



Начинаем работать



# Моделирование динамики железнодорожных экипажей

Это руководство поможет вам изучить особенности создания моделей, содержащих упругие тела, и анализа их динамики в программном комплексе «Универсальный механизм»

## Оглавление

<b>НАЧИНАЕМ РАБОТАТЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНОЙ КОЛЁСНОЙ ПАРЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ КОЛЁСНОЙ ПАРЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОТДЕЛЬНОЙ КОЛЁСНОЙ ПАРЫ .....</b>	<b>6</b>
1.2.1. Подготовка среды моделирования динамики рельсового экипажа .....	6
1.2.2. Движение по идеально ровному пути .....	8
<b>2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ АВТОМОТРИСЫ АС4 .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕЛИ.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. СОЗДАНИЕ НОВОГО ОБЪЕКТА – РЕЛЬСОВОГО ЭКИПАЖА .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. ДОБАВЛЕНИЕ КОЛЁСНЫХ ПАР .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4. ГРАФИЧЕСКИЕ ОБРАЗЫ .....</b>	<b>19</b>
2.4.1. Создание графического образа пружины .....	20
2.4.2. Добавление заранее подготовленных ГО .....	21
2.4.3. Графические образы правых букс .....	22
<b>2.5. ДОБАВЛЕНИЕ БУКС К МОДЕЛИ АВТОМОТРИСЫ.....</b>	<b>23</b>
<b>2.6. ДОБАВЛЕНИЕ КУЗОВА К МОДЕЛИ АВТОМОТРИСЫ.....</b>	<b>28</b>
<b>2.7. ДОБАВЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....</b>	<b>29</b>
2.7.1. Пружины.....	29
2.7.2. Наклонные гасители .....	33
2.7.3. Продольные тяговые поводки.....	34
2.7.4. Горизонтальные гасители.....	36
<b>3. ПРИМЕР СОЗДАНИЯ И АНАЛИЗА ПРОЕКТА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ МОДЕЛИ АВТОМОТРИСЫ АС4 .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА СКАНИРОВАНИЯ.....</b>	<b>38</b>
3.1.1. Постановка задачи .....	38
3.1.2. Создание нового проекта .....	40
3.1.3. Добавление новой модели к проекту сканирования .....	41
3.1.4. Описание иерархии параметров .....	42
3.1.5. Настройка железнодорожных параметров.....	44
3.1.6. Настройка параметров моделирования .....	46
3.1.7. Настройка условий завершения .....	47
3.1.8. Создание списка сохраняемых переменных.....	48
<b>3.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЕКТА СКАНИРОВАНИЯ.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СКАНИРОВАНИЯ .....</b>	<b>50</b>
3.3.1. Анализ результатов отдельных экспериментов .....	50
3.3.2. Анализ сводных данных .....	52

## 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 колёсной 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> [www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs\\_um.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs_um.pdf)

# 1. Моделирование движения отдельной колёсной пары

## 1.1. Создание модели колёсной пары

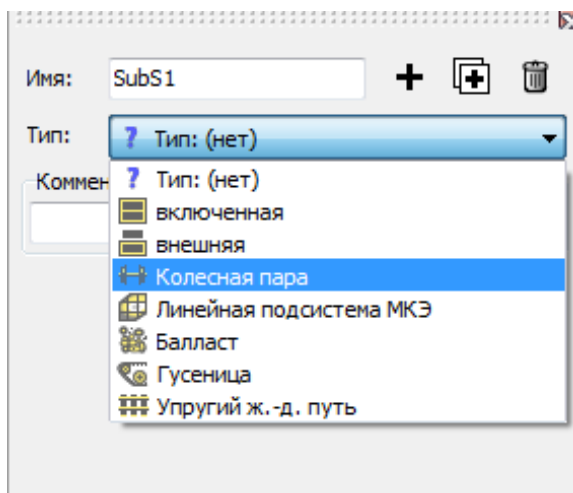
### Создайте новый объект

1. В программе **UM Input** выберите пункт меню **Файл | Новый объект**.

### Добавьте колёсную пару

Колёсная пара – одна из стандартных подсистем **UM**. Для добавления новой колёсной пары выполните следующие действия.

2. Перейдите на ветку **Подсистемы** в списке элементов модели.
3. Добавьте новую подсистему.
4. Выберите тип подсистемы **Колёсная пара**.



В анимационном окне появится изображение колёсной пары, см. рис. 1.1.

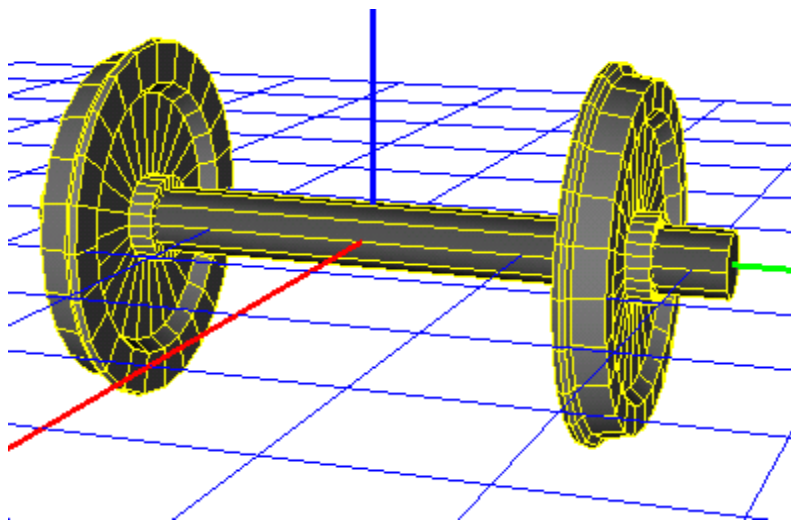


Рис. 1.1. Изображение колёсной пары

**Замечание.** При добавлении колёсной пары к списку параметров модели автоматически добавится параметр  $v_0$  – скорость продольного движения экипажа (в нашем случае скорость продольного движения колёсной пары).

5. Переименуйте колёсную пару. В поле **Имя** введите **КП1**.
6. Сохраните объект под именем **WSet**. Используйте пункт меню **Файл | Сохранить как....** Модель готова к загрузке в программу моделирования движения.
7. Перейдите к программе моделирования. Выберите пункт меню **Объект | Моделирование....**

## 1.2. Моделирование динамики отдельной колёсной пары

### 1.2.1. Подготовка среды моделирования динамики рельсового экипажа

Для моделирования динамики рельсового экипажа необходимо установить следующие данные: профили колёс и рельсов.

По умолчанию назначаются следующие профили:

- новый локомотивный профиль, файл *newlocow.wpf*;
- новый профиль рельса R65, файл *r65new.rpf*.

#### Задание профилей колёс и рельсов

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

1. Откройте окно инспектора моделирования объекта. Для этого выберите пункт меню **Анализ | Моделирование....**
2. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс**.
3. Перейдите на вкладку **Профили | Колеса | Профили**.
4. Нажмите кнопку **+** (добавить профиль к списку) и в появившемся диалоге выбора файла выберите файл **newwagnw.wpf**.
5. В таблице в верхней части окна, выберите только что добавленный профиль, вызовите контекстное меню и выберите пункт меню **Назначить всем**, см. рис. 1.2, сверху.
6. Перейдите на вкладку **Рельсы**.
7. В полях **Левый рельс** и **Правый рельс** выберите нужный файл **\*.rpf**, например, **r50.rpf**, см. рис. 1.2, снизу.

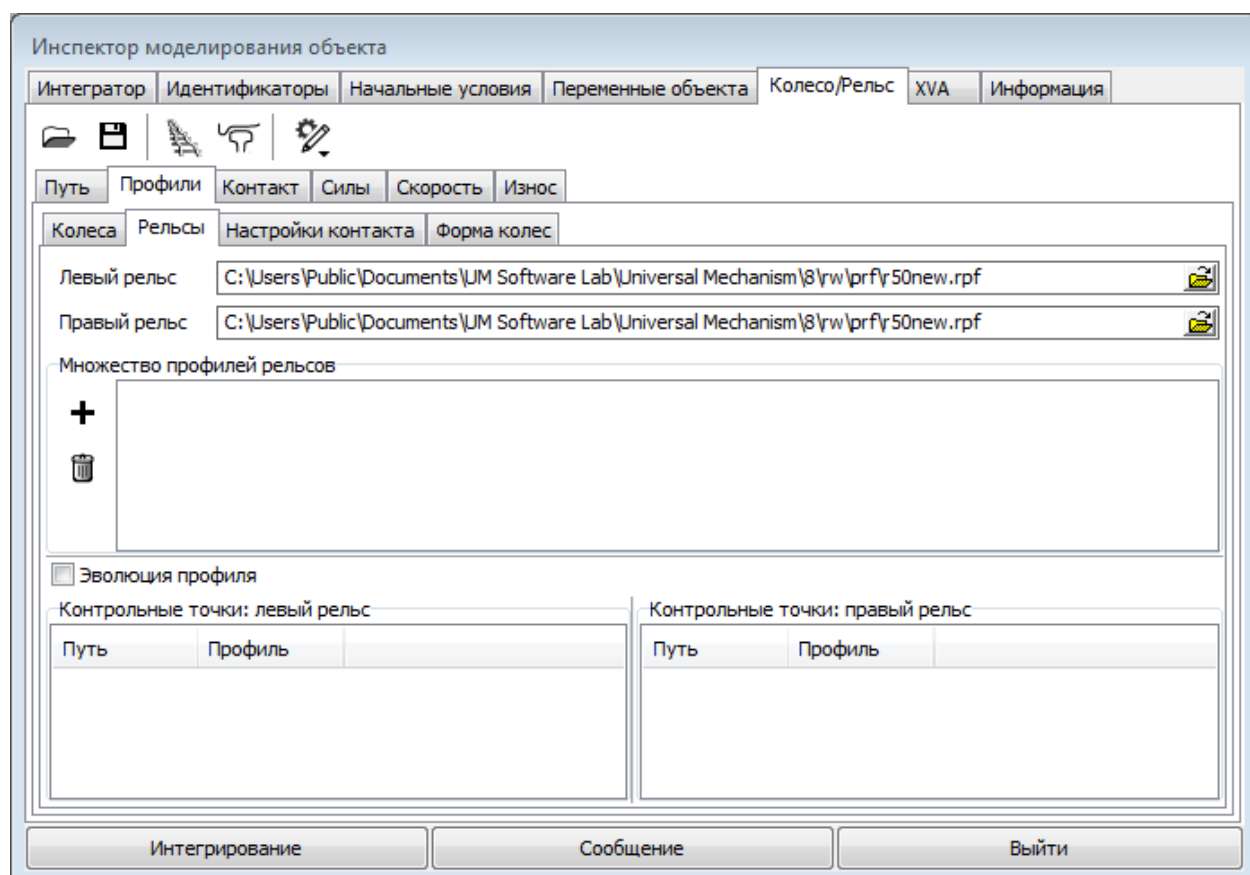
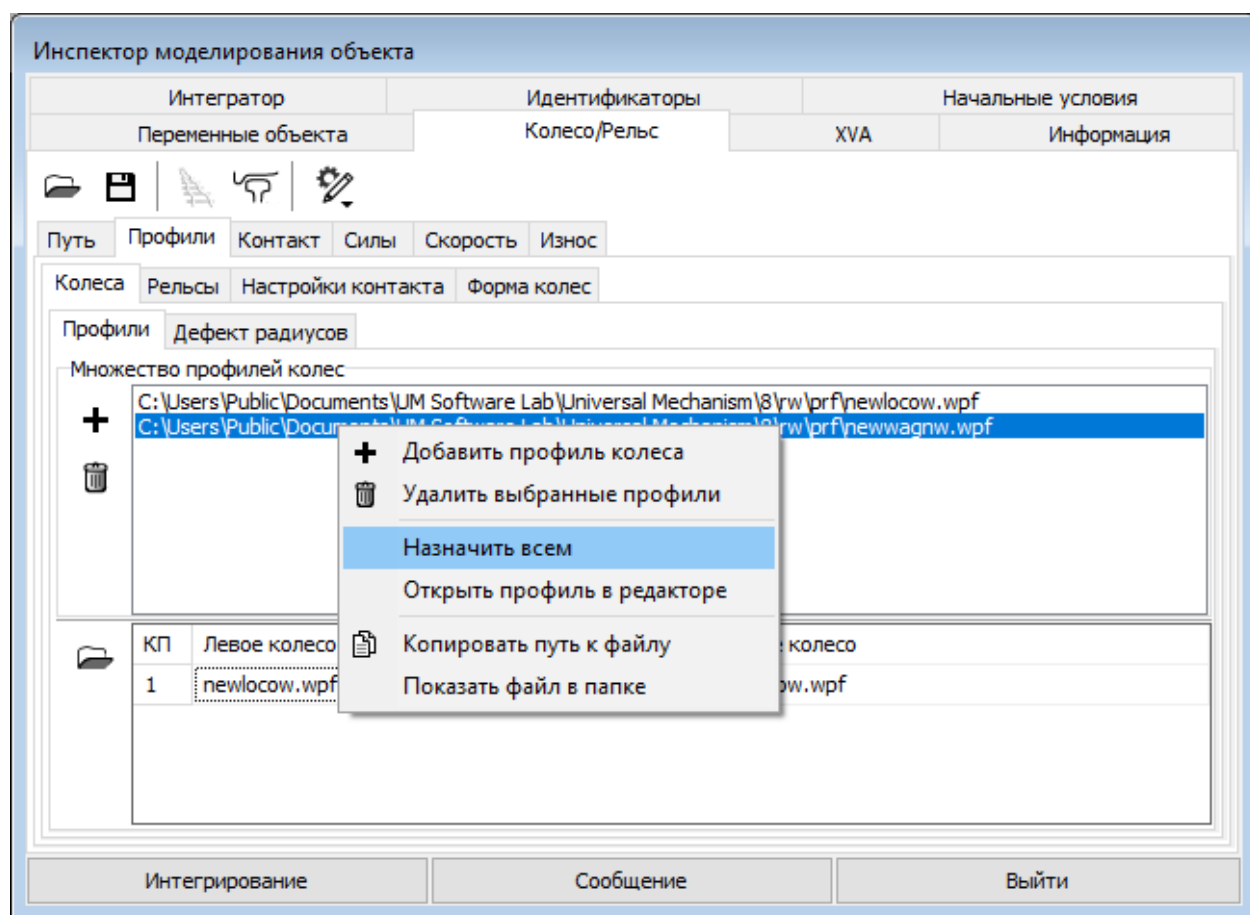



Рис. 1.2. Настройка профилей колёс и рельсов

8. Нажмите кнопку . Появится новое графическое окно с изображением выбранных профилей колёс и рельсов, см. рис. 1.3.
9. Закройте окно с изображением выбранных профилей.

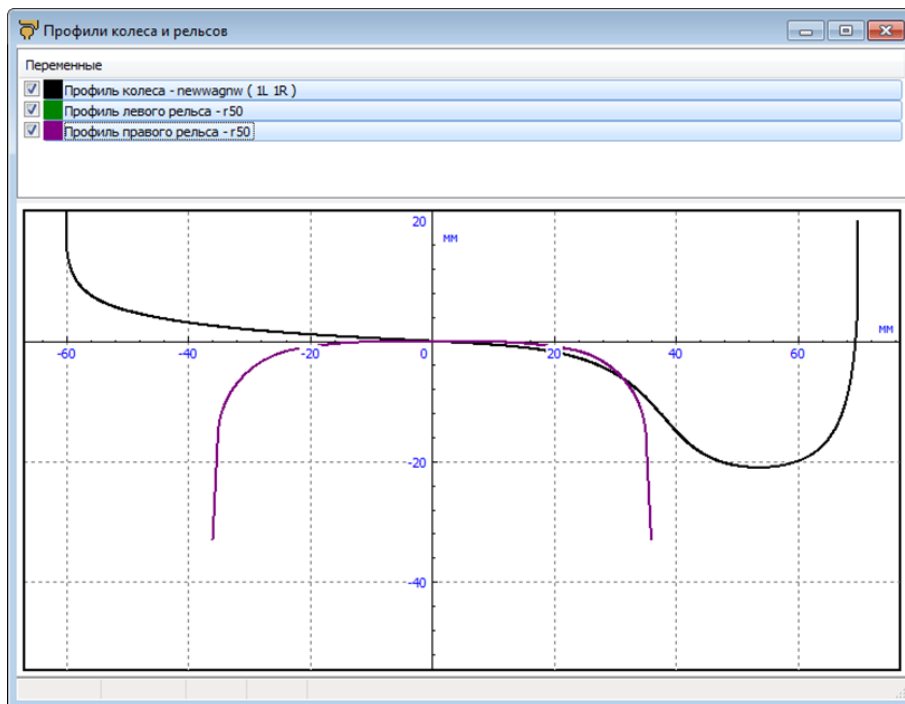


Рис. 1.3. Выбранные профили колёс и рельсов

## 1.2.2. Движение по идеально ровному пути

### Установим движение в идеально ровной прямой

1. Перейдите в окно **Инспектора моделирования объекта**, кнопка **F9**.
2. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Путь | Неровности**.
3. В поле **Тип пути** выберите **Ровный**.
4. Перейдите на вкладку **Макрогеометрия**.
5. В поле **Тип пути** выберите **Прямая**.

### Окно анимации контакта

Откроем новое окно для анимации контакта колёс 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, см. рис. 1.4.

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 расчёта динамики силы в окне отображаться не будут.



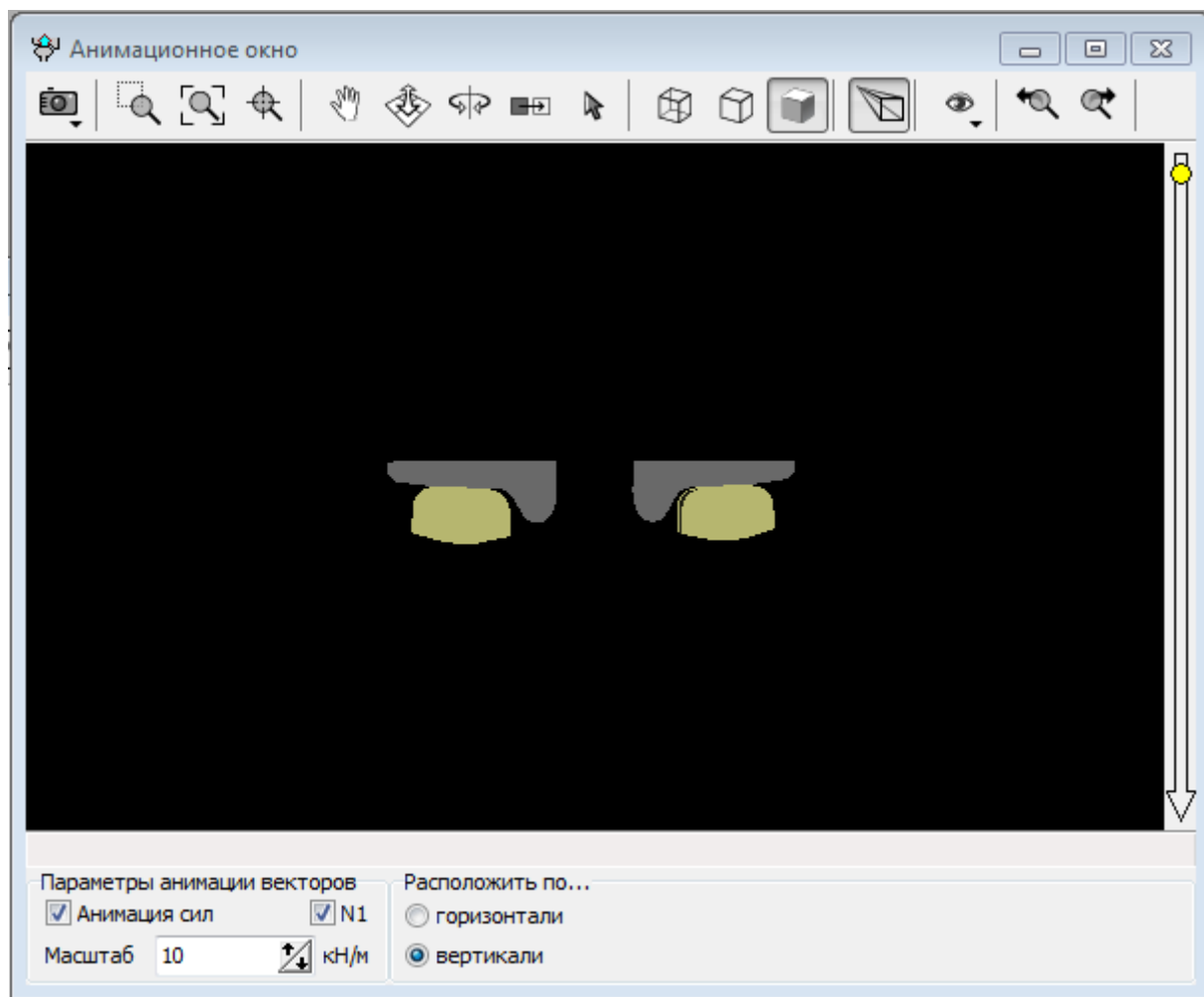


Рис. 1.4. Окно анимации контакта

### Стационарное движение

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

1. Перейдите в окно **Инспектора моделирования объекта**, кнопка **F9**.
2. Перейдите на вкладку **Интегратор**.
3. В поле **Численный метод** установите значение **Park**.
4. В поле **Погрешность** установите **4E-8**.
5. Нажмите кнопку **Интегрирование**.

При нулевых начальных значениях координат реализуется стационарный режим движения, при котором колёсная 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**.

## Возмущённое движение

Сместим колёсную пару от положения равновесия на 1 мм и проанализируем её движение.

1. Перейдите в окно инспектора моделирования объекта, кнопка *F11*, см. рис. 1.5.
2. Перейдите на вкладку **Начальные условия | Координаты**.
3. Установите начальное значение второй координаты равное **0.001**. После окончания ввода числа нажмите **Enter**.
4. Запустите моделирование движения. Убедитесь, что колёсная пара неустойчива – малое возмущение начальных условий приводит к колебаниям значительной амплитуды.

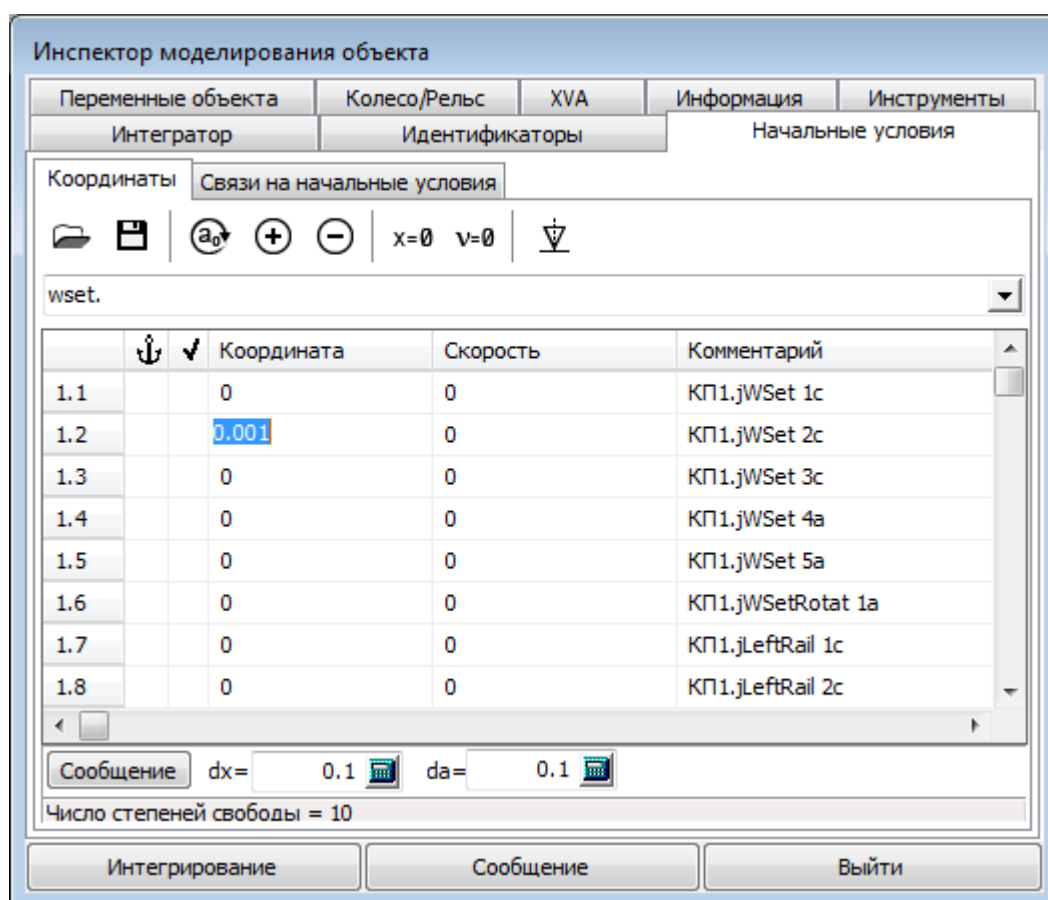



Рис. 1.5. Смещение колёсной пары от положения равновесия

Выполним этот расчёт ещё 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 вкладку **Координаты**.
8. Выберите координату **КП1 | jWSet | 1.2**. Эта координата – поперечное смещение колёсной пары.
9. Отошлите переменную в контейнер с помощью кнопки .

10. Повторите эти действия для координаты **КП1 | jWSet | 1.4** (угол поворота вокруг вертикальной оси).
11. Перетащите созданные переменные в графическое окно.
12. Запустите моделирование движения.

В графическом окне построятся графики поперечной координаты колёсной пары и угла поворота колёсной 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, см. рис. 1.6.

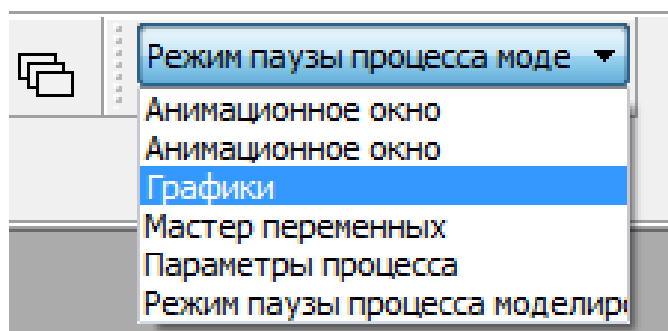


Рис. 1.6. Список окон

Изменим начальную скорость движения экипажа и время интегрирования.

13. Перейдите в **Инспектор моделирования объекта** на вкладку **Идентификаторы**.
14. В поле **Выражение** для скорости **v0** введите **10** (м/с).
15. Запустите моделирование движения.

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

## 2. Создание модели автомотрисы АС4

Рассмотрим процесс создания упрощённой модели автомотрисы АС4. Основное упрощение состоит в отсутствии в модели тяговых двигателей. Готовая модель находится в каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\Rail Vehicles\AC4.](#)

### 2.1. Основные элементы модели

Модель включает следующие элементы:

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

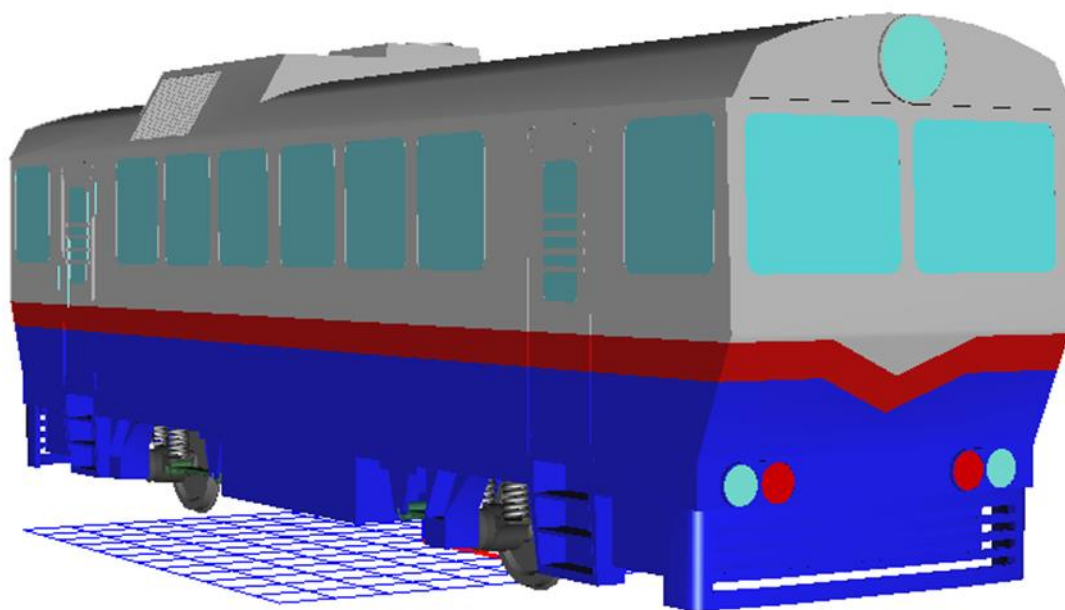


Рис. 2.1. Общий вид готовой модели автомотрисы

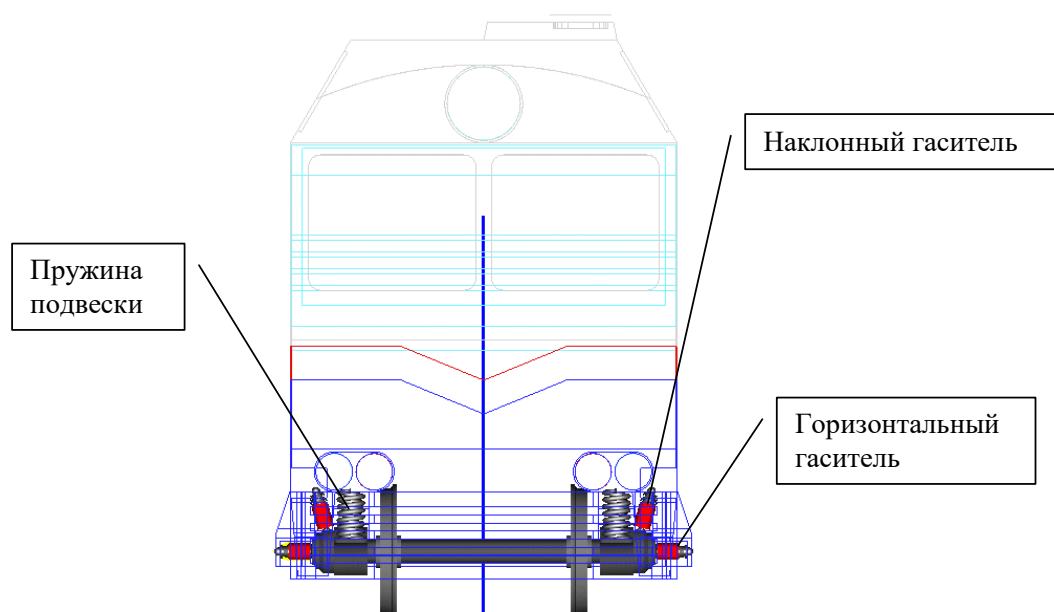


Рис. 2.2. Основные элементы модели

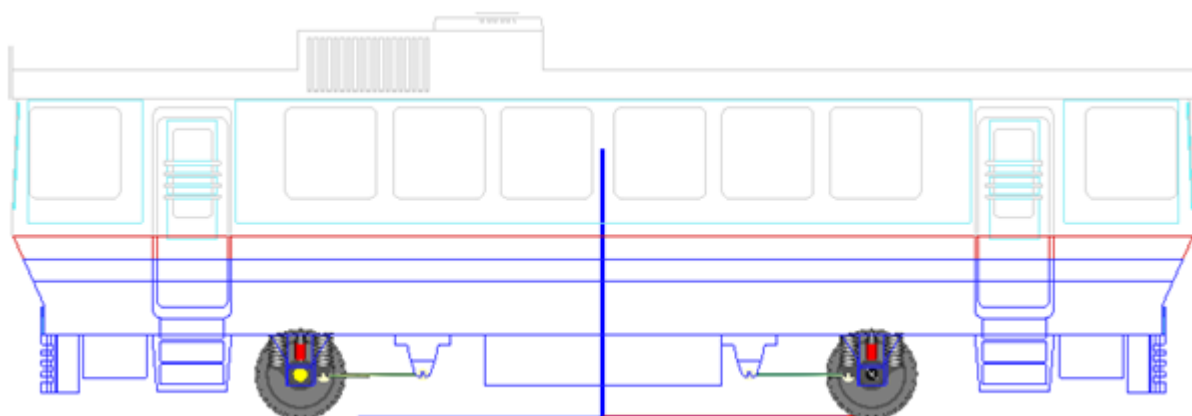



Рис. 2.3. Основные элементы модели

## 2.2. Создание нового объекта – рельсового экипажа

1. Запустите программу **UM Input**.
2. Создайте новый объект, щёлкнув 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....**

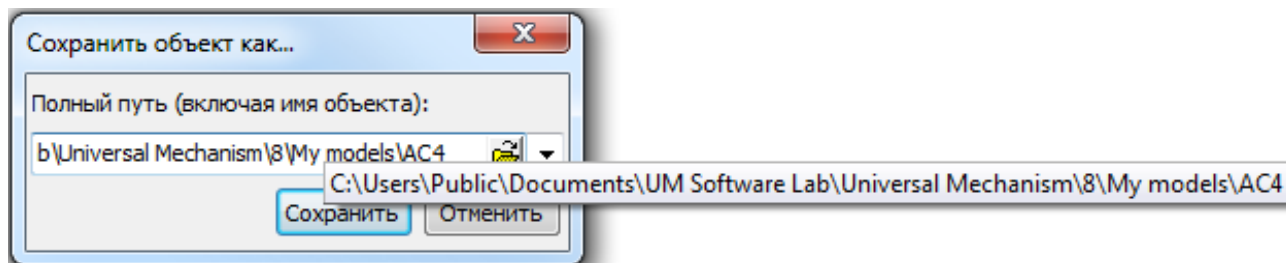


Рис. 2.4. Пример задания нового имени объекту

Выберите нужный каталог или напишите полный путь, включая имя объекта AC4 (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 AC4, в котором будут размещаться все генерируемые программой файлы.

В процессе сборки объекта переключайте режимы анимационного окна **Весь объект** / **Текущий элемент**, чтобы видеть в одном случае отдельный элемент, который в данный момент описывается (например, пружина вместе с кузовом и колёсной парой, которые она соединяет), или полный объект – в другом режиме.

## 2.3. Добавление колёсных пар

Общая информация о стандартной подсистеме, соответствующей колёсной паре, содержится в [Главе 8](#), п. *Колёсная пара*.

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

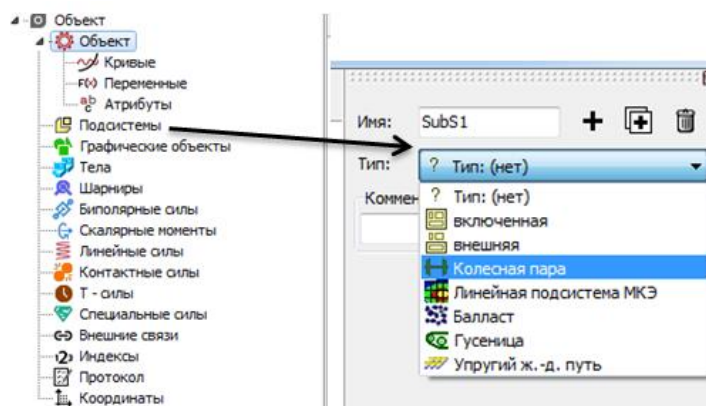


Рис. 2.5. Добавление стандартной подсистемы – "Колёсная пара"

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

2. Задайте положение колёсной пары относительно экипажа. Перейдите на вкладку **Положение**, в поле **Сдвиг | x** введите **L1** (рис. 2.6, справа). Таким образом, идентификатор **L1** задает сдвиг колёсной пары в продольном направлении. Нажмите клавишу **Enter** и введите численное значение идентификатора **L1=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 отсчёта инерциальной системы координат (СК0): на уровне головки рельса (рекомендуется) или на уровне осей колёсных пар (устаревшее). В этом уроке выберем рекомендуемое положение начала отсчёта инерциальной системы координат на уровне головки рельса. Для этого колёсную пару следует сдвинуть вверх на величину радиуса круга катания. В поле **Сдвиг | z** введите идентификатор **rwheel** далее назначьте ему значение **0.525**, рис. 2.6, справа сверху.

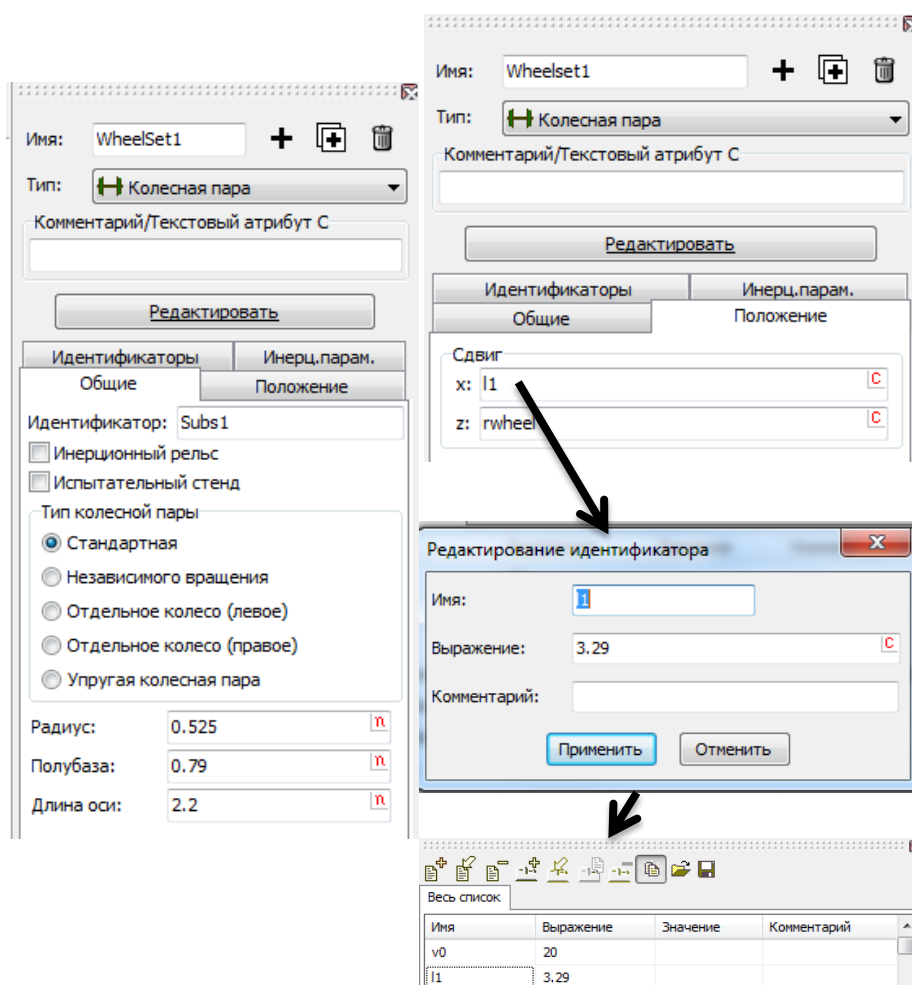


Рис. 2.6. Изменение параметров колесной пары



## Инерционные параметры колёсной пары

1. Для изменения инерционных параметров колесной пары перейдите на вкладку **Идентификаторы**.
2. Выделите подсистему **WheelSet1** в списке элементов (рис. 2.7, слева).
3. Колесная пара параметризована следующим образом: **mwset** – масса и **ixwset** – моменты инерции относительно осей X и Z, см. рис. 2.7. В списке идентификаторов задайте значения: для **mwset** = 3650 кг·м<sup>2</sup>, для **ixwset** = 1000 кг·м<sup>2</sup>, для **iywset** = 500 кг·м<sup>2</sup>.

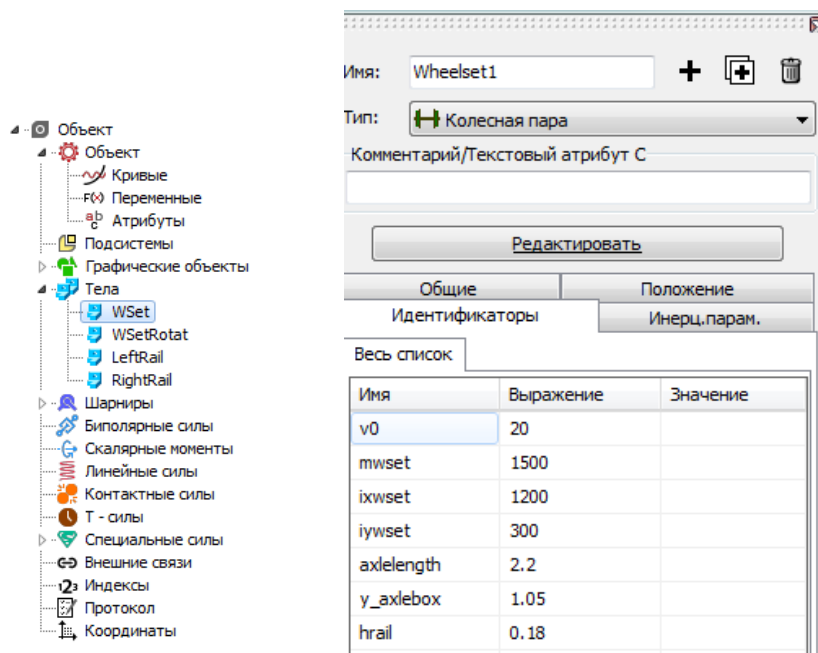

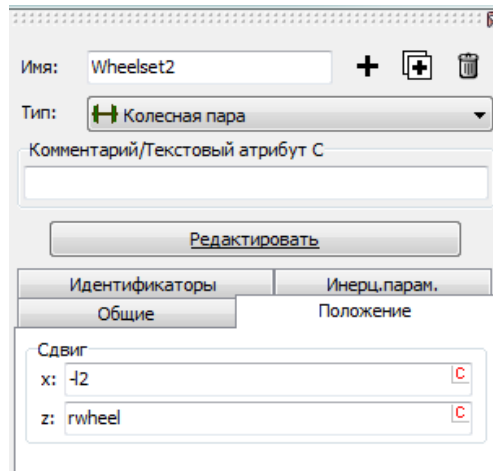





Рис. 2.7. Задание инерционных параметров колёсной пары **WheelSet1**

**Добавление второй колёсной пары**

1. Для добавления к модели второй колёсной пары скопируйте созданную ранее КП, щёлкнув на кнопке . Измените имя второй КП (**WheelSet2**), идентификатор (**WS2**), положение (**-I2**) на одноимённой вкладке, **I2 = 3.71**.



Имя:  +  

Тип:  Колесная пара ▼


Комментарий/Текстовый атрибут C


[Редактировать](#)

Идентификаторы      Инерц.парам.

Общие      Положение

Сдвиг

x:  

z:  

2. Колёсные 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 четырёх тяговых поводков.

В последнее время для создания сложных графических образов, например, кузова, часто используются САПР программы. В UM реализован импорт графических образов из большинства распространённых 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* в инспекторе (рис. 2.8). Пока список графических объектов пустой.

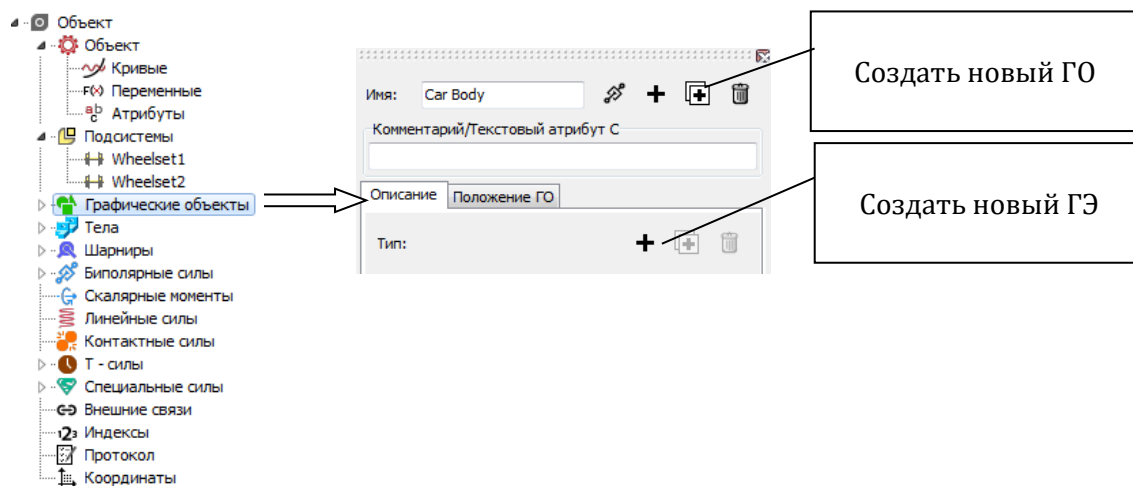


Рис. 2.8. Список ГО. Кнопки и их функции.

### 2.4.1. Создание графического образа пружины

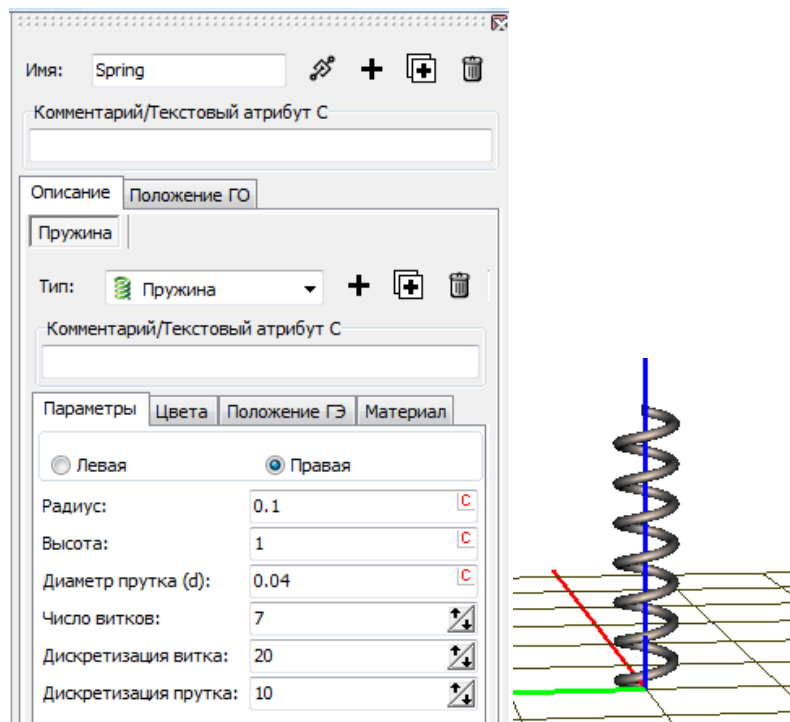



Рис. 2.9. Образ пружины

1. Добавьте графический объект к списку, щёлкнув на кнопке **+** в первом ряду, и измените имя (**Spring**). Затем добавьте графический элемент, щёлкнув на кнопке **+** во втором ряду,
2. Выберите тип **Пружина**. Измените радиус на 0.1 и число витков на 7, рис. 2.9, слева.

**Замечание.** Графические образы, назначаемые обобщённым 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 сохранённые в файлах элементы, в частности, ГО (файлы с расширением \*.img). Все ГО, которые мы включим в данную модель, находятся в каталоге {Данные УМ}\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).

После добавления гасителя в диалоговом окне **Инициализация численных значений** нажмите кнопку **Принять**.

Все эти ГО, за исключением гасителя, созданы с помощью одной из САПР и импортированы в УМ, рис. 2.10.

Обратите внимание, что графический образ кузова (**CarBody**) состоит из нескольких ГО. Графические образы пары поводков

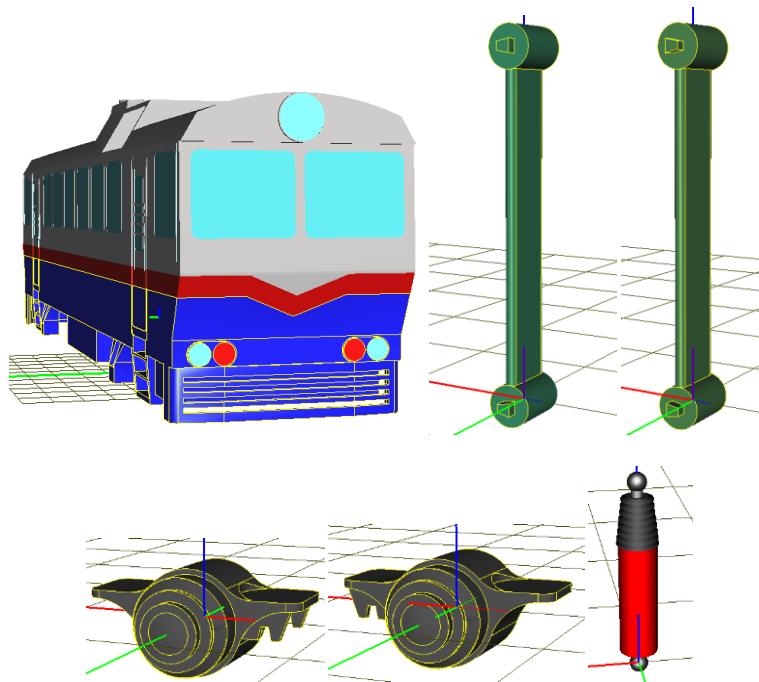


Рис. 2.10. ГО, добавленные в модель

### 2.4.3. Графические образы правых букс

Из файлов были прочитаны ГО *левых* букс. Путём 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: **ГО**, то есть ссылка на один из уже существующих графических объектов. Из выпадающего списка выберите **Axle-box LR**, рис. 2.11, слева

На вкладке **Положение ГЭ** разверните образ на 180 градусов вокруг вертикальной оси, рис. 2.11, справа.

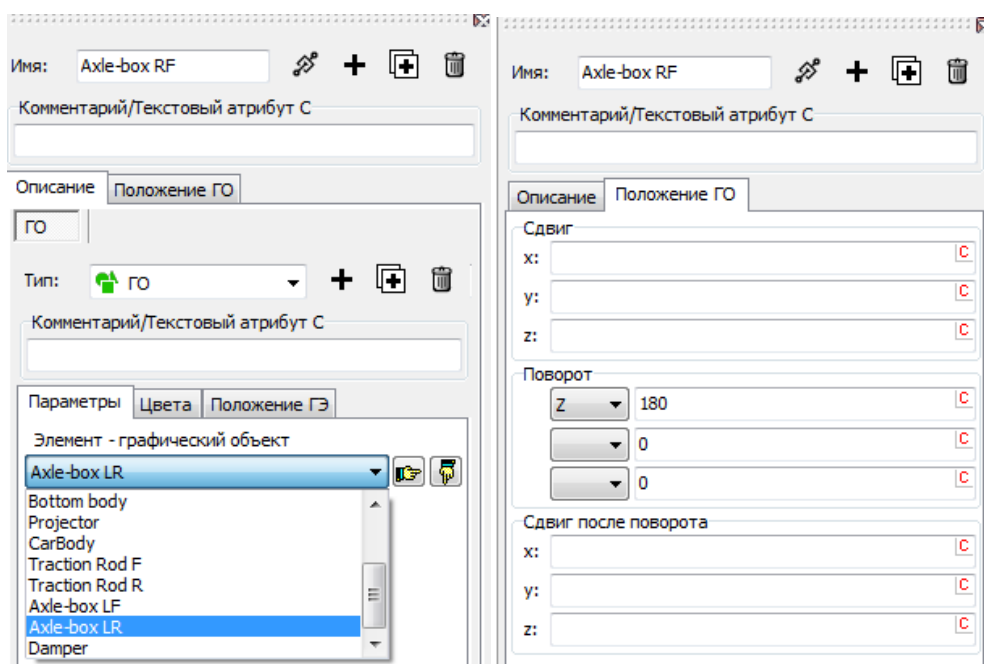


Рис. 2.11. Создание образа правой передней буксы путём поворота ГО левой задней буксы

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

## 2.5. Добавление букс к модели автомотрисы

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

Перейдите к списку тел модели, пока пустому (пункт Тела списка элементов), рис. 2.12, слева.

- Добавьте тело щелчком на кнопке **+**.
- Задайте название тела **Axle-box LF** (левая передняя букса), можно по-русски.
- Выберите одноимённый ГО из выпадающего списка.
- Задайте момент инерции буксы относительно оси вращения с помощью идентификатора **IY\_AxleBox = 3 кг·м<sup>2</sup>** (здесь русские буквы использовать нельзя), рис. 2.12, справа.

**Замечание** В качестве инерционных параметров для букс достаточно задать момент инерции относительно оси **Y**, как сказано выше. Вместе с тем, для интегрирования модели с помощью параллельной модификации метода Парка (**Park Parallel**) нужно также задать массу и все осевые моменты инерции (диагональные элементы тензора инерции). Поэтому, если в дальнейшем вы захотите использовать параллельную модификацию метода Парка для интегрирования уравнений движения этой модели, то инерционные параметры нужно задать так, как показано на рис. 2.12, справа. При задании в качестве инерционных параметров для буксы только момента инерции относительно оси **Y** будут доступны все методы интегрирования, кроме **Park Parallel**.

- Задайте моменты инерции буксы относительно осей **X** и **Z** с помощью идентификаторов **IX\_AxleBox = 3 кг·м<sup>2</sup>**, **IZ\_AxleBox = 3 кг·м<sup>2</sup>**, рис. 2.12, справа.

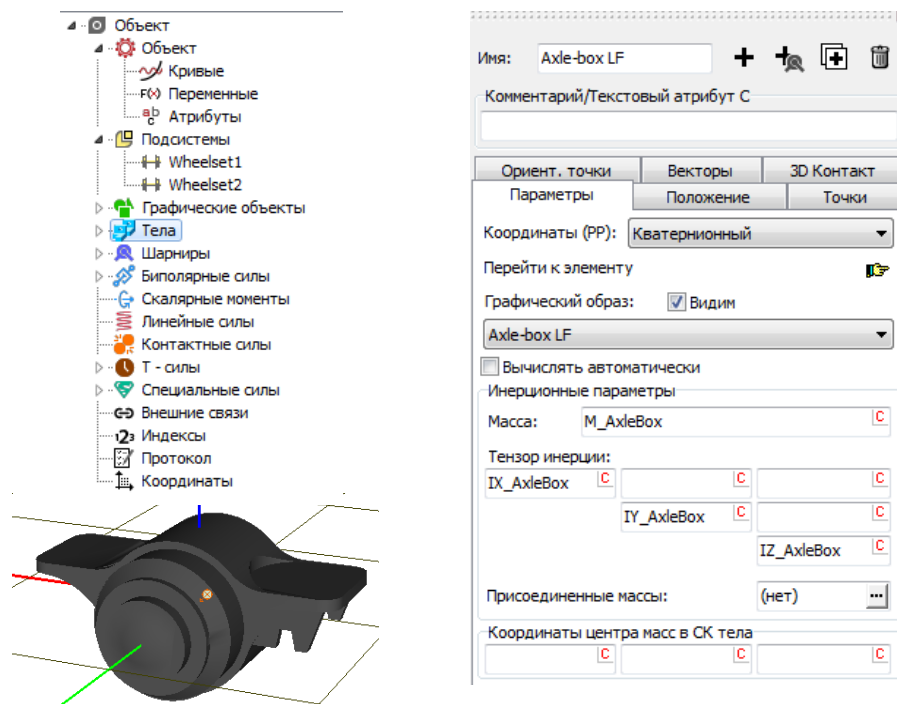



Рис. 2.12. Добавление тела: левая передняя букса

Создайте вращательный шарнир для буксы.

- Щелкните на кнопке  (**Перейти к элементу**) и выберите пункт меню **Создать шарнир | Вращательный**, рис. 2.13, 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. 2.13, справа.

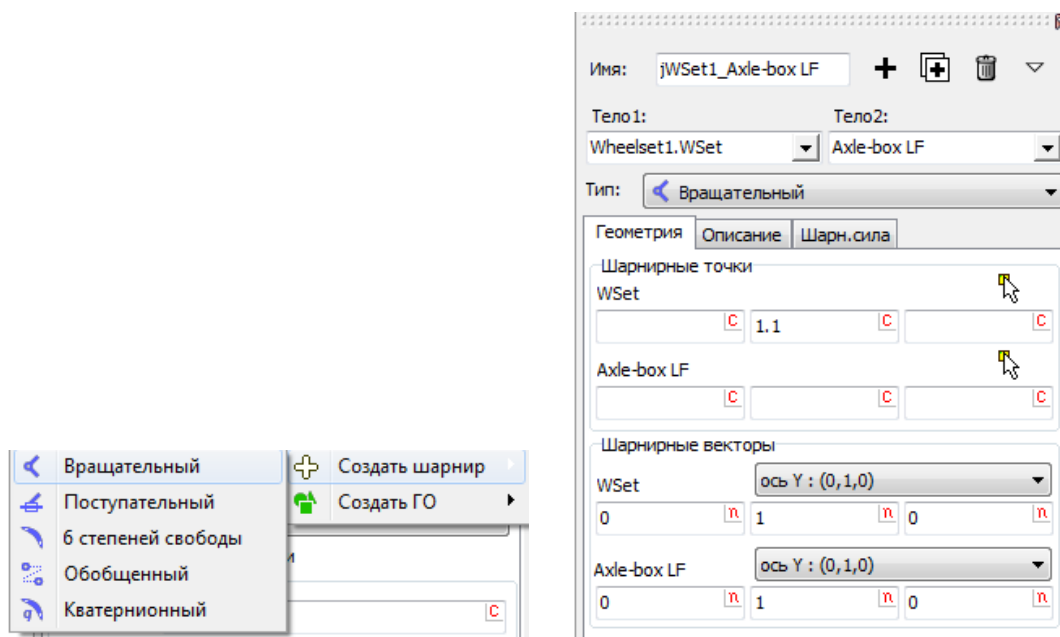



Рис. 2.13. Создание вращательного шарнира для буксы



- 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.

Обратите внимание, что база колёсной пары не имеет назначенного графического объекта. Поэтому, чтобы увидеть результат добавления шарнира, щёлкните на кнопке  перейдя в режим изображения всего объекта (а не отдельного элемента), см. рис. 2.14. Тогда, если все действия были выполнены правильно, образ модели будет соответствовать рис. 2.15.

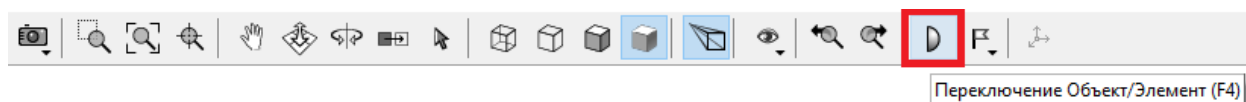


Рис. 2.14. Кнопка переключения "Весь объект/Текущий элемент"

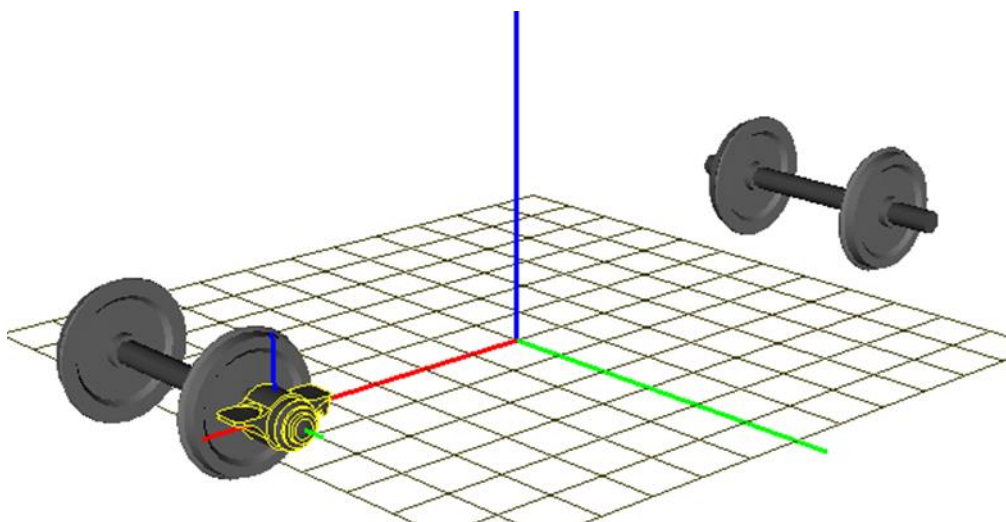



Рис. 2.15. Модель с добавленной буксой

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. 2.16.

Аналогично создайте тела и шарниры для букс задней КП.

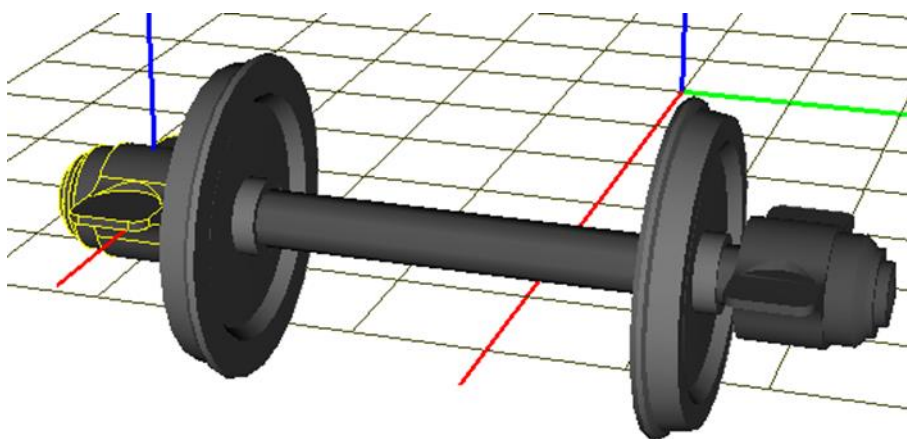


Рис. 2.16. Передняя КП с буксами

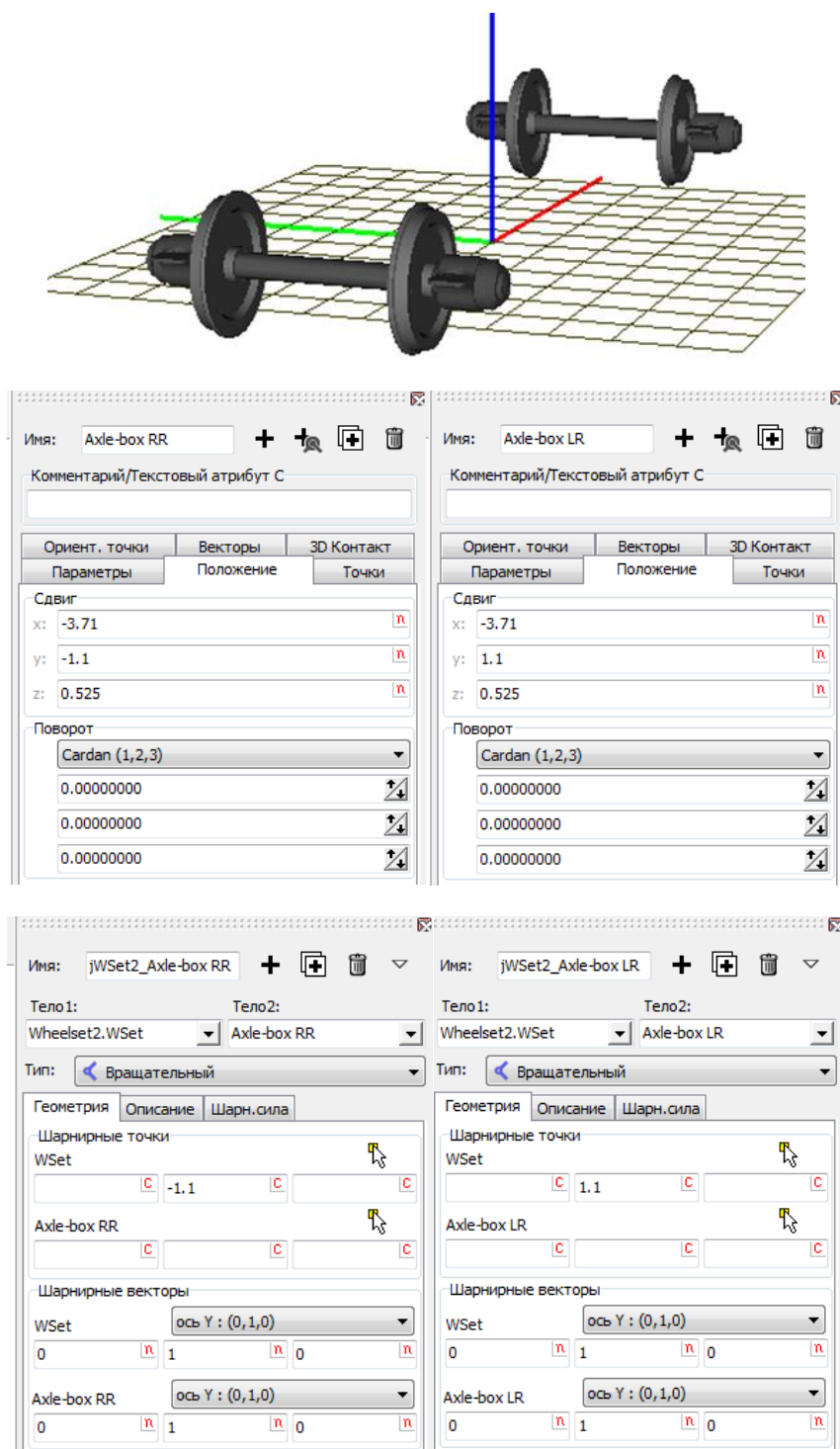


Рис. 2.17. Колёсные пары с буксами

## 2.6. Добавление кузова к модели автотрисы

Здесь мы добавим к модели кузов как тело и опишем его инерционные параметры. Обратите внимание, что создание графического образа кузова (**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, когда мы добавим соответствующее твёрдое тело к списку тел и зададим его координаты.

1. Выберите элемент **Тела** в списке элементов для того, чтобы перейти к списку тел.
2. Добавьте тело к списку, щёлкнув 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.

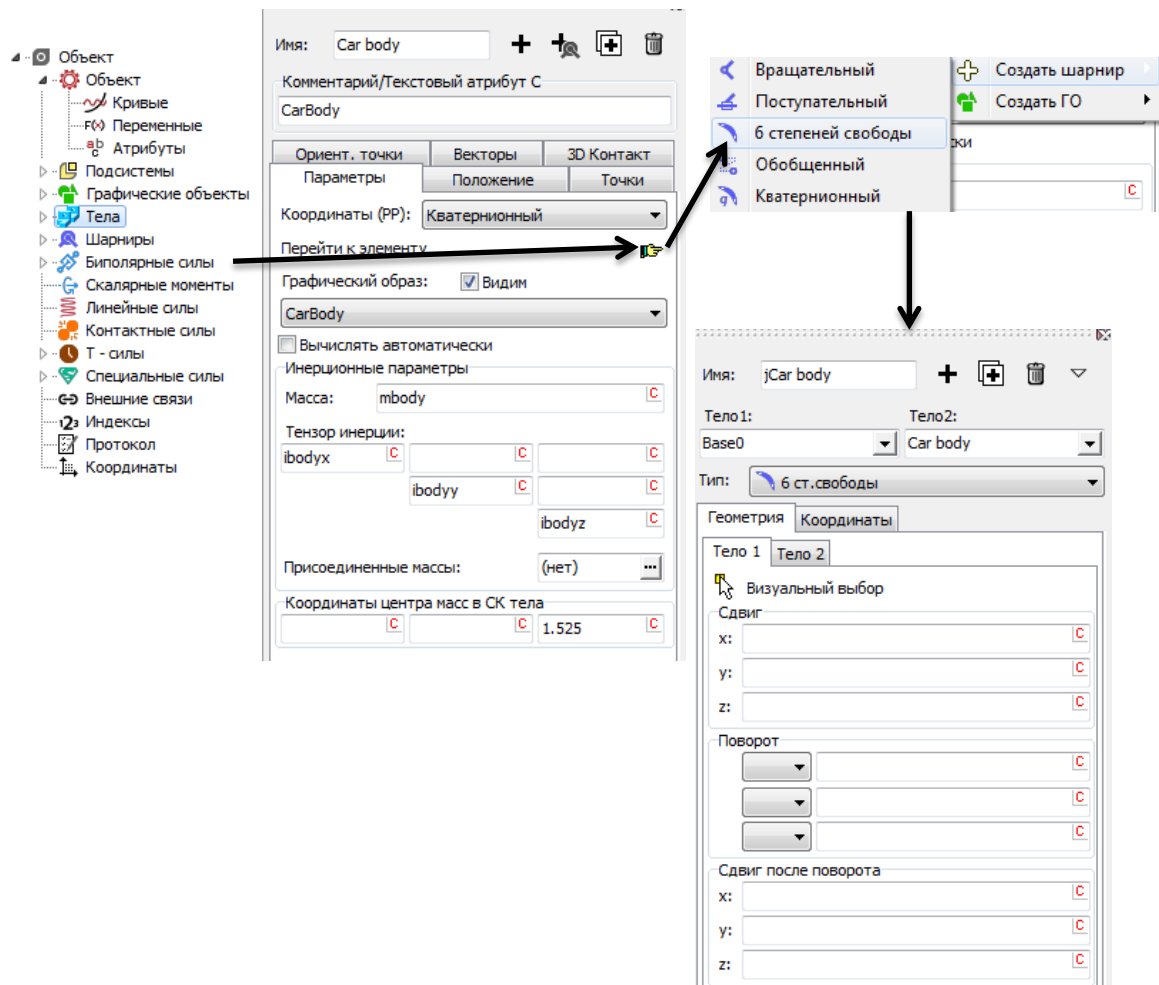


Рис. 2.18. Добавление кузова и его шарнира

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


$$mbody = 38300 \text{ кг};$$

$$ibodyx = 140000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$ibodyy = 626000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$ibodyz = 599000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$


$$zbody = 1.525 \text{ м}.$$

- Щёлкнув на кнопке  (Перейти к элементу) задайте **присоединённый 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. 2.18.

## 2.7. Добавление силовых элементов

### 2.7.1. Пружины

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

- Выберите элемент **Специальные силы** списка элементов (рис. 2.19, слева) и создайте первый элемент, соответствующий передней пружине для левой буксы первой КП, щёлкнув на кнопке . Переименуйте его в **Spring1L\_1**.
- Выберите тип элемента **Пружина** (рис. 2.19, в центре).
- Задайте соединяемые тела **Axle-box LF** (левая передняя букса) и **Car body** (рис. 2.19, справа). Задайте графический вид **Spring**.

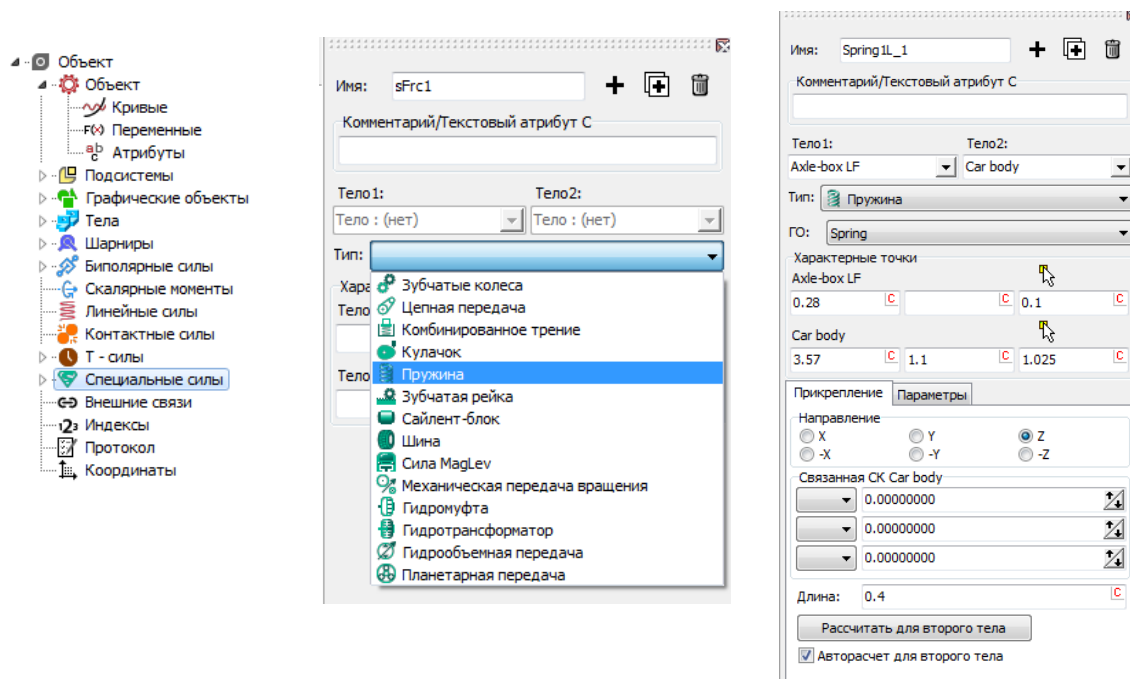


Рис. 2.19. Создание пружины

- Задайте точку прикрепления пружины к буксе **(0.28, 0, 0.1)** и высоту пружины под статической нагрузкой **0.4 м** (поле **Прикрепление** | **Длина**).
- Включите автоматический расчёт координат точки прикрепления пружины ко второму телу – поле **Авторасчёт для второго тела**, рис. 2.20, слева. В результате пружина займет свое окончательное положение в анимационном окне. Если теперь щёлкнуть на кнопке **Рассчитать для второго тела**, то будут показаны координаты точки при-

крепления верхнего конца пружины к кузову в системе координат кузова (3.57, 1.1, 1.025).

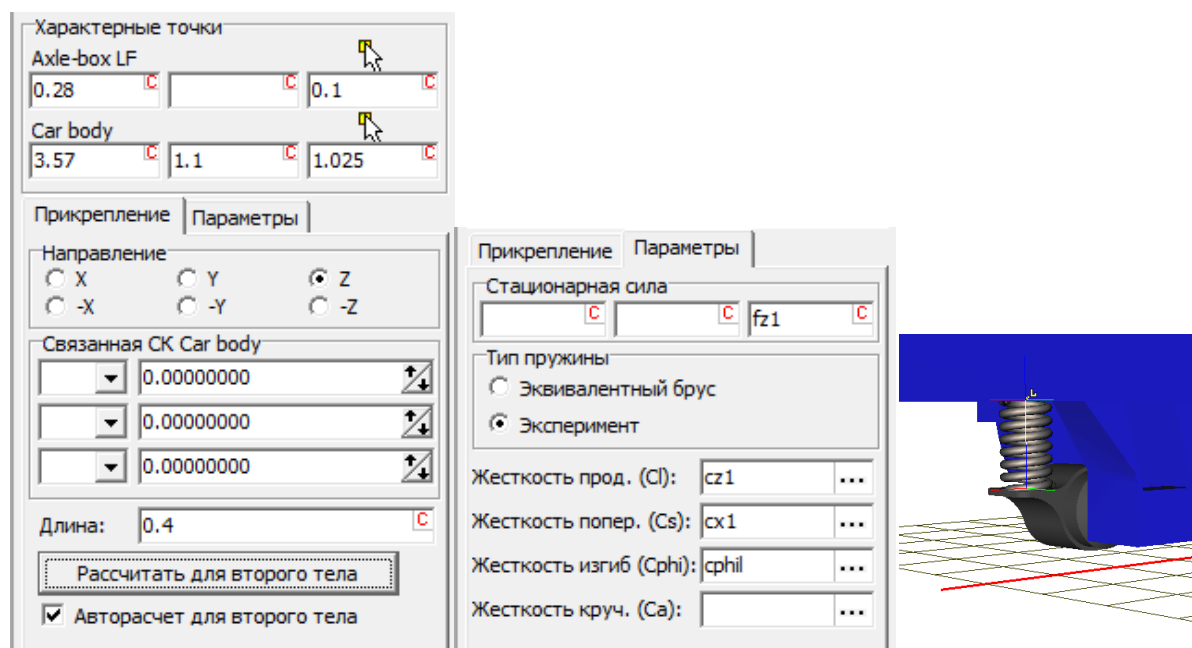


Рис. 2.20. Параметры, определяющие положение пружины и её силовые характеристики

6. На вкладке **Параметры** установите тип **Эксперимент** и задайте продольную (вертикальную) **C1**, сдвиговую (поперечную) **Cs** и изгибную **Cphi** жёсткости пружины с использованием идентификаторов:

**cz1 = 377000 Н/м;**

**cx1 = 370000 Н/м;**

**cphi1 = 5500 Нм/рад.**

Здесь же укажите статическое усилие в пружине. В поле **Стационарная сила | Z** (третье поле) введите идентификатор **fz1**, которому сначала задайте нулевое значение.

Очевидно, что статическое усилие в передних пружинах выражается через массу кузова и расстояния от центра масс кузова до каждой из колёсных пар. Данные величины параметризованы с использованием идентификаторов **mbody**, **L1**, **L2**, что позволяет выразить идентификатор силы через данные идентификаторы

$$fz1 = mbody * 9.81 * l2 / (l1 + l2) / 4.$$

Для внесения этого выражения в качестве формулы, определяющей численное значение идентификатора **fz1** в зависимости от значений остальных идентификаторов, дважды щёлкните левой кнопкой мыши на строке списка идентификаторов, содержащей **fz1**, и внесите выражение в появившееся окно, рис. 2.21.

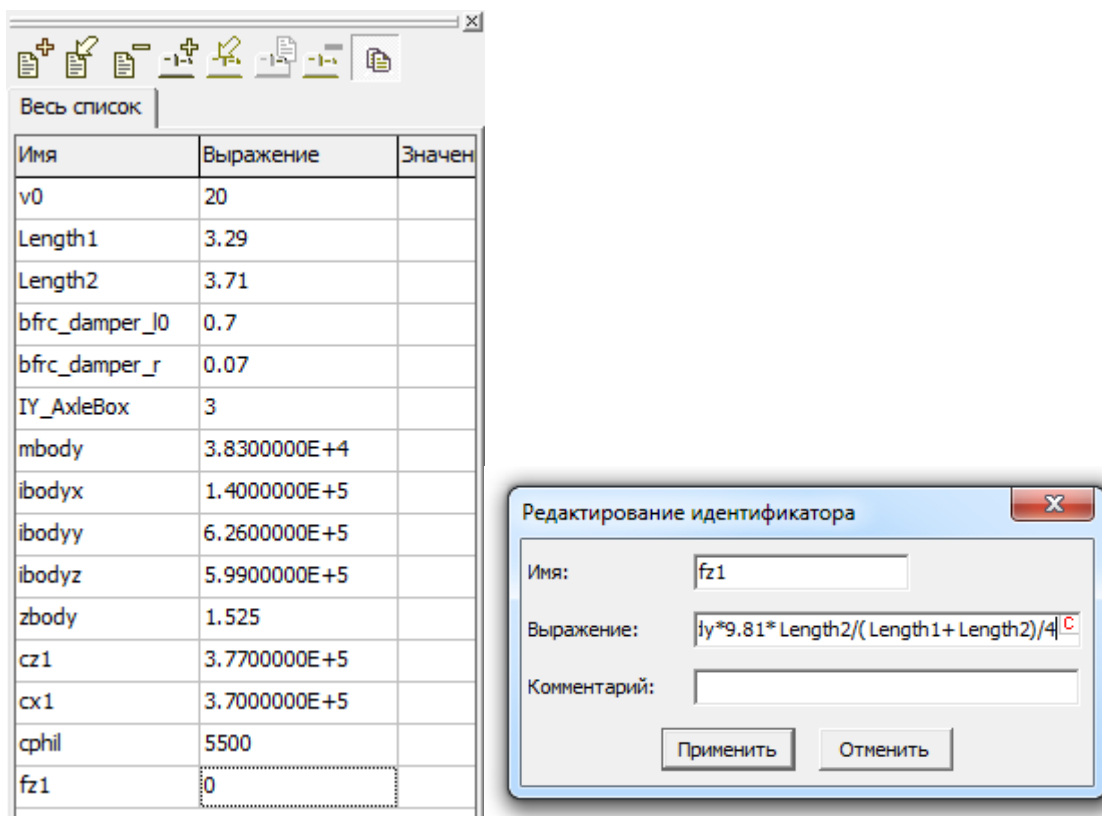



Рис. 2.21. Задание статического усилия в пружине в виде выражения

- Скопируйте первый элемент, щёлкнув на кнопке . Переименуйте его в **Spring1L\_2** (задняя пружина левой буксы первой КП).
- Измените знак координаты X точки прикрепления второй пружины к колёсной паре (**-0.28** вместо **0.28**).
- 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 КП).
- 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 жёсткости, задав идентификаторы **cz2 = 370000 Н/м; cx2 = 330000 Н/м; cphi2 = 5250 Нм/рад**.
- 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**.
- 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.



Имя: Spring2L_1	Имя: Spring2L_2	Имя: Spring2R_1	Имя: Spring2R_2
Комментарий/Текстовый атрибут C			
Тело1: Axle-box LR	Тело1: Axle-box LR	Тело1: Axle-box RR	Тело1: Axle-box RR
Тело2: Car body	Тело2: Car body	Тело2: Car body	Тело2: Car body
Тип: Пружина	Тип: Пружина	Тип: Пружина	Тип: Пружина
ГО: Spring	ГО: Spring	ГО: Spring	ГО: Spring
Характерные точки			
Axle-box LR: 0.28 C 0.1 C	Axle-box LR: -0.28 C 0.1 C	Axle-box RR: 0.28 C 0.1 C	Axle-box RR: -0.28 C 0.1 C
Car body: -3.43 C 1.1 C 1.025 C	Car body: -3.43 C 1.1 C 1.025 C	Car body: -3.43 C 1.1 C 1.025 C	Car body: -3.43 C 1.1 C 1.025 C
Прикрепление Параметры			
Направление: X Y Z			
Связанная СК Car body: 0.00000000 0.00000000 0.00000000			
Длина: 0.4 C			
Рассчитать для второго тела			
✓ Авторасчет для второго тела			

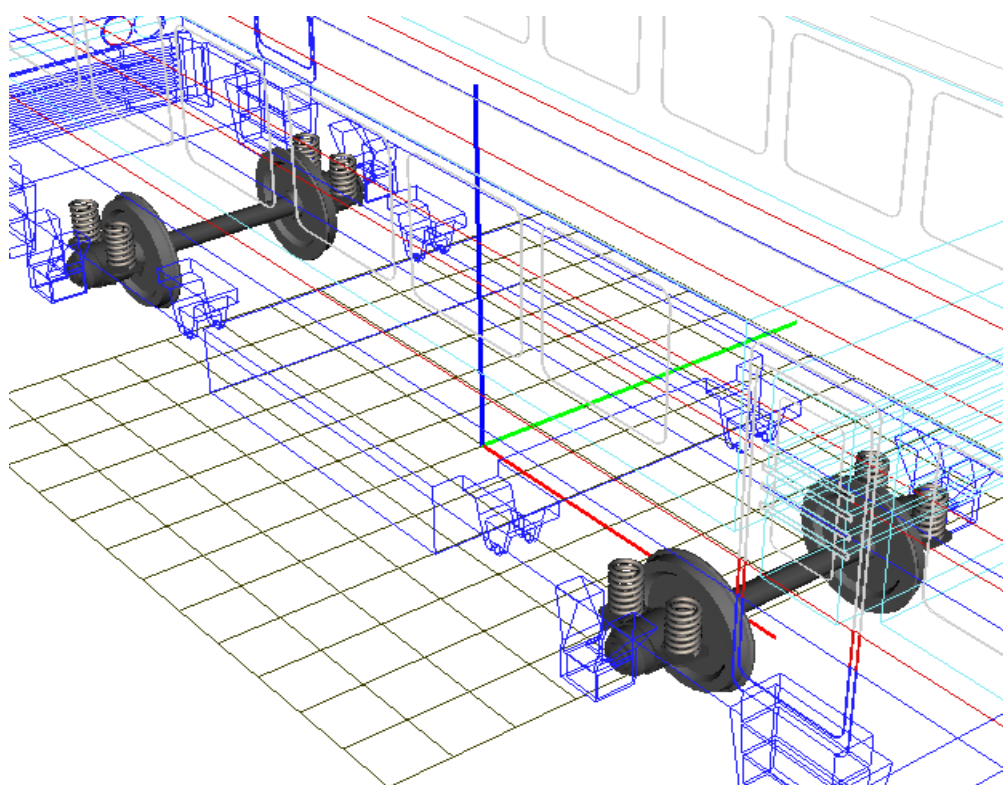


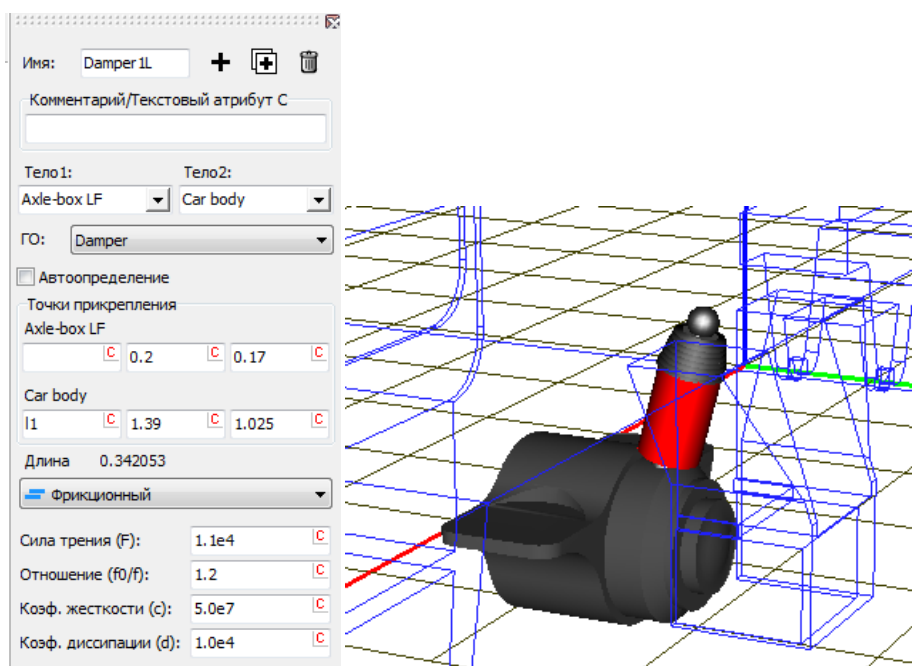
Рис. 2.22. Пружины подвески



## 2.7.2. Наклонные гасители

Для ввода моделей наклонных фрикционных гасителей следует использовать биполярные силовые элементы (см. [Глава 2](#), п. Биполярные силы, [Глава 3](#), п. Ввод силовых элементов | Ввод биполярных силовых элементов).

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



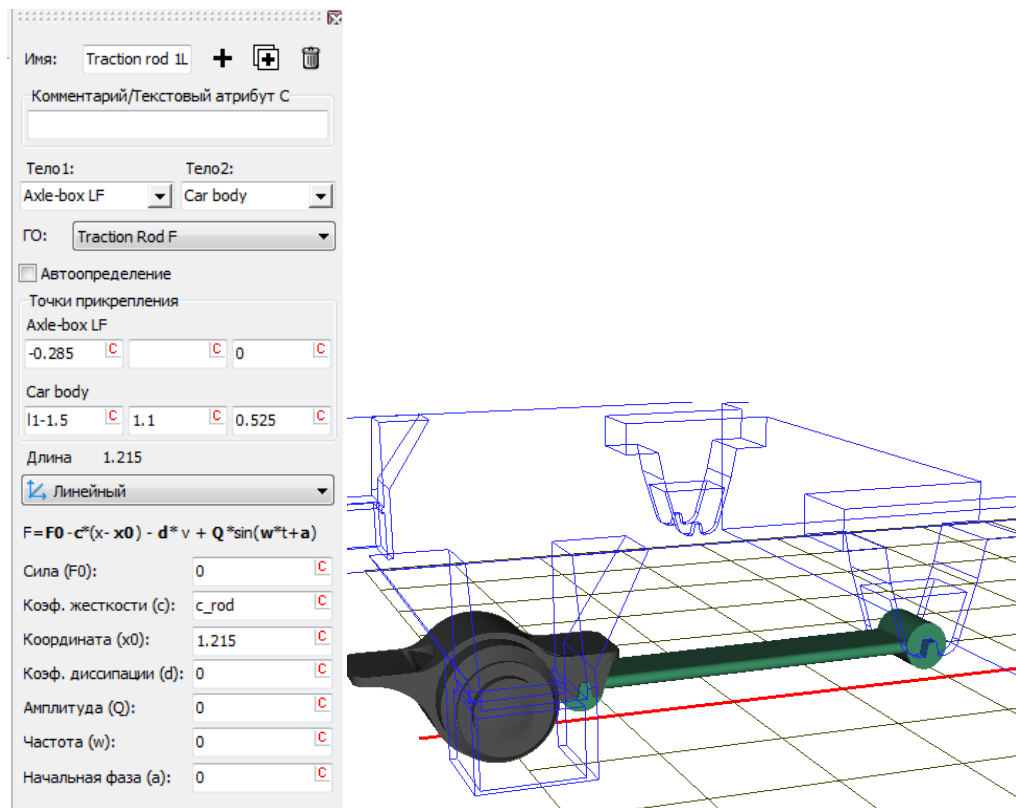
Остальные три гасителя добавляйте с помощью операции копирования, переименовая элементы, изменяя первое тело для задних гасителей и координаты точек прикрепления:

13. Второй гаситель (**Damper1R**), первое тело Axle-box RF, координаты точек прикрепления:  
(0, -0.2, 0.17) и (11, -1.39, 1.025).
14. Третий гаситель (**Damper2L**), первое тело Axle-box LR, координаты точек прикрепления:  
(0, 0.2, 0.17) и (-12, 1.39, 1.025).
15. Четвертый гаситель (**Damper2R**), первое тело Axle-box RR, координаты точек прикрепления:  
(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.

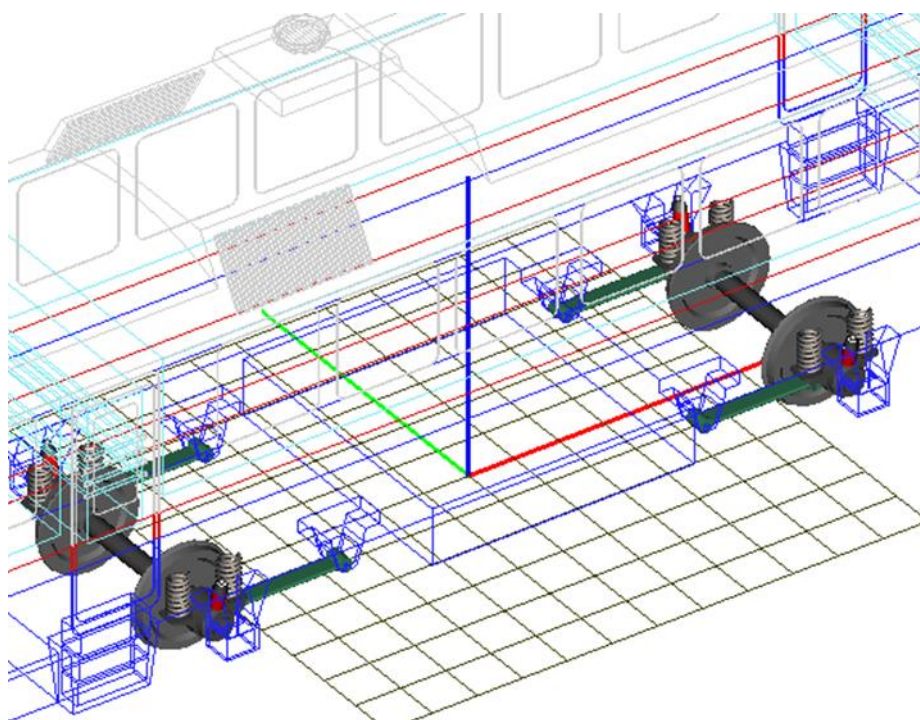
1. Добавьте пятый биполярный элемент, переименуйте его в **Traction rod 1L** (передний левый поводок). Выберите тип элемента **Линейный**.
2. Заполните поля инспектора, как показано на рисунке ниже. Длина элемента в недеформированном состоянии станет равна **1.215** м.



3. Задайте численное значение идентификатора – коэффициента жёсткости 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 крепления:

4. Вторая тяга (**Traction rod 1R**), первое тело **Axle-box RF**, координаты точек крепления: **(-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 крепления: **(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 крепления: **(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).

Имя: Damper1L + [icon] [icon]

Комментарий/Текстовый атрибут C

Тело1: Axle-box LF Тело2: Car body

ГО: Damper

☐ Автоопределение

Точки прикрепления

Axle-box LF 0.32

Car body Length1 1.7 0.525

Длина 0.28

Линейный

$F = F0 - c \cdot (x - x0) - d \cdot v + Q \cdot \sin(w \cdot t + a)$

Сила/момент (F0): 0

Козф. жесткости (c): 0

Длина (x0): 0

Козф. диссипации (d): d1y

Амплитуда (Q): 0

Частота (w): 0

Начальная фаза (a): 0

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 автомотрисы AC4 построена.

### 3. Пример создания и анализа проекта параметрического сканирования модели автомотрисы AC4

Рассмотрим процесс создания и анализа проекта сканирования динамических свойств автомотрисы AC4 в зависимости от параметров. Данная модель поставляется вместе с UM и находится в каталоге [{Данные УМ}\Samples\Rail\\_Vehicles\AC4](#).

Процесс создания модели автомотрисы подробно рассмотрен в предыдущем разделе, см. п. 2.

Инструмент для параметрического сканирования доступен только в поставках с включённым модулем оптимизации (**UM Experiments**). Для проверки наличия модуля оптимизации запустите программу **UM Input** или **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 автомотрисы была у вас на компьютере, поэтому создайте её в соответствии с п. 2, проверьте ее наличие в каталоге [{Данные УМ}\Samples\Rail\\_Vehicles\AC4](#), либо скачайте из интернета по адресу [www.universalmechanism.com/download/90/ac4.zip](http://www.universalmechanism.com/download/90/ac4.zip).

Подробнее о модуле сканирования и параметрической оптимизации см. [Главу 6](#) «Многовариантные расчеты»,

[www.universalmechanism.com/download/90/rus/06\\_um\\_experiments.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/06_um_experiments.pdf).

Полностью описанный и рассчитанный проект сканирования, который рассматривается в данном примере, находится в каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\TUTORIAL\Scan1](#), а также в Интернете по следующей ссылке:

[www.universalmechanism.com/download/90/scan1.zip](http://www.universalmechanism.com/download/90/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>2</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 колёсных 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 определённом 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 по 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>3</sup> (см. рис. 3.1), т.е. к неустойчивости движения 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 стандартного отклонения. При этом устойчивому движению экипажа соответствуют колебания без набегания колёс гребнями на рельс.

<sup>2</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 [www.universalmechanism.com/index/download/bogie18100.pdf](http://www.universalmechanism.com/index/download/bogie18100.pdf)

<sup>3</sup> В данном примере приведены графики для порожнего вагона-хоппера

Рассмотрим зависимость стандартного отклонения поперечных колебаний первой колёсной пары относительно головки рельса от скорости представленную на рис. 3.3. Отметим, что рассмотренные осциллограммы поперечных колебаний колёсных пар зачастую имеют тренд (см. график 1, рис. 3.2), который приводит к увеличению стандартного отклонения. 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 стандартного отклонения, что соответствует потере устойчивости и переходу в закритическую область.

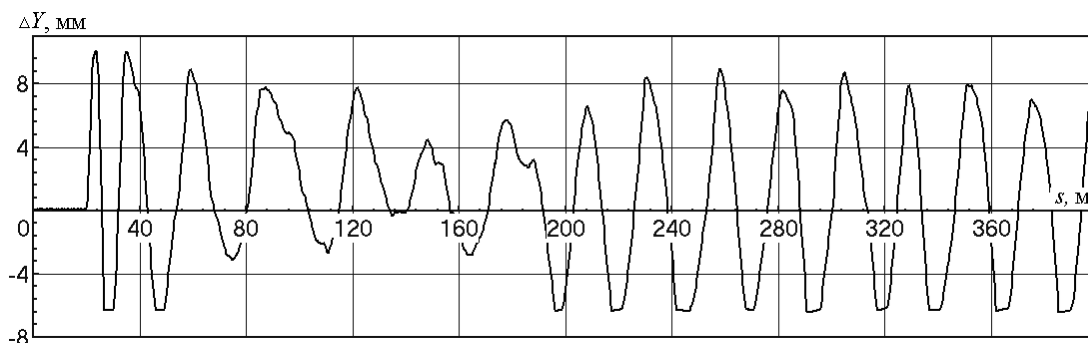


Рис. 3.1. Осциллограмма поперечных колебаний колёсной пары, неустойчивое движение

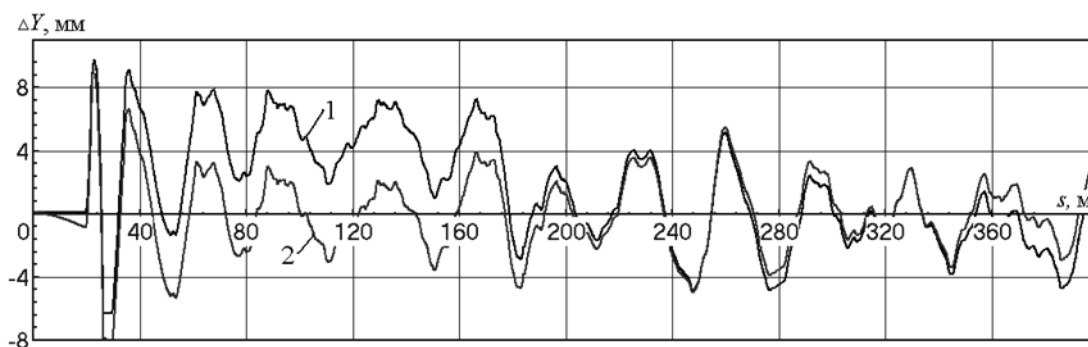


Рис. 3.2. Осциллограмма поперечных колебаний колёсной пары, устойчивое движение;  
1 – исходная; 2 – отфильтрованная

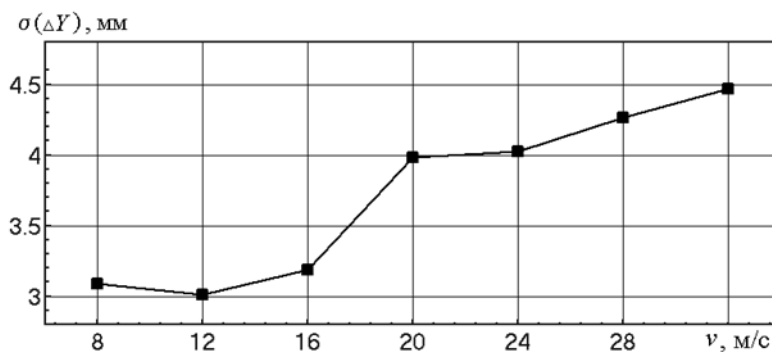


Рис. 3.3. Зависимость стандартного отклонения поперечных колебаний колёсной пары относительно головки рельса от скорости движения экипажа

### 3.1.2. Создание нового проекта

1. Запустите программу моделирования **UM Simulation**.
2. Для создания нового проекта выберите пункт меню **Сканирование | Новый проект....**
3. В появившемся окне введите полный путь к каталогу сканирования, включая имя проекта **Scan1** (см. рис. 3.4).

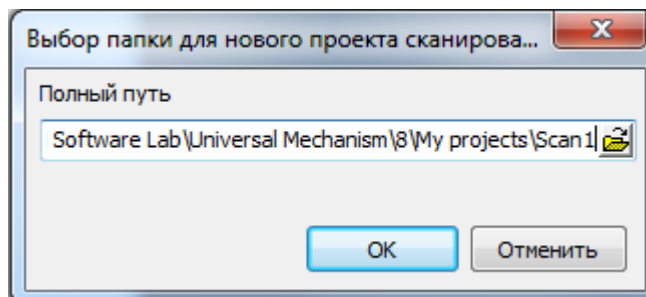


Рис. 3.4. Диалог выбора папки для нового проекта сканирования

4. Нажмите кнопку **Создать** и после этого появится окно описания проекта сканирования (см. рис. 3.5).

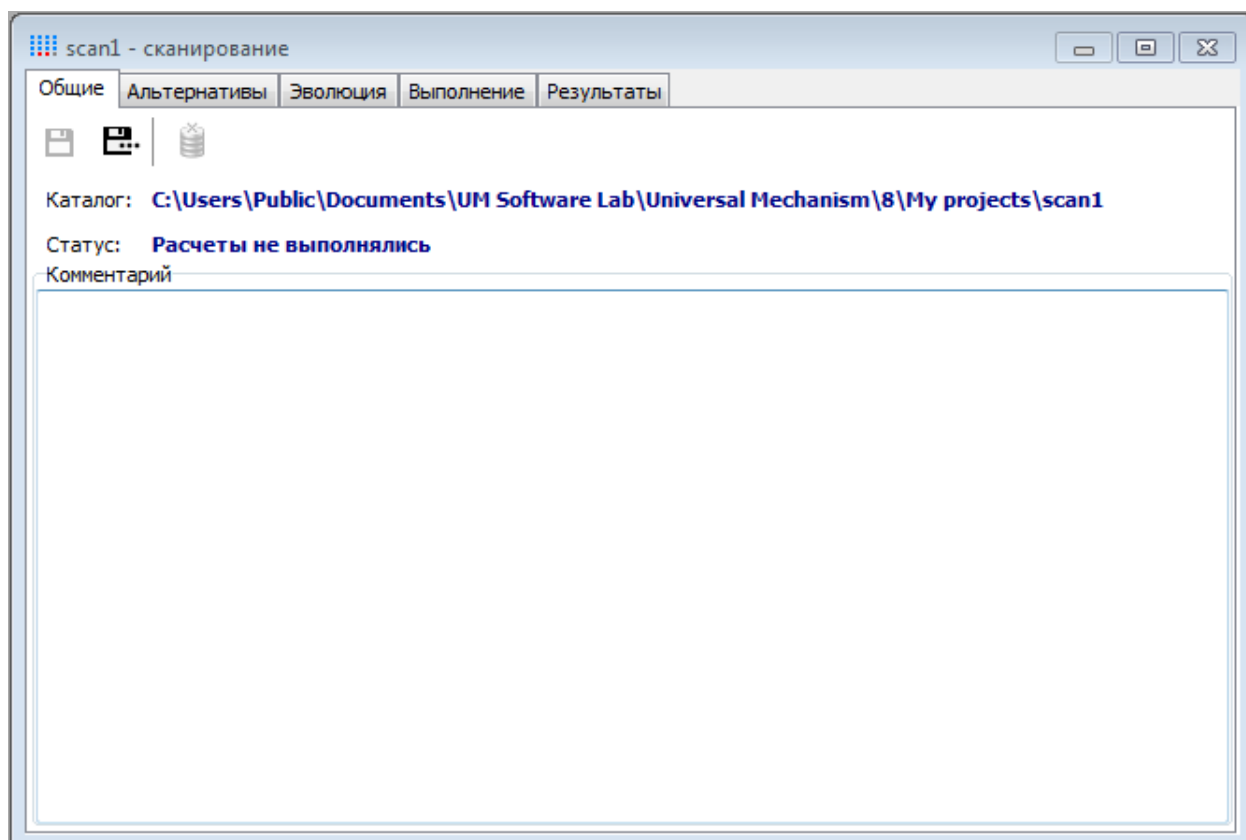


Рис. 3.5. Окно описания проекта сканирования: начало работы



### 3.1.3. Добавление новой модели к проекту сканирования

1. В окне описания проекта перейдите на вкладку **Альтернативы**.
2. Нажмите кнопку **+** (добавить семейство альтернатив).
3. В появившемся окне открытия модели выберите модель автомотрисы AC4.

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

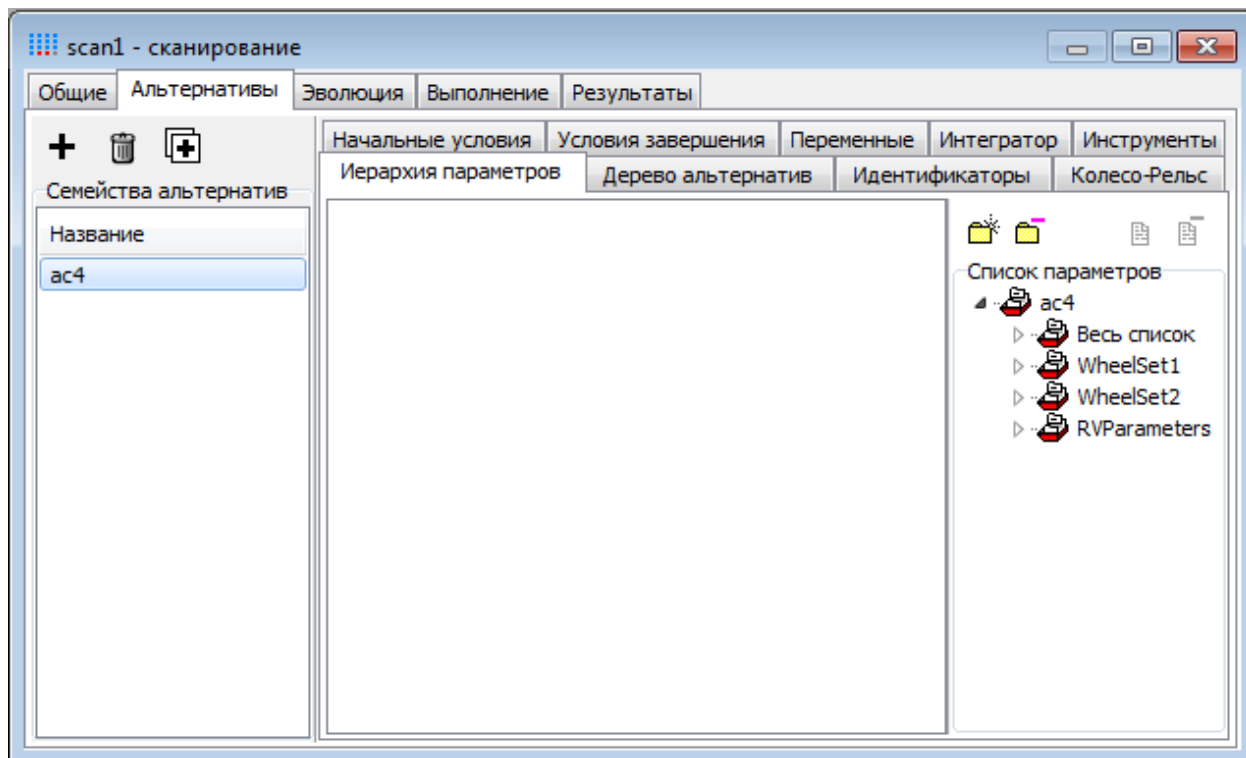


Рис. 3.6. Проект сканирования: добавление семейства альтернатив

### 3.1.4. Описание иерархии параметров

В данном проекте будем сканировать динамическое поведение модели только по одному параметру – скорости движения автотрисы.

1. Убедитесь, что в программе задана единица измерения скорости м/с (метры в секунду). Для этого выберите пункт меню **Инструменты | Настройки...**, в появившемся окне **Опции** перейдите на вкладку **Общие** и в поле **Единица скорости** установите значение **м/с**. Далее нажмите кнопку **Принять**.
2. В иерархическом списке **Список параметров** (в правой части вкладки **Иерархия параметров**, см. рис. 3.6) щёлкните на параметре **v0**. Параметр имеет смысл начальной скорости движения.
3. В появившемся окне **Свойства параметра** введите значения от 30 до 90 (м/с) включительно с шагом 5 м/с (см. рис. 3.7).
4. Закройте окно настройки значений параметров и вернитесь в окно описания проекта сканирования.
5. Группу параметров **Группа 1** переименуйте в **v0** (контекстное меню, пункт **Переименовать группу параметров**).

На вкладке **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.

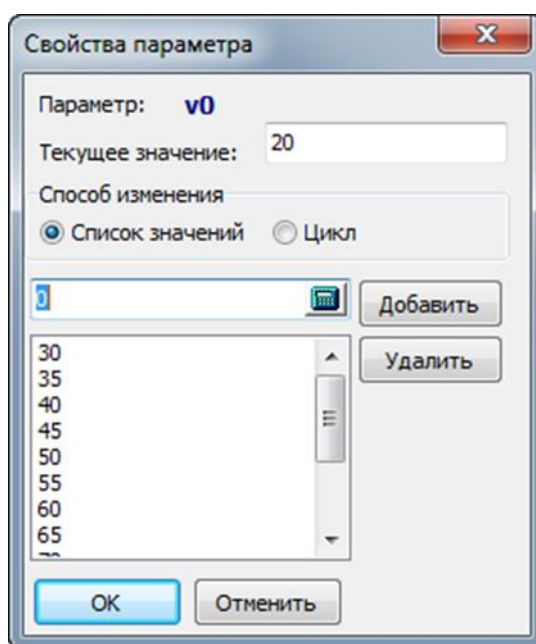


Рис. 3.7. Окно настройки значений параметра

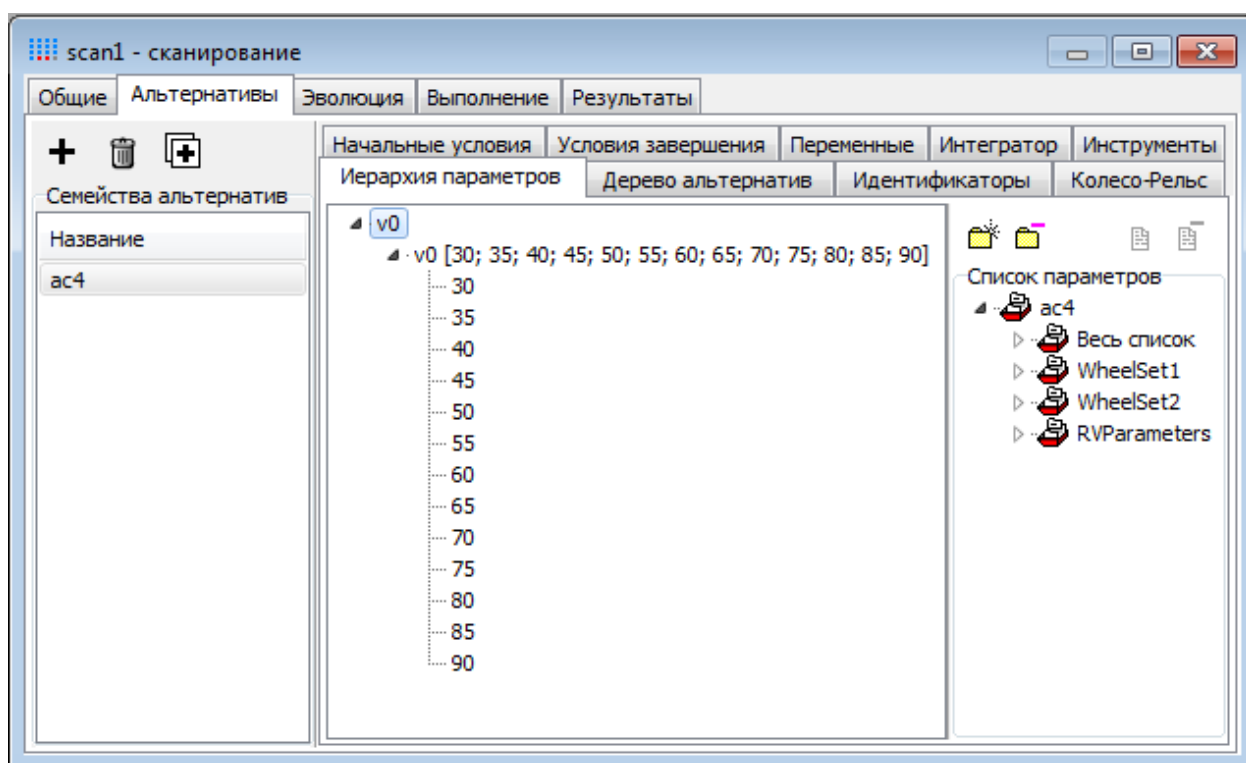


Рис. 3.8. Проект сканирования: иерархия параметров

### 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 вкладку **Колесо/Рельс | Путь | Неровности**. Установите **Тип пути** в значение **Неровный**, **Тип задания неровностей** – **Из файлов**. 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 вкладки представлен на рис. 3.10.
2. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Путь | Макрогеометрия**. В поле **Тип пути** выберите **Прямая**.
3. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Профили | Колеса**. Добавьте файл **new-locow.wpf** и установите его в качестве профиля для всех колёс (см. рис. 3.11).
4. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Профили | Рельсы**. Выберите профиль **rg5new.rpf** для левого и правого рельса.
5. На вкладке **Колесо/Рельс | Путь | Модель и параметры** в поле **Модель пути** выберите **Безмассовый рельс**.
6. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Контакт | Контактные силы**. В поле **Модель сил крива** выберите **FASTSIM**.

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

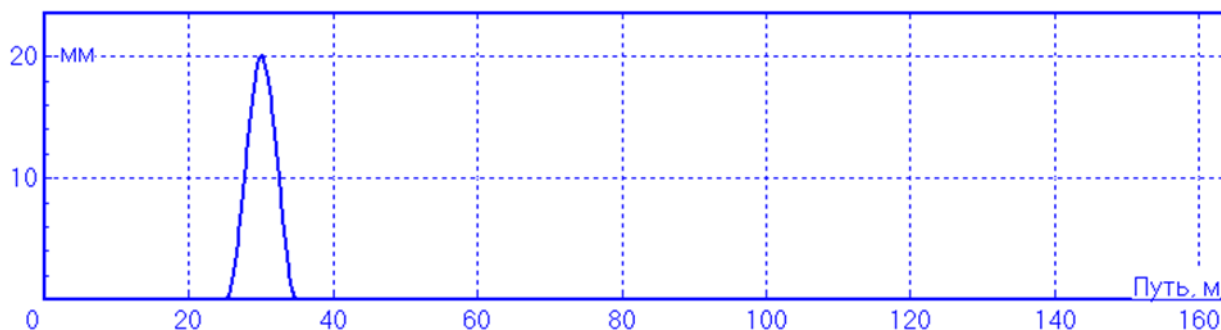


Рис. 3.9. Неровность пути в плане. Файл **g10\_20.way**

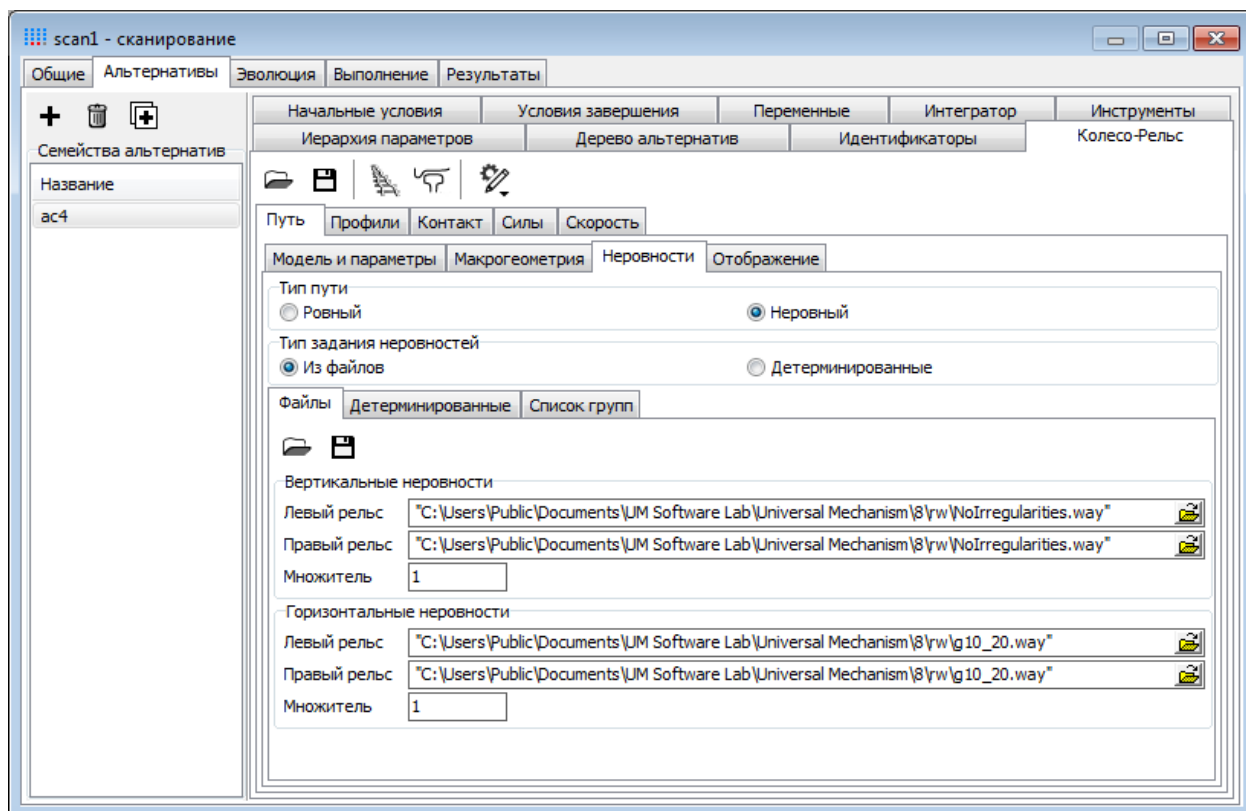


Рис. 3.10. Настройка неровностей путевой структуры

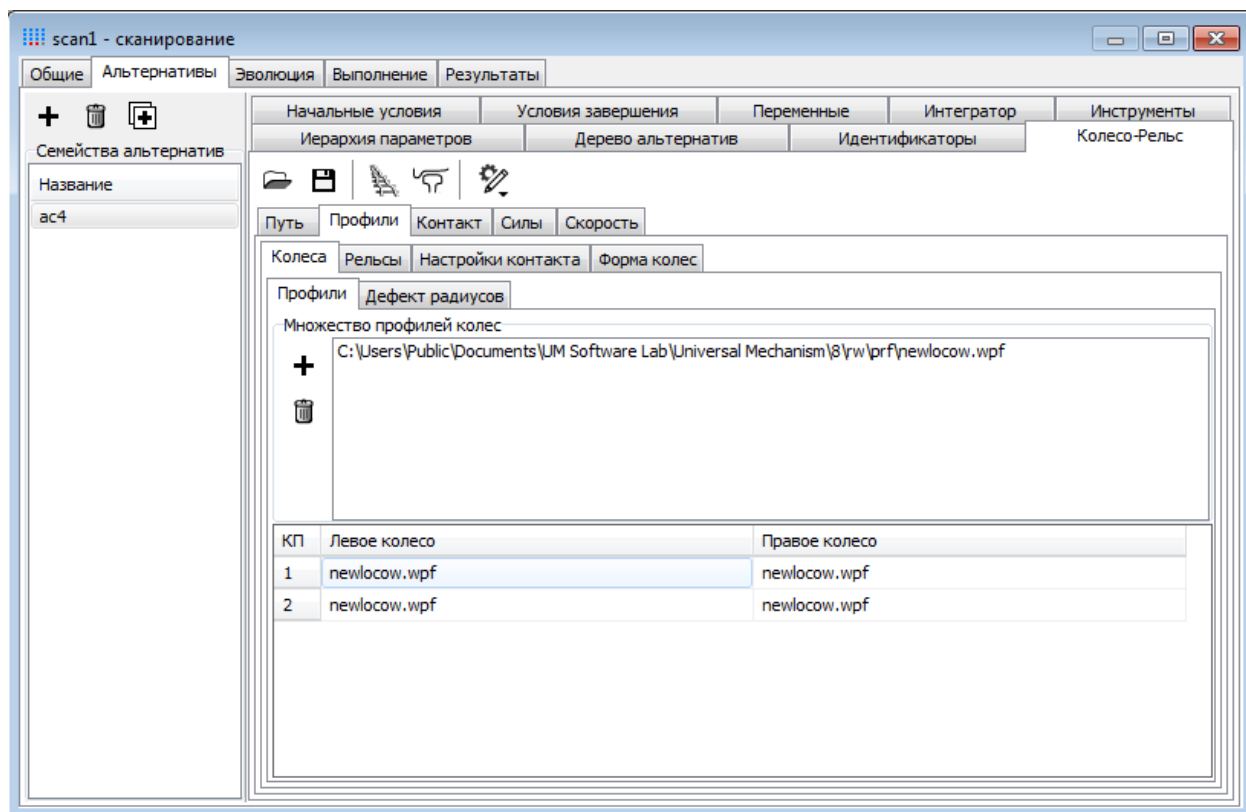


Рис. 3.11. Настройка профилей колес и рельсов

### 3.1.6. Настройка параметров моделирования

1. Перейдите на вкладку Альтернативы | Интегратор | Параметры моделирования.
2. В поле Численный метод выберите **Park**.
3. В поле Погрешность установите 1E-6.
4. Включите флажки Расчет матриц Якоби и Матрицы Якоби для контакта колесо/рельс.

Окончательный вид вкладки представлен на рис. 3.12.

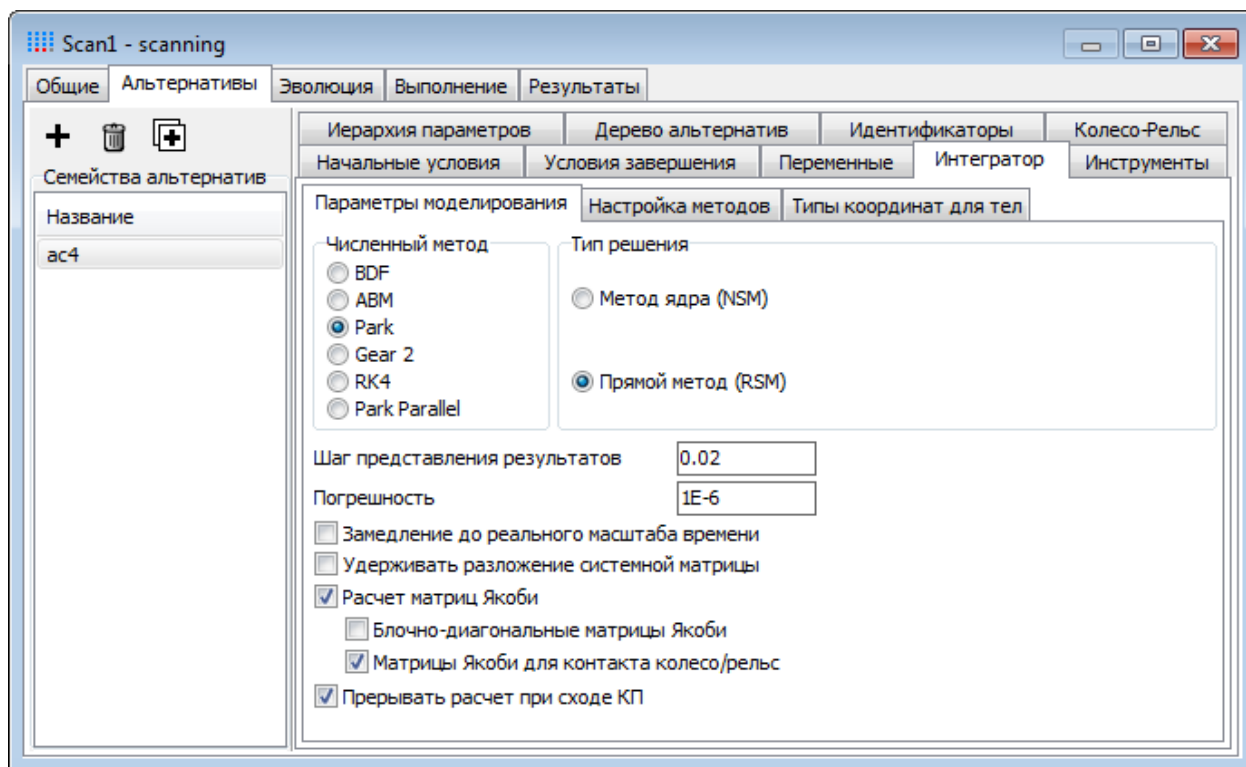


Рис. 3.12. Настройка параметров моделирования

### 3.1.7. 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 расчётов. При сканировании железнодорожных экипажей по умолчанию формируется следующее условие завершения:

*Путь, пройденный с момента начала моделирования  $\geq 600$  м.*

То есть, каждый численный эксперимент в данном семействе будет завершён тогда, когда выполнится указанное условие. В нашем случае уменьшим путь до 500 метров, как это показано на рис. 3.13.

**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.

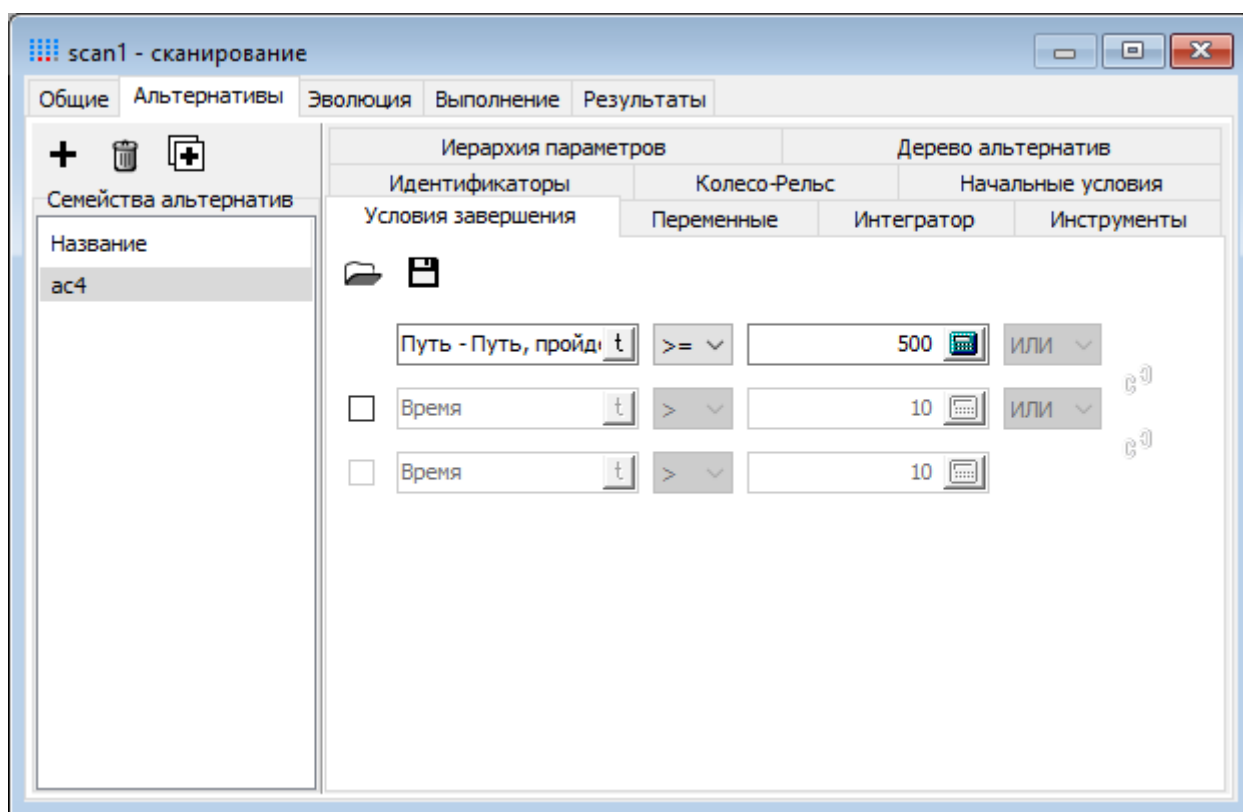




Рис. 3.13. Настройка условий завершения

### 3.1.8. Создание списка сохраняемых переменных

1. Перейдите на вкладку **Переменные**.

На этой вкладке 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 вкладку **Без имени** в **Stability**, используя кнопку .
3. Откройте **Мастер переменных**.
4. Перейдите на вкладку **Линейные переменные**, выберите тело **WheelSet1.Wset** в списке слева, в поле **Компонента** установите **Y** (поперечное направление для железнодорожных экипажей). Кнопкой  создайте переменную и перетащите её в список переменных на вкладку **Stability**.
5. В **Мастере переменных** перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж**. Создайте переменную **Путь** и перетащите её также в список переменных на вкладку **Stability**. Закройте **Мастер переменных**.

После выполнения всех указанных выше действий список сохраняемых переменных должен выглядеть так, как показано на рис. 3.14. Теперь проект сканирования описан полностью. Перейдем к его выполнению.

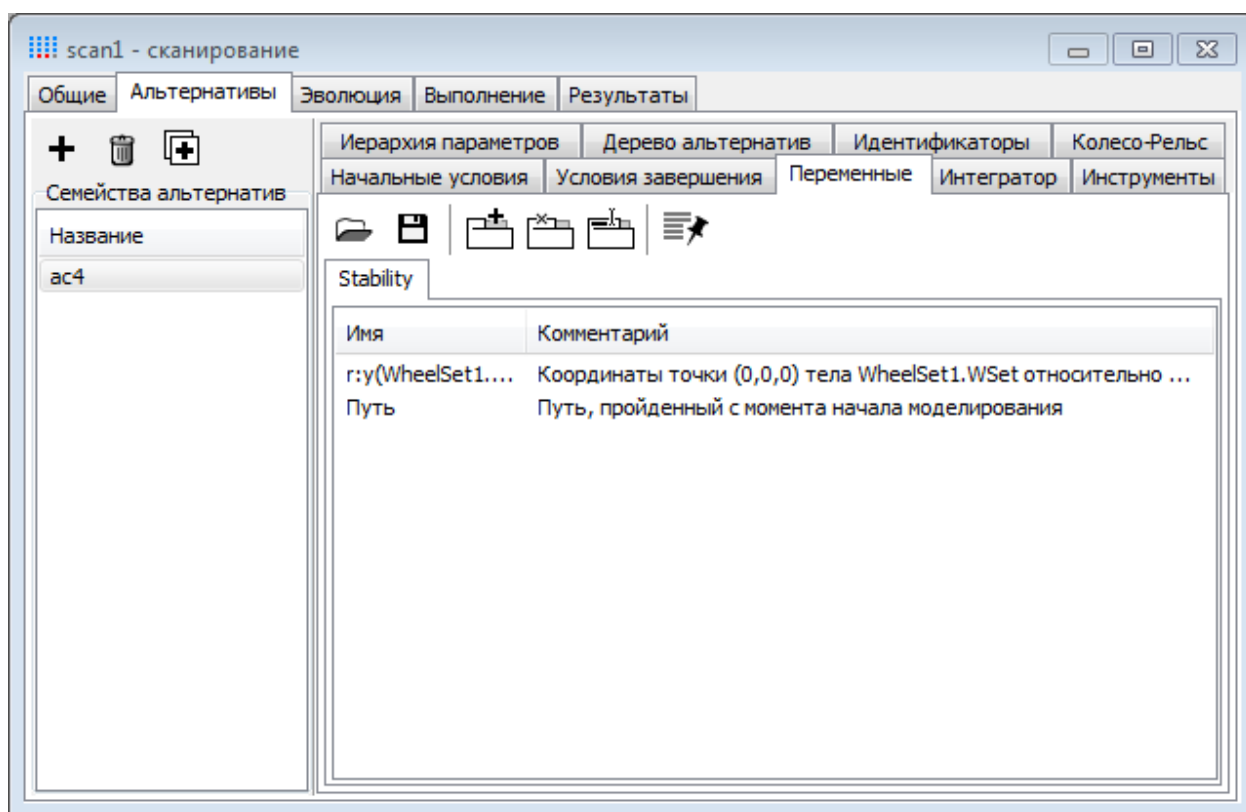


Рис. 3.14. Сканирование: список сохраняемых переменных



## 3.2. Выполнение проекта сканирования

1. Перейдите на вкладку **Выполнение**.
2. При правильном описании проекта в поле **Протокол** появится сообщение «**Ошибки не обнаружены**», см. рис. 3.15.
3. Нажмите кнопку **Запустить**.

Начнётся 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. 3.16.

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

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

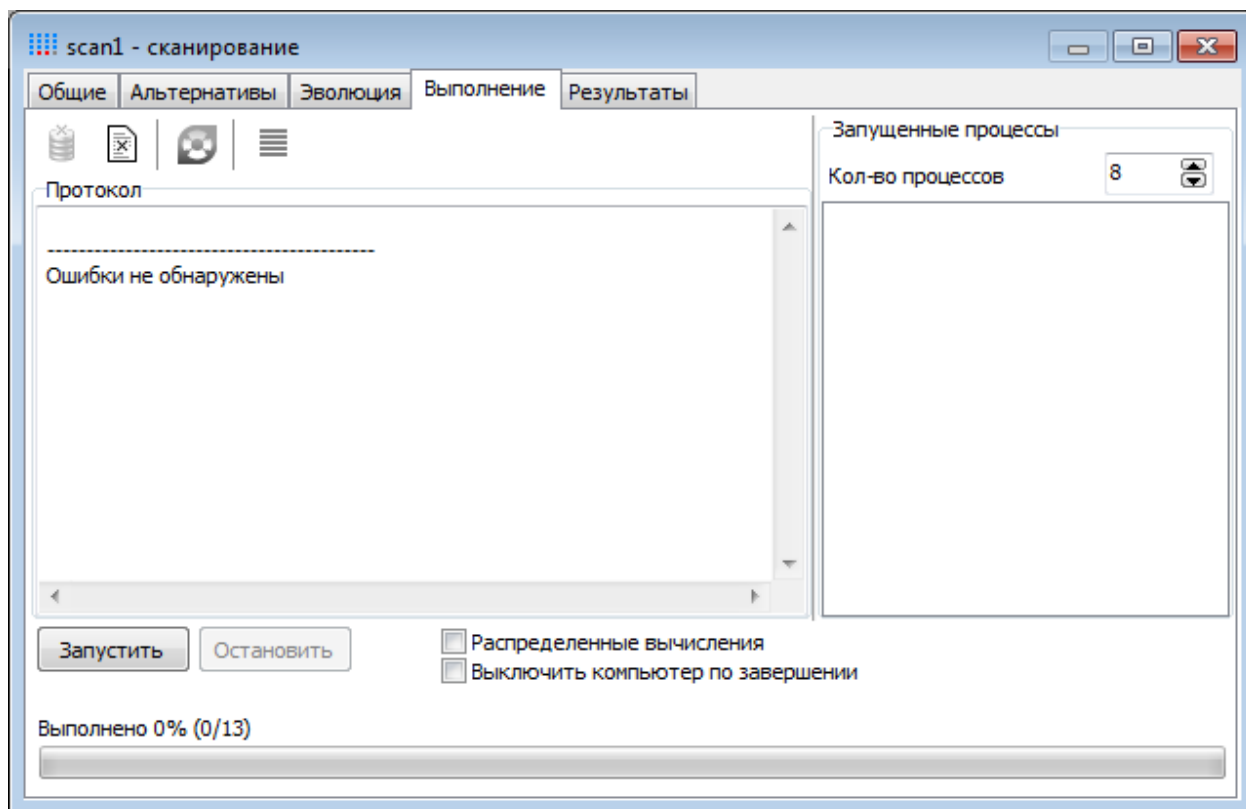


Рис. 3.15. Запуск проекта сканирования

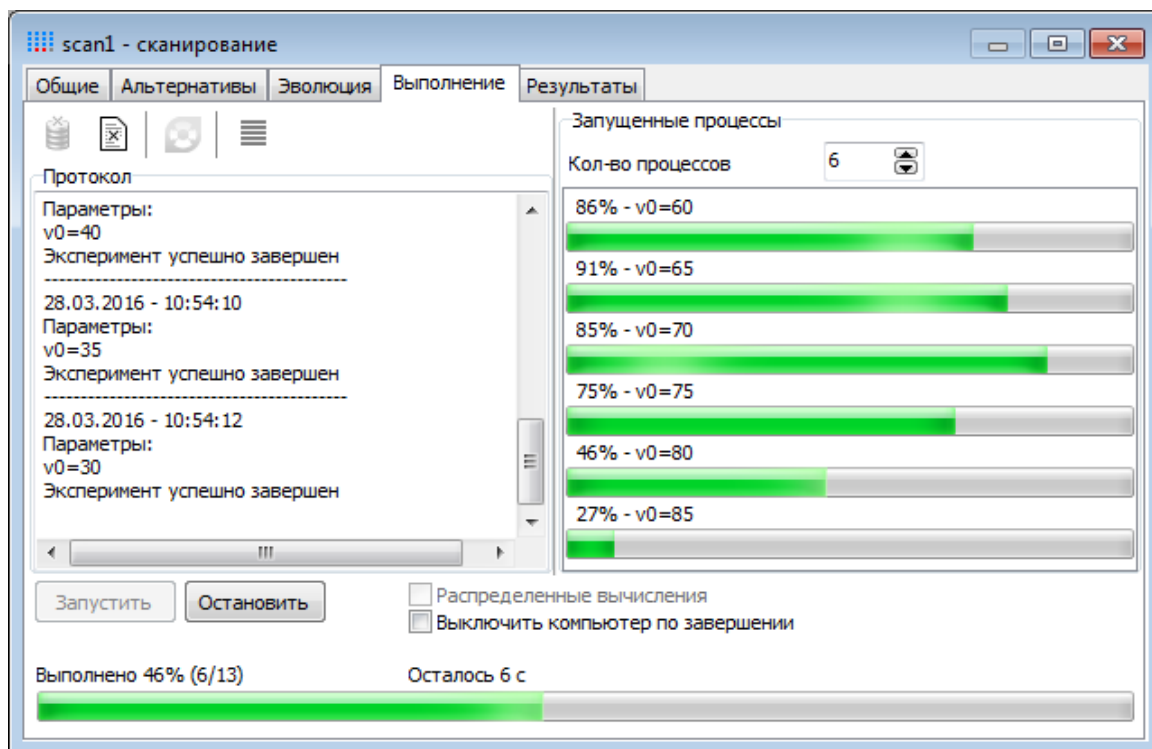


Рис. 3.16. Выполнение проекта сканирования

### 3.3. Анализ результатов сканирования

#### 3.3.1. Анализ результатов отдельных экспериментов

После выполнения всех расчётов перейдём к анализу полученных результатов. Выберите вкладку **Результаты** | **АС4**.

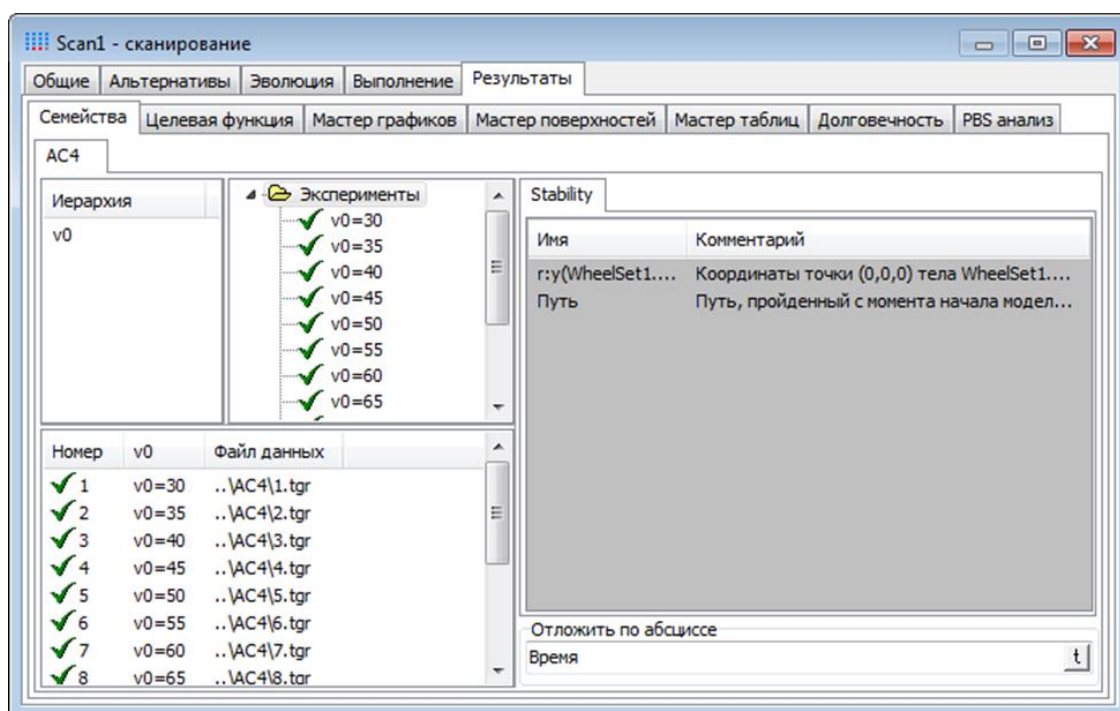


Рис. 3.17. Результаты сканирования

Проанализируем результаты моделирования для отдельных экспериментов. Сравним осциллограммы поперечных колебаний первой колёсной 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.

Выберите переменную Путь в списке рассчитанных переменных на вкладке **Устойчивость (Stability)** и перетащите её вниз в поле **Откладывать по абсциссе**, см. рис. 3.18.

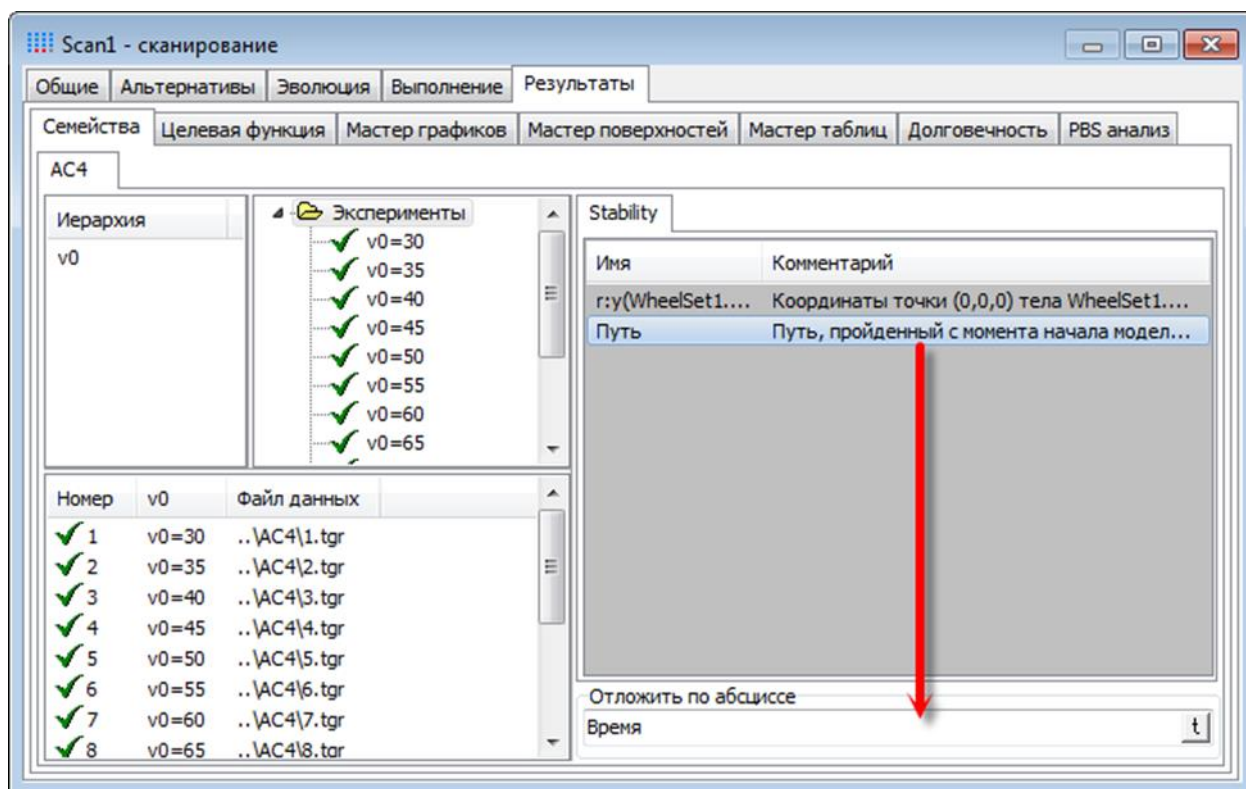


Рис. 3.18. Установить «путь» по оси абсцисс

Откройте новое графическое окно.

Вернитесь в окно проекта сканирования, в списке проделанных экспериментов в левой нижней части вкладки **AC4** выберите эксперимент номер **1 (v0=30)**.

В списке переменных выделите переменную **r:y(Wheelset1.Wset)** и перетащите её в графическое окно.

В окне проекта сканирования выберите эксперимент номер **13 (v0=90)**, и перетащите переменную **r:y(Wheelset1.Wset)** в графическое окно уже для этого эксперимента, см. рис. 3.19.

Таким образом, на рис. 3.18 ясно видно, что поперечные колебания первой колесной пары, возбуждённые 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 мотриса устойчива, на скорости 90 м/с – неустойчива.

Постройте график поперечных колебаний первой колёсной пары для скоростей 45 и 50 м/с. Видно, что при движении со скоростью 45 м/с амплитуда поперечных колебаний колёсной пары со временем затухает, а при 50 м/с – уже нет. Таким образом, критическая скорость модели находится в этом диапазоне скоростей.

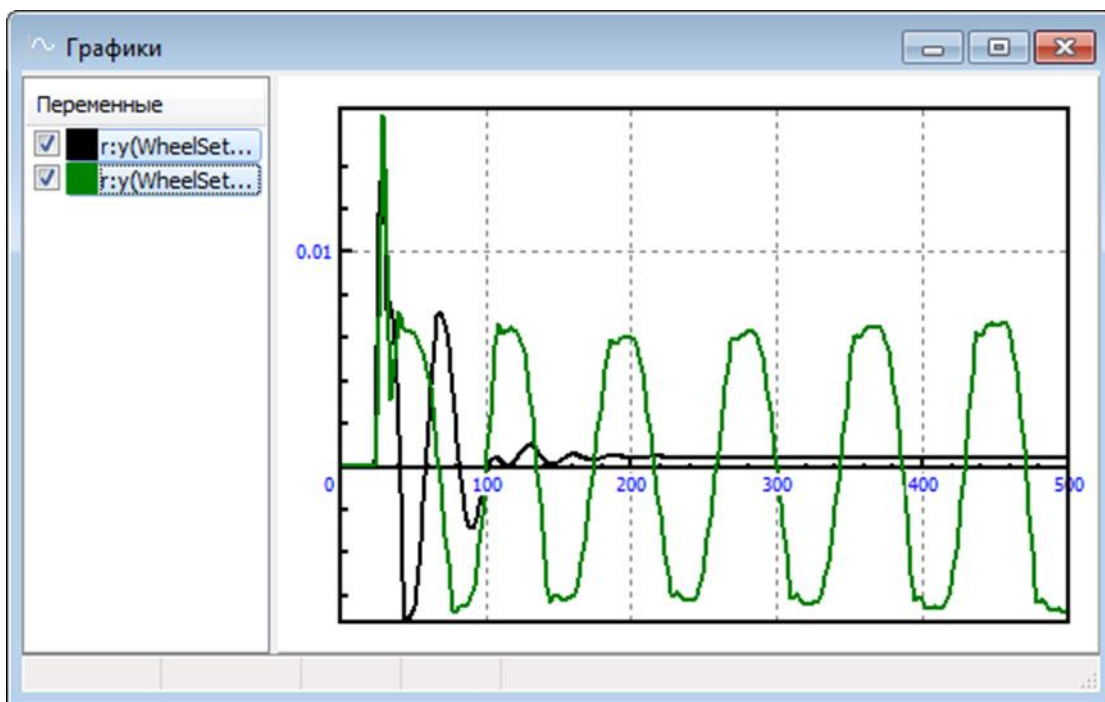



Рис. 3.19. Поперечные колебания первой колёсной пары:  
черный график – скорость 30 м/с, зеленый график – скорость 90 м/с

### 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 стандартного отклонения поперечных колебаний первой колёсной пары от скорости движения моторисы, аналогичный графику на рис. 3.3.

1. Перейдите на вкладку **Результаты | Мастер графиков**.
2. В списке переменных выберите **r:y(Wheelset1.Wset)**.
3. В поле **Функционал** выберите **Std\_Dev (Standard deviation – стандартное отклонение)**.
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 автотрисы находится в интервале от 45 до 50 м/с.

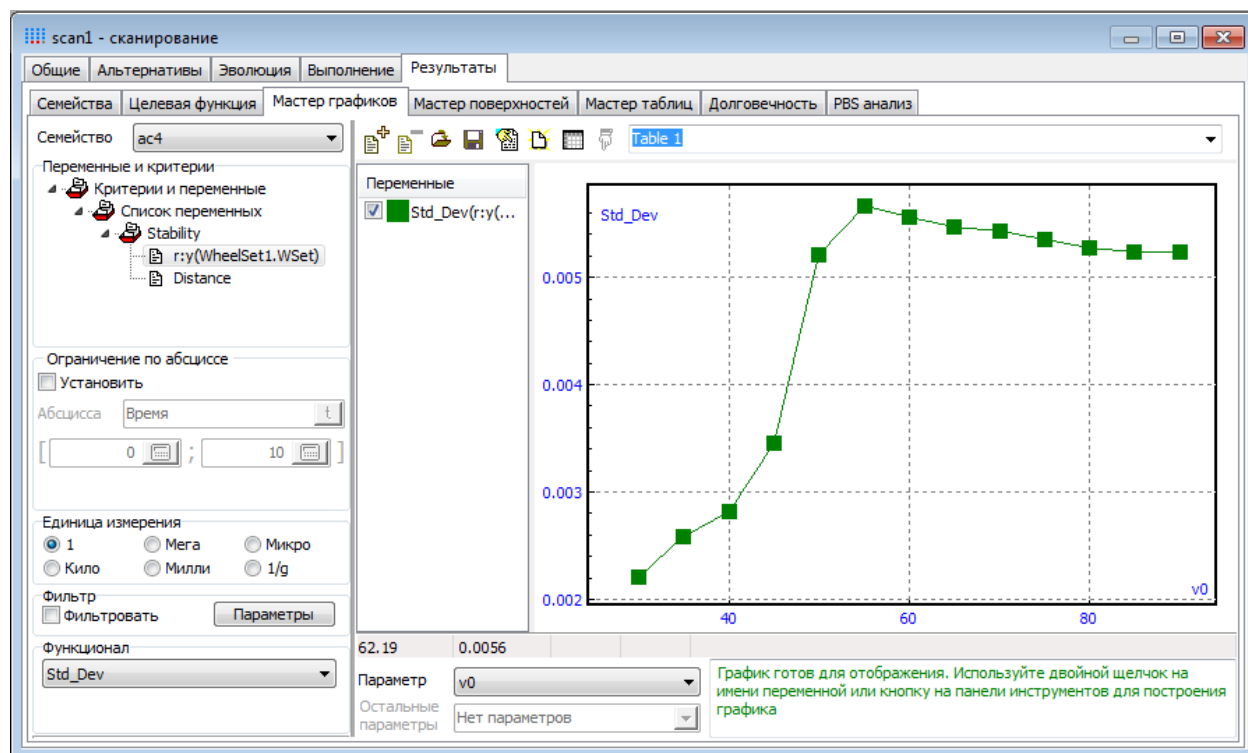


Рис. 3.20. Построение сводных графиков