайне воздействует только на ближайшую часть кривой.

Akima всегда дает хороший результат для значений функции при аппроксимации. *AKISPL* дает хорошую оценку для первой производной аппроксимируемой функции, когда точки данных расположены равномерно. Но если они расположены неравномерно, при вычислении первой производной может быть ошибка. В этом случае вторая производная функции будет аппроксимироваться крайне ненадежно.

Cubic-интерполяция имеет глобальную пригонку. Глобальный метод использует все данные точки, чтобы рассчитать все коэффициенты для всех интервалов в задаче одновременно. Таким образом, каждая точка данных влияет на весь *Cubic*-сплайн. Если вы переместите одну точку, то кривая изменится соответственно, делая сплайн более чувствительным и позволяя точнее отслеживать форму. Это особенно заметно на функциях с линейными отрезками или острыми пиками на кривой. В этом случае *Cubic*-сплайн всегда будет более подвижным, чем *Akima*-сплайн.

И локальный и глобальный методы работают хорошо на гладких функциях.

CUBSPL не так быстр, как *AKISPL*, но всегда дает хороший результат для значений аппроксимированной функции, а также первой и второй производной. Заданным точкам не обязательно размещаться равномерно. Процесс решения часто требует определения производных заданной функции. *CUBSPL* проще для обеспечения сходимости процесса решения для контура производной.

Гладкость второй производной важна, если вы задаете сплайном закон движения (*motion*). Здесь вторая производная является ускорением и используется для вычисления сил реакции, возникающих при работе *motion*. Разрыв во второй производной вызовет разрыв в ускорении и далее в силе реакции. Вы можете получить неверное решение или его несходимость.

B-spline-метод интерполяции – это главное конструкторское средство для описания 3D-конструкционной геометрии. Он может быть использован для геометрических приложений. В то время как *AKISPL* и *CUBSPL* лучше использовать для задания движений, сил и других переменных.

б) *Array* – создает массив. Массив в ADAMS – это просто ряд значений, имеющих различный вид:

Table 17. Array Examples

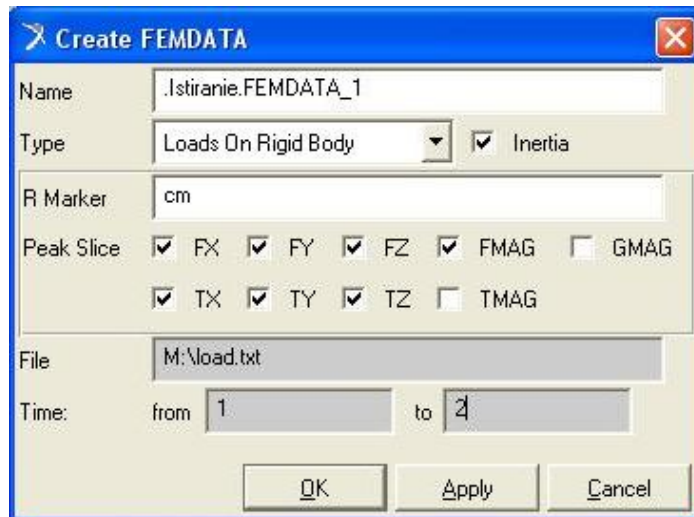
Array:	Example:
{1, 2, 3}	Array of integers
{"red", "green", "blue"}	Array of character strings
{.model_1, .model_1.part_1, part_3}	Array of objects
{1.2, 3.4, 5.6}	Array of real numbers

в) *Matrix* – матрица. Последний тип массива может быть многомерным. Такой массив называется матрицей.

г) *Curve* – кривая. Этот инструмент позволяет создать кривую на основе двумерной матрицы. (Если взять трехмерную матрицу, получим поверхность. Из четырехмерной матрицы и выше невозможно создать кривую). Для создания кривой понадобится указать метод интерполяции из указанных выше (см. *Spline*).

д) *String* – создание строковой (текстовой) переменной.

е) *FEMdata* – выдает различные величины, необходимые для КЭ-анализа или являющиеся его результатом. Передаются только нагрузки. Геометрия строится в FEM-пакете (КЭ-пакете) совершенно независимо. Для твердого тела эти данные показаны на рисунке:



System Elements

Позволяет на математическом языке описывать факторы, которые воздействуют на модель, но не предусмотрены в наборе инструментов ADAMS/View. Например, мускульный привод. Уравнения, заданные здесь, решаются совместно с уравнениями, создаваемыми ADAMS/View для описания работы системы, и имеют приоритет. Делится на следующие подразделы:

- а) *State Variable* – переменная среды.
- б) *Differential Equation* – дифференциальное уравнение.
- в) *Transfer Function* – передаточная функция.
- г) *Linear State Equation* – линейное уравнение.
- д) *General State Equation* – общее уравнение.

Group

Позволяет объединять различные элементы одной модели в группы и работать с ними, как с одним объектом.

Ungroup

Позволяет выделять элементы из группы.

Controls Toolkit

Комплект инструментов управления. Делится на следующие подразделы:

а) Standard Control Blocks... - стандартные контрольные блоки.

б) Plant Input... - установки входа.

в) Plant Output... - установки выхода.

г) U Input Array... - U-входной массив.

д) X State Array... - X-установочный массив.

е) Y Output Array... - Y-выходной массив.

Для определения взаимного перемещения деталей численной модели в процессе кинематико-динамического расчёта в ADAMS необходимо задать граничные условия. Основным инструментом для этого является Joints - соединения (шарниры).

Основой для системы уравнений, описывающих динамику системы n твердых тел, находящихся под действием m_a заданных сил и стесненных m голономными связями, послужили уравнения в форме Эйлера-Лагранжа с множителями [6]:

$$\begin{aligned}
\dot{p}_i &= \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_{k=1}^{m_a} \bar{F}_i \cdot \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_i} - \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial q_i}, \\
p_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} &= 0, \\
u_i - \dot{q}_i &= 0, i=1, \dots, 6n, \\
\Phi_j(\{q_\alpha\}, t) &= 0, j=1, m,
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\bar{F}_k - \bar{f}_k(\{q_\alpha\}, \{u_\beta\}, \{\lambda_\gamma\}, t) = 0, k = \overline{1, m_\alpha}.$$

Для задания движения твердого тела используются инерциальные глобальные координаты его центра масс и углы Эйлера. По умолчанию ориентация определяется последовательными поворотами вокруг главных центральных осей тела 3-1-3 (для них в интерфейсе и документации пакета используется обозначение *B313*) на углы ψ – прецессии, θ – нутации, φ – собственного вращения. Выбор одной из 24 систем углов Эйлера должен быть сделан в процессе сборки модели, перед началом симуляции. Как известно из курса теоретической механики, необходимость смены системы эйлеровых обобщенных координат связана с вырождением матрицы связи проекций вектора угловой скорости на ортогональные оси и обобщенных скоростей.

Например, в случае системы углов (*B313*) оси, для проекций на оси связанные с телом, и обобщенных скоростей $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$ [6]:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \psi \cdot \sin \theta & \cos \varphi & 0 \\ \cos \varphi \cdot \sin \theta & -\sin \varphi & 0 \\ \cos \theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

при угле нутации $\theta = 0$

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

Это не позволяет однозначно определить обобщенные скорости по проекциям угловой скорости и приводит к потере точности счета вблизи $\theta = 0$.

Проблема решается для конкретных режимов движения выбором другой системы углов Эйлера.

Проекции радиус-векторов точек, жестко связанных с телом, определяются с помощью ортонормальной матрицы преобразования от системы координат, связанной с телом, к глобальной (Gl) системе координат [6]:

$$A^{Gl} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\varphi - \sin\psi \cos\varphi \cos\theta & -\cos\psi \sin\varphi - \sin\psi \cos\varphi \cos\theta & \sin\psi \sin\theta \\ \cos\psi \cos\varphi + \sin\psi \cos\varphi \cos\theta & -\sin\psi \sin\varphi + \cos\psi \cos\varphi \cos\theta & -\cos\psi \sin\theta \\ \sin\varphi \sin\theta & \cos\varphi \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Для описания уравнений голономных связей (1) в ADAMS используются **примитивные связи**, задаваемые следующими соотношениями [6]:

1) Atpoint (Совпадение точек двух тел):

$$\bar{\Phi} = (\bar{R}_i + \bar{r}_{ik}) - (\bar{R}_j + \bar{r}_{jk}) = 0. \quad (5)$$

Это соотношение определяет три голономные связи типа (1) и используется для задания шарниров с фиксированной позицией (цилиндрического шарнира вращения, сферического шарнира, универсального шарнира).

2) Inplane (Движение точки в плоскости). Движение точки тела i в плоскости, принадлежащей телу j и проходящей через точку $(\bar{R}_j + \bar{r}_{jk})$ перпендикулярно вектору \bar{a}_j :

$$\bar{\Phi} = ((\bar{R}_i + \bar{r}_{ik}) - (\bar{R}_j + \bar{r}_{jk})) \cdot \bar{a}_j = 0. \quad (6)$$

3) Perpendicular (Перпендикулярность отрезков в телах):

$$\Phi = \bar{a}_i \cdot \bar{a}_j = 0. \quad (7)$$

4) Orientation (Фиксированная ориентация). Фиксированная ориентация систем координат в первом i и втором j телах разрешает относительное поступательное перемещение тел, которое образуется из двух соотношений (7) и добавляет в систему уравнений движения две голономные связи:

$$\{\bar{a}_i \cdot \bar{b}_j, \bar{a}_i \cdot \bar{c}_j\} = 0. \quad (8)$$

5) Inline (Движение по прямой). Точка, принадлежащая первой части, может двигаться только вдоль прямой, принадлежащей второй части. Это условие образуется из двух условий (6). Условие используется при необходимости наложения связи типа «подвижный вращательный шарнир»:

$$\{((\bar{R}_i + \bar{r}_i) - (\bar{R}_j + \bar{r}_j)) \cdot \bar{x}_j, ((\bar{R}_i + \bar{r}_i) - (\bar{R}_j + \bar{r}_j)) \cdot \bar{y}_j\} = 0. \quad (9)$$

6) Parallel (Параллельное движение). Ось Z маркера, принадлежащего одной части, параллельна оси Z маркера, принадлежащего второй части соединения:

$$\{\bar{z}_i \cdot \bar{x}_j, \bar{z}_i \cdot \bar{y}_j\} = 0. \quad (10)$$

С помощью рассмотренных примитивов могут быть описаны **типовые шарниры:**

а) Цилиндрический шарнир образуется из примитивов Atpoint и двух условий перпендикулярности \bar{z}_i орта оси маркера первого тела и ортов осей \bar{x}_j и \bar{y}_j маркера второго тела:

$$\{((\bar{R}_i + \bar{r}_i) - (\bar{R}_j + \bar{r}_j)), \bar{z}_i \cdot \bar{x}_j, \bar{z}_i \cdot \bar{y}_j\} = 0. \quad (11)$$

б) Универсальный шарнир состоит из условия совпадения точек соединяемых тел и ортогональности ортов \bar{z}_i и \bar{z}_j :

$$\{((\bar{R}_i + \bar{r}_i) - (\bar{R}_j + \bar{r}_j)), \bar{z}_i \cdot \bar{z}_j\} = 0. \quad (12)$$

в) Поступательный шарнир образуется условиями движения точки по прямой, образованной пересечением двух плоскостей, принадлежащих второму телу, и трех условий ортогональности, обеспечивающих параллельность одноименных ортов маркеров, принадлежащих соединяемым телам:

$$\{((\bar{R}_i + \bar{r}_i) - (\bar{R}_j + \bar{r}_j)) \cdot \bar{x}_j, ((\bar{R}_i + \bar{r}_i) - (\bar{R}_j + \bar{r}_j)) \cdot \bar{y}_j, \bar{z}_i \cdot \bar{x}_j, \bar{z}_i \cdot \bar{y}_j, \bar{x}_i \cdot \bar{y}_j\} = 0. \quad (13)$$





Revolute Joint

Позволяет одной части вращаться относительно другой вокруг общей оси. Ось вращения параллельна ориентирующему вектору и проходит через точку расположения шарнира.

1 Location (Bodies Implicit). Вы выбираете размещение соединения, а ADAMS/View определяет две части, которые должны быть соединены. ADAMS/View выбирает части, самые близкие к точке размещения соединения. Если имеется только одна часть около соединения, ADAMS/View соединяет эту часть с «землей».

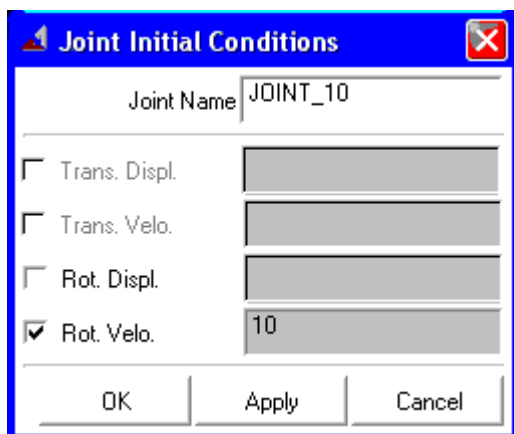
2 Bodies – 1 Location. Вы самостоятельно задаете два тела, которые будут соединены. Шарнир остается на первом теле и вращается относительно второго.

2 Bodies – 2 Locations. То же, но соединения устанавливаются на обоих телах.

Normal to Grid. Ориентирует соединение по рабочей сетке и перпендикулярно экрану.

Pick Geometry Feature. Вы самостоятельно задаете вектор ориентации соединения.

Для шарниров можно использовать возможности задания начальных условий. Например, в начальный момент расчета в шарнире уже будет ненулевая скорость перемещения.



Joint Name – имя шарнира.

Trans. Displ. – начальное линейное перемещение.

Trans. Velo. – начальная линейная скорость в шарнире.

Затем то же вводится для угловых величин. Размерности задаются в меню *Settings/Units*.



Translation Joint

Позволяет одной части перемещаться относительно другой поступательно, без вращения. Положение соединения не влияет на движение, влияет лишь задаваемый вектор, указывающий направление перемещения.



Cylindrical joint

Позволяет поступательное перемещение и вращение, вокруг оси. Ось задается вектором при создании соединения.



Spherical joint

Сферический шарнир, вращение вокруг точки.



Planar joint

Позволяет одной детали скользить и вращаться в плоскости другой детали. Вы задаете точку, через которую проходит плоскость.



Constant-velocity joint

Обеспечивает вращение с равными угловыми скоростями двух элементов, соединенных с третьим. Эквивалентно валу, жестко соединяющему два вращающихся элемента. Возможен сдвиг точки крепления за пределы тела.



Screw joint

Создает винтовое соединение. Винтовое соединение задается точкой приложения и двумя векторами, задающими оси болта и ось гайки. Теоретически они могут не совпадать, однако на практике желательно, чтобы они были параллельны.

После создания необходимо отредактировать шаг резьбы (*pitch*). По умолчанию он равен 1. Положительное значение создает правостороннюю резьбу, отрицательное – левостороннюю.

Если оставить свободное винтовое соединение, оно начнет хаотически вращаться под действием приложенной силы. Чтобы добиться стандартной работы, следует наложить на винтовое соединение цилиндрическое.



Fixed Joint

Жесткое соединение (замок). Место его размещения не влияет на работу конструкции. Отнимает у тела все шесть степеней свободы.



Hooke и Universal

Передаёт вращение с одного твёрдого тела на другое. Особенно подходит для соединений валов. Переключается с одного на другое двойным щелчком мыши на иконке. Карданное соединение. Способно передавать крутящий момент к валам, расположенным под углом относительно друг к другу. Нужно проверить, чтобы оси были ориентированы одинаково.



Gear Joint

Зубчатые передачи. Необходимо параллельно расположить оси Z . Сама зубчатая передача на экране не отображается.

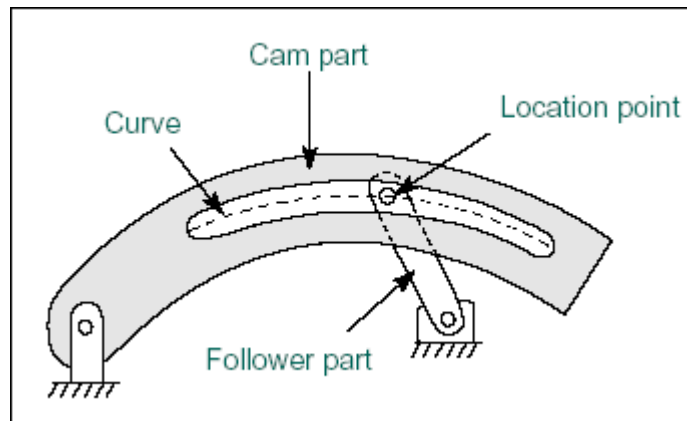


Coupler Joint

Соединение тросами на неподвижных блоках двух или трех шарниров. Связывает поступательные и вращательные шарниры. Может быть привязано только к соединениям. Изначально соединяются два шарнира с коэффициентом скоростей движения, равным 1. Чтобы изменить соединение, используйте свойство *Modify*. В открывшейся панели можно задать третий шарнир; изменить коэффициент скоростей движения; задать нелинейные свойства виртуального ремня, соединяющего шарниры.



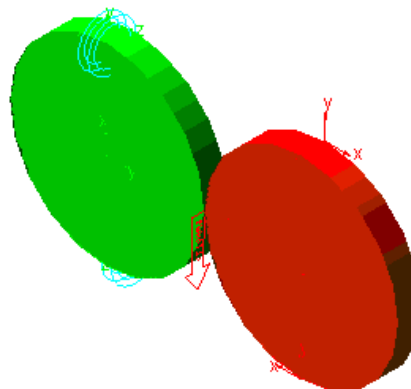
Point – Curve Constraint



Создает соединение между сплайном (кромкой) и точкой, при котором сплайн (кромка) всегда находится в соприкосновении с точкой. Однако отдельные точки сплайна (кромки) скользят вдоль точки, благодаря чему сплайн (кромка) может проворачиваться.



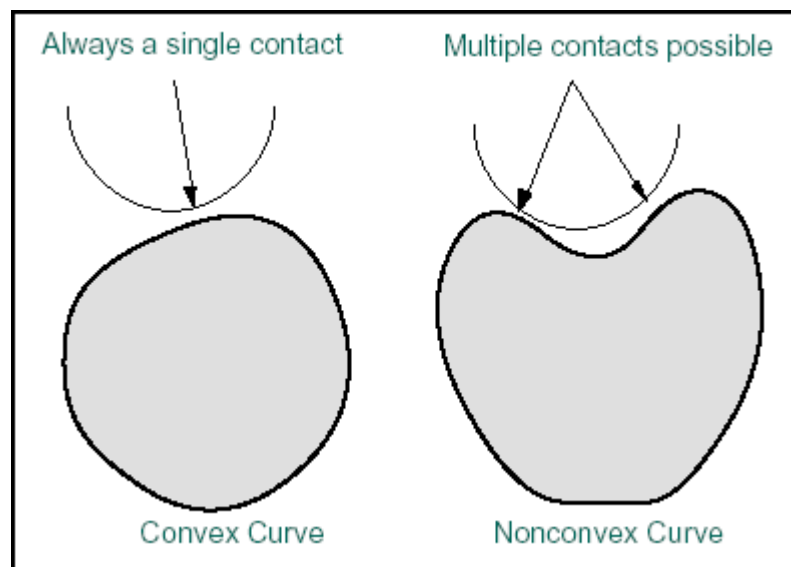
2D Curve – Curve Constraint



Соединение предполагает скольжение двух деталей по соприкасающимся кромкам или сплайнам.

Edge – означает соединение по кромкам. Выбираются две соприкасающиеся кромки. Кромкой считается ребро, составляющее один элемент, например, прямая, скругление, фаска. Чтобы соединить объемное тело, требуется соединить все соприкасающиеся кромки этих тел. Проще всего соединять кромки окружностей. Непременным условием соединения является неподвижность одной детали, т. е. закрепление ее соединением типа «замок».

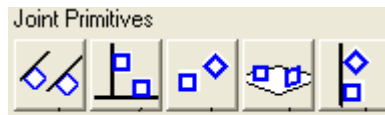
Splihе – действует так же, но соединению подлежат сплайны. Одна деталь должна быть неподвижной:



$f(q)=0$ **General Constraint**

Позволяет напрямую задавать уравнения связей. Включен в версии позже ADAMS 2003, работает только под решатель C++.

Простейшие соединения (Joint Primitives)



Inline

Позволяет одному телу двигаться относительно другого по линии. При этом тело может свободно вращаться. Если точка приложения соединения не совпадает с центром тела, то тело может свободно перемещаться внутри туннеля радиусом от точки приложения соединения до центра тела, отскакивая от стенок. Очень важен порядок соединения тел: сначала задается тело, которое будет двигаться (*активное*), затем тело, относительно которого совершается движение (*реактивное*), и, наконец, линия движения.

Inplane

То же, но в плоскости.

Parallel axes

При движении детали всегда остаются параллельны друг другу.

Perpendicular

То же, но перпендикулярно.

Orientation

Это соединение сохраняет постоянной ориентацию в пространстве выбранных деталей. При этом они могут свободно перемещаться линейно.

Операции с шарнирами

Загружая экран *Modify*, можно заметить внизу этого экрана иконки:



Comments – загружает окно, где можно привести различную текстовую информацию, не влияющую на работу механизма.



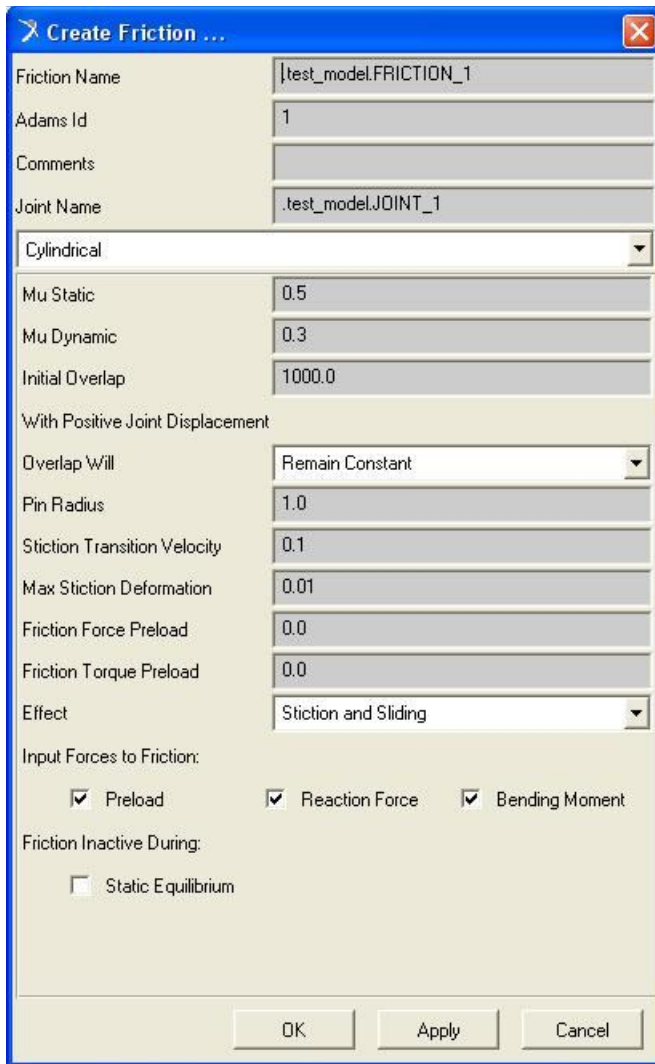
Change Position – аналогично команде *Edit/Move...* . Открывает окно, позволяющее перемещать шарнир.



Measures – позволяет выбрать какую-либо из характеристик движения шарнира, например, силу реакции или угол поворота, а затем в отдельном окне во время симуляции строит график изменения данной величины. Дублирует *PostProcessing*.



Joint Friction – задает силу трения в шарнире:



Допускается добавление сил динамического и статического сухого трения в цилиндрическом вращательном, поступательном, цилиндрическом поступательном, Гука/универсальном и сферическом шарнирах.

На рисунке показана панель для цилиндрического шарнира, заданная по умолчанию.

Mu Static – задает коэффициент статического трения в шарнире. Верхняя граница силы трения покоя:

$$F = \mu_{cm} \cdot N, \text{ где } \mu_{cm} - \textit{Mu Static}; N - \text{нормальная сила.}$$

Сила статического трения действует в противоположном силам или моментам направлении вдоль степеней свободы шарнира.

Mu Dynamic – задает коэффициент динамического трения в шарнире. Величина силы трения:

$$F = \mu_{din} \cdot N, \text{ где } \mu_{din} - \textit{Mu Dynamic}, N - \text{нормальная сила.}$$

Сила динамического трения действует в направлении, противоположном скорости в шарнире.

Initial Overlap – начальное перекрытие.

With Positive Joint Displacement – с положительным перемещением шарнира.

Overlap Will – вариант перекрытия.

Для задания трения в шарнире скольжения ADAMS/Solver вычисляет перекрытие шарнира. В процессе скольжения в таком шарнире перекрытие может:

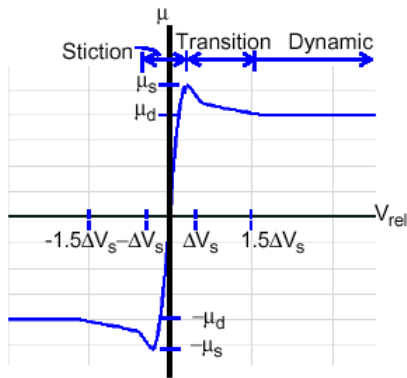
а) Increase – возрастать. Ползун перемещается внутрь шарнира.

б) Decrease – уменьшаться. Ползун перемещается из шарнира.

в) Remain Constant – оставаться постоянным. Ползун весь остается в шарнире.

Pin Radius – задает радиус стержня для шарнира, который используется при вычислении силы и момента трения.

Stiction Translation Velocity – определяет абсолютную величину пороговой скорости чувствительности при переходе от динамического к статическому трению. Если абсолютное значение относительной скорости маркера шарнира меньше *Stiction Translation Velocity*, то трение покоя (статическое трение) действует, блокируя движение тела. Измеряется на поверхности контакта в шарнире.



Max Stiction Deformation – задает максимальное смещение, допустимое в шарнире при действии сил статического трения. Слабая деформация позволяет ADAMS/Solver легко удовлетворить условию Кулона для статического трения: $F < \mu_{cm} \cdot N$,

где μ_{cm} - μ Static, N – нормальная сила.

Следовательно, даже при нулевой скорости возможно приложение конечной силы статического трения, если того требует динамика системы.

Friction Force Preload – задает преднапряженную силу трения в шарнире, которая обычно вызвана механическим люфтом в сборке шарнира.

Friction Torque Preload – задает момент преднагруженного трения, обычно вызываемый механическим люфтом в шарнире.

Оба этих параметра увеличивают силу трения и могут быть использованы для усиления демпфирующего эффекта трения.

Reaction Arm – задает эффективное плечо момента шарнирной реакции относительно оси поступательного шарнира. Это значение используется для вычисления вклада торсионного момента в силу трения.

Effect – определяет, какой тип трения учитывается в шарнире:

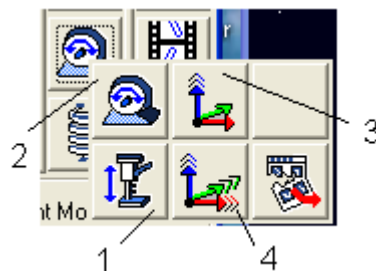
- а) **Stiction and Sliding** – трение покоя и динамическое трение;
- б) **Stiction** – только трение покоя;
- в) **Sliding** – только динамическое трение.

Исключение статического трения значительно увеличивает скорость расчета.

В дополнение к этому, ADAMS/View позволяет задавать для шарниров начальные условия. Для простых шарниров – это скорости и перемещения в начальный момент расчета (линейные или угловые, в зависимости от типа шарнира).

Для обеспечения движения деталей численной модели необходимо задать определённые генераторы движения, либо приложить внешние нагрузки, согласно типу решаемой задачи.

Задатчики движения (Motion Generators)



Translation Joint Motion

Прикладывается к поступательному или цилиндрическому соединению. Задаёт линейный закон движения. Возможно задание любой функции, в том числе ускорений и сплайнов.



Rotational

Прикладывается к вращательному или цилиндрическому соединению. Задаёт вращательный закон движения. Задаётся в виде $cd*time$, где c – величина в градусах, на которую тело повернется за одну

секунду; $c \cdot \text{time}$, где c – величина в радианах. Возможно задание любой функции, в том числе угловых ускорений и сплайнов.



Point Motion и General Point Motion

Позволяют вам самостоятельно задавать любой закон движения тела. Прикладываются не к шарнирам, а к маркерам. *Point Motion* – линейное, *General Point Motion* – в пространстве. Задается закон движения для каждой характеристики (три вращательных, три поступательных) либо устанавливается «*free*» – свободное движение.

Виды воздействий на деталь (Connector)



Translational Spring-Damper

The screenshot shows a dialog box titled "Modify a Spring-Damper Force" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains the following fields and options:

- Name: SPRING_1
- Action Body: PART_2
- Reaction Body: ground
- Stiffness and Damping:
 - Stiffness Coefficient: (1.6E-002(newton/mm))
 - Damping Coefficient: (4.1E-003(newton-sec/mm))
- Length and Preload:
 - Preload: 0.0
 - Default Length: (Derived From Design Position)
- Spring Graphic: On, If Stiffness Specified
- Damper Graphic: On, If Damping Specified
- Force Display: On Action Body

At the bottom of the dialog, there are three icons: a pencil, a coordinate system (x, y, z), and a spring. Below the icons are three buttons: OK, Apply, and Cancel.

Создает нелинейный упругодемпфирующий элемент. В простейшем случае используется линейный закон. При этом указываются две величины: жесткость пружины K (*Stiffness Coefficient*) и коэффициент затухания C (*Damping Coefficient*). Если C достаточно велико, пружина перестанет деформироваться тогда, когда достигнет точки равновесия. Деформации, скорости их изменения и другие параметры измеряются от длины ненагруженной пружины.

Деформация в точке равновесия $D=K/(m*g+preload)$,

где K - жесткость пружины;

m - масса груза; g – ускорение свободного падения; *Preload* задает силу в Н, которая постоянно действует на пружину. Это эквивалентно подвешиванию к ней какой-либо массы.

Length at preload задает длину ненагруженной пружины, которая складывается из $L_э$ (длины той пружины, которая изображена на экране) и некой части $L_n = \text{Length at preload} - L_э$. Если *Length at preload* > $L_э$, то пружина сжата в $\text{Length at preload}/L_э$ раз и при демонстрации будет расширяться. Иначе наоборот.

Если требуются нелинейные характеристики, то значения практически всех величин можно вводить в виде функций. Кроме того, коэффициент жесткости можно вводить в виде сплайна $\text{Сила} = f(\text{деформация})$, а коэффициент демпфирования – в виде сплайна

$\text{Сила} = f(\text{скорость деформации})$.



Gravity – управляет гравитацией. Дублирует команду *Settings/Gravity...*



Force (Single Component) – создает сосредоточенную силу, приложенную к какой-либо точке детали. Сила может иметь любое направление. Величина силы может быть как функцией, так и константой.

Если задается зависимость силы от перемещения, достаточно задать лишь точку (*To marker*) перемещение которой будет учитываться. При этом перемещение учитывается от нулевого уровня, т. е. от оси координат. Чтобы этого избежать, нужно вычесть из заданного перемещения начальную координату точки. Сила может находиться в различных положениях при движении тела:

а) *On one body, Fixed in Space* – означает, что вектор силы всегда остается одинаковым по направлению. Он может лишь перемещаться в плоскости вместе с телом, оставаясь параллелен сам себе. Задается тремя маркерами. *Маркер_1* – точка приложения силы на теле, *Маркер_2* – точка начала вектора силы (пространственно совпадает с *Маркер_1*), *Маркер_3* – находится на ведущем теле (в данном случае на «земле»).

б) *On one body, Moving with Body* – вектор силы сохраняет свое положение относительно тела, поворачиваясь вместе с ним. *Маркер_3* находится на теле в месте нахождения *Маркер_1*.

в) *On one body, Moving with Other Body* – вектор силы движется вместе с телом, но ориентацию сохраняет относительно ориентации другого тела, называемого ведущим. *Маркер_3* на ведущем теле. Здесь необходимо указать ведущее тело.

г) *Between Two Bodies In Line-Of-Sight* – сила связывает между собой два тела, при этом они воспринимают ее действие совместно. Сила всегда

направлена по прямой, соединяющей маркеры на телах, к которым она приложена.



Torsion Spring

Торсионный нелинейный упругодемпфирующий элемент предназначен для использования во вращательных соединениях, для которых он действует аналогично обычной пружине при поступательном движении. У него имеются следующие параметры:

Stiffness Coefficient (коэффициент жесткости), который в данном случае измеряется в Н*мм/градус. Если вам известна крутильная жесткость элемента в Н*мм, то достаточно будет поделить ее на величину 1 радиана в градусах, т. е. приблизительно на 57,3.

Damping Coefficient (коэффициент демпфирования), здесь измеряется в Н*мм*с/градус. Разумеется, все размерности даны по умолчанию и с изменением системы размерностей также изменяются.



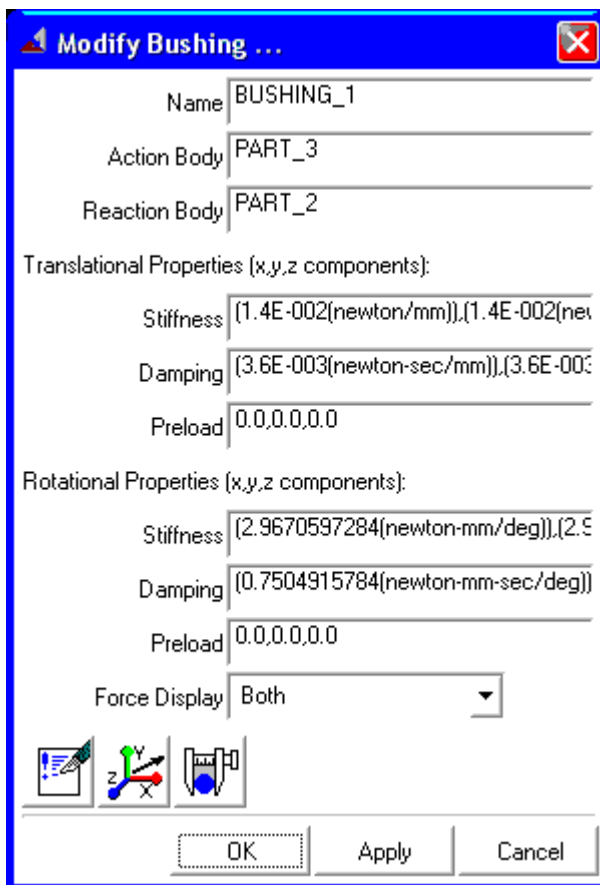
Applied Force: Torque (Single Component)

Создает момент вокруг одной оси, который можно приложить в любом месте.



Bushing

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}$$



Как видно, это соединение напоминает упругую пластину, соединяющую два тела. Как бы они не двигались, для каждой оси имеются свои коэффициенты жесткости и демпфирования. Еще можно представить это соединение как набор из шести пружин, по одной на каждое возможное движение (степень свободы). Хорошо подходит для моделирования опор.

Позволяет производить расчет конструкции на вибрацию. Однако при динамическом анализе вносит погрешности за счет своей податливости тем большие, чем меньше жесткость и выше демпфирование соединений.

Stiffness – величины жесткостей по осям.

Damping – величины демпфирования по осям.



Applied Force: Force Vector (3-Component Force)

Задаёт проекции силы на три оси.



Field

Задаёт матрицу жесткостей между двумя элементами. В общем, аналогична *Bushing*, но здесь связь идет не между точками, а между телами [6]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ a - a_0 \\ b - b_0 \\ c - c_0 \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}$$

Force Modify Element Like Field

Field Name: .model_1.FIELD_1

New Field Name:

Adams Id: 1

Comments:

I Marker Name: MARKER_23

J Marker Name: MARKER_24

Translation At Preload: 0.0,0.0,0.0

Rotation At Preload: 0.0,0.0,0.0

Define Using Standard Values

Force Preload: 0.0,0.0,0.0

Torque Preload: 0.0,0.0,0.0

Stiffness Matrix: (5.2E-003(newton/mm)),0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,(5

Damping Ratio: 0.0

$$F_x = f_1(x, y, z, a, b, c, v_x, v_y, v_z, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$$

$$F_y = f_2(x, y, z, a, b, c, v_x, v_y, v_z, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$$

$$F_z = f_3(x, y, z, a, b, c, v_x, v_y, v_z, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$$

$$T_x = f_4(x, y, z, a, b, c, v_x, v_y, v_z, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$$

$$T_y = f_5(x, y, z, a, b, c, v_x, v_y, v_z, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$$

$$T_z = f_6(x, y, z, a, b, c, v_x, v_y, v_z, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$$



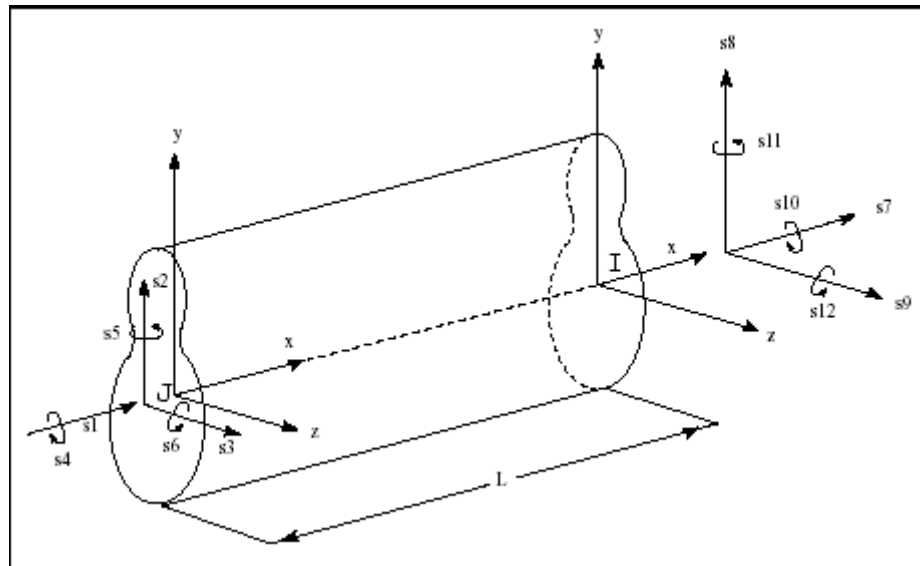
Applied Force: Torque Vector (3-Component Torque)

Задаёт проекции моментов относительно всех осей.



Massless Beam – балочная сила

Создает силу между маркерами двух различных деталей, действующую по заданному направлению. Моделирует соединение двух деталей участком гибкой балки произвольного сечения:



Матричное уравнение ADAMS/Solver, эквивалентное данной системе [6]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & K_{26} \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{53} & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & K_{62} & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - l \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} & C_{41} & C_{51} & C_{61} \\ C_{21} & C_{22} & C_{32} & C_{42} & C_{52} & C_{62} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{43} & C_{53} & C_{63} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{54} & C_{64} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{65} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

Основные параметры силы задаются в следующей таблице:

Force Modify Element Like Beam	
Beam Name	.model_1.BEAM_1
New Beam Name	
Adams Id	1
Comments	
Ixx	1.0
Iyy	1.0
Izz	1.0
Y Shear Area Ratio	0.0
Z Shear Area Ratio	0.0
Youngs Modulus	1.0
Shear Modulus	1.0
Length	(DM(MARKER_5, MARKER_6))
Area Of Cross Section	1.0
Damping Ratio	0.0
I Marker Name	MARKER_5
J Marker Name	MARKER_6
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Beam Name –

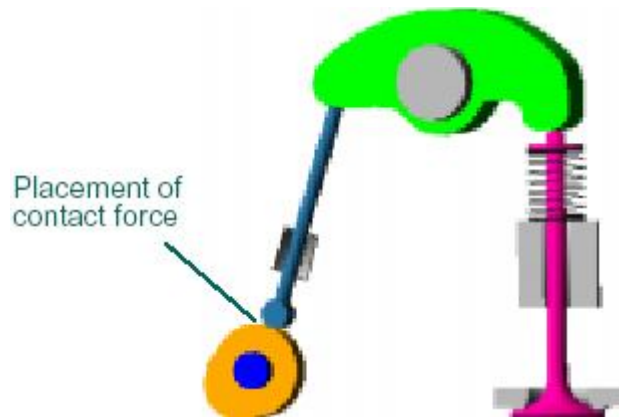
полное имя
соединения.

Length –

независимый
параметр, а именно:
расстояние между
двумя точками.



Contact



Позволяет задавать реакцию деталей на их соприкосновение. Для этого нужно выбрать два тела, задать необходимые коэффициенты, после чего геометрии начинают взаимодействовать друг с другом как реальные объекты: отскакивать при ударе, передавать импульс и кинетическую энергию.

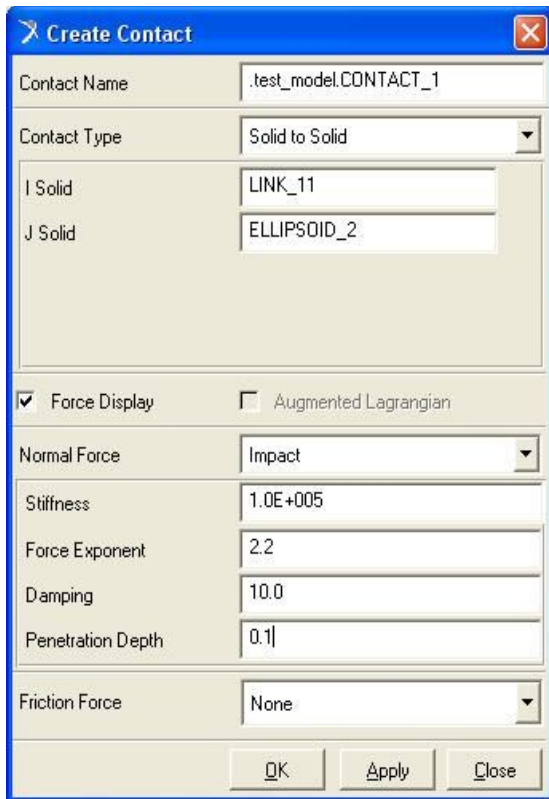
а) Взаимодействие *Restitution* представляет собой абсолютно упругий удар.

Restitution Coefficient (0...1) – показывает, какая часть энергии возвращается телу при ударе.

Penalty – жесткость контакта, при превышении которой два тела начнут проходить друг через друга. Также она является «штрафом» - при ее увеличении возрастает точность восстановления энергии.

При выборе *Augmented Lagrangian*, ADAMS/View использует итерационное усовершенствование для обеспечения минимального проникновения между телами. Эта функция также гарантирует, что величина нормальной силы относительно нечувствительна к жесткости. Большое значение жесткости гарантирует, что проникновение одной геометрии в другую будет малым. Однако большие значения вызывают

трудность численного интегрирования. Значение $1E6$ соответствует системам, смоделированным в кг-мм-с.



б) Impact – удар. Описывается следующим уравнением [6]:

$$F = 0, \text{ если } q > q_0,$$

$$F = k \cdot (q_0 - q)^e - c_{\max} \cdot \dot{q} \cdot \text{STEP}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0),$$

если $q \leq q_0$,

где q - расстояние между двумя телами, являющееся функцией от их взаимного перемещения;

\dot{q} - производная по времени от функции расстояния (скорость);

q_0 - сумма расстояний от центров тел до поверхности по линии контакта.

Определяет момент, когда включается или выключается контактная сила;

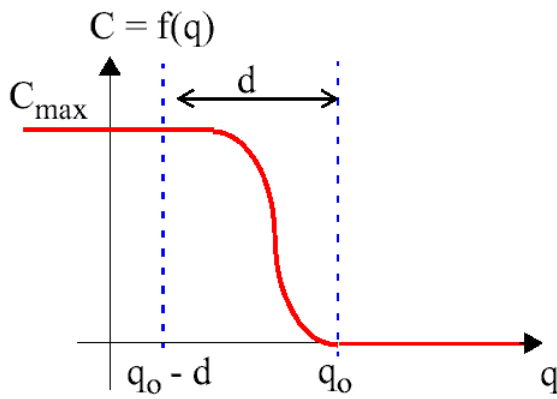
k - *Stiffness* – коэффициент жесткости;

e - *Force Exponent* – эмпирическая степень в уравнении силы, показывающая характер зависимости силы от перемещения.

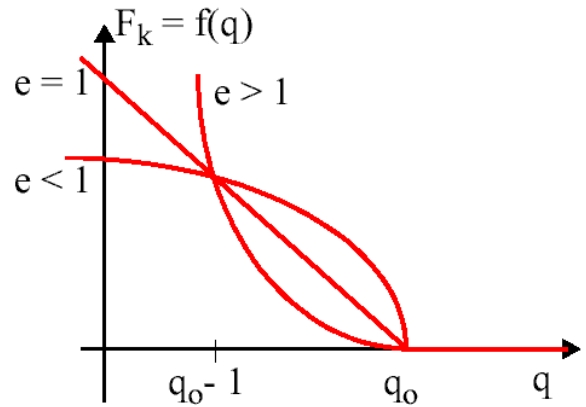
$e > 1$ - резкое возрастание силы, крутой график, большие амплитуды.

$e = 1$ - линейное возрастание силы, прямая пропорциональность.

$e < 1$ - медленное возрастание силы, пологий график, небольшие амплитуды.



Характер графика второй части уравнения ударной силы на участке *Penetration Depth*



Характер графика первой части уравнения ударной силы в зависимости от значения *Force Exponent*

c_{\max} - *Damping* – коэффициент демпфирования.

d - *Penetration Depth* – расстояние, на котором изменяется величина демпфирования.

Необходимость использовать кусочную функцию *STEP* связана с разным демпфированием при положительной и отрицательной скорости внедрения тел.

Friction Force – сила трения.

Coulomb – это кулоновская сила, т. е. обычная сила сухого трения.



Applied Force: General Force Vector (Six-Component Torque)

Задаёт все шесть компонентов сил: три силы и три момента.


Когда численная модель оснащена всеми необходимыми граничными условиями, как кинематическими (шарниры), так и динамическими (внешние нагрузки), можно приступить непосредственно к

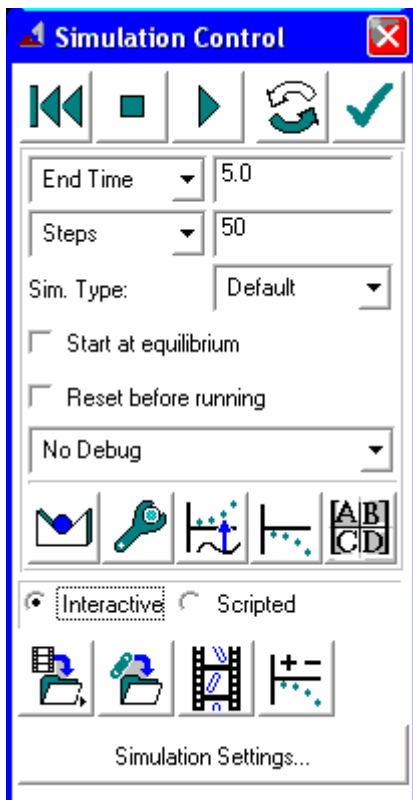
расчёту. Для этого в ADAMS существует специальный инструментарий - Simulate.

Меню Simulate

Необходимо для регулирования процесса расчета и управления им заранее, еще до отправления модели на анализ.


Interactive Controls...

Выводит окно Simulation Control, позволяющее задавать различные параметры анимации и расчета. В верхней части находится стандартная панель запуска на расчет. В нижней – специальные установки. Сохранение результатов симуляции – иконка . Используется для сравнения нескольких отличающихся результатов, например, «first», «second».




- проведение предварительного статического анализа для нахождения положения равновесия. После этого можно поставить флажок *Start at equilibrium*, чтобы расчет начинался из положения



равновесия. Иконка  позволяет сохранить текущую конструкцию и расчет в новой модели внутри этой сессии.

Флажок *Reset before running* означает, что расчет всегда проводится от нулевого времени. Иначе новый расчет начинается от времени конца предыдущего.



- выполнение начальных условий. Изменяет систему для отображения начальных условий. Например, вы можете задать начальный угол поворота во вращательном шарнире. Тогда, при нажатии на , тело повернется относительно шарнира на заданный угол. Независимо от этой иконки, расчет *ВСЕГДА* учитывает ваши начальные условия.



- позволяет получить доступ к вибрационному расчету.



- для деформируемого тела эта опция позволяет определить его моды и отобразить их на экране. Для твердого тела исследуются его колебания под воздействием внешней среды, т. е. первые 6 мод, характеризующих перемещение твердого тела (3 линейных, 3 вращательных). Для гибких тел доступны еще нормальные моды (изгибные, крутильные и т. д.). Каждый мод характеризуется определенной частотой. Применение этого метода для твердых тел предполагает предварительное проведение статического

анализа .




- расчет и экспорт матрицы линейных состояний (параметров).



- запускает панель контроля анимации. Смотри *Animation Controls...* из меню *Review*.



- запускает панель контроля линейного статического анализа. Служит для просмотра результатов .

Кнопка Simulation Settings... запускает панель контроля точности расчета и прямых настроек ADAMS/Solver. Смотри опцию ADAMS/Solver из меню *Settings*. С помощью переключателя *Scripted* можно перейти к панели Scripted Control.

Scripted Control

Запускает то же окно Simulation Control, но в упрощенном виде, с отсутствием многих настроек. Зато это окно позволяет выполнять расчет с помощью *Scripts* – подпрограмм ADAMS/Solver, в которых описывается последовательность расчета.

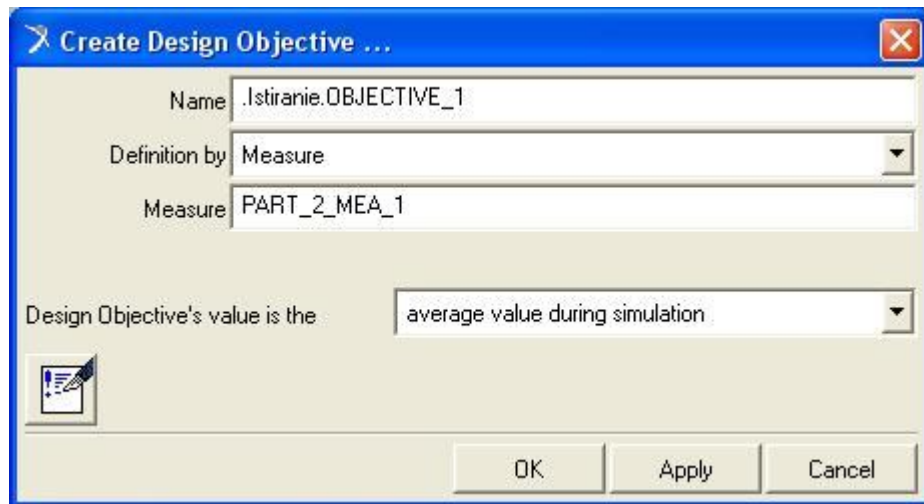
ADAMS/Solver commands позволяет:

- а) изменять параметры модели во время расчета;
- б) использовать разную величину шага при расчете для разных участков расчета;
- в) позволяет рассчитать модель при резком изменении нагрузки.

Можно импортировать такие подпрограммы из *.acf файлов.

Design Objective

Создает так называемое «*Конструкторское условие*», которое затем можно использовать в процессе оптимизации модели. Принцип работы – отбор из какого-либо массива данных требуемого значения и выдача его в алгоритм оптимизации.



Definition by задает базу данных, из которой берутся значения для сравнения.

1) **Measure** – условие использует значения какого-либо датчика (в данном случае, *PART_2_MEA_1*).

2) **Result Set Component (Request)** – используются *Запросы*, созданные инструментом *Measure – REQUEST* из меню *Build*.

3) **Existing Result Set Component (Request)** – возможно использование существующих результатов, например, *TIME* или обращение к *Запросам*.

4) **/View Function** – выбор из значений какой-либо функции.

5) **/View Variable and Macro** – выбор из значений переменной или макроса.

6) **/View Variable and Vibration Macro** – выбор из значений переменной или вибрационного макроса.

Design Objective's value is the - критерий поиска требуемого значения.

1) **Average value during simulation** – среднее значение величины в процессе расчета.

- 2) **Value at simulation end** – значение величины в конце расчета.
- 3) **Minimum value during simulation** – минимальное значение величины в процессе расчета.
- 4) **Maximum value during simulation** – максимальное значение величины в процессе расчета.
- 5) **Minimum absolute value during simulation** – минимальное абсолютное значение величины в процессе расчета.
- 6) **Maximum absolute value during simulation** – максимальное абсолютное значение величины в процессе расчета.

Следует учесть, что для **View Function, Variable, Macro** и **Vibration Macro** критерии поиска не требуются, поскольку они задаются в самом макросе в процессе его создания.

Design Constraint

Более простой вариант *Design Objective*.

Simulation Script

Модуль ADAMS/View, который служит для написания и редактирования программ расчета модели на языке ADAMS/Solver. Далее они используются в окне Scripted Control.

Опция *Simple Run* означает, что вы будете работать с текущим *Scripted*, который описывает последний расчет. Даже когда проводится интерактивный расчет, ADAMS/Solver автоматически создает для него программу, хотя и не показывает ее пользователю.

Sensor

Позволяет создавать (*new...*) и редактировать (*modify...*) виртуальный датчик, измеряющий различные величины, строящий графики и, при необходимости, прерывающий демонстрацию, в случае достижения требуемой величины измеряемым параметром. Для прерывания необходимо установить флажок *Terminate current simulation step and...*

Event Definition – поддерживает **два режима**:

а) **Run-Time Expression** – выражение, зависящее от времени. В поле *Expression* вы можете ввести это выражение. По умолчанию, *Sensor* будет измерять течение времени в вашей модели.

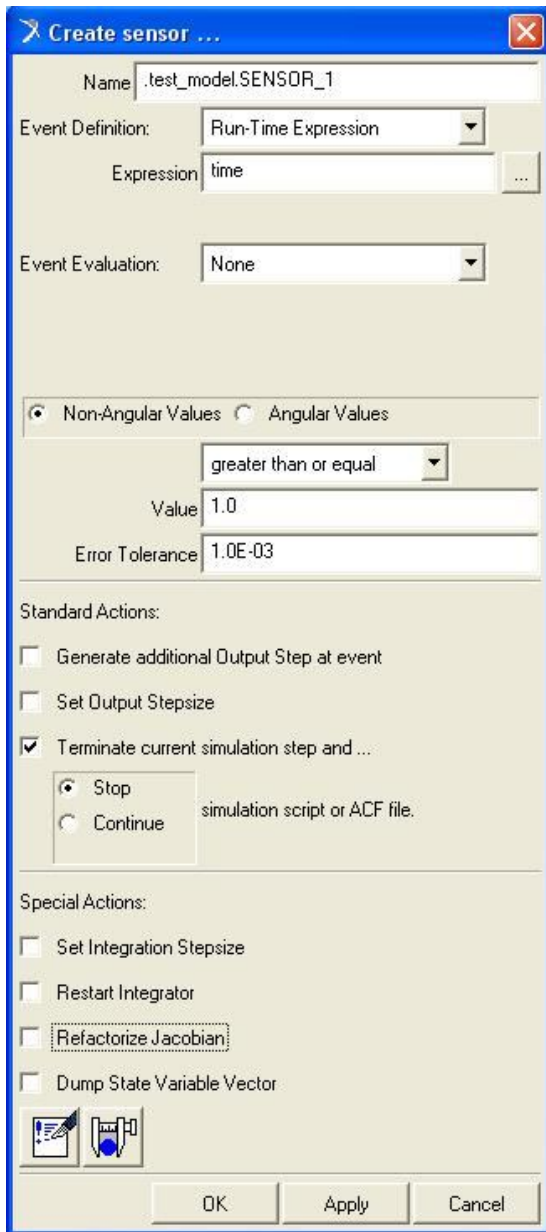
б) **Use written subroutine** – использовать подпрограмму, написанную пользователем.

Event Evaluation – поддерживает **три режима**:

а) **None** – отключено. Данный режим выбран по умолчанию.

б) **Run-Time Expression**

в) **Use written subroutine**



Angular Values или *Non-Angular Values* – является ли величина угловой или нет.

Определяет, какие единицы будут использоваться для ее измерения.

Затем идет выбор условий, при которых *Sensor* подаст сигнал. Если значение измеряемой величины:

equal – равно; greater than or equal – больше или равно; less than or equal – меньше или равно некоторому значению *Value* с допустимой погрешностью *Error Tolerance*.

Standard Actions – стандартные действия:

Generate additional Output Step at event – создание дополнительного *Output Step* (выходного шага) для события;

Set Output Step size – установка размера выходного шага;

Terminate current simulation step and... - удалить текущий шаг расчета

Stop (Continue) simulation script or ACF file – остановить или продолжить выполнение сценария расчета или ACF-файла.

Special Actions:

Set Integration Stepsize – установить шаг интегрирования;

Restart Integrator – перезагрузить интегратор;

Refactorize Jacobian – восстановление нормального состояния *Якобиана*;

Dump State Variable Vector – убирать *State*

Variable Vector (вектор изменения состояния)

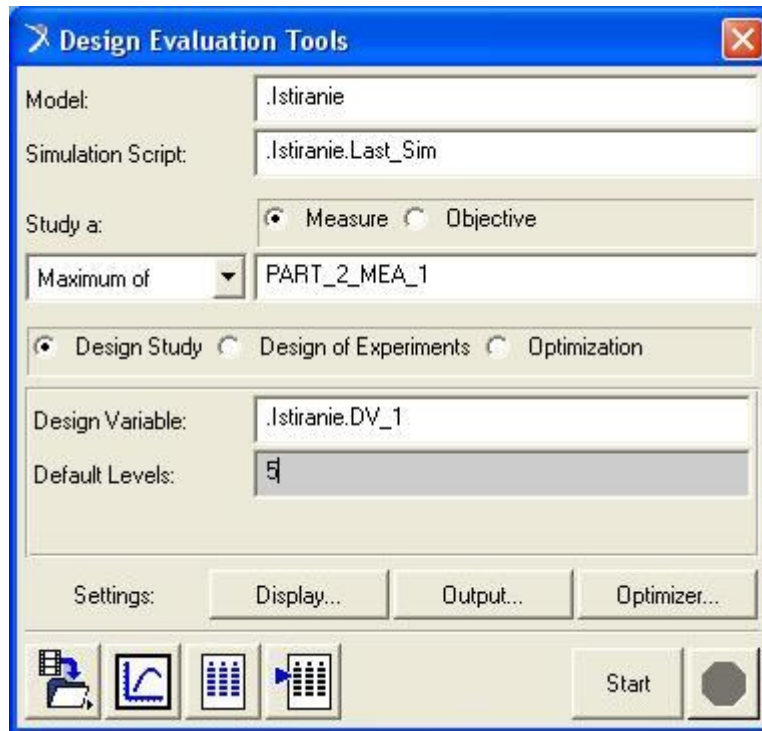
Design Evaluation

Связано с параметризацией и оптимизацией расчета на предмет автоматического достижения нужных параметров. Позволяет, автоматически изменяя значение каких-либо конструкционных переменных в заданном диапазоне, определять требуемые параметры конструкции.

Simulation Script - это алгоритм расчета, который будет повторяться требуемое число раз с различными параметрами. *Last_Sim* означает, что за образец будет взят алгоритм последнего расчета.

Study a - задает датчик (*Measure*), который будет измерять требуемые параметры. В качестве датчика может быть использовано «*Конструкторское условие*» (*Objective*). Если задается датчик, то необходимо указать, какое значение датчика использовать для оптимизации. (Например, минимальное или среднее). *Objective* уже содержит в себе одно из этих условий.

Design Variable - конструкторская переменная, значение которой будет изменять ADAMS/View.



Default Levels - число шагов, на которые разбивается диапазон изменения переменной. Поэтому также это число расчетов, которые будет проводить ADAMS/View и число точек на графике оптимизации.

В ADAMS/View предусмотрены три способа проведения автоматического изменения конструкции:

а) *Design Study* – изучение конструкции. Простейший вид оптимизации, показанный на рисунке. При этом методе изменяется только одна переменная и измеряется только один зависимый параметр конструкции. Итогом будет график зависимости требуемого параметра от значения конструкторской переменной. Вместе с ним могут быть получены графики от всех датчиков для каждого значения конструкторской переменной.

б) *Design of Experiments* – эксперименты с конструкцией. Несколько более сложный случай. Возможно измерение одного параметра, но теперь изменяться могут несколько конструкторских переменных. Здесь возможны несколько вариантов взаимодействия. По умолчанию,

результаты выводятся на одном графике, переменные изменяются поочередно.

в) *Optimization* – собственно оптимизация. Прежние методы не анализировали полученные результаты, они просто строили графики зависимости одних величин от других. *Optimization* имеет цель: найти минимальное, либо максимальное значение на графике оптимизации. При этом ADAMS/View сам выбирает число шагов и алгоритм поиска этой точки, поэтому предсказать заранее время расчета невозможно.

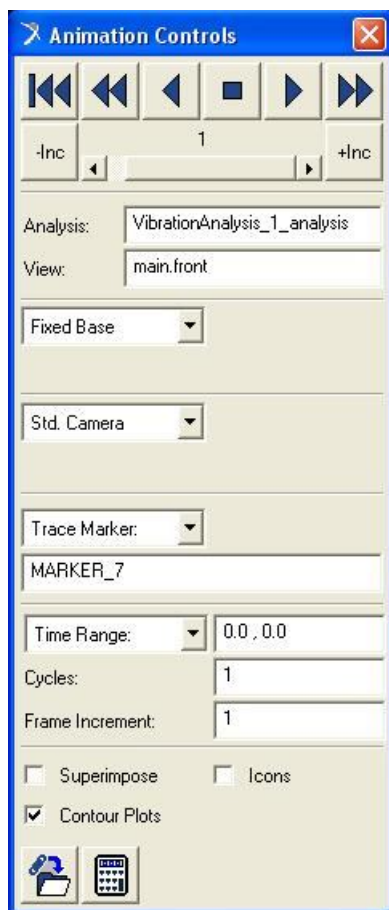
Кроме того, по окончании расчета, ADAMS/View присваивает конструкторским переменным найденные значения, что автоматически *ИЗМЕНЯЕТ* вашу модель.

Меню Review

Открывает доступ к инструментам, позволяющим детально просмотреть результаты расчетов (анимации, графики, таблицы).

Animation Control

Позволяет по кадрам или с разными скоростями проигрывать видеодемонстрации, а также сохранять их. Кроме того, трассировать перемещение маркеров, следовать камерой за объектом, отображать иконки при анимации и т. д.:



Linear Modes Controls...

Панель для просмотра форм колебаний (мод) отдельных тел или систем тел. Чтобы узнать о расчете форм колебаний, смотри *Interactive Controls...* в меню *Simulate*.

Postprocessing...

Эквивалентно нажатию клавиши F8 или иконки Main Toolbox\Plotting.

Открывает программу для построения графиков или выдачи в форме таблиц результатов демонстрации, сравнения с результатами прошлых демонстраций или данными стендовых испытаний. ADAMS/PostProcessor

посвящено отдельное руководство, так как он является внешним модулем по отношению к ADAMS/View.

Create Trace Spline

Создает сплайн, который перемещается вместе с определенной точкой относительно какой-либо модели. Этот сплайн никак не влияет на расчеты и служит лишь для более наглядного отображения на экране траектории движения детали. Однако по этому сплайну впоследствии можно строить тела с заданной геометрией. Данный метод основан на том, что для выходного звена, которое используется для построения сплайна, ADAMS/View определяет положение в любой момент времени в зависимости от кинематических параметров входных звеньев. Идеально подходит для построения кулачковых механизмов.

Solver

Позволяет настраивать параметры расчета. Одна из важнейших функций называется *Error*. Она определяет допустимую погрешность расчета системы уравнений, которая, как правило, зависит от точности создания модели и ее сложности. Если в сложной детали возникают небольшие неточности, несоосности, и выдаются сообщения об ошибке построения матрицы в какой-то момент времени, то можно попытаться увеличить этот параметр. В результате система уменьшит свои требования к точности уравнений. Если его уменьшить, точность расчета возрастет.

Содержит следующие **подразделы**:


Dynamics – параметры динамического расчета.

Kinematics – параметры кинематического расчета.

Equilibrium – параметры статического расчета.

Initial Conditions – начальные условия.

Solver Executable – общие параметры расчета.

Choice – выбор между решателями на FORTRAN и C++. FORTRAN - более старый тип решателя, а потому и более надежный. Он выбран по умолчанию. C++ более совершенен, он быстрее и позволяет получить доступ к новым функциям, не работающим под FORTRAN. (Например, соединение ). Однако он менее надежен и хуже отлажен.

Display – управление отображением результатов расчета.

Output – параметры сохранения результатов расчета.

Optimizer – управляет параметрами оптимизации.

Debugging – параметры отладки.

Contacts – параметры контакта.

Файлы ADAMS/Solver dataset описывают основные компоненты модели, используя операторы языка баз данных ADL – основного языка ADAMS/Solver. Вы можете импортировать или экспортировать эти файлы, используя ADAMS/View.

Меню Tools

Меню специальных инструментов, не вошедших в Main Toolbox.

Command Navigator...

Выдает список команд, которые можно совершить, если вы знаете, как правильно их применить. Щелкнув мышью на элементе из списка, можно совершить действие. По каждому действию можно получить краткую помощь. Например, команда *Part – Create – Rigid Body* –

mass_properties позволяет задать массово-инерционные характеристики твердого тела. Как правило, в этих командах не возникает необходимости, так как подобного результата можно добиться через специальные окна. В данном случае, через окно *Modify* твердого тела.

Database Navigator...

Выдает список, состоящий из имен всех частей, точек и результатов тестов. О каждом можно получить краткую информацию. Это основная поисковая система по данной сессии. Здесь можно найти любой элемент вашей модели. К *Database Navigator* обращаются другие команды, когда требуется найти какой-либо элемент, например, команда *Modify* из меню *Edit*. Для поиска определенных элементов используется фильтр. Например, можно вывести на экран только шарниры или только сплайны.

Function Builder...

Загружает редактор формул. Его можно также загрузить, если выбрать какой-либо параметр (например, величину силы) и щелкнуть мышью на иконке с тремя точками, расположенной рядом. Другой путь – использование команды *Function...* меню *Build*. Однако эти редакторы имеют разные наборы операций. Первый рассчитан на использование *Run Time* функций (временных или модельных), а второй только тех, которые нельзя задать для анимации модели (конструкторских функций).

Временные функции, которые вы задаете, являются математическими отношениями переменных расчета, которые напрямую определяют поведение системы. Во время симуляции многие параметры системы изменяются: время линейно возрастает, части перемещаются, сосредоточенные силы изменяются различными путями (например, синусоидально или нелинейно). *ADAMS/View* позволяет вам

манипулировать переменными, описывающими поведение системы с помощью временных функций. С их помощью вы можете задать зависимости, например, момента от $TIME^2$ или силу, равную скорости, деленной на вертикальное перемещение.

Вы можете работать с временными функциями через текстовые поля для значений, что особенно полезно при работе с сосредоточенными силами и генераторами движения. Вы можете создавать временные функции в *Function Builder* и вставлять их в текстовые поля значений.

Когда вы вводите в *Function Builder* функцию длиннее 80 символов в одну строку, ADAMS/View не соглашается и сообщает, что ваша функция слишком длинна. Если функция длиннее 80 символов, необходимо писать ее в несколько строк.

Существуют следующие **основные виды временных функций**:

Displacement Functions – функции перемещений. Все углы здесь измеряются в радианах.

Velocity Functions – функции скоростей. VR–скорость одного маркера относительно другого.

Acceleration Functions – функции ускорений.

Contact Functions – контактные функции.

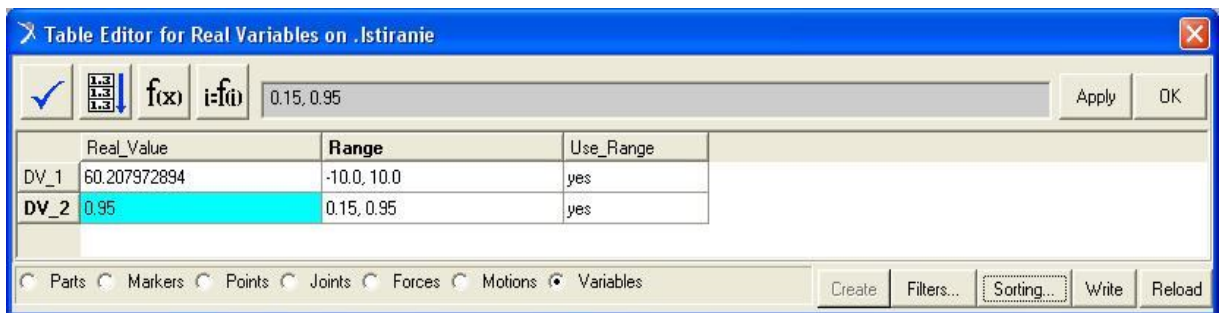
Spline Functions – сплайны.

Table Editor...

Точки можно строить как отдельно, так и с помощью *Point Table*, где задаются координаты необходимых точек. Вернувшись в таблицу, можно

редактировать положение точек. При этом вслед за точками перемещаются или изменяют конфигурацию детали, к ним привязанные.

Кроме того, в этом окне можно смотреть и изменять параметры любых табличных данных, например, значений пользовательских переменных (а также характеристики частей, маркеров, шарниров, сил и генераторов движения). Можно сказать, что это встроенный табличный редактор, подобный MS Excel:



На данном рисунке в *Table Editor* выведены все переменные модели.

Measure Distance...

Выдает точное расстояние между двумя точками. Текущее или в любой момент расчета. Позволяет записать это значение в файл.

Aggregate Mass...

Выдает следующие характеристики системы тел, а также всей конструкции: общую массу, положение центра масс, моменты инерции. При этом ясно, что для одного тела все эти параметры совпадут с его собственными характеристиками. Расчет ведется в активной системе координат.

Merge Two Models...

Соединение двух моделей. Позволяет в одном файле создавать различные модели с последующим наложением.

Model Topology Map

Выдает список всех тел конструкции с указанием их соединений с другими телами. Можно отдельно просмотреть только информацию о телах или только информацию о соединениях.

Model Verify...

Проверяет правильность модели. Как одно из действий, в этом процессе вычисляется число степеней свободы (*DOF*). Общее количество степеней свободы в модели равно разности между числом позволенных движений частей и числом активных связей в модели. Когда вы выполняете расчет модели, ADAMS/Solver вычисляет число степеней свободы в вашей модели, поскольку оно определяет характер алгебраических уравнений движения, которыми описывается ваша модель.

«There are no redundant constraint equations» - «нет дублирующих связей». Лучше, если их нет, поскольку лишние дублирующие связи ADAMS/View отключает по своему выбору, и поведение конструкции может не соответствовать ожиданиям.

System Command...

Открывает окно, в которое можно ввести системную команду ADAMS. Позволяет напрямую управлять процессами в программе:



Имеет следующие опции:

Write Output to Command Windows and Logfile – результат выполнения команды заносится в командное окно и журнал.

Write Output to Info Window – результат, кроме этого, записывается еще и в информационное окно.

Log File...

Показывает текстовый файл, в котором хранятся записи обо всех действиях, которые вы совершили в процессе работы. Позволяет выборочно просматривать его содержимое с помощью специальных фильтров.

Dialog Box

Предназначен для создания собственных меню и панелей инструментов, а также их редактирования. Элемент внутреннего программирования.

Создание модели, задание граничных условий и действующих нагрузок, а также проведение расчета в ADAMS/View еще не обеспечивает окончательного решения задачи определения кинематических и динамических параметров объекта исследования. Последним, но одним из главных этапов любого расчета, является правильный анализ и

интерпретация результатов. В ADAMS для решения этой задачи предназначен специальный модуль – ADAMS/PostProcessor.

Меню File (Операции с файлам) ADAMS/PP

Меню файл несколько отличается от привычного набора команд. Например, в нем отсутствуют опции сохранения и загрузки. Это объясняется тем, что PostProcessor – интегрированный модуль и работает с данными, поставляемыми ему ADAMS/View, ADAMS/Solver и другими модулями.

Replace Simulations

Позволяет добавить или удалить результаты симуляции.

Import

Импорт данных. В общих чертах импортируемые файлы PostProcessor совпадают с ADAMS/View. Но есть и отличия:

Report – позволяет загружать файлы в формате *.htm и *.txt, которые могут содержать в себе результаты расчета (данные о деталях, графики, анимации).

Vibration Results – загружает результаты вибрационного расчета.

Export

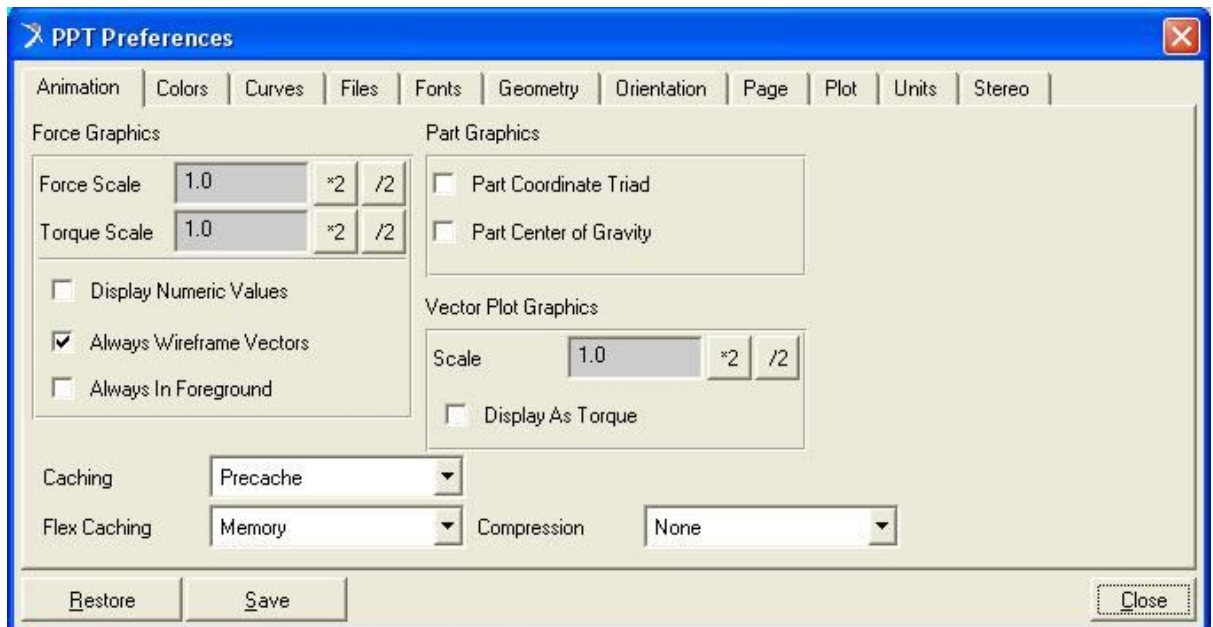
Экспорт данных. Здесь отсутствует формат для передачи нагрузок в FEM-пакеты, зато есть формат HTML Report, который позволяет сохранять все результаты расчета в виде набора html-страниц.

Меню Edit (Редактирование)

Служит для редактирования графиков и анимаций. Позволяет задавать основные настройки всей рабочей области.

Preferences

Настройка характеристик графиков и анимаций. На рисунке показана панель управления анимацией:



Force Graphics – это панель настройки отображения сил. В нее входят:

Force Scale – масштаб векторов сил (при анимации силы могут отображаться векторами, длина которых пропорциональна величине силы).

Torque Scale – масштаб векторов моментов.

Display Numeric Values – отобразит на экране числовые значения сил и моментов.

Always Wireframe Vectors – включает/выключает отображение сил при анимации.

Always In Foreground – позволяет всегда отображать вектора сил на переднем плане.

Помимо панели анимации позволяет управлять:

Colors – цвета.

Curves – кривые. Имеются в виду линии графиков. Для них задаются:

Color – цвет. *Auto Color* означает, что цвета для линий графиков назначаются по умолчанию. Если на одном поле изображать несколько графиков, то первый будет красным, второй синим и т.д.

Style – тип. *Solid* – сплошная толстая. *Dash* – штриховая с крупными штрихами. *Dot* – штриховая с мелкими штрихами. *DotDash* – штрихпунктирная. Если выбрать *Auto Style*, то первый график в поле будет сплошным, второй штриховым и т.д. Комбинацией типов и цветов

ADAMS добивается, чтобы стиль каждой кривой в одном поле был различным.

Symbol – ADAMS отмечает точки на графике каким-либо значком, например, « x ». По умолчанию установлено *none*, т.е. точки не отмечаются. При выборе *Auto Symbol* тип значков выбирается автоматически.

Files – файлы. Подразумевается управление чтением командных файлов ADAMS (*.cmd).

Fonts – шрифты.

Geometry – отображение геометрии.

Orientation – ориентация осей на экране. Опция *Up Axis* позволяет задать расположение шкалы верхней оси. *+Y* – опция по умолчанию для графиков. Шкала возрастающая, отображает функцию. *Forward Axis* позволяет задать положение нижней шкалы. *+Z* – опция по умолчанию. Также, по умолчанию, здесь отложено время симуляции. Шкала возрастающая.

Page – страница. Под «страницей» в PostProcessor подразумевается набор анимаций, графиков и настроек, которые выводятся на экран за один раз. Вы всегда видите на экране только одну, текущую, страницу. В одной сессии может быть много страниц. Например, с различными графиками.


Plot – управление окном графика.

Units – выбор системы единиц.

Stereo – стереорежим, недоступный для многих мониторов.


Меню View (Отображение)

Expand View

Область отображения результатов может делиться на несколько окон (максимум шесть), в каждом из которых будет выведен свой результат (набор графиков или анимация). Команда *Expand View* позволяет расширить одно такое окно на всю область. Это изменение является обратимым и дублируется кнопкой  на Main Toolbar.

Swap View

Позволяет переносить графики и анимации из одного окна на другое в пределах области отображения результатов. Для этого щелкните на окне с данными, затем на другом окне, и данные переместятся в новое окно.

Дублируется кнопкой  на Main Toolbar. Чтобы перенести данные с одной страницы на другую, можно воспользоваться командой Copy.

Clear View

Очистка выбранного окна результатов.

Fit Plot

Возвращение графика к исходному размеру.

Zoom Plot

Позволяет увеличить часть графика.

Load Animation

Загрузка в данное окно анимации.

Load Mode Shape Animation

Загружает анимацию формы колебаний, которая определяется через меню Simulate ADAMS/View.

Load Plot





Загрузка в данное окно графиков.

Load Report

Загружает в выбранное окно сведения о каком-либо файле. Для текстового файла это может быть его содержание.

Page

Позволяет осуществлять операции со страницами.


- а) *New* – создание новой страницы, дублирует .
- б) *Display* – отображение определенной страницы.
- в) *Page layouts* – разбиение области построения страницы на несколько окон, дублирует .
- г) *First* – отображение первой страницы.
- д) *Previous* – переход на предыдущую страницу, дублирует .
- е) *Next* – переход на последующую страницу, дублирует .
- ж) *Last* – отображение последней страницы.
- з) *Animate page* – запуск всех анимаций на странице.


Toolbars

Позволяет включать и отключать панели инструментов.

Main toolbar – главная панель инструментов





Curve Edit Toolbar – панель редактирования графиков, подробнее рассматривается далее. Является составной частью Main Toolbar, открывается кнопкой . По умолчанию неактивна.

Statistics Toolbar – окно данных о графике. Является составной частью Main Toolbar, открывается кнопкой . По умолчанию неактивно.

Status Toolbar – панель в нижней части экрана, куда выводится информация о необходимых действиях и прочая текущая информация.

Treeview – стандартная панель. Представляет собой древо конструкции.

Model (модель) содержит в себе *page* (страницы). Они содержат в себе *Plots* (окна с графиками), которые в свою очередь содержат оси, линии графиков и т.д. Включение/отключение панели дублируется кнопкой .

Dashboard – панель выбора результатов расчета. О ней подробно рассказывается далее. Включение/отключение панели дублируется кнопкой .

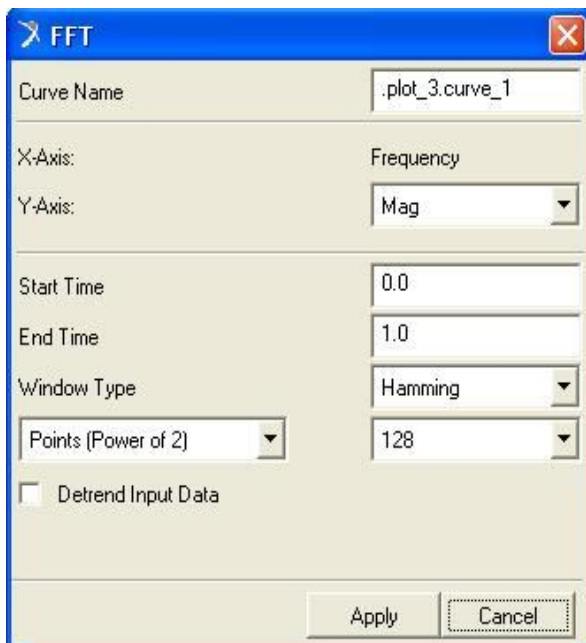
Settings – позволяет настраивать положение панелей инструментов на экране.

Command Window

Отображает командное окно.

Меню Plot (Графики)

FFT – Fast Fourier Transform



Быстрое преобразование Фурье позволяет анализировать график, строить зависимость параметров от частоты. Данная команда создает двумерный график. По оси Y (Y-Axis) можно вывести:

- **Mag** (Амплитуда)

- **Phase** (Фаза)

- **PSD** (Распределение энергии по спектру частот)

Доступны следующие *Window Type* [6]:

- **Rectangular**

- **Hanning:**

$$W_j = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi j}{N-1} \right) \right]$$

- **Hamming:**

$$W_j = 0.54 - 0.46 \cos \left(\frac{2\pi j}{N} \right)$$

- **Welch:**

$$W_j = 1 - \left(\frac{j - \frac{1}{2}(N-1)}{\frac{1}{2}(N+1)} \right)^2$$

- **Parzen:**

$$W_j = 1 - \left| \frac{j - \frac{1}{2}(N-1)}{\frac{1}{2}(N+1)} \right|$$

- **Bartlett:**

Для n нечетных:

$$w[j] = \begin{cases} \frac{2(j-1)}{n-1}, & 1 \leq j \leq \frac{n+1}{2} \\ 2 - \frac{2(j-1)}{n-1}, & \frac{n+1}{2} \leq j \leq n \end{cases}$$

Для n четных:

$$w[j] = \begin{cases} \frac{2(j-1)}{n-1}, & 1 \leq j \leq \frac{n}{2} \\ \frac{2(n-j)}{n-1}, & \frac{n}{2} + 1 \leq j \leq n \end{cases}$$

- **Blackman:**

$$w[j] = 0.42 - 0.5 \cos\left(2\pi \frac{j-1}{n-1}\right) + 0.08 \cos\left(4\pi \frac{j-1}{n-1}\right), j = 1, \dots, n$$

- **Triangular:**

Для n нечетных:

$$w[j] = \begin{cases} \frac{2j}{n+1}, & 1 \leq j \leq \frac{n+1}{2} \\ \frac{2(n-j+1)}{n+1}, & \frac{n+1}{2} \leq j \leq n \end{cases}$$

Для n четных:

$$w[j] = \begin{cases} \frac{2j-1}{n}, & 1 \leq j \leq \frac{n}{2} \\ \frac{2(n-j+1)}{n}, & \frac{n}{2} + 1 \leq j \leq n \end{cases}$$

FFT 3D

Аналогично предыдущей команде, но для трехмерных графиков.

Code plots

Сложные операции с графиками с привлечением матриц и команд ADAMS/View.

Create Scatter Plot with Eigen Table

Создает окно графика с результатом линейного расчета форм колебаний, номера мод, частоты, коэффициенты демпфирования. Точки на

графике – это разброс частот. Имеет действительную (*Real*) и мнимую (*Imaginary*) части. Как правило, каждая пара точек отражает собственную частоту колебаний системы.

Меню Tools (Инструменты)

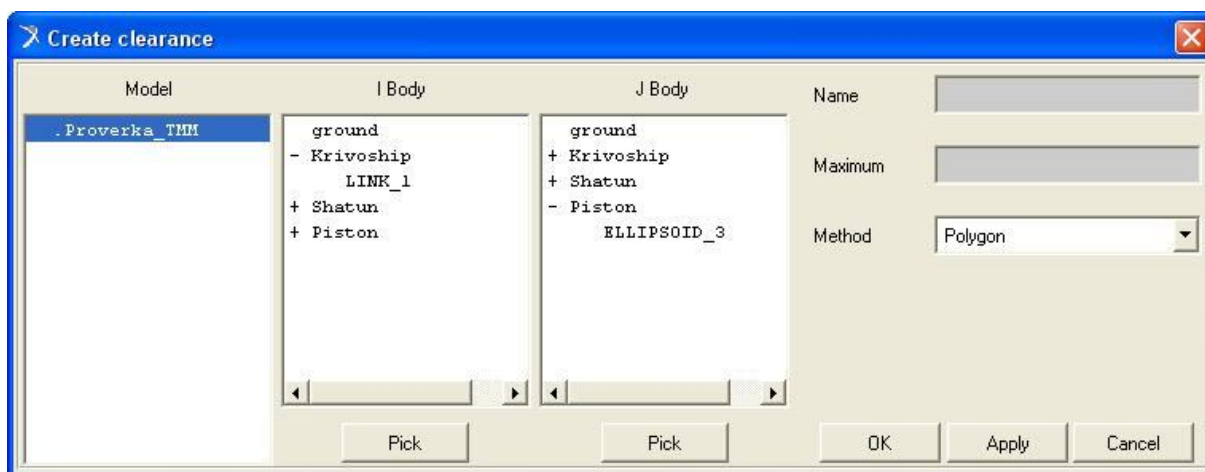
Clearance

Расчет зазоров в телах в процессе движения. Для расчета используются данные текущей симуляции.

Сначала, используя подменю *Create*, вы должны указать, между какими геометриями будет производиться измерение. Здесь *I Body* – активное тело, *J Body* – пассивное (условно-неподвижное) тело. В качестве метода (Method) расчета вы можете указать:

- **Polygon** – использовать полигоны.

- **Vertex** – использовать вершины.



Затем, используя подменю *Compute*, произвести расчет. Все параметры расчета берутся из указанной вами симуляции.

Если есть такая необходимость, результаты расчета можно записать, используя подменю *Write*.

Главная панель инструментов (Main Toolbar)

Позволяет произвести большую часть операций с графиками и анимацией. Она имеет два варианта. Первый предназначен для работы с графиками:



Второй вариант служит для работы с анимацией:



Общие кнопки:

Выбор вида панели. Возможно:

Plotting – для графиков.

Animation – для анимации.

Report – для сообщений.

Plot3D – для трехмерных графиков.



- Import File

Позволяет импортировать файлы. Дублирует соответствующую команду меню File.



- Reload Simulations

Перезагрузка расчетов.



- Print

Запускает менеджер печати.

 и  - Undo и Redo

Позволяют отменять и возвращать отмененные действия.

 - Reset Animation

Перемотка анимации на начало.

 - Animate Page

Запуск анимации.

 - Select


Выбор элемента.

 - Previous Pages

Переход на предыдущую страницу.

 - Next Pages

Переход на следующую страницу.

 - Create a new page

Создание новой страницы. Под «страницей» в ADAMS/PostProcessor подразумевается набор анимаций, графиков и настроек, которые выводятся на экран за один раз. Вы всегда видите на экране только одну, текущую, страницу. В одной сессии может быть много страниц. Например, с различными графиками.



- Delete the current page

Удаление текущей страницы.



- Toggle treeview visibility

Включение/выключение отображения дерева модели.



- Toggle dashboard visibility

Включение/выключение панели выбора результатов расчета.



- Page layouts

Разбиение области отображения на несколько окон. От 1 до 6. В каждом из окон могут быть свои данные. Например, на одном – график перемещения тела, а на другом – его скорость. Если в одном из окон содержится анимация, то на графиках появляется указатель времени, синхронизированный с данной анимацией. Однако некоторые графики не зависят от времени ни напрямую, ни косвенно (пример косвенной зависимости, построение перемещения от угла поворота, который сам является функцией от времени). На них указатель времени не появляется.



- Expand View Layout

Расширение окна на всю область построения. Или, что то же самое, свертывание всех остальных окон в области построения. Этот процесс обратим: достаточно еще раз нажать на эту кнопку, чтобы закрытые окна развернулись.



- Swap View

Перенос графиков или анимации в новое окно. Щелкните на первом окне, затем на втором. Данные переместятся во второе окно.



- Return to modeling environment

Возврат в программу построения модели.

Далее приведены **кнопки, доступные в окне анимации:**



- Dynamic View Rotation

Позволяет поворачивать изображение.



- Dynamic View Translation

Позволяет перемещать изображение в текущей плоскости.



- Center

Помещение выбранной детали в центр.



- View Zoom

Увеличение выбранного фрагмента окна.



- View Fit

Возвращение к исходному размеру для графиков. Для анимации – подбор масштаба таким образом, чтобы на окне разместилась вся модель.



- View orientations

Выбор видов детали: фронтальный, справа, сзади и т.д.



- Wireframe/Shaded toggle for current view

Каркасный/объемный режим отображения деталей.



- Toggle icon visibility for current view

Включает/выключает отображение иконок на модели.

Далее приведены **кнопки, доступные в окне графиков:**



- Add text

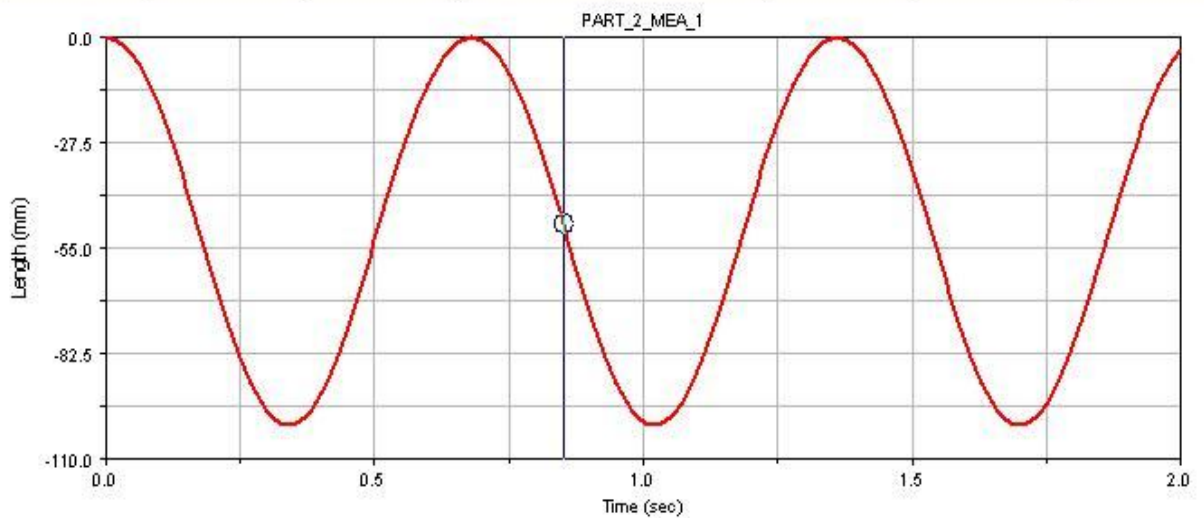
Позволяет добавлять на график текст.



- Plot tracking

Эта кнопка открывает доступ к Statistics Toolbar, панели для отображения информации о графиках. Общий вид панели:

X:	Y:	Slope:	Min:	Max:	Avg:	RMS:	# of Points:
0.85	-48.234	-465.1655	-101.0399	0.0	-50.1447	61.4161	201



Эта панель выводит следующую информацию о графике:

- а) X – координата точки X на графике. Точку задает пользователь, перемещая ее мышью вдоль графика. В данном примере по оси X расположено время симуляции (расчета) *TIME*. Оно линейно возрастает.
- б) Y – значение координаты Y этой точки. В данном случае это поступательное перемещение тела в мм.
- в) Slope – наклон графика. Горизонтальный участок графика имеет нулевой наклон. Убывающий – отрицательный. Возрастающий – положительный.
- г) Min – минимальное значение координаты Y графика.
- д) Max – максимальное значение координаты Y графика.
- е) Avg – среднее значение графика по оси Y .
- ж) RMS – среднеквадратичное отклонение.
- з) # of Points – число расчетных точек на графике.



- Curve edit toolbar

Эта панель позволяет производить различные математические операции с графиками. Результирующие кривые по умолчанию отображаются на том же поле. Внешний вид панели:



Она содержит в себе следующие кнопки:



- сложение двух кривых. Выберите этот инструмент, затем щелкните на первой кривой, следом на второй. На том же поле отобразится суммарная кривая.



- вычитание двух кривых. Первая – та, из которой вычитают.



- перемножение двух кривых.



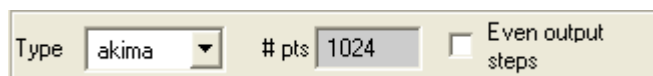
- эта кнопка позволяет найти абсолютное значение всех точек кривой и построить график, содержащий в себе только положительные значения. Визуально это приведет к зеркальному отражению отрицательной части кривой относительно оси X.



- изменяет знак всех точек кривой. График зеркально отображается относительно оси X.



- интерполяция кривой. Позволяет выбрать тип интерполяции (*Type*). В данном случае это *Akima*. Подробнее о способах интерполяции смотри описание ADAMS/View:



- масштабирование графика по вертикальной оси. Масштабирование проводится умножением значений графика на величину масштаба (*Scale*), который вы задаете.



- смещение кривой по вертикальной оси на заданную вами величину (*offset*).



- совмещение начальных точек двух кривых. Сначала выбирается кривая для переноса, затем базовая кривая, которая остается неподвижной.



- перенос начала графика в ноль. Особенно удобно при сравнении нескольких графиков в одном поле.



- интегрирование данного графика. Результирующий график строится на том же поле со своей шкалой Y. Если известна размерность графика, то ADAMS автоматически определяет размерность интегральной кривой.



- дифференцирование данного графика. Результирующий график строится на том же поле со своей шкалой Y. Если известна размерность графика, то ADAMS автоматически определяет размерность производной.



- создание по кривой сплайна. Удобно тем, что созданный сплайн автоматически записывается в Database и может использоваться в ADAMS/View, скажем, для задания законов изменения величин.

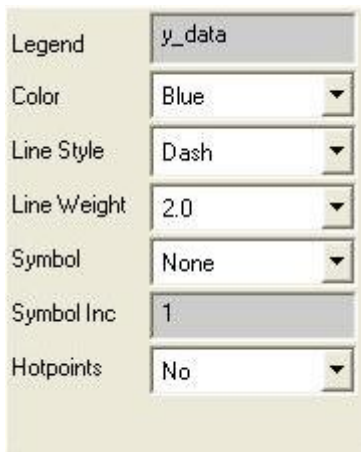


- отображение на кривой расчетных точек, двигая которые мышью, вы можете вручную изменять вид графика.



- фильтрация кривых по заданным вами законам. Здесь можно использовать уже созданные вами фильтры.

Редактор свойств (Property Editor)



Редактор свойств позволяет настраивать параметры различных объектов. Поскольку разновидностей объектов довольно много, опции редактора свойств могут сильно различаться. На данном рисунке показан редактор свойств для графика.

Legend – подпись кривой.

Color – цвет.

Line Style – тип линии.

Line Weight – толщина линии.

Symbol – символы.

Hotpoints – горячие точки на графике, перемещая которые можно изменять форму кривой.

Для объекта Plot (поле графика), имеются следующие вкладки:

General – общие. Здесь настраивается:

Title – заголовок.

Subtitle – подзаголовок.

Analysis – отображение названия расчета.

Date Stamp – отображение времени проведения расчета.

Legend – выводит названия кривых.

Zero line – выводит нулевую линию.

Border – настройка рамки.

Grid – настройка крупной сетки.

2nd Grid – настройка мелкой сетки.

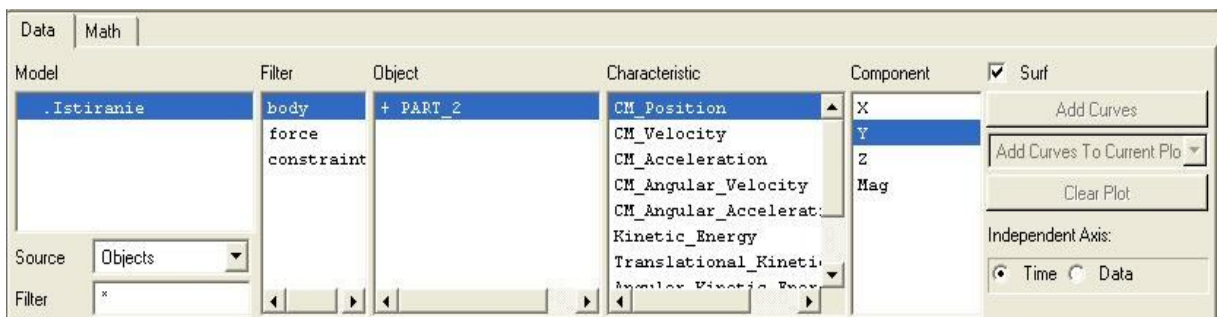
Панель выбора результатов расчета (Dashboard)

Служит для связи с Database и позволяет обращаться к данным, полученным в результате расчета. Именно на этой панели вы выбираете, что именно надо изобразить, в то время как на остальных вы выбирали только то, как это должно выглядеть.

Поскольку ADAMS/PostProcessor работает с двумя основными, и в корне различными, видами данных: графиками и анимацией, панель выбора результатов также имеет два различных вида.

Панель выбора результатов расчета для графиков

Общий вид панели:



Первое действие, которое нужно совершить при работе с Dashboard – выбрать тип результатов, с которыми придется работать. Для этих целей предусмотрено поле *Source* (Источник). Это связано с тем, что каждый тип данных хранится в отдельной части Database, а часто, даже получен разными видами расчета и разными модулями.

В этом поле вы можете выбрать следующее:

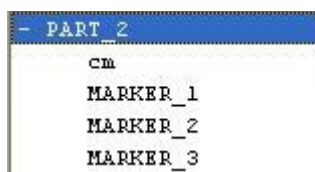
Objects – объекты. Основной объект в вашей сессии – это модель. Если она одна, то она выбирается автоматически. Если их несколько, укажите нужную в поле *Model*. На данном рисунке модель называется *.Istiranie*. Модель, в свою очередь, состоит из:

- а) Body – тел.
- б) Force – сил.
- в) Constraint – соединений.

Вы можете выбрать их в поле *Filter*. На данном рисунке выбрано *body* – тела. В поле *Object* появится список всех элементов, тип которых вы указали. В данном случае, это список всех тел в модели. Видно, что в модели всего одно тело, которое называется *PART_2*.

Каждый элемент имеет определенные характеристики, которые измеряются автоматически.

Т.к. перемещение тела – это вектор. Следовательно, можно разложить его на проекции по осям, а можно узнать его амплитуду. Для этих операций служит поле *Component*. В данном случае выбрана проекция вектора перемещения на вертикальную ось Y.



Напротив имени части (*PART_2*) стоит знак «+». Он означает, что тело является составным. Любое тело содержит в себе маркеры. Действительно, даже простейшее тело имеет хотя бы один маркер - маркер центра масс. Но, как правило, маркеров в теле больше, так как тело взаимодействует с

окружающим миром только через маркеры. Даже для соединения тел на них создаются специальные маркеры. В данном теле четыре маркера. Для маркеров имеются свои характеристики:

1) *Total_Force_On_Point* – связано с особенностью приложения сил. Допустим, мы создали *Маркер_1* и захотим приложить к нему силу. Сила задается в виде вектора. Как только мы прикладываем силу к *Маркеру_1*, в той же точке возникает *Маркер_2*, который является началом вектора силы. Затем мы указываем способ перемещения (допустим, фиксировано в пространстве). Тогда сила действует по линии, которую мы укажем, а *Маркер_3* располагается на «земле». При этом *Маркер_1* принадлежит телу, *Маркер_2* считается принадлежащим телу и вектору силы одновременно, а *Маркер_3* принадлежит только вектору силы.

Тогда наблюдается такая картина. В *Маркере_1* сила является зависящей от положения, т.е.

$$\text{Total_Force_On_Point} = 0,$$

$$\text{Total_Force_At_Location} = \text{force}.$$

В *Маркере_2* и *Маркере_3* сила является зависящей от положения и одновременно действующей непосредственной на маркер, поэтому

$$\text{Total_Force_On_Point} = \text{force},$$

$$\text{Total_Force_At_Location} = \text{force}.$$

2) *Total_Torque_On_Point* – момент, действующий непосредственно на точку.

3) *Total_Force_At_Location* – сюда относятся силы, действующие на маркер из-за его положения. Любые силы, которые передаются на этот маркер от

других маркеров или тел. Силы, действующие на это тело в других маркерах, или *ГРАВИТАЦИЯ* в эти силы не включаются. Поэтому, если тело просто падает $Total_Force_At_Location = 0$, несмотря на действие силы тяжести.

4) $Total_Torque_At_Location$ – предыдущая сила, умноженная на плечо.

5) $Translational_Displacement$ – перемещение в ЦСК.

6) $Translational_Velocity$ – скорость в ЦСК.

7) $Translational_Acceleration$ – ускорение в ЦСК.

8) $Angular_Velocity$ – угловая скорость относительно центра масс.

9) $Angular_Acceleration$ – угловое ускорение относительно центра масс.

Для фильтров (*filter*) FORCE (силы) и CONSTRAINT (соединения) большинство данных находится аналогично. Можно вывести данные для самих *СИЛ* и *СОЕДИНЕНИЙ*, а можно подробнее рассмотреть каждый маркер, входящий в них. Отличаются только характеристики:

1) $Element_Force$ – величина силы в направлении осей, [newton].

2) $Element_Torque$ – величина момента по осям. Следует заметить, что для сил эти величины однозначно определяются типом и величиной, которые вы задаете, [newton*meter].

3) $Translational_Displacement$ – это перемещение маркера тела, к которому приложена сила, может быть с обратным знаком, [meter].

4) $Ax_Ay_Az_Projection_Angles$ – эта функция измеряет углы, на которые отклоняется вектор силы, от соответствующих осей маркера, на котором он закреплен. Причем делает это лишь в том случае, если сила меняется по

величине, т. е. как бы определяет углы, на которых сила менялась. При этом ноль градусов совпадает с осью ЦСК, [deg].

а) Если сила не меняется, углы равны 0.

б) Если вектор поворачивается вместе с телом, углы равны 0.

5) *Translational_Velocity* – скорость маркера, к которому приложена сила, может быть с обратным знаком, [meter/sec].

6) *Translational_Acceleration* – ускорение маркера, к которому приложена сила, может быть с обратным знаком, [meter/sec**2].

7) *Angular_Velocity* – угловая скорость маркера, к которому приложена сила, может быть с обратным знаком, [deg/sec].

8) *Angular_Acceleration* – угловое ускорение маркера, к которому приложена сила, может быть с обратным знаком, [deg/sec**2].

Вторым типом данных, которые выбираются в поле *Source*, являются **Measures** (датчики). О создании датчиков и их типах смотрите в описании ADAMS/View. Измеряемые данные и компоненты задаются при создании датчика. Поэтому вам нужно лишь выбрать нужный датчик в окне Measure, чтобы вывести его график.

Result Sets – третий тип данных, выбираемый в поле *Source*. Здесь содержатся только основные данные по расчету, но не разделенные по типам. Здесь есть основные сведения о частях, датчиках, силах и шарнирах. Отсутствуют данные о маркерах. Самое главное, что в этом разделе вы можете посмотреть все данные, которые не входят ни в какую классификацию ADAMS/PostProcessor. Для ADAMS/View это могут быть, например, данные о напряжениях в выбранном узле в процессе расчета.

В окне *Result Set* выберете требуемый объект. Для частей, сил и шарниров вы можете выбрать в разделе *Component* тип данных, например *FX* – сила по оси *X*. Для датчиков – здесь только одна величина – их значение (*Q*). Для специальных данных эта панель содержит индивидуальные параметры.

Помимо трех основных, в поле *Source* можно выбрать ряд дополнительных данных для вибрационного расчета.

- а) *System Modes* – формы колебаний системы.
- б) *Frequency Response* – частотный отклик.
- в) *Transfer Function* – передаточная функция.
- г) *PSD* – распределение энергии колебаний по спектру в виде сплайна.
- д) *Modal Coordinates* – модальные координаты.
- е) *Modal Participation* – модальное участие.

Допустим, вы выбрали данные, которые хотите отобразить. Чтобы вывести на экран текущий график, поставьте флажок *Surf*. Тогда каждый новый график будет выводиться в том же окне вместо предыдущего. Достаточно только выбрать его.

Если же вам требуется отобразить на одном поле несколько графиков, то воспользуйтесь кнопкой Add Curves. Для этого отключите флажок *Surf*, выберете новый график и щелкните Add Curve. Здесь вам доступны три опции. Если выбрана опция *Add Curves to Current Plot*, то новый график появится вместе с предыдущим в том же окне. Если он построен в других координатах, то для него отобразится отдельная шкала.

Если выбрана опция *One Curve per Plot*, то каждый график будет появляться в отдельном окне. Выбор *One plot per*

Object доступен только для *Object* (объектов) и означает, что каждый объект будет иметь отдельный график.

Если вас не устраивает отображение графиков от времени (*TIME*), то вы можете построить их от любых других данных, которые могут изменяться во времени. Это, например, угол поворота вала, сила реакции в опоре или скорость.

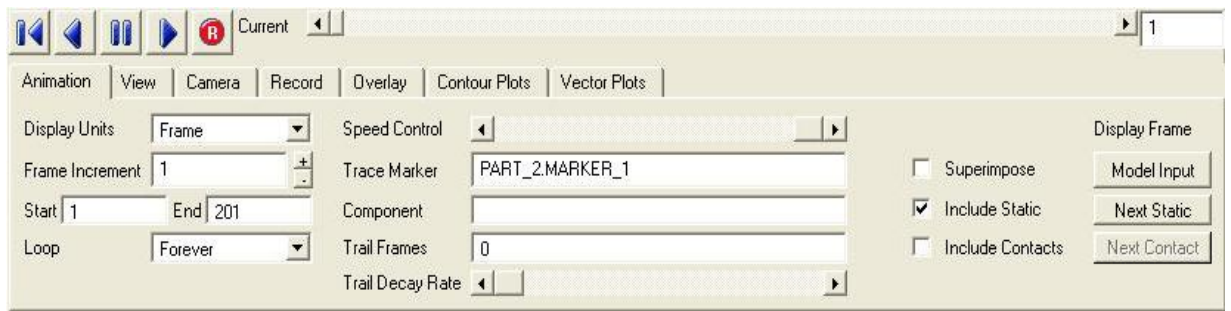
Для этого существует параметр *Independent Axis*. По умолчанию выбрано время (*TIME*). Переставьте точку на *Data* (данные). В появившемся окне выберите параметр, который будет отложен по оси абсцисс. После этого перестройте требуемые графики, убрав и поставив флажок *Surf*.

Вкладка Math позволяет изменять данные о графиках, а также создавать новые графики напрямую, указав в соответствующих полях тип данных, значения по осям и подписи. На практике используется редко.

Панель выбора результатов расчета для анимации

Эта панель управляет настройками анимации. Конечным результатом работы этой панели является видеоклип, отображающий поведение модели.

Общий вид панели:



Кнопки панели:



- перемотка анимации на начало;



- просмотр анимации в обратном направлении;



- пауза;



- запуск анимации;



- кнопка начала записи. Когда она нажата – идет запись. При повторном щелчке запись прерывается.

Эта панель имеет семь основных вкладок. Для некоторых специальных режимов отдельные вкладки неактивны.

Animation

Основная вкладка настройки анимации. Здесь можно выбирать следующие параметры:

Display Units – отображение на экране типа единиц, на которые делится ваша анимация. Это могут быть кадры (*frame*) или время (*time*). Отображается просто для удобства контроля за анимацией.

Frame Increment – шаг кадров. Показывает, как проигрываются кадры. Если равен 1, то последовательно проигрываются все кадры. Если равен 2,

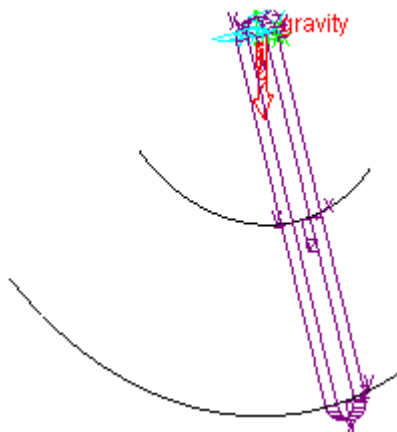
то проигрываются кадры 1, 3, 5, 7 и т. д. Увеличение шага ускоряет анимацию и уменьшает размер видеоклипа.

Start и *End* – начальное и конечное время симуляции. Это *НЕ* время, которое она отображается. Это промежуток *МОДЕЛЬНОГО* времени, который мы будем просматривать. Например, вал поворачивается за 0.04 секунды, и мы пишем *Start* = 0 и *End* = 0.04. Тогда мы увидим *ОДИН* поворот вала, даже если анимация будет идти целый час (что вполне возможно при большом числе шагов расчета *Steps* из ADAMS/View).

Loop – цикл. Настройка числа повторений анимации. По умолчанию выбрано *Forever*, т.е. бесконечное повторение.

Speed Control – скорость анимации. Позволяет уменьшать скорость анимации (увеличить ее можно с помощью шага кадров). Если *Frame Increment* = 1, а анимация все еще слишком быстрая, передвиньте ползунок влево.

Trace Marker – позволяет в процессе анимации рисовать траектории выбранных маркеров.



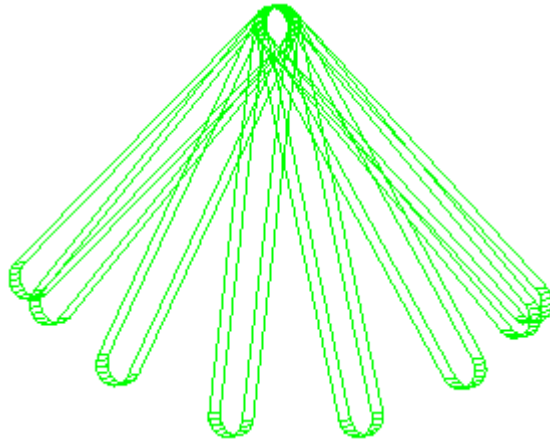
Маркер может быть несколько и они могут лежать на разных частях.

Component – компонент.

Trail frames – число следов, которые оставляют тела при движении. Под следом здесь понимается отпечаток моделей в пространстве при их движении. Чем больше следов, тем заметнее эффект. Обычно используется, чтобы подчеркнуть высокую скорость движения объекта.

Trial Decay Rate – этот ползунок позволяет изменять степень затухания следа. При отсутствии затухания (ползунок в крайнем левом положении) все следы видны отчетливо. При максимальном затухании следы едва заметны.

Superimpose – наложение.



Означает, что при смене кадров, прежние кадры не исчезают, а остаются на экране. Например, при повороте плоскости вы получите цилиндр. Это крайний вариант следа.

Include Static – включение в анимацию результатов статического расчета. Подробнее о типах расчета смотри в описании ADAMS/View. Кнопкой Next Static вы можете выбрать, какой из статических анализов включить в модель.

Include Contacts – включение в анимацию контактов. Если поставить этот флажок, то можно находить в анимации места, где имело место начало контакта между двумя геометриями. Для перехода к следующему такому месту используйте кнопку Next Contact.

View

Настройка непосредственно вида модели при анимации. Содержит:

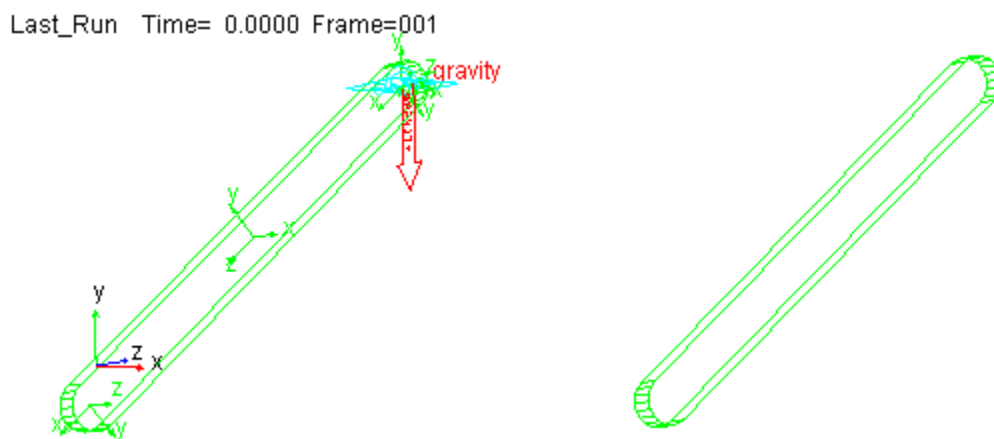
Display Icons – отобразить на экране иконки (иконками обозначаются маркеры, силы, соединения).

Perspective – включает перспективу.

Title – выводит на экран заголовок.

FPS In Title – выводит на экран *FPS* (*Frame per second* – число кадров в секунду). Этот параметр может меняться и отображается только в процессе самой анимации, поэтому его нет на этом рисунке.

Display Triad – отображает три вспомогательные оси координат. Они всего лишь показывают направление соответствующих осей. На самом деле оси связаны с ЦСК.



Так выглядит деталь с включенными иконками, перспективой, заголовком, *FPS* и *Triad*.


А так выглядит та же самая деталь, когда эти опции отключены.

Light Intensity – интенсивность освещения.

Ambient Light – интенсивность освещения окружающей среды, так называемого рассеянного освещения.

Light Angle – угол падения света относительно заданного.



Заданный угол выбирается с помощью показанных здесь девяти кнопок. При выбранной кнопке , т. е. только рассеянное освещение, угол наклона не влияет на освещенность.

Light Reflections – включает режим рефлексии.

Two-Sided Lighting – двустороннее освещение.

Camera

Управляет положением камеры при анимации. Позволяет:

Follow Object – камера следует за объектом, но объект может поворачиваться на экране. Если поставить флажок *Lock Rotations*, то камера будет еще и поворачиваться вместе с объектом. Т. е. объект будет совершенно неподвижен, но вся остальная модель будет двигаться вокруг него.

Mount Camera At – задает точку, из которой камера будет снимать. В виде точки здесь выступает маркер. При этом он может находиться на движущейся детали, и камера будет перемещаться вместе с ним.

Record

Эта вкладка настраивает параметры записи. Она включает в себя:

File name – имя видеоклипа, который записывается на диск.

Format – формат видеоклипа (avi, mpg, tiff, jpg, xpm, bmp, png).

Frame size – размер кадра. Показывает размер окна в пикселях. По умолчанию не выбран (это значит, что размер кадра будет равен текущему размеру области с анимацией).

Movie replay rate ... frame per second – скорость проигрывания записанной анимации в кадрах в секунду.

Use compression – использование сжатия видеофайла. Если не поставить этот значок, вы столкнетесь с тем, что даже небольшие анимации будут иметь объем в несколько гигабайт.

Key Frame every ... frames – ключевой кадр каждые ... кадров.

Quality – качество сжатия. От 0 до 100. Чем лучше качество, тем больше видеофайл. Однако рекомендуется всегда ставить 100, так как потеря качества очень велика.

Overlay

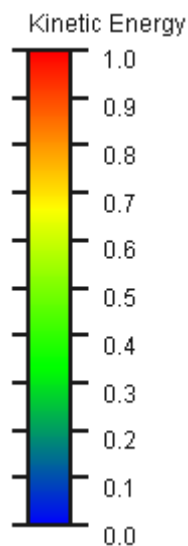
Покрытие. Задает отдельные слои или маски для каждого расчета. Если важно отличить при симуляции детали, принадлежащие одному расчету, от деталей другого расчета, используйте эту опцию. Кроме того, щелкнув в этом окне название расчета, вы обновите его. Особенно это важно, если вы не изменяли положение модели при расчете. Подобная мера позволит вам быть уверенным, что на экране отображается последняя анимация, а не оставшаяся от предыдущих расчетов.

Colors – цвета. Например, вы рассчитали вашу модель с разными нагрузками. Вы можете задать для первого расчета желтую маску, а для второго – зеленую. Тогда любая деталь в анимации первого расчета станет желтой, независимо от ее действительного цвета, а в анимации второго расчета – зеленой, что позволит легко их различать. Особенно полезна при большом числе расчетов.

Analysis – в этом окне можно выбрать анализ, для которого назначается покрытие.

Offset – смещение.

Display Legend – отображает на экране шкалу, подобную показанной на рисунке, на котором показано соответствие цвета контура тела числовому значению выбранной величины.



Для настройки этой шкалы используются кнопки в правой части панели:

Minimum Value – минимальное значение.

Maximum Value – максимальное значение.

Decimal places – число знаков после запятой.

Scientific Range – диапазон степеней m в записи числа $n \cdot 10^m$ при котором число отображается в обычной форме, при выходе за эти границы число указывается в виде $n \cdot 10^m$.

Trailing Zeros – отображение всех нулей после запятой.

Contour Plot Type – выбор типа отображаемых данных:

Deformation – деформации.

Kinetic Energy – кинетическая энергия.

Strain Energy – энергия деформации.

Strain Energy SS – энергия деформации SS.

Von Mises Stress – эквивалентные напряжения.

Max Prin. Stress – максимальные главные напряжения.

Min Prin. Stress – минимальные главные напряжения.

Max Shear Stress – максимальные сдвиговые напряжения.

Normal-X Stress – нормальные напряжения по X.

Normal-Y Stress – нормальные напряжения по Y.

Normal-Z Stress – нормальные напряжения по Z.

Shear-XY Stress – сдвиговые напряжения в плоскости XY.

Shear-YZ Stress – сдвиговые напряжения в плоскости YZ.

Shear-ZX Stress – сдвиговые напряжения в плоскости ZX.

Von Mises Strain – эквивалентная энергия деформации.

Max Prin. Strain – максимальная главная энергия деформации.

Min Prin. Strain – минимальная главная энергия деформации.

Max Shear Strain – максимальные сдвиговые напряжения.

Normal-X Strain – нормальная энергия деформации по оси X.

Normal-Y Strain – нормальная энергия деформации по оси Y.

Normal-Z Strain – нормальная энергия деформации по оси Z.

Shear-XY Strain – энергия деформации сдвига в плоскости XY.

Shear-YZ Strain - энергия деформации сдвига в плоскости YZ.

Shear-ZX Strain - энергия деформации сдвига в плоскости ZX.

Legend placement – расположение шкалы легенды. По умолчанию *left*, т. е. в левой части экрана анимации.

Legend Title – заголовок легенды.

Colors – устанавливает число цветов, с помощью которых раскрашивается контур.

Legend Gradients – число делений на легенде. По умолчанию он равен 10, что означает, что весь диапазон изменения условно разделен на десять частей. Служит только для удобства отображения и больше ни на что не влияет.

Таким образом, в результате проведения кинематико-динамического расчёта, согласно приведённым выше рекомендациям, показана возможность отклонять двигатель от вертикального положения во всех направлениях.

На раму (рис. 25) действует нагрузка 150 тонн, то есть 1470000 Н, представляющая собой тягу двигателя. Эта сила делится на четыре точки закрепления (опоры в верхней части конструкции). Таким образом на каждую точку закрепления приходится 367500 Н.

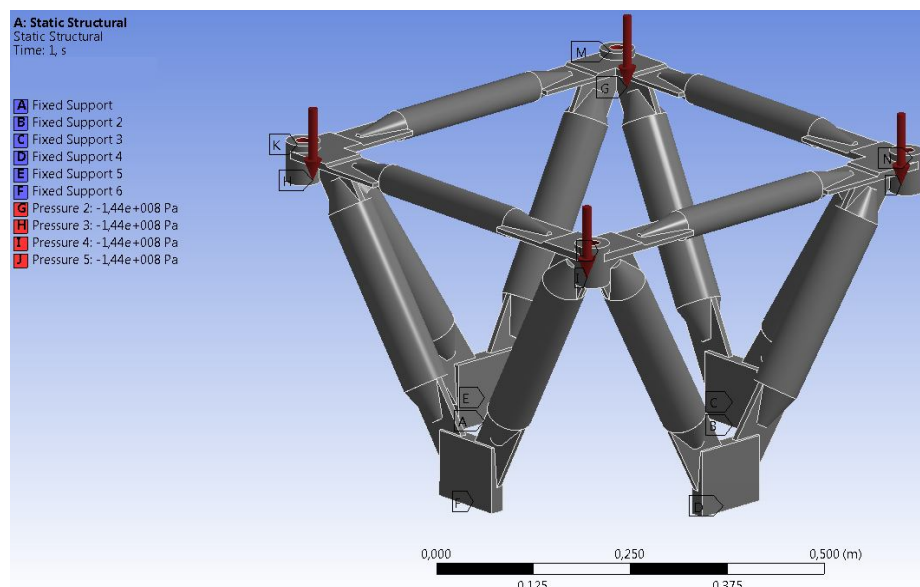


Рисунок 25 - Конструкция рамы НК-33

Разработанная модель (рис. 26) может использоваться для расчета движения камеры при отклонении с получением скоростей, ускорений и динамических усилий, действующих на элементы крепления и двигателя.

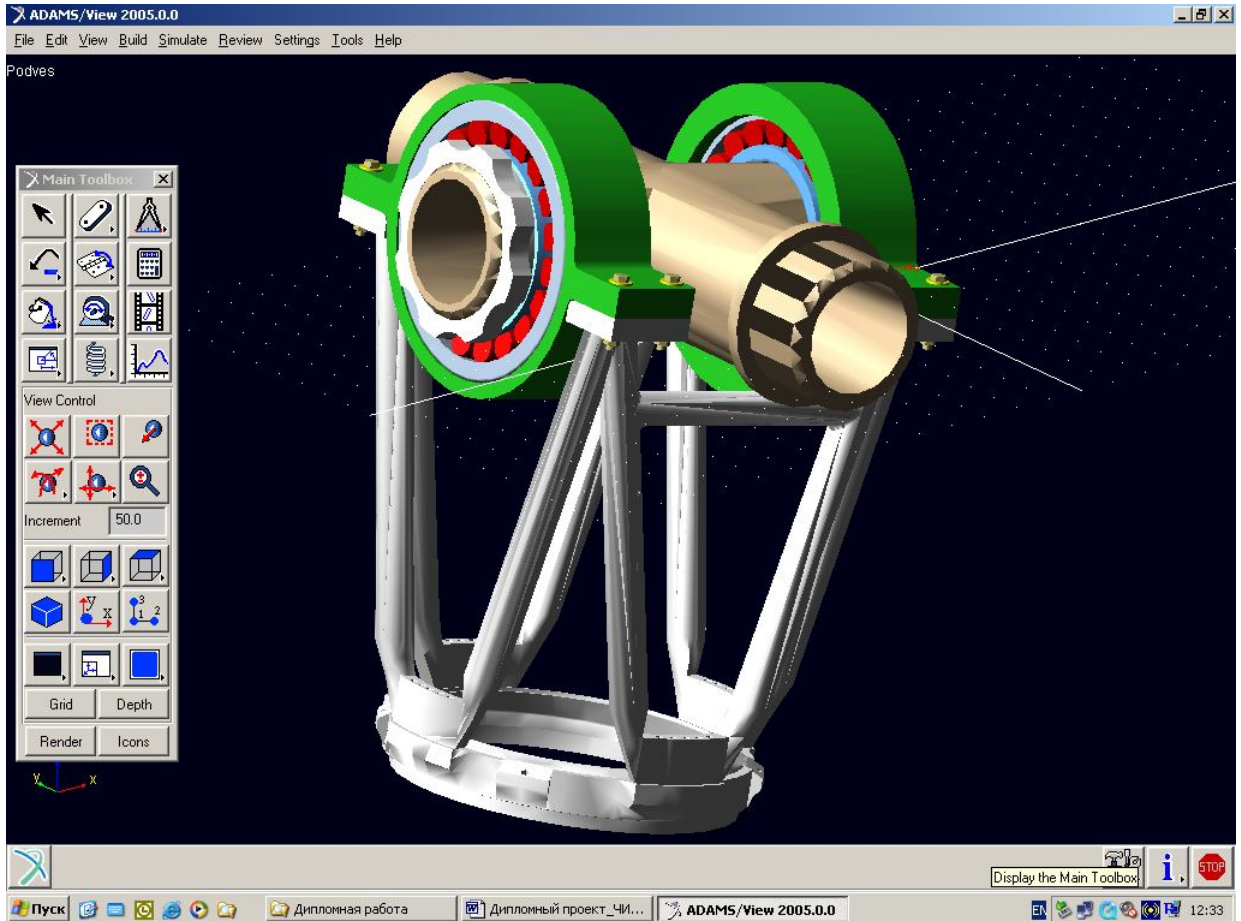


Рисунок 26 – Крепление камеры ЖРД НК-33 в программе ADAMS. Камера в отклонённом положении относительно неподвижной оси Кардана (закреплённой на корпусе ракеты)

Модель камеры импортируется в пакет MSC.ADAMS, где детали объединяются в кинематические группы (рис. 27), имеющие один центр масс и движущиеся в модели совместно по одному закону. Сначала выбирается базовая деталь группы, затем командой Rename изменяется принадлежность детали [3, 4].

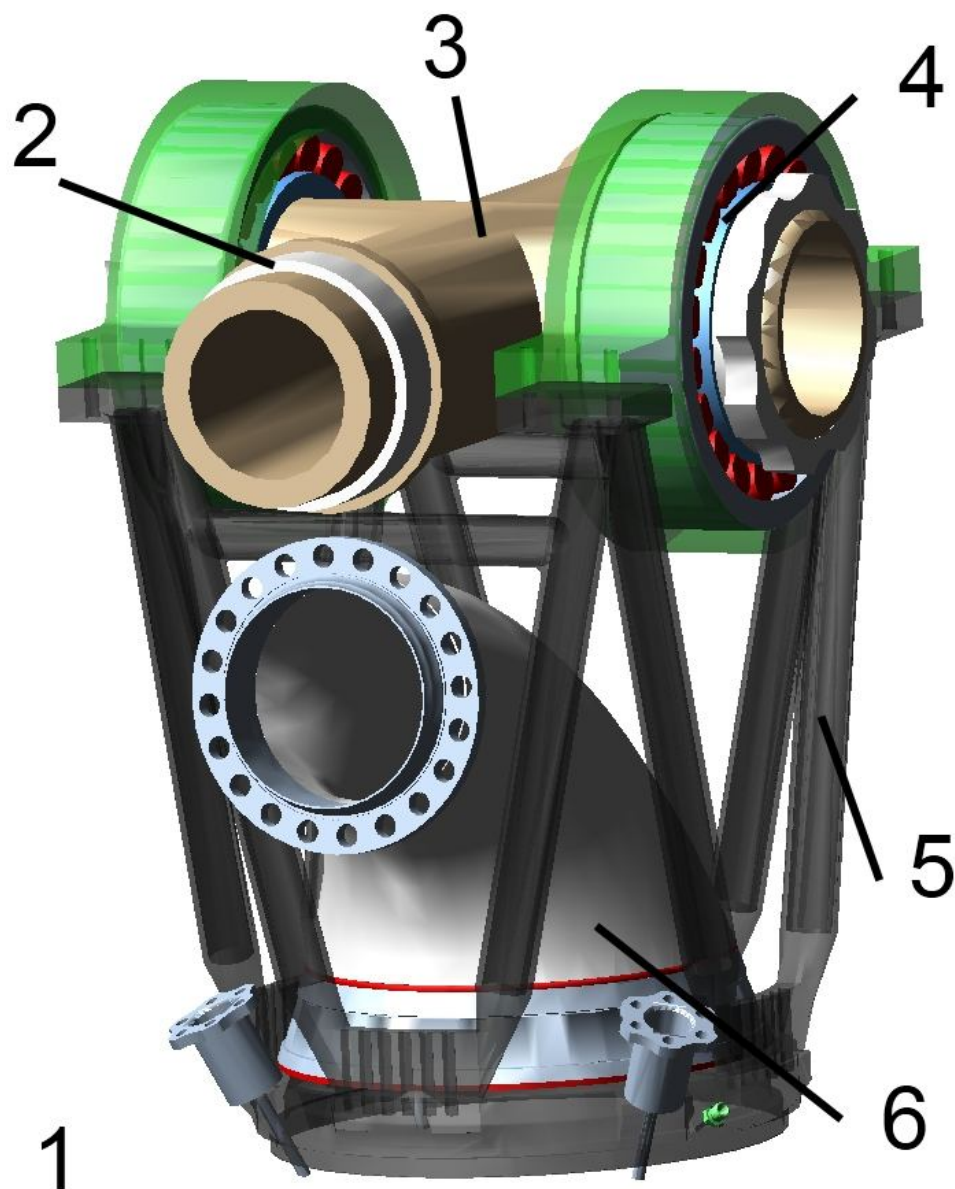






Рисунок 27 – Крепление камеры ЖРД НК-33 в программе ADAMS. Камера в отклонённом положении относительно подвижной оси Кардана (связанной с двигателем): 1 - все поле модели представляет собой Корпус; 2 - подшипники оси Y (скрыты); 3 - крестовина; 4 - подшипники оси X; 5 - рама; 6 - камера.

Рассмотрим пример. Имеем две детали, каждая представляет собой тело с физическими свойствами и геометрией: `.Model.Kamera.Solid1` и `Model.Part_2.Solid2`. По умолчанию всем импортированным телам (которым назначена в CAD-пакете плотность материала) присваивается название "Part_#", а геометриям "Solid#". Заменяем название геометрии `.Part_2.Solid2` на `Kamera.Solid2`, затем удаляем пустую деталь `Part_2`, не

содержащую геометрии. Получаем одну деталь .Model.Kamera с двумя геометриями Solid1 и Solid2. Для избежания путаницы геометрии можно переименовать в соответствии с названиями исходных деталей.

На рисунке 27 показано расположение отдельных кинематических групп, а на рисунке 28 кинематическая схема сборки, где показаны связи между ними. На первом этапе сборки наружные кольца подшипников оси Y соединяются JF (табл. 3) фиксирующими шарнирами  в корпусе, затем их внутренние кольца фиксируются  на крестовине. Подшипники реализуют вращательную связь JR с одной степенью свободы (вращательный шарнир ) либо вращательную с возможностью движения вдоль оси JC (цилиндрический шарнир )

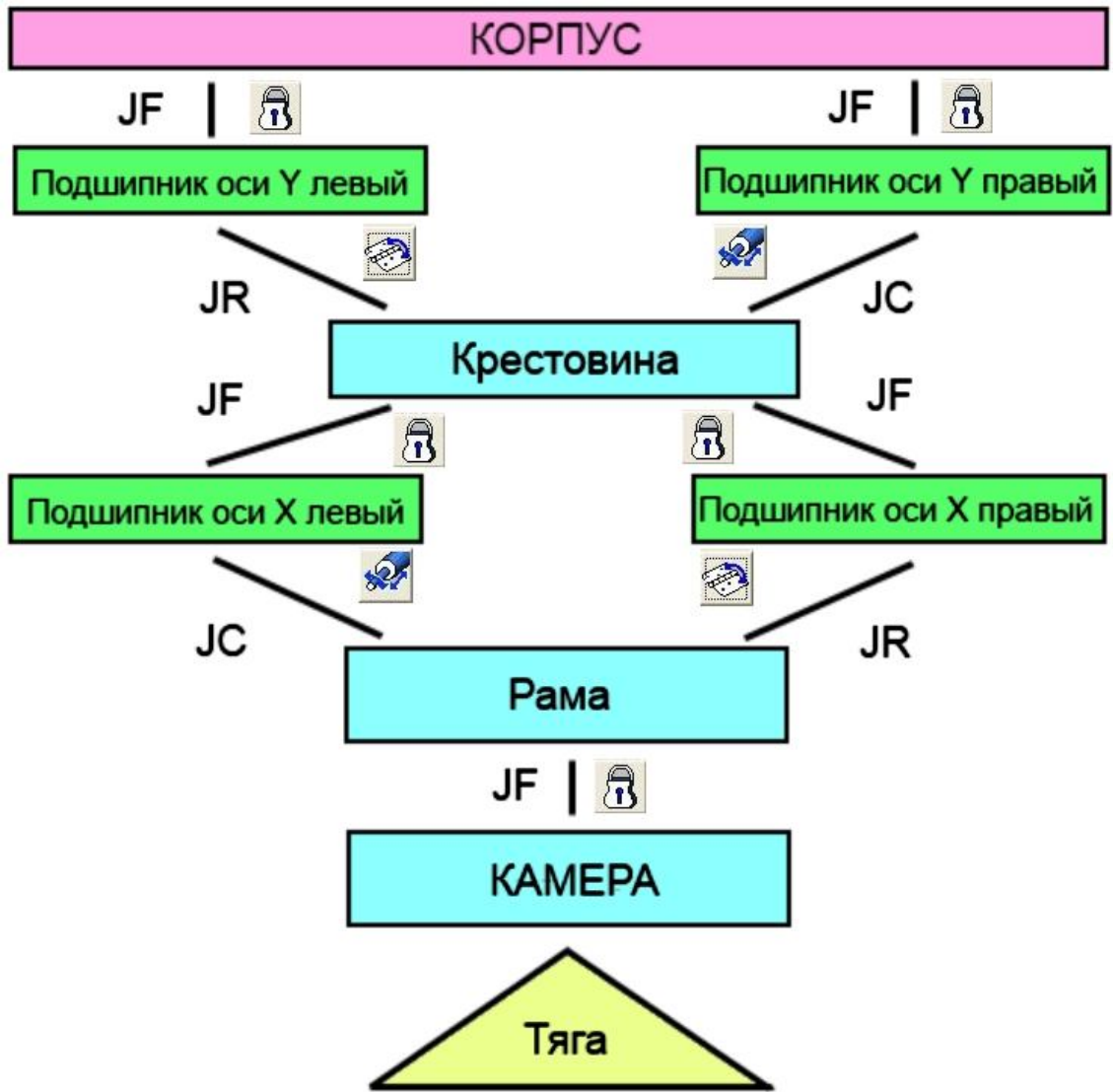


Рисунок 28 - Кинематическая схема ЖРД с карданным подвесом











Рисунок 29 - Кинематическая схема подшипника

Подшипник является сборной единицей, внутри которой (рис. 29) наружное кольцо соединяется с сепаратором и роликами (выполняются одной кинематической группой) вращательным (или цилиндрическим) шарниром. Внутреннее кольцо соединяется с сепаратором деформируемой втулкой JB (Bushing), что позволяет заложить в соединение реальную жёсткость подшипника и учесть трение. Внутреннее и наружное кольца фиксируются на деталях.

Таблица 3 - Маркировка шарниров

Маркировка	Тип	Значение
JR	Вращательный	Одна вращательная степень свободы
JF	Неподвижный	Убирает все 6 степеней свободы. Заделка
JT	Поступательный	Одна поступательная степень свободы
JS	Сферический	Три вращательные степени свободы
JB	Гибкая муфта	Жесткости и коэффициенты демпфирования по всем поступательным и вращательным осям
G	Земля	Абсолютно неподвижное тело. С ним связана центральная система координат
Spring	Пружина	Жесткость и коэффициент демпфирования по одной поступательной оси
JC	Цилиндрический	Одна поступательная и одна вращательная степени свободы
JK	Coupler	Связь вращательных или поступательных шарниров через передаточный коэффициент

Использование пары шарниров JR  и JC  (вместо пары JR  и JR ) в симметричных подшипниках объясняется особенностями математической модели пакета MSC.ADAMS и позволяет снизить число паразитных связей в модели, никак не влияя на движения деталей.

Крестовина через подшипники оси X соединяется с рамой двигателя, на которой закрепляется  камера ЖРД. По оси камеры прикладывается вектор тяги  двигателя. К шарнирам, связывающим крестовину с подшипниками, прикладываются генераторы движения  для задания закона качания камеры. Для качания в одной плоскости генератор  прикладывается только к соответствующей паре подшипников, для качания в двух плоскостях - на обе пары (X и Y). Законы могут быть выбраны в зависимости от назначения расчёта (для испытаний, в полёте, на земле, на орбите, манёвр и т.д.) независимо для каждой плоскости качания. Если пренебречь трением и сопротивлением трубопроводов, то качание камеры отдельно относительно оси X и Y практически одинаковы. Зададимся законом $6 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(5 \cdot \text{time})$, где 6 - амплитуда качания в градусах, $\pi / 180$ - множитель для перевода градусов в радианы, time - модельное время в секундах. Проведём расчёт, задав время 2,5 секунды и число шагов более 2000. Полученные графики представлены на рис. 30- 33.

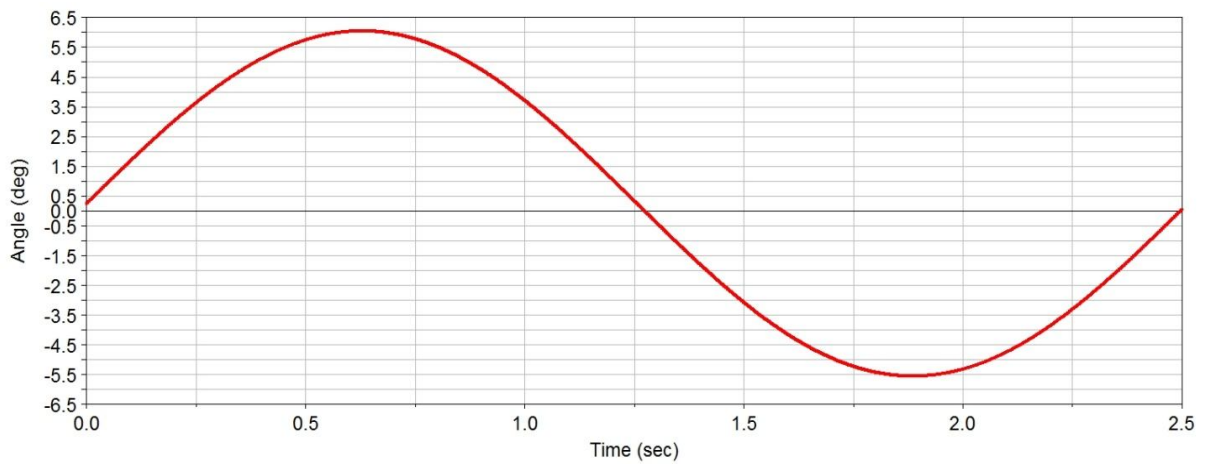


Рисунок 30 - Зависимость угла качания камеры (градусы) от времени (секунды)
 для качания в одной плоскости: $\text{Angle} = f(\text{time})$

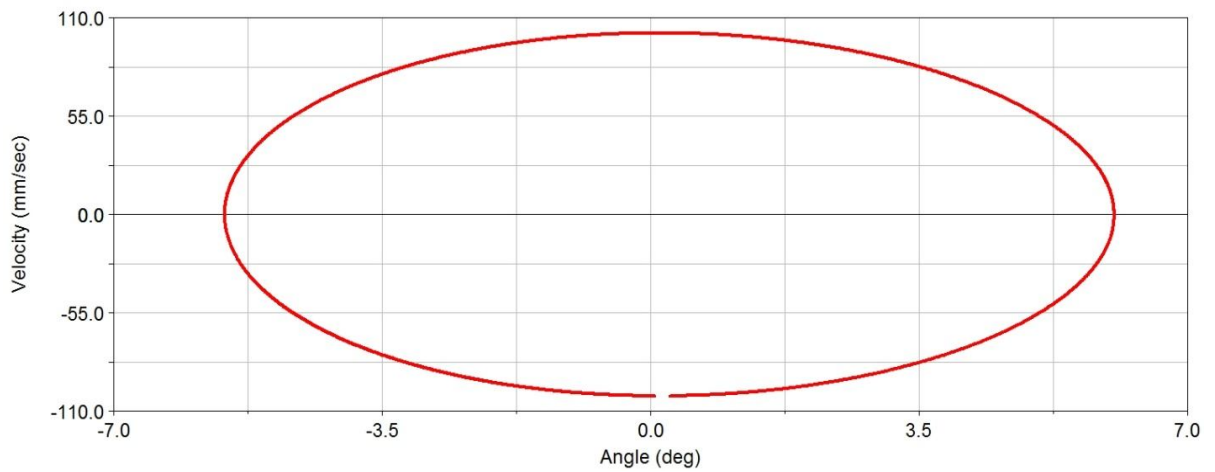


Рисунок 31 - Зависимость скорости качания камеры (мм/с) от угла качания камеры
 (градусы) для качания в одной плоскости: $\text{Velocity} = f(\text{angle})$

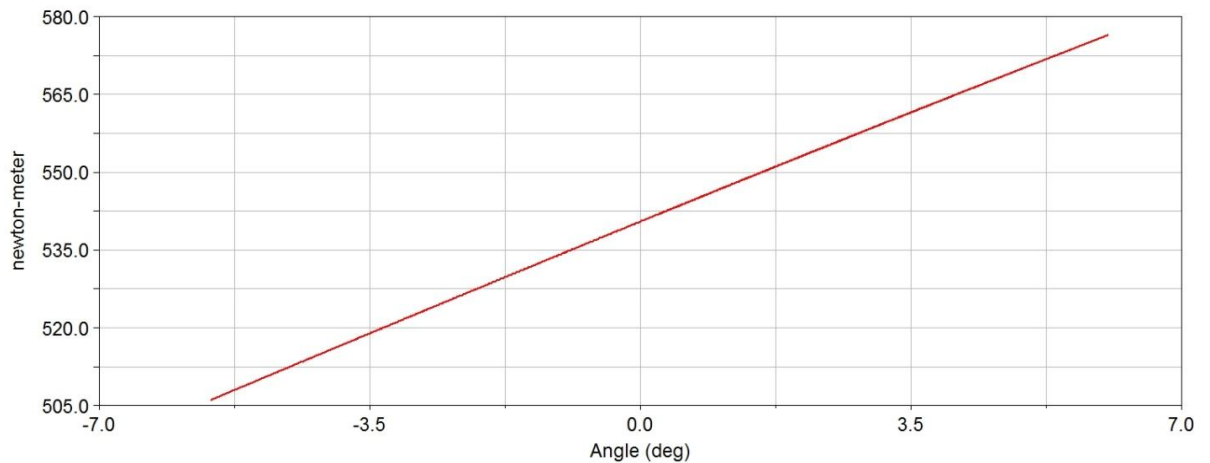


Рисунок 32 - Зависимость крутящего момента (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в одной плоскости: $\text{Newton-meter} = f(\text{angle})$

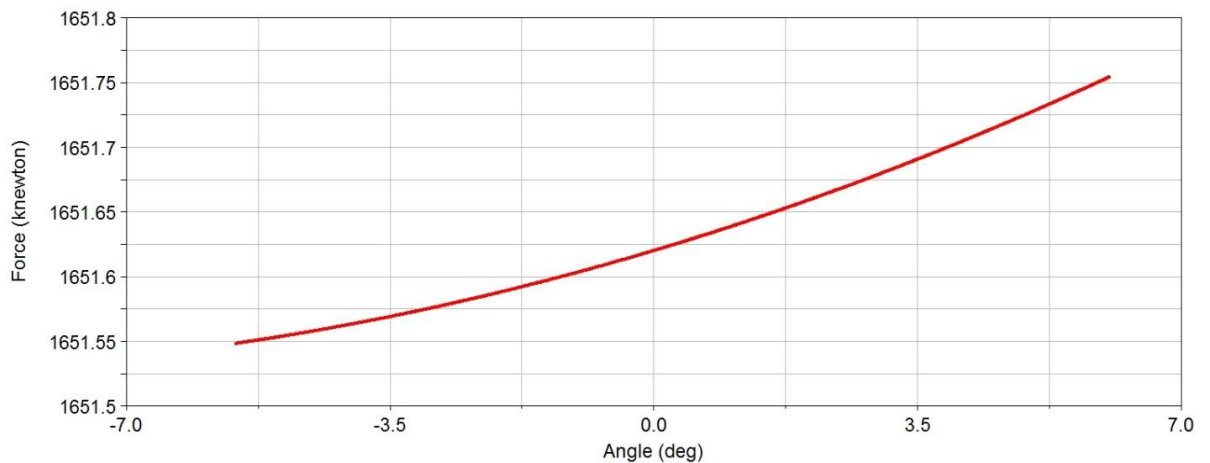


Рисунок 33 - Зависимость силы, действующей на подшипники, (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в одной плоскости: $\text{Force} = f(\text{angle})$

Рассмотрим более сложную ситуацию, когда камера качается одновременно в двух плоскостях. Возьмём следующие законы качания:

$\text{PI}/50 * \text{SIN}(5 * \text{time})$ - для оси X,

$\text{PI}/18 * \text{SIN}(5 * \text{time}/2)$ - для оси Y.

Полученные графики представлены на рис. 34 - 39.

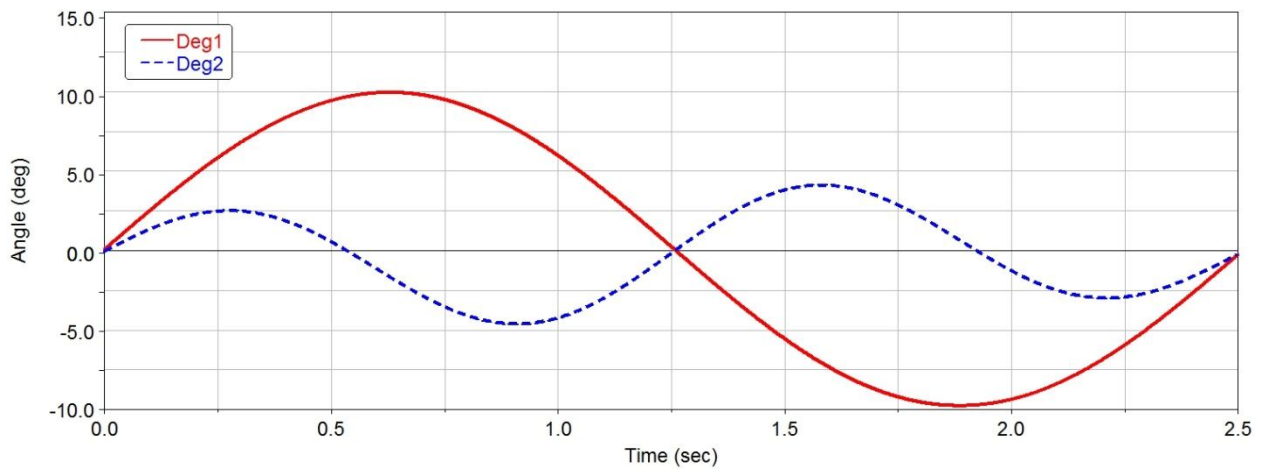


Рис. 34 - Зависимость угла качания камеры (градусы) от времени (секунды) для качания в двух плоскостях: $\text{Angle} = f(\text{time})$: Deg1 - поворот относительно оси X, Deg2 - поворот относительно оси Y

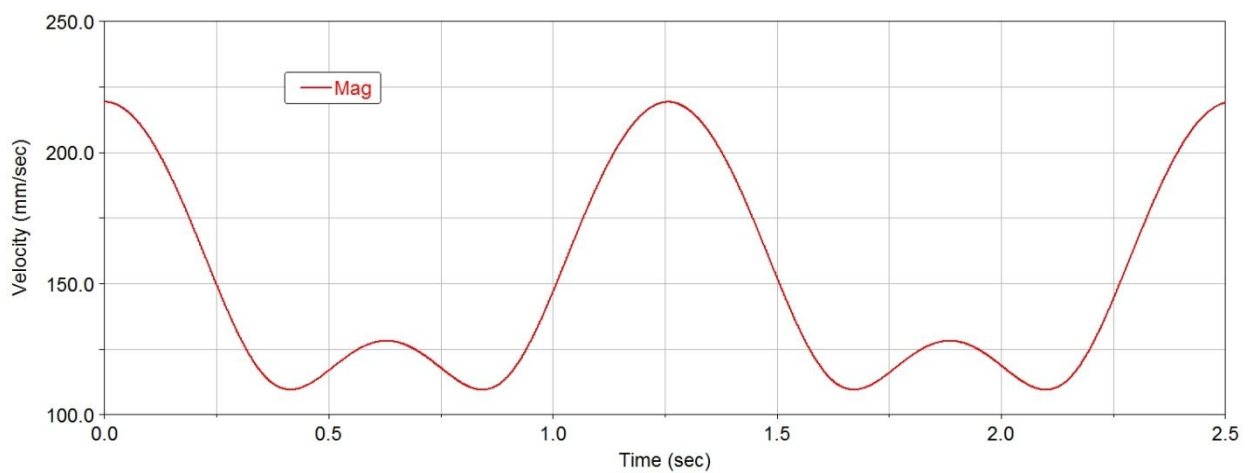


Рисунок 35 - Зависимость скорости качания камеры (мм/с) от угла качания камеры (градусы) для качания в двух плоскостях: $\text{Velocity} = f(\text{angle})$

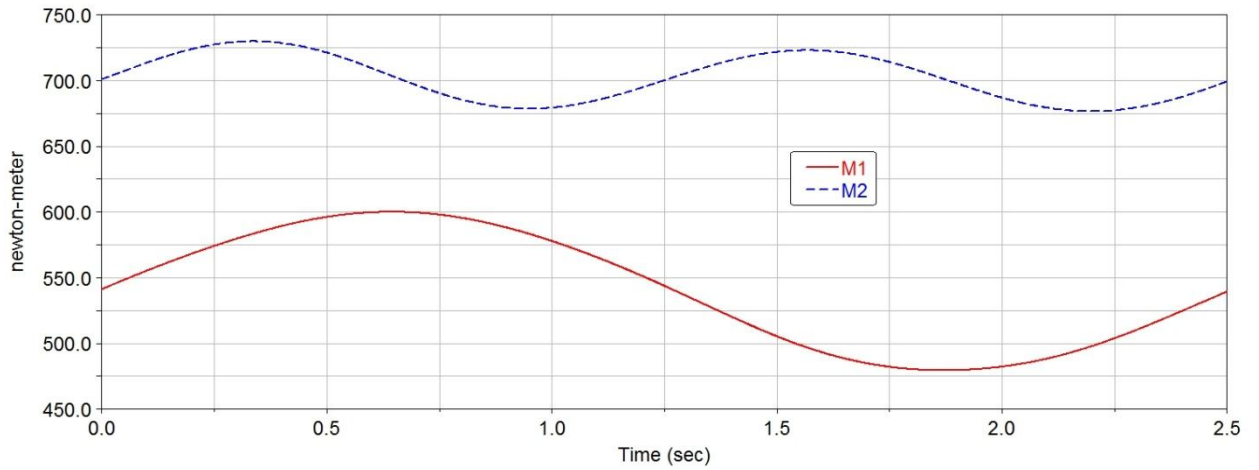


Рисунок 36 - Зависимость крутящего момента (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в двух плоскостях: $\text{Newton-meter} = f(\text{angle})$: M1 - крутящий момент относительно оси X, M2 - относительно оси Y

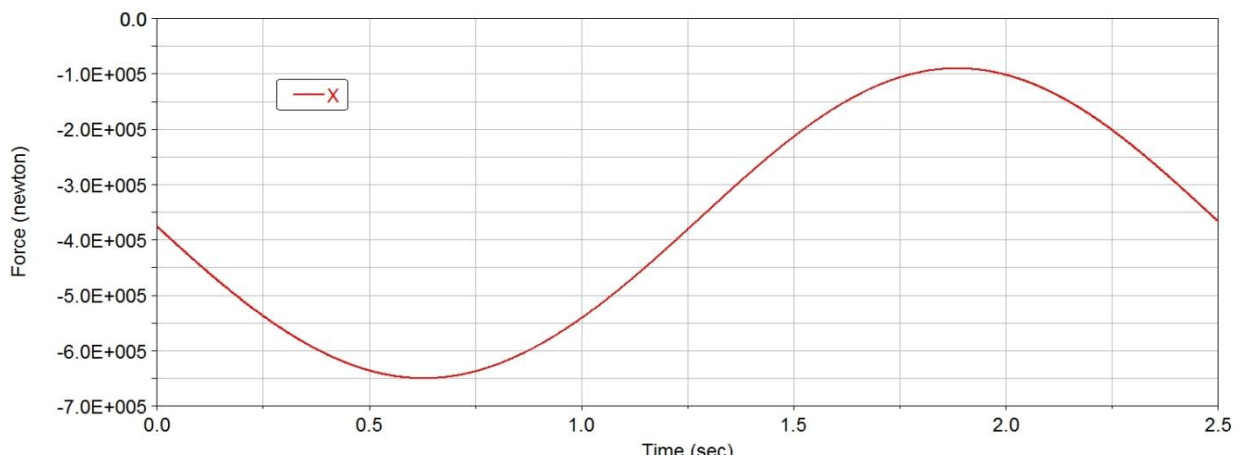


Рисунок 37 - Зависимость силы, действующей на подшипники вдоль оси X, (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в двух плоскостях: $\text{Force} = f(\text{angle})$

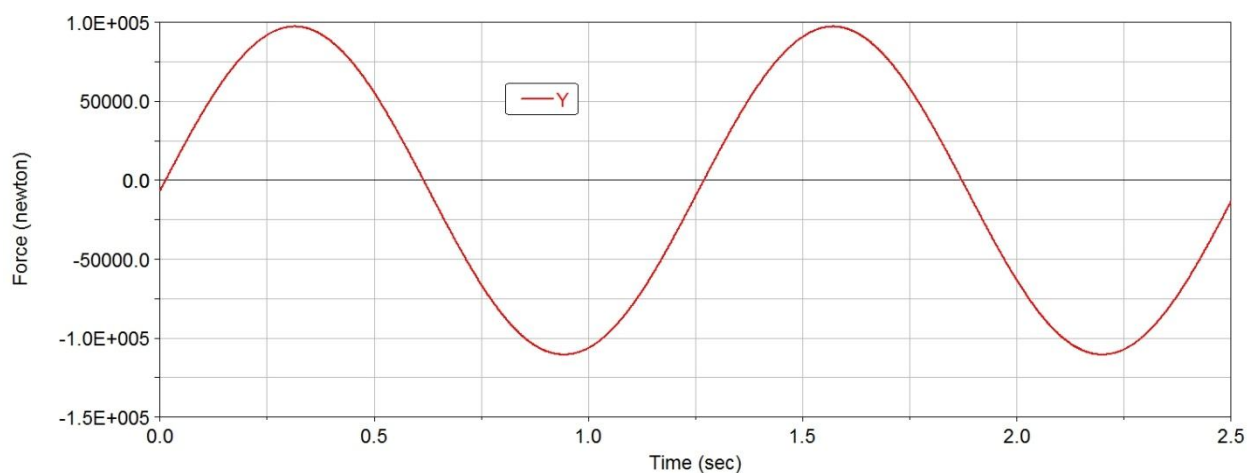


Рисунок 38 - Зависимость силы, действующей на подшипники вдоль оси Y, (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в двух плоскостях: Force = f (angle)

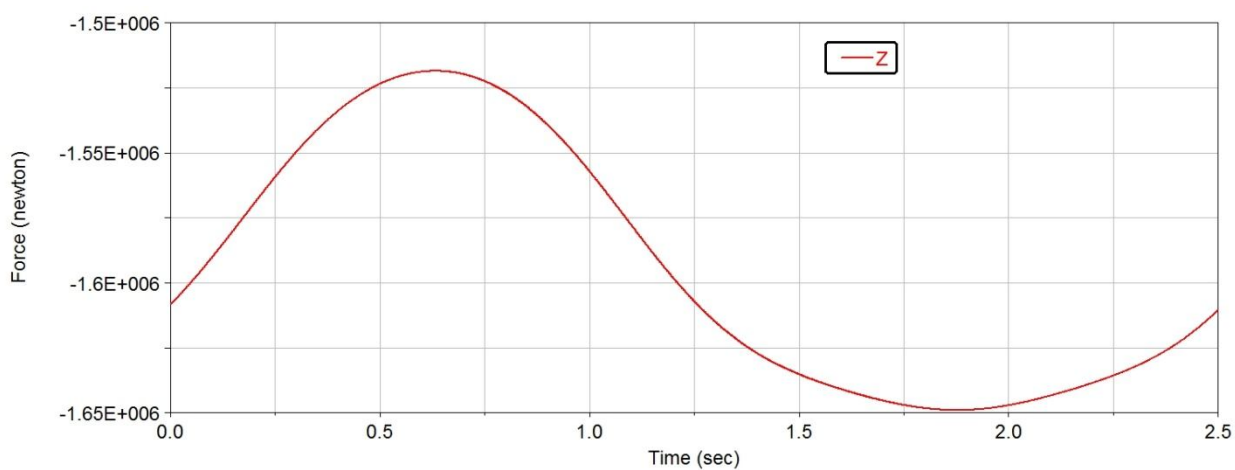


Рисунок 39 - Зависимость силы, действующей на подшипники вдоль оси Z, (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в двух плоскостях: Force = f (angle)

Заключение

Таким образом, созданы численные модели узлов крепления ЖРД, включающие в себя:

1. Параметрическую 3D-модель узлов крепления двигателя, созданную в САD-пакете, в т.ч. пригодную для автоматизированного создания чертежей;
2. Конечно-элементную модель узлов крепления, основанную на 3D-модели;
3. Динамическую модель качающегося подвеса ЖРД для одно- и двухплоскостного качания.

Представленные модели в совокупности позволяют получать перемещения, скорости и ускорения деталей узлов крепления, нагрузки, деформации, напряжения. Проводить оптимизационные расчёты и подготовить конструкцию для расчёта на надёжность и оценку ресурса, а также использовать полученные модели в САМ-пакетах для технологического проектирования и последующего производства в рамках концепции "Виртуального ЖРД" по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)».

Список использованных источников

1. Пичугин, Д. Ф. Конструкция и проектирование агрегатов двигателей летательных аппаратов [Текст] : [учеб. пособие] / Д. Ф. Пичугин; Куйбышев. авиац. ин-т им. С. П. Королева. - Куйбышев : [б. и.], 1989. - 244 с.
2. Двигатели 1944-2000: авиационные, ракетные, морские, наземные, Справочник, Под редакцией Шустова И.Г., М., изд. «АКС - Конверсалт, 2000. - 510с.
3. Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов: метод. указания / Сост. А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Д.С. Лежин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 23 с.: ил.
4. Изучение конструкции авиационных ДВС с совместным использованием пакетов ANSYS, ADAMS, SolidEdge: метод. указания / Сост. А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 53 с.: ил.
5. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения. Справочник. М.: Машиностроение, 1975.
6. Мелентьев, В.С. ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: краткий справочник пользователя [Текст]: Учебное пособие / В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев. - Самара: Изд-во СГАУ, 2006. - 105 с.
7. Васильев, А. Очередной блог о САПР // Вопросы параметризации [Электронный ресурс]: сетевой журнал 2010-2012. URL: <http://www.saprobasni.ru/> (дата обращения: 10.09.2013).