



# Моделирование динамики железнодорожных экипажей

---

Начинаем работать

2010

Это руководство поможет вам изучить особенности использования программного комплекса «Универсальный механизм» для моделирования динамики железнодорожных экипажей.

## Начинаем работать в программном комплексе «Универсальный механизм»: моделирование железнодорожных экипажей

Это руководство поможет вам изучить особенности использования программного комплекса «Универсальный механизм» для моделирования динамики железнодорожных экипажей. Предполагается, что вы уже изучили раздел, посвященный введению в моделирование в ПК УМ, который находится в файле **gs\_UM.pdf**<sup>1</sup>, и умеете выполнять в УМ простые действия: создать новую модель, добавлять тела и шарниры, синтезировать уравнения движения (**UM Input**) и работать в программе моделирования движения (**UM Simulation**).

В настоящем руководстве мы рассмотрим два примера: моделирование динамики отдельной колесной пары и простого двухосного экипажа - автомотрисы АС4. В последнем параграфе рассмотрен пример составления, выполнения и анализа проекта сканирования, цель которого – определение критической скорости движения автомотрисы АС4.

---

<sup>1</sup> [http://www.umlab.ru/download/60/rus/gs\\_um.pdf](http://www.umlab.ru/download/60/rus/gs_um.pdf)

<b>НАЧИНАЕМ РАБОТАТЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ .....</b>	<b>2</b>
<b>1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ .....</b>	<b>4</b>
1.1. Создание модели колесной пары.....	4
1.2. Моделирование динамики отдельной колесной пары .....	6
1.2.1. Подготовка среды моделирования динамики рельсового экипажа .....	6
1.2.2. Движение по идеально ровному пути.....	9
<b>2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ АВТОМОТРИСЫ АС4 .....</b>	<b>13</b>
2.1. Основные элементы модели .....	13
2.2. Создание нового объекта – рельсового экипажа .....	15
2.3. Добавление колесных пар .....	16
2.4. Графические образы .....	21
2.4.1. Создание графического образа пружины .....	22
2.4.2. Добавление заранее подготовленных ГО .....	23
2.4.3. Графически образы правых букс .....	23
2.5. Добавление букс к модели автомотрисы.....	25
2.6. Добавление кузова к модели автомотрисы.....	27
2.7. Добавление силовых элементов .....	30
2.7.1. Пружины .....	30
2.7.2. Наклонные гасители .....	34
2.7.3. Продольные тяговые поводки .....	35
2.7.4. Горизонтальные гасители.....	37
<b>3. ПРИМЕР СОЗДАНИЯ И АНАЛИЗА ПРОЕКТА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ МОДЕЛИ АВТОМОТРИСЫ АС4 .....</b>	<b>38</b>
3.1. Описание проекта сканирования.....	39
3.1.1. Постановка задачи .....	39
3.1.2. Создание нового проекта.....	42
3.1.3. Добавление новой модели к проекту сканирования .....	43
3.1.4. Описание иерархии параметров.....	44
3.1.5. Настройка железнодорожных параметров .....	46
3.1.6. Настройка условий завершения .....	48
3.1.7. Создание списка сохраняемых переменных.....	49
3.2. Выполнение проекта сканирования .....	50
3.3. Анализ результатов сканирования.....	52
3.3.1. Анализ результатов отдельных экспериментов.....	52
3.3.2. Анализ сводных данных.....	55

# 1. Моделирование движения отдельной колесной пары

## 1.1. Создание модели колесной пары

### Создайте новый объект

1. Выберите пункт меню **Файл/Новый объект**.

### Установите параметры объекта

2. Перейдите на ветку **Объект** в списке элементов модели.
3. В окне инспектора в поле **Тип объекта** установите **Рельсовый экипаж**.
4. Установите **Численно-итерационный** тип синтеза уравнений движения

**Замечание.** При выборе типа объекта – рельсовый экипаж к списку параметров модели автоматически добавится параметр **v0** – скорость продольного движения экипажа (в нашем случае скорость продольного движения колесной пары).

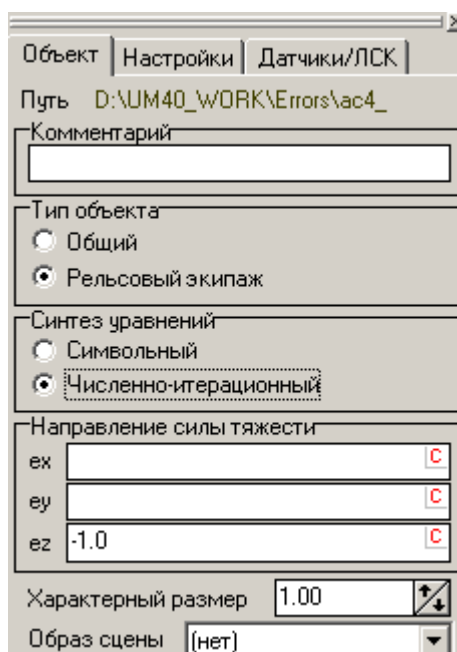



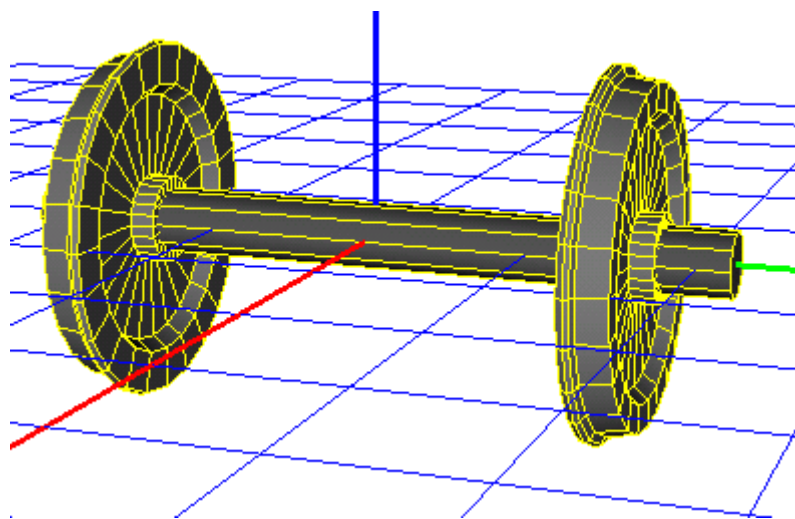
Рис. 1. Настройки объекта

### Добавьте колесную пару

Колесная пара – одна из стандартных подсистем **УМ**. Для добавления новой колесной пары выполните следующие действия.

5. Перейдите на ветку **Подсистемы** в списке элементов модели.
6. Добавьте новую подсистему кнопкой .
7. Выберите тип подсистемы – **колесная пара**.

В анимационном окне появится изображение колесной пары.



8. Переименуйте колесную пару. В поле **Имя** введите **КП1**.
9. Сохраните объект под именем **WSet**. Используйте пункт меню **Файл/Сохранить как**.
10. Выполните синтез и компиляцию уравнений движения. Выберите пункт меню **Объект/Синтезировать уравнения**, в появившемся окне установите флажок **Компилировать уравнения** и нажмите кнопку **Синтезировать**.  
Модель готова к загрузке в программу моделирования движения.
11. Перейдите к программе моделирования. Выберите пункт меню **Объект/Моделирование**.

## 1.2. Моделирование динамики отдельной колесной пары

### 1.2.1. Подготовка среды моделирования динамики рельсового экипажа

Для моделирования динамики рельсового экипажа необходимо установить следующие данные:



- профили колес и рельсов;
- файлы вертикальных и поперечных неровностей рельсов.

По умолчанию назначаются следующие профили:

- новый локомотивный профиль, файл *newlocow.wpf*;
- новый профиль рельса Р65, файл *r65new.rpf*.

#### Задание профилей колес и рельсов

Колесная пара – одна из стандартных подсистем **УМ**. Для добавления новой колесной пары выполните следующие действия.

1. Откройте окно инспектора моделирования объекта. Для этого выберите пункт меню **Анализ/Моделирование**.
2. Перейдите на закладку **Колесо/Рельс**.
3. Перейдите на закладку **Профили/Колеса**.
4. Нажмите кнопку  (добавить профиль к списку) и в появившемся диалоге выбора файла выберите нужный файл **\*.wpf**, например, **newwagnw.wpf**.
5. В таблице в нижней части окна, вызовите контекстное меню и выберите пункты меню **Назначить всем/newwagnw.wpf**, см. рис. 2.
6. Перейдите на закладку **Рельсы**.
7. В полях **Левый рельс** и **Правый рельс** выберите файлы нужный файл **\*.rpf**, например, **r50.rpf**, см. рис. 2.
8. Нажмите кнопку . Появится новое графическое окно с изображением выбранных профилей колес и рельсов, см. рис. 3.
9. Закройте окно с изображением выбранных профилей.

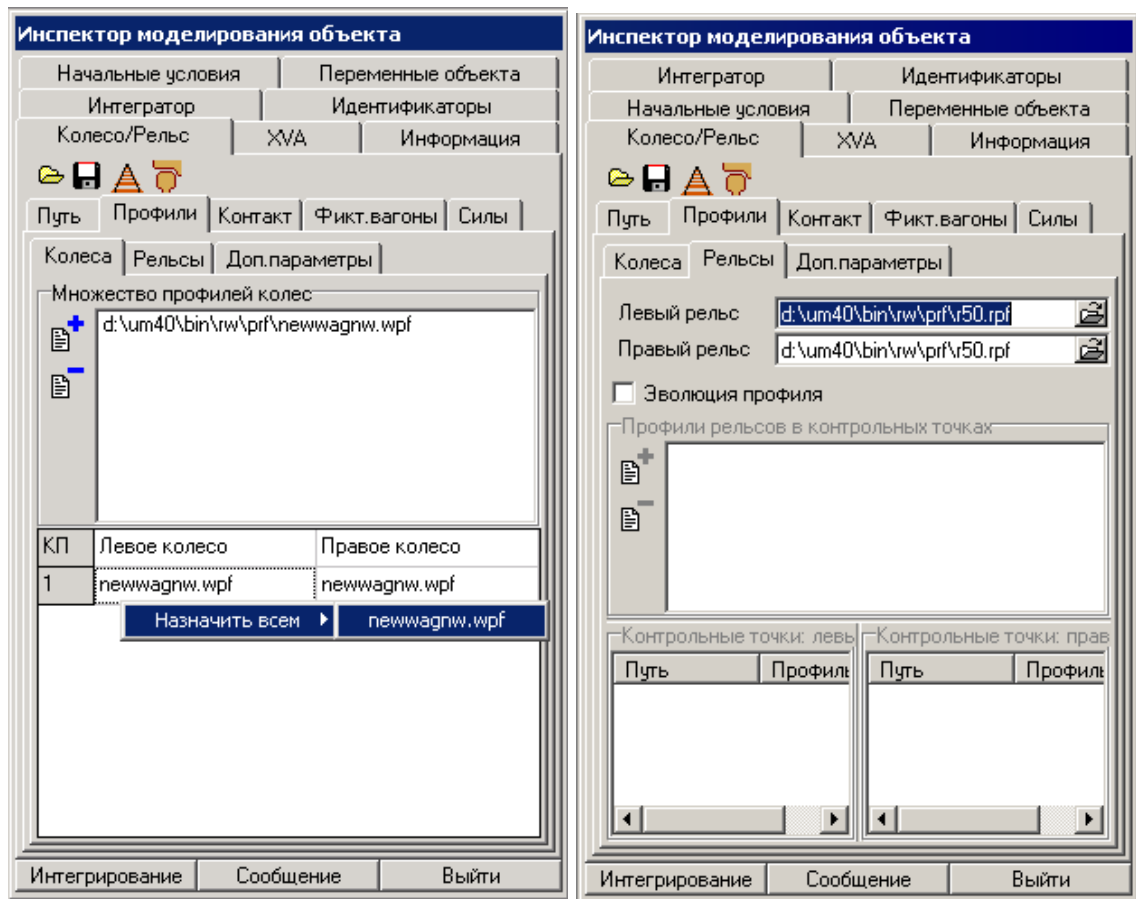


Рис. 2. Настройка профилей колес и рельсов

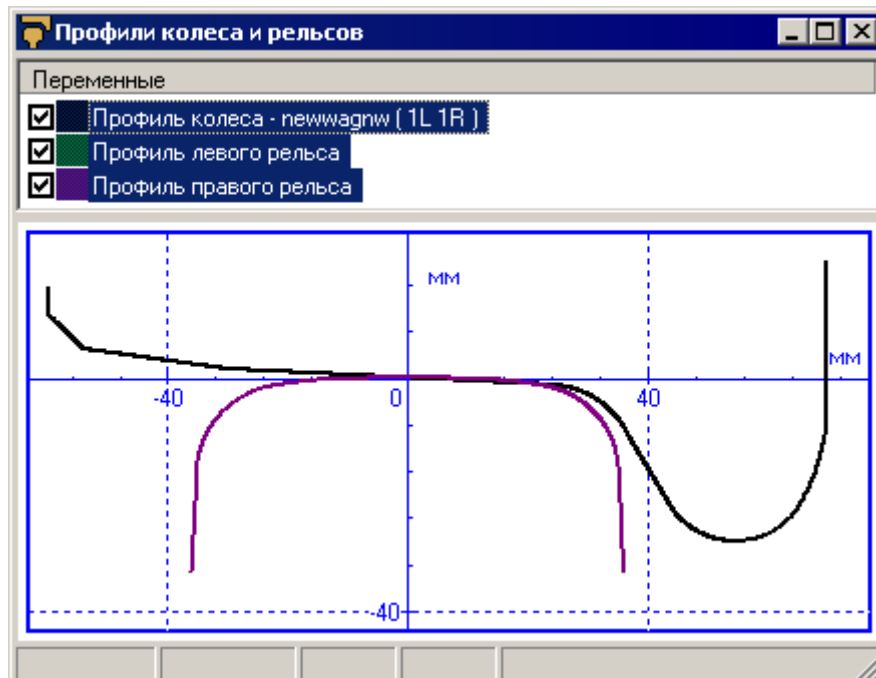


Рис. 3. Выбранные профили колес и рельсов

### Выбор файлов неровностей путевой структуры

1. Перейдите в окно **Инспектора моделирования объекта**, кнопка *F11*.
2. Перейдите на закладку **Колесо/Рельс / Путь / Неровности**.
3. В поле **Тип пути** выберите **Неровный**.
4. Откройте файлы неровностей в соответствии с таблицей ниже.

<b>Поле</b>	<b>Файл</b>
Левый рельс (Z)	aprg11.way
Правый рельс (Z)	aprg11.way
Левый рельс (Y)	kolomvn.way
Правый рельс (Y)	kolomvn.way

## 1.2.2. Движение по идеально ровному пути

### Установим движение в идеально ровной прямой

1. Перейдите в окно **инспектора моделирования объекта**, кнопка *F11*.
2. Перейдите на закладку **Колесо/Рельс / Путь / Неровности**.
3. В поле **Тип пути** выберите **Ровный**.
4. Перейдите на закладку **Макрогеометрия**.
5. В поле **Тип пути** выберите **Прямая**.

### Окно анимации контакта

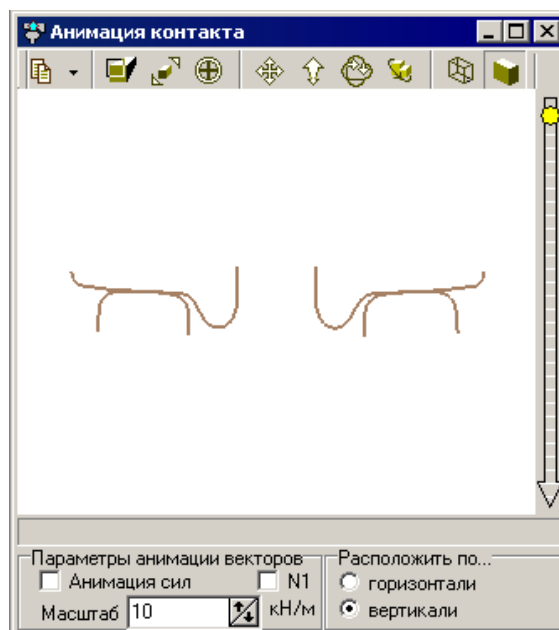
Откроем новое окно для анимации контакта колес и рельсов. В новом окне включим отображение сил в контакте.

1. Для открытия окна анимации контакта выберите пункт меню **Инструменты/Анимация контакта**. Откроется новое окно анимации контакта.
2. Включите флажки **Анимация сил** и **N1**.

Для того, чтобы контактные силы рисовались в окне достаточно крупно, нужно уменьшить масштаб изображения векторов.

3. В поле **Масштаб** установите значение **10** (кН/м).

**Замечание.** До запуска первого расчета динамики силы в окне отображаться не будут.



## Стационарное движение

До запуска моделирования необходимо скорректировать настройки численного метода интегрирования уравнений движения.

1. Перейдите в окно **инспектора моделирования объекта**, кнопка *F11*.
2. Перейдите на закладку **Интегратор**.
3. Поле **Численный метод** установите в значение **Метод Парка**.
4. В поле **Погрешность** установите **4E-8**.
5. Нажмите кнопку **Интегрирование**.

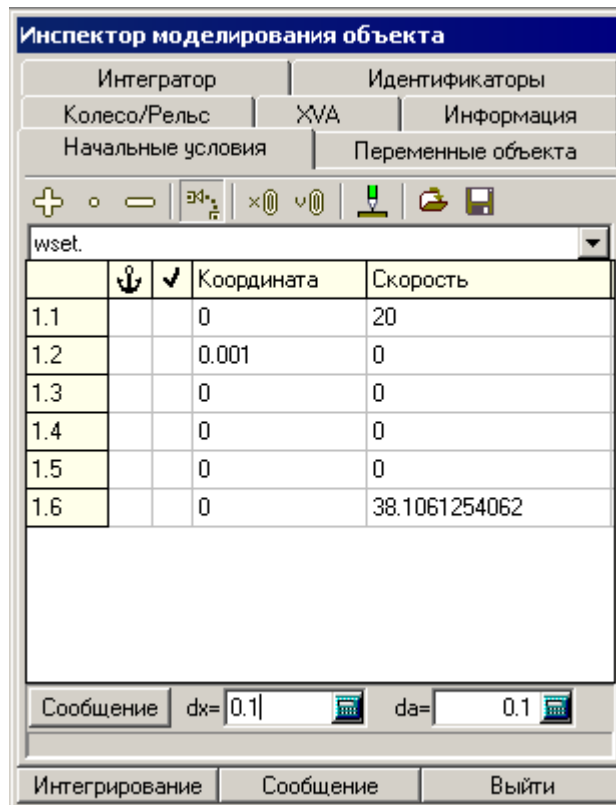
При нулевых начальных значениях координат реализуется стационарный режим движения, при котором колесная пара не смещается в поперечном направлении и не поворачивается вокруг вертикальной оси. Контактные силы между колесом и рельсом принимают постоянное значение.

6. По окончании моделирования появится **Инспектор режима паузы**. В этом окне нажмите **Прервать**.

## Возмущенное движение

Сместим колесную пару от положения равновесия на 1 мм и проанализируем ее движение.


1. Перейдите в окно инспектора моделирования объекта, кнопка *F11*.
2. Перейдите на закладку **Начальные условия**.
3. Установите начальное значение второй координаты равное **0.001**. После окончания ввода числа нажмите **Enter**.



4. Запустите моделирование движения. Убедитесь, что колесная пара неустойчива – малое возмущение начальных условий приводит к колебаниями значительной амплитуды.

Выполним этот расчет еще раз, построив графики поперечного смещения и угла поворота вокруг вертикальной оси в зависимости от времени.

5. Откройте новое **графическое окно**.
6. Откройте **мастер переменных**.
7. В **мастере переменных** выберите закладку **Координаты**.

8. Выберите координату **КП1/jWSet/1.2**. Эта координата – суть поперечное смещение колесной пары.
9. Отошлите переменную в контейнер с помощью кнопки .
10. Повторите эти действия для координаты **КП1/jWSet/1.5** (угол поворота вокруг вертикальной оси).
11. Перетащите созданные переменные в графическое окно.
12. Запустите моделирование движения.

В графическом окне построятся графики поперечной координаты колесной пары и угла поворота колесной пары относительно вертикальной оси.

**Замечание.** Если у вас открыто много окон, и вы путаетесь при переходе между ними, в таком случае пользуйтесь **Списком окон** для перехода к нужному окну. Список окон – выпадающий список в верхнем меню быстрого доступа.

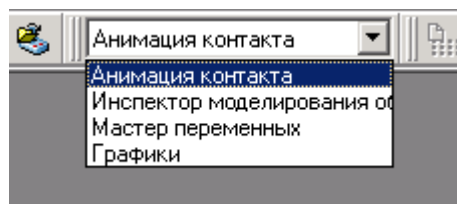


Рис. 4. Список окон

Изменим начальную скорость движения экипажа и время интегрирования.

13. Перейдите в **Инспектор моделирования объекта** на закладку **Идентификаторы**.
14. В поле **Выражение** для скорости **v0** введите **10** (м/с).
15. Перейдите на закладку **Интегратор** и в поле **Время моделирования** установите **20** с.
16. Запустите моделирование движения.

Движение колесной пары также будет неустойчиво, но с уменьшением скорости увеличился период колебаний колесной пары.

## 2. Создание модели автомотрисы АС4

Рассмотрим процесс создания упрощенной модели автомотрисы АС4. Основное упрощение состоит в отсутствии в модели тяговых двигателей. Готовую модель вы можете найти в каталоге `{um_root}\samples\rail vehicles\ac4`.

### 2.1. Основные элементы модели

Модель включает следующие элементы:

1. две подсистемы «колесная пара»;
2. четыре графических объекта (кузов, гаситель, пружина, поводок);
3. пять тел (кузов и четыре буксы);
4. шарнир, вводящий координаты кузова и четыре вращательных шарниров для описания кинематических пар букса/колесная пара;
5. двенадцать биполярных силовых элементов (4 наклонных, 4 поперечных гасителя, 4 тяговых поводка);
6. восемь специальных силовых элемента типа **Пружина** для моделирования пружин подвески.

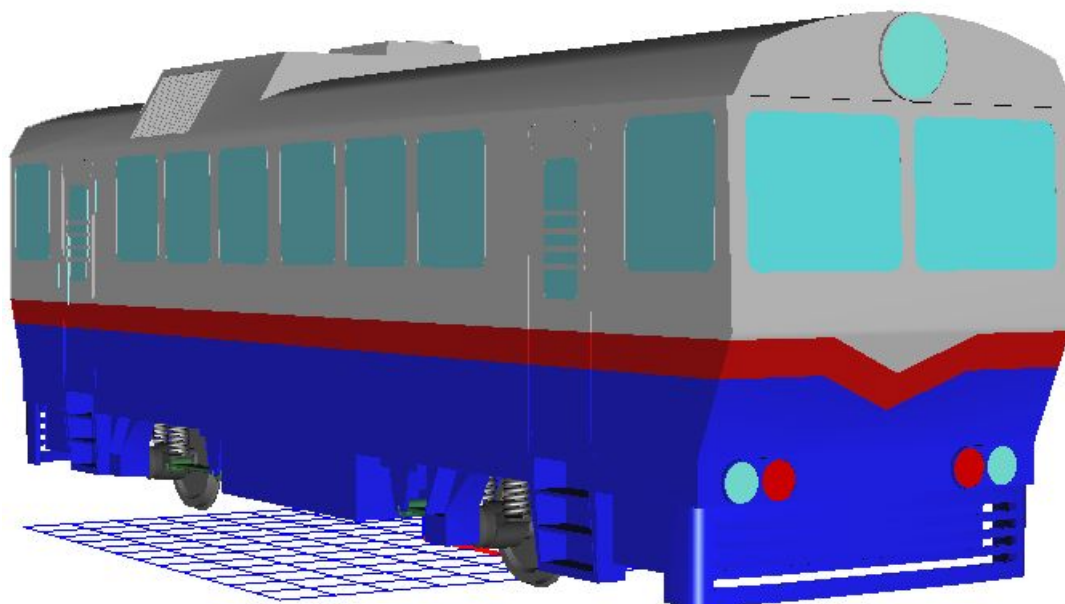


Рис. 2.1. Общий вид готовой модели автомотрисы

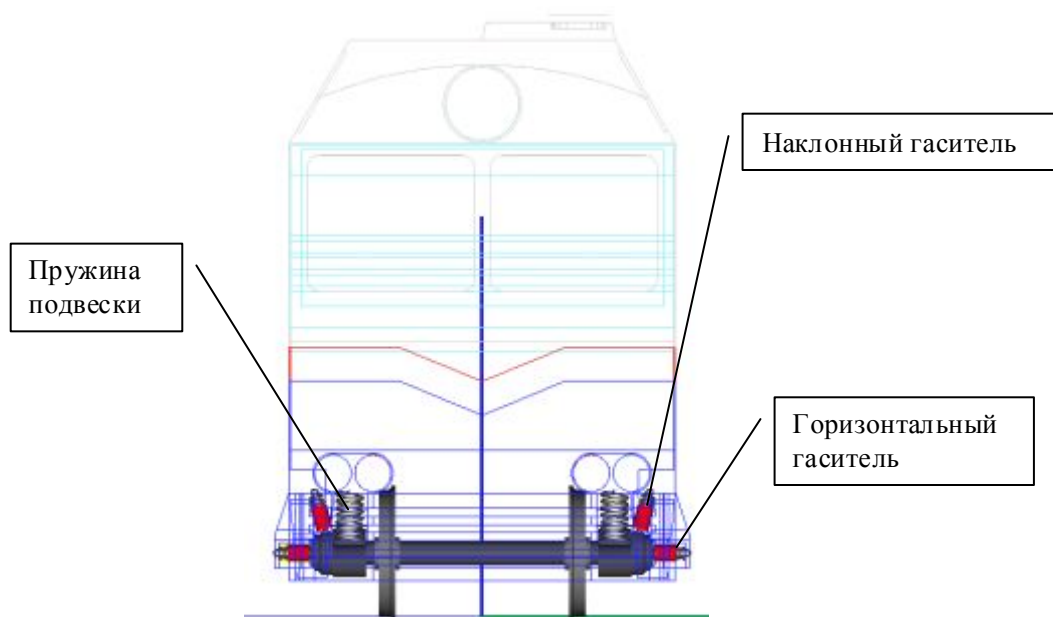


Рис. 2.2. Основные элементы модели

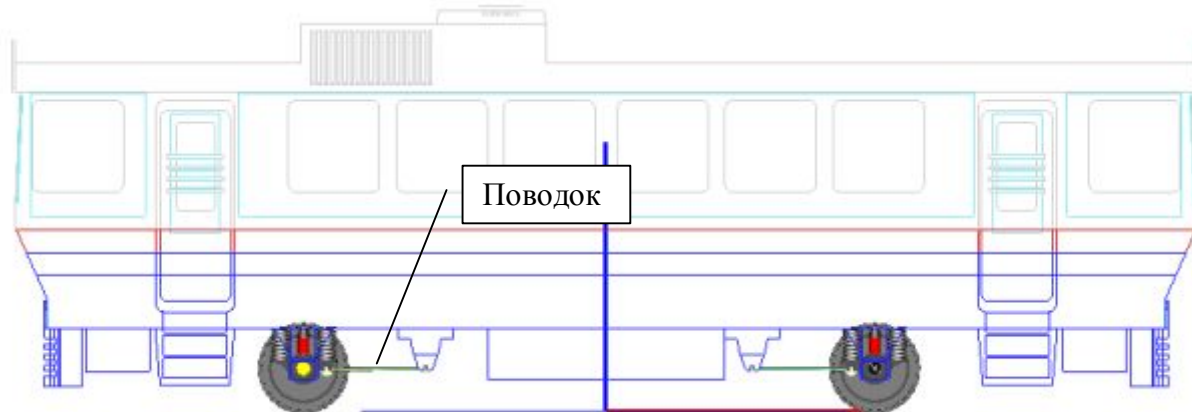



Рис. 2.3. Основные элементы модели

## 2.2. Создание нового объекта – рельсового экипажа

1. Запустите программу **UM Input**.
2. Создайте новый объект, щелкнув на кнопке  панели инструментов или используя команду меню **Файл / Новый объект** или сочетание клавиш **Ctrl+N**.
3. Сохраните (пока пустой объект). Пункт меню **Файл / Сохранить как...**

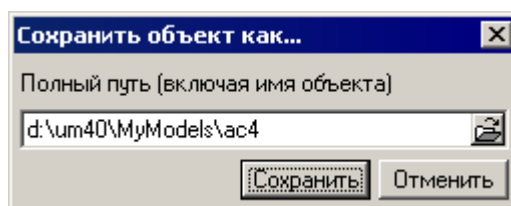




Рис. 2.4. Пример задания нового имени объекту

Выберите нужный каталог или напишите полный путь, включая имя объекта АС4 (используйте только латинские буквы и цифры в имени объекта, но можете использовать русские буквы в пути к объекту). При необходимости программа создаст все каталоги на указанном пути, включая каталог АС4, в котором будет размещаться все генерируемые программой файлы.

В процессе сборки объекта переключайте режимы анимационного окна с использованием кнопки  на панели в верхней части анимационного окна, чтобы видеть в одном случае отдельный элемент, который в данный момент описывается (например, пружина вместе с кузовом и колесной парой, которые она соединяет), или полный объект – в другом режиме.

## 2.3. Добавление колесных пар

Общая информация о стандартной подсистеме, соответствующей колесной паре, содержится в Главе 8, п. *Колесная пара*.

1. Выделите **Подсистемы** в списке элементов, добавьте подсистему, щелкнув на кнопке , переименуйте подсистему в **WheelSet1**, выберите тип подсистемы – **Колесная пара** (рис.2.5, справа). Колесная пара появится в анимационном окне, а инспектор данных отобразит ее текущие инерционные и геометрические параметры.

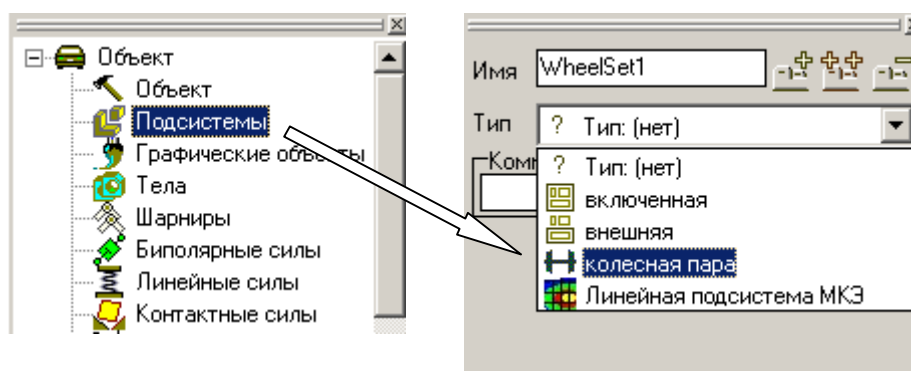


Рис. 2.5. Добавление стандартной подсистемы – "Колесная пара"

Некоторые параметры колесной пары могут быть скорректированы прямо здесь (рис. 2.6):

При необходимости здесь вы можете изменить также базу колесной пары и радиус круга катания (рис. 2.6, слева).

2. Задайте положение колесной пары относительно экипажа. Перейдите на закладку **Положение**, в поле **Сдвиг/х** введите **11** (рис. 2.6, справа). Таким образом, идентификатор **11** задает сдвиг колесной пары в продольном направлении. Нажмете клавишу **Enter** и введите численное значение идентификатора **11=3.29 м**, и идентификатор появится в списке идентификаторов сразу после стандартного идентификатора **v0** (скорость экипажа). Вы можете в любой момент модифицировать значения идентификаторов в списке.
3. На этом этапе пользователь может выбрать положение начала отсчета инерциальной системы координат (СК0): на уровне головки рельса (рекомендуется) или на уровне осей колесных пар (устаревшее). В первом случае подсистему следует сдвинуть вверх на величину радиуса круга

катания (0.525 м в нашем случае), указав соответствующее значение проекции Z вектора сдвига на закладке **Положение**, рис. 2.6, справа внизу. Во втором случае следует оставить нулевое значение сдвига. В данном примере мы используем положение СК0 на уровне головки рельса.

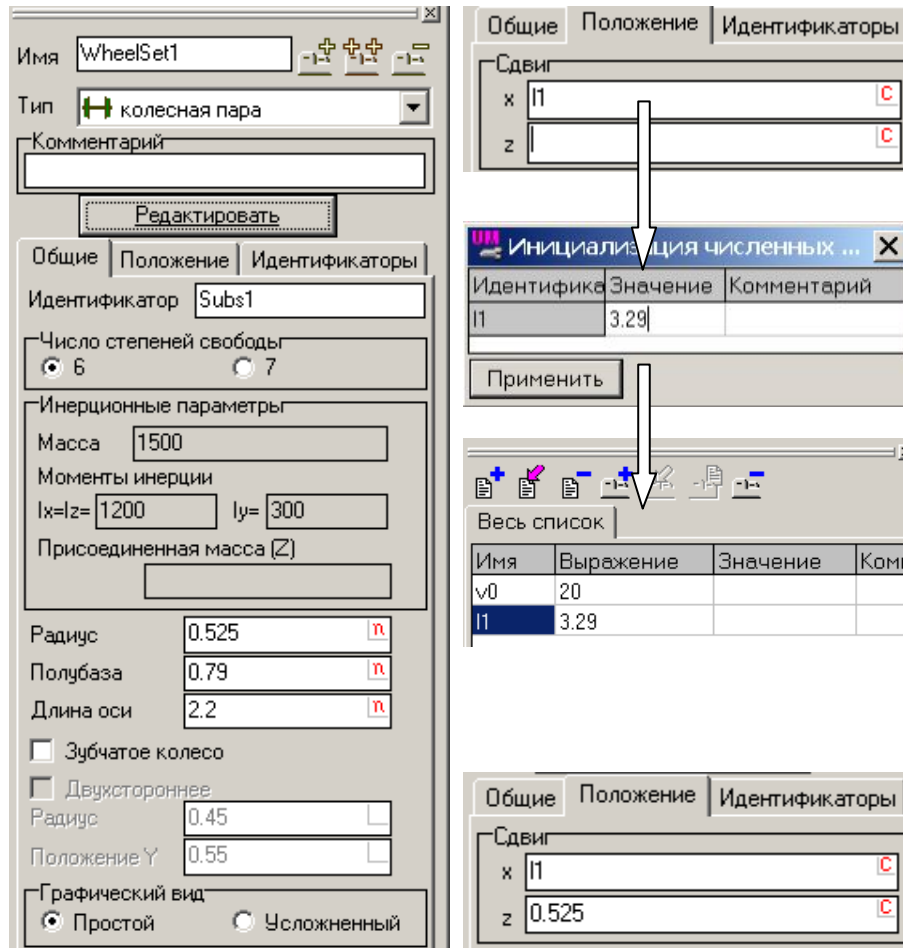


Рис. 2.6. Корректировка параметров колесной пары

## Инерционные параметры колесной пары

1. Для изменения инерционных параметров КП перейдите в режим редактирования подсистемы, щелкнув на кнопке **Редактировать** (рис. 2.6). Появится новый конструктор с полным описанием колесной пары.

Для модификации параметров выполните следующие действия.

2. Выделите тело **WSet** в списке элементов (рис. 2.7, слева).
3. Назначьте массу (**mw**) и моменты инерции относительно осей X и Z (**iw<sub>x</sub>**) используя идентификаторы **mw = 3650** кг, **iw<sub>x</sub> = 1000** кг·м<sup>2</sup>, см. рис. 2.7, в центре.
4. Выделите тело **WSetRotat** и назначьте момент инерции тела относительно оси Y используя идентификатор **iw<sub>y</sub> = 500** кг·м<sup>2</sup>, см. рис. 2.7, справа.

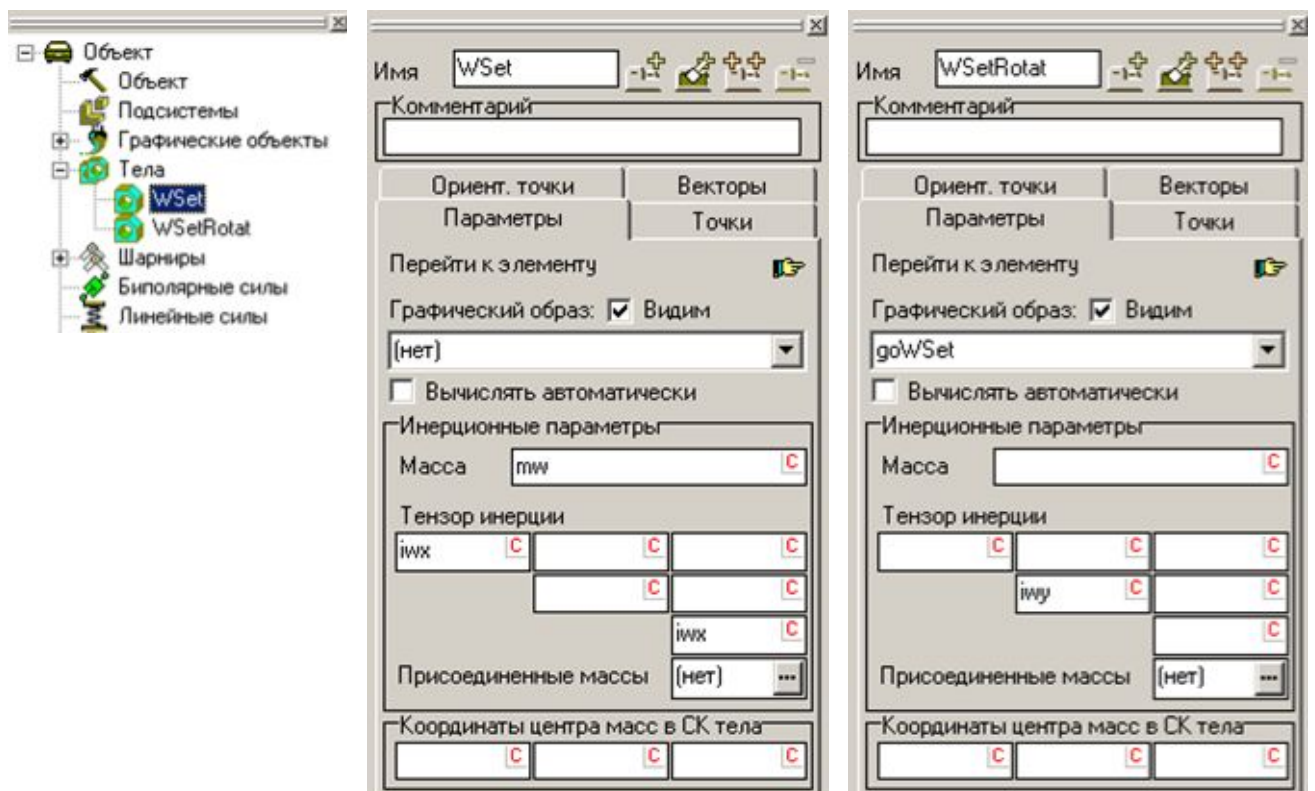


Рис. 2.7. Задание инерционных параметров колесной пары (слева – для базы колесной пары, справа – для гиростата)

**Замечания.** Момент инерции относительно оси  $Y$  для базы КП (тело WSet) игнорируется программой при выводе уравнений движения, поскольку отсутствует соответствующая степень свободы.

Для гиростата (тело WSetRotat) только один инерционный параметр может быть отличен от нуля – момент инерции относительно оси  $Y$ .

5. В окне **Закреть подсистему** в верхнем правом углу нажмите кнопку **Принять** для выхода из режима редактирования подсистемы с сохранением внесенных изменений.

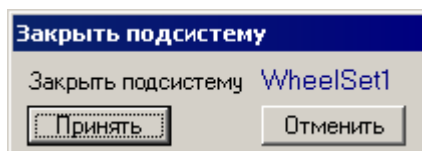


Рис. 2.8. Окно сохранения/отмены изменений

В результате инспектор отобразит внесенные для подсистемы данные следующим образом:

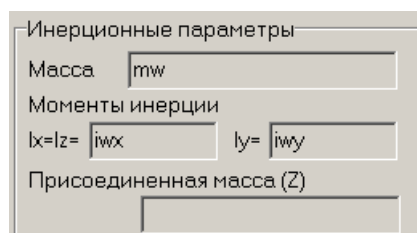

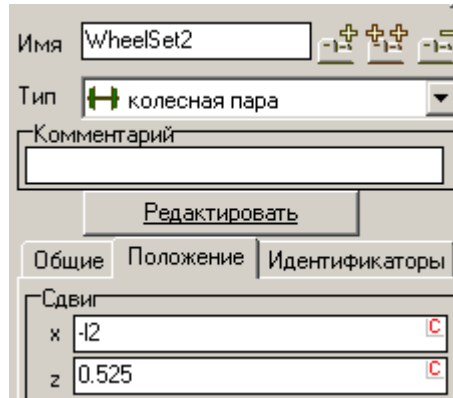






Рис. 2.9. Модифицированные инерционные параметры КП

## Добавление второй колесной пары

1. Для добавление к модели второй колесной пары скопируйте введенную КП, щелкнув на кнопке . Измените имя второй КП (**WheelSet2**), идентификатор (**WS2**), положение **-l2** на одноименной закладке, **l2 = 3.71**.





Имя    

Тип  колесная пара

Комментарий

Общие Положение Идентификаторы

Сдвиг

x	<input type="text" value="-l2"/>	
z	<input type="text" value="0.525"/>	

2. Колесные пары теперь описаны полностью. Сохраните введенные данные командой меню **Файл / Сохранить**.

## 2.4. Графические образы

При создании графических образов элементов конструкции железнодорожного экипажа следует учитывать, что один и тот же *графический объект* (ГО) может быть назначен нескольким элементам. Например, восемь комплектов пружин подвешивания будут ссылаться на один и тот же *графический объект*. То же самое касается восьми гасителей и четырех тяговых поводков.

В последнее время для создания сложных графических образов, например, кузова, часто используются САПР программы. В UM реализован импорт графических образы из большинства распространенных САПР программ, а также из нейтральных форматов (STEP, IGES). Поэтому при создании данной модели мы будем использовать несколько ГО, заранее созданных в САПР программе и импортированных в формат UM (кузов, буксы, поводок).

Используя пункт Графические **объекты** списка элементов, вызовите список графических объектов (ГО) в инспекторе (рис. 2.10). Пока список *графических объектов* пустой.

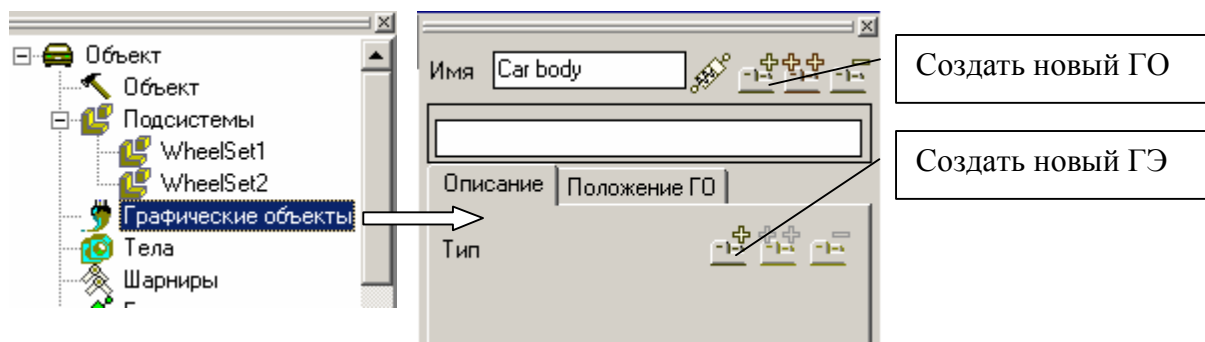


Рис. 2.10. Список ГО. Кнопки и их функции

### 2.4.1. Создание графического образа пружины

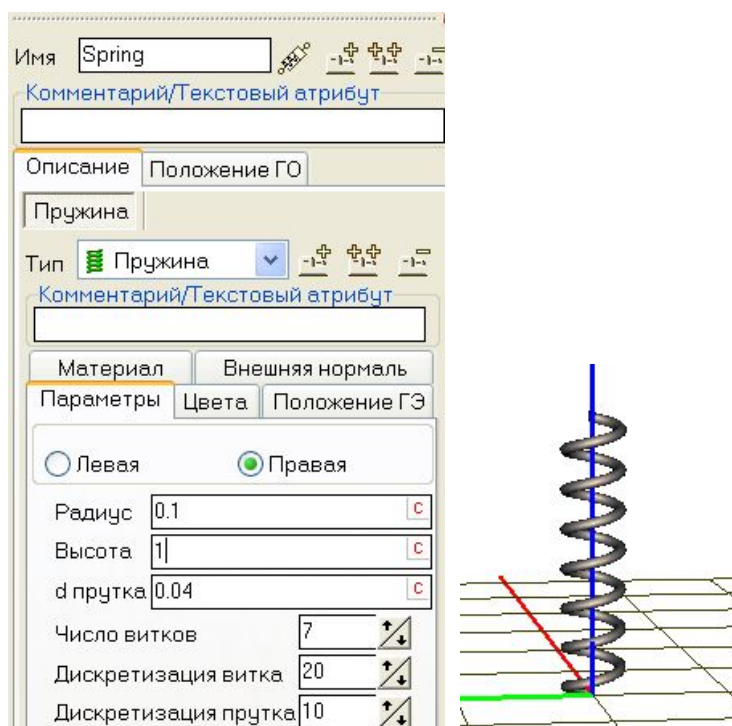




Рис. 2.11. Образ пружины

1. Добавьте ГО к списку, щелкнув на кнопке  в первом ряду, и измените имя (**Spring**).
2. Выберите тип **Пружина**. Измените радиус на 0.1 и число витков на 7, рис. 2.11.

**Замечание.** Графические образы, назначаемые обобщенным линейным, биполярным элементам и специальному элементу типа пружина в простейшем случае имеют размер (длину) 1 м по оси Z. Затем они автоматически разворачиваются программой, удлиняются или укорачиваются и вставляются между точками прикрепления элемента.

## 2.4.2. Добавление заранее подготовленных ГО

Кнопка  на панели инструментов или пункт меню **Правка | Прочитать из файла** позволяет добавлять к модели отдельные заранее созданные и сохраненные в файлах элементы, в частности, ГО (файлы с расширением \*.img). Все ГО, которые мы включим в данную модель, находятся в каталоге {Путь к UM}\bin\rw\images.

Прочитайте по очереди следующие файлы:

- AC4\_CarBody (кузов)
- AC4\_TractionRod\_F (передний тяговый поводок)
- AC4\_TractionRod\_R (задний тяговый поводок)
- AC4\_AxleBox LF (левая букса первой КП)
- AC4\_AxleBox LR (левая букса второй КП)
- Damper (гаситель)

Все эти ГО, за исключением гасителя, созданы с помощью одной из САПР и импортированы в UM, рис. 2.12.

Обратите внимание, что графический образ кузова (CarBody) состоит из нескольких ГО. Графические образы пары поволоков и букс хоть и близки друг к другу, но несколько различаются в деталях

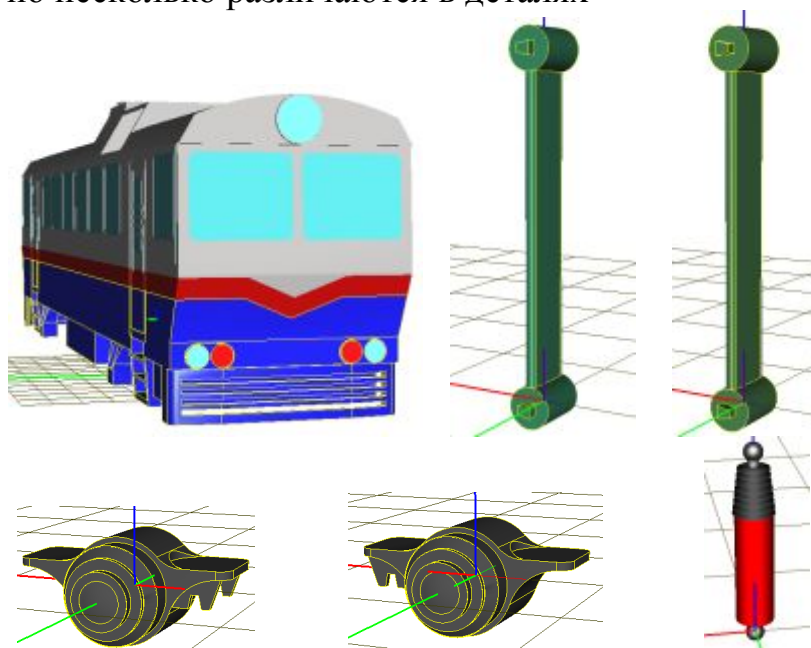




Рис. 2.12. ГО, добавленные в модель

## 2.4.3. Графически образы правых букс

Из файлов были прочитаны ГО *левых* букс. Путем поворота на 180 градусов вокруг вертикальной оси из них легко создать ГО правых букс.

- Создайте новый ГО щелчком на кнопке . Переименуйте его «Axle-box RF» - букса правая (Right) передняя (Front)
- Добавьте графический элемент (ГЭ) щелчком на нижней кнопке 

- Выберите тип ГЭ: «GO», то есть ссылка на один из уже существующих ГО. Из выпадающего списка выберите «Axle-box LR», рис. 2.13, слева
- На вкладке Положение ГЭ разверните образ на 180 градусов вокруг вертикальной оси, рис. 2.13, справа.

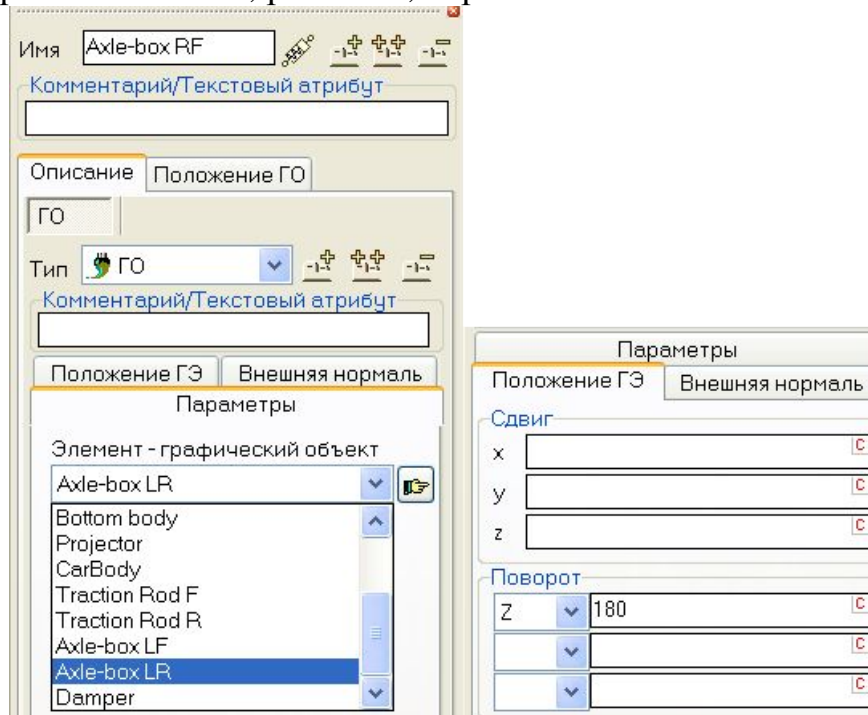


Рис. 2.13. Создание образа правой передней буксы путем поворота ГО левой задней буксы

Аналогично следует создать ГО правой задней буксы (Axle-box RR) путем поворота ГО левой передней буксы.

## 2.5. Добавление букс к модели автомотрисы

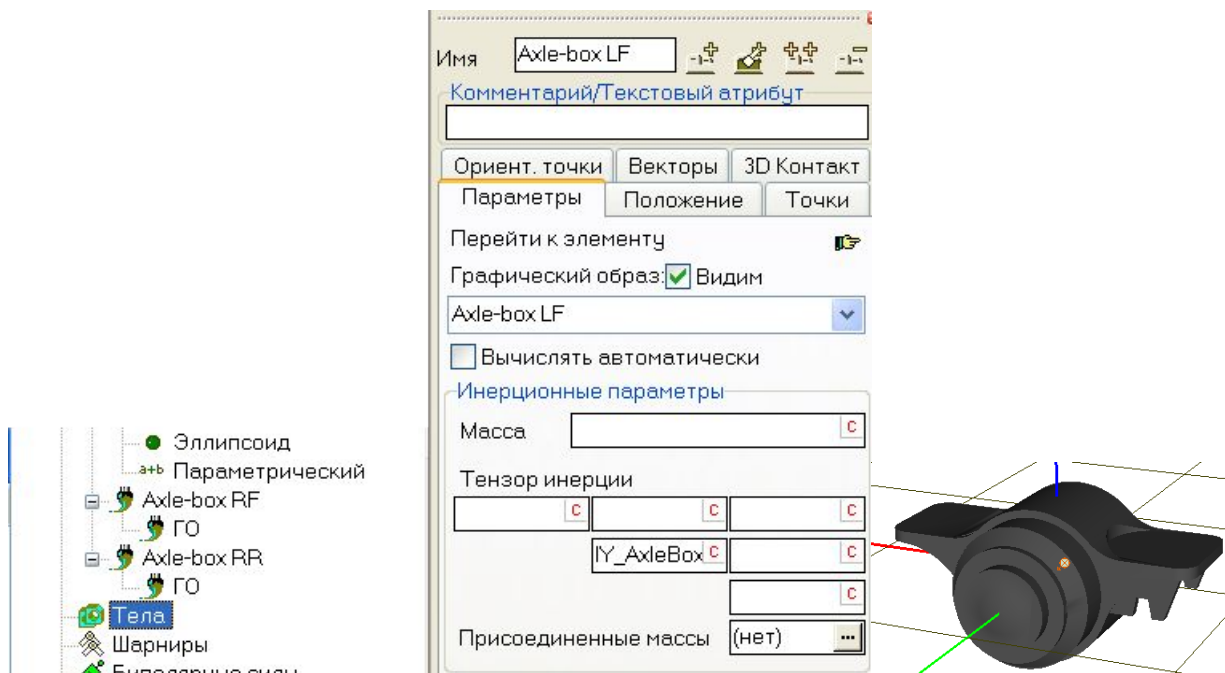



Рис. 2.14. Добавление тела: левая передняя букса

Добавление каждой буксы к модели происходит в два этапа: сначала создается тело - букса, а потом вращательный шарнир, определяющий вращательную степень свободы буксы относительно оси колесной пары.

- Перейдите к списку тел модели (пока пустому) с помощью пункта Тела списка элементов (рис. 2.14, слева).
- Добавьте тело щелчком на кнопке .
- Задайте название тела Axle-box LF (левая передняя букса), можно по-русски.
- Выберите одноименный ГО из выпадающего списка.
- Задайте момент инерции буксы относительно оси вращения с помощью идентификатора  $IY\_AxleBox=3\text{кгм}^2$  (вот здесь русские буквы использовать нельзя).

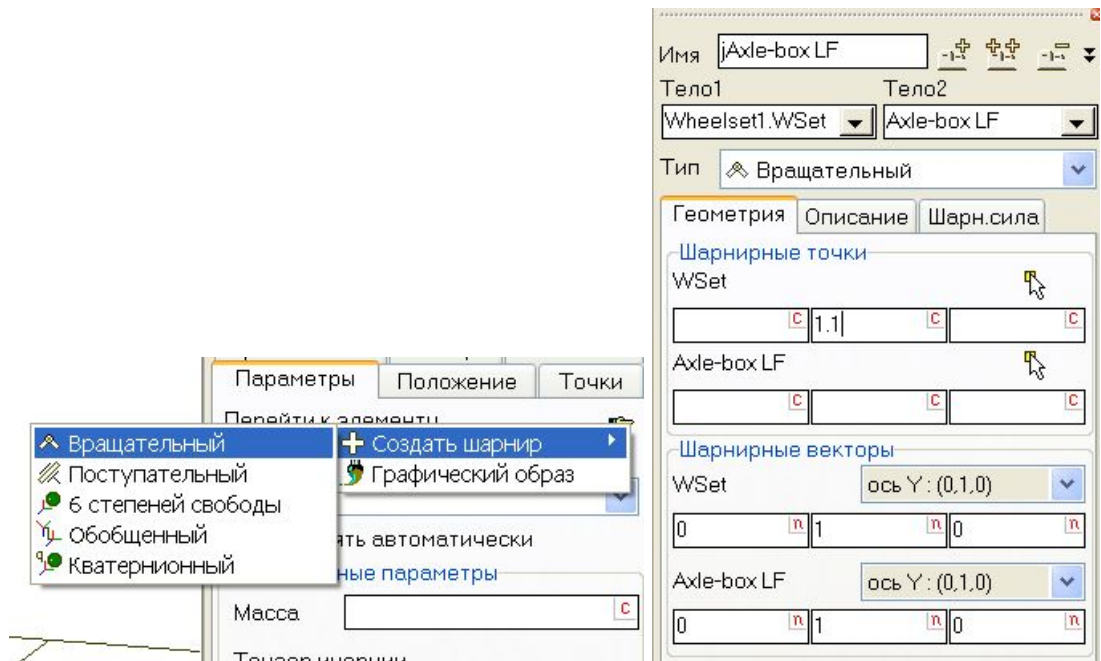



Рис. 2.15. Создание вращательного шарнира для буксы

Создайте вращательный шарнир для буксы.

- Щелкните на кнопке  (Перейти к элементу) и выберите пункт меню **Создать шарнир | Вращательный**, рис. 2.15, слева. Автоматически добавится шарнир, у которого в качестве второго тела задана букса.
- Назначьте первое тело Wheelset1.WSet (база первой КП) с помощью выпадающего списка, рис. 2.15, справа.
- Задайте положение первой буксы на оси в поперечном направлении 1.1 м (группа **Шарнирные точки**).
- Задайте направление оси вращения для каждого из тел кинематической пары: (0,1,0) – ось Y. Направление оси в данном случае можно задать с помощью выпадающего списка стандартных направлений.

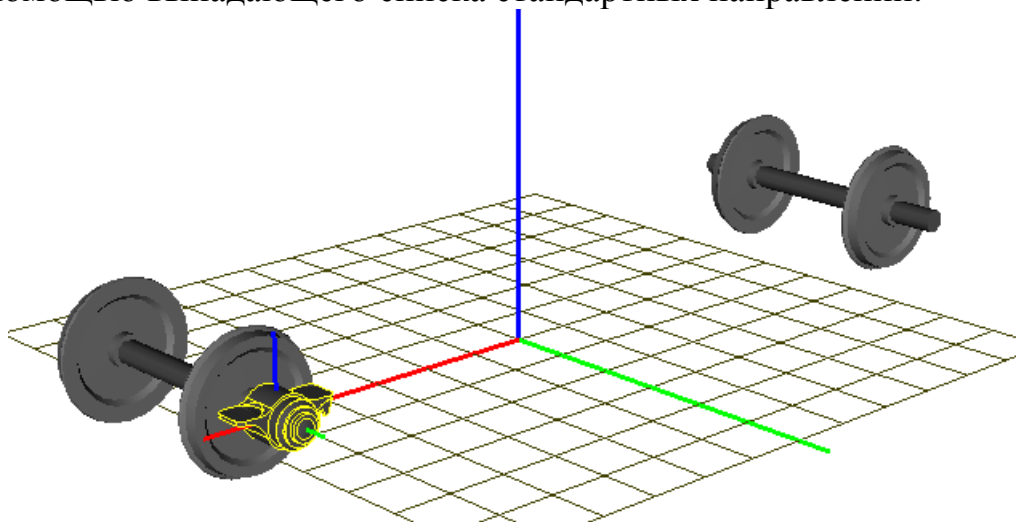



Рис. 2.16. Модель с добавленной буксой

Обратите внимание, что база колесной пары не имеет назначенного ГО. Поэтому, чтобы увидеть результат добавления шарнира, щелкните на кнопке , перейдя в режим изображения всего объекта (а не отдельного элемента). Тогда, если все действия были выполнены правильно, образ модели будет соответствовать рис. 2.16.

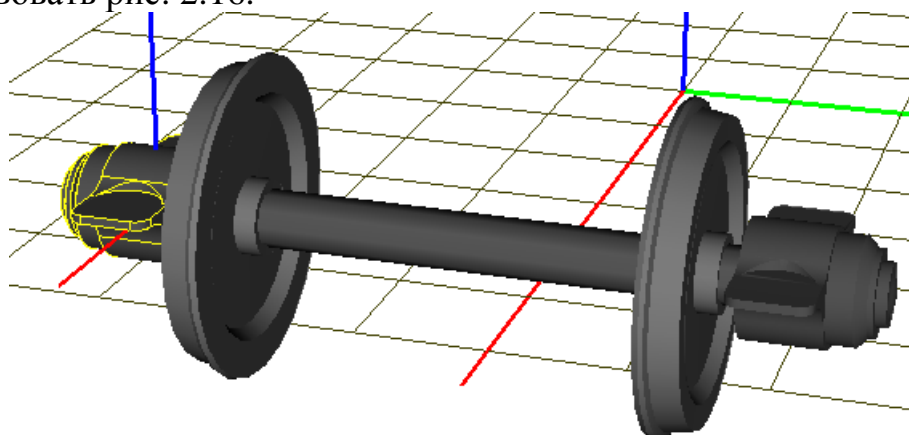



Рис. 2.17. Передняя КП с буксами

Для добавления второй буксы мы рекомендуем использовать операции копирования тела и шарнира первой буксы.

- Перейдите к списку тел и скопируйте буксу с помощью кнопки . Переименуйте тело Axle-box RF (правая передняя букса). Назначьте одноименный ГО.
- Перейдите к списку шарниров и скопируйте вращательный шарнир первой буксы. Измените второе тело на Axle-box RF. Измените знак поперечной координаты буксы на оси КП -1.1. Результат представлен на рис. 2.17.

Аналогично создайте тела и шарниры для букс задней КП.

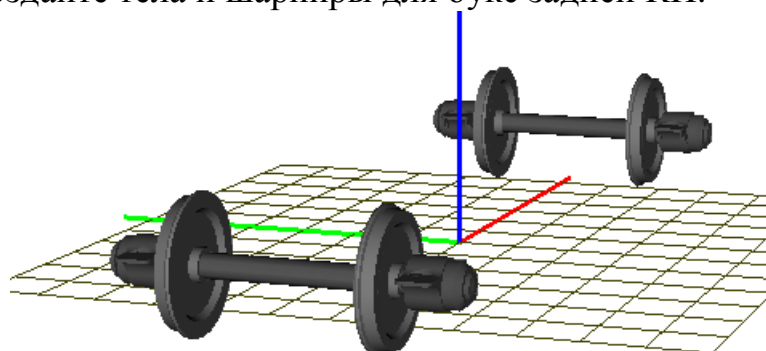



Рис. 2.18. Колесные пары с буксами

## 2.6. Добавление кузова к модели автомотрисы

Здесь мы добавим к модели кузов как тело и опишем его инерционные параметры. Заметьте, что создание графического образа кузова (ГО **Car body**) в предыдущем разделе не означает, что мы добавили сам кузов. Мы добавили картинку к списку картинок – и ничего больше. Кузов появится в модели, ко-

гда мы добавим соответствующее твердое тело к списку тел и зададим его координаты.

1. Выберите элемент **Тела** в списке элементов для того, чтобы перейти к списку тел (пока пустому).
2. Добавьте тело к списку, щелкнув на кнопке , переименуйте его в **Car body** (кузов).
3. Заполните поля инспектора, как показано на рисунке: назначьте графический образ, введите идентификаторы массы и моментов инерции.

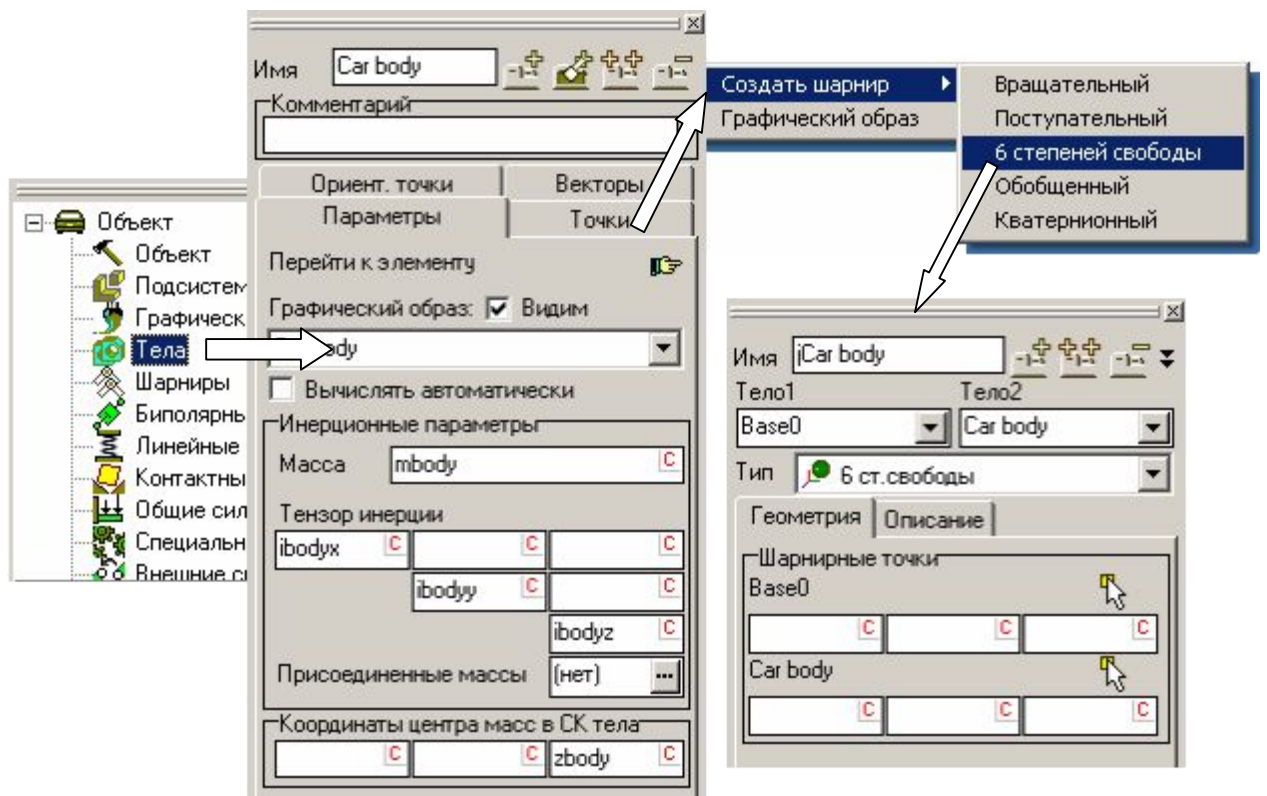


Рис. 2.19. Добавление кузова и его шарнира

Инерционные параметры (массу, моменты инерции и положение центра масс в СК тела) задайте идентификаторами, задав им численные значения


$$m_{body} = 38300 \text{ кг};$$

$$i_{bodyx} = 140000 \text{ кг м}^2;$$

$$i_{bodyy} = 626000 \text{ кг м}^2;$$

$$i_{bodyz} = 599000 \text{ кг м}^2;$$

$$z_{body} = 1.525 \text{ м}.$$

4. Щелкнув на кнопке  задайте **присоединенный шарнир**, выбрав тип **6 степеней свободы**. Шарниру автоматически назначено имя **jCar body**. Данный шарнир назначает телу шесть степеней свободы: три декартовы координаты относительно СК0 и три угла ориентации в последовательности 1, 2, 3 последовательные повороты вокруг оси X, затем Y и, наконец, Z), см. рис. 2.19.

## 2.7. Добавление силовых элементов

### 2.7.1. Пружины

Наиболее простой способ задать пружину состоит в использовании специального силового элемента типа *пружина* (см. Гл.2, п. *Специальные силы / Пружина*, Гл.3, п. *Ввод силовых элементов / Ввод специальных сил / Пружина*).

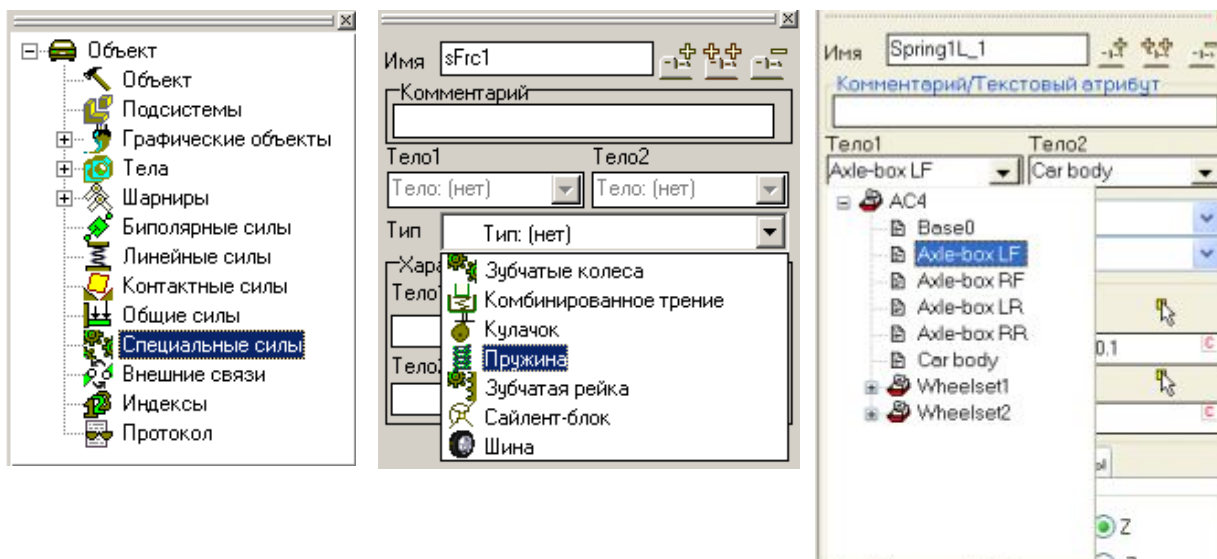



Рис. 2.20. Создание пружины

1. Выберите элемент **Специальные силы** списка элементов (рис. 2.20, слева) и создайте первый элемент, соответствующий передней пружине для левой буксы первой КП, щелкнув на кнопке . Переименуйте его “**Spring1L\_1**”.
2. Выберите тип элемента **Пружина** (рис.2.20, в центре).
3. Задайте соединяемые тела **Axle-box LF** (левая передняя букса) и **Car body** (рис.2.20, справа). Задайте графический вид **Spring**.
4. Задайте точку прикрепления пружины к буксе (**0.28, 0, 0.1**) и высоту пружины под статической нагрузкой **0.4** м (поле **Прикрепление / Длина**).
5. Включите автоматический расчет координат точки прикрепления пружины ко второму телу - поле **Авторасчет для второго тела**, рис.2.21, слева. В результате пружина займет свое окончательное положение в анимационном окне. Если теперь щелкнуть на кнопке **Рассчитать для второго тела**, то будут показаны координаты точки прикрепления верхнего конца пружины к кузову в системе координат кузова (3.57, 1.1, 1.025).

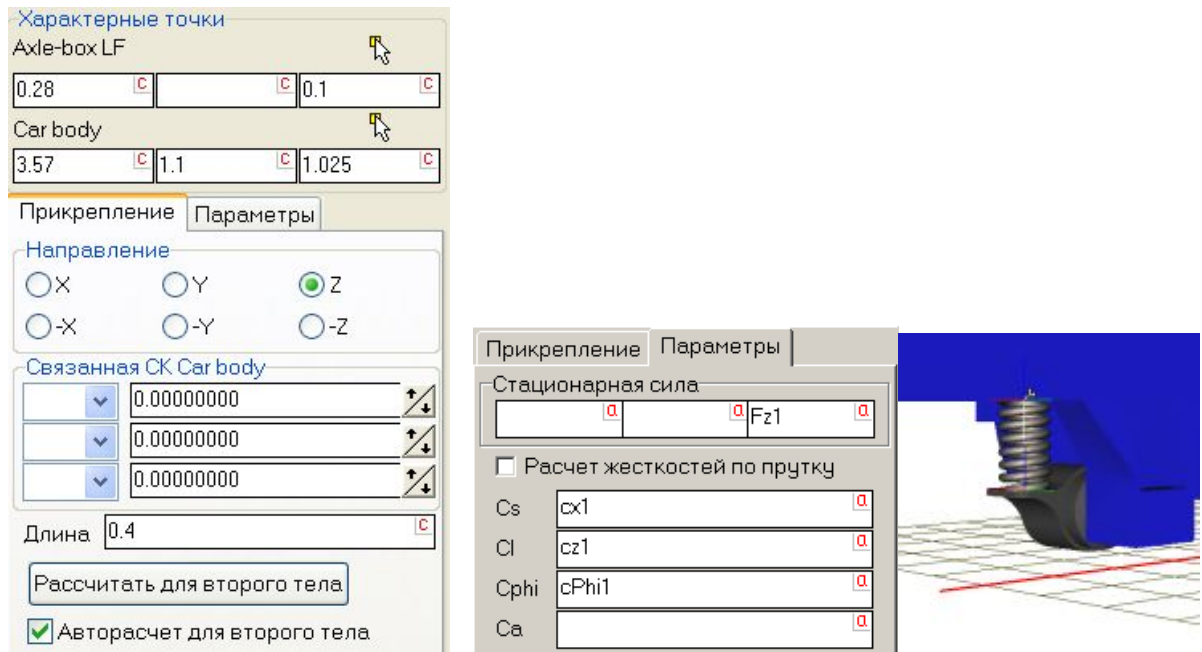


Рис. 2.21. Параметры, определяющие положение пружины и ее силовые характеристики

б. На закладке **Параметры** задайте сдвиговую (поперечную) **Cs**, продольную (вертикальную) **Cl** и изгибную **Cphi** жесткости пружины с использованием идентификаторов

$$\begin{aligned}
 cx1 &= 370000 \text{ Н/м,} \\
 cz1 &= 277000 \text{ Н/м,} \\
 cPhi1 &= 5500 \text{ Нм/рад.}
 \end{aligned}$$

Здесь же укажите статическое усилие в пружине. В поле **Стационарная сила / Z** (третье поле) введите идентификатор **Fz1**, которому сначала задайте нулевое значение.

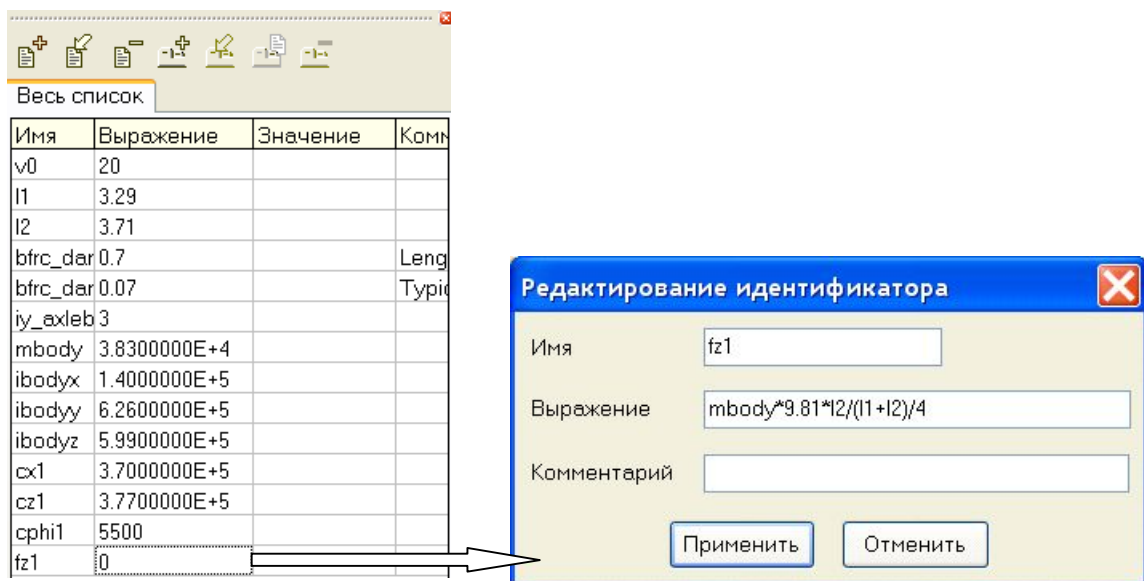



Рис. 2.22. Задание статического усилия в пружине в виде выражения

Очевидно, что статическое усилие в передних пружинах выражается через массу кузова и расстояния от центра масс кузова до каждой из колесных пар.

Данные величины параметризованы с использованием идентификаторов **mbody**, **I1**, **I2**, что позволяет выразить идентификатор силы через данные идентификаторы

$$Fz1 = mbody * 9.81 * I2 / (I1 + I2) / 4$$

Для внесения этого выражения в качестве формулы, определяющей численное значение идентификатора **Fz1** в зависимости от значений остальных идентификаторов, дважды щелкните левой кнопкой мыши на строке списка идентификаторов, содержащей **Fz1**, и внесите выражение в появившееся окно (рис.2.22).

7. Скопируйте первый элемент, щелкнув на кнопке . Переименуйте его в **Spring1L\_2** (задняя пружина левой буксы первой КП).
8. Измените знак координаты **X** точки прикрепления второй пружины к колесной паре (**-0.28** вместо **0.28**).
9. Скопируйте первый и второй элемент еще один раз, чтобы создать третью и четвертую пружину. Переименуйте их в **Spring1R\_1**, **Spring1R\_2** (передняя и задняя пружины правой буксы первой КП). Измените первое тело для этих пружин на **Axle-box RF** (правая букса первой колесной пары).
10. Теперь создадим переднюю пружину левой буксы второй КП. Для этого скопируйте первую пружину, переименуйте на **Spring2L\_1**, измените первое тело на **Axle-box LR**. Измените значения коэффициентов жесткости, задав идентификаторы

$$cx2 = 330000, cz2 = 370000, cPhi2 = 5250 \text{ Нм/рад.}$$

11. Задайте значение статического усилия идентификатором **Fz2**. В окне **Инициализация численных значений** сначала установите 0 для **Fz2**, а затем в списке параметров модели задайте его значение выражением **Fz2 = mbody\*9.81\*I1/(I1+I2)/4**.
12. Копируя последнюю пружину еще три раза, создайте остальные три пружины задней КП (**Spring2L\_2**, **Spring2R\_1**, **Spring2R\_2**) и модифицируйте их так же, как в случае соответствующих пружин первой КП.

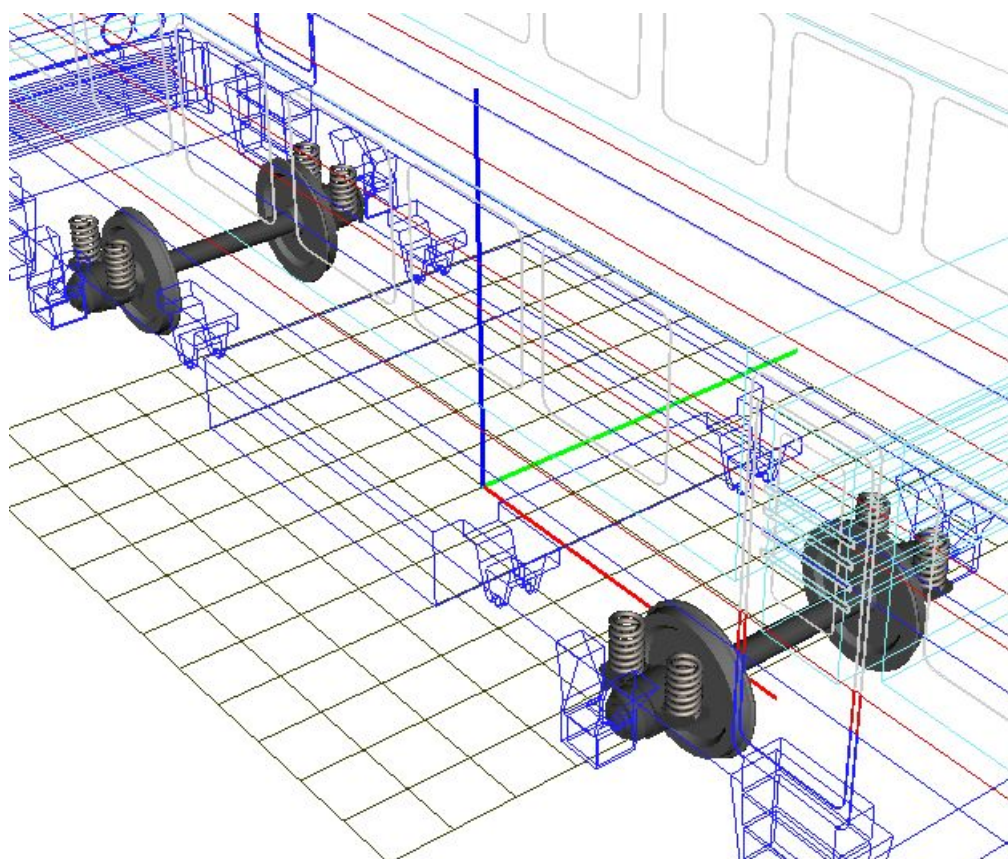
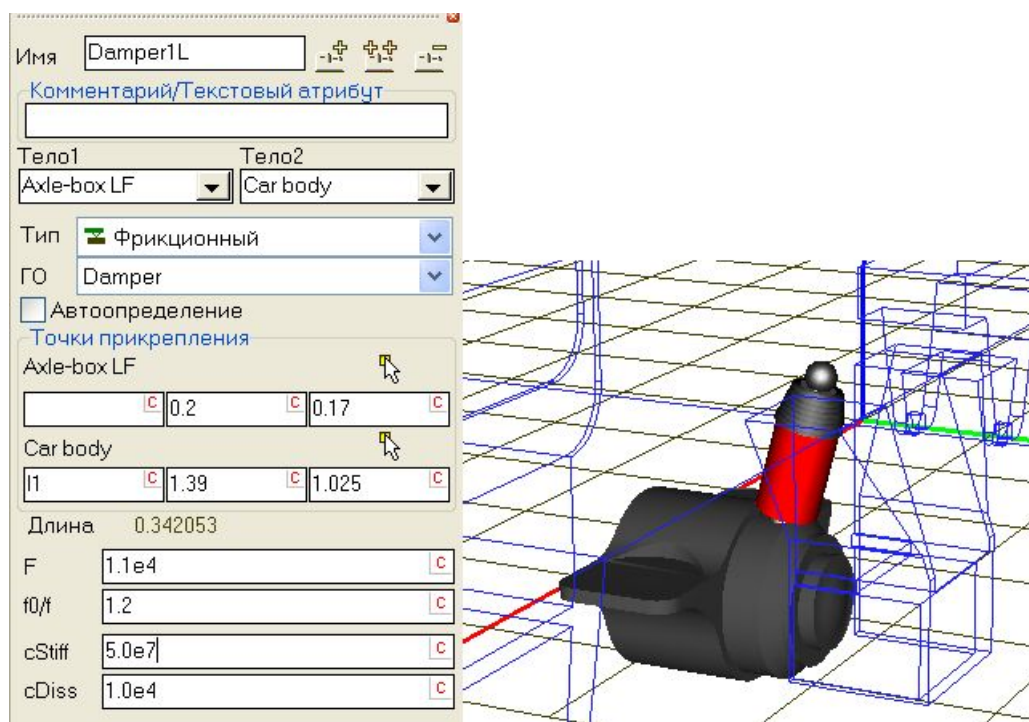


Рис. 2.23. Пружины подвески

## 2.7.2. Наклонные гасители

Для ввода моделей наклонных фрикционных гасителей следует использовать биполярные силовые элементы (см. Гл.2, п. *Биполярные силы*, Гл.3, п. *Ввод силовых элементов / Ввод биполярных сил*).

1. Выделите элемент **Биполярные силы** в списке элементов и добавьте первый элемент к списку. Переименуйте его **Damper1L**.
2. Заполните поля инспектора, как показано на рисунке ниже.



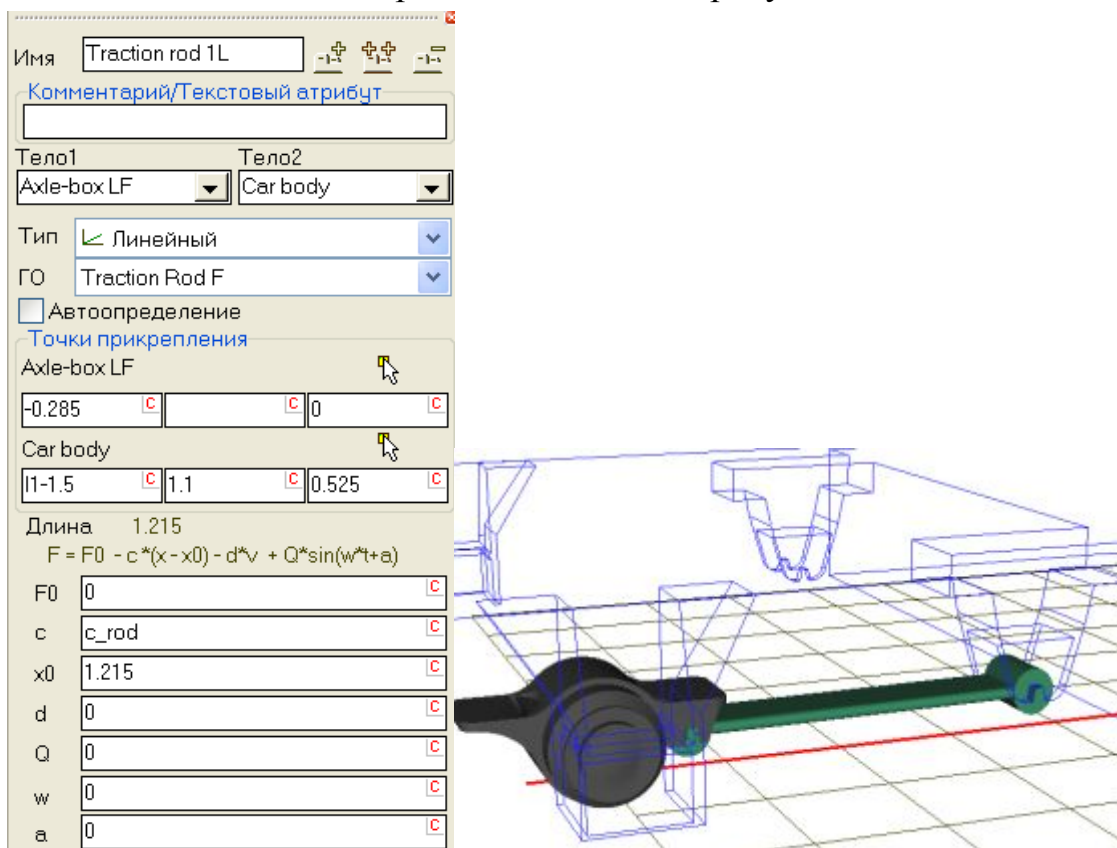
Остальные три гасителя добавляйте с помощью операции копирования, переименовывая элементы, изменяя первое тело для задних гасителей и координаты точек крепления:

1. Второй гаситель (**Damper1R**), первое тело **Axle-box RF**, координаты точек крепления  
(0, -0.2, 0.17) и (11, -1.39, 1.025).
2. Третий гаситель (**Damper2L**), первое тело **Axle-box LR**, координаты точек крепления  
(0, 0.2, 0.17) и (-12, 1.39, 1.025).
3. Четвертый гаситель (**Damper2R**), первое тело **Axle-box RR**, координаты точек крепления  
(0, -0.2, 0.17) и (-12, -1.39, 1.025).

### 2.7.3. Продольные тяговые поводки

Поводки, работающие исключительно на растяжение и сжатие, обычно моделируются биполярными силовыми элементами. Выберите тип элемента – **Линейный**. Длина элемента в недеформированном состоянии **1.215 м**.

1. Добавьте пятый биполярный элемент, переименуйте его в **Traction rod 1L** (передний левый поводок).
2. Заполните поля инспектора, как показано на рисунке.

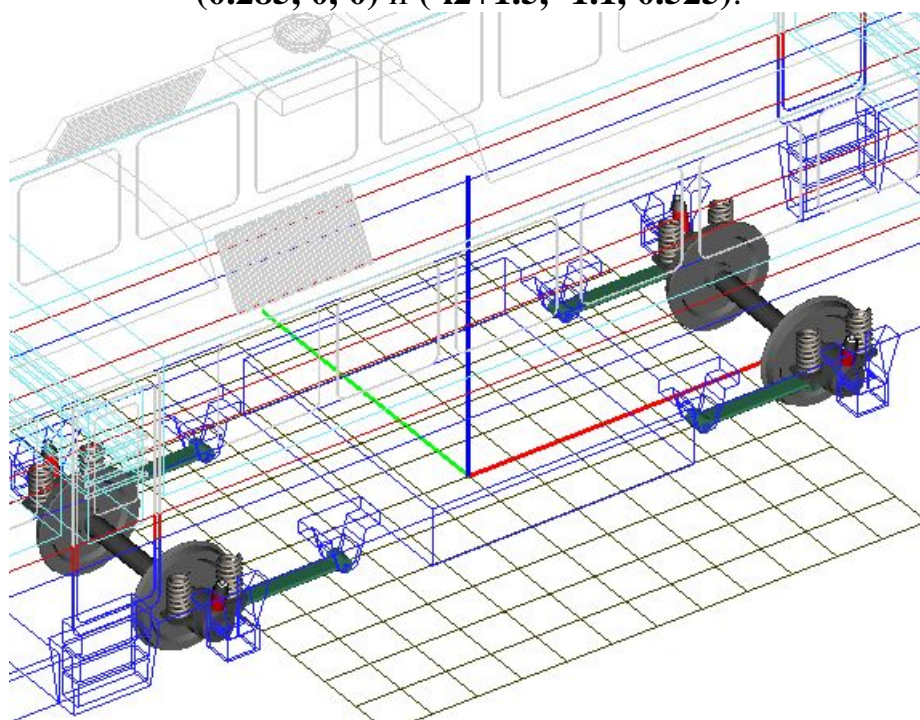


3. Задайте численное значение идентификатора – коэффициента жесткости тяги **c\_rod=2.5E7**.

Остальные три тяги добавляйте с помощью операции копирования, переименовывая элементы, изменяя первое тело для задних тяг и изменяя координаты точек прикрепления:

4. Вторая тяга (**Traction rod 1R**), первое тело **Axle-box RF**, координаты точек прикрепления **(-0.285, 0, 0)** и **(11-1.5, -1.1, 0.525)**
5. Третья тяга (**Traction rod 2L**), первое тело **Axle-box LR**, координаты точек прикрепления **(0.285, 0, 0)** и **(-12+1.5, 1.1, 0.525)**.
6. Четвертая тяга (**Traction rod 2R**), первое тело **Axle-box RR**, координаты точек прикрепления

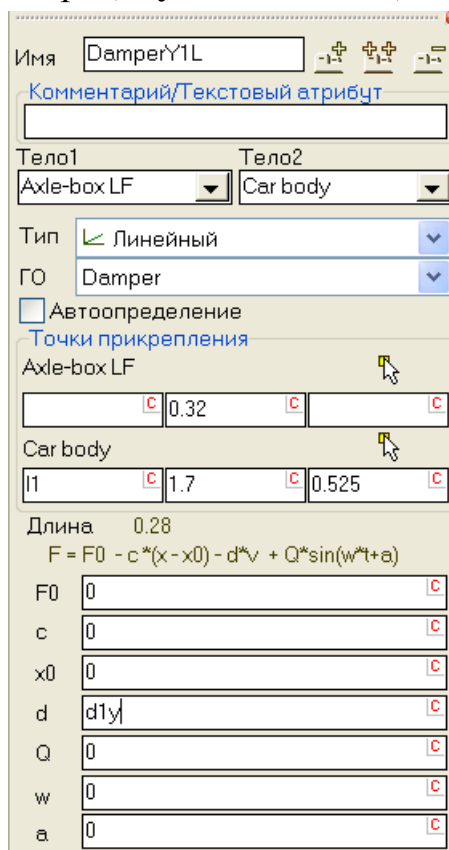
**(0.285, 0, 0) и (-12+1.5, -1.1, 0.525).**



### 2.7.4. Горизонтальные гасители

Процесс создания моделей горизонтальных гасителей полностью аналогичен рассмотренной выше последовательности ввода вертикальных гасителей и продольных тяг.

1. Добавьте девятый биполярный элемент, переименуйте его в **DamperY1L** (передний левый гаситель);
2. Заполните поля инспектора ( $d1y = 16400$  Нс/м).



3. Второй гаситель (**DamperY1R**), первое тело **Axle-box RF**, координаты точек прикрепления **(0, -0.32, 0)** и **(11, -1.7, 0.525)**.
4. Третий гаситель (**DamperY2L**), первое тело **Axle-box LR**, координаты точек прикрепления **(0, 0.32, 0)** и **(-12, 1.7, 0.525)**.
5. Четвертый гаситель (**DamperY2R**), первое тело **Axle-box RR**, координаты точек прикрепления **(0, -0.32, 0)** и **(-12, -1.7, 0.525)**.

Модель автотрисы АС4 построена.

### 3. Пример создания и анализа проекта параметрического сканирования модели автотрисы АС4

Рассмотрим процесс создания и анализа проекта сканирования динамических свойств автотрисы АС4 в зависимости от параметров. Данная модель поставляется вместе с УМ (относительный путь – `{um_root}\samples\rail vehicles\ac4`).

Процесс создания модели автотрисы подробно рассмотрен в предыдущем разделе, см. п. 2, стр. 13.

Инструмент для параметрического сканирования доступен только в поставках с включенным модулем оптимизации (**UM Optimization**). Для проверки наличия модуля оптимизации запустите программу **UM Simulation**, выберите пункт меню **Помощь / О программе**. В появившемся окне в разделе **Конфигурация** вы увидите список доступных модулей.

Перед началом описания проекта сканирования необходимо, чтобы модель автотрисы была у вас на компьютере: создайте ее в соответствии с п. 2, либо проверьте ее наличие в каталоге `{um_root}\samples\rail vehicles\ac4`, либо скачайте из интернета по адресу <http://www.umlab.ru/download/60/ac4.zip>.

Подробнее о модуле сканирования и параметрической оптимизации см. главу 6 «Модуль оптимизации», [http://www.umlab.ru/download/60/rus/06\\_um\\_experiments.pdf](http://www.umlab.ru/download/60/rus/06_um_experiments.pdf).

Полностью описанный и рассчитанный проект сканирования, который рассматривается в данном примере, находится в каталоге `{um_root}\samples\tutorial\scan1`, а также в Интернете по следующей ссылке: <http://www.umlab.ru/download/60/scan1.zip>.

### 3.1. Описание проекта сканирования

В данном разделе рассмотрим применение сканирования к определению критической скорости автомотрисы АС4.

#### 3.1.1. Постановка задачи<sup>1</sup>

Существует достаточно большое число критериев, которые различные авторы принимают во внимание при оптимизации по критериям ходовой динамики железнодорожных экипажей. Однако практически всех интересуют показатели устойчивости движения в прямых участках пути. Кратко рассмотрим основные современные подходы к определению устойчивости.

Для оценки устойчивости в прямых используются различные показатели, и в первую очередь это критическая скорость. Могут быть использованы также и косвенные характеристики, такие как поперечные ускорения, рамные силы, силы отжатия рельсов, угол поворота надрессорной балки относительно кузова для трехэлементных тележек, смещение колесных пар относительно оси пути. Для определения критической скорости можно использовать два различных подхода – на основании решения задачи об устойчивости по Ляпунову в первом приближении и по результатам численных экспериментов. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Подход, основанный на решении задачи об устойчивости по Ляпунову, является в определенном смысле самым строгим, но предполагает линеаризацию уравнений движения, что для целого ряда моделей (имеющих существенно нелинейные элементы, например, гасители сухого трения) представляется задачей неоднозначной. В данном разделе мы будем использовать другой подход к определению критической скорости – экспериментальный. Заключается он в следующем. Моделируется движение экипажа в прямой с вертикальными неровностями. В горизонтальной плоскости путь идеально ровный с единичной горизонтальной неровностью амплитудой 20 мм и длиной 10 м в начале пути. Такая форма неровностей в плане позволяет определить приводит ли единичная неровность в начале пути к достаточно интенсивным незатухающим поперечным колебаниям экипажа<sup>2</sup> (см. рис. 3.1), т.е. к неустойчивости движения

---

<sup>1</sup> Постановка задачи и методика исследования приведена по статье «Ковалев Р.В., Котов С.В., Симонов В.А., Ефимов В.П. Влияние параметров буксовых адаптеров для тележки типа 18-100 на показатели износа бандажей колесных пар и устойчивость движения грузовых вагонов. Вестник БГТУ. №1 (1). Брянск, 2004. С. 147-155». Полный текст статьи доступен в электронном виде по адресу <http://www.umlab.ru/index/download/bogie18100.pdf>

<sup>2</sup> В данном примере приведены графики для порожнего вагона-хоппера

или же колебания, возбужденные единичной неровностью, затухают и, соответственно, экипаж является устойчивым на данной скорости (см. рис. 3.2). Описанные выше подходы позволяют сделать вывод об устойчивости экипажа на каждой конкретной скорости при наличии вертикальных неровностей.

Предварительный анализ позволил определить, что наиболее информативным для идентификации критической скорости является поперечное смещение колеса относительно рельса, а точнее мощность этого процесса, которую можно приближенно оценить по величине среднеквадратического отклонения (СКО). При этом устойчивому движению экипажа соответствуют колебания без набегания колес гребнями на рельс.

Рассмотрим зависимость СКО поперечных колебаний первой колесной пары относительно головки рельса от скорости представленную на рис. 3.3. Отметим, что рассмотренные осциллограммы поперечных колебаний колесных пар зачастую имеют тренд (см. график 1, рис. 3.2), который приводит к увеличению СКО. Для удаления тренда был применен фильтр верхних частот с нижней границей 0,1 Гц (см. график 2, рис. 3.2). На рис. 3.3 представлен график, полученный на основе обработки отфильтрованных осциллограмм. Из которого видно, что в диапазоне скоростей от 16 до 20 м/с наблюдается скачок СКО, что соответствует потере устойчивости и переходу в закритическую область.

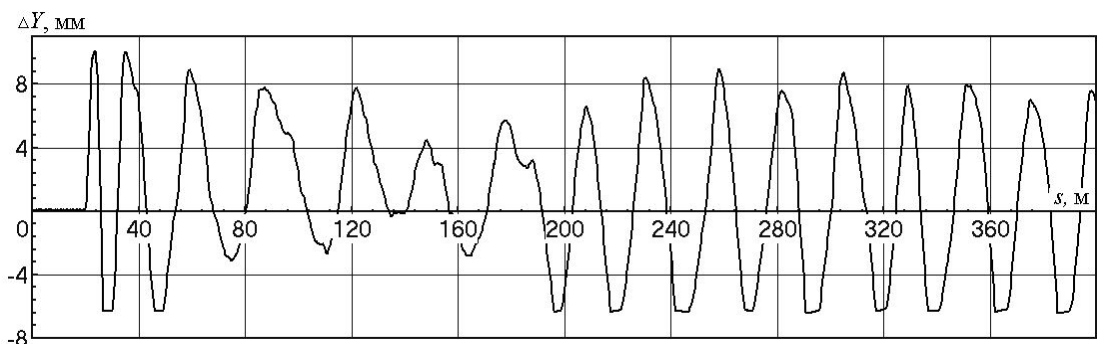


Рис. 3.1. Осциллограмма поперечных колебаний колесной пары, неустойчивое движение

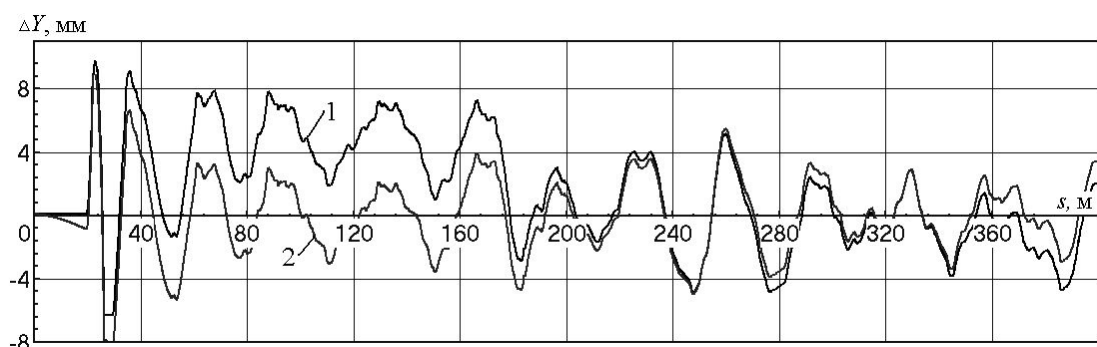


Рис. 3.2. Осциллограмма поперечных колебаний колесной пары, устойчивое движение; 1 – исходная; 2 – отфильтрованная

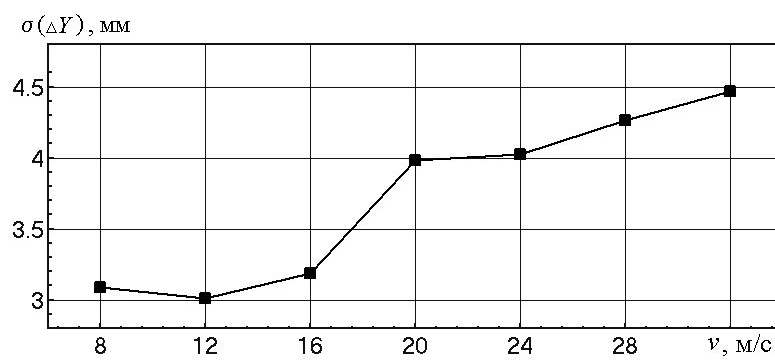


Рис. 3.3. Зависимость СКО поперечных колебаний колесной пары относительно головки рельса от скорости движения экипажа

### 3.1.2. Создание нового проекта

1. Запустите программу моделирования **UM Simulation**.
2. Итак, для создания нового проекта выберите пункт меню **Расширенный анализ / Сканирование: новый проект...**
3. В появившемся окне введите полный путь к каталогу сканирования, включая имя проекта (см. рис. 3.4).
4. Нажмите кнопку **Создать** и после этого появится окно описания проекта сканирования (см. рис. 3.5).

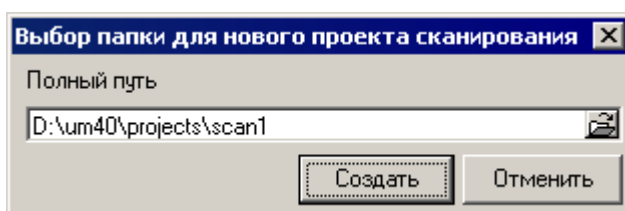


Рис. 3.4. Диалог выбора папки для нового проекта сканирования

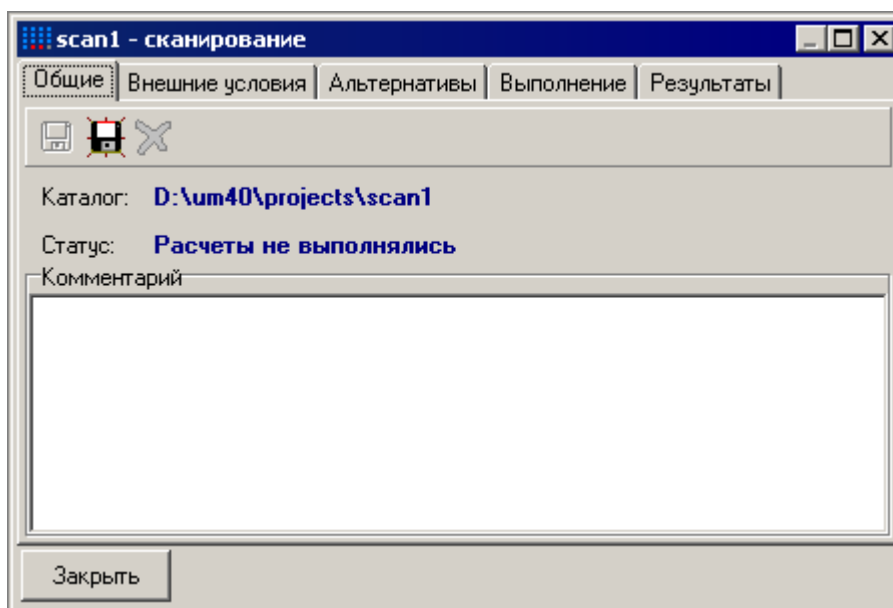


Рис. 3.5. Окно описания проекта сканирования: начало работы

### 3.1.3. Добавление новой модели к проекту сканирования

1. В окне описания проекта перейдите на закладку **Альтернативы**.
2. Нажмите кнопку **+** (добавить альтернативу).
3. В появившемся окне открытия модели выберите модель автомотрисы АС4.

После этого данная модель появится в списке **Семейства альтернатив** (см. рис. 3.6).

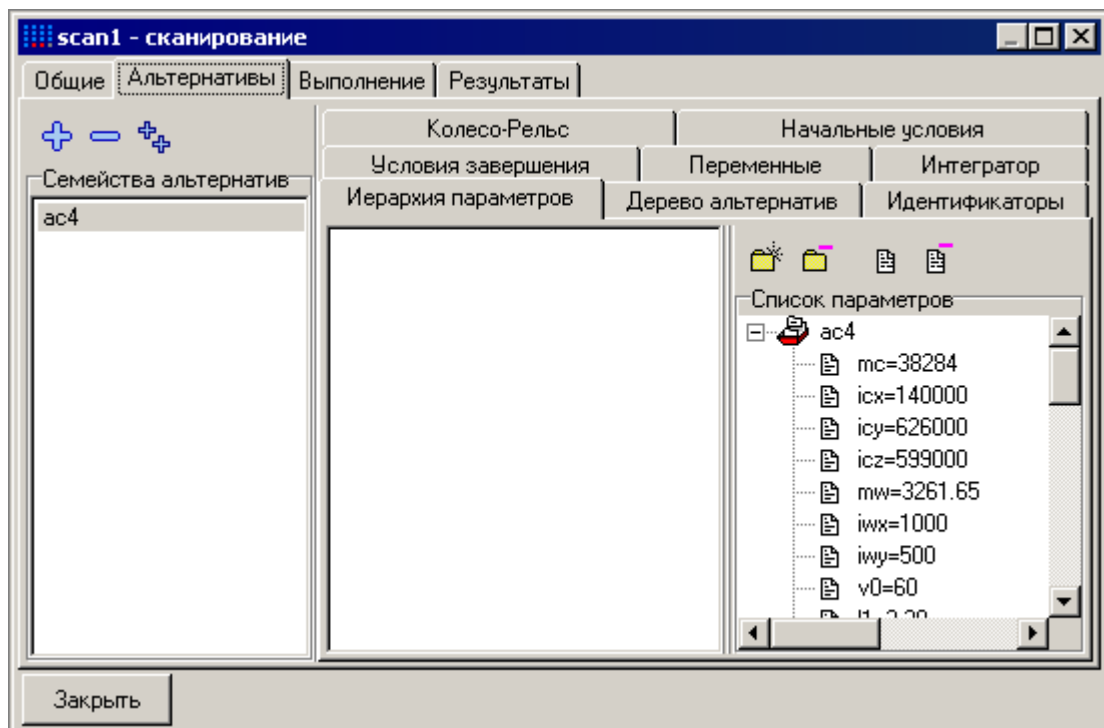


Рис. 3.6. Проект сканирования: добавление семейства альтернатив

### 3.1.4. Описание иерархии параметров

В данном проекте будем сканировать динамическое поведение модели только по одному параметру: скорости движения автотомотрисы.

1. В иерархическом списке **Список параметров** (в правой части закладки **Иерархия параметров**, см. рис. 3.6) щелкните на параметре **v0** (параметр имеет смысл начальной скорости движения).
2. В появившемся окне **Свойства параметра** введите значения от 30 до 90 (м/с) включительно с шагом 5 м/с (см. рис. 3.7).
3. Закройте окно настройки значений параметров и вернитесь в окно описания проекта сканирования.
4. Группу параметров **Группа 1** переименуйте в **v0** (контекстное меню, пункт **Переименовать группу параметров**).

На закладке **Иерархия параметров** появится новая группа параметров с именем **v0** (см. рис. 3.8). Таким образом, всего в процессе сканирования будет выполнено 13 численных экспериментов. Общие для всех этих численных экспериментов настройки мы выполним ниже.

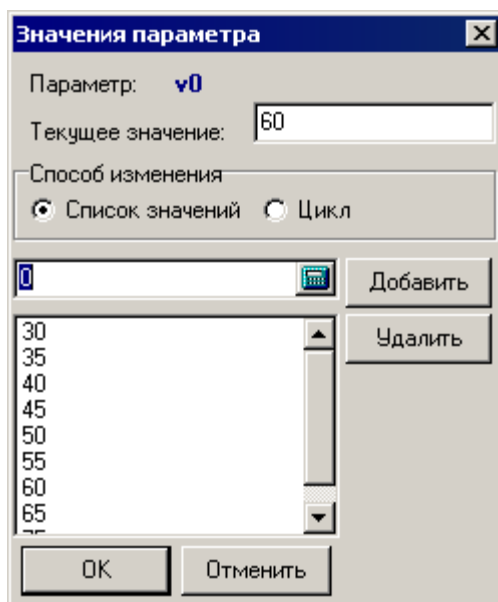


Рис. 3.7. Окно настройки значений параметра

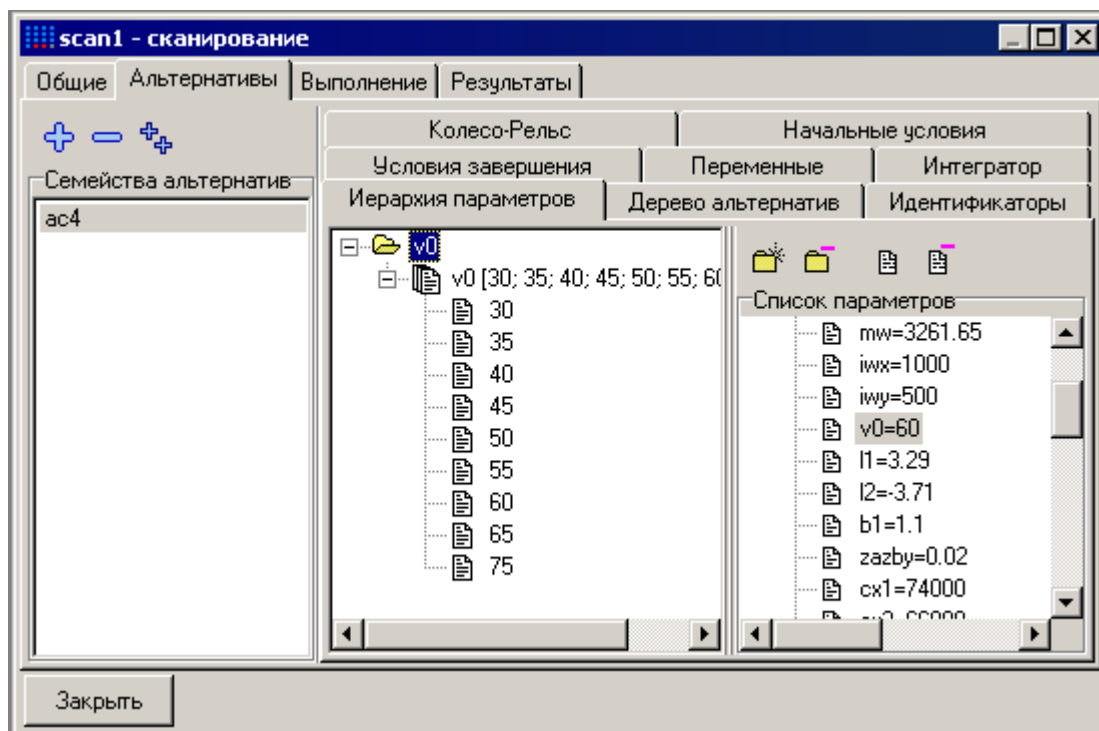


Рис. 3.8. Проект сканирования: иерархия параметров

### 3.1.5. Настройка железнодорожных параметров

Одним из необходимых этапов в данном примере является настройка железнодорожных параметров в соответствии с методикой, описанной в п. 3.1.1.

1. Итак, настроим неровности путевой структуры. Перейдите на закладку **Колесо-Рельс / Путь / Неровности**. Установите **Тип пути** в значение **Неровный**. В качестве файлов вертикальных (Z) неровностей выберите файл **NoIrregularities.way** (нет неровностей), а для горизонтальных (Y) неровностей выберите файл **g10\_20.way**, содержащий единичную неровность в начале пути, см. рис. 3.9. Окончательный вид закладки представлен на рис. 3.10.
2. Перейдите на закладку **Колесо-Рельс / Путь / Макрогеометрия**. В поле **Тип пути** выберите **Прямая**.
3. Перейдите на закладку **Колесо-Рельс / Профили / Колеса**. Добавьте файл **newlocow.wpf** и установите его в качестве профиля для всех колес (см. рис. 3.11).
4. Перейдите на закладку **Колесо-Рельс / Профили / Рельсы**. Выберите профиль **r65new.rpf** для левого и правого рельса.

Каждый численный эксперимент будет выполняться с этими ж.-д. настройками.

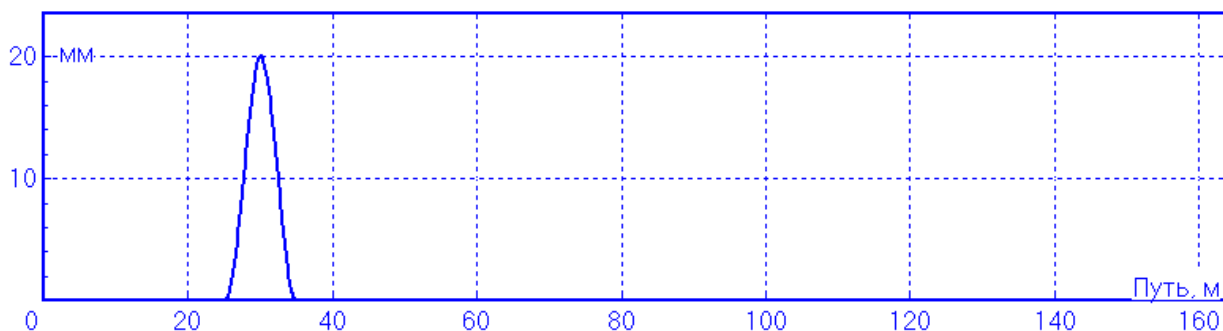


Рис. 3.9. Неровность пути в плане. Файл **g10\_20.way**

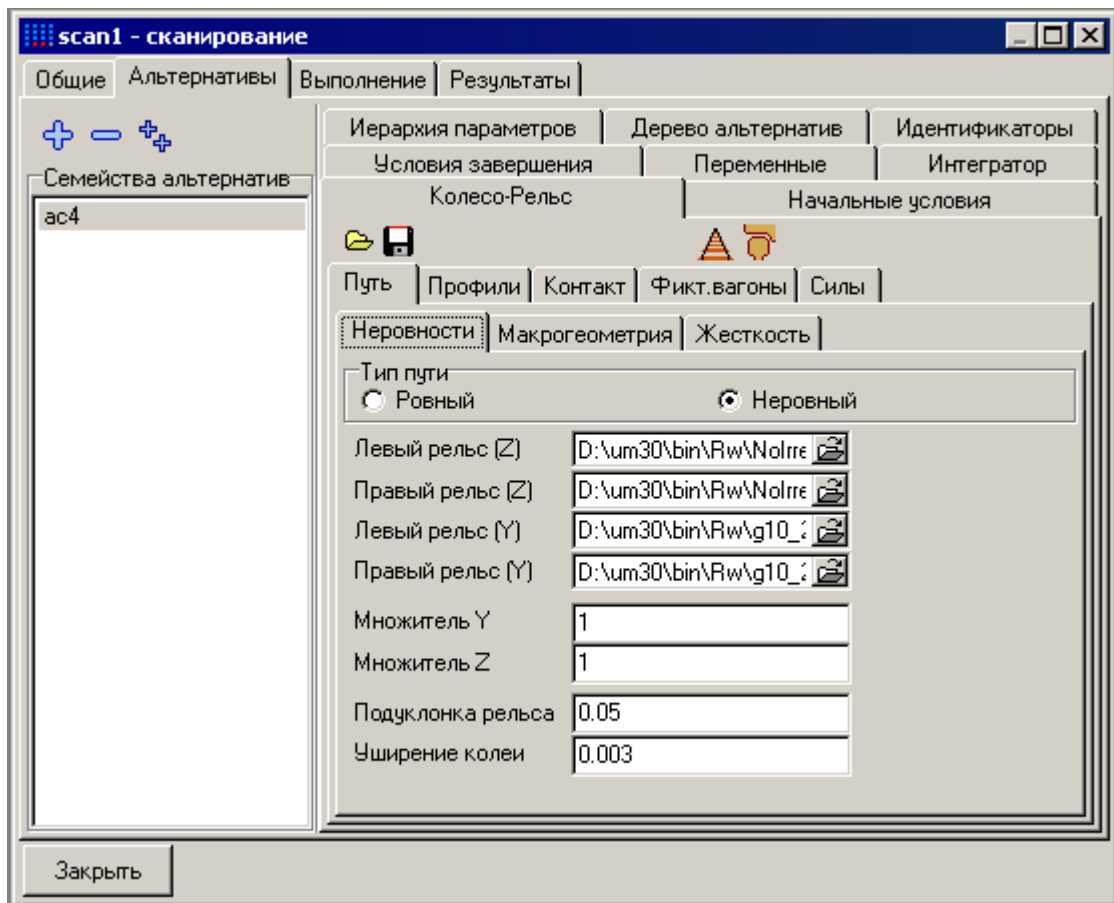


Рис. 3.10. Настройка неровностей путевой структуры

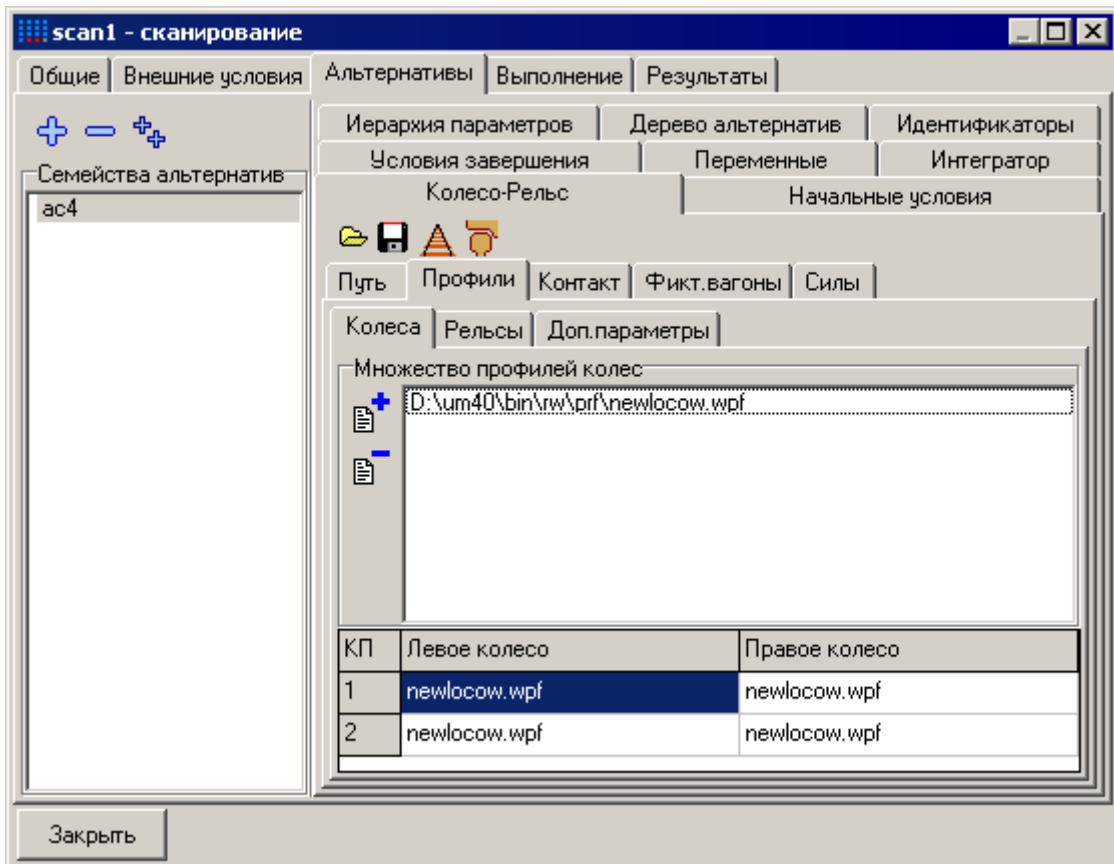


Рис. 3.11. Настройка профилей колес и рельсов

### 3.1.6. Настройка условий завершения

При использовании сканирования численные эксперименты могут завершаться не только по истечении некоторого установленного времени, но также и по выполнению условия вида

*Переменная [Условная операция] Численное\_Значение.*

В качестве переменной может быть установлена любая переменная, вычисляемая в процессе расчетов. При сканировании железнодорожных экипажей по умолчанию формируется следующее условие завершения:

*Путь, пройденный экипажем  $\geq 300$  м.*

То есть, каждый численный эксперимент в данном семействе будет завершен тогда, когда выполнится указанное условие. В нашем случае увеличим путь до 500 метров, как это показано на рис. 3.12.

**Замечание.** Необходимую переменную можно сформировать в Мастере переменных и перенести мышкой в поле с именем переменной. Для не железнодорожных задач по умолчанию устанавливается завершение по времени.

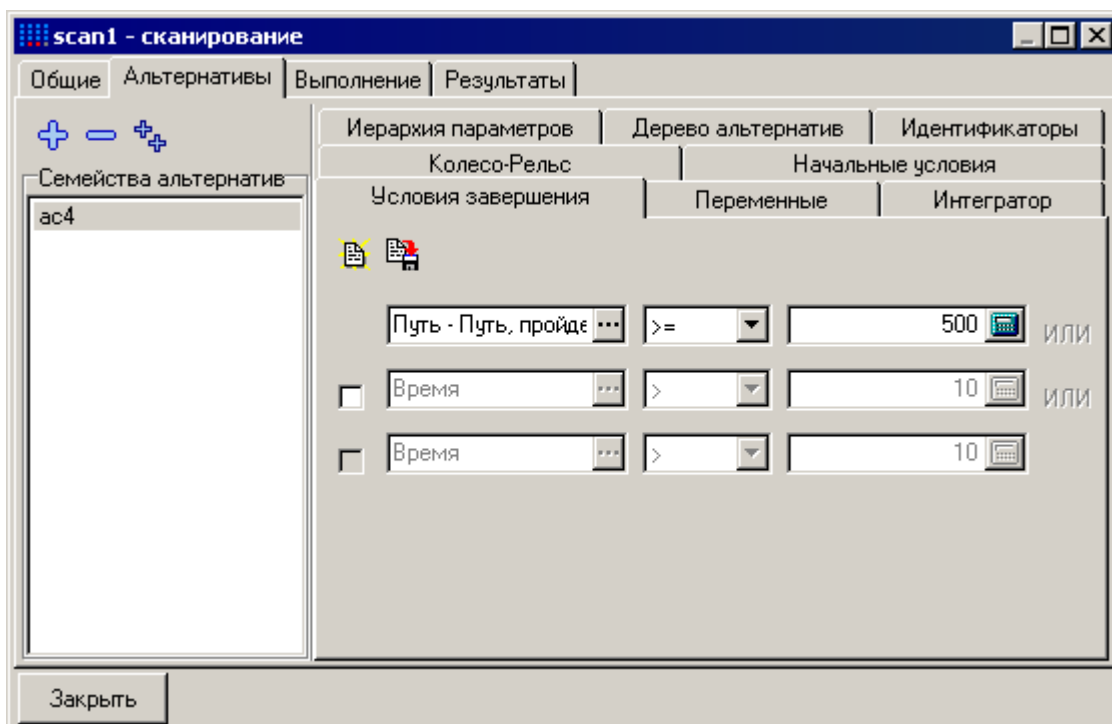


Рис. 3.12. Настройка условий завершения


### 3.1.7. Создание списка сохраняемых переменных

1. Перейдите на закладку **Переменные**.

На этой закладке вы видите *список переменных*, которые будут сохраняться для каждого численного эксперимента при сканировании. Поэтому перед запуском проекта на выполнение совершенно необходимо сформировать те переменные, которые мы будем анализировать после выполнения проекта.

2. Переименуйте закладку **Без имени** в **Stability**, используя кнопку .

3. Откройте **Мастер переменных**.

4. Перейдите на закладку **Лин. перем.**, выберите тело **WheelSet1.Wset** в списке слева, в поле **Компонента** установите **Y** (поперечное направление для железнодорожных экипажей). Кнопкой  создайте переменную и перетащите ее в список переменных на закладку **Stability**.

5. В **Мастере переменных** перейдите на закладку **Ж.-д. экипаж**. В списке железнодорожных переменных выберите **Путь**. Создайте эту переменную и перетащите ее также в список переменных на закладку **Stability**. Закройте **Мастер переменных**.

После выполнения всех указанных выше действий список сохраняемых переменных должен выглядеть так, как показано на рис. 3.13<sup>1</sup>. Теперь проект сканирования описан полностью. Перейдем к его выполнению.

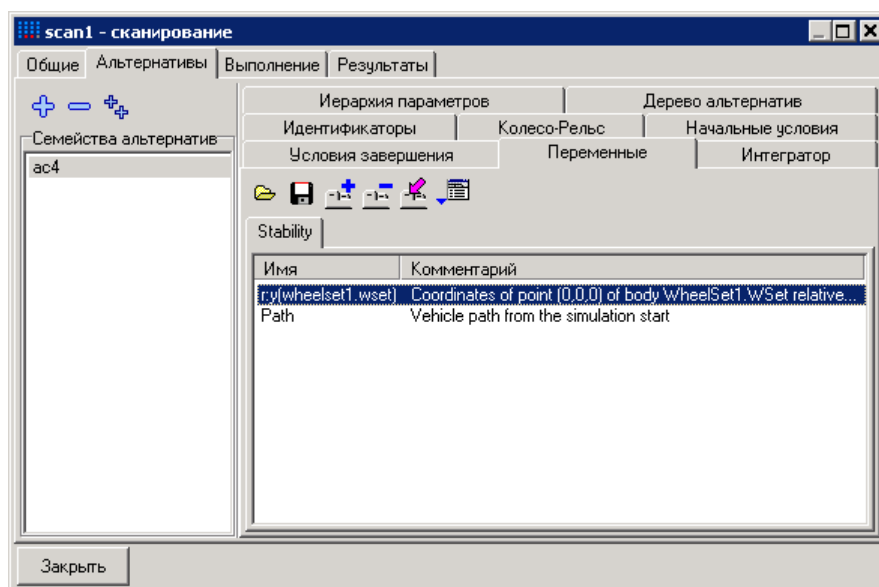


Рис. 3.13. Сканирование: список сохраняемых переменных

<sup>1</sup> Имена и комментарии к переменным будут по-русски

## 3.2. Выполнение проекта сканирования

1. Перейдите на закладку **Выполнение**.
2. При правильном описании проекта в поле **Протокол** появится сообщение «**Ошибки не обнаружены**», см. рис. 3.14.
3. Нажмите кнопку **Запустить**.

Начнется выполнение численных экспериментов. В протоколе будет отмечаться время начала и окончания каждого численного эксперимента. Индикатор прогресса показывает отношение числа полностью выполненных экспериментов к их общему числу, см. рис. 3.15.

Модель автомотрисы относительно простая, поэтому моделирование движения будет выполняться довольно быстро, примерно от 2 до 10 секунд, в зависимости от производительности вашего компьютера.

4. По завершении проекта появится сообщение «**Сканирование закончено**».

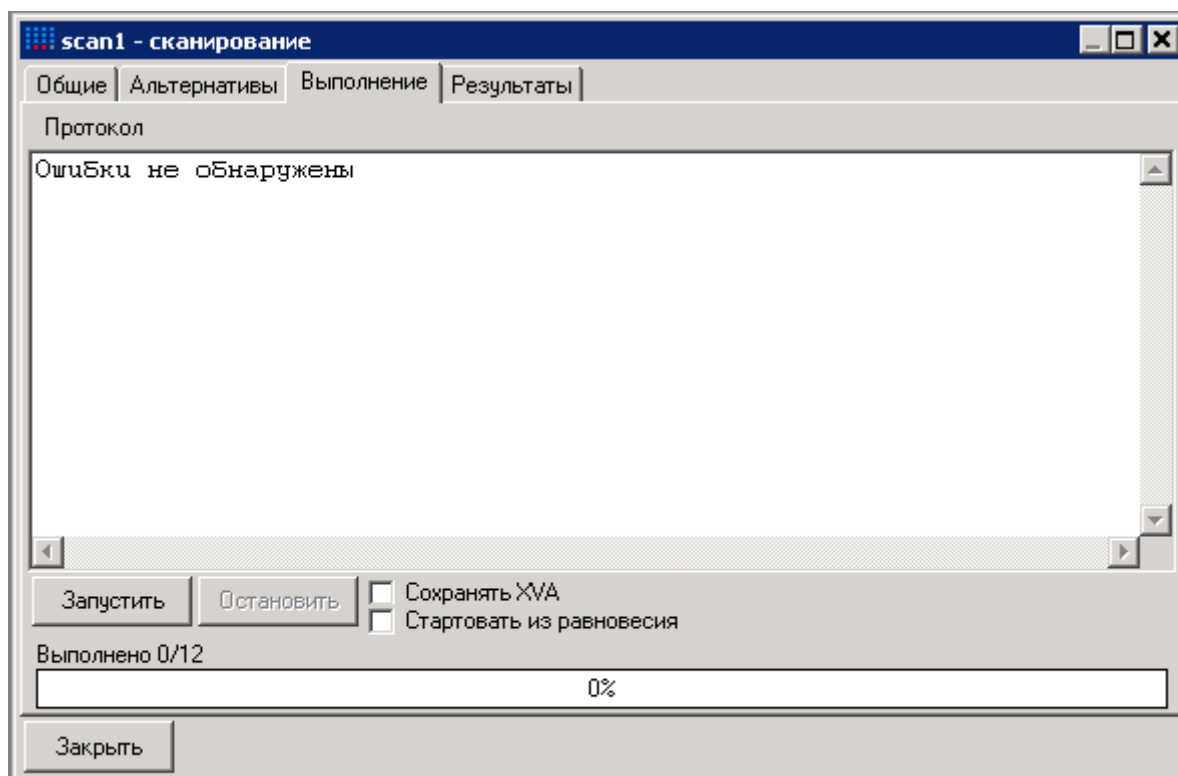


Рис. 3.14. Запуск проекта сканирования

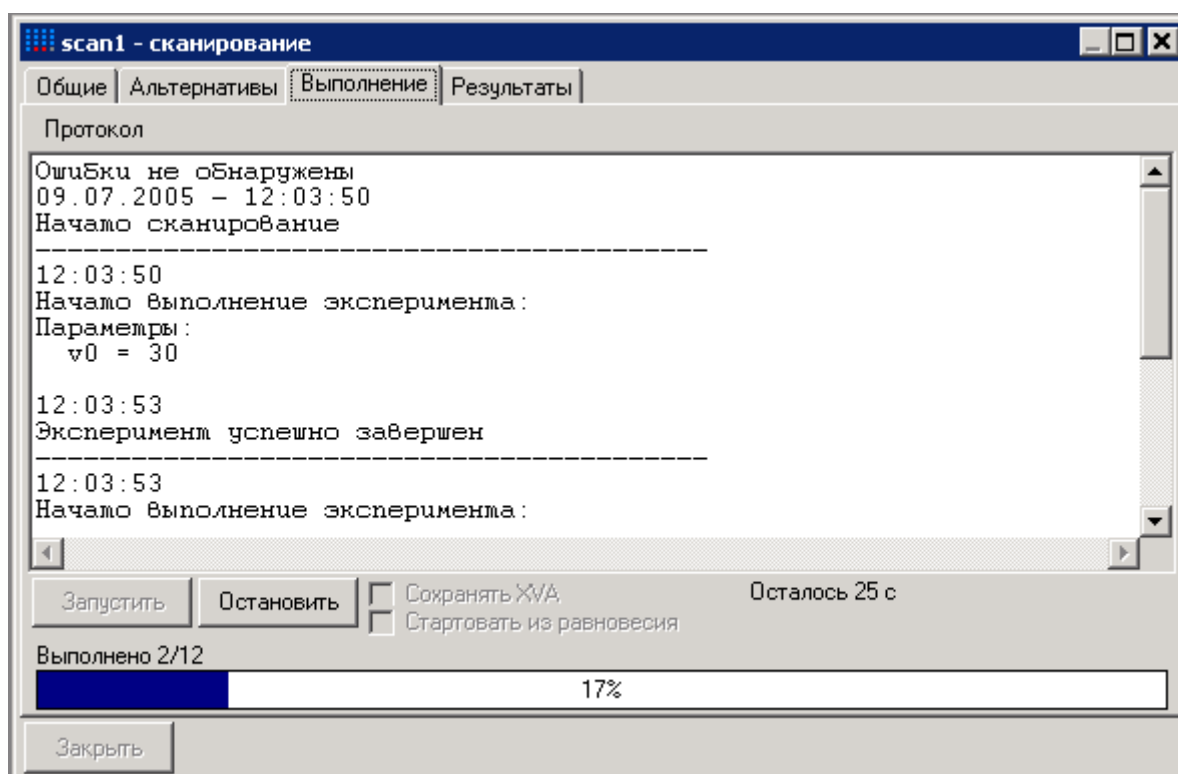


Рис. 3.15. Выполнение проекта сканирования

### 3.3. Анализ результатов сканирования

#### 3.3.1. Анализ результатов отдельных экспериментов

После выполнения всех расчетов перейдем к анализу полученных результатов.

1. Выберите закладку **Результаты / ас4**.

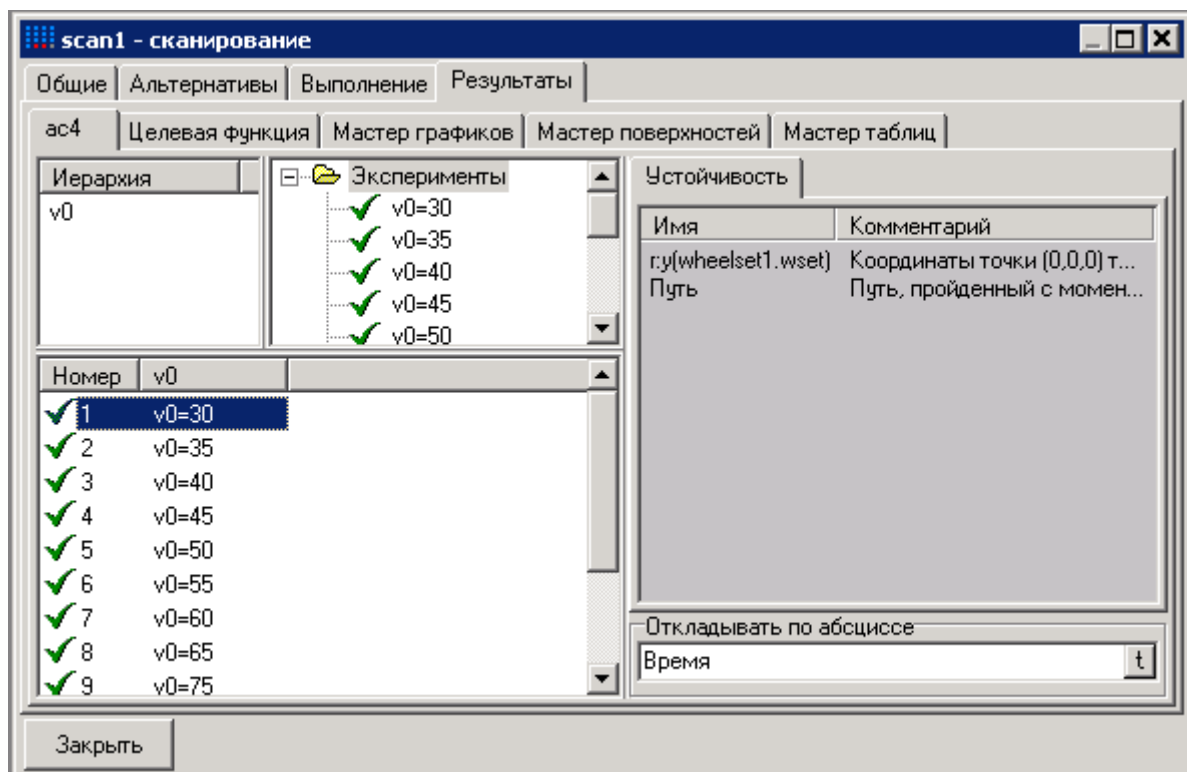


Рис. 3.16. Результаты сканирования

Проанализируем результаты моделирования для отдельных экспериментов. Сравним осциллограммы поперечных колебаний первой колесной пары для скорости 30 и 90 м/с.

Так как на разных скоростях мотриса пройдет один и тот же путь за разное время, то для сравнительного анализа осциллограмм процессов удобнее по оси абсцисс отложить путь.

2. Выберите переменную **Путь** в списке рассчитанных переменных на закладке **Устойчивость** и перетащите ее вниз в поле **Откладывать по абсциссе**, см. рис. 3.17.

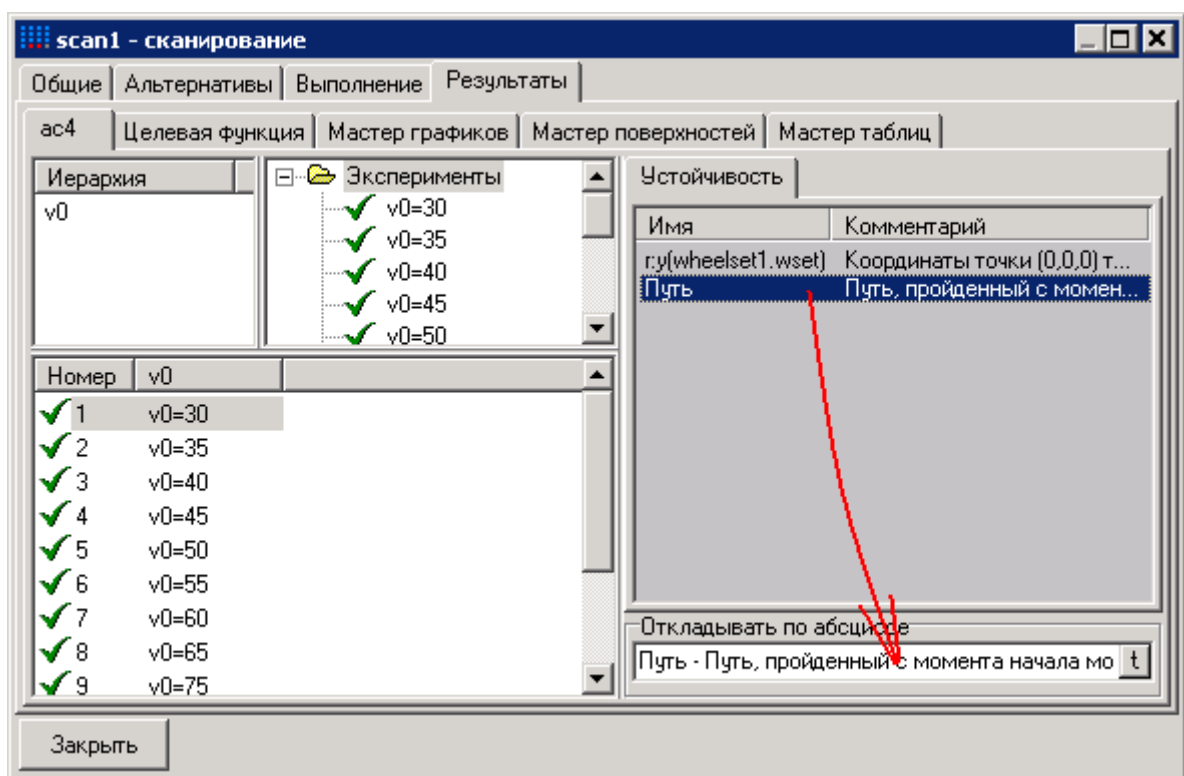


Рис. 3.17. Установить «путь» по оси абсцисс

3. Откройте новое графическое окно.
4. Вернитесь в окно проекта сканирования, в списке проделанных экспериментов в левой нижней части закладки **ac4** выберите эксперимент номер 1 ( $v_0=30$ ).
5. В списке переменных выделите переменную **r:y(wheelset1.wset)** и перетащите ее в графическое окно.
6. В окне проекта сканирования выберите эксперимент номер 12 ( $v_0 = 90$ ), и перетащите переменную **r:y(wheelset1.wset)** в графическое окно уже для этого эксперимента, см. рис. 3.18.

Таким образом, на рис. 3.18 ясно видно, что поперечные колебания первой колесной пары, возбужденные единичной неровностью на скорости 30 м/с со временем затухают, а на скорости 90 м/с – превращаются в незатухающие колебания, т.н. предельный цикл. Другими словами, на скорости 30 м/с мотрису устойчива, на скорости 90 м/с – неустойчива.

7. Постройте график поперечных колебаний первой колесной пары для скоростей 65 и 70 м/с. Видно, что при движении со скоростью 65 м/с амплитуда поперечных колебаний колесной пары со временем затухает, а при 70 м/с – уже нет. Таким образом критическая скорость модели находится в этом диапазоне скоростей.

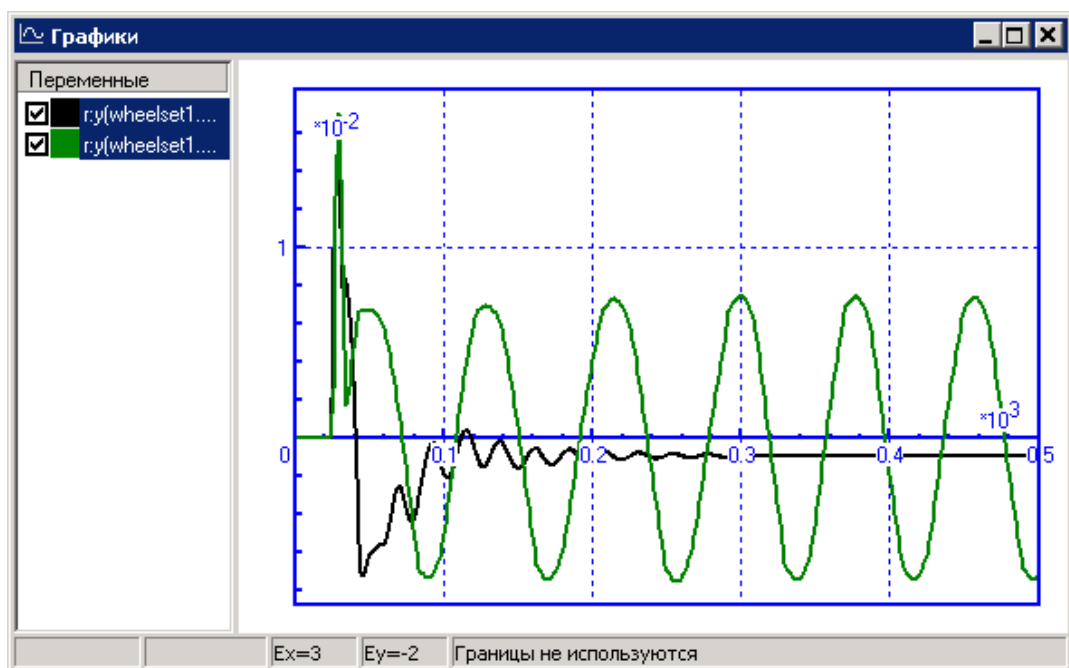



Рис. 3.18. Поперечные колебания первой колесной пары:  
черный график – скорость 30 м/с,  
зеленый график – скорость 90 м/с.

### 3.3.2. Анализ сводных данных

Реализованные в модуле оптимизации инструменты позволяют не только строить графики рассчитанных величин для отдельного численного эксперимента, но также строить так называемые сводные графики.

Построим график зависимости СКО поперечных колебаний первой колесной пары от скорости движения моторсы, аналогичный графику на рис. 3.3.

1. Перейдите на закладку **Результаты / Мастер графиков**.
2. В списке переменных выберите **r:y(wheelset1.wset)**.
3. В поле **Функционал** выберите **RMS** (Root mean square – среднеквадратическое отклонение, СКО).
4. В поле **Параметр** выберите **v0**.
5. На панели быстрого доступа в верхней части окна нажмите кнопку  для формирования сводного графика.

В графическом поле будет построен сводный график, анализ которого показывает, что критическая скорость движения автотрассы находится в интервале от 55 до 75 м/с.

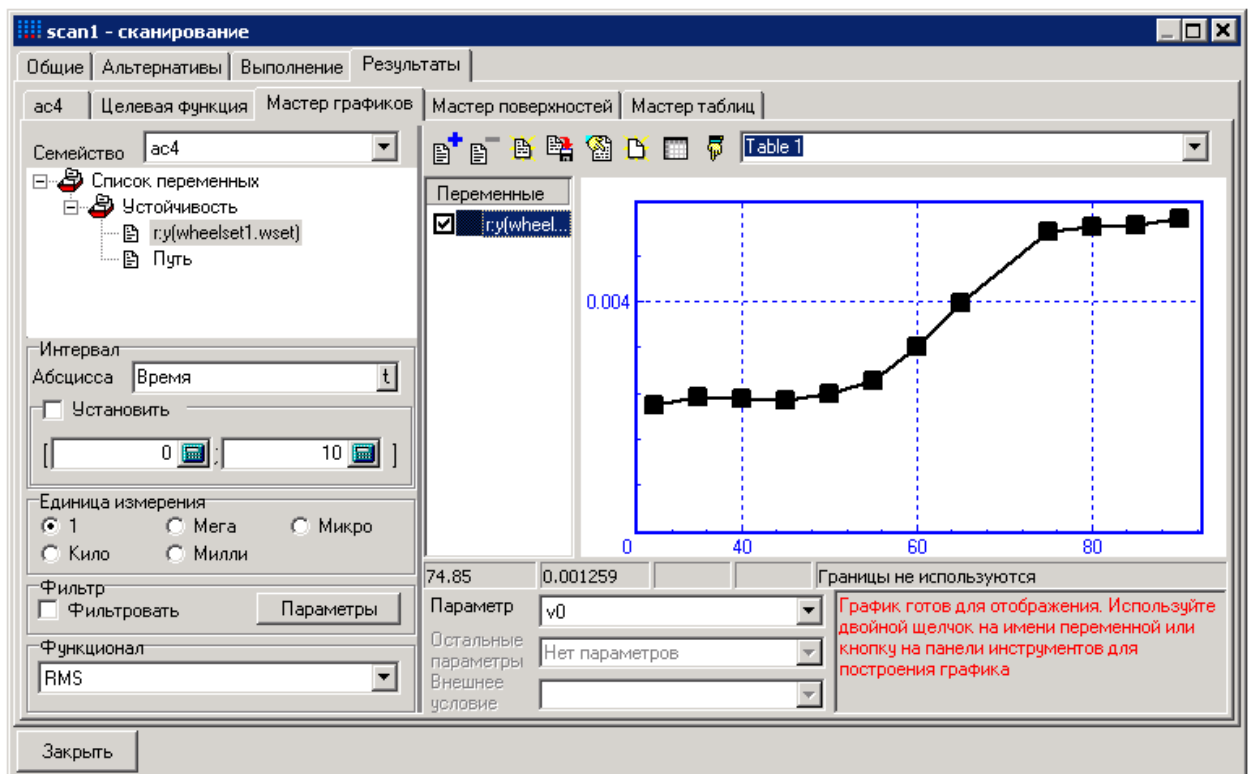


Рис. 3.19. Построение сводных графиков