

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ 6.0



# Программа моделирования

---

Руководство пользователя

2010

Рассмотрены вопросы моделирования динамики механических систем в программном комплексе «Универсальный механизм»

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>4.</b>	<b>ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ</b>	<b>4-4</b>
4.1.	<b>Меню программы моделирования</b>	4-4
4.1.1.	Файл	4-4
4.1.2.	Анализ	4-5
4.1.3.	Инструменты	4-6
4.1.4.	Окна	4-8
4.2.	<b>Настройки модуля моделирования</b>	4-9
4.2.1.	Общие	4-9
4.2.2.	Автосохранение	4-10
4.2.3.	Формат чисел	4-11
4.2.4.	Экспорт графиков в MS Excel	4-12
4.3.	<b>Общие сведения о модуле моделирования</b>	4-13
4.3.1.	Переменные	4-13
4.3.2.	Мастер переменных	4-13
4.3.2.1.	Координаты	4-14
4.3.2.2.	Угловые переменные	4-15
4.3.2.3.	Линейные переменные	4-16
4.3.2.4.	Силы: активные, биполярные, шарнирные, линейные, специальные, реакции	4-17
4.3.2.5.	Все силы	4-21
4.3.2.6.	Контактные силы	4-21
4.3.2.6.1.	Вкладка Тела	4-22
4.3.2.6.2.	Вкладка Отдельные силы	4-23
4.3.2.7.	Переменные, рассчитываемые пользователем	4-24
4.3.2.8.	Векторы, рассчитываемые пользователем	4-24
4.3.2.9.	Идентификаторы	4-24
4.3.2.10.	Переменная – выражение	4-25
4.3.2.10.1.	Основные действия при создании списка	4-25
4.3.2.10.2.	Операторы	4-26
4.3.2.10.3.	Простейший пример	4-27
4.3.2.11.	Закладки ж.-д. экипаж и СК пути	4-27
4.3.2.12.	Внешние библиотеки	4-27
4.3.3.	Список переменных	4-29
4.3.3.1.	Создание и модификация списков переменных	4-29
4.3.3.2.	Наполнение списка переменных	4-30
4.3.3.3.	Обработка данных в списках рассчитанных переменных	4-32
4.3.4.	Окно для построения графиков	4-33
4.3.4.1.	Работа с графиками в графическом окне	4-35
4.3.4.2.	Изменение параметров графического окна	4-37
4.3.4.3.	Частотная фильтрация переменных	4-38
4.3.4.4.	Изменение параметров переменной	4-39
4.3.4.5.	Копирование графиков в MS Excel	4-39
4.3.5.	Анимационное окно модуля моделирования	4-40
4.3.5.1.	Визуализация векторов/траекторий	4-40
4.3.5.2.	Сохранение анимации в файл	4-41
4.3.6.	Процессор переменных	4-43
4.3.6.1.	Табличный процессор	4-43
4.3.6.2.	Преобразование переменных	4-45
4.3.7.	Статистика	4-47
4.3.8.	Анализ силовых элементов в частотной области	4-49
4.3.9.	Пульт управления	4-50
4.3.9.1.	Редактор пульта управления	4-51
4.4.	<b>Режим однократного интегрирования уравнений движения</b>	<b>4-54</b>

4.4.1.	Общая структура блока интегрирования уравнений движения.....	4-55
4.4.2.	Подготовка процесса интегрирования.....	4-56
4.4.2.1.	Выбор метода и параметров численного интегрирования.....	4-56
4.4.2.2.	Общие параметры интегрирования.....	4-57
4.4.2.3.	Параметры численных методов.....	4-58
4.4.2.3.1.	BDF, ABM.....	4-58
4.4.2.3.2.	Метод Парка.....	4-58
4.4.2.4.	Изменение значений идентификаторов.....	4-59
4.4.2.5.	Выбор и автоматическое вычисление начальных условий.....	4-60
4.4.2.5.1.	Задание начальных условий для систем без избыточных координат.....	4-62
4.4.2.5.2.	Расчет начальных условий для систем с замкнутыми кинематическими цепями ..	4-62
4.4.2.5.3.	Расчет интервала допустимых значений координат.....	4-63
4.4.2.6.	Задание и использование списка автоматически рассчитываемых переменных.....	4-64
4.4.2.7.	Настройка параметров 3D контакта.....	4-64
4.4.3.	Интегрирование уравнений движения.....	4-69
4.4.3.1.	Режим паузы в процессе интегрирования.....	4-69
4.4.3.2.	Текущие параметры процесса интегрирования.....	4-70
4.4.3.3.	Режим XVA-анализа уравнений движения.....	4-70
4.5.	<b>Линейный анализ</b> .....	4-72
4.5.1.	Исследование равновесия в зависимости от параметров.....	4-72
4.5.2.	Собственные частоты и собственные значения.....	4-73
4.5.3.	Построение корневых годографов и зависимостей частот от параметров.....	4-75
4.5.4.	Настройки.....	4-76
4.5.5.	Равновесие при наличии контактных сил.....	4-76
4.6.	<b>Список литературы</b> .....	4-77

## 4. Программа моделирования

Программа моделирования представляет собой отдельное приложение (*UMSimul.exe*) и подгружает уравнения движения исследуемого объекта, используя предварительно подготовленную динамическую библиотеку (*umtask.dll*) задачи.

Для запуска программы используйте пункт меню **Объект | Моделирование** в программе описания моделей (*UMInput.exe*). Если текущая активная задача полностью подготовлена для моделирования (то есть для нее создана динамическая библиотека с уравнениями движения *umtask.dll*), то программа моделирования автоматически подгружает модель. Если задача не имеет DLL, то ее моделирование невозможно, однако модуль интегрирования может быть запущен. В этом случае пользователь может подгрузить любую ранее подготовленную модель с помощью команды меню **Файл | Открыть**.

Численный анализ уравнений движения включает:

- численное интегрирование уравнений движения;
- анализ XVA-файлов и создание демонстраций;
- анализ линеаризованных уравнений.

### 4.1. Меню программы моделирования

#### 4.1.1. Файл

##### Открыть

Выбор задачи для моделирования из списка. Данные текущей задачи будут удалены и замещены новыми. Таким образом, не покидая программу моделирования, можно исследовать различные объекты, для которых подготовлен файл *umtask.dll*.

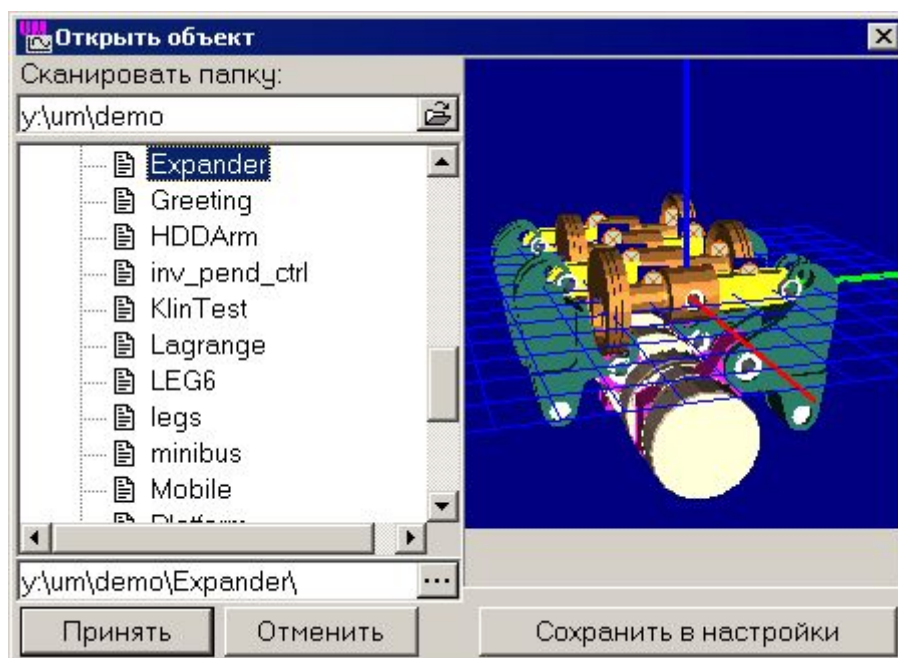


Рис. 4.1. Диалог открытия объекта

##### Открыть заново

Открывает один из последних ранее моделировавшихся объектов.

### **Закрыть**

Выгружает текущий объект.

### **Прочитать конфигурацию**

- **Рабочий стол:** чтение предварительно записанного файла \*.icf, содержащего информацию об открытых окнах, графических переменных, методе и точности интегрирования и тому подобное;
- **Другие пункты подменю:** чтение полной конфигурации, включающей рабочий стол, начальные условия, значения идентификаторов, а также, если имеется, специальный файл конфигурации (например, конфигурацию железнодорожного экипажа).

### **Записать конфигурацию**

- **Рабочий стол:** записать конфигурацию рабочего стола в файл \*.icf;
- **Все параметры:** запись конфигурации рабочего стола, начальных условий, текущих значений параметров, а также специальной конфигурации (например, для железнодорожного экипажа). Позже полная конфигурация может быть прочитана через пункт меню **Прочитать конфигурацию**.

## **4.1.2. Анализ**

Данный элемент меню открывает доступ к процедурам анализа динамики объекта. При переходе к одному из типов анализа меню становится недоступным и открывается после окончания сеанса моделирования.

### **Моделирование**

Численное интегрирование уравнений движения объекта. Через данный пункт меню вызывается Инспектор моделирования объекта (п. *Подготовка процесса интегрирования*).

### **Линейный анализ**

Анализ линеаризованных уравнений движения, включающий расчет положения равновесия, расчет частот и форм колебаний, построение корневых годографов и так далее (п. *Линейный анализ*).

### **4.1.3. Инструменты**

#### **Анимационное окно**

Открывает анимационное окно (п. 4.3.5), в котором отображается движение объекта. Число окон не ограничено.

#### **Графическое окно**

Открывает окно, в котором можно построить графики переменных (п. 4.3.4). Число окон не ограничено.

#### **Гистограмма**

Открывает окно, в котором можно построить гистограммы переменных. Число окон не ограничено.

#### **Текстовый редактор**

Открывает текстовый редактор.

#### **Мастер переменных**

Вызов **Мастера переменных** (п. 4.3.2), с помощью которого можно сформировать новые переменные для анализа динамики объекта.

#### **Список переменных**

Вызов **Списка переменных** (п. 4.3.3) для его создания/модификации/чтения, а также для анализа ранее рассчитанных списков переменных. Составленный с помощью **Мастера переменных** для конкретного объекта **Список переменных** является основой графической или табличной обработки результатов моделирования сложных технических систем.

#### **Список рассчитанных переменных**

Вызов списка предварительно рассчитанных переменных (п.

*Обработка данных в списках* рассчитанных переменных) для анализа или сравнения.

### **Табличный процессор**

Вызов **Табличного процессора** (п. 4.3.6), позволяющего провести статистический анализ рассчитанных переменных (максимум, минимум, среднее, среднеквадратическое отклонение и так далее).

### **Калькулятор выражений**

**Калькулятор выражений** позволит пользователю вычислить сложные зависимости между параметрами механической системы.

### **Калькулятор ориентации**

**Калькулятор ориентации** позволяет связать тройку углов ориентации, вектор и угол поворота, кватернион и матрицу направляющих косинусов.

### **Статистика**

Инструмент **Статистика** предназначен для расчета и графического отображения таких статистических характеристик временного ряда, как гистограммы плотности распределения вероятностей и распределения вероятностей, оценки корреляционной функции и спектральной плотности мощности, комплексной спектральной плотности (спектра). См.п.

Статистика.

### **Макросы идентификаторов**

Инструмент для создания макрокоманд - группового изменения идентификаторов.

### **Анализ сил**

Анализ силовых элементов в частотной области.

### **Редактор пульта управления**

Позволяет создавать и модифицировать окна визуального управления процессом моделирования.

### **Открыть пульт управления**

Открывает одно из ранее созданных окон визуального управления процессом моделирования.

### **Настройки**

Открывает окно с настройками модуля моделирования.

### **Панели инструментов**

Список видимых групп кнопок на панели инструментов.

## **4.1.4. Окна**

### **Список окон**

Вывод на экран окна со списком окон, открытых в данный момент. Список позволяет поместить одно из окон поверх остальных.

### **Предыдущее**

Переход к предыдущему окну.

### **Следующее**

Переход к следующему окну.

### **Текущий инспектор**

Активизация текущего инспектора.

## 4.2. Настройки модуля моделирования

Используйте команду **Инструменты | Настройки** основного меню для того, чтобы открыть окно настроек модуля моделирования. Рассмотрим вкладки окна.

### 4.2.1. Общие

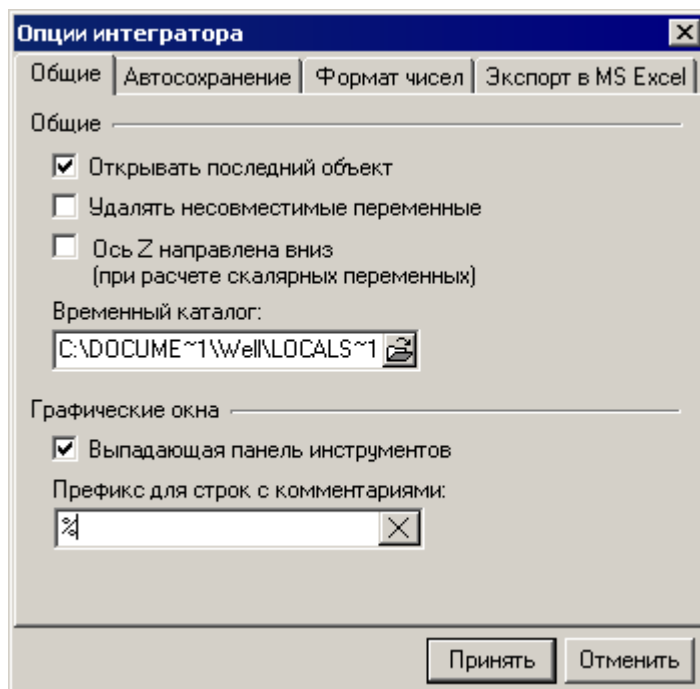


Рис. 4.2. Опции интегратора: общие

#### Общие настройки:

- **Открывать последний объект** – как правило, исследователи долгое время работают с одной и той же моделью, таким образом, может быть удобно воспользоваться данной настройкой.
- **Удалять несовместимые переменные.** Во включенном состоянии все переменные, несовместимые с текущим объектом, будут автоматически удалены из анимационных и графических окон при чтении файла конфигурации, а также при чтении списка переменных. Игнорируется для списка рассчитанных переменных (п. 4.3.3).
- **Ось Z направлена вниз (при расчете скалярных переменных)** – изменение ориентации базовой СК при расчете переменных (проекции на оси Y и Z меняют знаки, если включен данный флажок).

**Временный каталог** – используется для записи временных файлов при работе программы, например, для временной записи кадров при создании анимационных роликов в анимационных окнах.

#### Настройки графического окна

**Выпадающая панель инструментов** – включает / выключает соответствующий режим панели инструментов графического окна (п. 4.3.4).

**Префикс для строк с комментариями** – символ или набор символов, автоматически располагающийся в начале каждой строки комментариев при копировании рассчитанных переменных в буфер и текстовый файл (п. 4.3.4.1, 4.3.6). Данная настройка полезна для экспорта рассчитанных переменных во внешние программы (Maple, МАТНЕМАТИСА) с целью пометки строк с комментариями.

#### 4.2.2. Автосохранение

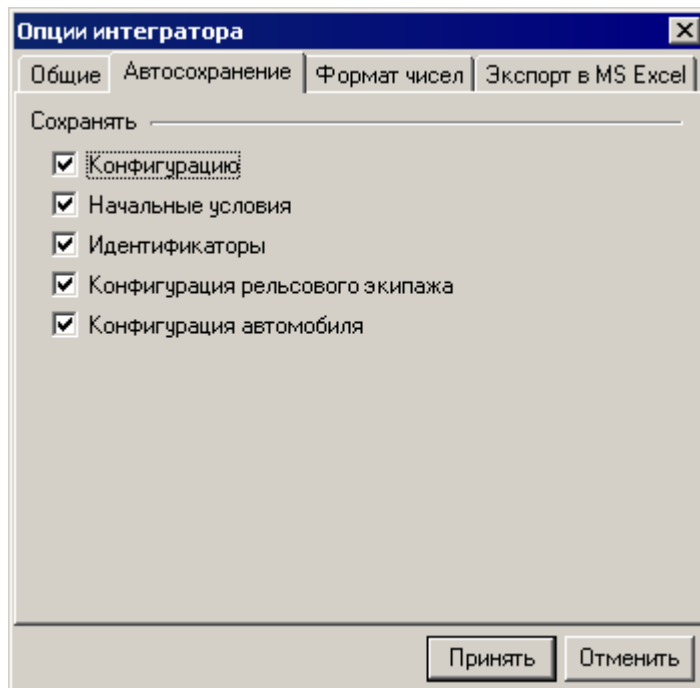


Рис. 4.3. Опции интегратора: автосохранение

Автоматическое сохранение используется для записи состояния объекта при последнем его моделировании.

##### Флажки:

- **Конфигурация** – сохранение положений графических и анимационных окон, списков переменных, включенных в эти окна, метода интегрирования и его настроек (файл last.icf).
- **Начальные условия** – сохраняет начальные значения координат и первых производных по времени (файл last.xv).
- **Идентификаторы** – сохраняет значения идентификаторов объекта после последнего изменения (файл last.par).
- **Конфигурация рельсового экипажа** – сохраняет последние настройки, использованные при моделировании объекта – рельсового экипажа (имена файлов неровностей, профилей, параметры пути и так далее, файл last.rwc).
- **Конфигурация автомобиля** – сохраняет последние настройки, использованные при моделировании объекта – автомобиля (имена файлов неровностей, тестов, параметров модели шин и так далее, файл last.car).

### 4.2.3. Формат чисел

Задается формат представления в текстовой форме чисел с плавающей точкой. Настройки используются в следующих инструментах

- **Табличный процессор** (п. 4.3.6.1)
- **Графическое окно** (при записи рассчитанных переменных в текстовый файл и копировании в буфер, п.4.3.4.1)

#### Типы форматов:

**Общий формат чисел.** Число представляется наиболее коротким выражением с использованием экспоненциального или фиксированного форматов. Концевые нули удаляются из результирующего выражения. Десятичная точка появляется только в тех случаях, когда необходимо. Результирующее выражение использует фиксированный формат, если число цифр слева от десятичной точки меньше или равно заданному параметру *точности* представления числа, и если число больше или равно 0.00001. В противном случае выражение использует научный формат, при котором параметр **Разряды** определяет минимальное число цифр в экспоненциальной части (от 0 до 4).

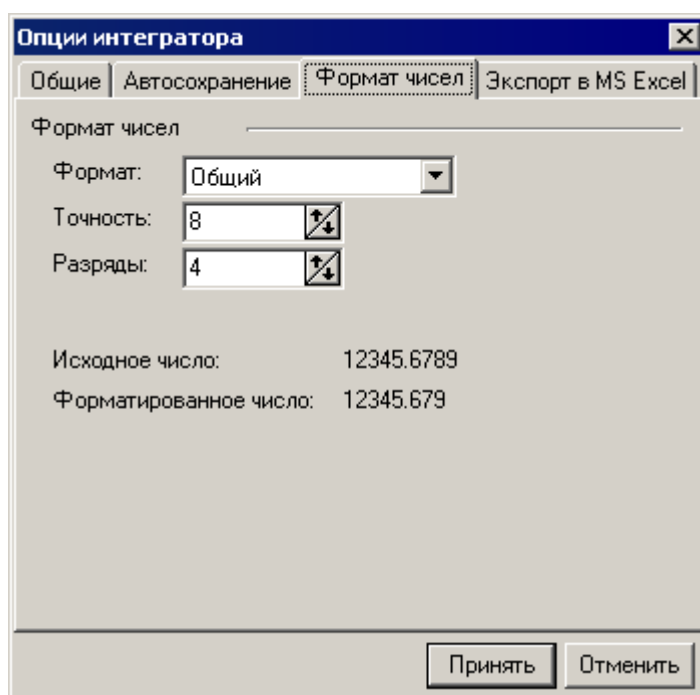


Рис. 4.4. Опции интегратора: формат чисел

**Экспоненциальный: научный формат.** Значение числа преобразуется в выражение вида "-d.ddd...E+dddd". Выражение начинается со знака минус, если число отрицательное и одна цифра всегда присутствует перед десятичной точкой. Полное число цифр, включая цифру перед десятичной точкой, задается параметром **Точность**. За знаком экспоненты "E" всегда следует знак плюс или минус и до 4 цифр показателя степени. Параметр **Разряды** определяет минимальное число цифр в экспоненциальной части (от 0 до 4).

**Фиксированный: формат с фиксированной точкой.** Значение числа преобразуется в выражение вида "-ddd.ddd...". Выражение начинается со знака минус, если число отрицательное, и по меньшей мере одна цифра всегда предшествует десятичной точке. Число цифр после десятичной точки задается параметром **Разряды** (от 0 до 18) Если число цифр

перед десятичной точкой превосходит заданный параметр **Точность**, значение числа передается в экспоненциальном (научном) формате.

#### 4.2.4. Экспорт графиков в MS Excel

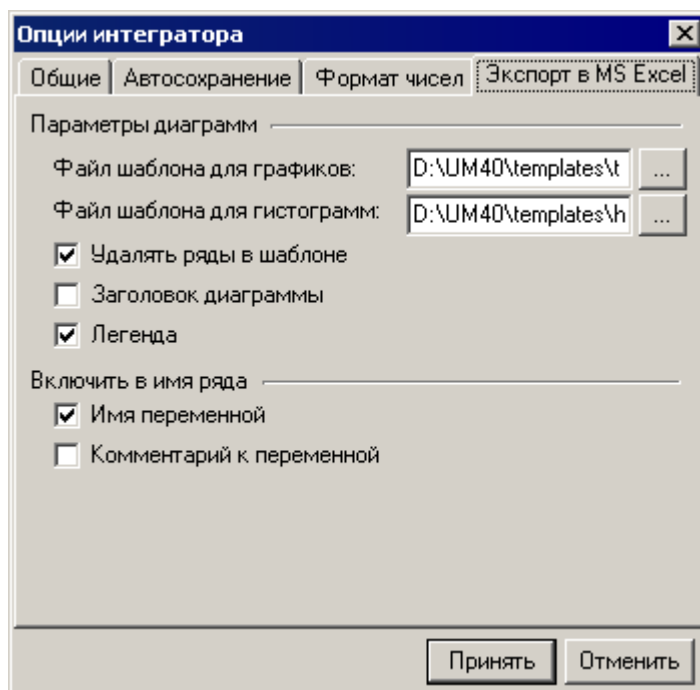


Рис. 4.5. Опции интегратора: экспорт графиков

Кнопка **Файл шаблона для графиков** позволяет выбрать один из шаблонов представления графиков в MS Excel (стандартные файлы шаблонов находятся в каталоге `.\Templates`).

Кнопка **Файл шаблона для гистограмм** позволяет выбрать один из шаблонов представления гистограмм в MS Excel.

##### Флажки:

- **Удалять ряды в шаблоне** – временные ряды в шаблонах, используемые для настроек, будут автоматически удаляться при экспорте данных из UM.
- **Заголовки диаграмм** – при включенном флажке названию диаграммы присваивается заголовок графического окна, если нет – остается заголовок шаблона.
- **Легенда** – при включенном флажке добавляется легенда, сформированная в соответствии с флажками группы **Включать в имя ряда**, если нет – легенды не будет.
- **Имя переменной** – включать в имя ряда имя переменной (игнорируется, если флажок **Легенда** выключен).
- **Комментарий к переменной** – включать комментарий к переменной в имя переменной (игнорируется, если флажок **Легенда** выключен).

**Замечание.** Если в файле шаблона находится несколько диаграмм, то при экспорте будет использоваться активная. По умолчанию активна первая диаграмма.

### 4.3. Общие сведения о модуле моделирования

#### 4.3.1. Переменные

*Переменной* называется любая характеристика исследуемого объекта, которая может быть получена при помощи УМ, например модуль вектора скорости точки, величина силы, координаты произвольной точки тела и т.д.

*Переменные* создаются при помощи **Мастера переменных** (п. 4.3.2) и хранятся в **Списке переменных** (п.4.3.3).

*Переменные* могут иметь размерность скаляра и размерность вектора, в зависимости от этого они отображаются либо в **графическом** (п. 4.3.4), либо в **анимационном** (п. 4.3.5) окне. В процессе моделирования значения переменных выводятся в графическом окне в виде графика, или в анимационном окне в виде вектора или траектории (для радиус-векторов).

#### 4.3.2. Мастер переменных

**Мастер переменных** (см. рис. 4.6) используется для создания переменных. Используйте пункт меню **Инструменты | Мастер переменных** для его активизации.

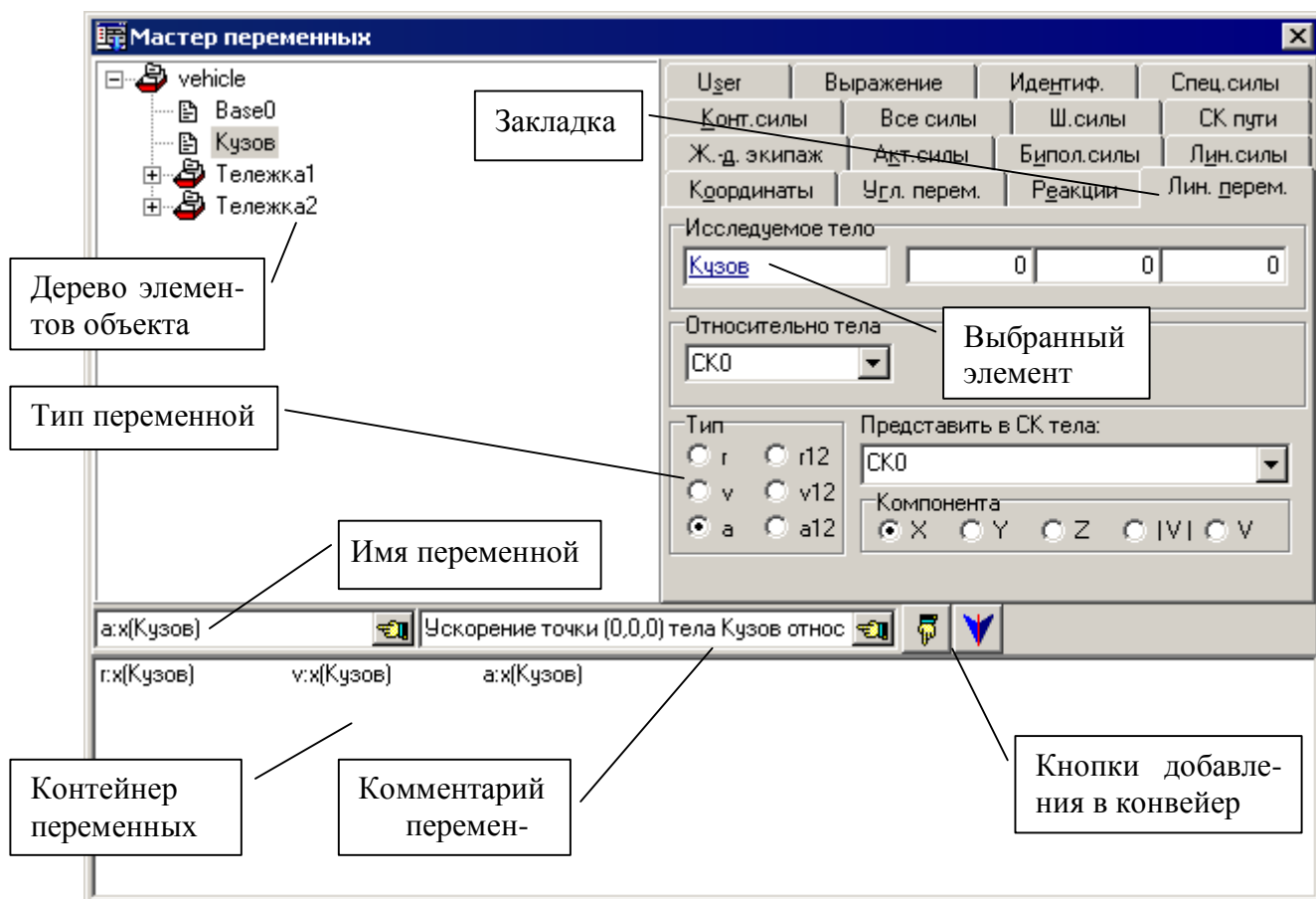
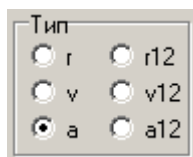


Рис. 4.6. Мастер переменных


Основными элементами окна являются *вкладки*, относящиеся к различным типам переменных (координаты, кинематические переменные тел, силы реакций и так далее), а также *дерево элементов объекта*, соответствующее каждой вкладке.

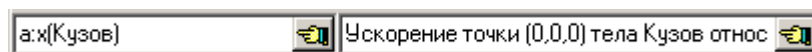
- Создание новой переменной объекта происходит в следующей последовательности:
- выбрать вкладку (например, **Лин. перем.** – линейные переменные);
  - выбрать необходимый элемент из дерева элементов объекта двойным щелчком мыши на соответствующем элементе (например – на имени конкретного тела);
  - выбрать тип переменной на вкладке из заданного списка (например, координата, скорость, ускорение, или сила, момент);





- задать дополнительные параметры, определяющие переменную (например, координаты точки, скорость которой следует определить);
- для создания переменной, которая может принимать векторное значение (скорости, ускорения, силы) следует установить параметр **Компонента**: проекция на ось (**X**, **Y** или **Z**), модуль вектора (**|V|**) или сам вектор (**V**); если переменная является проекцией, то следует задать систему координат, на которую осуществляется проектирование (параметр **Представить в СК тела**);



- используя две кнопки , можно назначить переменной стандартное имя и стандартный комментарий (пользователь может сам внести имя и комментарий непосредственно в соответствующие поля, используя техническую терминологию).



- послать сформированную переменную в контейнер, можно используя одну из двух кнопок:  – добавить переменную с текущим идентификатором и комментарием,  – добавить переменную со стандартным идентификатором и комментарием.

Далее сформированная переменная (или группа переменных) переносится с помощью мыши в соответствующее окно (графическое окно и список переменных – для скалярных переменных; анимационное окно – для векторных переменных) используя технологию *Drag&Drop*.

Перейдем к рассмотрению основных типов переменных, представленных на вкладках мастера.

#### 4.3.2.1. Координаты

Вкладка **Координаты** (рис. 4.7) используется для выбора в качестве переменной одной из шарнирных координат, а также ее первой (скорость) или второй (ускорение) производной по времени из списка координат активного объекта. Дерево элементов для данной вкладки содержит все шарниры объекта вместе с шарнирными координатами с указанием номера подсистемы и локального номера каждой из координат.

В примере, приведенном на рис. 4.7 сформирована следующая переменная: координата номер 14 подсистемы 1 – локальная шарнирная координата в шарнире:

***Тележка1.КМБлок1.jРотор.***

Данная переменная может быть перенесена либо в графическое окно, либо добавлена к списку переменных.

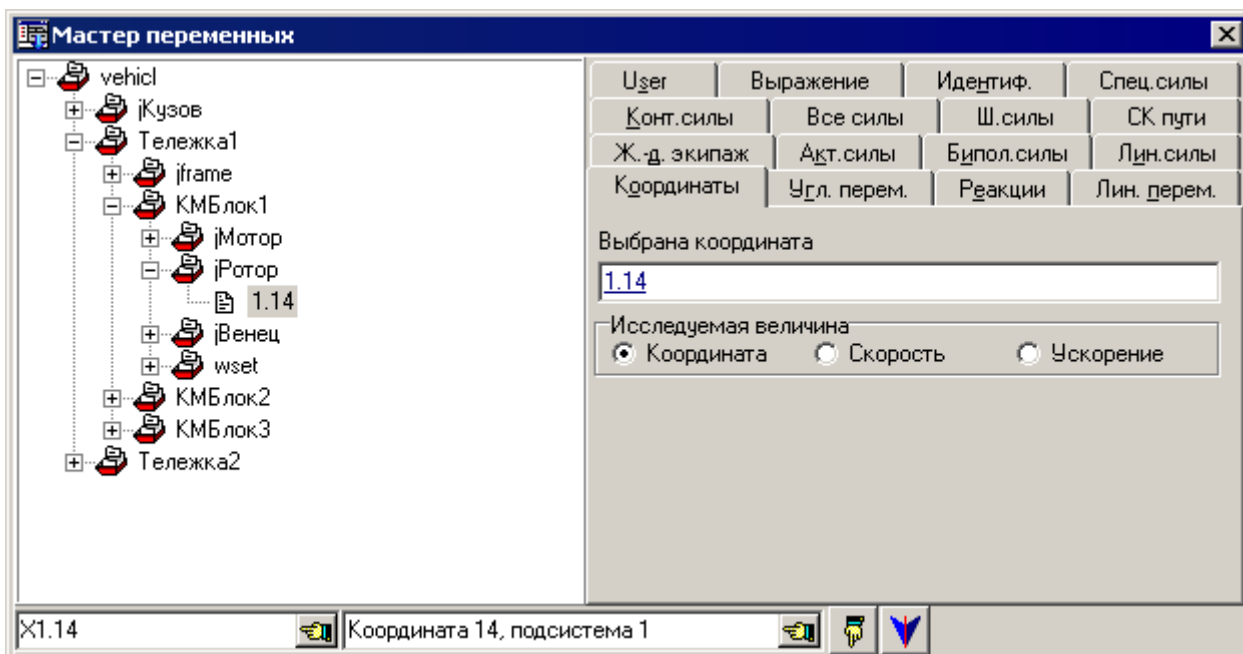


Рис. 4.7. Координаты

### 4.3.2.2. Угловые переменные

Вкладка **Угл[овые] перем[енные]** (рис. 4.8) позволяет определить переменную, связанную с изменением ориентации одного тела относительно другого. Речь идет о проекции или модуле вектора поворота, угловой скорости и углового ускорения при движении одного тела объекта относительно любого другого. Проекции вектора могут быть представлены в СК любого объекта системы. Дерево элементов для данной вкладки содержит тела.

В примере, приведенном на (рис. 4.8) сформирована следующая переменная: вектор углового ускорения тела *Тележка1.КМБлок1.Венец* относительно СК0 (абсолютное движение). Данная переменная может быть перенесена только в анимационное окно.

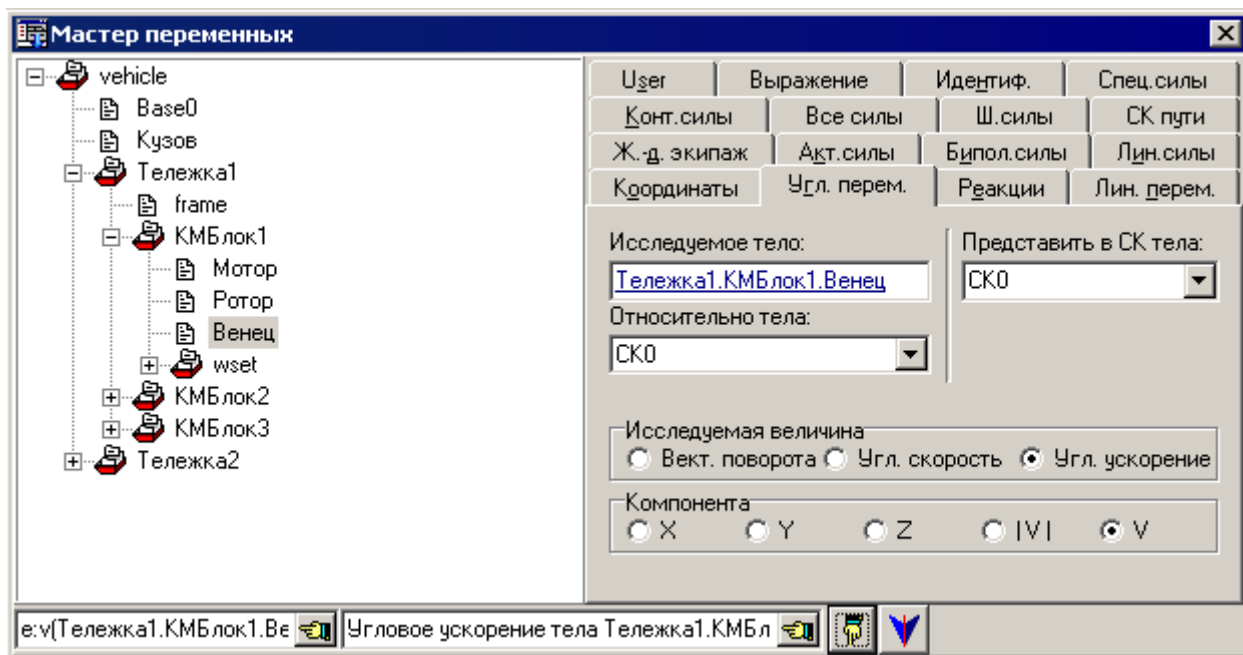


Рис. 4.8. Угловые переменные

Ключ **Использовать ориентацию при нулевых координатах** используется только для переменной **Вектор поворота**. Использование ориентации при нулевых координатах означает, что переменная рассчитывается для поворотов тел относительно положений, которые они занимали при нулевых значениях всех координат объекта. При выключенном ключе переменная рассчитывается для систем координат, связанных с телами.

**Замечание.** Вектор поворота определяется в соответствии с теоремой о конечном повороте (см. п. 1.2. научного руководства) и равен произведению единичного вектора поворота на угол поворота. В случае малых движений одного тела относительно другого проекции вектора определяют углы поворота вокруг соответствующих осей координат.

#### 4.3.2.3. Линейные переменные

Вкладка **Лин[ейные] перемен[енные]** (рис. 4.9) позволяет определить переменную, характеризующую линейное движение одного тела относительно другого. Речь идет о проекции или модуле радиуса-вектора ( $\mathbf{r}$ ), траектории (вектор  $\mathbf{r}$ ), скорости ( $\mathbf{v}$ ), ускорения ( $\mathbf{a}$ ) произвольной точки исследуемого тела относительно любого другого или о так называемых биполярных переменных: биполярном векторе ( $\mathbf{r12}$ ), скорости ( $\mathbf{v12}$ ) и ускорении ( $\mathbf{a12}$ ) пары точек двух тел. Проекция вектора могут быть представлены в СК любого тела объекта.

Рис. 4.10 иллюстрирует понятие биполярного вектора, скорости и ускорения. Рассмотрим пару тел и две связанные с ними точки **A** (для тела, относительно которого исследуется движения) и **B** (для исследуемого тела). Пусть  $\mathbf{e}_{12}$  – единичный вектор по направлению от точки **A** к точке **B**. Биполярный вектор между парой точек определяется соотношением

$$\mathbf{r}_{12} = r\mathbf{e}_{12},$$

где  $r$  – расстояние между точками. Биполярная скорость  $\mathbf{v}_{12}$  и ускорение  $\mathbf{a}_{12}$  находятся из формул

$$\mathbf{v}_{12} = \dot{r}\mathbf{e}_{12},$$

$$\mathbf{a}_{12} = \ddot{r}\mathbf{e}_{12}.$$

Величины биполярной скорости и ускорения  $\dot{r}, \ddot{r}$  характеризуют скорость и ускорение сближения/удаления пары точек.

В примере, приведенном на (рис. 4.9) сформирована следующая переменная: проекция (на ось Y СК тела *Тележка1.Frame*) биполярного вектора, соединяющего точку (5.3, -1, -2.18) тела *Кузов* с точкой (0.1, -1, -2.18) тела *Тележка1.Frame*. Данная переменная может быть перенесена в графическое окно и список переменных.

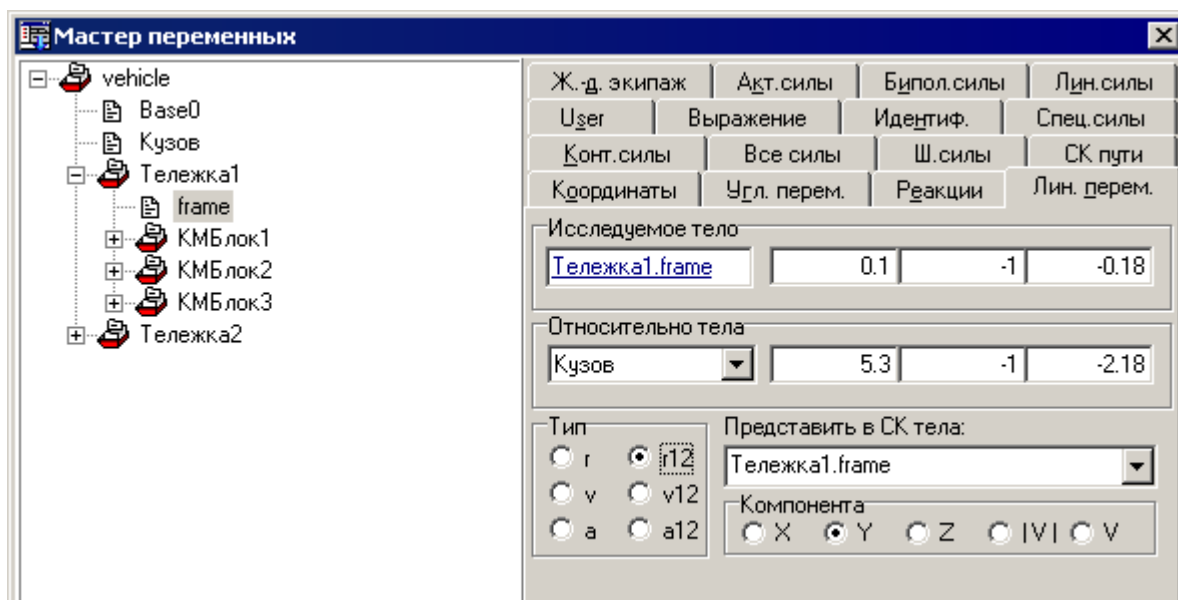


Рис. 4.9. Линейные переменные

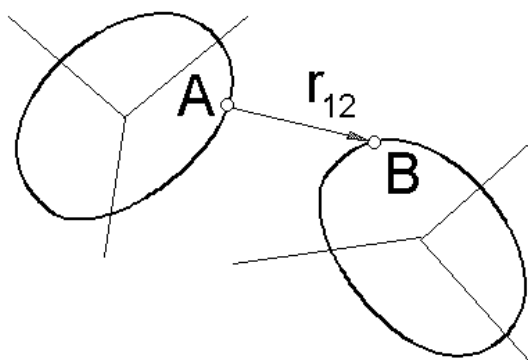


Рис. 4.10. Биполярный вектор

**Замечания.**

1. Для построения пространственной траектории какой-либо точки тела в анимационном окне следует: выбрать тело; указать координаты точки в СК тела; задать тип переменной – координаты ( $r$ ); задать компоненту – вектор ( $V$ ).
2. При задании компоненты – модуль ( $|V|$ ) в случае биполярной скорости и ускорения формируется не модуль соответствующего вектора, величины со знаком:  $\dot{r}, \ddot{r}$ .

**4.3.2.4. Силы: активные, биполярные, шарнирные, линейные, специальные, реакции**

Создание переменных, соответствующих перечисленным типам сил имеет схожий интерфейс в мастере переменных, поэтому рассмотрим переменные данных типов в одном разделе, кратко останавливаясь на некоторых особенностях, присущих каждому типу.

Дополнительно к стандартным данным (элемент, компонента, тип – сила или момент, система координат для определения проекции) следует выбрать тело из пары тел, на которое действует данная сила (параметр **Действует на тело**, рис. 4.11).

Если описание объекта не содержит элементов заданного типа, соответствующая вкладка мастера становится невидимой.

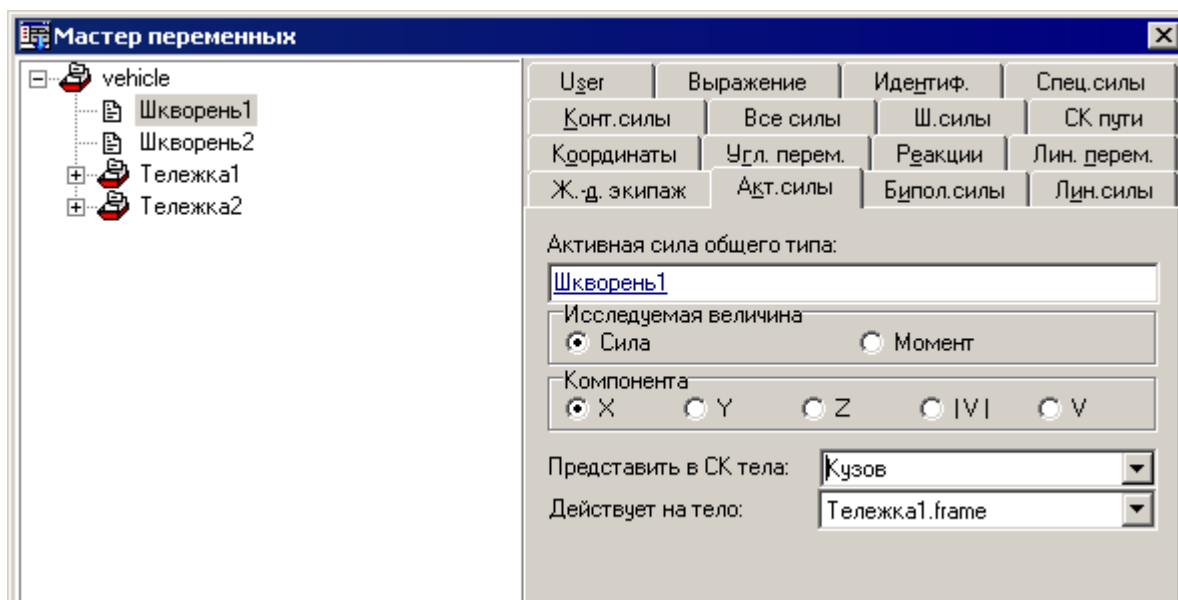


Рис. 4.11. Активная сила общего типа

Рассмотрим особенности задания сил каждого из типов:

**Активная сила**

Переменная соответствует одной из активных сил общего типа, входящих в описание объекта (рис. 4.11). Переменная имеет размерность силы, либо момента.

**Биполярная сила**

Переменная соответствует одному из силовых элементов биполярного типа, входящих в описание объекта. Компонента |V| соответствует не модулю силы, а ее численному значению (со знаком).

**Шарнирная сила**

Переменная соответствует активным силам и моментам в шарнирах, заданных пользователем при описании объекта. Список шарниров представлен в дереве элементов. Шарнирные силы присутствуют только для поступательного, вращательного шарниров и шарнира обобщенного типа. Для остальных типов шарниров переменная принимает нулевое значение. Если при описании шарнира обобщенного типа, имеющего несколько степеней свободы, введены шарнирные силы для разных степеней свободы, то в переменной формируются суммарные векторы силы или момента, приведенные к шарнирной точке.

**Линейные силы**

Линейные силы (рис. 4.12) соответствуют обобщенным линейным упругим силовым элементам.

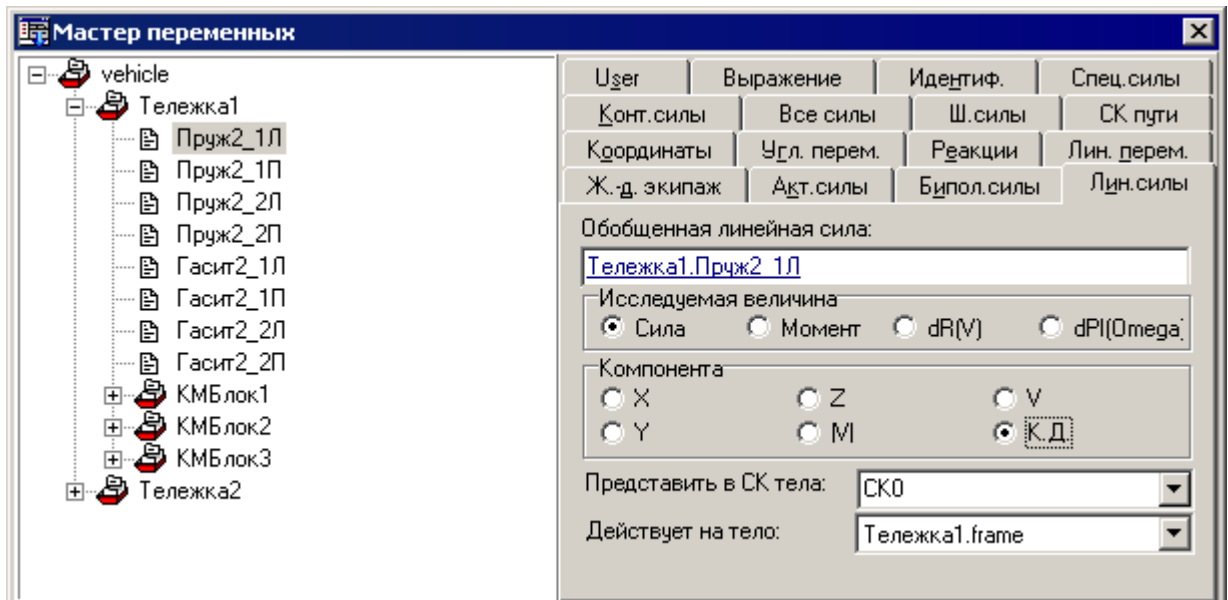


Рис. 4.12. Линейные силы

Группа **Исследуемая величина** позволяет выбрать тип переменной: **Сила**, **Момент**, **dr** – смещение (для упругого элемента) или **V** – скорость (для диссипативного элемента), **Moment**, **dpi** – поворот (для упругого элемента) или **Omega** – угловая скорость (для диссипативного элемента). Два последних типа переменной соответствуют относительным движениям взаимодействующих тел, используемым для расчета сил в соответствии с гл.2, п. *Обобщенный линейный силовой элемент*.

Параметр **Компонента** имеет дополнительное значение **K**[коэффициент] **D**[динамики]. Данный параметр имеет эффект только для типа **Сила** (и игнорируется для момента) в случае, когда при описании соответствующего элемента задано *стационарное значение силы*, причем *только одна* компонента стационарной силы отлична от нуля. Значение коэффициента динамики равно разности между ненулевой составляющей стационарной силы к соответствующей динамической проекции силы, отнесенной к стационарному значению. Например, если проекция стационарной силы на ось z отлична от нуля, то

$$k_D = \frac{F_z - F_{z0}}{F_{z0}}$$

### Специальные силы

Переменная соответствует одному из силовых элементов типа специальной силы.

Для зубчатого зацепления переменной является сила в зацеплении.

Для силового элемента типа **комбинированного трения** переменная соответствует либо осевой силе, либо силе трения (используется терминология программы ввода). На рис. 4.13 сформирована переменная, соответствующая элементу *Тележка1.FУБуксаЛ* типа **комбинированное трение** – проекция осевой силы на ось **X** базовой системы координат (**СК0**), сила действует на тело *Тележка1.Frame*. Для того чтобы отобразить вектор данной силы в анимационном окне следует задать переменной **Компонента** значение **V** (вектор).

Для специального силового элемента типа **Пружина** переменные аналогичны обобщенному линейному силовому элементу упругого типа.

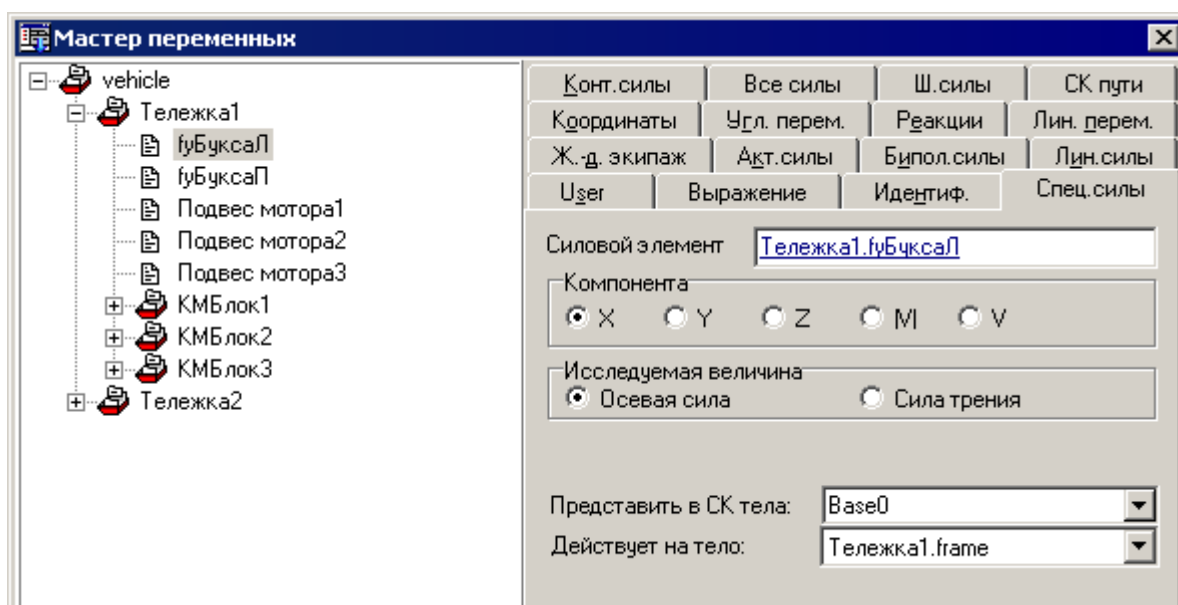


Рис. 4.13. Специальные силы

### Силы реакций

Силы соответствуют силам реакций шарниров объекта и считаются приведенными к шарнирной точке.

#### Замечания.

1. Если шарнир имеет шесть степеней свободы (или три для плоского механизма), то силы реакций должны быть равны нулю, так как в данном случае шарнир не является связью. Поскольку расчет динамики производится с определенной погрешностью, то фактическое значение сил будет отлично от нуля, но стремиться к нулю при увеличении точности интегрирования, причем величина силы и момента может служить ориентировочной оценкой точности расчета сил реакций при моделировании.
2. Расчет сил реакций является корректным только в том случае, если механизм является статически определенным. Например, статически определенными являются все системы тел, не имеющие замкнутых кинематических цепей. При наличии замкнутых кинематических цепей расчет может быть некорректным, хотя моделирование динамики механизма является правильным. Например, кривошипно-ползунный механизм является плоским и, рассматриваемый в пространстве – статически неопределенным. Если приложить к механизму активную силу, перпендикулярную его плоскости, то расчет сил реакций будет некорректным. Данный механизм можно сделать статически определенным, если заменить вращательные шарниры кривошип-база и шатун-ползун шарнирами с двумя и тремя вращательными степенями свободы соответственно.

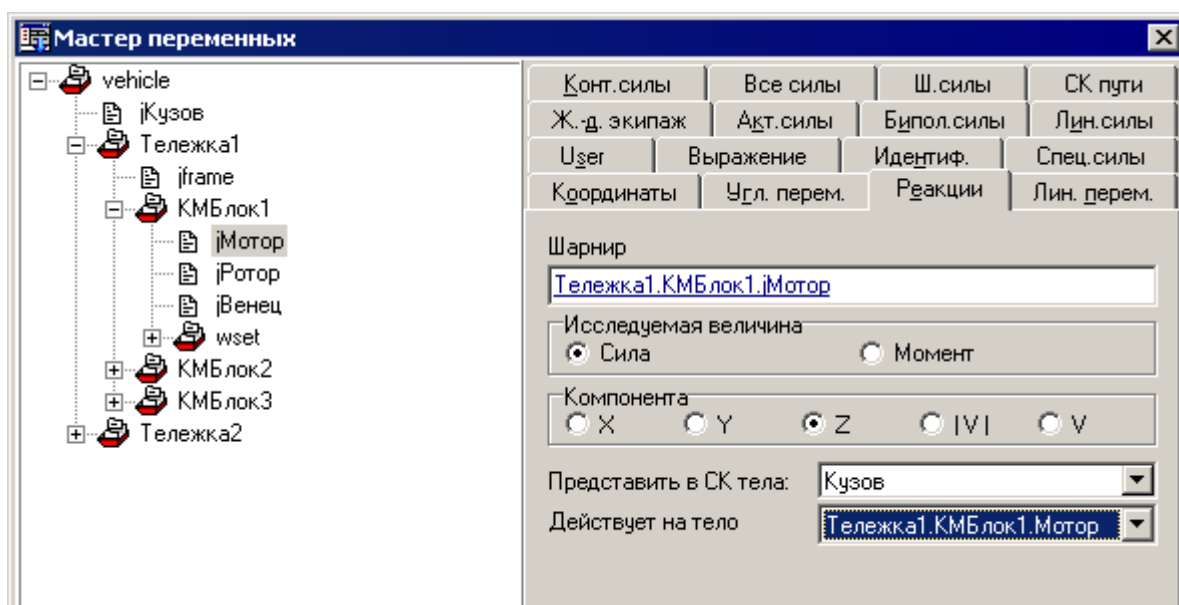


Рис. 4.14. Силы реакции

### 4.3.2.5. Все силы

Переменная предназначена для отображения в анимационном окне *всех* сил, действующих на отдельное тело или на группу тел. Отметьте в дереве тело или группу тел, для которых формируется переменная, укажите типы сил (активные, реакции и инерции). Силы инерции приводятся к центру масс тела. На рис. 4.15 сформирована переменная: все активные силы и силы реакций связей, действующие на тела *Кузов* и *Тележка1.Frame*.

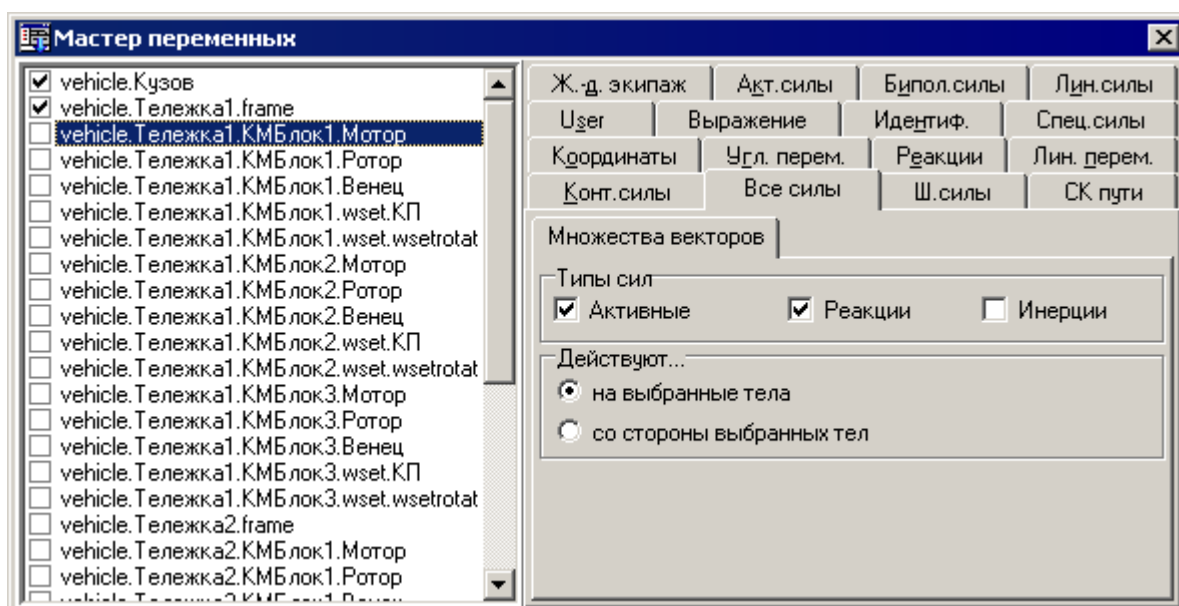


Рис. 4.15. Все силы

### 4.3.2.6. Контактные силы

Вкладка **Конт[актные] силы** предназначена для создания переменных, соответствующих контактным силовым элементам.

В свою очередь, на вкладке расположены две дополнительные вкладки: **Тела** (используется исключительно для контактов типа *Точки-Плоскость*) и **Отдельные силы** (используется для всех типов контактных силовых элементов).

### 4.3.2.6.1. Вкладка Тела

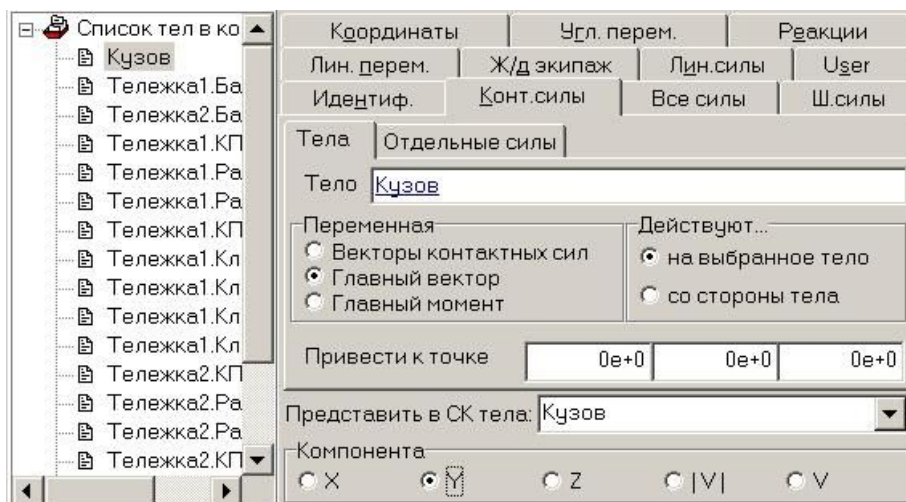


Рис. 4.16. Вкладка Контактные силы

Рассматриваются *все* контактные силы типа *Точки-Плоскость*, действующие на тело, выбранное пользователем. Переменная формируется одного из следующих типов:

#### Векторы контактных сил

Переменная может быть помещена только в анимационное окно, в котором будут отрисованы векторы всех контактных сил указанного типа (по числу точек), приложенные каждая в соответствующей точке контакта, причем нормальные силы и силы трения будут представлены отдельными векторами. Пример реализации двух переменных данного типа представлен на рис. 4.17.

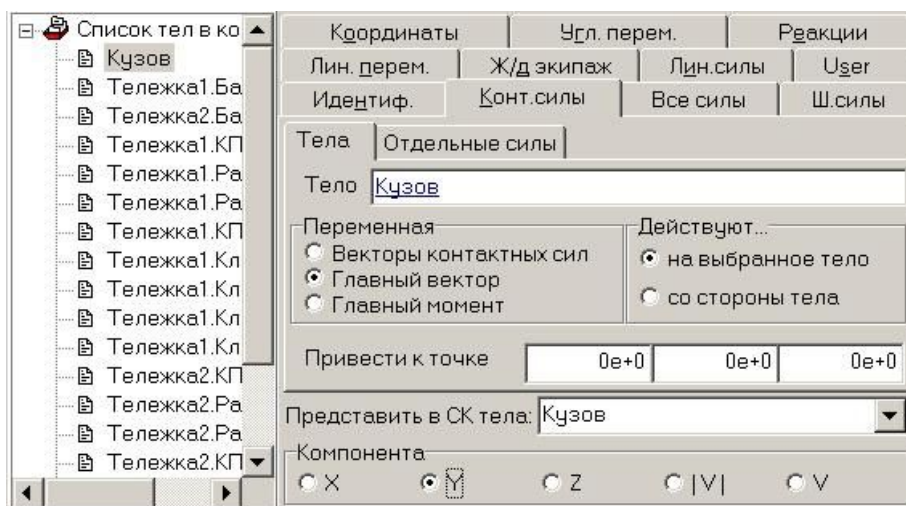


Рис. 4.17. Векторы контактных сил

#### Главный вектор

Главный вектор представляет собой геометрическую сумму всех контактных сил, действующих на данное тело (или со стороны него на другие тела), включая нормальные силы и силы трения. Стандартным образом следует указать **Компоненту**.

### Главный момент

Главный момент представляет собой геометрическую сумму моментов всех контактных сил, действующих на данное тело, относительно точки, координаты которой представлены в СК тела:

Привести к точке	0e+0	0e+0	0e+0
------------------	------	------	------

Стандартным образом следует указать **Компоненту**.

На рис. 4.16 сформирована следующая переменная: проекция на ось **Y** СК тела *Кузов* главного вектора всех контактных сил, действующих на тело *Кузов*.

#### 4.3.2.6.2. Вкладка Отдельные силы

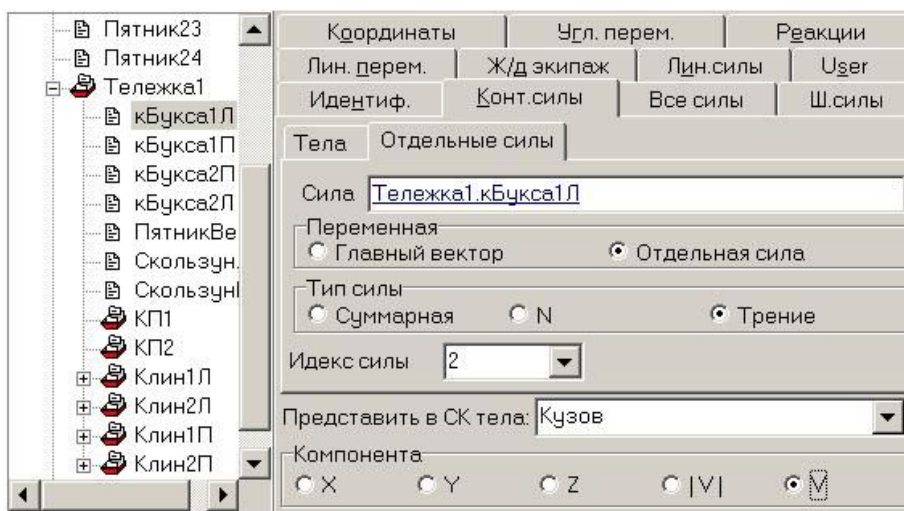


Рис. 4.18. Вкладка Отдельные силы

Можно выбрать отдельный контактный силовой элемент любого типа.

В случае контакта типа *Точки-Плоскость* параметры, приведенные на вкладке, имеют следующие значения:

### Главный вектор

Сумма сил во всех точках контакта. Если вектор помещается в анимационное окно, то начало вектора размещается в геометрическом центре контактных точек. Поле **Тип силы** устанавливает, какие силы участвуют в суммировании (только нормальные силы, только силы трения или и те, и другие)

### Отдельная сила

Из всех точек контакта выбирается одна (поле **Индexс силы** – порядковый номер контактной точки в описании элемента в программе ввода). Для нее выбирается **Тип силы**: суммарная, нормальная реакция или трение. Как главный вектор, так и отдельная сила могут быть представлены своими компонентами.

Переменная, представленная на рис. 4.18 задает вектор контактной силы во второй контактной точке для силового элемента *Тележка1.кБукса1Л*.

В случае контактных элементов остальных типов (*Сфера-Сфера*, *Сфера-Плоскость* и так далее) параметры, приведенные на вкладке, имеют следующие значения:

**Главный вектор**, **Отдельная сила** – игнорируются.

Поле **Тип** силы задает либо нормальную реакцию, либо силу трения, либо их сумму.

#### 4.3.2.7. Переменные, рассчитываемые пользователем

Закладка **User/UserVars** (рис. 4.19) позволяет сформировать переменную, рассчитываемую пользователем в файле управления при программировании в среде UM.

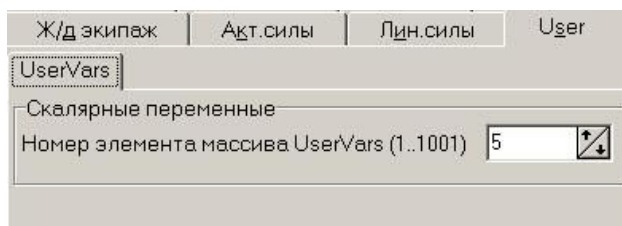


Рис. 4.19. Переменные пользователя

Пользователь должен позаботиться о том, чтобы значение рассчитанного им выражения в файле управления было присвоено одному из элементов массива `UserVars[0..1001]`.

Для задания переменной с помощью мастера следует указать ее номер в массиве, задать стандартный или оригинальный идентификатор и комментарий и отослать переменную в контейнер.

#### 4.3.2.8. Векторы, рассчитываемые пользователем

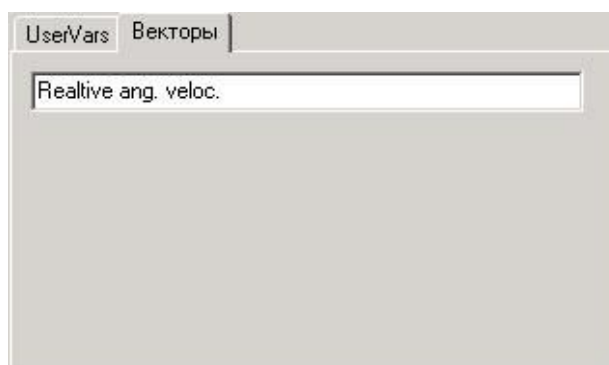


Рис. 4.20. Векторы пользователя

Вкладка **User/Векторы** (рис. 4.20) позволяет сформировать векторы для отрисовки в анимационном окне, которые рассчитываются пользователем в *файле управления*. Пользователь имеет возможность динамически сформировать список векторов, величины которых рассчитываются в файле управления. Основная цель данного списка – предоставить возможность отображения в анимационном окне нестандартных векторов, которые не могут быть получены автоматически с помощью мастера переменных (см. п. 5.6.8).

#### 4.3.2.9. Идентификаторы

Закладка **Идентификаторы** (рис. 4.21) позволяет сформировать переменную, связанную с идентификатором. В процессе моделирования значения некоторых идентификаторов могут изменяться (например, идентификаторы, описывающие величину силы), таким образом, может возникнуть необходимость контроля над ними.

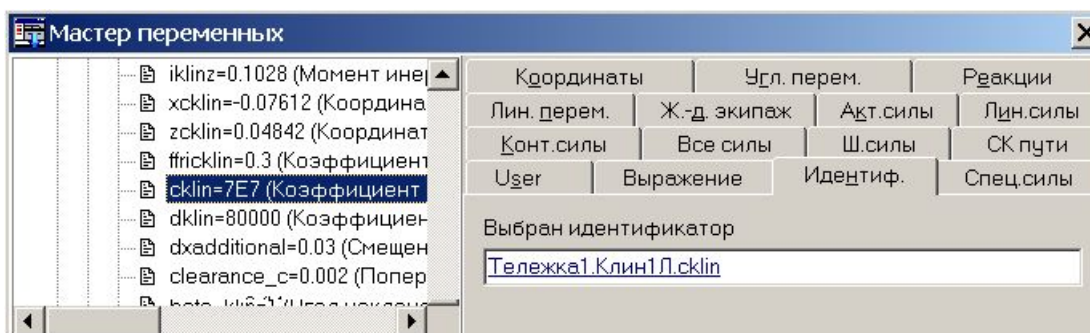


Рис. 4.21. Идентификаторы

#### 4.3.2.10. Переменная – выражение

С помощью закладки **Выражение** мастера переменных можно создавать новые программируемые переменные, применяя к заранее созданным с помощью мастера переменным и идентификатору времени  $t$  арифметические, векторные и другие операции, функции, а также, используя операторы условия.

Примеры переменных, которые можно создать с помощью данного инструмента:

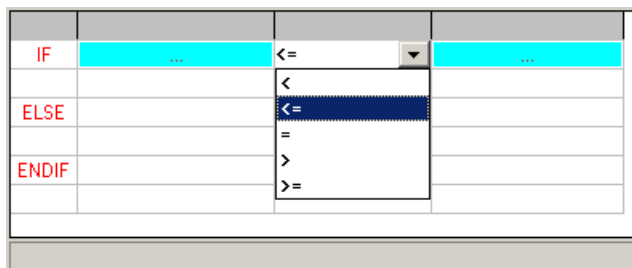
- Векторная сумма произвольного набора сил, а также ее модуль и проекция на любую ось.
- Стандартная переменная, но со знаком, измененным на противоположный. Стандартная переменная, умноженная на число.
- Функция времени, например,  $\sin(10t)$ .
- Разность значений двух переменных.


##### 4.3.2.10.1. Основные действия при создании списка

Для программирования переменных следует выполнить следующие действия.

1. Подготовить переменные, которые будут участвовать в создании новой переменной (например, открыть список переменных). При необходимости создать новые переменные с помощью мастера и поместить в контейнер.
2. Пооператорно запрограммировать новую переменную. Для этого используются следующие правила:
  - Каждый оператор (функция или операция) занимает одну строку таблицы, за исключением условных операторов. Строка оператора содержит имя результата (в первом столбце), графический образ или имя оператора (например,  $\sin$ ) и поля с одним или двумя операндами (светло-голубого цвета).
  - Новый оператор либо вставляется в пустую активную строку таблицы, либо заменяет существующий оператор в активной строке после щелчка на кнопке с именем оператора.
  - Операндом является:
    - число (вводится в поле операнда с клавиатуры)
    - идентификатор времени  $t$  (вводится в поле операнда с клавиатуры)
    - переменная из контейнера мастера переменных, из списка переменных данного объекта или из открытого графического окна (перетаскиваются в поле операнда с помощью мыши)
    - результат выполнения одного из вышестоящего оператора (имя результата в первой колонке перетаскивается в поле операнда с помощью мыши).
  - Старое значение операнда может быть заменено новым таким же образом, как и выше, то есть вводом с клавиатуры или перетаскиванием новой переменной с помощью мыши.

- Используйте всплывающее меню для удаления или вставки отдельной строки, а также для удаления всех введенных операторов.
- Для выбора условия (<, <=, >...) в условных операторах используйте выпадающий список (после щелчка на соответствующем поле оператора 'IF').



- Удаление одного из элементов условного оператора ('if', 'else', 'endif') приводит к удалению всего условного оператора и всех операторов, помещенных внутри его.
3. Для добавления сформированной переменной в контейнер
- выделите мышкой оператор, результат которого является новой переменной,
  - задайте имя переменной (рис. 4.6),
  - отошлите переменную в контейнер щелчком на кнопке .



### 4.3.2.10.2. Операторы

Оператор	Первый операнд	Второй операнд	Комментарий
+ - *	Вектор или скаляр	Вектор или скаляр	Произведение двух векторов соответствует векторному произведению
/	Вектор или скаляр	Скаляр	
=	Вектор или скаляр	–	
sin, cos, abs, ln, exp, sqrt, atan, sign	Скаляр	–	Элементарные функции
χ	Скаляр	–	Функция Хэвисайда (1 для положительного аргумента, 0 в остальных случаях)
pow	Скаляр	Скаляр	Возведение первого операнда в степень, равную второму операнду
Px, Py, Pz	Вектор	–	Проекция вектора на соответствующую ось
•	Вектор	–	Норма вектора
•	Вектор	Вектор	Скалярное произведение векторов
IF	Скаляр	–	Оператор условия IF (условие) [группа операторов] ENDIF
IF...ELSE	Скаляр	–	Оператор условия IF (условие) [группа операторов] ELSE [группа операторов] ENDIF

### 4.3.2.10.3. Простейший пример

Рассмотрим переменную, равную модулю разности двух скалярных переменных, например, проекций ускорений двух точек на ось Z  $|a_{z1} - a_{z2}|$ .

Для формирования переменной выполните следующие действия (рис.4.22).

- Создайте переменные az1, az2 с помощью мастера и поместите их в контейнер.
- Щелкните на кнопке  для создания операции вычитания.
- Перетащите мышкой переменную az1 в поле первого оператора, az2 – в поле второго оператора.
- Щелкните мышкой на второй (пустой) строке таблицы, чтобы сделать ее активной, а затем щелкните на кнопке abs для создания соответствующей операции во второй строке.
- Перетащите имя результата первой операции (\_x1) в поле операнда операции abs.
- Введите имя переменной |az1-az2| и щелкните на кнопке  для того, чтобы отослать переменную в контейнер. При этом активной должны быть вторая строка.

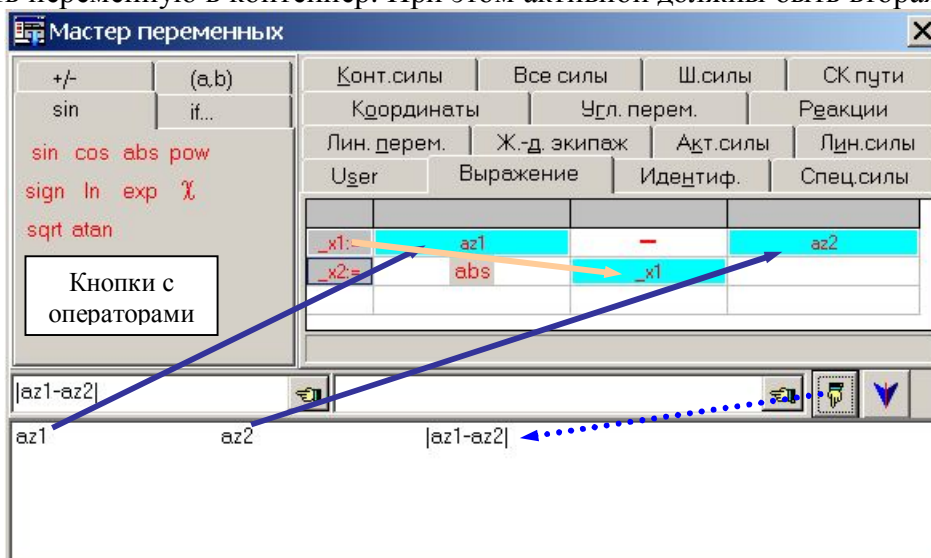


Рис. 4.22. Пример программирования переменной - выражения

### 4.3.2.11. Закладки ж.-д. экипаж и СК пути

Данные закладки появляются только при моделировании рельсовых экипажей. Описание соответствующих переменных см. в Гл.8, п. *Моделирование динамики рельсовых экипажей* | Особенности создания списка переменных.

### 4.3.2.12. Внешние библиотеки

Данная закладка доступна только при условии, что модель содержит подключенные внешние библиотеки. Это могут быть как библиотеки, экспортированные из Matlab/Simulink, так и библиотеки пользователя, разработанные на некотором языке программирования. Подробнее о разработке, подключении и использовании внешних библиотек см. Гл. 5, п. *Создание и использование внешних библиотек*.

В дереве элементов в левой части окна доступны все входные и выходные величины всех внешних библиотек.

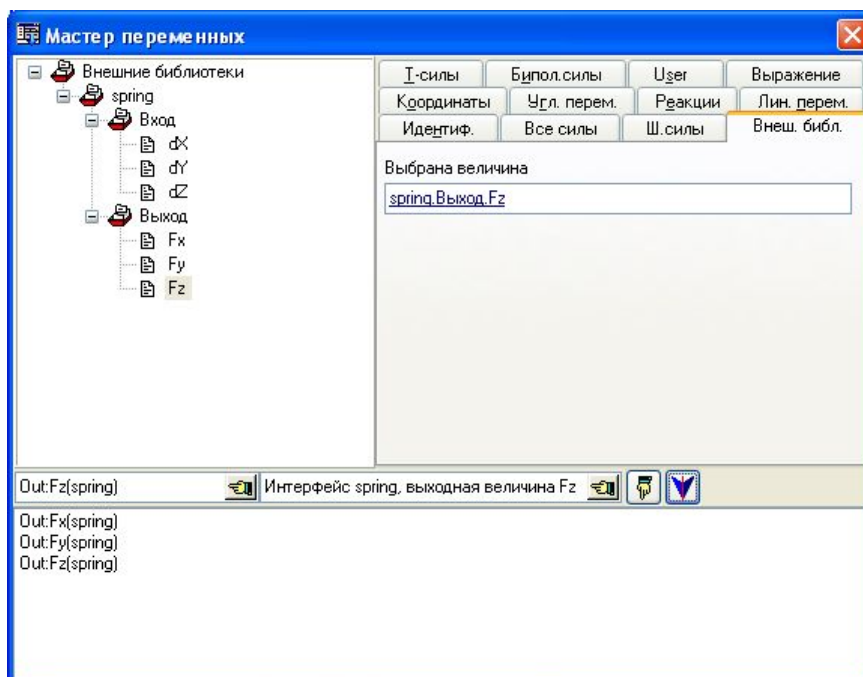


Рис. 4.23. Внешние библиотеки

### 4.3.3. Список переменных

При моделировании сложных технических систем исследователя, как правило, интересует анализ вполне определенных кинематических и динамических характеристик (переменных): ускорения определенных (характерных) точек тел, силы реакций в некоторых шарнирах, коэффициенты динамики пружин и так далее. УМ позволяет заранее подготовить и сохранить для дальнейшего использования *списки* таких *переменных* для каждого моделируемого объекта с целью их использования при анализе результатов численного моделирования.

Как будет показано ниже, такой подход позволяет значительно сократить время анализа системы. Например, при исследовании динамики рельсовых экипажей список может включать сотни переменных, и даже их однократное создание требует значительных затрат времени. Рассматриваемая методика позволяет разбивать переменные по группам, использовать специальную терминологию, принятую в данной области техники, использовать списки, подготовленные для одного объекта, при формировании списков переменных родственного объекта (при некоторых ограничениях).

В процессе моделирования можно сохранять численные характеристики различных переменных в *файл рассчитанных переменных* (см. 4.4.2.6). Доступ к таким файлам также осуществляется при помощи *списка переменных* (в дальнейшем – *списка рассчитанных переменных*).

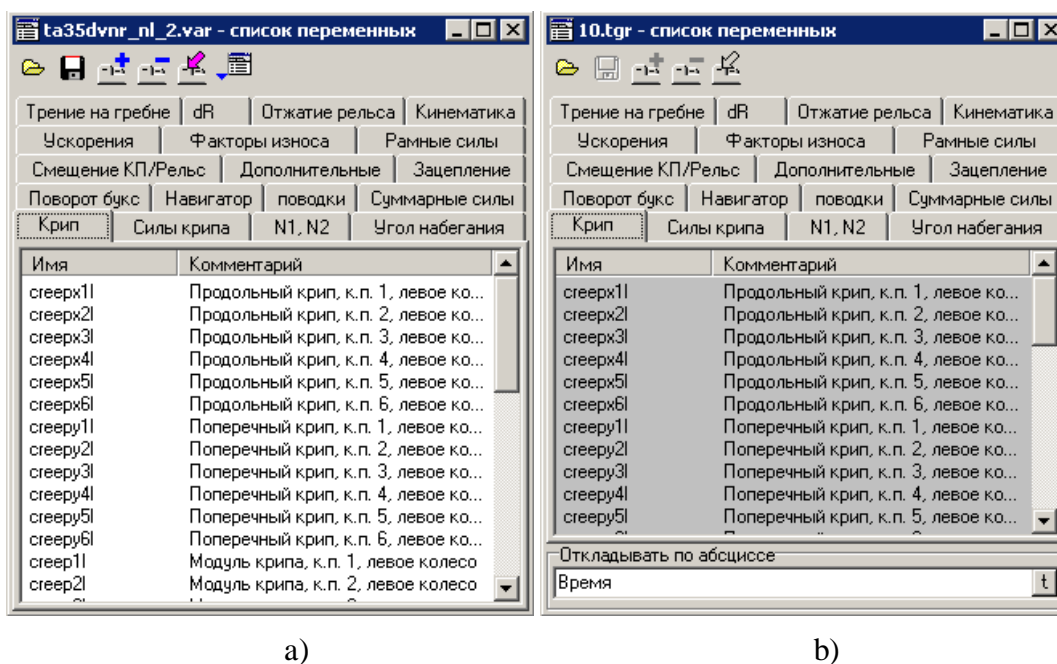








Рис.4.24. Список переменных, а – список переменных, б – список рассчитанных переменных

#### 4.3.3.1. Создание и модификация списков переменных

Элементами списка являются кинематические и динамические переменные анализируемой модели. Каждый элемент характеризуется именем и комментарием. Имя и комментарий могут включать произвольное число символов, в том числе и пробелы.

Для создания списка загрузите исследуемый объект в модуль моделирования (команда меню **Файл | Открыть**), вызовите окно списка переменных (рис. 4.24) с помощью пункта меню **Инструменты | Список переменных**.

Окно, появившееся на экране, содержит одну пустую закладку (**Без имени**). Кнопки в верхней части окна имеют следующие функции:

-  – чтение заранее подготовленного списка переменных (файл \*.var или \*.tgr);
-  – запись списка в файл \*.var;
-  – добавить новую закладку к списку;
-  – удалить текущую закладку;
-  – переименовать текущую закладку;
-  – настройки статистической обработки групп переменных (единица измерения, параметры фильтра, функционал и т.д. (рис.4.25). Настройки используются при обработке результатов сканирования (Гл.6, п. *Обработка результатов сканирования*).

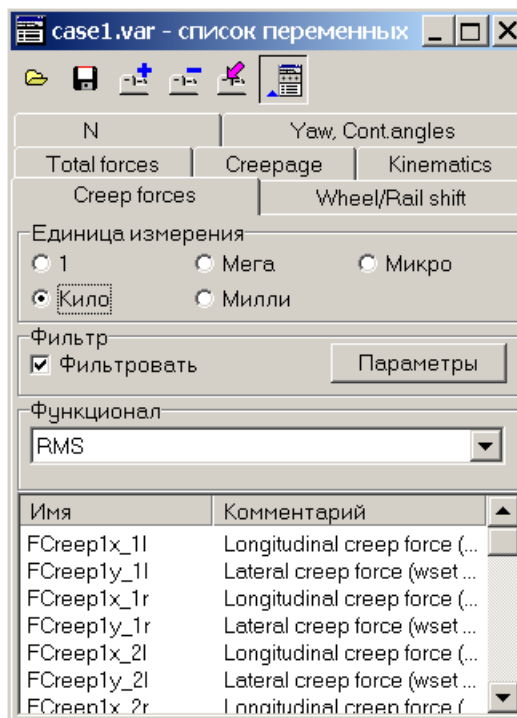


Рис.4.25. Настройки статистической обработки групп переменных


В списке переменных можно выделить одну или несколько переменных стандартным образом. Выделенные элементы можно удалить (клавиша **Delete**) или скопировать мышкой в другие окна:

- анимационное окно,
- графическое окно,
- табличный процессор (только рассчитанные переменные),
- другой список переменных,
- окно анализа статистики (только рассчитанные переменные).

#### 4.3.3.2. Наполнение списка переменных

Наполнение списка переменных производится двумя способами. Первый метод состоит в переносе в данный список переменных из других списков или графических окон. Другой метод – создание новых переменных с помощью мастера переменных (п. 4.3.2). Добавляемые переменные могут быть разделены на группы (на отдельные вкладки списка).

Для добавления новой переменной с помощью мастера следует:

- Открыть **мастер переменных** (п. 4.3.2) с помощью команды основного меню **Инструменты | Мастер переменных** или щелкнув на кнопке  на панели инструментов;
- Создать переменную и перенести на соответствующую вкладку списка (рис. 4.26);
- Сохранить список.

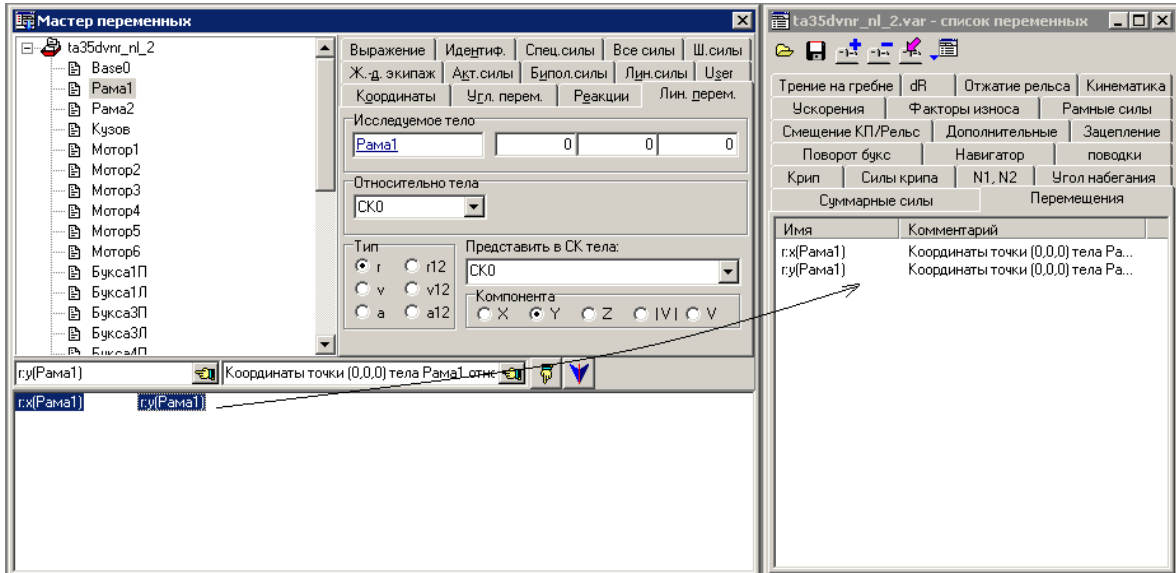


Рис. 4.26. Создание списка переменных

### 4.3.3.3. Обработка данных в списках рассчитанных переменных

Создание списка переменных при однократном расчете динамики см. п. 4.4.2.6.

Любая переменная из списка рассчитанных переменных может быть обработана путем копирования в окна, являющиеся инструментами анализа данных:

- графическое окно (п. 4.3.4),
- табличный процессор (п. 4.3.6),
- окно статистического анализа (п.4.3.7).

После получения переменной соответствующее окно обрабатывает результаты и визуализирует их.

Обработка данных может производиться в зависимости от времени (независимая переменная **по умолчанию**) или в зависимости от любой другой переменной, принадлежащей тому же **списку рассчитанных переменных**, что и анализируемая переменная. Чтобы назначить переменную в качестве независимой, следует просто перенести ее с помощью мыши в поле **Откладывать по абсциссе** в нижней части окна списка (рис. 4.24).

Используйте *фильтр интервала независимой переменной* для того, чтобы выполнить анализ части данных рассчитанной переменной. Для установки фильтра

- щелкните правой кнопкой мыши в пределах списка рассчитанных переменных,
- выберите команду контекстного меню **Настройка фильтра**,
- установите значения левой и правой границы изменения независимой переменной (откладываемой в качестве абсциссы).

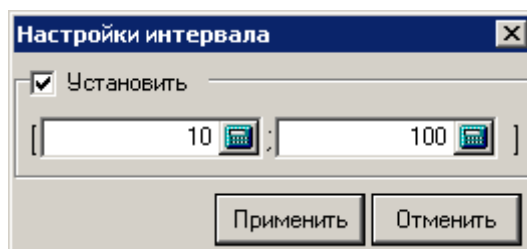


Рис.4.27. Интервал изменения независимой переменной для обработки данных

#### 4.3.4. Окно для построения графиков

Графическое окно (рис. 4.28) является одним из основных инструментов представления и анализа результатов моделирования. Одновременно пользователь может открыть (пункт меню **Инструменты | Графическое окно**) любое число окон, в которых могут отображаться различные графики. Положение каждого окна и список назначенных ему переменных (кроме переменных, перенесенных из *файла рассчитанных переменных*, п. 0) сохраняется в конфигурационном файле (команда меню **Файл | Записать конфигурацию**).

Графическое окно состоит из следующих основных элементов:

- контейнера переменных,
- поля построения графиков с нанесенной на нем координатной сеткой,
- управляющих кнопок в верхней части окна.

Разметка осей координат производится автоматически, в левой части оси абсцисс и верхней части оси ординат указываются *масштабные множители*.

При перемещении курсора мыши по полю графиков производится автоматический расчет координат точки (в масштабах оси абсцисс и ординат), а соответствующие численные значения указываются в строке статуса (*координаты курсора*).

Положение контейнера относительно окна можно изменить. Для этого используйте пункт контекстного меню **Положение**.

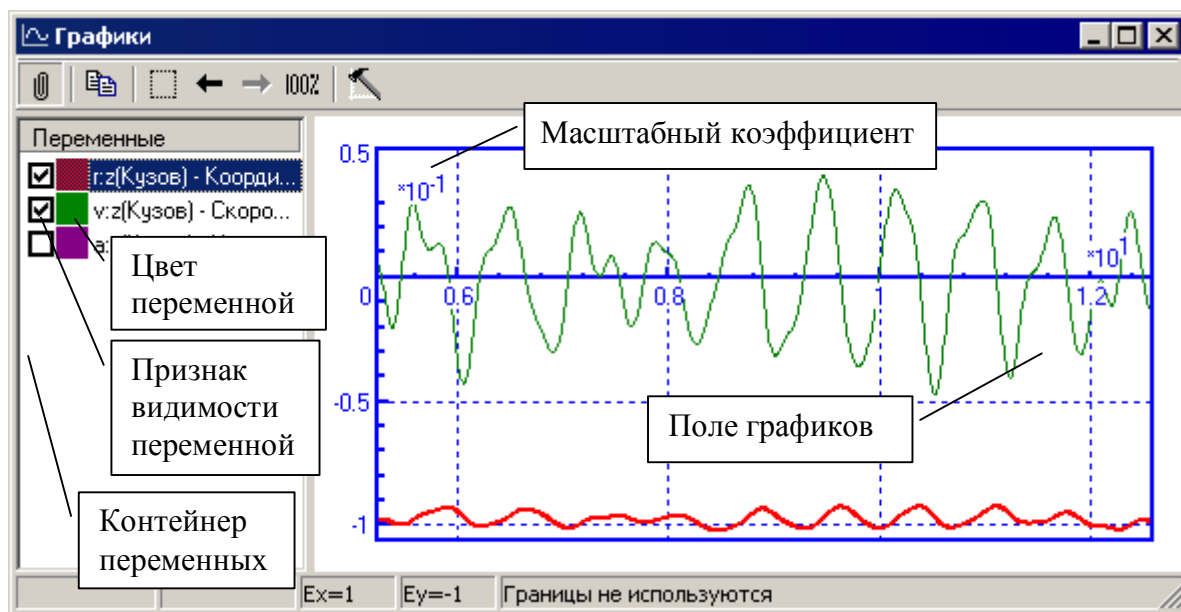


Рис.4.28. Окно для построения графиков

Графики переменных, выделенных в контейнере, рисуются жирными линиями.

Элементы панели инструментов:

- закрепить панель инструментов;
- копировать поле графиков в буфер обмена как изображение;
- увеличить выделенную область на все окно;
- показать графики целиком (учитываются только видимые в данный момент графики);
- диалог «Параметры окна».

Удерживая *левую* кнопку мыши, вы можете перемещать поле графиков в окне.

Удерживая *правую* кнопку мыши, вы можете менять масштаб графиков по двум осям координат одновременно.

Удерживая клавишу **Shift**, вы можете распахнуть выделенную область графика на все окно при помощи левой кнопки мыши.

Панель инструментов может быть выпадающей или фиксированной. Этот признак по умолчанию можно установить в поле **Инструменты | Настройки | Общие | Выпадающая панель инструментов графического окна**.

Графики в окно можно перетаскивать из другого графического окна и из списка рассчитанных переменных (п. 0). Из графического окна график можно перетащить в табличный процессор (п. 4.3.6) и в окно статистической обработки (п. 4.3.7).

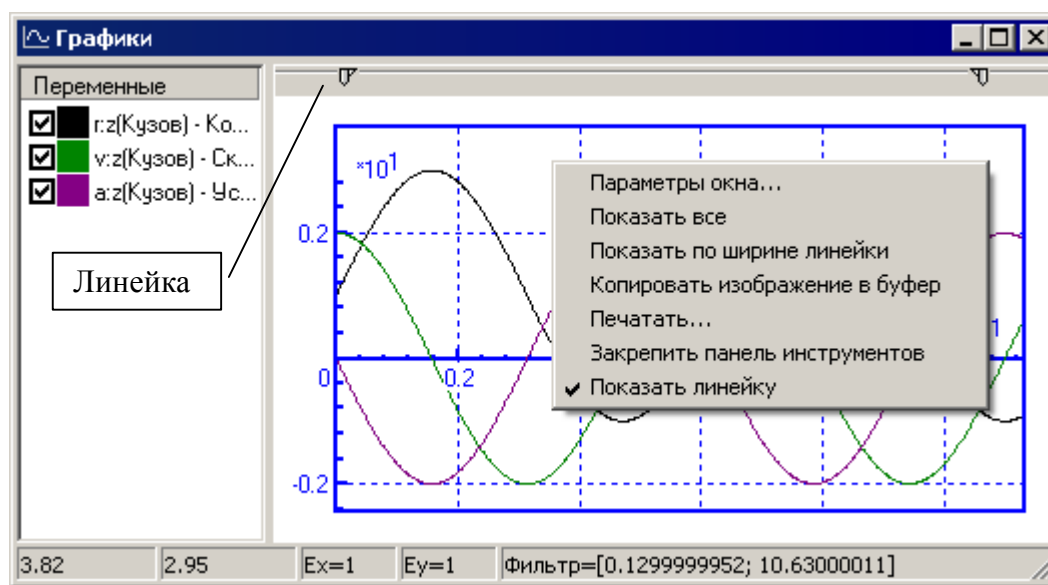


Рис.4.29. Меню области построения графиков

На рис. 4.29 показаны пункты контекстного меню области построения графиков, которые во многом повторяют команды панели инструментов:

- **Параметры окна...** – вызов диалогового окна **Параметры окна**,
- **Показать все** – показать графики целиком (учитываются только видимые в данный момент графики),
- **Показать по ширине линейки** – показать графики по ширине линейки,
- **Копировать изображение в буфер** – копировать в буфер изображение графиков в области построения,
- **Печатать...** – печатать область построения (вызывает стандартное диалоговое окно печати на принтер),
- **Закрепить панель инструментов** – закрепить панель инструментов, находящуюся в верхней части графического окна.
- **Показать линейку** – показать/спрятать линейку.

Часто для анализа результатов необходимо задать границы отображения данных по абсциссе (вырезать часть графика). Например, удалить переходный процесс и оставить только данные, соответствующие установившемуся режиму. Для включения/выключения подобного режима используйте закладку **Границы** в окне настроек. Кроме того, ширину окна, устанавливающего границы, можно установить при помощи *линейки*. Показать/спрятать линейку можно через контекстное меню (пункт **Показать линейку**). Текущие данные об установках показываются в строке статуса графического окна.

#### 4.3.4.1. Работа с графиками в графическом окне

В контейнере переменных графического окна расположен список всех графиков. Рассмотрим пункты контекстного меню контейнера переменных, рис. 4.30:

- **Параметры окна** – вызов диалогового окна **Параметры окна**,
- **Редактировать** – редактирование выбранных переменных (п. 0),
- **Удалить** – удалить выбранные переменные из списка,
- **Копировать в буфер** – копировать значения переменных в буфер обмена (в текстовом формате), см. ниже,
- **Копировать в активную книгу MS Excel** – копировать выбранные графики в программу MS Excel (п. 4.3.4.5),
- **Фильтровать переменные** – частотная фильтрация выбранных переменных (п. 4.3.4.3),
- **Скопировать как статические** – скопировать график как статический (различаются два вида переменных: динамические – рассчитываются каждый раз при запуске интегрирования, статические – получаются из динамических копированием, не изменяются при интегрировании),
- **Сохранить в текстовый файл...** – сохранить выделенные переменные в текстовый файл,
- **Сохранить в файл переменных...** – сохранить выделенные переменные в файл рассчитанных переменных (п. 0),
- **Прочитать из текстового файла...** – прочитать переменные из текстового файла в графическое окно,
- **Отложить переменную по оси абсцисс** – переменная станет абсциссой для всех остальных переменных в окне,
- **Отложить «время» по оси абсцисс** – если ранее была отложена одна из переменных по оси абсцисс, то отложить «время»,

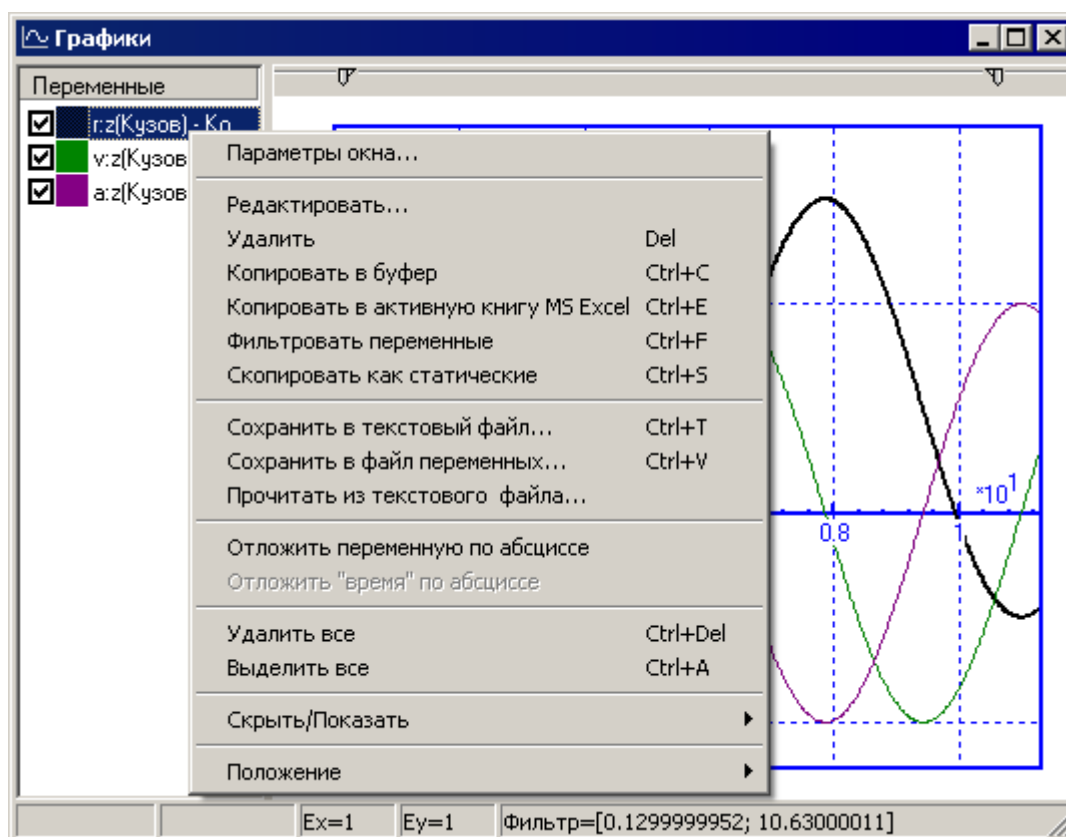


Рис.4.30. Меню контейнера переменных

- **Удалить все** – удалить все переменные в окне,
- **Выделить все** – выделить все переменные в окне,
- **Скрыть/показать** – скрыть/показать все или выделенные переменные в зависимости от выбранного подпункта меню,
- **Положение** – положение контейнера переменных (слева, справа, сверху, снизу).

Выделив одну или несколько переменных в контейнере переменных, при помощи контекстного меню вы можете (кроме переменных, полученных из списка рассчитанных переменных, п.0):

- **копировать** значения переменных в **буфер** обмена (в текстовом формате);

Пример:

*%Описание переменных:*

*%Столбец 1 - Массив значений по оси абсцисс*

*%Столбец 0 - r\_z(Тело1) [Координаты точки (0,0,0) тела Тело1 (ss 1) относительно ...*

*%Столбец 1 - r\_z(Тело2) [Координаты точки (0,0,0) тела Тело2 (ss 1) относительно ...*

*%*

*9.99999997475243E-7 5.000000000000000E-1 1.35000002384186E+0*

*3.02056260406971E-2 5.02337813377380E-1 1.34784018993378E+0*

*4.30080145597458E-2 5.04678130149841E-1 1.34569251537323E+0*


*6.30080178380013E-2 5.09747564792633E-1 1.34109389781952E+0*

Символ % (префикс) в начале строк комментариев установлен с помощью настроек программы моделирования (п. 4.2.1).

- **сохранить** значения переменных в **текстовый файл**;
- **сохранить** выделенные переменные в **файл** рассчитанных переменных (п.4.3.3).

**Замечание.** При копировании переменных в текстовом виде строки комментариев могут предваряться произвольным символьным префиксом, что бывает удобно для загрузки и обработки таких данных в специализированное математическое программное обеспечение (п. 4.2.1).

#### 4.3.4.2. Изменение параметров графического окна

Вызов окна изменения параметров (рис. 4.31) графического окна осуществляется через пункт контекстного меню **Настройка** или через кнопку  на панели инструментов.

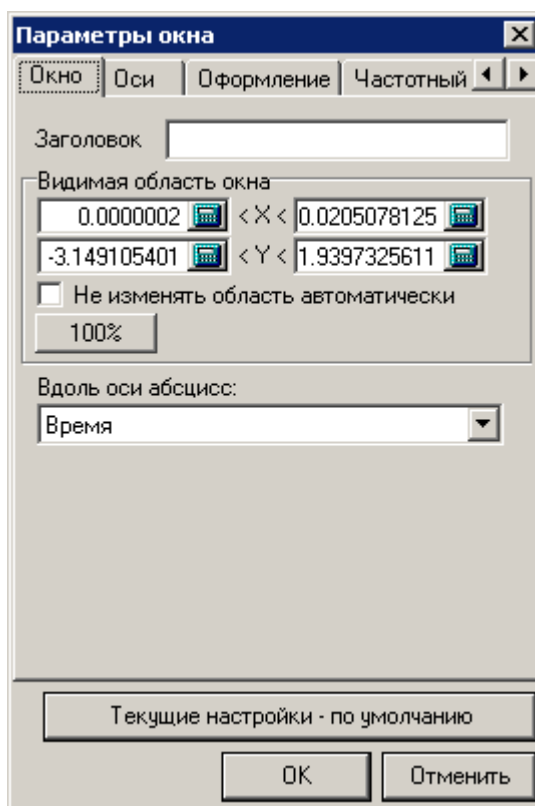


Рис.4.31. Параметры графического окна

При помощи этого окна вы можете:

- изменить заголовок графического окна;
- точно установить видимую область экрана;
- установить переменную, которая будет откладываться вдоль оси абсцисс (вдоль оси абсцисс могут быть отложены все переменные, кроме переменных пересылаемых из списка рассчитанных переменных, которые всегда откладываются в зависимости от своей независимой переменной, значения которой читаются из файла), время – по умолчанию;
- установить признак видимости сетки;
- признак равного масштаба по осям;
- установить признак логарифмической шкалы по оси ординат и абсцисс;
- установить граничные значения отображения данных по абсциссе;
- настроить параметры частотного фильтра;
- настроить оформление окна (цвет, толщина и стиль осей; толщина графиков; размер и цвет подписей)

#### 4.3.4.3. Частотная фильтрация переменных

Для того чтобы осуществить частотную фильтрацию необходимо выделить в контейнере переменных соответствующие переменные и в контекстном меню выбрать команду **Фильтровать переменные**. Выделенные переменные будут отфильтрованы в соответствии с текущими настройками (команда контекстного меню **Параметры окна** – закладка **Частотный фильтр**) и добавлены в список переменных с именем: *\_ + имя переменной*. Доступны следующие типы фильтров:

- Прямоугольный фильтр
- Фильтр нижних частот;
- Фильтр верхних частот;
- Заграждающий фильтр;
- Полосовой фильтр;
- Фильтр нижних частот Баттерворта.

Строки ввода **Нижняя частота** и **Верхняя частота** задают полосу частот фильтров. Фильтр нижних частот пропускает частотную информацию в полосе частот от 0 Гц до значения **Верхняя частота** (значение в строке **Нижняя частота** игнорируется). Фильтр верхних частот пропускает частоты в полосе от значения **Нижняя частота** до частоты Найквиста (значение в строке **Верхняя частота** игнорируется). Заграждающий фильтр вырезает соответствующую полосу частот. Полосовой фильтр пропускает частоты только в заданной полосе. Частоты можно задавать как **Абсолютным значением** (в Гц), так и **Долей от частоты Найквиста**.

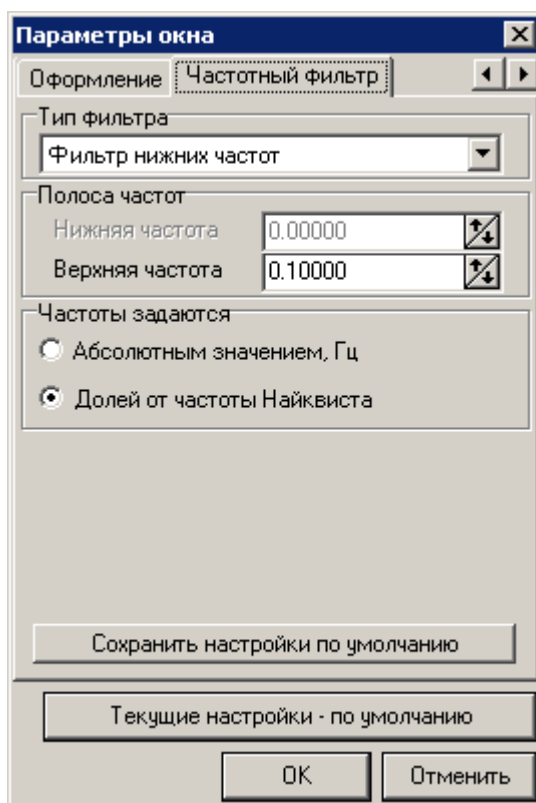


Рис.4.32. Параметры частотного фильтра

#### 4.3.4.4. Изменение параметров переменной

Вызов диалога изменения параметров *переменной* (рис. 4.33) осуществляется двойным щелчком на соответствующей переменной в *контейнере переменных* или выбором команды **Редактировать** из контекстного меню – в этом случае настраиваются параметры для выделенных переменных.

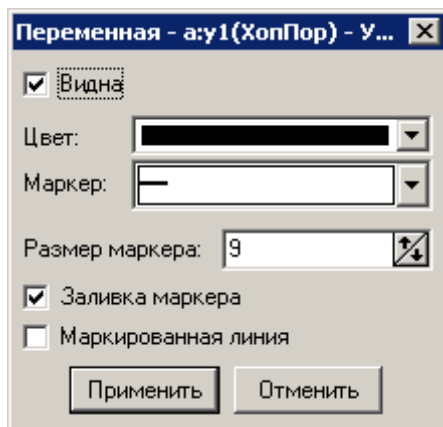


Рис.4.33. Параметры переменной в графическом окне

При помощи этого диалога вы можете:

- установить признак видимости графика переменной в окне;
- установить цвет графика переменной;
- выбрать форму и размер маркера, установить признак заливки маркера и признак маркированной линии. По умолчанию любой график рисуется сплошной линией.

#### 4.3.4.5. Копирование графиков в MS Excel

Графики из графического окна можно экспортировать в программу MS Excel. Для этого необходимо выделить нужные переменные в контейнере и в контекстном меню выбрать пункт **Копировать в активную книгу MS Excel**. Выделенные графики будут скопированы в активную книгу MS Excel в соответствии с настройками на закладке **Экспорт графиков в MS Excel** окна **Настройки интегратора** (п.4.2.4).

### 4.3.5. Анимационное окно модуля моделирования

Движение объекта в процессе моделирования движения отображается в анимационных окнах. Общая информация об анимационных окнах содержится в Гл.3, п. *Анимационное окно конструктора*.

Кроме того, анимационное окно в модуле моделирования имеет дополнительные возможности, такие как:

- включение/выключение осей глобальной системы координат – пункт **Оси координат** контекстного меню,
- настройка режима отрисовки отдельных тел (каркас/поверхность) – пункт **Режимы образов тел** контекстного меню,
- возможность слежения камерой за произвольным телом в системе – пункт **Параметры окна** контекстного меню, поле **Следить за...** окна настроек,
- визуализация векторов/траекторий (п.4.3.5.1),
- сохранение анимации в окне в файлы bmp, gif, avi (п.4.3.5.2).

Если в данный момент курсор мыши находится над каким-нибудь телом, то в контекстном меню дополнительно появляются следующие пункты:

- **Информация о** (имя тела) – появляется окно с дополнительной текущей информацией о данном теле;
- **Добавить** – возможность добавления вектора угловой скорости, углового ускорения для тела, а также траектории, вектора скорости и вектора ускорения для текущей точки тела, на которую указывает курсор мыши.

При перемещении мыши в анимационном окне в строке статуса появляется информация о кинематических характеристиках данной точки тела. Сведения о клавишах-модификаторах смотрите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Клавиши-модификаторы в анимационном окне**

Клавиша	Отображаемая информация
нет	Радиус-вектор точки тела в глобальной системе координат
Ctrl	Вектор скорости точки тела в глобальной системе координат
Ctrl+Alt	Вектор ускорения точки тела в глобальной системе координат
Shift	Радиус-вектор точки тела в локальной системе координат
Ctrl+Shift	Вектор скорости точки тела в локальной системе координат
Ctrl+Alt+Shift	Вектор ускорения точки тела в локальной системе координат

#### 4.3.5.1. Визуализация векторов/траекторий

В модуле моделирования движения в анимационных окнах можно отображать векторы сил, скоростей, ускорений и траектории точек тел.

По умолчанию список отображаемых в окне векторов/траекторий не виден. Для того чтобы показать его в окне и установить ему нужное положение, используйте пункт контекстного меню **Положение списка векторов**. Пример окна с траекторией и графиками приведен на рис. 4.34.

Для добавления векторов и траекторий в анимационное окно используйте **Мастер переменных** (п.4.3.2).

Двойной щелчок на соответствующем векторе в списке позволит вам изменить цвет вектора и траектории и установить нужную длину траектории.

**Замечание.** Радиус-вектор точки всегда рисуется траекторией.

Одинаковые по размерности векторы рисуются с одинаковым масштабом. Для изменения *масштаба* и *размера* векторов используйте пункт контекстного меню **Масштаб векторов**.

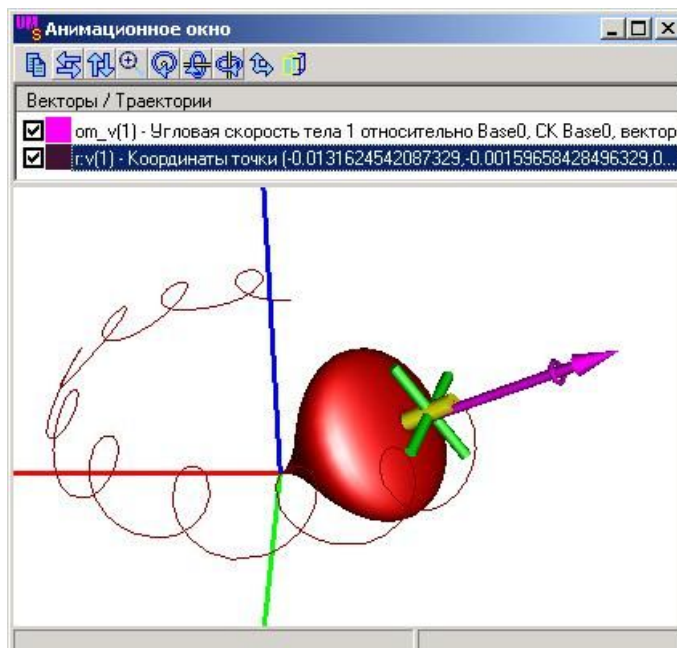


Рис.4.34. Анимационное окно модуля моделирования

Для изменения масштаба доступны следующие типы векторов:

- скорость (м/с);
- ускорение (м/с<sup>2</sup>);
- поворот (радиан);
- угловая скорость (1/с);
- угловое ускорение (1/с<sup>2</sup>);
- сила (Н);
- момент (Нм).

#### 4.3.5.2. Сохранение анимации в файл

В процессе моделирования движения механической системы можно сохранять анимацию в виде набора файлов BMP, анимированного GIF файла или AVI файла. Используйте пункт **Запись анимации** контекстного меню для вызова диалога настройки данной возможности (см. рис. 4.35).

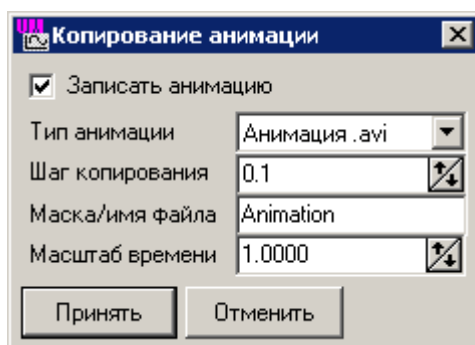


Рис.4.35. Настройка параметров сохранения анимации

Для сохранения анимации из данного анимационного окна поставьте флажок в поле **Записать анимацию**.

В поле **Тип анимации** можно выбрать следующие значения:

- **Набор .bmp** – в каталоге задачи будет создана серия файлов с именами [Маска]0.BMP – [Маска][Номер последнего кадра].BMP, где *Маска* – вводится в поле **Маска/имя файла**;
- **Анимация .avi** – в каталоге задачи будет создан файл AVI с именем, которое вводится в поле **Маска/имя файла**;
- **Анимация .gif** – в каталоге задачи будет создан файл GIF (анимированный) с именем, которое вводится в поле **Маска/имя файла**.

Поле **Шаг копирования** задает промежуток времени модели (в секундах), через который будут добавляться новые кадры в файл с анимацией.

Поле **Маска/имя файла** задает имя GIF и AVI файлов и маску для BMP файлов.

Поле **Масштаб времени** доступно при выборе AVI файлов. Предназначено для замедления или ускорения проигрывания AVI-файлов. Это бывает необходимо при анимации процессов происходящих в модельном времени очень быстро или, наоборот, медленно.

#### **Замечания.**

- Обратите внимание на то, что файл(ы) будут созданы после выхода из режима паузы процесса интегрирования (п. 4.4.3.2).
- При создании анимационных AVI и GIF файлов временные файлы сохраняются в каталоге временных файлов, см. п. 4.2.1.
- При создании продолжительных клипов размер временных файлов может достигать десятков и сотен мегабайт. Проследите, чтобы на диске с каталогом временных файлов было достаточно свободного места.

### 4.3.6. Процессор переменных

Процессор переменных включает в себя два инструмента обработки рассчитанных переменных: *табличный процессор* и инструмент *преобразования переменных*. Остановимся на этих инструментах подробнее.

#### 4.3.6.1. Табличный процессор

**Табличный процессор** (см. рис. 4.36) используется для статистической обработки рассчитанных переменных. Для вызова окна процессора используется пункт меню **Инструменты | Табличный процессор**.

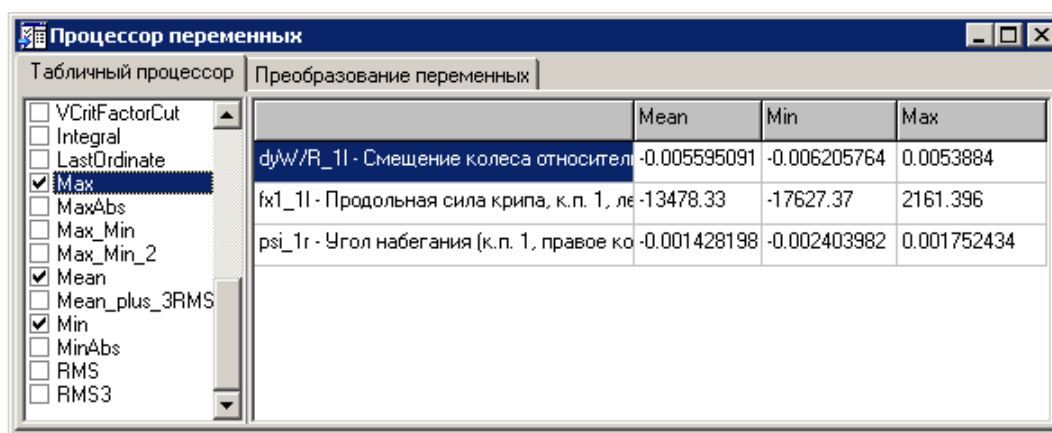


Рис.4.36. Табличный процессор

В левой части окна находится список всех доступных функционалов, при помощи которых можно обработать рассчитанные переменные. Для анализа одной или группы переменных (файловые переменные из *списка рассчитанных переменных*, п. 0, или переменные из *графического окна*, п. 4.3.4) перенесите их с помощью мыши в поле процессора. Для включения/выключения функционала используйте галочку возле его имени.

Для выключения функционала из табличного процессора поместите курсор на столбец с этой функционалом и нажмите клавиши **Shift+Del**. Для удаления переменной из табличного процессора поместите курсор на строку с этой переменной и нажмите клавишу **Del**.

При помощи контекстного меню (см. рис. 4.37) можно очистить список переменных или список функционалов, упорядочить переменные по каждому критерию по возрастанию и убыванию, а также копировать таблицу в MS Word целиком или выделенную часть.

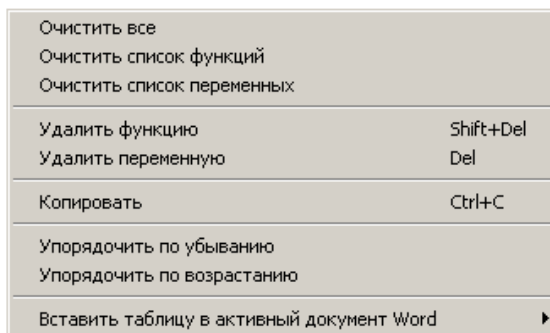


Рис.4.37. Контекстное меню табличного процессора

Вместе с УМ поставляются некоторые стандартные функционалы, см. табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Функционалы стандартной поставки**

Функционал	Комментарий
<b>Percentile_0_point_1 (0,1%)</b> <b>Percentile_0_point_15 (0,15%)</b> <b>Percentile_1 (1%)</b> <b>Percentile_99 (99%)</b> <b>Percentile_99_point_85 (99,85%)</b> <b>Percentile_99_point_9 (99,9%)</b>	Процентиль. Процентиль N – это такое значение, ниже которого расположено N процентов значений данной переменной. Значения переменной упорядочиваются в порядке возрастания; отбрасываются N % значений с начала ряда; минимальное значение среди оставшихся есть значение функционала.
<b>Integral</b>	Интеграл от переменной по независимой переменной с учетом знака переменной. Площади под кривой с положительным значением ординаты берутся с положительным знаком, площади над кривой с отрицательным значением абсциссы берутся с отрицательным знаком. Для периодической функции типа <i>sin(t)</i> на целом числе периодов равен нулю.
<b>IntegralAbs</b>	Интеграл от переменной по независимой переменной без учета знака переменной. Все площади берутся с положительным знаком, без учета знака ординаты.
<b>LastAbscissa</b>	Последнее значение абсциссы
<b>LastOrdinate</b>	Последнее значение ординаты
<b>Max</b>	Максимальное значение переменной
<b>MaxAbs</b>	Максимальное значение модуля переменной
<b>Max_Min</b>	Разность между максимальным и минимальным значениями переменной, <b>Max_Min = Max-Min</b> , удвоенная амплитуда процесса
<b>Max_Min_2</b>	Разность между максимальным и минимальным значениями переменной, поделенная пополам, <b>Max_Min = (Max-Min)/2</b> , амплитуда процесса
<b>Mean</b>	Среднее
<b>Mean_plus_3RMS</b>	Сумма среднего и утроенного среднеквадратического отклонения, <b>Mean_plus_3RMS = Mean + RMS3</b>
<b>Min</b>	Минимальное значение переменной
<b>MinAbs</b>	Минимальное значение модуля переменной
<b>RMS</b>	Среднеквадратическое отклонение (root mean square), корень квадратный из дисперсии, считается по формуле $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$ , где N – число точек на графике, $\bar{X}$ – среднее.
<b>RMS3</b>	Утроенное среднеквадратическое отклонение, <b>RMS3 = 3*RMS</b>

Реализация функционалов, которые используются в табличном процессоре, вынесена в файлы DLL, которые находятся в каталоге *Plugins*. Вместе со стандартной версией UM

поставляется файлы **standard.dll** и **percentile.dll**, в которых находятся стандартные функции, описанные выше. При запуске программы **UM Simulation** все внешние функции, находящиеся во всех DLL каталога **Plugins**, автоматически подгружаются как функционалы.

Таким образом, разработка дополнительных функционалов может осуществляться независимо от UM самим пользователем или разработчиками по заказу пользователя.

Шаблон процедуры функционала для языка Pascal можно найти в файле `..\com\Plugin.pas`, а пример реализации DLL на языке Pascal (Delphi) – в файле `..\Plugins\standard.dpr`.

### 4.3.6.2. Преобразование переменных

Инструмент **Преобразование переменных** (см. рис. 4.38) используется для совершения операций над уже рассчитанными переменными. Этот способ полезен тогда, когда численный эксперимент(ы) уже проведен, а необходимая переменная-выражение предварительно не сформирована (см. **Мастер переменных | Выражение**). На рис. 4.38 в графическом окне построены две рассчитанные переменные. При помощи инструмента **Преобразование переменных** сформирована новая переменная – сумма двух исходных, которая также построена в графическом окне. Сформированная таким образом переменная не будет рассчитываться при выполнении последующих численных экспериментов.

**Замечание.** Для формирования переменной-выражения, которую можно будет поместить в список переменных и которая будет рассчитываться при каждом численном эксперименте, воспользуйтесь конструктором выражений в **Мастере переменных**, закладка **Выражение**. Этот способ рекомендуется как более универсальный и позволит исследователю сократить время обработки результатов при проведении многих численных экспериментов.

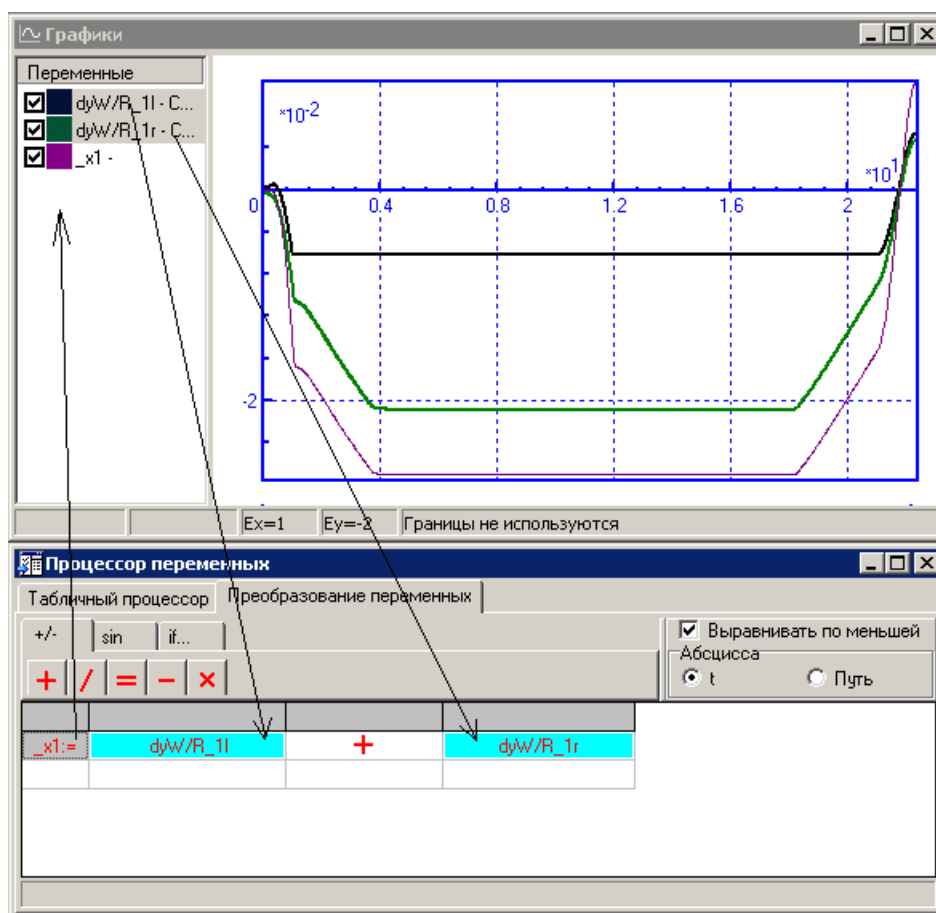



Рис.4.38. Операции над рассчитанными переменными



### 4.3.7. Статистика

Инструмент **Статистика** используется для статистического анализа *рассчитанных переменных* с возможностью отображения различных характеристик в виде гистограмм и графиков. Вызов этого окна осуществляется с помощью команды меню **Инструменты | Статистика** или нажатием кнопки  на панели инструментов. Число окон не ограничено. Окно **Статистика** (см. 4.39) разделено на две части: контейнер переменных (слева), поле построения графиков (справа). Анализируемые переменные переносятся в окно либо из графического окна, либо из списка рассчитанных переменных (п. 0).

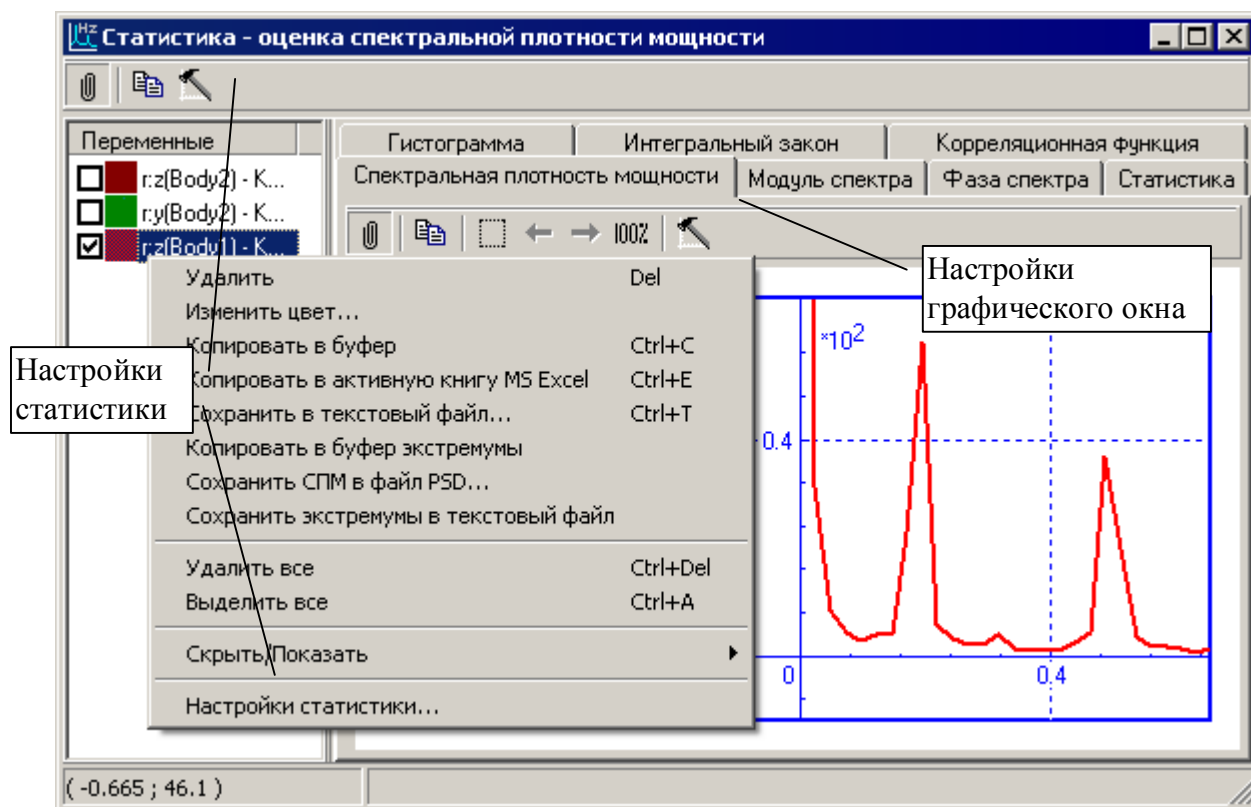



Рис.4.39. Окно статистики

Поле графиков представляет собой набор вкладок, на которых отображаются различные гистограммы и графики, а также статистическая информация. На вкладках представлены следующие статистические характеристики:

- **Гистограмма** – гистограммы плотности распределения вероятностей;
- **Интегральный закон** – гистограммы распределения вероятностей;
- **Корреляционная функция** – графики оценки автокорреляционной функции;
- **Спектральная плотность мощности** – графики оценки спектральной плотности мощности;
- **Действительная и мнимая части спектра (модуль и фаза спектра)** – комплексная спектральная плотность временного ряда (спектр).
- **Статистика** – таблица статистических характеристик.

Гистограммы и графики выводятся только для активных переменных (отмеченных галочкой в контейнере переменных). Графики строятся с помощью графических окон, работа с которыми описана в руководстве пользователя п. 4.3.4.

Диалоговое окно **Настройки статистики** (рис. 4.40), вызываемое при помощи контекстного меню или кнопки  на панели инструментов окна **Статистика** (см. рис. 4.39), позволяет изменять параметры отображения статистической информации. На вкладке **Общие** настраиваются формат выводимых чисел и вид гистограмм:

- **Количество столбцов** – количество столбцов гистограмм (**Авто** – количество будет рассчитано программой).
- **Выноска** – на гистограммах отображаются выноски со значениями выборочной вероятности.

На той же вкладке настраивается способ формирования выборки для алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ):

- **Дополнение нулями** – выборка дополняется нулями до ближайшего большего значения  $2^n$ .
- **Усечение до ближайшего** – выборка усекается до ближайшего меньшего значения  $2^n$ .

**Замечание.** Обратите внимание, что значения корреляционной функции и спектральной плотности при использовании разных способов формирования выборки несколько отличаются друг от друга.

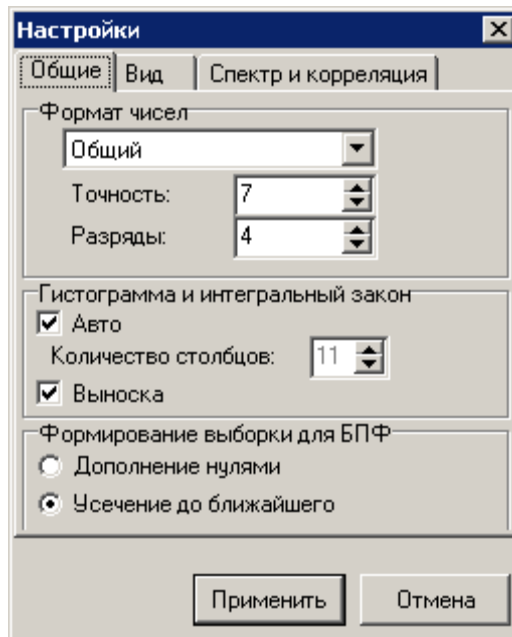


Рис.4.40. Окно настроек статистики

Указать отображаемые статистические характеристики, а также настроить вид отображения комплексной спектральной плотности (спектра) можно с помощью вкладки **Вид**. Комплексная спектральная плотность (спектр) вычисляется прямым преобразованием Фурье. Используемая пара дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с условиями нормировки записывается так:

$$x(i) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} a(n) \cdot e^{j \cdot 2\pi \frac{in}{m}} \quad , \quad a(n) = \sum_{i=0}^{m-1} x(i) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \frac{in}{m}}$$

Комплексная спектральная плотность может быть представлена на графиках в двух видах: отображаются действительная и мнимая части спектра или модуль и фаза спектра.

Вкладка **Спектр и корреляция** используется для выбора функции спектрального окна, вида оценки автокорреляционной функции и указания отношения  $m/N$ .

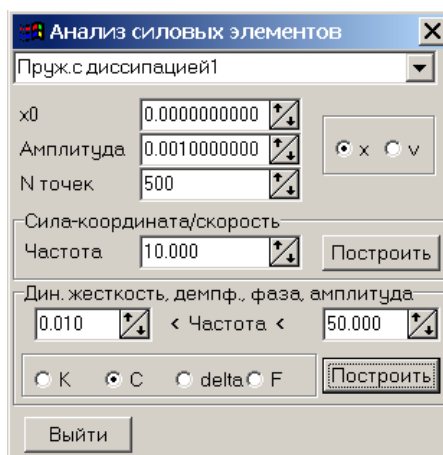
График спектральной плотности мощности, представляет собой оценку односторонней спектральной плотности мощности с использованием различных функций спектрального окна. Доступны следующие функции спектральных окон: Бартлетта, Хэннинга, Парзена, Хэмминга и усеченная.

При расчете спектральных и корреляционных характеристик для вычисления ДПФ используется алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Для автокорреляционной функции применяются несмещенная и смещенная оценки.

**Отношения  $m/N$**  определяет отношение количества точек оценки корреляционной функции, используемое для определения спектральной плотности мощности, к размеру выборки.

#### 4.3.8. Анализ силовых элементов в частотной области



Математическое описание раздела см. в Гл.2, *Анализ свойств силового элемента в частотной области*.

Для вызова окна анализа используется команда меню **Инструменты | Анализ сил**.

1. Выберите силовой элемент для анализа с помощью выпадающего меню. Если элемент является списком сил, то для анализа доступен как элемент целиком, так и каждая его составляющая.
2. Задайте параметры гармонического возмущения:
  - центр колебаний  **$x_0$**  (в метрах);
  - **амплитуду  $a$**  (в метрах);
  - **число точек** на графике.
3. Для построения отклика силового элемента в зависимости от координаты или скорости
  - выберите **тип зависимости** ( $x$ ,  $v$ );
  - задайте **частоту** возмущения в группе **Сила-координата/скорость** в Гц;
  - щелкните на кнопке **Построить** в группе **Сила-координата/скорость** для построения графика силы.
4. Для построения частотных характеристик (зависимости динамической жесткости, эквивалентного демпфирования, угла демпфирования или амплитуды отклика в зависимости от частоты возмущения)
  - задайте нижнюю и верхнюю границы интервала изменения **частоты** возмущения в Гц;
  - щелкните на нижней кнопке **Построить**.

Пример использования инструмента см. в Гл.7, п. *Упруго-фрикционный элемент 2*

### 4.3.9. Пульт управления

Пульт управления позволяет пользователю интерактивно изменять значения параметров модели, влияя на поведение модели, в том числе в процессе численного моделирования. Это позволяет, например, учесть в модели действия человека-оператора (водителя транспортного средства).

Порядок работы с пультом управления следующий. Запустите **Редактор пульта управления** (см. рис. 4.43, пункт меню **Инструменты | Редактор пульта управления**) и в нем создайте пульт управления для модели. Затем сохраните этот пульт управления в файл. После этого сохраненный пульт управления можно запустить на выполнение выбрав пункт меню **Инструменты | Открыть пульт управления**, см. рис. 4.41.

В каждый момент времени может быть открыто неограниченного число редакторов пульта управления и только один активный пульт управления.

На рис. 4.41 приведен пульт управления, при помощи которого пользователь может интерактивно управлять транспортным роботом (см. демонстрационную модель `..\samples\robots\atr`): выбирать направление движения (вперед, назад, налево, направо) и управлять движущим моментом на колесах, а также устанавливать амплитуду неровностей и коэффициент трения между колесами и поверхностью.

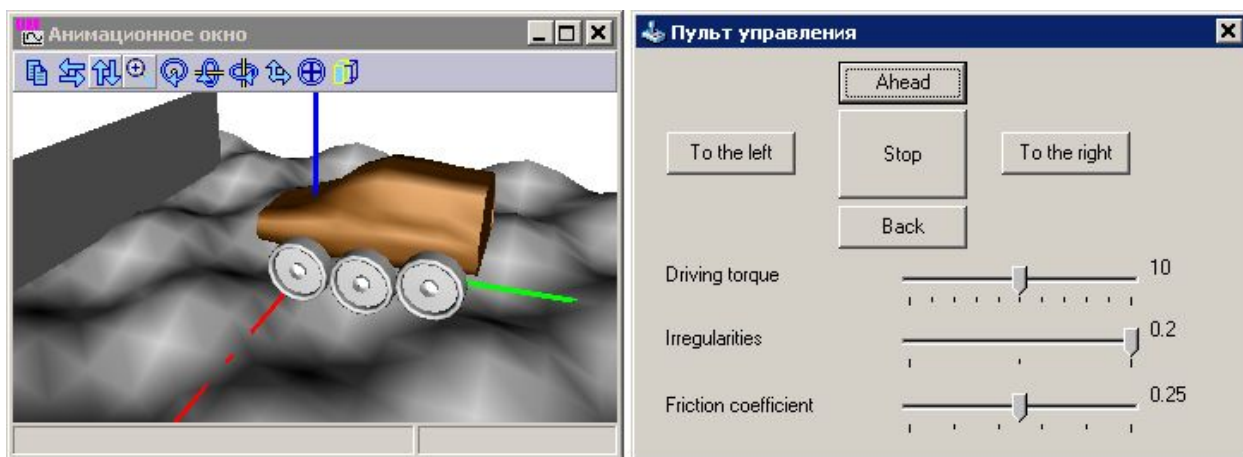


Рис.4.41. Пульт управления

Изменять с пульта управления можно только идентификаторы, параметризующие силовые элементы любых типов, в том числе и шарнирных сил, и графические объекты. Запрещается изменять с пульта управления идентификаторы, параметризующие характеристики тел (масса, момент инерции, положение центра масс) и шарниров.

### 4.3.9.1. Редактор пульта управления

Редактор пульта управления (см. 4.43) представляет собой визуальный конструктор, позволяющий разместить в окне пульта управления различные элементы управления и связать их со значениями идентификаторов.

Редактор пульта управления поддерживает следующие элементы управления:

- статический текст;
- поле ввода численных величин;
- переключатель (флажок);
- ползунок;
- кнопку;
- радио-группу;
- двухкоординатный джойстик.

Для добавления нового элемента управления нажмите нужную кнопку в меню быстрого доступа (см. рис. 4.42) а затем щелкните в поле редактирования пульта управления и в месте щелчка появится выбранный элемент управления.



Рис.4.42. Меню редактора пульта управления

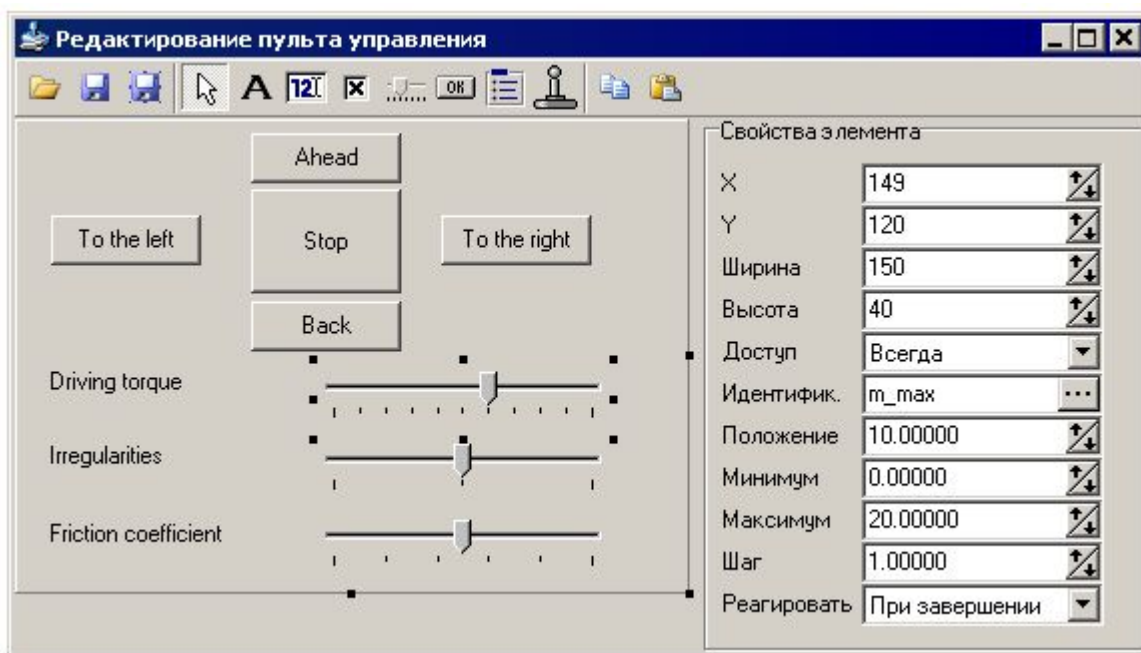


Рис.4.43. Редактор пульта управления

Рассмотрим значения и смысл свойств элементов управления. Итак, общими для всех элементов являются следующие свойства:

- **X** – расстояние от левого края элемента до левой границы окна пульта управления;
- **Y** – расстояние от верхнего края элемента до верхней границы окна пульта управления;
- **Ширина** – ширина элемента;
- **Высота** – высота элемента.

Все элементы, кроме статического текста имеют следующие свойства:

- **Доступ** – регулирует доступность элемента управления. Может принимать следующие значения: **Всегда**, **Перед моделированием**, **Только при моделировании**, **В режиме паузы**.
- **Идентифик.** – задает один или несколько параметров модели, с которым связан элемент управления, а также связанные с ними числовые значения. Конкретная реализация зависит от элемента управления.

Ниже рассмотрим специфические свойства элементов управления.

#### Статический текст

- **Текст** – текст элемента;
- **Переносы** – поддержка переносов (для многострочных меток, Да/Нет);
- **Выравнивание** – выравнивание текста внутри заданного размера: слева, по центру, справа.

#### Поле ввода

- **Значение** – текущее (начальное) значение идентификатора;
- **Минимум** – минимально возможное значение для ввода;
- **Максимум** – максимально возможное значение для ввода;
- **Приращение** – шаг приращения величины при использовании кнопок визуального изменения величины.

#### Переключатель

- **Состояние** – текущее (начальное) состояние переключателя (включено/выключено);
- **Идентификаторы** – в диалоговом окне можно указать один или несколько идентификаторов модели с указанием значений на «включено» и «выключено»;

#### Ползунок

- **Минимум, Максимум** – предельные величины для изменения связанного параметра;
- **Шаг** – шаг изменения параметра;
- **Реагировать** – устанавливает режим изменения величины связанного параметра. Может принимать значения **Всегда** и **При завершении**. Установка этого свойства в значение **Всегда** приведет к тому, что величина связанного параметра будет обновляться в процессе перемещения указателя. В некоторых случаях затраты на изменение величины параметра могут быть относительно велики, и тогда рекомендуется выбирать режим реагирования **При завершении**. Это приведет к тому, что величина связанного параметра будет меняться только при завершении операции с указателем ползунка.

#### Кнопка

- **Идентификаторы** – в диалоговом окне можно указать один или несколько идентификаторов модели с указанием значений, которые будут устанавливаться этим идентификаторам при нажатии на кнопку.

#### Радио-группа

- **Значения** – связывает название пунктов и численные значения идентификаторов, см. рис. 4.44;
- **Заголовок** – общий заголовок радио-группы;

- **Столбцов** – число столбцов в радио-группе;
- **Активный** – индекс активного (выделенного элемента), -1 если нет активного элемента.

**Замечание.** Идентификаторы модели, связанные с переключателем или радио-группой, при активном пульте управления могут принимать только значения, предусмотренные в соответствующем переключателе или радио-группе. При попытке изменить значение такого параметра из **Инспектора моделирования объектов** (см. п. 4.4.2.4) его значение будет автоматически округлено до ближайшего значения из списка радио-группы.

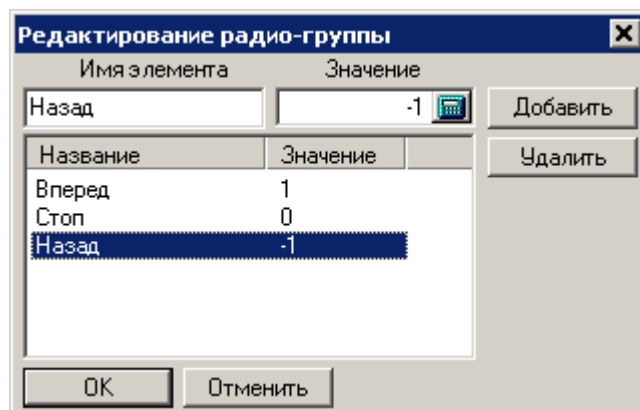


Рис.4.44. Окно редактирования радио-группы

#### Джойстик

- **Идент.(ификатор) по X** – идентификатор модели, с которым связывается отклонение джойстика по горизонтали; идентификатор может принимать значения от минус единицы для крайнего левого положения джойстика, до единицы для крайнего правого положения.
- **Идент.(ификатор) по Y** – идентификатор модели, с которым связывается отклонение джойстика по вертикали. Крайнее нижнее положение соответствует минус единице, крайнее верхнее – плюс единице.
- **Идент.(ификатор) реж.(има)** – идентификатор модели, которому назначается значение в поле **Старт** на начало управления джойстиком, а значение в поле **Стоп** – на окончание управления. Обычно применяется для управления двигателями роботов и манипуляторов с автотормозами, где на начало управления нужно выключить автотормоза, а на конец управления – включить.

**Замечание.** Любой идентификатор для джойстика (идентификатор по X, по Y и идентификатор режима) можно не указывать. Если, например, опустить идентификатор по X или Y, то двухкоординатный джойстик превратится в однокоординатный.

#### 4.4. Режим однократного интегрирования уравнений движения

Процесс численного интегрирования уравнений движения является одним из основных инструментов исследования свойств механической системы с использованием УМ. Пользователь может использовать режимы *однократного расчета* движения или выполнять *многовариантные расчеты* (доступно при наличии модуля многовариантных расчетов и оптимизации, см. главу 6).

В данном разделе мы остановимся на описании режима однократного расчета. Переход к данному режиму осуществляется с помощью пункта меню **Анализ | Моделирование**.

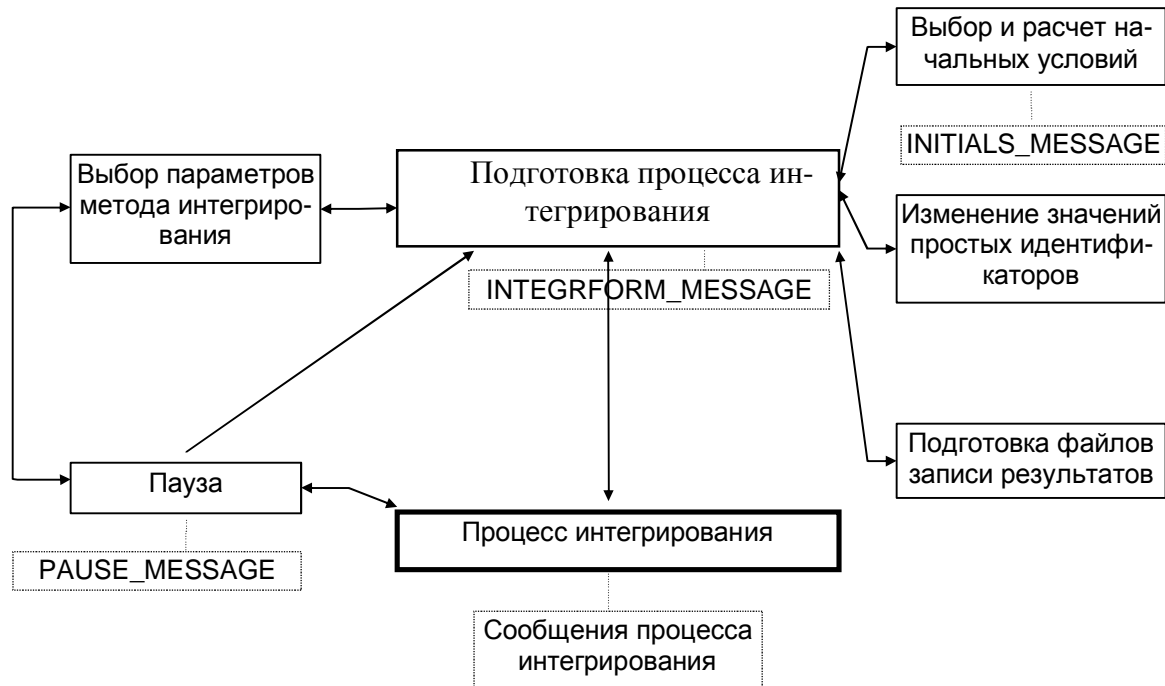
Перед стартом процесса интегрирования уравнений движения пользователь имеет возможность:

- задать численный метод и точность интегрирования, шаг представления и записи результатов;
- задать начальные условия (начальные значения координат и их первых производных по времени);
- изменить значения параметров задачи, заданных с использованием идентификаторов;
- задать файлы для сохранения результатов моделирования.

В процессе моделирования можно:

- контролировать процесс интегрирования с использованием любого числа анимационных окон, выводить результаты в графические окна;
- сохранять результаты моделирования в файл автоматически рассчитываемых переменных;
- прерывать процесс интегрирования в любой момент времени, влиять на процесс в интерактивном режиме путем использования прерываний.

### 4.4.1. Общая структура блока интегрирования уравнений движения



Блоки схемы в сплошных рамках в основном соответствуют диалоговым окнам, появляющимся на экране; блоки в пунктирных рамках – ключи сообщений при нажатии кнопок **Сообщение**. За исключением прерываний процесса интегрирования, имя в блоке, соответствующем прерыванию, является ключом прерывания. Прерывания блока интегрирования будут подробно рассмотрены ниже

#### 4.4.2. Подготовка процесса интегрирования

Диспетчером подготовки механической системы к процессу однократного интегрирования является диалоговое окно, представленное на рис. 4.45.

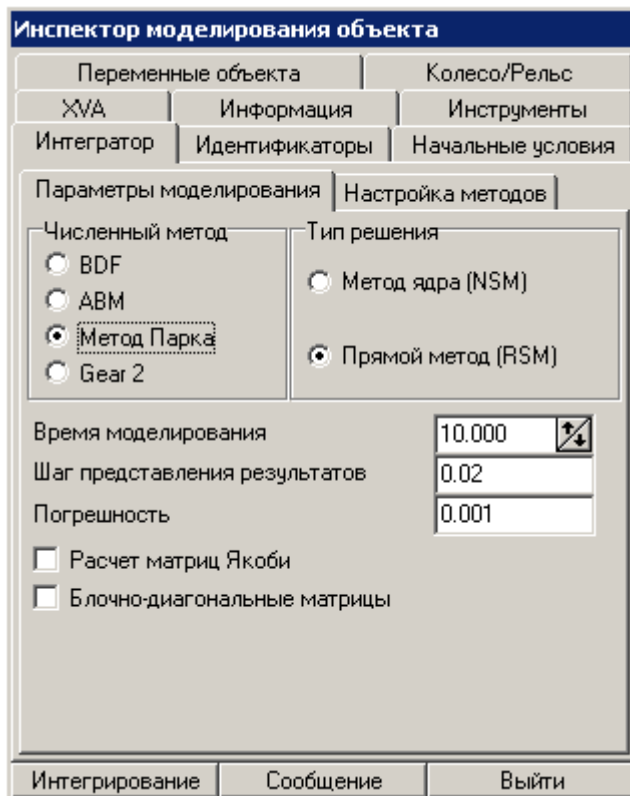


Рис.4.45. Инспектор моделирования объекта

##### 4.4.2.1. Выбор метода и параметров численного интегрирования

В случае систем, имеющих структуру дерева, уравнения движения являются обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ). При наличии замкнутых кинематических цепей или использовании кватернионов уравнений движения имеют вид дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ). Рассмотрим численные методы решения нелинейных уравнений движения.

Для интегрирования нелинейных ОДУ и ДАУ в УМ предлагается несколько численных методов:

- **BDF**

(The Backward Differentiation Formula - формула дифференцирования назад), явный метод в форме PEC (т.е. прогноз-оценивание-коррекция), до 5-го порядка включительно, переменный шаг и порядок, только для нежестких уравнений;

- **ABM**

(The Adams-Bashfort-Moulton method - метод Адамса-Бэшфорта-Моултона), явный метод в форме PECE (прогноз-оценивание-коррекция-оценивание); до 11-го порядка включительно, переменный шаг и порядок, только для нежестких уравнений;

- **PARK**

Неявный метод второго порядка с переменным/постоянным шагом, наиболее эффективен для жестких ОДУ и ДАУ.

Для нежестких уравнений методы BDF и ABM показывают примерно одинаковую эффективность при интегрировании с не очень высокой точностью. При интегрировании с

высокой точностью метод АВМ часто более эффективен. Если уравнения жесткие, то метод Парка значительно более эффективный. Иногда эффективности повышается, при условии, что при синтезе уравнений движения включена опция вычисления матриц Якоби.

#### 4.4.2.2. Общие параметры интегрирования

Поля закладки для выбора метода и параметров интегрирования (рис. 4.45) содержат следующую информацию.

**Численный метод** (перечислены выше).

**Тип решения:** RSM (Range Space Method) или NSM (Null Space Method).

**Замечание.** NSM и RSM различаются только для систем с избыточными координатами (то есть при решении ДАУ). Подробная информация о методах содержится в Научном Руководстве [1] (NSM – п. 6.4, RSM – п. 6.3).

NSM основан на переходе к локальным обобщенным координатам системы и более эффективен, если система имеет большое число замкнутых цепей и, соответственно, малое число степеней свободы.

RSM соответствует переходу к обобщенным силам реакций в разрезанных шарнирах, что более эффективно, если анализируется составной объект, содержащий большое число подсистем и длинные кинематические цепи. Например, для цепочки тел, моделируемой по методу подсистем, можно с использованием данного подхода достичь линейной зависимости времени выполнения одного шага от числа подсистем, в то время как для прямой реализации эта зависимость кубическая.

*Вместе с тем, оба метода имеют особенность, которую должен учитывать пользователь.* Поясним ее на простом примере кривошипно-ползунного механизма (см. рис. 4.46).

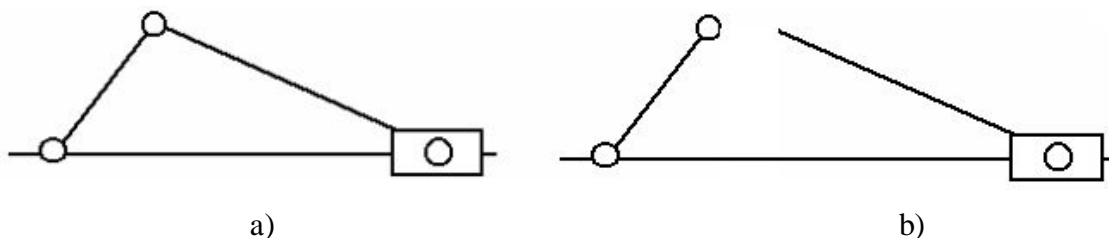


Рис.4.46. Кривошипно-ползунный механизм

Предположим, что масса кривошипа мала по сравнению с массами шатуна и ползуна, и при описании объекта пользователь задал нулевыми массу и момент инерции этого тела. Поскольку механизм имеет замкнутую кинематическую цепь, то шарнир, соединяющий кривошип с шатуном будет разрезан. В результате механизм разделяется на две независимые части, для одной из которых, а именно для кривошипа, матрица масс будет вырожденной. В этом случае моделирование движения становится невозможным (требуется обращение матриц масс). Таким образом, не рекомендуется задавать нулевые массы и моменты инерции тел.

**Время моделирования** – интервал моделирования движения системы. Начальный момент времени при моделировании считается равным нулю.

**Шаг представления результатов** моделирования задает частоту смены изображения объекта в анимационных окнах, постановки новых точек на графиках, расчета и записи в файл автоматически рассчитываемых переменных. Данная величина непосредственно не связана с шагом интегрирования, который является переменным и устанавливается автоматически.

**Погрешность** - задаваемая точность численного метода. Для **BDF** и **ABM** методов: это абсолютная погрешность на интервале времени 1 с. Шаг интегрирования выбирается так, чтобы обеспечить заданную погрешность в вычислении координат. Для метода **Парка** - локальная погрешность *одного шага интегрирования*, поэтому для метода Парка следует задавать большую точность вычислений.

#### 4.4.2.3. Параметры численных методов

Рассмотрим настройки численных методов решения уравнений движения (см. рис. 4.47).

Инспектор моделирования объекта	
Переменные объекта	XVA
Информация	Инструменты
Интегратор	Идентификаторы
	Начальные условия
Параметры моделирования	Настройка методов
BDF	
Минимальный шаг	1E-0010
Максимальный порядок	5
ABM	
Минимальный шаг	1E-0010
Максимальный порядок	11
Метод Парка	
Прогноз	
<input type="radio"/> Высокий	<input checked="" type="radio"/> Средний
Начальная дискретизация	2
Минимальный шаг	1E-0012
Минимум итераций:	1
Максимум итераций:	2
Множитель точности итерационного решения (<=1)	1
Интегрирование	Сообщение
	Выйти

Рис.4.47. Настройка параметров численных методов

##### 4.4.2.3.1. BDF, ABM

Для методов **BDF** и **ABM** задаются минимальный шаг и максимальный порядок (не более 5-го и 11-го соответственно). Интегрирование прерывается, если программа устанавливает шаг меньше заданного в данной таблице (тем самым можно предотвратить бесконечное дробление шага).

##### 4.4.2.3.2. Метод Парка

**Переменный/постоянный шаг** интегрирования; при выборе опции переменного шага производится автоматический контроль за величиной локальной погрешности с соответствующей коррекцией шага интегрирования, в противном случае шаг интегрирования постоянный.

**Начальная дискретизация** шага метода Эйлера: метод Парка является многошаговым методом, требующий для старта предварительного расчета нескольких начальных точек. С этой целью используется неявный метод Эйлера, постоянный шаг которого устанавливается в соответствии с величиной  $h/n$ , где  $h$  – шаг метода Парка, а  $n$  – задаваемый в данном поле коэффициент дискретизации.

**Высокий прогноз:** если да, то используется прогноз 4-го порядка, в противном случае – третьего.

**Максимальное число итераций.** Метод Парка является итерационным, как и любой неявный метод. Если число итераций, необходимых для получения заданной точности решения, превзойдет заданные здесь числа, то шаг интегрирования уменьшается вдвое (при интегрировании с переменным шагом) или процесс интегрирования прерывается (при интегрировании с постоянным шагом).

#### 4.4.2.4. Изменение значений идентификаторов

Изменение параметров механической системы, заданных идентификаторами, позволяет проводить оперативное исследование влияния этих параметров на динамическое поведение системы без дополнительного вывода уравнений движения. Для изменения значений параметров используется закладка **Идентификаторы** (см. рис. 4.48).

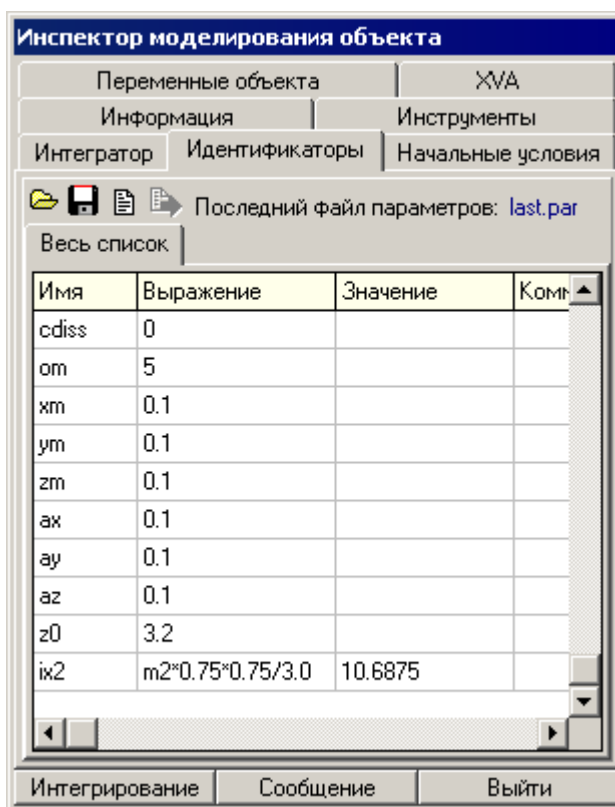


Рис.4.48. Изменение значений идентификаторов

Значение поля **Выражение** для идентификаторов, заданных числом, можно изменять, также как и комментарии к любым идентификаторам. Текущие значения идентификаторов можно записать в файл, а также прочитать из файла ранее сохраненные значения.

#### Автосохранение идентификаторов

При загрузке модели в программу **UM Simulation** значения параметров модели загружаются из файла *last.par*, если такой найден в каталоге модели, либо из файла данных *input.dat*, как они заданы в программе подготовки моделей **UM Input**. В файл *last.par* сохра-

няются текущие значения идентификаторов при выходе из программы **UM Simulation**. Файл создается только если включена опция автосохранения идентификаторов, см. п. 4.2.2. Автосохранение, стр. 4-10. Таким образом, если включена опция автосохранения идентификаторов, то файл *last.par* будет создан при первом же выходе из программы **UM Simulation** и будет загружаться при дальнейшей работе с этой моделью в **UM Simulation**. Обратите внимание, что при дальнейшем изменении значений идентификаторов в программе **UM Input** новые значения параметров будут сохранены в файле *input.dat*, но при открытии модели в **UM Simulation** из *last.par* будут загружены старые значения идентификаторов. Для загрузки моделей в **UM Simulation** со значениями параметров из *input.dat* необходимо удалить или переименовать файл *last.par*.

**Замечание.** Не допускается изменение значений зависимых параметров, то есть идентификаторов, выраженных через другие идентификаторы.

#### 4.4.2.5. Выбор и автоматическое вычисление начальных условий

Выбор начальных условий является важной частью подготовки механической системы к процессу интегрирования. Для систем, имеющих структуру дерева, эта операция не представляет особых проблем, поскольку в этом случае все шарнирные координаты являются независимыми (исключением являются системы, содержащие *кватернионные шарниры*, в которых элементы *кватерниона* связаны известным алгебраическим соотношением). Для систем с замкнутыми кинематическими цепями подбор начальных значений координат и скоростей осложнен тем, что координаты и их производные по времени не являются независимыми, а удовлетворяют уравнениям связей. Поскольку алгебраические уравнения связей являются нелинейными, нахождение их решения представляет определенную проблему.

Программа предоставляет возможность автоматического определения начальных условий при наличии уравнений связей, используя метод Ньютона-Рафсона для решения нелинейных уравнений связей. Однако ситуация усложняется тем, что система нелинейных уравнений может не иметь решения а может иметь несколько. Кроме того, метод Ньютона-Рафсона в некоторых случаях может не найти решения, если неудачно задано начальное приближение. Тем не менее, определение начальных условий возможно, если руководствоваться изложенным ниже подходом, и задача определения начальных условий вообще корректна (то есть если моделируемый механизм технически реализуем).

Введем основные понятия.

Объект имеет *избыточные координаты*, если он имеет замкнутые кинематические цепи (замкнутые контуры), контактные или фиктивные шарниры. Избыточность координат означает, что они не могут принимать произвольные значения, то есть являются *зависимыми*. Уравнения, которым удовлетворяют избыточные координаты, называются *уравнениями связей*. Как правило, это сложные нелинейные алгебраические уравнения. Для систем с замкнутыми кинематическими цепями часть шарниров *«разрезается»*, и уравнения связей являются условиями замыкания разрезанных шарниров. Локальные координаты в неразрезанных шарнирах называются *основными*, в разрезанных – *вспомогательными*. Решать уравнения связей аналитически в большинстве случаев невозможно из-за трансцендентности уравнений. Поэтому точные значения координат являются заранее неизвестными и могут быть получены только численным путем. Расчет конфигурации механизма и означает автоматизированное решение уравнений связей.

Для решения уравнений связей, то есть для расчета конфигурации механизма, в UM используется итерационный метод Ньютона-Рафсона, использующий в качестве начального приближения значения координат, заданные пользователем. Численное решение систем нелинейных алгебраических уравнений является нетривиальной задачей: уравнения могут иметь несколько решений, часть из которых может не устраивать пользователя, уравнения могут вообще не иметь решения (в этом случае пользователь ошибся либо при

описании кинематической схемы объекта, либо при задании его геометрических параметров). Сходимость метода Ньютона-Рафсона в значительной степени определяется близостью начального приближения к точному решению. Перечисленные проблемы в большинстве случаев можно легко решить, если следовать изложенным ниже инструкциям.

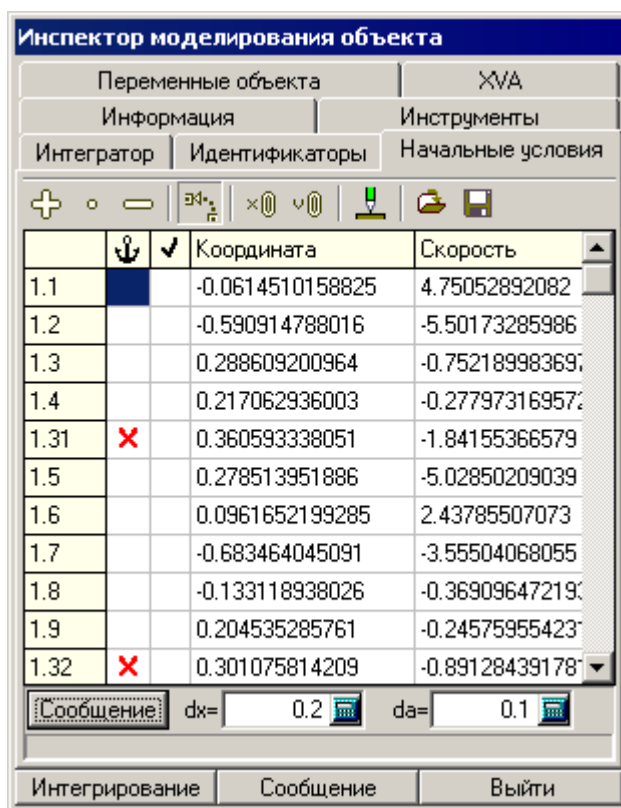


Рис.4.49. Задание начальных условий

Работа с мастером автоматизированного выбора начальных данных (см. рис. 4.49) требует определенных навыков.

Рассмотрим сначала группы полей и кнопок мастера.

**Столбец**  – столбец ключей фиксации координат. Пользователь может *фиксировать* одну или несколько координат, щелкнув мышкой на поле с идентификатором координаты. Признаком фиксации – в соответствующем поле. Фиксировать можно только *основные координаты*. Фиксация игнорируется для систем без избыточных координат. Для систем с *избыточными координатами* фиксация переменной означает, что запрещается изменение ее значения в процессе решения уравнений связей.

**Столбец**  – одна или несколько *основных* координат могут быть *выделены*. Выделение используется для пошагового изменения значений координат с автоматическим расчетом конфигурации и перерисовкой объекта в анимационных окнах при щелчке на кнопках и . Шаг изменения координаты устанавливается для линейных и угловых координат в полях **da** (для угловой переменной) и **dx** для линейной.




Столбцы Координата, Скорость содержат текущие значения координат и их первых производных по времени. Допускается прямое внесение значений в поля таблицы. Координаты упорядочены по их номерам в списке координат объекта.

**Расчет.** Кнопки , и используются для отображения в анимационном окне конфигурации объекта при текущих значениях координат (кнопка ), а также с пошаговым уменьшением () или увеличением () выделенных координат. При наличии избы-

точных координат предварительно производится решение уравнений связей с использованием текущих значений координат в качестве первого приближения.






**Замечание.** При автоматическом решении уравнений связей значения координат будут изменены. Если требуется оставить неизменными некоторые координаты, их следует фиксировать.

#### 4.4.2.5.1. Задание начальных условий для систем без избыточных координат

Рассмотрим процедуру задания начальных условий для простого объекта без замкнутых кинематических цепей. В соответствующие поля следует внести численные значения координат и нажать кнопку . В анимационном окне после этого действия объект будет изображен при новых значениях координат. Можно перерисовывать объект с пошаговым изменением одной или нескольких координат. Для этого *выделите* нужные координаты. После этого при нажатии кнопки  будет происходить пошаговое уменьшение, а кнопки  – увеличение выделенных координат. Шаг изменения угловой  $da$  и линейной  $dc$  координаты задается в соответствующих полях.

#### 4.4.2.5.2. Расчет начальных условий для систем с замкнутыми кинематическими цепями

Расчет начальных условий для систем с замкнутыми цепями происходит значительно сложнее, чем для систем со структурой дерева. В этом случае для численного решения нелинейных уравнений связей используется итерационный метод Ньютона-Рафсона (Гл.2, п. *Теоретические основы расчета начальных условий для систем с замкнутыми кинематическими цепями*).

Для старта используется кнопка . После того, как программа успешно рассчитала конфигурацию механизма, можно использовать функцию пошагового увеличения/уменьшения координат. Рекомендуется изменять пошагово только одну координату. Для этого *выделите* и *зафиксируйте* координату (в соответствующей строке должны стоять  и ) и щелкните мышью на одну из кнопок , .

В процессе расчета можно фиксировать (то есть запрещать изменяться) несколько координат, *но не больше, чем число степеней свободы объекта*.

Кратко рассмотрим действия, которые пользователю рекомендуется предпринять в ситуации, когда программа сообщает о неудаче при попытке рассчитать конфигурацию объекта.

*Уравнение связей не имеет решения.* При ошибочном описании механизма с замкнутыми кинематическими цепями или при неудачном задании геометрических размеров может возникнуть ситуация, когда уравнения замыкания разрезанных шарниров (уравнения связей) не имеют решения, то есть механизм не может быть реализован. УМ не может отличить такую ситуацию от случая, когда решение системы уравнений методом Ньютона-Рафсона не определяется из-за неудачно заданного начального приближения и посылает стандартное сообщение о том, что итерации не сходятся. Пользователь должен самостоятельно разобраться в такой ситуации и выполнить корректировку описания модели или численных значений параметров.

*Решение уравнений связей не найдено из-за неудачно выбранного начального приближения.* Измените значения координат с использованием окна на рис. 4.49, приблизив конфигурацию к желаемой, и выполните расчет конфигурации заново.

*Уравнения связей не имеют решения при заданном наборе фиксированных координат.* Если пользователь зафиксировал некоторый набор координат, то они не могут изменяться в процессе итераций при решении уравнений связей. При этом может возникнуть ситуация, которая описана в первом пункте, то есть уравнения связей не имеют решения. Сни-

мите фиксацию и заново проведите расчет конфигурации. В общем случае рекомендуется сначала рассчитать конфигурацию без фиксации координат, определить число степеней свободы и в дальнейшем следить за тем, чтобы число зафиксированных координат не превосходило число степеней свободы.

*Программа рассчитала конфигурацию, которая не устраивает пользователя.* Эта проблема связана с неоднозначностью решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Используя мастер задания начальных условий (рис. 4.49), подберите значения координат, близкие к желаемой конфигурации механизма и повторите расчет.

*Текущая конфигурация механизма является вырожденной.* Некоторые положения механизма с избыточными координатами могут быть *вырожденными*. В этих положениях понижается ранг матрицы Якоби уравнений связей, и метод Ньютона-Рафсона не может найти решение, если начальное приближение соответствует вырождению. Измените произвольным образом значения всех координат, выводя тем самым механизм из вырожденного положения, и проведите расчет конфигурации.

**Замечание.** В случае сложного объекта с большим числом замкнутых кинематических цепей записывайте в файл удачно найденную начальную конфигурацию для дальнейшего использования.

#### 4.4.2.5.3. Расчет интервала допустимых значений координат

Автоматический расчет конфигурации может быть использован для определения границ интервала изменения координат. Поясним методику на примере кривошипно-ползунного механизма (рис. 4.46). Угол поворота шатуна относительно ползуна (то есть локальная координата в соответствующем шарнире) является ограниченным. Рассчитайте конфигурацию в некотором произвольном положении. Затем зафиксируйте и выделите координату, соответствующую исследуемому углу. Выполняйте расчет конфигурации с увеличением (а затем – с уменьшением) значения координаты, щелкая на одну из кнопок **+**, **=** до тех пор, пока программа не сообщит о невозможности решения уравнения связей (в этом случае угол перейдет за границу области определения). При необходимости уменьшите шаг приращения угла, чтобы получить более точные граничные значения.

**Замечание.** Описанный метод может быть использован только для *основных* координат, то есть для координат в неразрезанном шарнире.

#### 4.4.2.6. Задание и использование списка автоматически рассчитываемых переменных

С использованием *автоматически рассчитываемых переменных* (**Инспектор моделирования объекта | Переменные объекта**) пользователь получает доступ к одной из основных форм хранения и обработки результатов численного моделирования движения объекта.

Для автоматического сохранения переменных в процессе моделирования поставьте галочку в поле **Инспектор моделирования объекта | Переменные объекта | Автоматическое сохранение** переменных и заполните список как обыкновенный **Список переменных** (п. 4.3.3).

В процессе интегрирования уравнений движения значения всех переменных из списка **Инспектор моделирования объекта | Переменные объекта** будут сохранены в файлах \*.sgr и \*.tgr. Первый файл с расширением tgr содержит текстовую информацию о типах переменных, второй (расширение sgr) – файл значений переменных.

Используйте функцию **Сохранить как** для задания имени файла.

В процессе интегрирования и после его окончания переменные доступны для их отображения в виде графика и для анализа с помощью табличного процессора (п. 4.3.6.1). Более того, рассчитанные переменные могут быть проанализированы в любой момент, в том числе и при моделировании *другой задачи* (пользователь должен помнить или записать, какой расчет содержится в файлах, для этого может быть использовано смысловое задание имя файла с рассчитанными переменными).

Опишем методику работу со списком автоматически рассчитываемых переменных.

Список выбирается, модифицируется или создается перед стартом процесса численного интегрирования уравнений движения. Созданный список рекомендуется записать под именем, который в последующем позволит восстановить смысл текущего расчета.

После старта процесса интегрирования модификация и удаление списка становится невозможным вплоть до прерывания процесса.

В процессе численного интегрирования, а также после его окончания переменные из списка могут быть перенесены в графическое окно или проанализированы во встроенном *табличном процессоре*. В графическом окне переменные, перенесенные из списка автоматически рассчитываемых переменных, приобретают статус *рассчитанных переменных*.

При последующих стартах процесса интегрирования можно использовать ранее открытый список автоматически рассчитываемых переменных, но при этом пользователь должен следить за привязкой списка к имени файла и при необходимости (чтобы не перекрыть предыдущий расчет) сохранять его под новым именем.

Списки ранее рассчитанных переменных можно использовать для сравнения результатов расчетов одной модели при различных значениях параметров, начальных условий или для сравнения результатов моделирования различных объектов. Для этого используются списки переменных (команда меню **Инструменты | Список переменных**). Открыв список, прочитайте соответствующий файл с расширением tgr. Переменные списка будут доступны для переноса как в графические окна, так и в табличный процессор.

#### 4.4.2.7. Настройка параметров 3D контакта

Закладка **3D Контакт** появляется в **Инспекторе моделирования объекта** если модель механической системы включает по крайней мере два тела с описанным контактным многообразием. Подробнее об описании контактных многообразий см. *Ввод тел/Контакт* в третьей главе руководства пользователя.

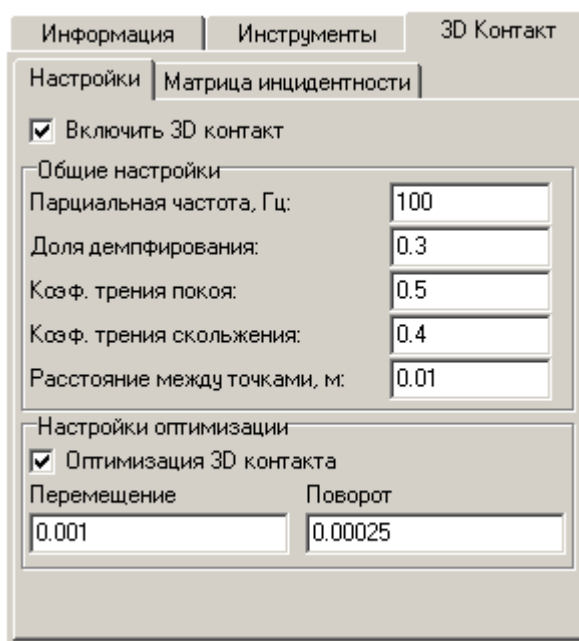


Рис.4.50. Настройки параметров контактного взаимодействия

### Общие настройки.

Через параметры **Парциальная частота** и **Доля демпфирования** вычисляются величины жесткости и демпфирование в контакте между парой тел по следующим формулам:

$$c = 4\pi^2 k^2 m, \quad \nu = 2\beta\sqrt{cm}, \quad \text{где}$$

$c$  – контактная жесткость, Н/м;  $k$  – парциальная частота, Гц;  $m$  – масса меньшего из пары тел, кг;  $\nu$  – коэффициент демпфирования в контакте, Нс/м;  $\beta$  – доля демпфирования от критического. Подробную информацию о выборе парциальной частоты и доли демпфирования см. в *Глава 2, Методика расчета параметров контакта*.

Коэффициент жесткости и демпфирования вычисляется для каждой пары тел. Рекомендуемые значения для **парциальной частоты** лежат в интервале 50÷500 Гц. Малые значения этого параметра могут привести к большим контактным внедрениям тел. Высокие значения парциальной частоты приведут к замедлению процесса численного интегрирования уравнений движения. Рекомендуемые значения для **доли демпфирования** составляют от 0.05 до 0.5. Малые значения соответствуют упругому, большие – неупругому удару.

Параметр **Расстояние между точками** (м) имеет смысл расстояния между соседними контактными точками на ребре. Рекомендуется выбирать такое значение этого параметра, чтобы на ребре характерной длины помещалось от 2 до 6 контактных точек.

При выборе величин **парциальной частоты** и **доли демпфирования** следует учитывать значение параметра **Расстояние между точками**. Чем больше одновременно работающих контактных точек между парой тел, тем выше эффективная контактная жесткость между ними. Контактные точки фактически работают как параллельно установленные пружины и демпферы. Поэтому при уменьшении расстояния между точками рекомендуется пропорционально снижать парциальную частоту. Вместе с тем следует помнить, что при увеличении количества контактных точек эффективный коэффициент диссипации между двумя телами увеличивается быстрее количества контактных точек ввиду нелинейной зависимости между коэффициентами диссипации и жесткости, см. формулы выше.

### Настройки оптимизации.

Суть **Оптимизации 3D контакта** заключается в том, что если относительное положение пары тел не изменилось или мало изменилось с момента предыдущего вызова процедуры ближнего контакта, то этот этап, затратный с точки зрения вычислительных ресур-

сов, можно пропустить. Действительно, процедура расчета ближнего контакта выполняет трехмерное отсечение по алгоритму Сайруса-Бека и расставляет контактные точки на внедренных ребрах каждого тела. Вместе с тем процедура расчета контактных сил выполняется на каждом шаге численного метода, независимо от того, был или нет выполнен расчет ближнего контакта. Таким образом, малые изменения относительно положения тел при включенной **оптимизации 3D контакта** будут корректно обработаны в процедуре расчета контактных сил.

Параметры **Перемещение** и **Поворот** имеют смысл пороговых значений, при которых выполняется пересчет ближнего контакта. **Перемещение** ограничивает изменение любого элемента вектора относительного положения пары тел, **Поворот** – изменение любого элемента относительной матрицы поворота.

Большие значения этих параметров могут приводить к артефактам при расчете контактных сил – контактные точки появляются с уже значительным внедрением, что скачками меняет главный вектор контактных сил. Малые значения параметров приводят к неоправданно большим вычислительным затратам на расчет ближнего контакта.

### Матрица инцидентности.

По умолчанию устанавливается режим контакта **Все со всеми**, при котором применяются **Общие настройки**. При необходимости для некоторых пар тел можно отключать контактное взаимодействие, а также индивидуально менять параметры этого взаимодействия. Для этого в выпадающем списке **Режим взаимодействия контактных примитивов** необходимо выбрать пункт **Ручные настройки**, после чего в диалоговом окне, представленном ниже, можно указать параметры контактного взаимодействия для любой пары тел.

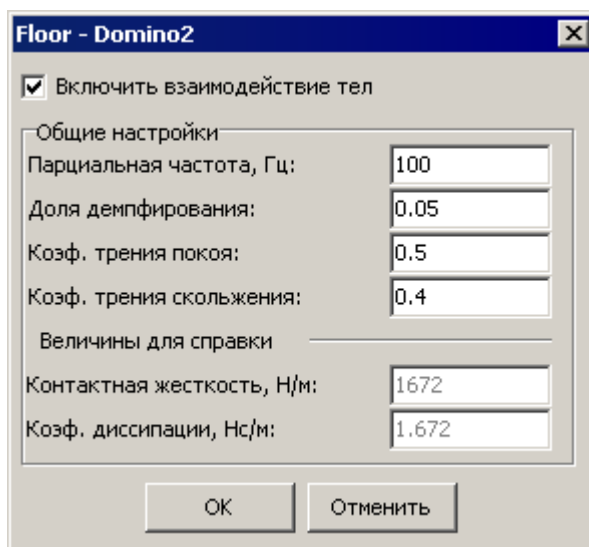


Рис.4.51. Настройки параметров контактного взаимодействия между парой тел

### Настройки.

Если в начале моделирования взаимодействующие контактные многообразия имели заметное относительное внедрение, в таком случае будет иметь место «взрыв» контактных сил, при котором большое взаимное проникновение приведет к большим контактным силам, которые скорее всего приведут систему в нерабочее состояние. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо либо четко контролировать начальное взаимное положение тел механической системы, либо отключать взаимодействие контактирующих пар тел.

Для автоматизации подобных действий предназначены следующие кнопки быстрого доступа на закладке **Матрица инцидентности**:



- выдает список пар тел, контактирующих в данный момент;





- переводит режим взаимодействия контактных примитивов в ручной режим и отключает взаимодействие у тех пар тел, которые контактируют в данный момент.

Этими возможностями следует пользоваться до запуска процесса моделирования для предотвращения ситуации, приводящей к «взрыву» контактных сил.

Еще одна возможность предотвращения «взрыва» контактных сил заключается в том, что все контактные взаимодействия в течение первых  $T$  секунд моделирования будут игнорироваться, а контакт между взаимодействующими парами тел будет отключаться, подробнее см. группу настроек **Контакт/Матрица инцидентности/Настройки**.

### Рекомендации.

Для лучшего понимания процессов, протекающих в модели при расчете 3D контакта, для определения положения точек контакта, величины и направления контактных сил и т.д. рекомендуется пользоваться следующими возможностями программы.

- Контактные силы, рассчитанные по модели 3D контакта можно визуализировать в анимационном окне программы **UM Simulation**. Для этого (1) наведите мышку на тело (убедитесь, что **Режим выбора элементов с помощью мыши** включен, ) и выберите в контекстном меню пункт **Показать силы для [Имя\_тела]**, либо (2) в **Мастере переменных** перейдите на закладку **Все силы/Множества векторов**, выберите интересующее вас тело в списке слева и необходимые опции в группах **Типы сил** и **Действуют**, см. рис. 4.52. Обратите внимание, что контактные силы относятся к **Активным** силам, поэтому для визуализации в анимационном окне необходимо включить только флажок **Активные** из группы **Типы сил**. Вместе с тем, в этом случае будут показаны все активные силы, действующие на тело, а не только контактные силы, в том числе, например, силы тяжести и т.д. Подробнее о построении векторов сил в анимационных окна см. п. 4.3.5.1 *Визуализация векторов/траекторий*, стр. 4-40.
- Выключать отображения графических образов тел с помощью пункта **«Режимы изображения тел->Видимые/Невидимые»** контекстного меню анимационного окна, см. рис. 4.53.
- Используйте кнопку *Каркас*  на панели инструментов анимационного окна для включения каркасного изображения тел, которое позволит видеть векторы контактных сил, действующих на тело, находящиеся полностью или частично внутри графического образа тела, сравните изображения фрикционного клина на рис. 4.53 снизу.

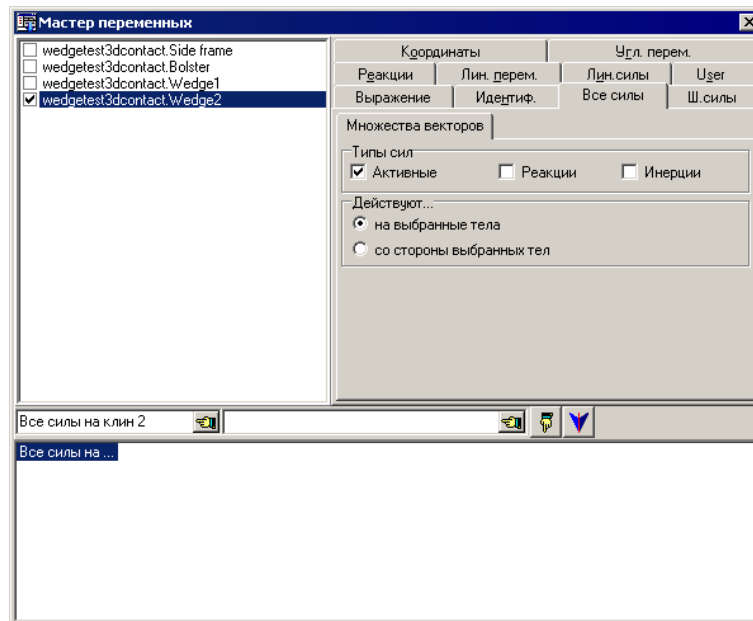


Рис.4.52. Создание множества векторов сил, действующих на тело Wedge2

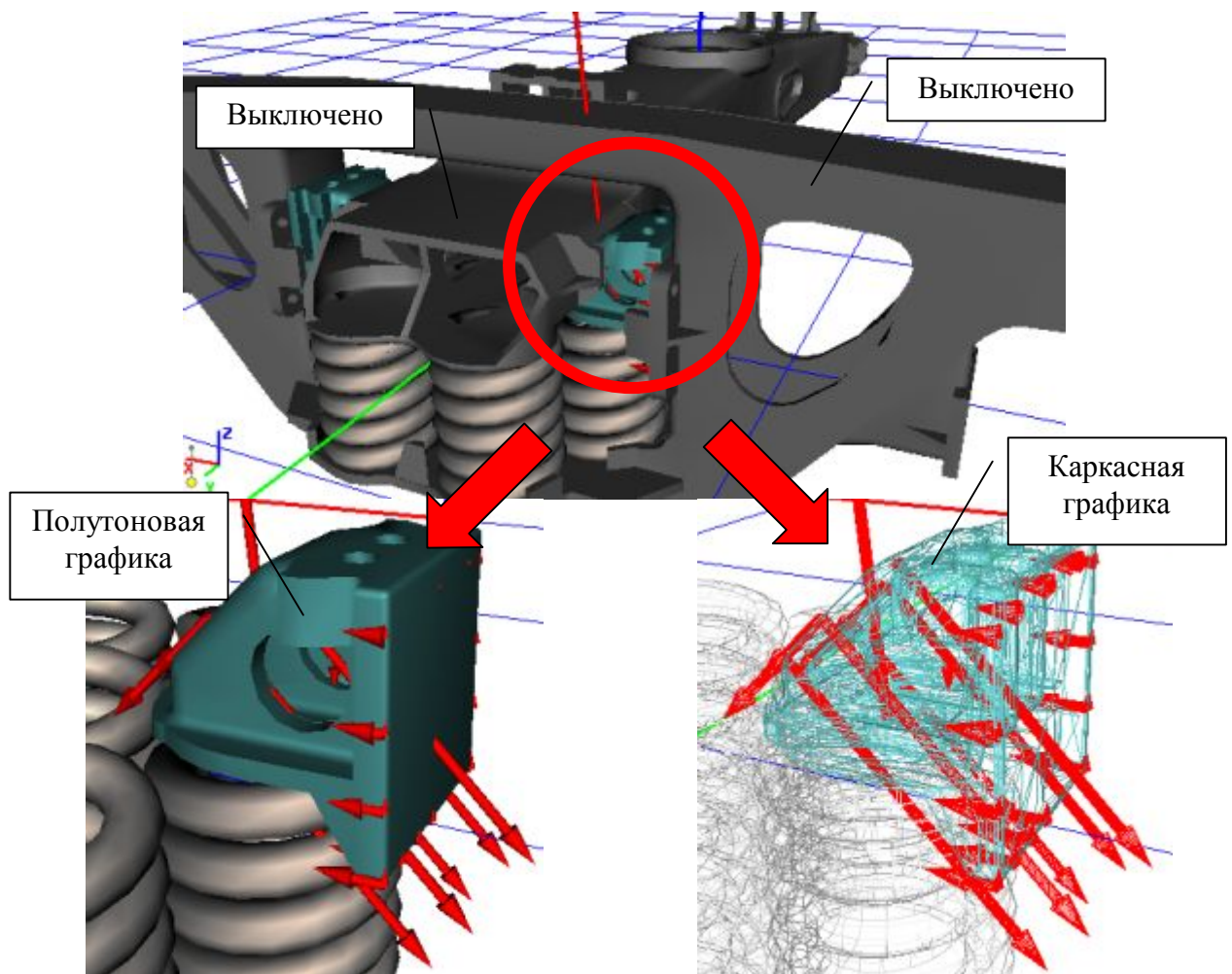


Рис.4.53. Приемы работы в анимационном окне

### 4.4.3. Интегрирование уравнений движения

Переход к процессу интегрирования уравнений движения осуществляется через кнопку **Инспектор моделирования объекта | Интегрирование** (см. рис. 4.45).

Обновление графической информации, то есть смена положения объекта в анимационном окне и добавление новых точек на графиках, а также определение значений автоматически рассчитываемых переменных и запись их в файл, происходит не после выполнения каждого шага интегрирования, а через равные интервалы времени, которые задаются в поле **Инспектор моделирования объекта | Интегратор | Шаг представления результатов**.

#### 4.4.3.1. Режим паузы в процессе интегрирования

Нажатие пробела или клавиши **Esc** в процессе интегрирования уравнений движения приведет к переходу системы в режим паузы (рис. 4.54).

В режиме паузы можно:

- изменить параметры процесса интегрирования: время, точность и все остальные параметры интегрирования, и продолжить с новыми данными (кнопка **Продолжить**),
- прервать процесс интегрирования (кнопка **Прервать**),
- записать текущие значения координат объекта и их первых производных по времени; в последующем эти переменные могут быть использованы в качестве начальных данных (кнопка **Записать**),
- обработать в файле управления сообщение с ключом PAUSE\_MESSAGE (кнопка **Сообщение**).

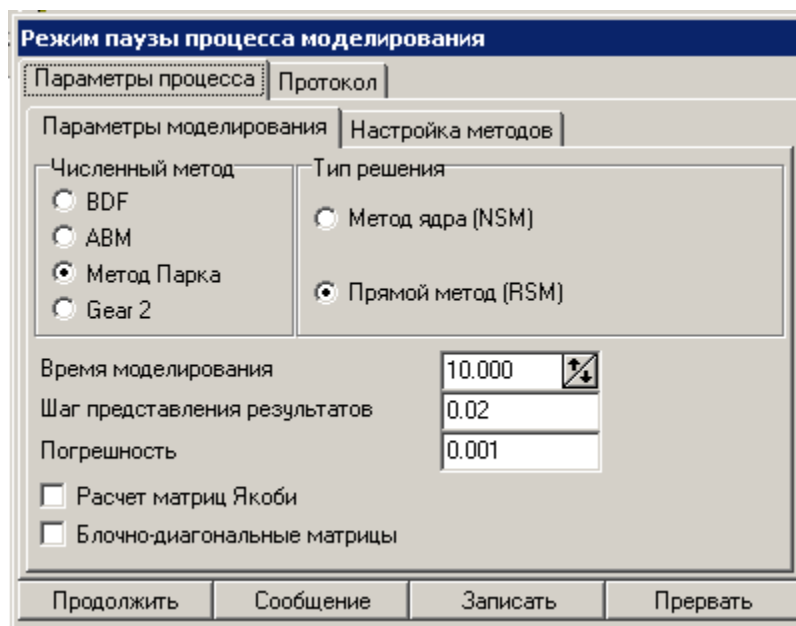



Рис.4.54. Режим паузы процесса моделирования

#### 4.4.3.2. Текущие параметры процесса интегрирования

В процессе численного интегрирования уравнений движения автоматически появляется информационная панель с текущими данными процесса (см. рис. 4.55). Кнопка  вызывает переход в режим паузы.

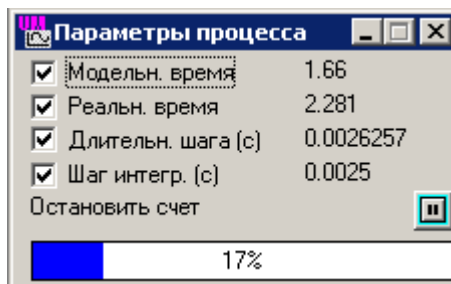


Рис.4.55. Параметры процесса интегрирования

В окне отображаются следующие данные:

- **Модельн[ое] время** – время модели с момента старта процесса.
- **Реальн[ое] время** – время ЦПУ с момента старта процесса.
- **Длительн[ость] шага (с)** - среднее время ЦПУ, затраченное на один шаг интегрирования без затрат на отображение результатов в графические и анимационные окна.
- **Шаг интегр[ования] (с)** - шаг численного метода интегрирования. Шаг интегрирования нелинейных уравнений движения является переменным, то есть подбирается автоматически с целью достижения заданной точности численного решения.

#### 4.4.3.3. Режим XVA-анализа уравнений движения

Анализ XVA-файлов во многих чертах аналогичен процессу интегрирования. Основное отличие заключается в том, что новые значения координат и их производных по времени определяются не из решения уравнений движения, а считываются из предварительно созданного файла с расширением *.xva*, что, как правило, гораздо быстрее.

Данный тип анализа используется для демонстраций заранее просчитанных движений в случае, когда процесс интегрирования идет медленно из-за дробления шага. В процессе «прокрутки» файла возможно построение графиков любых переменных, что позволяет использовать данную функцию для дополнительного анализа ранее просчитанного процесса.

Для того, чтобы создать файл XVA в процессе моделирования включите флажок **Инспектор моделирования объекта | XVA | XVA-файл для текущего интегрирования | Включить** (рис. 4.56). Там же задается имя для создаваемого XVA-файла.

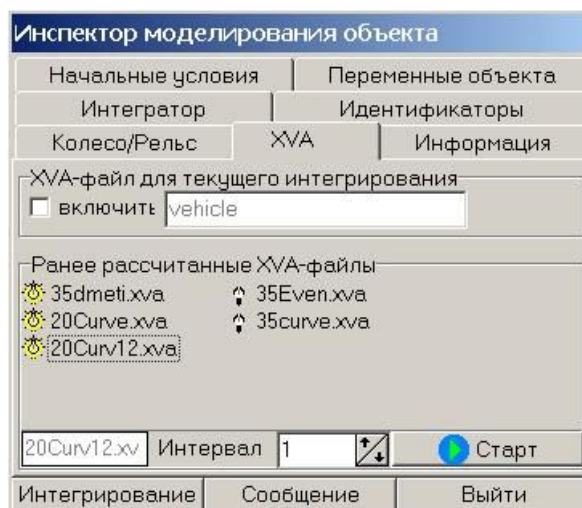




Рис.4.56. XVA анализ

На закладке **Инспектор моделирования объекта | XVA** находится список ранее рассчитанных XVA-файлов.

Обратите внимание, что анализ проводится на базе текущей структуры объекта, характеризуемой файлом исходных данных *input.dat*. Это означает, что если структура объекта изменена, например, добавлены новые степени свободы или внесены существенные изменения в файл управления, то использовать ранее созданный XVA-файл не рекомендуется. Это автоматически проверяется программой, и XVA-файлы, созданные после последней модификации файла *input.dat*, изображаются в списке со значком , а созданные до - со значком .

Для запуска ранее рассчитанного XVA-файла выделите его в **Списке рассчитанных XVA-файлов** и нажмите кнопку **Старт**, или просто дважды щелкните мышкой по нужному файлу. Изменение значение параметра **Интервал** позволяет пропускать кадры и тем самым ускорять процесс.

Используйте контекстное меню для выполнения ряда служебных команд со списками XVA-файлов.

## 4.5. Линейный анализ

Линейный анализ направлен на решение задач численного определения положения равновесия объекта, линеаризации уравнений в окрестности найденного положения равновесия и анализа полученных линейных дифференциально-алгебраических уравнений (Гл.2, п. *Линеаризация уравнений движения и линейный анализ*).

Для перехода в режим линейного анализа используйте команду меню **Анализ | Линейный анализ**. Инструменты расчета равновесия и проведения анализа линеаризованных уравнений расположены на закладках окна **Линейный анализ**.

При выполнении линейного анализа отключаются силы, линеаризация которых невозможна. В основном это касается сил трения.

**Замечание.** Функции линейного анализа не поддерживаются для гусеничных машин.

### 4.5.1. Исследование равновесия в зависимости от параметров

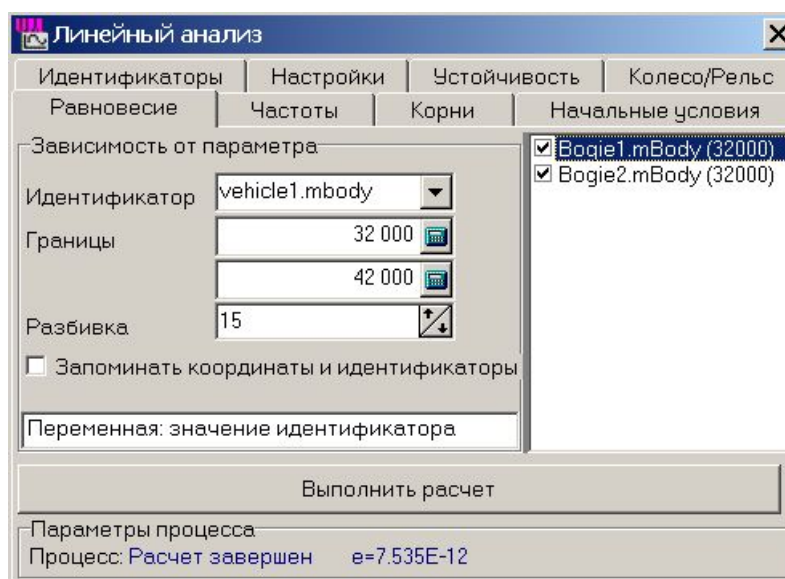


Рис.4.57. Подготовка процесса расчета равновесия в зависимости от параметра

Для расчета равновесия используется одноименная закладка окна (рис.4.57). Предусмотрено два режима расчета равновесия.

- **Режим однократного расчета равновесия при заданных значениях идентификаторов.**  
С использованием закладки Идентификаторы установите нужные значения идентификаторов и щелкните на кнопке Выполнить расчет. Используйте ключ Запоминать координаты и идентификаторы для того, чтобы рассчитанные координаты стали текущими начальными условиями. При однократном расчете векторы активных сил и сил реакций могут быть указаны в анимационном окне, если поместить в окно соответствующие переменные (п. *Визуализация векторов/траекторий*)
- **Режим расчета зависимости положения равновесия от идентификатора.**  
В данном режиме определяется положение равновесия в зависимости от одного из идентификаторов. В процессе расчета могут быть получены зависимости от идентификатора значения в положении равновесия координат, сил реакций, активных сил.

Для задания параметров расчета:

- выберите идентификатор с использованием выпадающего списка; если в подсистемах объекта найдены одноименные идентификаторы, укажите, какие из них будут изменяться одновременно с выбранным идентификатором (на рис.4.57 найдено 2 идентификатора, одноименные с выбранным идентификатором mass);
- назначьте границы изменения идентификатора (начальное значение – в верхнем поле, конечное – в нижнем) и число расчетов с равным шагом (параметр Разбивка);
- используйте ключ Запоминать координаты и идентификаторы, если следует сделать текущими рассчитанные координаты и значение идентификатора в последнем расчете;
- если необходимо построить зависимости от данного параметра некоторых переменных в положении равновесия, поместите нужные переменные в одно или несколько графических окон, затем перетащите мышкой из поля “Переменная: значение идентификатора” в эти окна стандартную переменную, значение которой будет равно значению идентификатора в процессе расчета;
- если требуется получить анимацию значения в положении равновесия в зависимости от параметра векторной величины или траектории некоторой точки, поместите данные величины в открытое анимационное окно;
- для создания анимационного файла при изменении параметра используйте стандартную функцию анимационного окна (п. *Сохранение анимации в файл*);
- после завершения процесса подготовки, запустите расчет с помощью кнопки Выполнить расчет.

Если программа не находит положение равновесия или находит не то положение, которое необходимо исследовать, используйте закладку Начальные условия для того чтобы задать значения координатам, близкие к нужному положению. Иногда для расчета положения равновесия системы с диссипацией помогает предварительное интегрирование уравнений движения, при котором движение стремится к положению равновесия.

См. также п. *Настройки*.

#### 4.5.2. Собственные частоты и собственные значения

Для расчета собственных частот и собственных значений используется закладка **Частоты**.

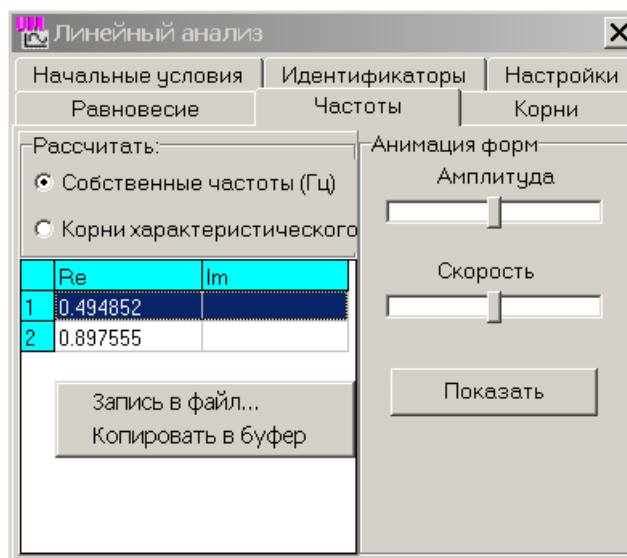


Рис.4.58. Собственные частоты

Расчет возможен только в случае, если программа нашла положение равновесия. Рекомендуется предварительно выполнить однократный расчет равновесия (п. *Исследование равновесия в зависимости от параметров*). После успешного расчета равновесия программа линеаризует уравнения, учитывая или не учитывая диссипативные и другие неконсервативные силы, в зависимости от типа расчета: частоты или собственные значения.

### Расчет собственных частот

- При расчете частот отключаются все силы, зависящие от скорости.
- Появление мнимой частоты свидетельствует о неустойчивости положения равновесия.
- Используйте всплывающее меню для записи частот в файл или в буфер обмена.
- Для анимации собственных форм колебаний выделите нужную частоту и щелкните на кнопке **Показать**.
- Для создания файла анимации собственных форм колебаний используйте стандартную функцию анимационного окна (п. *Сохранение анимации в файл*);
- Используйте движки **Амплитуда** и **Скорость** для изменения амплитуды колебаний и скорости анимации.

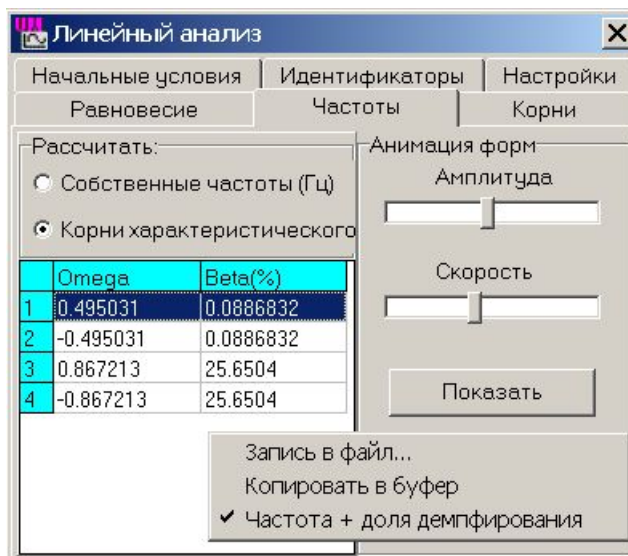


Рис.4.59. Значения в форме частота/доля демпфирования от критического

### Расчет собственных значений

Для расчета собственных значений линеаризованных уравнений используется параметр **Корни** группы **Рассчитать** (рис.4.59). Собственные значения, представленные в форме действительная/мнимая части (**Re/Im**) сортируются по убыванию действительной части. Для отображения собственных значений в форме **Частота (Гц)/Доля демпфирования** в % от критической используйте соответствующую команду всплывающего меню.

Для анимации собственных векторов и записи соответствующего движения в анимационный файл используются те же подходы, что и для собственных форм колебаний.

### 4.5.3. Построение корневых годографов и зависимостей частот от параметров

Для расчета корневых годографов (зависимость собственных значений и собственных частот от параметра) используется закладка **Годограф**. Корневые годографы для собственных значений рисуются на комплексной плоскости.

Для выполнения расчета следует

- указать идентификатор, область его изменения и число расчетов (см.п. Исследование равновесия в зависимости от параметров),
- для собственных значений дополнительно указать список частот для расчета (не более 15 частот),
- используйте ключ **Запоминать координаты и идентификаторы**, если следует сделать текущими рассчитанные координаты и значение идентификатора в последнем расчете,
- окно для построения зависимостей открывается автоматически,
- используйте группу **Отображение** для отрисовки очередного расчета в том же окне, что и предыдущий с удалением или с сохранением предыдущих результатов, или в новом графическом окне,
- используйте анимацию корневого годографа после его построения для отображения значений корней для отдельных значений идентификатора.

Примеры задания списка частот для расчета:

1-12

1..12,15

1,2,3,7,9,11-14

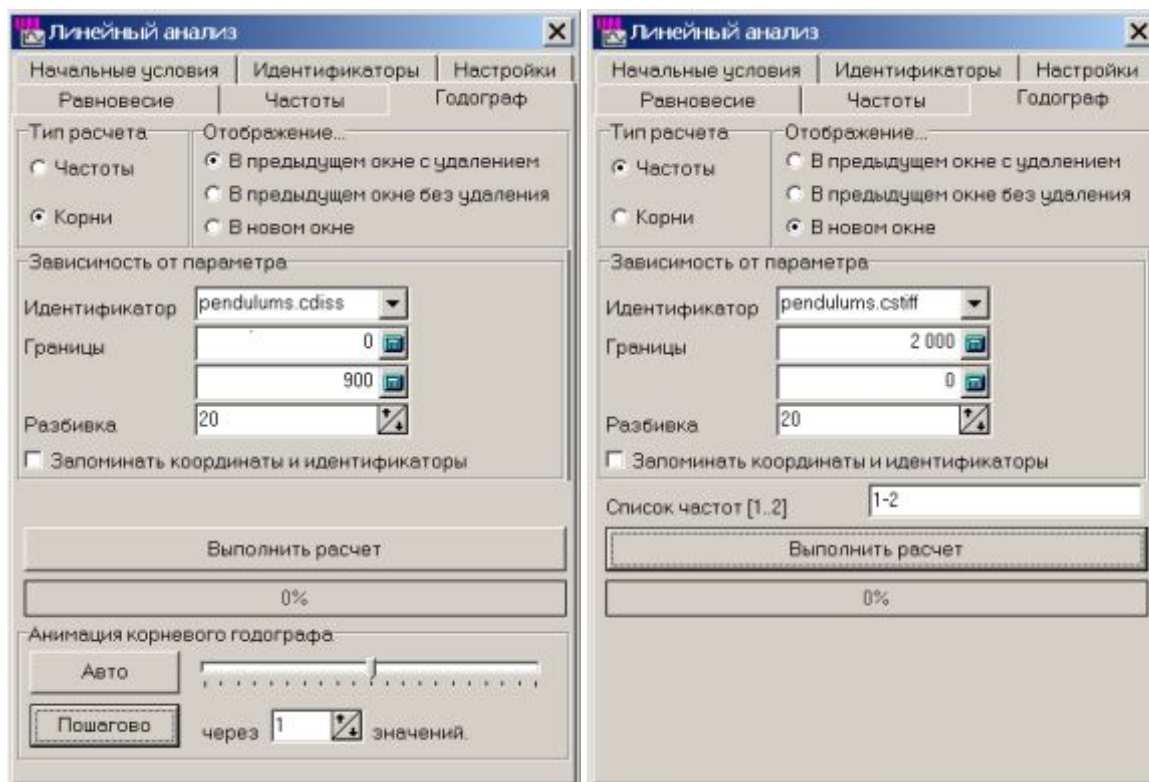


Рис.4.60. Расчет собственных значений и частот в зависимости от параметра

#### 4.5.4. Настройки

Используйте закладку **Настройки** | **Параметры** для того, чтобы скорректировать параметры процесса расчета положения равновесия, если программа не находит положение равновесия. Параметры **Коэффициент релаксации ( $R$ )**, **Точность ( $\epsilon$ )**, **Шаг приращения координаты ( $\delta$ )** введены в Гл.2, п. *Уравнения равновесия и их решение*.

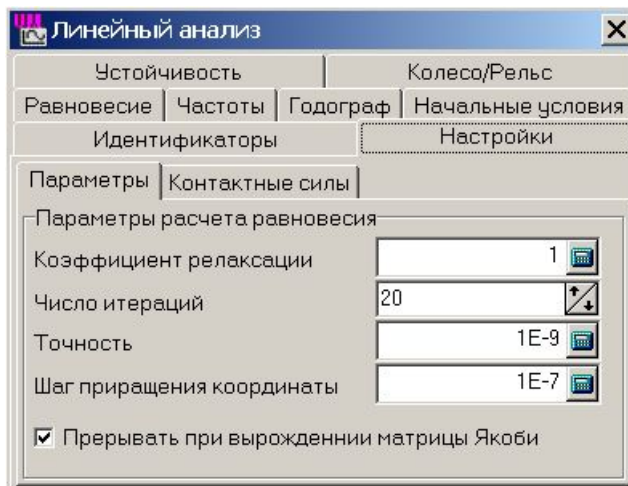


Рис.4.61. Параметры процесса расчета положения равновесия

Выключение ключа **Прерывать при вырождении матрицы Якоби** может помочь при расчете безразличного положения равновесия.

#### 4.5.5. Равновесие при наличии контактных сил

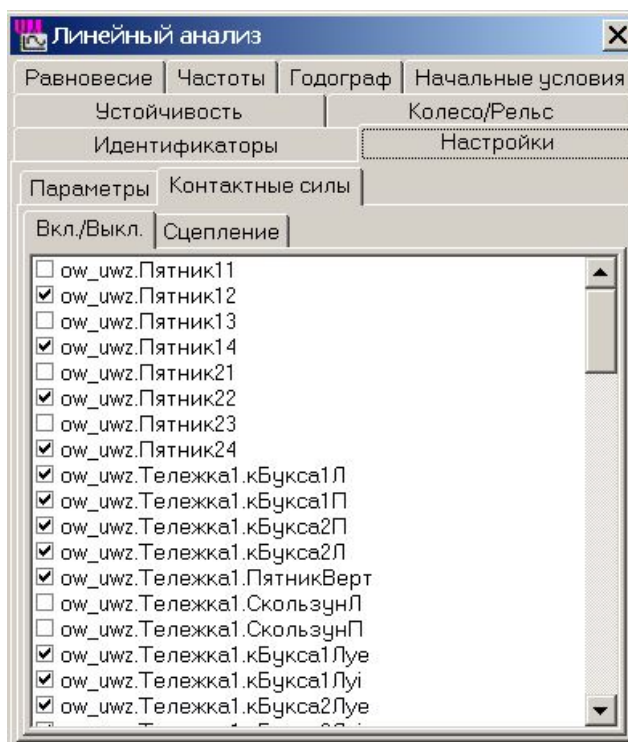


Рис. 4.62. Включение/выключение контактных сил типа точки-плоскость и точки - Z-поверхность

Для каждого из контактных силовых элементов типа точки – плоскость и точки – Z-поверхность (см. Гл.2, п. *Контактные силы*) при линейном анализе предусмотрены три режима:

- Полное отключение взаимодействия. Для этого достаточно выключить силу на закладке **Настройки | Контактные силы | Вкл./Выкл.**
- Включение в режиме *двухстороннего контакта* без сцепления (действует только нормальная сила, стремящаяся вывести точку на контактную плоскость). В данном режиме сила должна быть включена на закладке **Вкл./Выкл.**, но выключена на закладке **Сцепление**; сила трения не учитывается.
- Включение в режиме *двухстороннего контакта* со сцеплением. В данном режиме сила должна быть включена на обеих закладках **Вкл./Выкл.**, **Сцепление**. Данный режим совпадает с предыдущим за одним исключением: при расчете собственных значений (но не частот) после расчета положения равновесия при тех же условиях (т.е. без учета трения) линеаризованные уравнения формируются в предположении, что контакт находится в состоянии сцепления. При этом в касательной плоскости контакта вводится жесткость, равная жесткости в нормальном направлении.

Если с использованием всплывающего меню сохранить список выключенных сил в файл с именем задачи и расширением \*.chs, то список будет автоматически подгружаться при расчете равновесия.

## 4.6. Список литературы

1. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: Учеб. пособие.- Брянск: БГТУ, 1997.-156 с.