

САПР
И
ГРАФИКА

1'98

МАШИНОСТРОЕНИЕ

 **КОМПЬЮТЕР**
ПРЕСС

Моделирование динамики механических систем в программном комплексе Euler

Владимир Бойков

Программный комплекс Euler («Эйлер») предназначен для математического моделирования динамического поведения сложных механических систем в самых различных областях техники. В журнале «САПР и графика» № 11'97 была описана общая технология работ при моделировании в Euler, рассмотрены основные возможности и особенности программного комплекса. В данной статье на конкретных примерах демонстрируются основные принципы работы при моделировании механических систем в Euler.

Кратко технологию моделирования в Euler можно представить следующей последовательностью действий:

1 Формирование концепции идеализированной модели механической системы. Этот этап осуществляется до начала работы непосредственно в Euler, и его цель может быть сформулирована так: что и с какой степенью подробности мы собираемся моделировать.

2 Описание геометрии элементов механической системы. В Euler для этого могут быть использованы такие объекты, как точка, линия, поверхность и тело.

3 В соответствии с принятой идеализированной моделью механической системы пользователь выделяет звенья (твердые тела), создает шарниры, силовые элементы, объекты контроля и управления.

4 На основании сделанного пользователем инженерного описания механической системы Euler автоматически формирует точные в рамках классической механики уравнения движения и проводит расчеты.

Задача решается в Euler в трехмерном пространстве в общей нелинейной постановке с учетом нелинейных характеристик всех элементов механической системы. На

экране компьютера пользователь может наблюдать движение механической системы и получать информацию об ускорениях, скоростях, расстояниях, углах и силах, возникающих в системе в процессе движения.

Физический маятник

В качестве простейшего примера использования Euler рассмотрим задачу исследования движения физического маятника, изображенного на рис. 1. Механизм состоит из двух звеньев: стойки и маятника. Стойка является неподвижным (инерциальным) звеном. Стойка и маятник соединены вращательным шарниром. Движение маятника происходит под действием силы тяжести, если в начальный момент он отклонен от вертикальной оси.

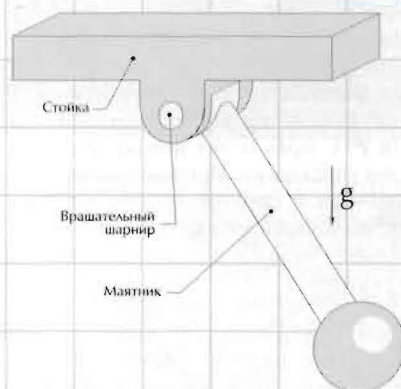


Рис. 1. Физический маятник

Сначала рассмотрим по шагам процесс задания и исследования идеального физического маятника без трения.

1 Запускаем Euler и создаем новый проект. После этого на экране в главном окне Euler появляется пу-

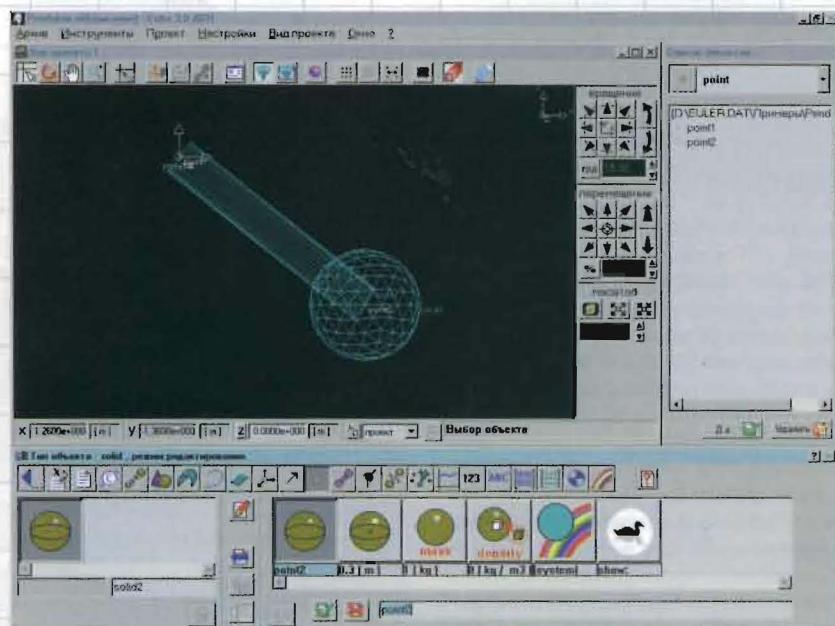


Рис. 2. Геометрическая модель маятника

стое окно (Вид проекта) и диалоговое окно создания и редактирования объектов (Верстак). Проект находится в режиме «редактирование».

2 Создаем базовые точки маятника. В Euler это можно сделать двумя способами: выбрать один из методов создания точек с указанием точных координат (точка в декартовых координатах проекта, точка в цилиндрических координатах проекта и т. д.) или нанести их непосредственно на виде проекта при помощи мыши (в дальнейшем их координаты можно отредактировать). Создадим две точки с координатами $point1(0[m], 0[m], 0[m])$ и $point2(1[m], -0.8[m], 0[m])$.

3 Следующим шагом будет создание твердых тел, из которых состоит маятник. Сначала создадим цилиндр. Для этого выбираем в Верстаке пиктограмму , соответствующую телам, а затем нажимаем в Верстаке кнопку создания нового объекта . Из появившихся пиктограмм методов создания тел выбираем цилиндр. В Верстаке появятся параметры, которые необходимо задать для создания цилиндра. В качестве базовых точек цилиндра выбираем (можно указать прямо на виде проекта) созданные нами ранее точки $point1$ и $point2$. Задаем радиус цилиндра $0,1[m]$, массу $1[kg]$ и затем нажимаем кнопку завершения создания объекта . После этого на виде проекта появится изображение цилиндра. Аналогичным образом создаем сферу с центром в точке $point2$, радиусом $0,3[m]$ и массой $1[kg]$. На этом завершается создание геометрической модели маятника, которая представлена на рис. 2.

4 Теперь необходимо создать звено и прикрепить к ним созданные твердые тела. Выбираем в Верстаке пиктограмму  и нажимаем кнопку создания нового объекта . Назовем звено «Маятник». Затем нажимаем кнопку  для подтверждения создания звена. После этого система предлагает указать объекты для прикрепления к этому звену. Для прикрепления созданных тел к звену выбираем в Верстаке пиктограмму  и указываем их по очереди на виде проекта. После прикрепления тела к звену

оно меняет свой цвет на цвет звена. Аналогично создаем второе звено с именем «Стойка».

5 Следующим шагом будет создание вращательного шарнира. Выбираем в Верстаке пиктограмму , соответствующую шарнирам, и нажимаем кнопку создания объекта. Среди предлагаемых методов выбираем вращательный шарнир. Затем задаем позиционные параметры для вращательного шарнира. Шарнир соединит звенья «Стойка» и «Маятник», центром вращения будет точка $point1$, а направлением оси вращения — вектор $projectZ$, который изначально существует в проекте.

Для вращательного шарнира система автоматически создаст датчик угла поворота относительно начального положения с именем $gamma$. Полное имя датчика — $joint1.gamma$. Так как этот датчик является внутренним объектом шарнира, его полное имя содержит точку и имя хозяина.

6 Создадим гравитацию, которая заставит маятник двигаться. Выбираем в Верстаке пиктограмму  и нажимаем кнопку создания объекта. Необходимо задать один позиционный параметр, определяющий направление силы тяжести (второй параметр — значение ускорения — по умолчанию равен $9,81 [m/s^2]$). Зададим направление

силы тяжести вертикально вниз.

7 Заключительным шагом создания механизма является указание инерциального звена, которое считается неподвижным. В качестве инерциального выбираем звено «Стойка».

Итак, механизм создан. Сохраним его под именем «маятник.elf».

8 Теперь начнем исследование созданного механизма. Выбираем в меню Проект пункт Создать структуру механизма. После этого проект переводится из режима «редактирование» в режим «исследование». Открываем табло и помещаем на него датчик $joint1.gamma$. Также открываем монитор датчиков и помещаем на него тот же датчик. Включаем визуализацию сил, действующих на звено «Маятник».

Для запуска расчета движения механизма нажимаем кнопку  на пульте управления расчетом. Движение маятника можно наблюдать на виде проекта, где стрелками изображаются силы, действующие на звено «Маятник» (сила тяжести и реакция от вращательного шарнира). Одновременно с этим на табло отображается текущее значение угла поворота, а на мониторе датчиков строится график зависимости значения датчика от времени. Общий вид окон при расчете идеального маятника представлен на рис. 3.

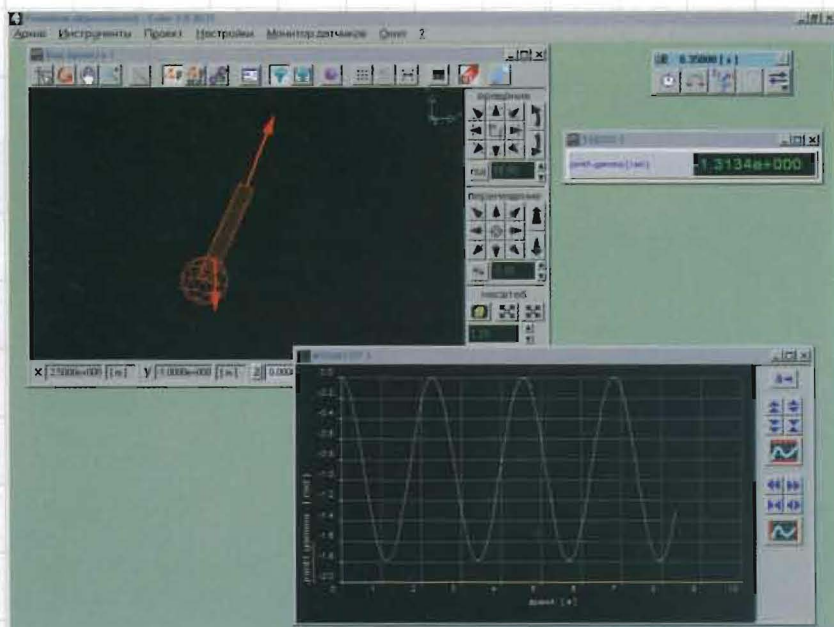


Рис. 3. Расчет идеального маятника

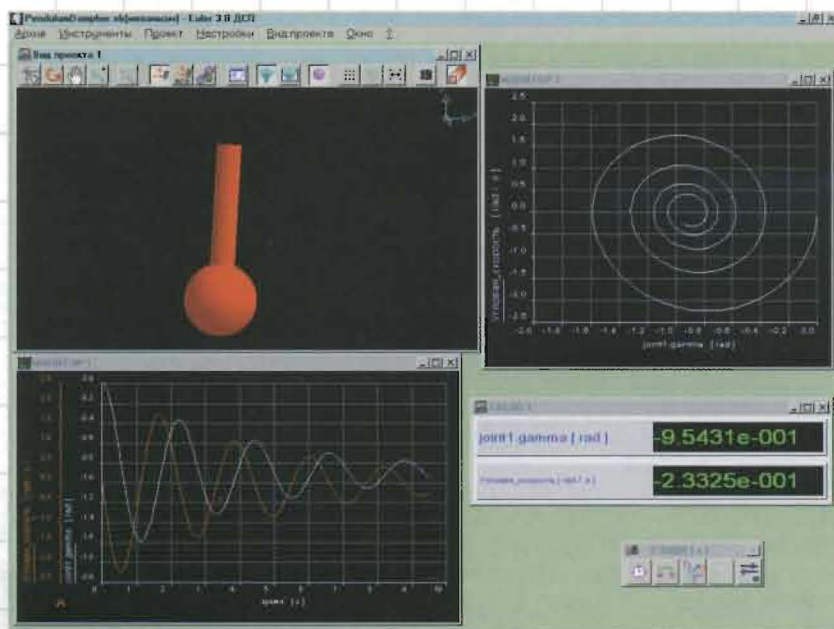


Рис. 4. Расчет маятника с демпфированием

Текст проекта «маятник.елr» имеет следующий вид:

```
point point1 = (0.00e+00 [m],
0.00e+00 [m], 0.00e+00 [m]);
point point2 = (1.00e+00 [m],
-8.00e-01 [m], 0.00e+00 [m]);
solid solid1 = cylinder( point1, point2,
0.1 [m], mass = 1 [kg] );
solid solid2 = sphere( point2, 0.3 [m],
mass = 1 [kg] );
body Стойка = ( color = index( 1 ) );
body Маятник = ( color = index( 2 ) );
joint joint1 = rotational( Стойка,
Маятник, point1, projectZ );
gravity gravity1 = parallel
( reverse( projectY ) );
body Маятник < (solid1, solid2 );
set ground = Стойка;
```

Проект можно модифицировать не только с помощью описанных диалоговых средств, но и редактированием этого текстового описания проекта.

Усложним наш механизм, введя дополнительный объект — демпфирующий силовой элемент. С помощью подобных элементов можно моделировать трение в шарнире.

1 Переводим проект в режим «редактирование» и открываем Верстак.

2 Создадим силовой элемент, который вызывает демпфирующий момент между звеньями «Стойка» и «Маятник» в точке их соединения

(point1). Для этого фиксируем в Верстаке кнопку , обозначающую силовые элементы, и нажимаем кнопку создания объекта. Среди предлагаемых методов создания выбираем обозначенный приведенной пиктограммой.

Далее задаем параметры для данного силового элемента.

3 Для того чтобы иметь возможность наблюдать изменение угло-

вой скорости в шарнире, создадим датчик, значение которого будет равно угловой скорости. Поскольку в механизме уже имеется датчик, равный углу поворота в шарнире (это датчик joint1.gamma, созданный системой автоматически при создании шарнира), нам достаточно создать датчик, который будет первой производной по времени от joint1.gamma.

Нажимаем в Верстаке пиктограмму , соответствующую датчикам, и кнопку создания нового объекта. Среди предлагаемых методов выбираем метод создания датчика как производной по времени от другого датчика. В качестве единственного позиционного параметра этого метода выбираем joint1.gamma. Называем датчик «Угловая_скорость».

4 Переводим проект в режим «исследование». Открываем табло и монитор с датчиками joint1.gamma и «Угловая_скорость». Для получения фазовой картины движения откроем еще один монитор, на который поместим датчик «Угловая_скорость», а в качестве аргумента для построения зависимости выберем joint1.gamma.

Нажмем кнопки  запускаем механизм на расчет. Общий вид окон при расчете движения маятника с демпфированием представлен на рис. 4.

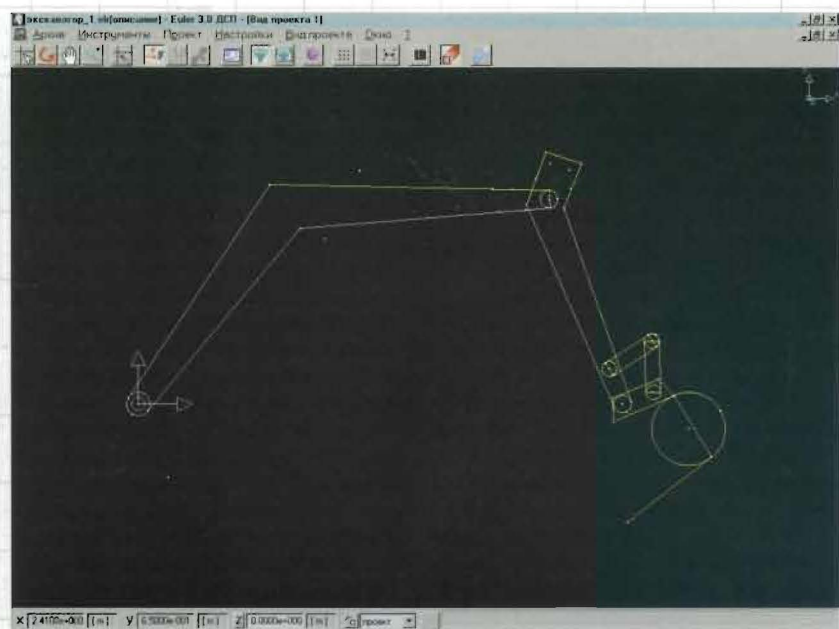


Рис. 5. Базовые точки и линии модели экскаватора

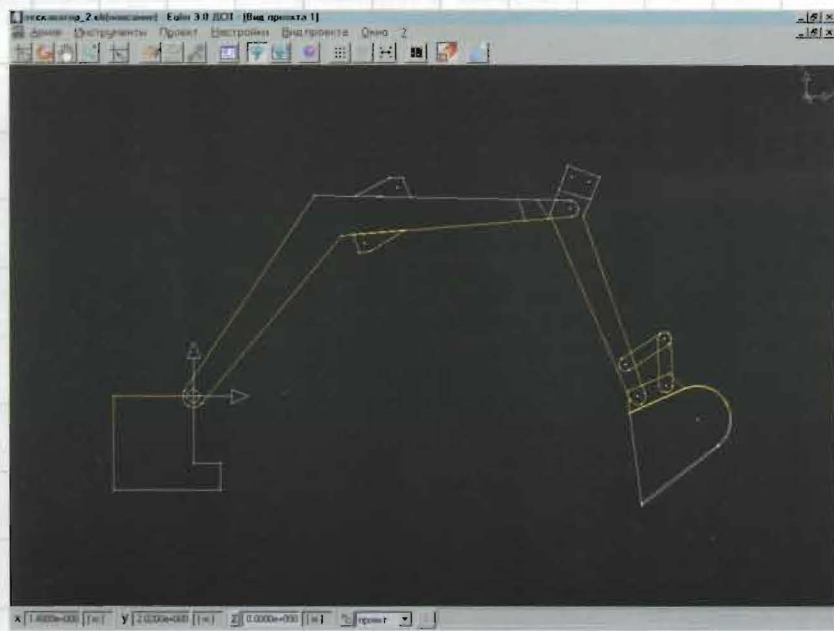


Рис. 6. Контурные линии деталей

Рабочее оборудование экскаватора

Следующий пример — создание модели рабочего оборудования одноковшового экскаватора с гидравлическим приводом и использование этой модели для определения силового нагружения рабочего оборудования в статическом режиме. При решении этой задачи фиксировалось время, затраченное на весь процесс и его отдельные этапы.

В качестве исходной информации использовался сборочный чертеж общего вида рабочего оборудования экскаватора.

Перед началом работ в Euler была принята общая концепция модели. В данном случае модель достаточно проста и состоит из следующих основных звеньев: рамы, на которой монтируется рабочее оборудование, стрелы, рукояти и ковша. Перемещения рабочего оборудования обеспечиваются тремя гидроцилиндрами, каждый из которых состоит из двух звеньев: корпуса и штока. В механизме поворота ковша относительно рукояти имеются тяга и качалка, которые для большей наглядности изображения решили моделировать отдельными звеньями, хотя для упрощения модели в Euler их можно было бы представить шарнирами типа «тяги со сферическими наконечниками».

В работе по созданию модели рабочего оборудования экскаватора были выделены следующие этапы:

- 1 Задание базовых точек и линий.
- 2 Формирование контурных линий деталей.
- 3 Формирование трехмерных тел деталей.
- 4 Задание звеньев механической системы.

- 5 Задание шарниров.
 - 6 Задание условий нагружения.
- Рассмотрим эти этапы подробнее.

Задание базовых точек и линий

На данном этапе были заданы точки соединения звеньев, основные линии и точки, определяющие конфигурацию главных элементов механизма. В данном примере все эти точки и линии располагаются в одной плоскости, совпадающей с плоскостью XY системы координат проекта. Результаты этапа представлены на рис. 5. Продолжительность этапа составила 35 минут. Основная часть времени при этом ушла на снятие размеров с чертежа.

Формирование контурных линий деталей

На данном этапе на основе базовых точек и линий были сформированы контурные линии всех деталей. В данном примере все контурные линии, как и базовые точки и линии, располагаются в плоскости XY системы координат проекта. Результаты этапа представлены на рис. 6. Контурные линии деталей были сформированы за 26 минут.

Формирование трехмерных тел деталей

Для формирования большинства трехмерных тел использовался метод «тело выдавливания». При этом

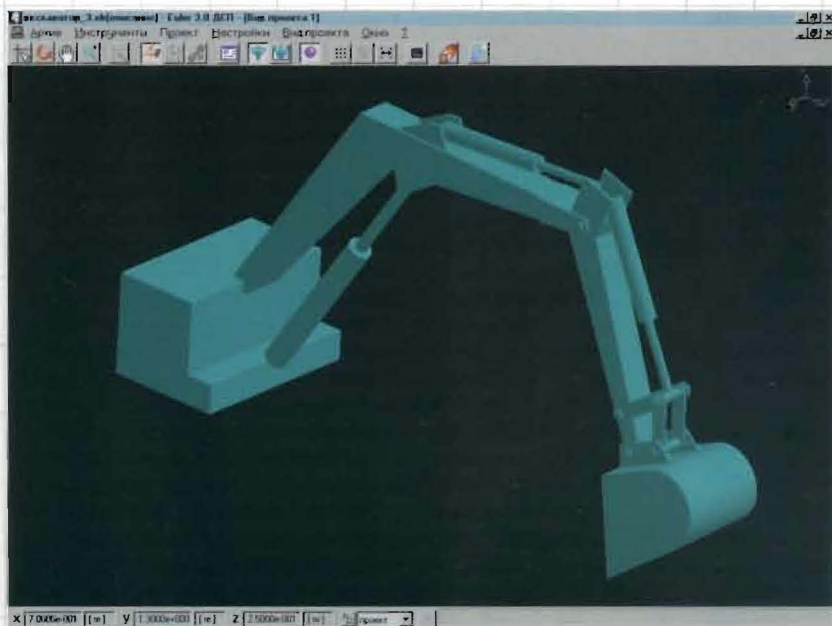


Рис. 7. Трехмерные тела деталей

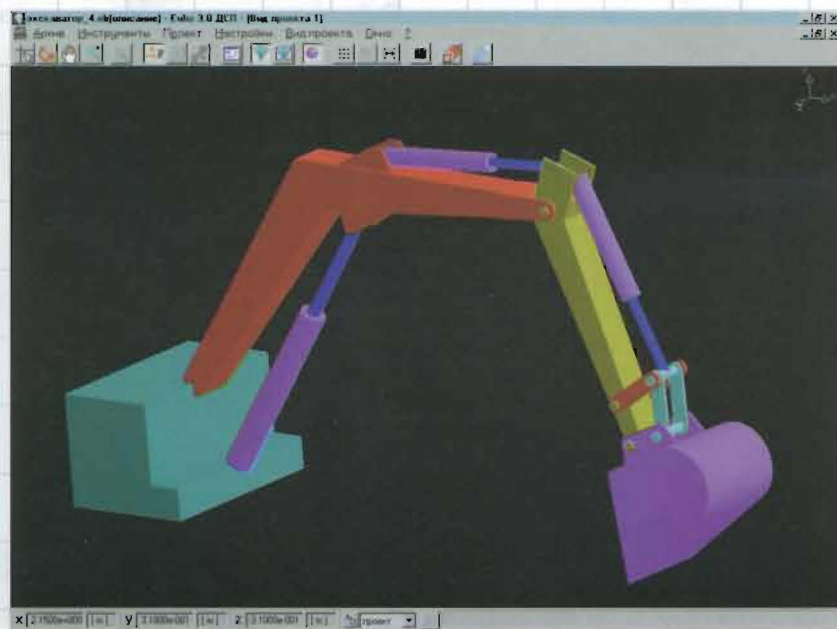


Рис. 8. Звенья механической системы

в качестве образующих использовались контурные линии деталей, которые были сформированы на предыдущем этапе. Корпуса и штоки гидроцилиндров и валы осей вращения создавались методом «цилиндр». Некоторые детали, в частности косынки и валы осей вращения, создавались лишь для наглядности, а при решении практических задач можно обойтись без них. Результаты этапа представлены на рис. 7. На формирование трехмерных тел деталей в Euler ушло 38 минут.

Задание звеньев механической системы

На данном этапе осуществлялось задание звеньев механической системы в соответствии с принятой концепцией модели и прикрепление к ним геометрических объектов (трехмерных тел деталей). Для каждого звена задавался его цвет, которым по умолчанию окрашивались все прикрепленные к звену объекты. Результаты этапа представлены на рис. 8. Продолжительность этапа составила 12 минут.

Задание шарниров

Шарниры представляют собой подвижные соединения звеньев механической системы. Они показаны на рис. 9 условными пиктограммами. Задание шарниров заняло 9 минут.

Задание условий нагружения

В качестве условий нагружения были заданы прежде всего силовые элементы, имитирующие нагрузку на ковш по трем осям. В данном случае использовались элементы типа «сила на одну точку». В качестве точки приложения сил была задана точка в центре ковша.

Для приведения модели рабочего оборудования в различные поло-

жения были заданы три объекта типа «условие состояния механизма», по одному на каждый гидроцилиндр. Каждое из этих условий устанавливает свой гидроцилиндр в требуемое положение по заданному значению хода гидроцилиндра.

Поскольку рассматривается задача статического нагружения, то необходимо произвести стопорение механизма в текущем положении. Для этого поступательные шарниры, соединяющие корпуса и штоки гидроцилиндров, были заклинены. Этим фактически имитировалась установка золотника распределителя управления гидроцилиндром в нейтральное положение, при котором линии подачи и слива жидкости на гидроцилиндре заперты.

После завершения этого этапа, последнего из рассматриваемых, можно оперативно устанавливать механизм рабочего оборудования экскаватора в любое физически возможное положение и получать значения усилий в шарнирах при заданной нагрузке на ковш. В Euler можно включить визуализацию сил, действующих на любое звено. На рис. 10 представлена модель рабочего оборудования в одном из его положений. На рисунке показаны силы, действующие на стрелу. Продолжительность этапа задания условий нагружения составила 12 минут, но далее можно оперативно менять

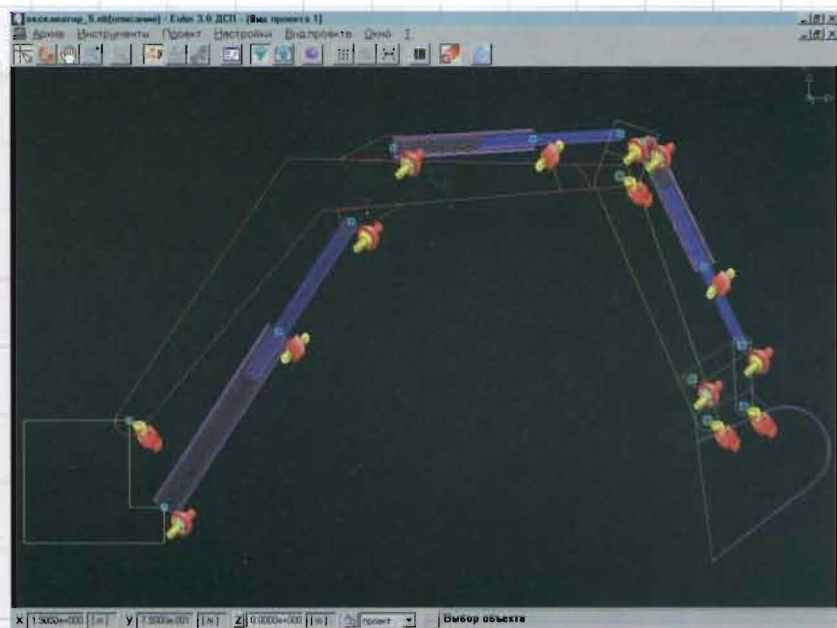


Рис. 9. Шарниры механической системы

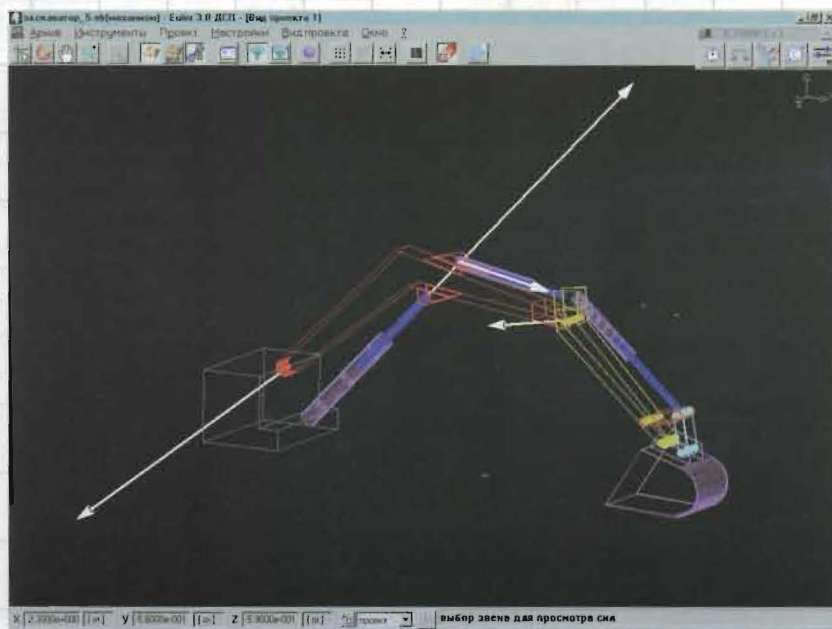


Рис. 10. Силовое нагружение рабочего оборудования экскаватора

значения в этих условиях для изменения нагрузок на ковш и изменения положения рабочего оборудования.

Итак, общая продолжительность решения задачи формирования модели рабочего оборудования экскаватора составила 2 часа 12 минут. В таблице 1 представлены поэтапные затраты времени на решение задачи. Но следует заметить, что в данном случае формированием модели занимался опытный пользователь, хорошо знающий возможности Euler. У начинающего пользователя решение этой задачи может занять больше времени.

Созданную модель рабочего оборудования можно использовать при проведении других исследований. Например, можно получить зону копания экскаватора, которая представлена на рис. 11. Модель может быть использована также для автономных динамических исследований рабочего оборудования или как составная часть в общей модели экскаватора.

Сброс головного обтекателя ракеты-носителя

При сбросе головного обтекателя ракеты-носителя во избежание аварии необходимо обеспечить безударное расхождение его частей с самой

ракетой-носителем (РН). Для этого требуется правильно выбрать характеристики конструктивных элементов, в том числе моменты их срабатывания, которые обеспечат безопасность этого процесса. В примере, показанном на рис. 12, моделируется сброс обтекателя, состоящего из двух секций.

Предполагается, что в начальный момент моделирования физическая

расцепка секций обтекателя уже произведена, то есть раскрыты замки, соединяющие секции друг с другом и с конструкцией РН. Но каждая секция остается скрепленной с конструкцией РН одним вращательным шарниром. Эти шарниры расположены в средних частях оснований секций.

В процессе сброса обтекателя работает двигательная установка ракеты-носителя, вектор тяги которой направлен вдоль продольной оси.

В начальный момент моделируемого процесса включены специальные реактивные двигатели, установленные в верхней части секций, которые обеспечивают их разведение. При этом секции остаются связанными с конструкцией РН вращательными шарнирами в средних частях своих оснований. При работе реальной конструкции в процессе сброса обтекателя происходят два важных события:

- 1 Выключаются двигатели разведения секций. Фактически это окончание выработки заряда твердого топлива.
- 2 Ликвидируются вращательные шарниры, связывающие секции обтекателя с конструкцией РН. Обычно это выполняется раскрытием механических или пиротехнических замков, скрепляющих конструкции шарнирных соединений с конструкцией РН.

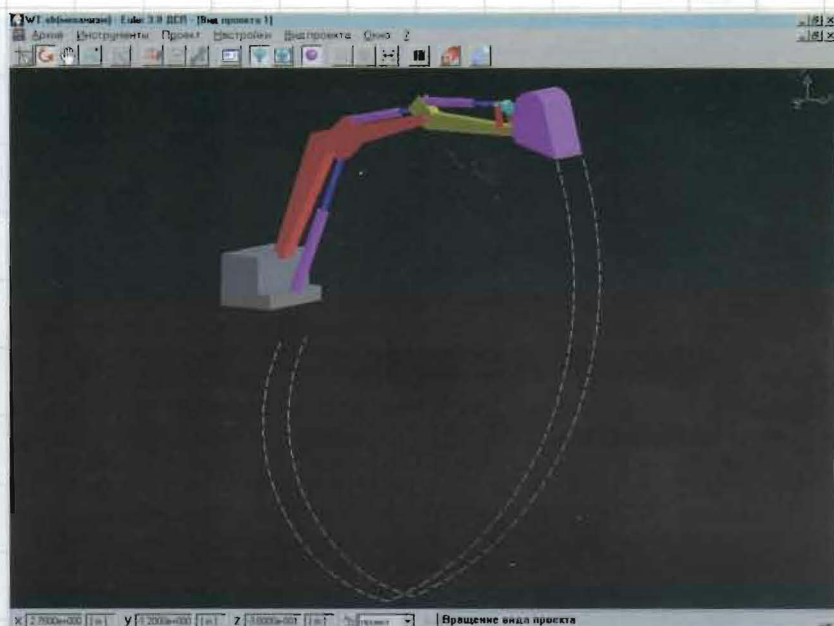


Рис. 11. Зона копания экскаватора

Продолжительность создания модели рабочих органов экскаватора

№	Наименование этапа	Продолжительность этапа
1	Задание базовых точек и линий	35 минут
2	Формирование контурных линий деталей	26 минут
3	Формирование трехмерных тел деталей	38 минут
4	Задание звеньев механической системы	12 минут
5	Задание шарниров	9 минут
6	Задание условий нагружения	12 минут
	Итого	2 часа 12 минут

После совершения этих событий происходит свободное движение секций обтекателя.

Для моделирования процесса сброса обтекателя в Euler была составлена достаточно простая модель, включающая следующие основные объекты:

♦ **звенья:**

- две секции обтекателя;
- ракета-носитель;
- Земля — инерциальное звено;

♦ **шарниры:**

- два вращательных шарнира, связывающих секции обтекателя с РН;

♦ **силовые элементы:**

- реактивный двигатель РН;
- два реактивных двигателя разведения на секциях обтекателя;

♦ **события:**

- выключение двигателей разведения на секциях обтекателя;
- удаление вращательных шарниров, связывающих секции обтекателя с РН.

Гравитация в данной модели не задавалась, так как, вызывая одинаковые ускорения секций обтекателя и РН, она не влияет на их относительное движение, исследуемое в рассматриваемом процессе.

Модель можно упростить, если масса секций обтекателя мала по сравнению с массой РН. В этом случае можно пренебречь влиянием масс отделяемых секций обтекателя на движение РН. В связи с этим можно убрать звено «Земля» и считать инерциальным звеном саму ракету-носитель. Убирается также силовой элемент «реактивный двигатель РН», а его влияние достаточно точно имитируется параллельной гравитацией с постоянным ускорением. В этом случае вектор гравитационного ускорения надо задавать противоположным направлением

силы тяги двигателя РН, а его значение должно быть равно ускорению РН, которое вызывается силой тяги.

Для обеспечения безударного расхождения секций обтекателя нужно подбирать характеристики двигателей разведения (значение тяги, угол установки, момент выключения) и момент удаления вращательных шарниров. Картину движения можно контролировать на экране компьютера.

При сбросе обтекателя могут использоваться и другие конструктивные решения узлов, обеспечивающие разделение. Например, на секциях обтекателя вместо реактивных двигателей разведения могут устанавливаться пружинные или пневматические толкатели. Разрушаемые

вращательные шарниры в средних частях оснований секций обтекателя могут быть заменены на контактные связи конструктивных элементов секций и ракеты-носителя. В этом случае для обеспечения безударного расхождения секций обтекателя необходимо правильно выбрать форму контактных поверхностей, поскольку от нее зависит момент схода секций с контактных связей, и, следовательно, протекание динамического процесса. Все эти варианты можно исследовать с помощью Euler.

Самоходная артиллерийская установка

Для обеспечения высокой скорострельности самоходной артиллерийской установки (САУ) большого калибра необходимо обеспечить эффективное демпфирование ее колебаний, возникающих после выстрела. Это демпфирование осуществляется в основном амортизаторами подвески, которые устанавливаются между корпусом и рычагами катков. Целью данного исследования являлось определение необходимого числа амортизаторов в подвеске САУ и их характеристик, которые обеспечивают заданную скорострельность. Для этого моделировался динамический процесс

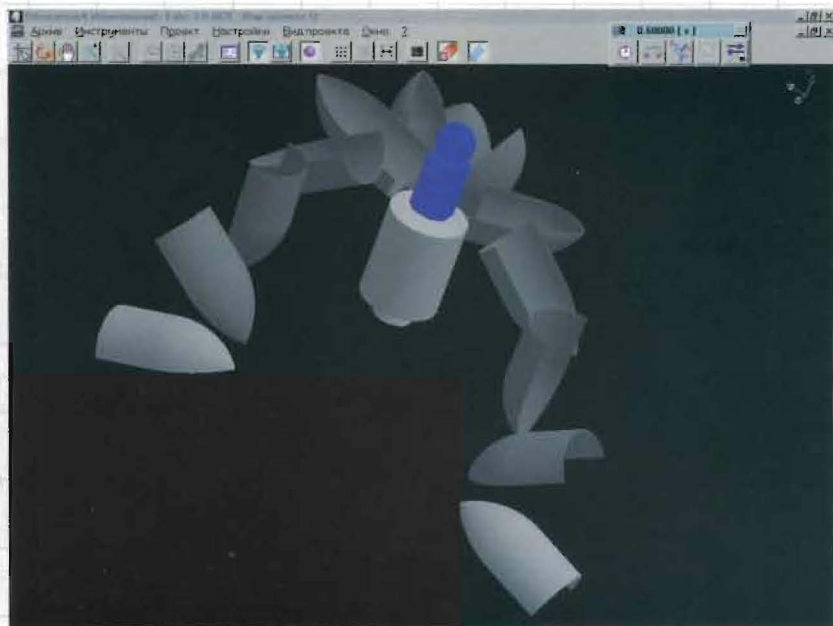


Рис. 12. Сброс головного обтекателя ракеты-носителя

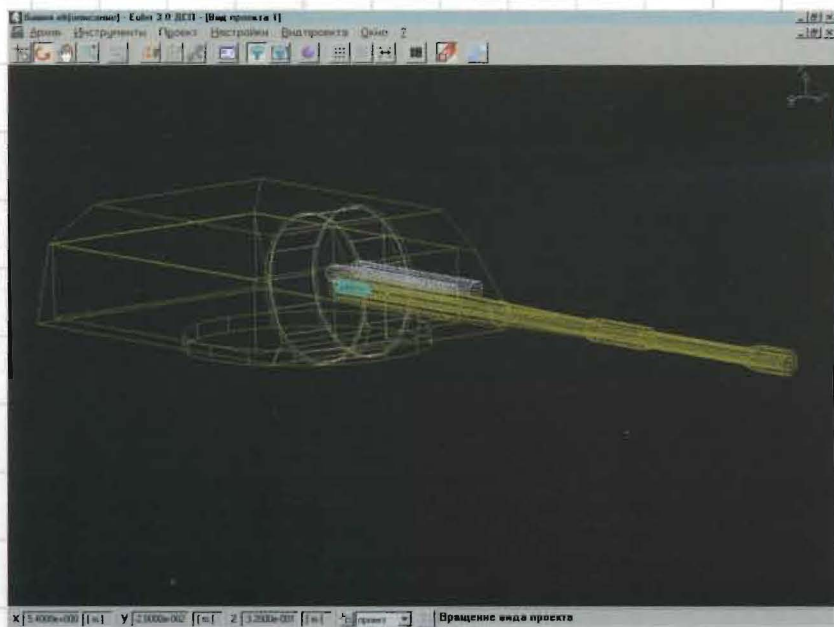


Рис. 13. Артиллерийская установка

пространственного поведения САУ при выстреле со стационарной позиции. Выстрел может производиться при различных углах поворота башни относительно корпуса и углах возвышения ствола.

Рассмотрим кратко описание идеализированной модели САУ, используемой при проведении данного исследования. Для удобства описания САУ была разделена на два агрегата: артиллерийская установка и ходовая часть.

Внешний вид артиллерийской установки показан на рис. 13. Она состоит из следующих звеньев:

- башня;
- цапфа — конструкция, обеспечивающая поворот ствола в вертикальной плоскости;
- ствол;
- снаряд.

Звенья соединены следующими шарнирами:

- башня и цапфа соединены вращательной парой, ось расположена в горизонтальной плоскости и перпендикулярна оси ствола;
- цапфа и ствол соединены поступательной парой, ось которой совпадает с осью ствола;
- ствол и снаряд связаны поступательной парой. Этот шарнир разрушается в момент выхода снаряда из ствола объектом типа «событие».

Между звеньями установлены следующие силовые элементы:

- между цапфой и стволом установлена возвратная пружина. Она возвращает ствол в исходное положение после отдачи в результате выстрела;
- между цапфой и стволом установлен также демпфер поступательного движения. Он гасит энергию отдачи ствола;
- сила давления пороховых газов имитируется продольным силовым

элементом, который действует на снаряд и ствол. Значение силы описывается функцией, зависящей от положения снаряда относительно ствола. Этот силовой элемент включается в момент выхода снаряда из ствола объектом типа «событие».

Внешний вид ходовой части показан на рис. 14. Она состоит из следующих звеньев:

- корпуса;
- рычагов подвески;
- катков.

Каждый рычаг подвески соединен одной парой вращения с корпусом, а другой парой вращения — со своим катком.

Между рычагами подвески и корпусом установлены силовые элементы: торсионы и амортизаторы.

Для создания общей модели САУ оба агрегата (артиллерийская установка и ходовая часть) были внесены в единый проект. Далее в этот проект были добавлены следующие основные объекты:

- башня артиллерийской установки соединена парой вращения с корпусом ходовой части;
- введено звено — позиция;
- позиция и катки ходовой части соединены контактными шарнирами;
- введены начальные условия процесса — угол поворота башни относительно корпуса и угол возвышения ствола;

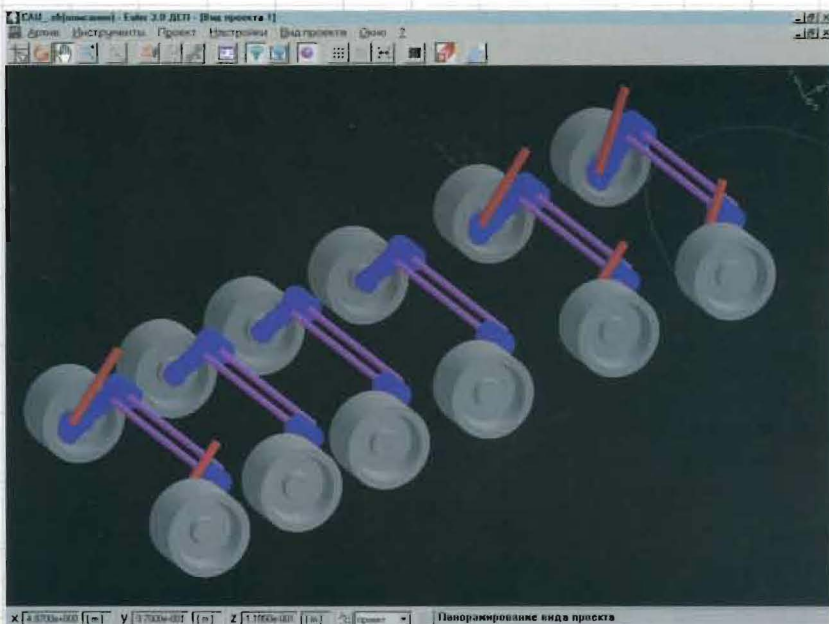


Рис. 14. Ходовая часть САУ

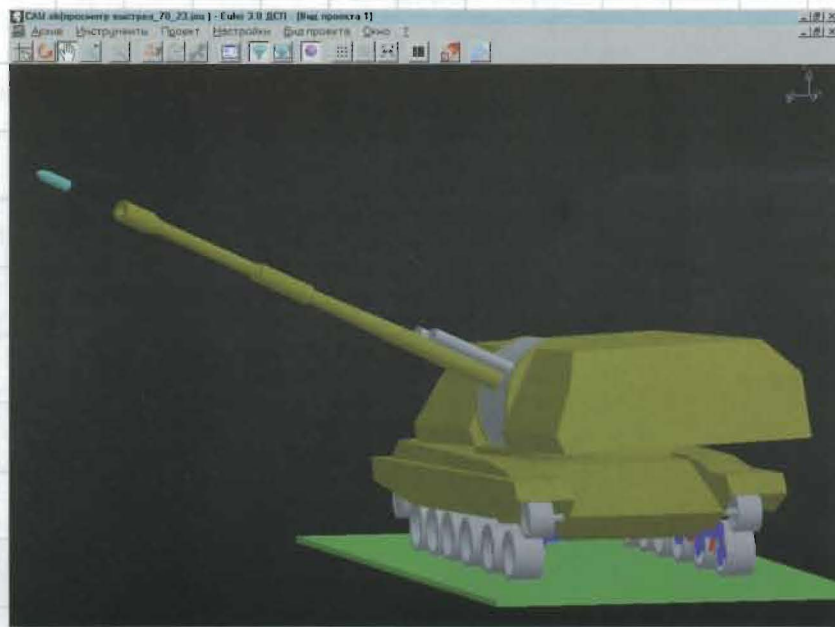


Рис. 15. Динамическое поведение САУ при выстреле

• введены объекты типа «событие», которые производят заклинивание пар вращения корпус-башня и башня-цапфа перед выстрелом. Так моделировалось действие фиксаторов в реальной конструкции САУ.

Отображение динамического поведения САУ в процессе стрельбы приведено на рис. 15.

Следует отметить, что приведенная модель САУ является моделью первого приближения и носит отчасти иллюстративный характер. Для ее уточнения можно учесть изгибную жесткость ствола, жесткость погона, соединяющего башню и корпус, влияние гусениц и другие факторы.

Посадка самолета во внештатных условиях

Посадка самолета в различных внештатных условиях (большой крен, наезд на препятствие и т. д.) может вызывать опасное движение и приводить к возникновению повышенных нагрузок, которые существенно отличаются от типовых. Основной целью исследования в примере, который представлен на рис. 16, являлось определение нагрузок, возникающих в узлах шасси при посадке самолета с большим креном на ровную площадку. При такой посадке происходит сложное простран-

ственное движение самолета, которое сопровождается несимметричным нагружением главных стоек шасси.

Конструкция планера самолета в данном примере задавалась с учетом изгибной жесткости крыла в поперечной плоскости самолета и изгибных жесткостей фюзеляжа в двух плоскостях. Крыло было разделено по размаху на семь секций.

Секции крыла соединены между собой вращательными шарнирами, оси которых совпадают с хордой крыла. Между секциями крыла установлены силовые элементы, имитирующие его изгибную жесткость. Фюзеляж был разделен вдоль продольной оси на три секции. Секции фюзеляжа соединены между собой шарнирами с двумя вращательными степенями свободы. Между секциями фюзеляжа установлены силовые элементы, имитирующие его изгибные жесткости в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Центральная секция крыла и передняя секция фюзеляжа соединены в единое жесткое звено.

Каждая стойка шасси состоит из корпуса, штока и колеса. Корпуса главных стоек жестко соединены с центральной секцией крыла, а корпус хвостовой стойки — с последней секцией фюзеляжа. Штоки главных стоек соединены с корпусами поступательными шарнирами, что делает колеса главных стоек неповоротными. Хвостовое колесо является поворотным, и поэтому шток хвостовой стойки соединен с корпусом цилиндрическим шарниром. Между штоками и корпусами стоек установлены упругие и демпфирующие силовые элементы, которые имитируют возвратные пружины и амортизаторы гашения энергии. Штоки и колеса соединены

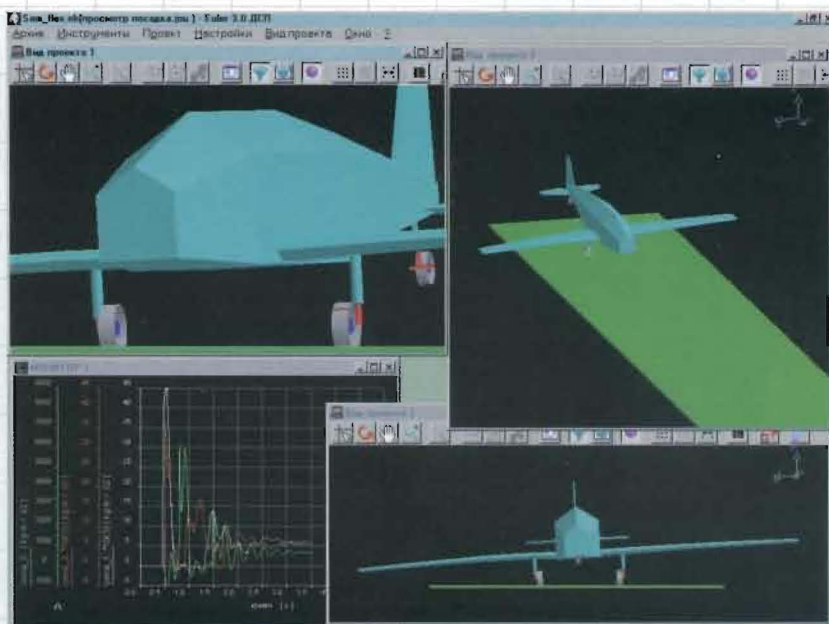


Рис. 16. Посадка самолета

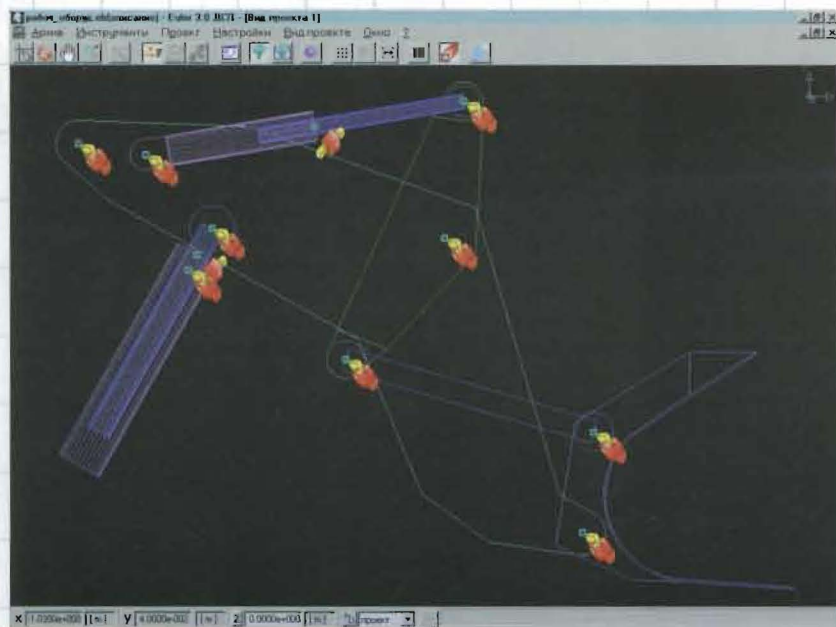


Рис. 17. Рабочие органы фронтального погрузчика

между собой парами вращения, которые имитируют оси вращения колес. Колеса моделировались специальными шарнирами «колесо с эластичной шиной».

Моделировались внешние силы, действующие на самолет:

- сила тяжести;
- аэродинамическая подъемная сила крыла (моделировалась отдельными силовыми элементами, действующими на каждую секцию крыла). Эта сила зависит от скорости набегающего потока и угла атаки секции;
- силы воздействия от колес при их контакте с поверхностью аэродрома. Эти силовые воздействия автоматически появляются в модели в результате использования шарнира «колесо с эластичной шиной» и зависят от его характеристик.

Сила аэродинамического лобового сопротивления и сила тяги двигательной установки примерно компенсируют друг друга и в сумме не оказывают существенного влияния на поведение нагрузок в узлах шасси, и поэтому их влияние не учитывалось.

Значения сил, действующих в процессе посадки на конструкцию самолета со стороны шасси, приведены на графиках на рис. 16.

Приведенную модель самолета можно использовать для оценки безопасности посадки по касанию

крылом поверхности аэродрома, моделирования условий опрокидывания самолета, а также для проведения других исследований.

Моделирование работы фронтального погрузчика

При разработке фронтального погрузчика инженерам приходится

решать множество кинематических, статических и динамических задач, связанных с определением нагрузок на рабочее оборудование и элементы трансмиссии, с динамикой движения погрузчика в целом и т. д. Продемонстрируем, как некоторые из них решаются с помощью программного комплекса Euler.

На рис. 17 представлена модель рабочего оборудования погрузчика, используемая для оценки его силового нагружения в основной плоскости. Такую постановку задачи рационально использовать в качестве модели первого приближения при выборе общей конструктивной схемы рабочего оборудования.

Модель рабочего оборудования состоит из следующих звеньев:

- рама — инерциальное звено, имитирующее переднюю часть рамы погрузчика, на которой монтируется рабочее оборудование;
- стрела;
- корпуса верхнего и нижнего гидроцилиндров;
- штоки верхнего и нижнего гидроцилиндров;
- коромысло;
- тяга;
- ковш.

Шарниры, которые использовались для соединения звеньев в модели при решении задачи силового нагружения рабочего оборудования в основной плоскости, пред-

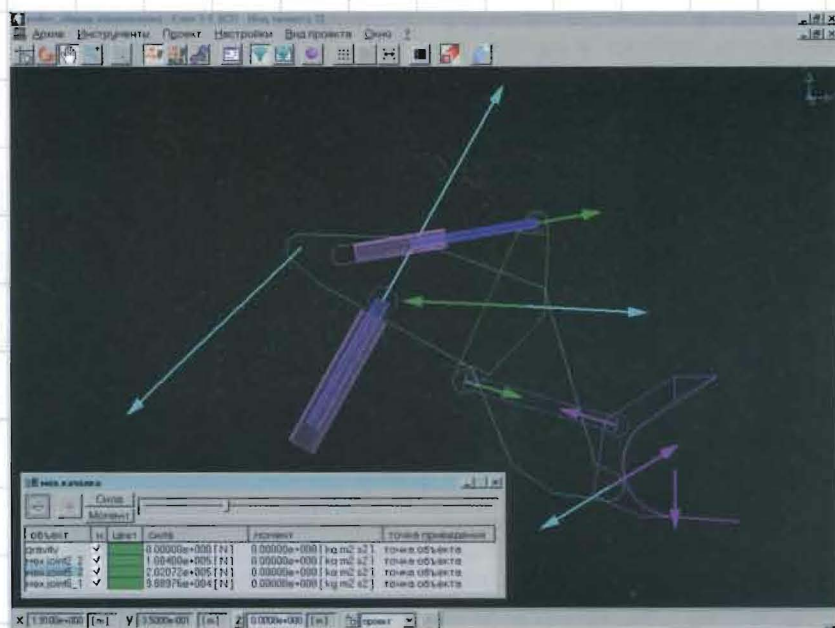


Рис. 18. Силовое нагружение рабочих органов фронтального погрузчика

ставлены на рис. 17 условными пиктограммами. Для соединений рама-стрела, рама-корпус нижнего гидроцилиндра, стрела-шток нижнего гидроцилиндра, стрела-корпус верхнего гидроцилиндра, коромысло-шток верхнего гидроцилиндра, коромысло-стрела, коромысло-тяги, стрела-ковш и тяга-ковш использованы вращательные шарниры, оси которых перпендикулярны основной плоскости. Корпуса и штоки гидроцилиндров соединены поступательными шарнирами. Следует заметить, что представленная на рис. 17 модель фактически является плоской. Реальный пространственный механизм с такими шарнирами будет работоспособен только при идеально точном изготовлении. Малейший перекос осей шарниров приведет к заклиниванию механизма. В этом можно убедиться, если смоделировать эту ситуацию в Euler. При перекосе осей будет выдан диагноз, что задача положения механизма не имеет решения.

Работоспособность реального механизма рабочего оборудования погрузчика обеспечивается за счет дополнительных степеней свободы. Они могут быть обеспечены заменой принятых в описанной модели вращательных и поступательных шарниров на цилиндрические или сферические, а также за счет зазоров в шарнирах. Заметим, что вращательный шарнир с зазором, обеспечивающим угловое смещение оси вращения, работает в некоторой окрестности как сферический шарнир. Euler, начиная с версии 3.0, позволяет проводить исследования механизмов не только на «правильных» пространственных моделях, в которых введены все необходимые степени свободы, но и на идеализированных плоских моделях, подобных приведенной на рис. 17 плоской модели механизма рабочего оборудования погрузчика. Преимуществом плоских моделей является простота, поэтому для их создания требуется меньше времени.

На рис. 18 в виде стрелок визуализированы силы, которые действуют на ковш, коромысло и стрелу при статическом нагружении ковша вертикальной силой. Сила нагружения ковша моделируется силовым элементом.

Моделирование рабочего цикла погрузчика представлено на рис. 19.

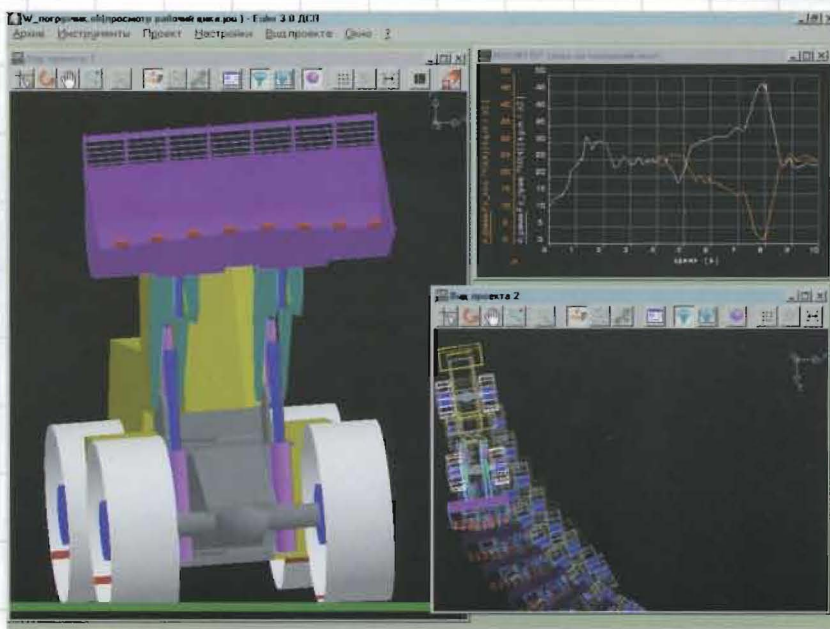


Рис. 19. Рабочий цикл фронтального погрузчика

Перед началом рабочего цикла, моделируемого в данном примере, погрузчик находится перед штабелем, имеет скорость по направлению к штабелю, ковш опущен.

Моделируемый рабочий цикл состоит из следующих операций:

- внедрение ковша в материал штабеля под действием напорного усилия погрузчика;
- подъем наполненного ковша;
- отъезд погрузчика задним ходом с поворотом.

Для решения этой задачи в общей модели погрузчика были соединены пространственная модель рабочих органов, модель шасси и модель трансмиссии.

Для моделирования гидроцилиндров использовались следующие объекты:

- соответствующие звенья (корпус и шток);
- силовые элементы, имитирующие давление жидкости при ее подаче в гидроцилиндры;
- события заклинивания и освобождения шарниров, связывающих корпус и шток. Этими событиями моделировались переключения распределителя подачи жидкости в гидроцилиндры в нейтральное положение, при котором линии подачи и слива жидкости на гидроцилиндре заперты, и в рабочее положение.

Силы сопротивления материала штабеля при внедрении в него ков-

ша и при подъеме последнего моделировались силовыми элементами с функцией силы, зависящей от положения ковша относительно штабеля. Двигатель погрузчика моделировался силовым элементом типа «момент сил». Для моделирования поворота передней и задней секций погрузчика относительно друг друга использовался объект типа «программное движение», который представляет собой идеальный однопараметрический канал управления. В этом программном движении угол поворота секций задавался функцией, зависящей от пройденного погрузчиком пути.

На графике на рис. 19 представлены значения вертикальных сил, действующих в шарнирах колес переднего моста в процессе выполнения погрузчиком описанного рабочего цикла.

Благодаря удобному, понятному интерфейсу и наличию подробной интерактивной документации освоение работы с программным комплексом происходит достаточно быстро. После небольшой тренировки на простейших механизмах пользователь может приступить к решению практических задач. При моделировании сложных систем рационально привлечь к работе специалистов АО «АвтоМеханика», которое является разработчиком программного комплекса Euler. ►