



Руководство пользователя



# Моделирование динамики гусеничных машин

Рассмотрены особенности автоматизированного создания моделей гусеничных машин и исследования их динамики

## Оглавление

<b>18. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН .....</b>	<b>1-5</b>
<b>18.1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О МОДУЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН.....</b>	<b>1-5</b>
<b>18.2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ГМ В МОДУЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ .....</b>	<b>1-7</b>
18.2.1. Стандартные элементы модели гусеничного движителя .....	1-7
18.2.1.1. Перечень элементов и моделирующих их компонент .....	1-7
18.2.1.2. Основная система координат .....	1-9
18.2.1.3. Системы координат колес и роликов .....	1-9
18.2.1.4. Описание стандартных компонент, задающих элементы гусеничного движителя.....	1-10
18.2.1.4.1. Подсистемы подвески .....	1-10
18.2.1.4.1.1. Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески .....	1-11
18.2.1.4.1.2. Выделенные идентификаторы блока подвески .....	1-14
18.2.1.4.1.3. Индивидуальная торсионная подвеска .....	1-16
18.2.1.4.1.4. Блок балансирующей каретки с двумя катками и двумя рычагами .....	1-25
18.2.1.4.1.5. Балансирующая каретка с двумя катками и одним рычагом .....	1-30
18.2.1.4.1.6. Отдельный опорный каток для жесткой и полужесткой подвесок.....	1-33
18.2.1.4.2. Направляющее колесо и натяжное устройство .....	1-34
18.2.1.4.2.1. Направляющее колесо на кривошипе (упрощенная модель) .....	1-36
18.2.1.4.2.2. Направляющее колесо на кривошипе (уточненная модель) .....	1-43
18.2.1.4.3. Ведущее колесо .....	1-45
18.2.1.4.3.1. Геометрические параметры ведущего колеса .....	1-45
18.2.1.4.3.2. Автоматический генератор профилей зуба звездочки.....	1-47
18.2.1.4.3.3. Задание профилей зуба и цевки с помощью редактора кривых .....	1-51
18.2.1.4.3.4. Шаблон модели звездочки .....	1-53
18.2.1.4.4. Звено цепи .....	1-55
18.2.1.4.4.1. Звено с жестким шарниром .....	1-57
18.2.1.4.4.2. Звено с упругим шарниром .....	1-59
18.2.1.4.4.3. Звено с параллельными резинометаллическими шарнирами .....	1-61
18.2.1.4.5. Поддерживающий каток .....	1-62
18.2.2. Примеры разработки новых элементов гусеницы .....	1-64
18.2.2.1. Разработка блока балансирующей подвески с тремя опорными катками.....	1-64
18.2.3. Регистрация компонент, моделирующих элементы гусеницы .....	1-68
18.2.4. Создание модели гусеницы.....	1-70
18.2.4.1. Подготовка процесса .....	1-70
18.2.4.2. Добавление подсистемы – гусеницы .....	1-71
18.2.4.3. Задание структуры модели .....	1-72
18.2.4.4. Создание подвески.....	1-74
18.2.4.5. Добавление ведущего колеса.....	1-75
18.2.4.6. Добавление направляющего колеса .....	1-76
18.2.4.7. Добавление поддерживающих катков .....	1-77
18.2.4.8. Создание модели гусеничной цепи .....	1-77
18.2.4.9. Доработка модели гусеницы. Добавление амортизаторов .....	1-79
18.2.5. Создание модели ГМ .....	1-82
18.2.5.1. Добавление корпуса.....	1-82
18.2.5.2. Назначение связи гусеницы с корпусом .....	1-84
18.2.5.3. Добавление второй гусеницы .....	1-85
18.2.5.4. Коррекция положения ГМ в вертикальном направлении .....	1-87
18.2.6. Модель трансмиссии и механизма поворота .....	1-89
18.2.6.1. Добавление модели трансмиссии из базы данных.....	1-89
18.2.6.2. Общие элементы стандартных моделей трансмиссии.....	1-91
18.2.6.2.1. Фиктивное тело трансмиссии .....	1-92
18.2.6.2.2. Двигатель внутреннего сгорания .....	1-93
18.2.6.2.3. Передача момента от двигателя: главный фрикцион и гидроаппарат .....	1-94
18.2.6.2.4. Коробка передач .....	1-95
18.2.6.2.5. Остановочный тормоз .....	1-96
18.2.6.2.6. Бортовые передачи .....	1-96

18.2.6.2.7. Идентификаторы .....	1-97
18.2.6.2.8. Действия после добавления трансмиссии с модели ГМ .....	1-98
18.2.6.3. Система управления поворотом с бортовыми фрикционными .....	1-100
18.2.6.4. Система управления поворотом с планетарным механизмом .....	1-102
18.2.6.5. Система управления поворотом с регулируемым дифференциалом .....	1-104
18.2.6.6. Двойной дифференциал (Майбах) .....	1-106
18.2.6.7. Двойной дифференциал .....	1-109
18.2.6.8. Двойной дифференциал (SU).....	1-110
18.2.6.9. Тройной дифференциал .....	1-111
18.2.6.10. Бесступенчатый механизм поворота.....	1-112

### **18.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГМ..... 1-113**

18.3.1. Модели силовых взаимодействий .....	1-113
18.3.1.1. Взаимодействие звездочки с цевками.....	1-113
18.3.1.2. Взаимодействие звеньев гусеницы с грунтом.....	1-115
18.3.1.2.1. Модель грунта без учета просадки .....	1-115
18.3.1.2.2. Модель Беккера грунта с учетом просадки.....	1-116
18.3.1.3. Качение катков по звеньям гусеничной цепи .....	1-118
18.3.1.4. Нормальные силы взаимодействия катка с гусеницей.....	1-119
18.3.1.5. Удерживающие силы и момент .....	1-122
18.3.1.6. Блокирующая сила и момент в горизонтальной плоскости .....	1-123
18.3.1.7. Методика расчета коэффициента жесткости в контакте опорного катка с гусеничной цепью..	1-123
18.3.2. Управление движением ГМ .....	1-124
18.3.2.1. Общие сведения о модели управления ГМ .....	1-124
18.3.2.2. Модель водителя.....	1-125
18.3.2.3. Геометрия управляемого движения ГМ .....	1-126
18.3.2.3.1. Прямолинейное движение .....	1-126
18.3.2.3.2. Плоская кривая .....	1-126
18.3.2.3.3. Испытательный полигон .....	1-127
18.3.3. Классификация динамических тестов.....	1-129
18.3.4. Подготовка модели ГМ к моделированию .....	1-129
18.3.4.1. Вкладка "Настройки".....	1-131
18.3.4.1.1. Общие настройки.....	1-131
18.3.4.1.2. Задание неровностей .....	1-132
18.3.4.1.2.1. Файловые неровности.....	1-132
18.3.4.1.2.2. Синусоидальные неровности .....	1-133
18.3.4.1.2.3. Плавный заезд на неровности .....	1-133
18.3.4.1.2.4. Примеры неровностей .....	1-134
18.3.4.1.2.5. Визуализация неровностей в анимационном окне.....	1-134
18.3.4.1.3. Задание параметров макрогеометрии .....	1-136
18.3.4.1.3.1. Задание маршрутов на испытательном полигоне .....	1-136
18.3.4.1.3.2. Параметры графического образа колеи.....	1-139
18.3.4.2. Вкладка "Соппротивление".....	1-140
18.3.4.3. Вкладка "Инструменты": задание скорости .....	1-140
18.3.4.4. Вкладка "Идентификация".....	1-141
18.3.4.4.1. Параметры контактов гусеницы.....	1-142
18.3.4.4.2. Блокировка движения в горизонтальной плоскости .....	1-143
18.3.4.4.3. Тяговые моменты .....	1-143
18.3.4.4.4. Характеристики грунта с просадкой.....	1-143
18.3.4.5. Вкладка "Тесты".....	1-144
18.3.4.5.1. Тест: равновесие .....	1-145
18.3.4.5.2. Тест: натяжение гусеницы .....	1-148
18.3.4.5.3. Тест: натяжение через преднатяг .....	1-152
18.3.4.5.4. Тест: вертикальная прокатка .....	1-156
18.3.4.5.5. Тест: расчет начальных скоростей.....	1-158
18.3.4.5.6. Тесты с продольным движением ГМ.....	1-159
18.3.4.5.6.1. Тест: движение по прямой.....	1-161
18.3.4.5.6.2. Тест: управление без обратной связи .....	1-161
18.3.4.5.6.3. Тест с водителем .....	1-162
18.3.5. Численный метод .....	1-164
18.3.6. Список специализированных переменных .....	1-165
18.3.7. Особенности организации многовариантных расчетов.....	1-167

18.3.7.1. Использование стандартных внутренних идентификаторов .....	1-167
18.3.7.2. Условие завершения численных экспериментов по пройденному пути .....	1-169

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>1-171</b>
--------------------------------	--------------

# 1. Моделирование динамики гусеничных машин

## 1.1. Общая информация о модуле моделирования гусеничных машин

Модуль предназначен для автоматизации процесса создания моделей машин с гусеничными двигателями (гусеничных машин, ГМ) и исследования их динамики.

В текущей версии реализованы следующие инструменты:

- автоматическое создание модели гусеничного двигателя с использованием библиотеки основных элементов конструкции;
- дополнение библиотеки элементов конструкции двигателя;
- анализ динамики ГМ с использованием набора стандартных тестов.

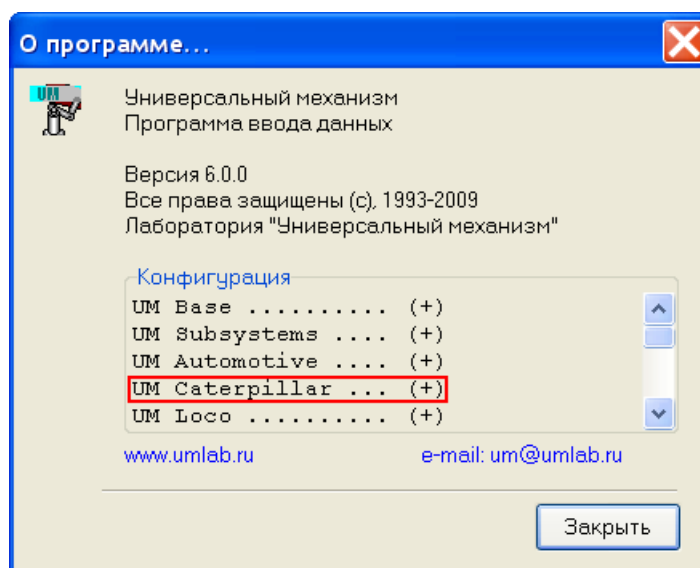


Рис. 1.1. Состав модулей в текущей версии UM

Для того чтобы проверить, включает ли текущая версия UM данный модуль, запустите программу моделирования **UM Input**, выберите команду меню **Помощь | О программе** и проверьте, что в появившемся окне после названия модуля **UM Caterpillar** стоит знак (+), рис. 1.1.



Рис. 1.2. Пример модели ГМ

Стандартная модель ГМ включает (рис. 1.2):

- кузов,
- два гусеничных движителя,
- элементы трансмиссии.

Разработка модели гусеничного движителя в значительной мере автоматизирована. Детальное моделирование элементов трансмиссии при необходимости производится самостоятельно разработчиком модели машины.

В текущей версии УМ могут быть реализованы все основные типы подвесок: жесткая, полужесткая и упругая.

**Замечание.** В настоящее время реализовано самое распространенное цевочное зацепление ведущего колеса со звеньями гусеничного обвода. По желанию пользователей разработчики могут доработать модуль и реализовать гребневое и зубчатое зацепления.

## 1.2. Создание модели ГМ в модуле моделирования

### 1.2.1. Стандартные элементы модели гусеничного движителя

#### 1.2.1.1. Перечень элементов и моделирующих их компонент



Рис. 1.3. Пример гусеничного движителя

Пример гусеничного движителя с индивидуальными торсионными подвесками представлен на рис. 1.3. Основными элементами модели движителя являются:

- балансирной или индивидуальной подвески с *опорными катками*;
- каток как элемент жесткой или полужесткой подвески;
- *звездочка*;
- *гусеница*, состоящая из отдельных тел – *траков*, соединенных жесткими или упругими шарнирами;
- направляющее колесо с натяжным устройством;
- поддерживающие катки.

Для автоматизации процесса создания модели движителя используется набор стандартных и созданных пользователем *компонент*, а также специальный инструмент описания конструкции в программе ввода.

*Стандартные компоненты* содержатся в текстовых файлах, размещенных в каталоге {Данные УМ}\Caterpillar\Subsystems.

Список стандартных компонент.

#### 1. Подвески:

- *torsion\_bar\_wheel.dat* – отдельный блок индивидуальной торсионной подвески, включающий одно опорное колесо и торсионный рычаг;
- *bogie\_joint.dat* – отдельный блок двухкатковой каретки балансирной подвески;
- *bogie\_torsion.dat* – отдельный блок двухкатковой торсионной балансирной подвески.

#### 2. Звездочка: *sprocket.dat*.

#### 3. Натяжное устройство и направляющее колесо:

- idler\_crank\_simple.dat – упрощенная модель колеса с кривошипом;
  - idler\_crank.dat – уточненная модель колес с кривошипом;
  - idler\_slider.dat – модель колеса с ползуном.
4. Отдельные **траки** гусеницы:
- track\_link\_rigid.dat – трак с жестким шарниром;
  - track\_link\_bushing.dat – трак с упругим шарниром;
  - track\_link\_parallel.dat – трак с двойным упругим шарниром.
5. **Поддерживающий каток**: *roller.dat*.

Используя компоненты, а также геометрические данные, введенные пользователем, программа автоматически формирует модель.

### 1.2.1.2. Основная система координат

Стандартная система координат, используемая в модуле моделирования ГМ, совпадает с СК0 и имеет следующее направление осей координат.

- Ось X направлена вперед вдоль экипажа при его начальном положении.
- Ось Z направлена вертикально вверх.
- Ось Y направлена влево по ходу экипажа.

Как правило, при описании модели гусеничного движителя ось звездочки в случае заднеприводной ГМ или ось натяжного колеса в случае переднеприводной ГМ находятся над началом отсчета СК0, см. рис. 1.3, так что остальные колеса и ролики имеют положительные продольные координаты.

### 1.2.1.3. Системы координат колес и роликов

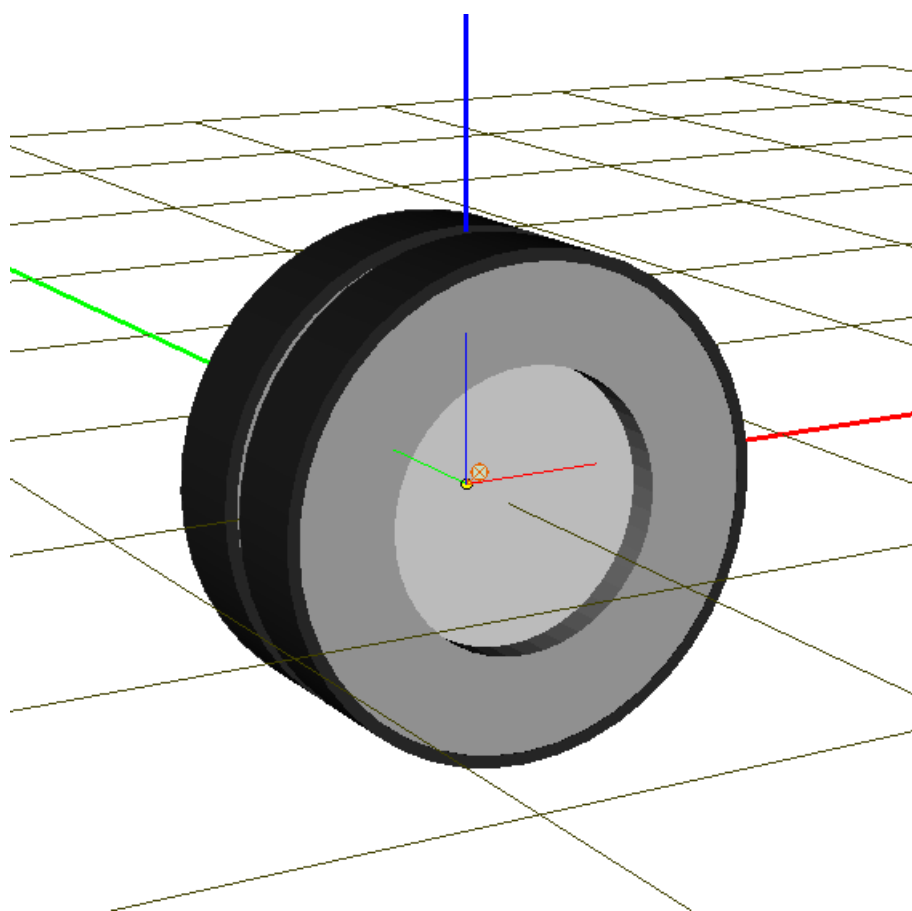


Рис. 1.4. Локальная система координат опорного катка

Локальная система координат тел, моделирующих опорные катки, ведущее, направляющее колесо и поддерживающие ролики должна иметь начало отсчета в центре симметрии колеса, рис. 1.4. В частности, начало отсчета должно лежать на оси вращения колеса. Все стандартные компоненты обладают таким свойством, однако пользователю следует помнить об этом правиле при создании собственных компонент, см. п. 1.2.3 *Регистрация компонент, моделирующих элементы гусеницы.*

#### 1.2.1.4. Описание стандартных компонент, задающих элементы гусеничного движителя

##### 1.2.1.4.1. Подсистемы подвески

Отдельные блоки подвески различных типов описываются в виде включенных подсистем.

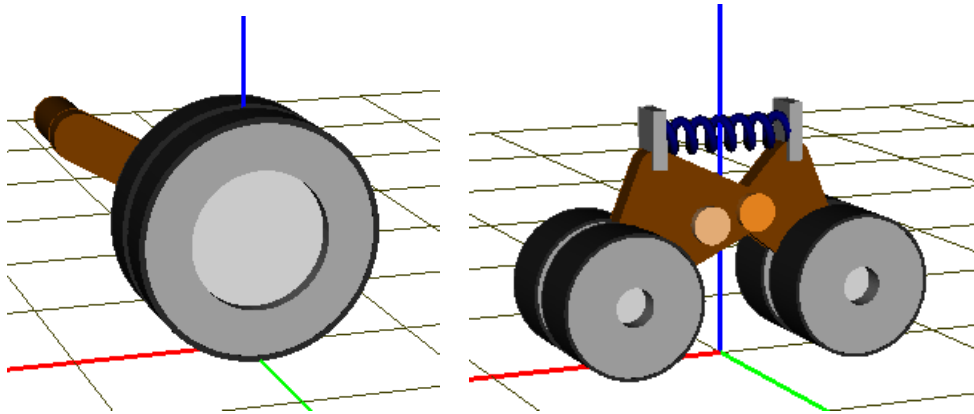


Рис. 1.5. Примеры отдельных блоков (подсистем) индивидуальной и балансирующей подвесок

В случае *индивидуальной* подвески, как правило, подсистема содержит только одно опорное колесо, в то время как для балансирующих подвесок подсистема может содержать отдельную каретку и, соответственно, несколько опорных колес, рис. 1.5.

Для жесткой и полужесткой подвески подсистема содержит одно опорное колесо.

*При необходимости подсистема может содержать полное описание подвески гусеницы и все опорные катки.*

### 1.2.1.4.1.1. Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески

Корректное описание подсистемы, моделирующей отдельный блок подвески, предполагает использование стандартных элементов.

#### 1. Стандартный элемент: локальный корпус.

*Локальный корпус* это тело нулевой массы с *внутренним шарниром*, имеющим шесть степеней свободы, помеченное текстовым атрибутом типа C: *LocalHull*, рис. 1.6.

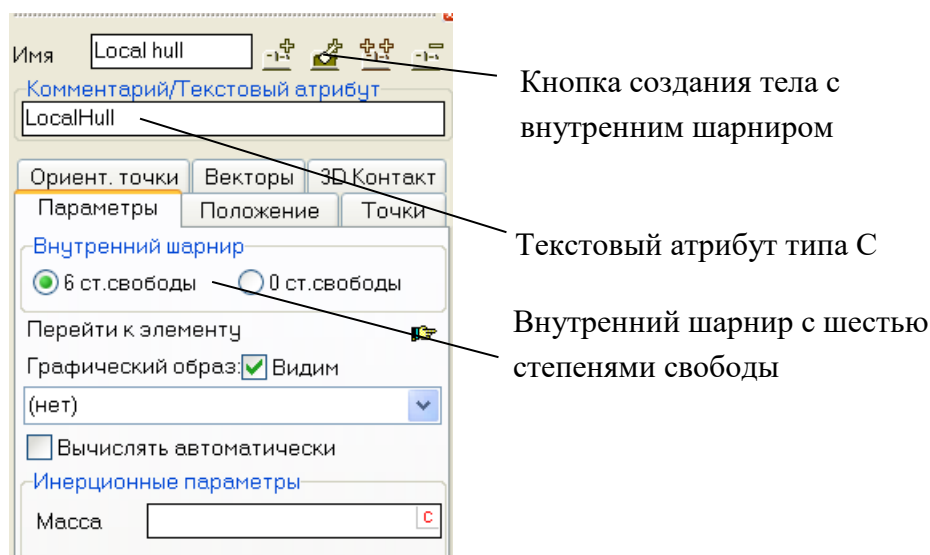


Рис. 1.6. Тело – локальный корпус

**Замечание.** В UM60 появился второй текстовый атрибут. Чтобы различать их, для первого атрибута, вносимого пользователем в поле **Комментарий/Текстовый атрибут** (рис. 1.6), используется наименование «текстовый атрибут типа C», для второго – «текстовый атрибут типа T». Оба типа атрибутов доступны на закладке **Объект | Атрибуты**, рис. 1.7.

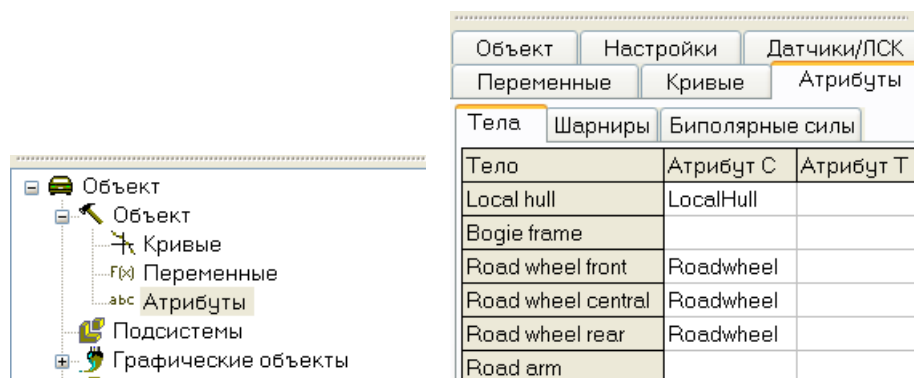



Рис. 1.7. Текстовые атрибуты типов C и T

Это тело используется при описании шарниров и силовых элементов, связывающих тела блока подвески с кузовом машины. Поскольку кузов не входит в подсистему, то шарниры и силовые элементы связываются вместо него с локальным корпусом. При автома-

тическом добавлении подсистемы в модель гусеничного движителя локальный корпус блока подвески жестко связывается с аналогичным локальным корпусом гусеницы, а внутренний шарнир с шестью степенями свободы игнорируется. Поскольку, в свою очередь, локальный корпус гусеницы жестко связывается с телом, моделирующим корпус машины, элементы, связывающие тела блока подвески с локальным корпусом, будут фактически связаны с действительным корпусом.

При создании тела – локальный корпус следует использовать кнопку , с помощью которой создается тело с внутренним шарниром, рис. 1.6.

2. **Стандартный элемент:** текстовый атрибут опорного колеса *RoadWheel*.

Тела, моделирующие опорные катки должны быть помечены текстовым атрибутом типа *C RoadWheel*, рис. 1.8.

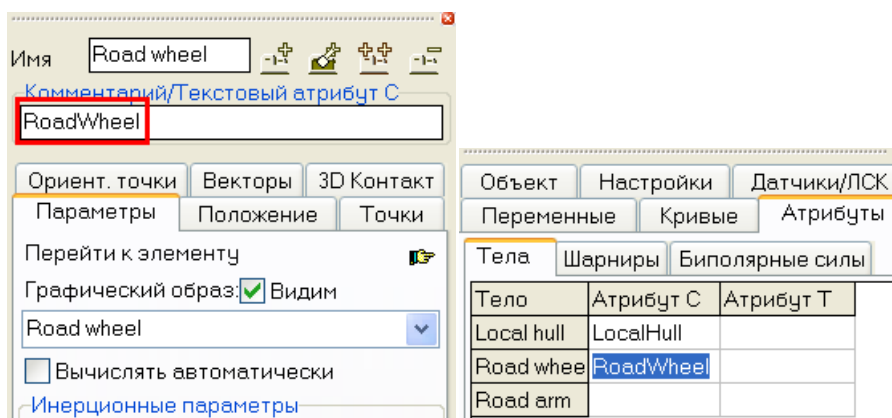


Рис. 1.8. Текстовые атрибуты на закладке **Тела и Объект | Атрибуты | Тела**

3. **Стандартные элементы:** стандартные идентификаторы, табл. 1.1, рис. 1.9.

Таблица 1.1.

Идентификатор	Комментарий
<i>xbogie</i>	Положение подсистемы относительно СК0 в продольном направлении
<i>rroadwheel</i>	Радиус опорного катка
<i>wroadwheel</i>	Ширина опорного катка
<i>side_key</i>	Признак левой (1) или правой (-1) гусеницы. Следует использовать этот идентификатор для задания поперечных координат, имеющих разные знаки для разных гусениц
<i>wguide</i>	Ширина паза в катке для прохода гребня гусеничного звена
<i>hguide</i>	Глубина паза в катке для прохода гребня гусеничного звена
<i>guide_in_key</i>	Признак наличия (1) или отсутствия (0) паза в катке для прохода гребня гусеничного звена

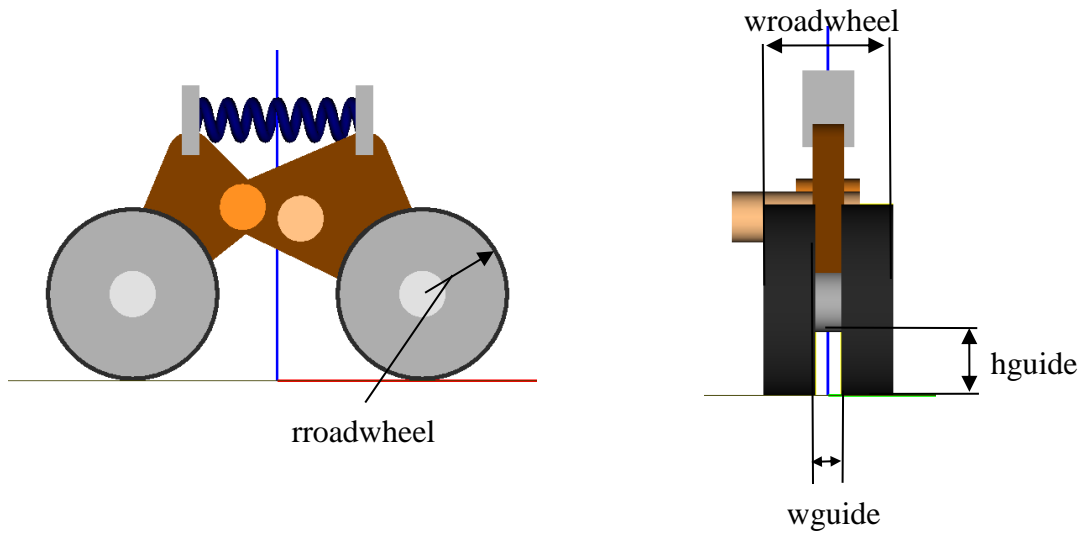


Рис. 1.9. Стандартные геометрические идентификаторы


**Замечание.** Модели блоков подвески с геометрической точки зрения создаются таким образом, что при значении идентификатора  $side\_key=1$  геометрия соответствует левой гусенице, а при  $side\_key=-1$  – правой. С этой целью данный идентификатор используется в качестве множителя для геометрических параметров, имеющих разные по знаку значения для левой и правой гусеницы.

### 1.2.1.4.1.2. Выделенные идентификаторы блока подвески

Для того чтобы получить доступ к наиболее важным геометрическим параметрам блока подвески при создании модели гусеницы, рекомендуется создать список *выделенных идентификаторов*, параметризующих нужные геометрические размеры блока подвески. Поскольку блок подвески описывается подсистемой, то выделенный список идентификаторов означает множество идентификаторов головного объекта модели подвески, тождественно совпадающих с нужными идентификаторами блока подвески.

Стандартные блоки подвески содержат готовый список выделенных идентификаторов, который может быть модифицирован пользователем.

Для создания и модификации списка выделенных идентификаторов блока подвески следует выполнить следующие действия.

1. Создать новый объект в программе **UM Input**.
2. Прочитать модель (компоненту) с помощью кнопки  или команды меню **Правка | Прочитать из файла**.
3. Для добавления новых элементов в список выделенных идентификаторов щелкнуть правой кнопкой мыши на списке идентификаторов объекта и выбрать команду контекстного меню **Добавить из подсистемы** (рис. 1.10, слева).

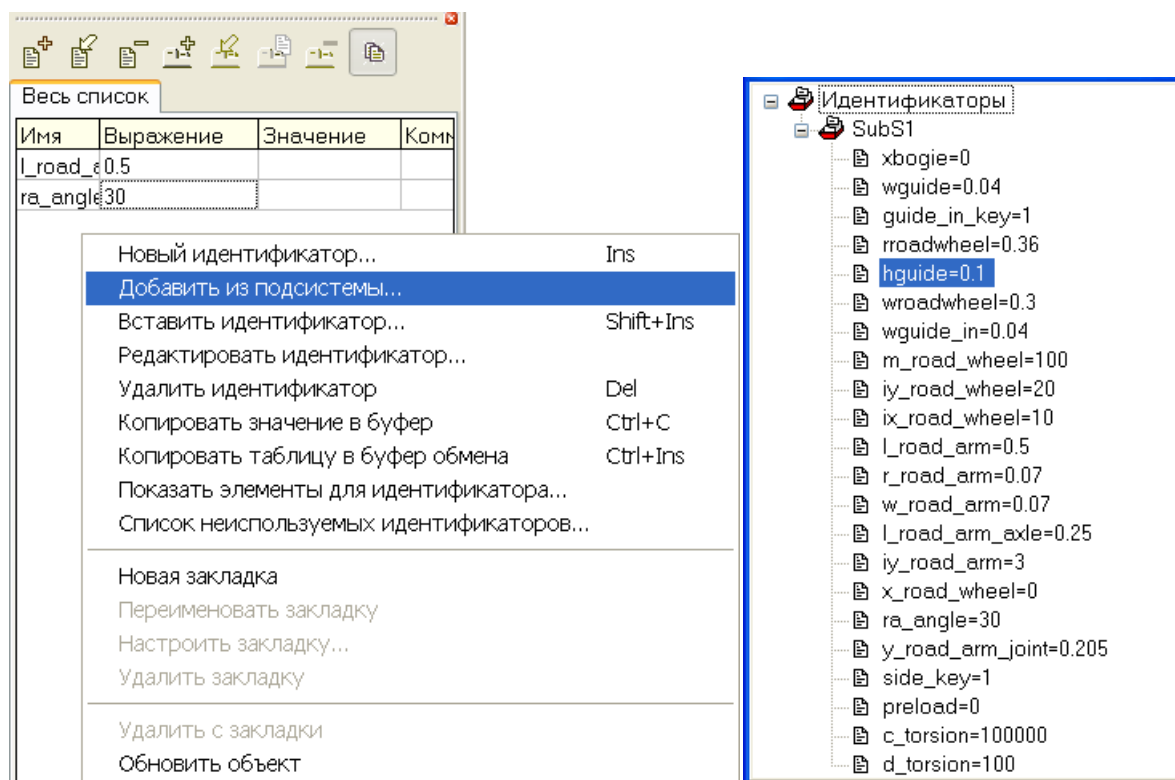



Рис. 1.10. Добавление выделенных идентификаторов из подсистемы

4. Добавить нужные идентификаторы щелчками правой кнопкой мыши на элементах списка идентификаторов (рис. 1.10, справа).
5. Для удаления элементов из списка используется стандартная процедура удаления идентификаторов.

6. Сохранить измененную компоненту с помощью кнопки  на панели инструментов или с помощью команды меню **Файл | Сохранить как компоненту**.

При добавлении блоков подвесок в модель гусеницы выделенные идентификаторы доступны для модификации в мастере создания гусеничного движителя на закладке Suspension, рис. 1.11.

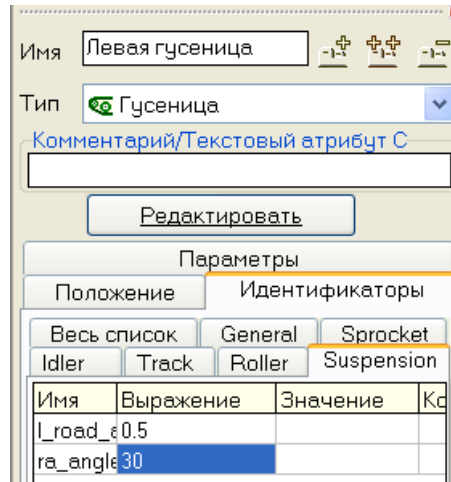


Рис. 1.11. Список выделенных идентификаторов индивидуальной торсионной подвески в мастере создания гусеничного движителя

1.2.1.4.1.3. Индивидуальная торсионная подвеска

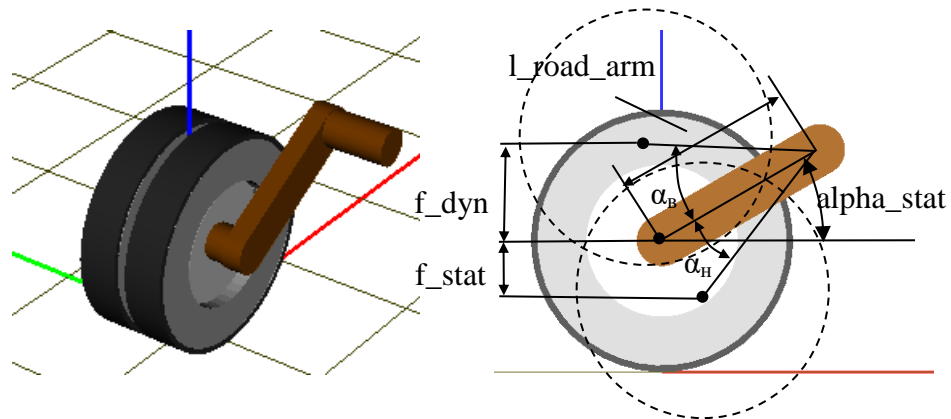


Рис. 1.12. Торсионная индивидуальная подвеска и выделенные идентификаторы

Подсистема моделирует один из наиболее распространенных типов подвески гусеничных движителей – индивидуальной торсионной подвески.

1. **Путь к файлу** компоненты:  
 {Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\torsion\_bar\_wheel.dat.
2. **Выделенные идентификаторы**, табл. 1.2., рис. 1.12.

Таблица 1.2.

Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>l_road_arm</i>	0.5	(м) Длина рычага подвески
<i>alpha_stat</i>	20	(градусы) Угол наклона балансира в статическом положении
<i>f_stat</i>	70	(мм) Статический ход
<i>f_dyn</i>	120	(мм) Динамический ход
<i>p_stat</i>	7000	(Н) Статическая нагрузка на каток
<i>rear_arm</i>	1	(±1) Признак направления оси балансира: назад по ходу (1) или вперед по ходу (-1)



Рис. 1.13. Изменение положения рычага с помощью идентификатора признака направления оси балансира

Задавая различные значения *rear\_arm* в разных подсистемах, пользователь может получить геометрически различные положения оси балансира в модели гусеницы, рис. 1.13. Для всех катков, кроме левого, задано значение -1, в то время как для левого катка принято значение 1.

По значениям выделенных идентификаторов автоматически рассчитываются углы  $\alpha_B$ ,  $\alpha_H$  и крутильная жесткость торсиона *c* в соответствии с формулами

$$\alpha_B = \arcsin\left(\frac{f_{dyn}}{l_{road\_arm}} - \sin \alpha_{stat}\right) + \alpha_{stat}$$

$$\alpha_H = \arcsin\left(\frac{f_{stat}}{l_{road\_arm}} + \sin \alpha_{stat}\right) - \alpha_{stat}$$

$$c = \frac{p_{stat} * l_{road\_arm} * \cos \alpha_{stat}}{\alpha_H}$$

### 3. Тела.

Модель содержит три тела.

- Локальный корпус (*Local hull*), см. п. 1.2.1.4.1.1. "Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески", с. 1-11.
- Опорный каток (*Road wheel*), помеченный стандартным текстовым атрибутом типа C: *RoadWheel*.
- Рычаг торсионной подвески *Road Arm*.

Инерционные параметры тел заданы идентификаторами, табл. 1.3.

Таблица 1.3.

**Идентификаторы, параметризующие инерционные параметры тел**

Тело	Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>Road Wheel</i>	<i>m_road_wheel</i>	100	(кг) Масса
	<i>ix_road_wheel</i>	10	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости колеса
	<i>iy_road_wheel</i>	20	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колеса
<i>Road Arm</i>	<i>m_road_arm</i>	50	(кг) Масса
	<i>ix_road_arm</i>	0.2	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно продольной оси рычага
	<i>iy_road_arm</i> <i>iz_road_arm</i>	3	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно осей, перпендикулярных рычагу

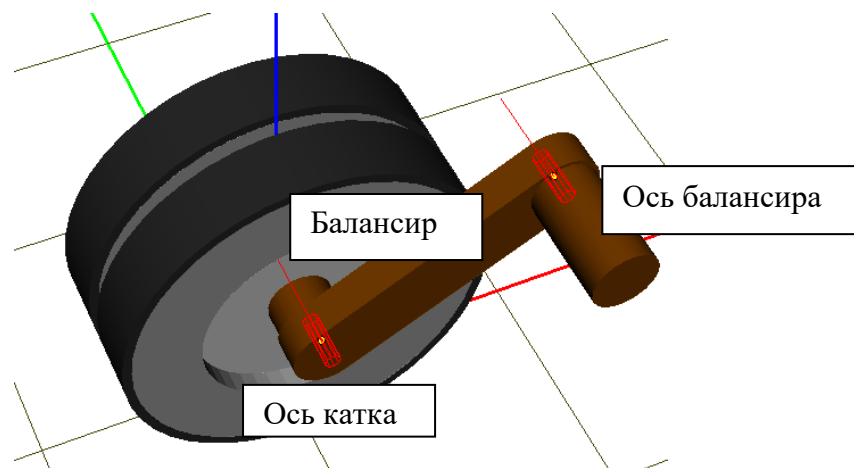


Рис. 1.14. Шарниры индивидуальной торсионной подвески

#### 4. Шарниры.

Кроме внутреннего шарнира локального кузова, модель блока подвески содержит два вращательных шарнира, рис. 1.14.

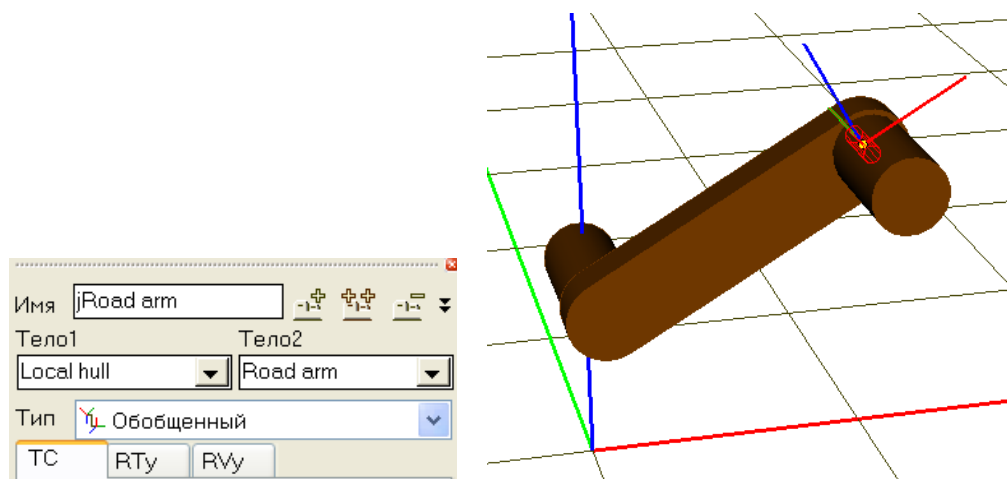


Рис. 1.15. Шарнир *jRoad arm* и СК тел

Шарнир *jRoad arm* определяет вращательную степень свободы рычага относительно корпуса. В подсистеме, моделирующей блок подвески, этот шарнир задает вращение рычага (тело *Road arm*) относительно локального корпуса (тело *Local hull*). Для задания вращательного шарнира используется шарнир *обобщенного типа*, содержащий три элементарных преобразования. Рассмотрим их подробно.

Как известно, шарнир обобщенного типа описывает последовательность элементарных преобразований (ЭП), переводящих СК первого тела кинематической пары в СК второго тела, рис. 1.15, см. [Глава 2](#), п. *Шарниры | Обобщенный шарнир*.

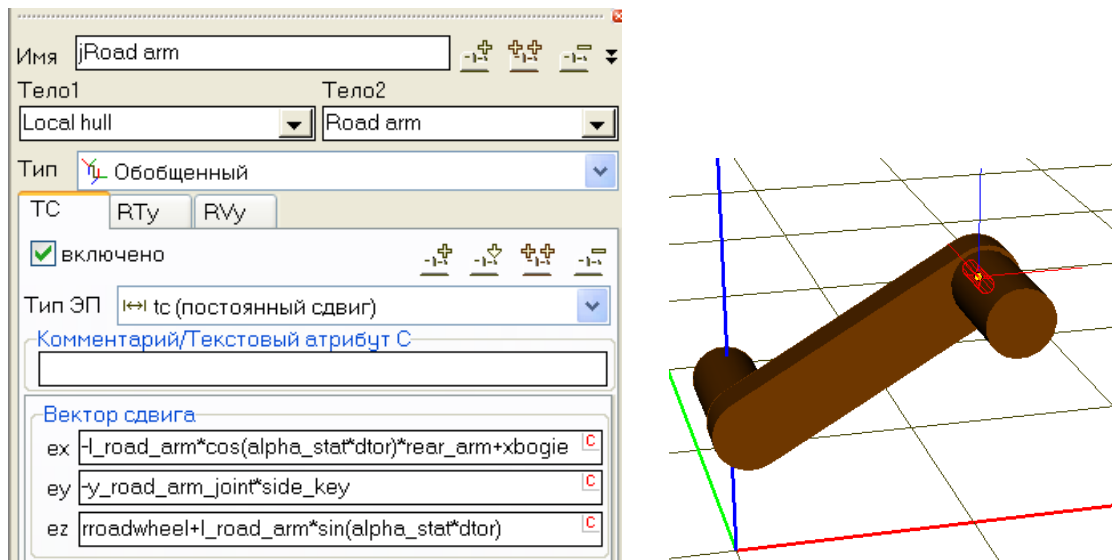


Рис. 1.16. Первое ЭП: сдвиг

Первое ЭП типа *tc* переводит СК первого тела в шарнирную точку, лежащую на оси шарнира (результат смещения СК показан на рис. 1.16 тонкими линиями):

- сдвиг вдоль оси X задан выражением

$$l\_road\_arm * \cos(\alpha\_stat * dtor) + xbogie,$$

при этом идентификатор *xbogie* задает положение центра колеса в продольном направлении; стандартный идентификатор *dtor* ( $=\pi/180$ ) переводит угол из градусов в радианы;

- сдвиг вдоль оси Y

$$-y\_road\_arm\_joint * side\_key,$$

обратите внимание, что направление сдвига в поперечном направлении зависит от значения идентификатора *side\_key* ( $\pm 1$ );

- сдвиг вдоль оси Z:

$$roadwheel + l\_road\_arm * \sin(\alpha\_stat * dtor).$$

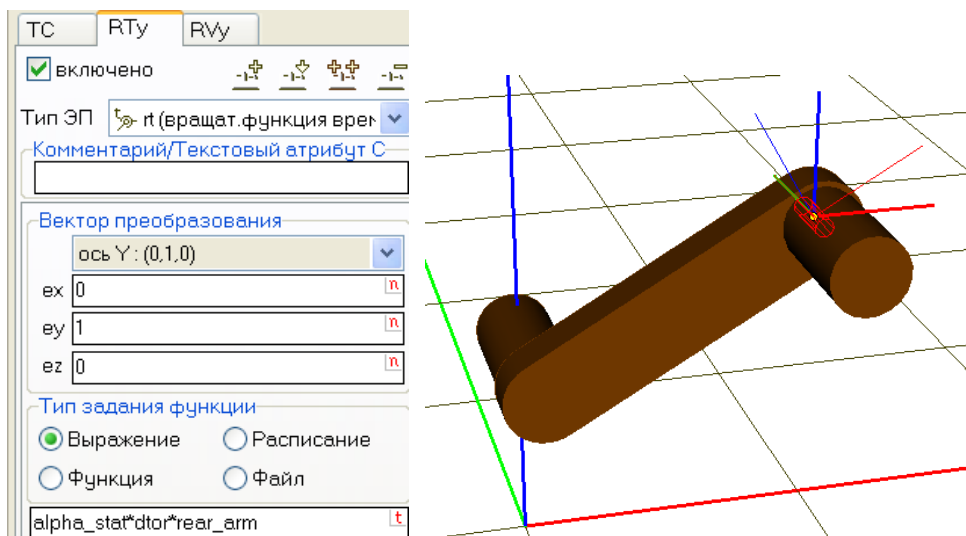


Рис. 1.17. Второе ЭП: поворот на угол, заданный идентификатором

Второе ЭП типа *tt* осуществляет поворот на угол, параметризованный идентификатором *alpha\_stat* вокруг оси шарнира, рис. 1.17.

Третье ЭП типа *tv* вводит вращательную степень свободы и упругий поддерживающий момент в подвеске, рис. 1.18.

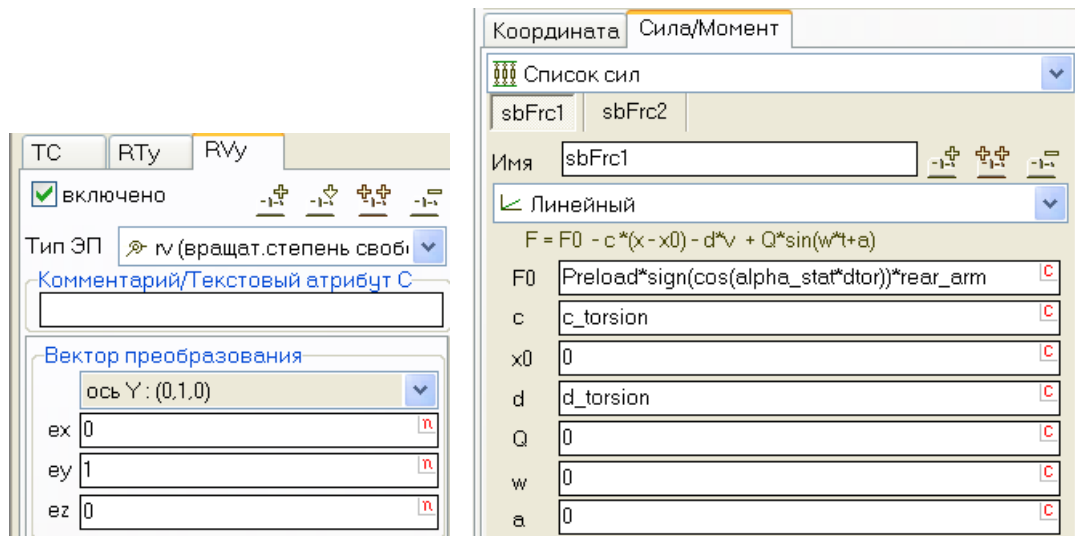


Рис. 1.18. Третье ЭП: Введение вращательной степени свободы и упругого момента торсионной подвески

Положительное изменение угла в шарнире при различных положениях оси торсиона (идентификатор *rear\_arm*) указано на рис. 1.19.

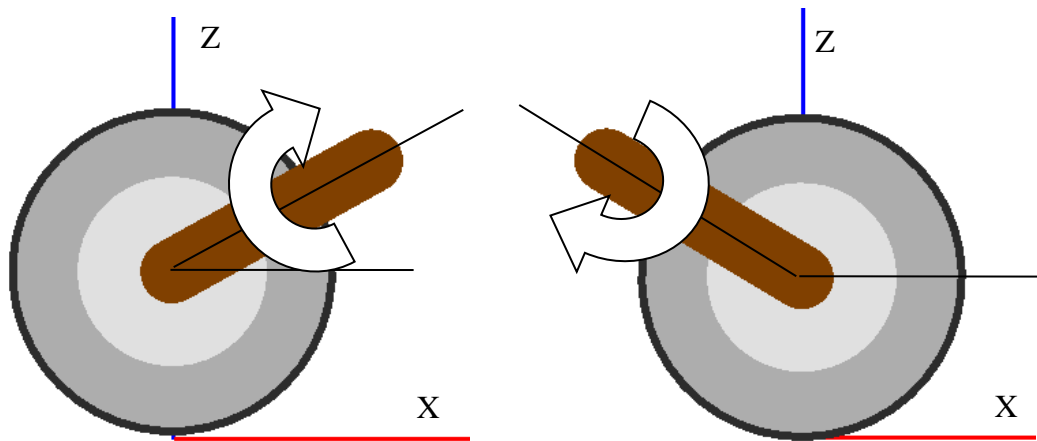


Рис. 1.19. Положительное направление изменения угла в шарнире

**Параметры упругой торсионной подвески.**

В модели реализована линейная упругая торсионная подвеска с помощью линейного шарнирного момента, рис. 1.18. При нулевом значении шарнирной координаты возникает момент, значение которого параметризовано идентификатором *preload* (предварительная нагрузка). Направление этого момента при различных значениях номинального угла  $\alpha_0$  (идентификатор *alpha\_stat*) указано на рис. 1.20. При изменении значения угла возникает динамическая составляющая упругого момента с коэффициентами угловой жесткостью *c\_torsion* и угловой диссипацией *d\_torsion*.

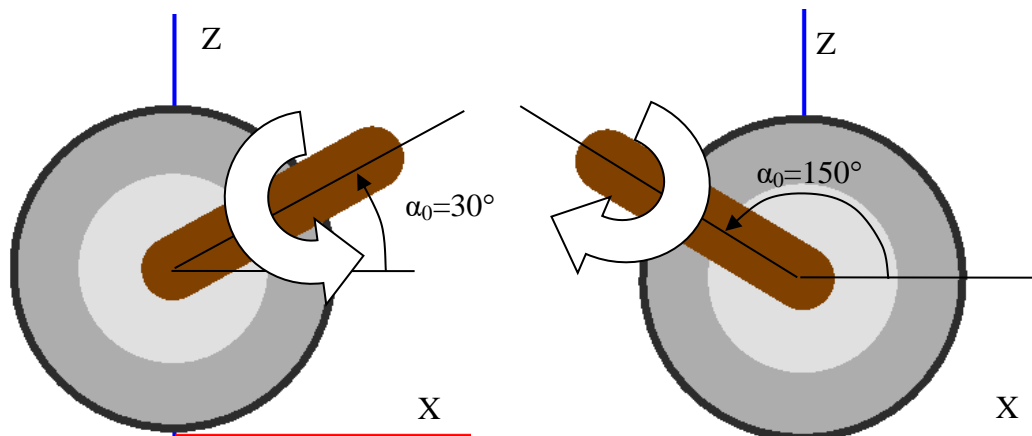


Рис. 1.20. Направление момента преднатяга

Для ограничения динамического хода катка по вертикали используется вторая составляющая шарнирного момента. При превышении заданного динамического хода возникает возвращающий упругий момент с коэффициентом жесткости, заданном идентификатором  $c_{stop}$ , рис. 1.21, рис. 1.22.

sbFrc1 | sbFrc2

Имя: sbFrc2

Потоочный (выраж.)

Тип зависимости:  x  v  t  var

Сжатие положительно

Тип привязки графика:  По абсциссе  По силе

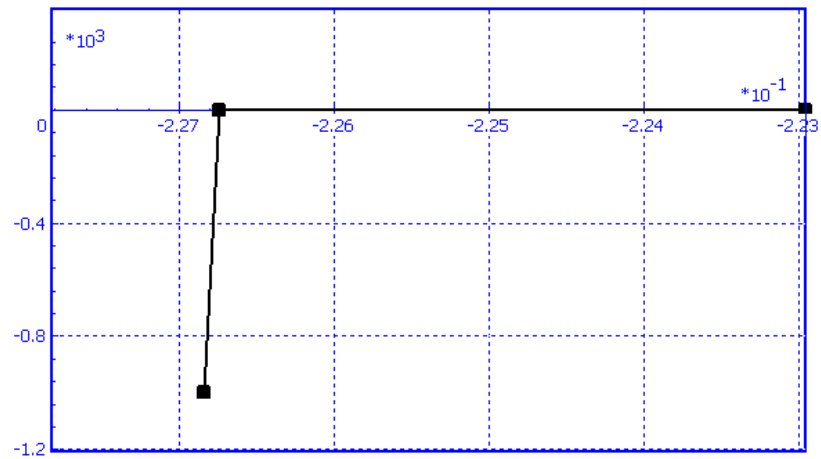
L: 0

X(L)/F(L):

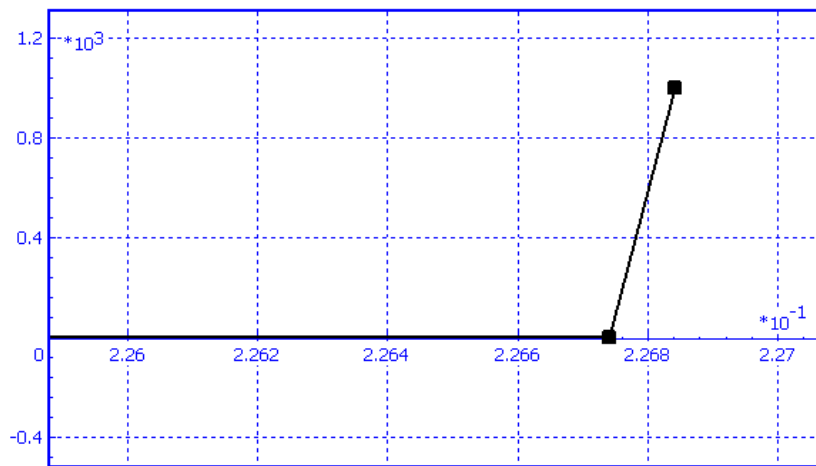
Периодическая зависимость

	X	Y
1	$-(\alpha_{stop\_up} + \alpha_{stat}) * (1 - rear\_arm) / 2 * dtor - 0.0001$	$-0.0001 * c_{stop} * (1 - rear\_arm) / 2$
2	$-(\alpha_{stop\_up} + \alpha_{stat}) * (1 - rear\_arm) / 2 * dtor$	0
3	$(\alpha_{stop\_up} + \alpha_{stat}) * (1 + rear\_arm) / 2 * dtor$	0
4	$(\alpha_{stop\_up} + \alpha_{stat}) * (1 + rear\_arm) / 2 * dtor + 0.0001$	$0.0001 * c_{stop} * (1 + rear\_arm) / 2$

Рис. 1.21. Ограничение опорного катка по вертикальному ходу



*rear\_arm=-1*



*rear\_arm=+1*

Рис. 1.22. Ограничивающий нелинейный момент для заднего и переднего расположения торсиона

Таблица 1.4.

**Идентификаторы, параметризующие линейный упругий момент в торсионе**

Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>preload</i>	-	(Нм) Момент при нулевом значении угла в шарнире
<i>c_torsion</i>	-	(Нм/рад) Коэффициент угловой жесткости торсиона
<i>d_torsion</i>	100	(Нмс/рад) Коэффициент угловой диссипации торсиона
<i>c_stop</i>	10 000 000	(Нм/рад) Коэффициент жесткости ограничителя динамического хода катка

**Замечание.** Момент преднатяга используется для того, чтобы при нулевых значениях координат в торсионном шарнире катки находились в положении, близком к положению равновесия. Приближенная формула для расчета момента следующая:  $preload \approx \frac{Mgl \cos \alpha_0}{2n}$ .

Здесь  $M$  – подрессоренная масса,  $g$  – ускорение свободного падения,  $l$  – длина рычага торсиона,  $\alpha_0$  номинальное значение угла (идентификатор  $alpha\_stat$ ),  $n$  – число опорных катков.

- Шарнир *jRoad wheel* определяет вращательную степень свободы опорного катка относительно рычага. Поперечная координата шарнирной точки на колесе задана выражением  $-y\_road\_arm\_joint*side\_key$ . Благодаря множителю  $side\_key$  эта координата меняет знак для левой и правой гусеницы.

**5. Графические образы.**

- ГО *Road wheel* назначается опорному колесу.

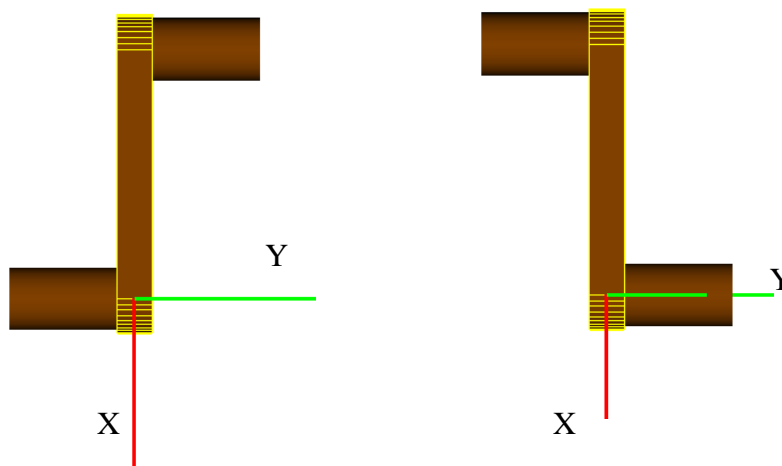


Рис. 1.23. Графический образ рычага при  $side\_key=\pm 1$

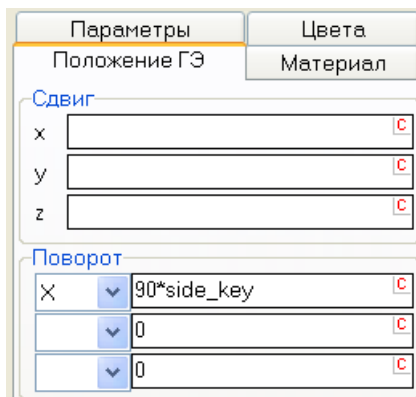


Рис. 1.24. Параметризация угла повтора ГЭ с помощью идентификатора  $side\_key$

ГО *Road arm* назначается рычагу балансира. Этот графический образ меняется для левой и правой гусеницы (зеркально отражается вокруг продольной вертикальной плоскости XZ, рис. 1.23). Чтобы реализовать такое изменение, для двух графических элементов – цилиндров введен поворот, знак которого зависит от значения параметра *side\_key*, рис. 1.24.

**1.2.1.4.1.4. Блок балансирующей каретки с двумя катками и двумя рычагами**

Блок моделирует балансирующую подвеску с двумя опорными катками, двумя рычагами, соединенными вращательным шарниром А, рис. 1.25, рис. 1.26. Передний рычаг связан с корпусом вращательным шарниром В. Пружина подвески связывает оба рычага.

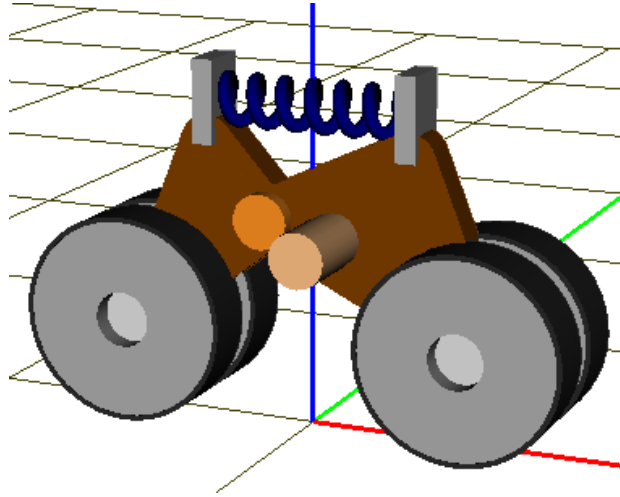


Рис. 1.25. Балансирующая подвеска с двумя рычагами

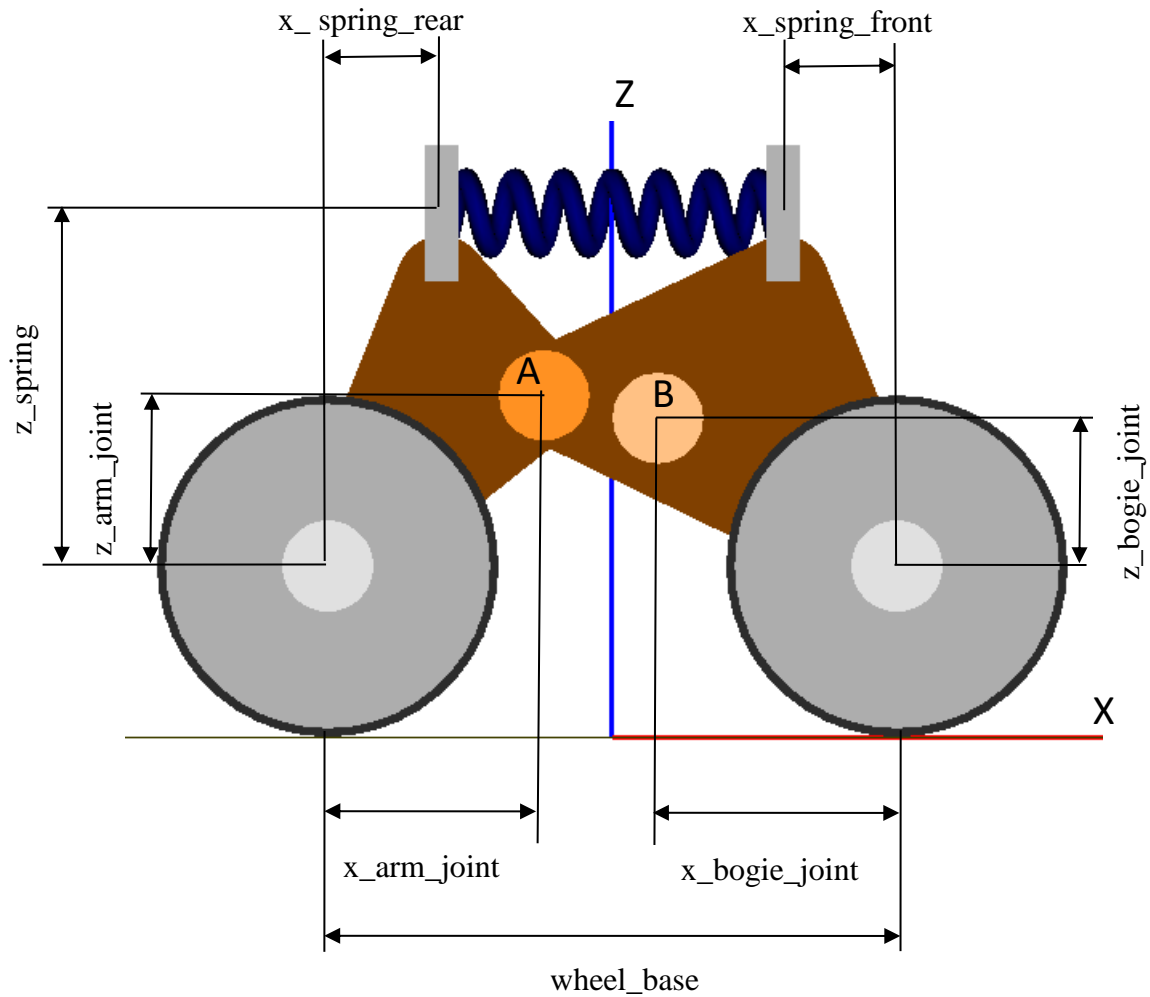


Рис. 1.26. Выделенные идентификаторы

1. Путь к файлу компоненты: {Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\bogie\_2arm.dat.
2. Выделенные идентификаторы, рис. 1.26, табл. 1.5.

Таблица 1.5.

Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>wheel_base</i>	0.5	(м) Расстояние между осями опорных катков
<i>x_spring_front</i>	0.1	(м) положение начала пружины относительно центра переднего катка (положительное значение - назад)
<i>x_spring_rear</i>	0.1	(м) положение конца пружины относительно центра заднего катка (положительное значение - вперед)
<i>x_arm_joint</i> <i>z_arm_joint</i>	0.19 0.15	(м) положение шарнира А относительно центра заднего катка
<i>x_bogie_joint</i> <i>z_bogie_joint</i>	0.21 0.13	(м) положение шарнира В относительно центра переднего катка

3. Тела.

Модель содержит пять тел.

- Локальный корпус (*Local hull*), см. п. 1.2.1.4.1.1. "Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески", с. 1-11.
- Опорные катки (*Road wheel front, Road wheel rear*), помеченные стандартным текстовым атрибутом типа C: *RoadWheel*.
- Рычаги подвески *Road arm front, Road arm rear*.

Инерционные параметры тел заданы идентификаторами, табл. 1.6.

Таблица 1.6

Идентификаторы, параметризующие инерционные параметры тел

Тело	Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>Road wheel front (rear)</i>	<i>m_road_wheel</i>	100	(кг) Масса
	<i>ix_road_wheel</i>	5	(кг м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости колеса
	<i>iy_road_wheel</i>	10	(кг м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колеса
<i>Road Arm front (rear)</i>	<i>m_road_arm</i>	10	(кг) Масса
	<i>ix_road_arm</i>	1	(кг м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно продольной оси рычага
	<i>iy_road_arm</i>	1	(кг м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно осей, перпендикулярных рычагу
	<i>iz_road_arm</i>	1	

4. Шарниры.

Кроме внутреннего шарнира локального кузова, модель блока подвески содержит четыре вращательных шарнира, рис. 1.27:

- шарниры, соединяющие опорные катки с рычагами (*jRoad wheel rear, jRoad wheel front*);
- шарнир *jRoad arm*, соединяющий рычаги (А на рис. 1.26);
- шарнир *jBogie*, соединяющий передний рычаг с локальным кузовом (В на рис. 1.26).

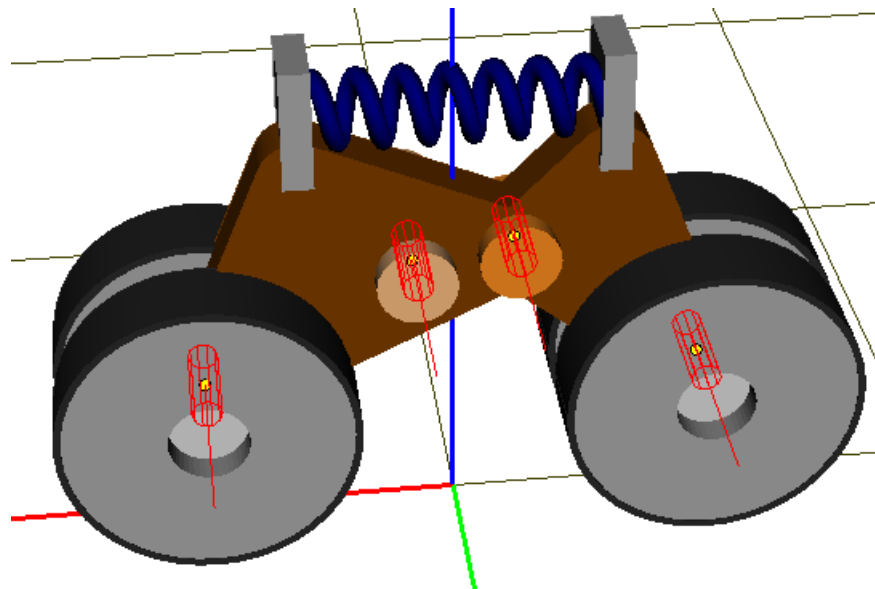


Рис. 1.27. Шарниры балансирной подвески с двумя рычагами

**Параметры упругой подвески.**

В модели реализована линейная упругая подвеска с помощью биполярного силового элемента *Spring*. Тип силового элемента: *Линейный*, рис. 1.28. Силовой элемент описывается двумя основными параметрами: сила преднатяга *Preload* и жесткость пружины *c\_spring*.

F0	Preload	C
c	c_arm_spring	C
x0	l_arm_spring	C
d	0	C
Q	0	C
w	0	C
a	0	C

Рис. 1.28. Параметры линейного силового элемента

Преднатяг призван компенсировать статическую нагрузку, передаваемую через шарнир *jBogie* со стороны корпуса.



### 1.2.1.4.1.5. Балансирная каретка с двумя катками и одним рычагом

Подсистема моделирует каретку с двумя опорными катками, балансиrom и рычагом, рис. 1.30. Упругая подвеска в данном случае может быть реализована как торсионная. Торсион может быть заменен цилиндрической пружиной путем добавления к модели упругого силового элемента биполярного типа, связывающего балансиr с корпусом.

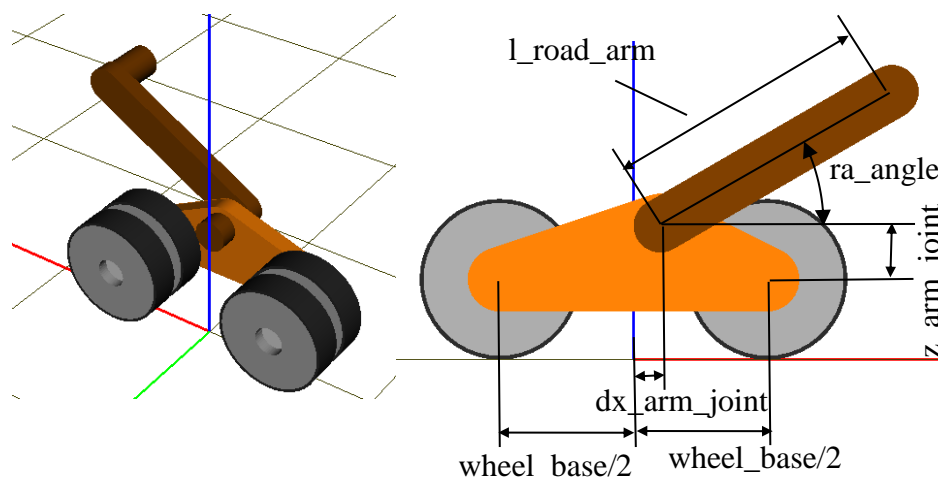


Рис. 1.30. Каретка с балансиrom и торсионным рычагом; выделенные идентификаторы

1. **Путь к файлу** компоненты:  
{Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\bogie\_2wheel\_1arm.dat.
2. **Выделенные идентификаторы**, табл. 1.7, рис. 1.30.

Таблица 1.7.

Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
wheel_base	0.5	(м) Расстояние между осями опорных катков
l_road_arm	0.5	(м) Длина рычага подвески
ra_angle	30	(градусы) Номинальный угол поворота оси рычага относительно продольной оси
z_arm_joint	0.1	(м) высота шарнира рычага над центром катка
dx_arm_joint	0	(м) продольное смещение шарнира рычага

Задавая различные значения угла  $ra\_angle$  в разных подсистемах, пользователь может получить геометрически различные положения торсионного рычага в модели гусеницы, рис. 1.31. Для всех кареток, кроме левой, задано значение угла  $30^\circ$ , в то время как для левой каретки принято значение  $150^\circ$ .



Рис. 1.31. Изменение положения рычага с помощью значения идентификатора номинального угла поворота

3. Тела.

Модель содержит четыре тела.

- Локальный корпус (*Local hull*), см. п. 1.2.1.4.1.1. "Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески", с. 1-11.
- Два опорных катка (*Road wheel front, Road wheel rear*), помеченные стандартным текстовым атрибутом типа C: *RoadWheel*.
- Балансир (*Bogie frame*).
- Рычаг торсионной подвески *Road Arm*.

Инерционные параметры тел заданы идентификаторами, табл. 1.8.

Таблица 1.8

Параметризация инерционных параметров тел

Тело	Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>Road Wheel</i>	<i>m_road_wheel</i>	100	(кг) Масса
	<i>ix_road_wheel</i>	10	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости колеса
	<i>iy_road_wheel</i>	20	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колеса
<i>Bogie frame</i>	<i>m_frame</i>	50	(кг) Масса
	<i>ix_frame</i>	3	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции балансира
	<i>iy_frame</i>	10	
	<i>iz_frame</i>	10	
<i>Road Arm</i>	<i>m_road_arm</i>	50	(кг) Масса
	<i>ix_road_arm</i>	0.2	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно продольной оси рычага
	<i>iy_road_arm</i> <i>iz_road_arm</i>	3	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно осей, перпендикулярных рычагу

#### 4. Шарниры.

Кроме внутреннего шарнира локального кузова, модель блока подвески содержит четыре вращательных шарнира, рис. 1.32. Описание шарниров аналогично торсионной индивидуальной подвеске, которое подробно разобрано в п. 1.2.1.4.1.3. *"Индивидуальная торсионная подвеска"*, с. 1-16.

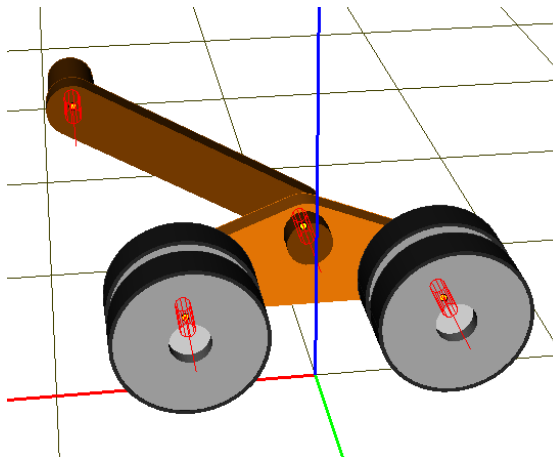


Рис. 1.32. Шарниры

#### **Параметры упругой торсионной подвески.**

В модели реализована линейная упругая торсионная подвеска с помощью линейного шарнирного момента. Описание полностью соответствует соответствующему разделу п. 1.2.1.4.1.3. *"Индивидуальная торсионная подвеска"*, с. 1-16.

**1.2.1.4.1.6. Отдельный опорный каток для жесткой и полужесткой подвесок**

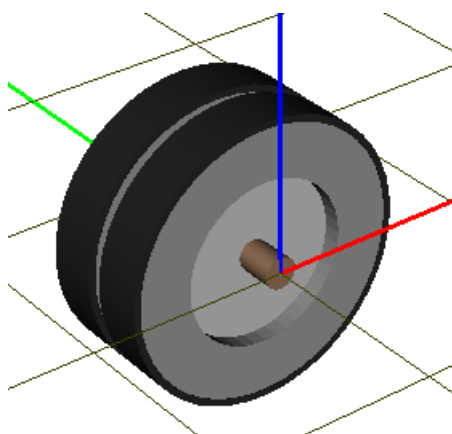


Рис. 1.33. Отдельный опорный каток

Подсистема содержит одно колесо, имеющее вращательную степень свободы относительно локального корпуса. В случае жесткой подвески локальный корпус связывается с остовом машины, а для полужесткой тележки – с рамой тележки гусеницы.

**1. Путь к файлу** компоненты:

{Данные УМ} \Caterpillar\subsystems\Single\_wheel.dat.

**2. Выделенные идентификаторы** отсутствуют.

**3. Тела.**

Модель содержит два тела.

- Локальный корпус (*Local hull*), см. п. 1.2.1.4.1.1. "Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески", с. 1-11.
- Опорный каток (*Road wheel*), помеченный стандартным текстовым атрибутом типа C: *RoadWheel*.

Инерционные параметры тел заданы идентификаторами, табл. 1.9.

Таблица 1.9

**Параметризация инерционных параметров тел**

Тело	Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>Road Wheel</i>	<i>m_road_wheel</i>	100	(кг) Масса
	<i>ix_road_wheel</i>	10	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости колеса
	<i>iy_road_wheel</i>	20	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колеса

**4. Шарниры.**

Кроме внутреннего шарнира локального кузова, модель блока подвески содержит один вращательный шарнир катка относительно локального корпуса.

### 1.2.1.4.2. Направляющее колесо и натяжное устройство

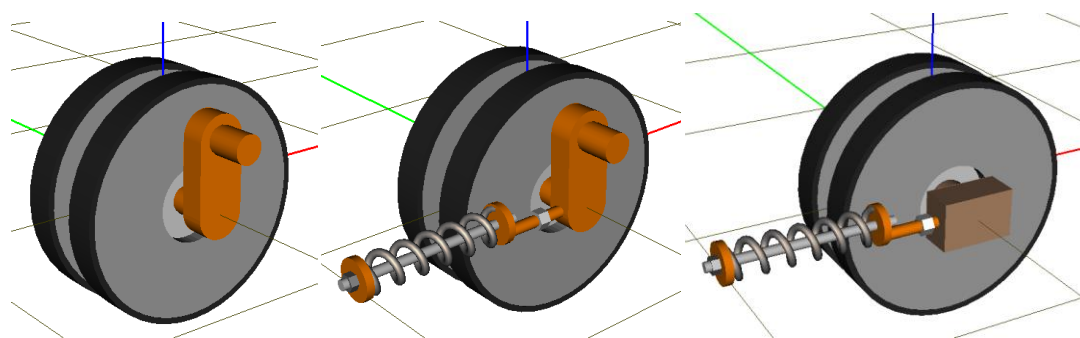


Рис. 1.34. Стандартные модели направляющих колес с натяжным устройством

В качестве стандартных моделей направляющего колеса с натяжным устройством в УМ поставляются три компонента, различающиеся по типу натяжного устройства:

- *idler\_crank\_simple* – упрощенная модель с креплением колеса на кривошипе для моделирования как упругих, так и полужестких подвесок, рис. 1.34, слева
- *idler\_crank* уточненная модель с креплением колеса на кривошипе для моделирования как упругих, так и полужестких подвесок, рис. 1.34, в центре;
- *idler\_slider* с креплением колеса на ползуне для моделирования полужестких подвесок, рис. 1.34, справа.

#### Стандартные элементы

1. **Стандартные идентификаторы:** Любая компонента, описывающая натяжное колесо, должна содержать стандартные идентификаторы, табл. 1.10, рис. 1.48.

Таблица 1.10

Идентификатор	Комментарий
<i>ridler</i>	(м) Радиус колеса
<i>widler</i>	(м) Ширина колеса
<i>side_key</i>	Признак левой (1) или правой (-1) гусеницы. Следует использовать этот идентификатор для задания поперечных координат, имеющих разные знаки для разных гусениц
<i>wguide</i>	(м) Ширина паза в катке для прохода гребня гусеничного звена
<i>hguide</i>	(м) Глубина паза в катке для прохода гребня гусеничного звена
<i>xcidler</i>	(м) Положение центра колеса в продольном направлении
<i>zcidler</i>	(м) Положение центра колеса в вертикальном направлении
<i>rear_drive_key</i>	Признак положения ведущего колеса: 1 (сзади), -1 (спереди)

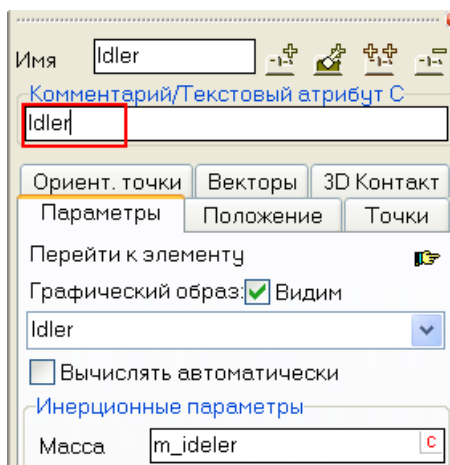


Рис. 1.35. Стандартный текстовый атрибут направляющего колеса

2. **Стандартный элемент:** текстовый атрибут направляющего колеса. Тело, моделирующее направляющее колесо, должно быть помечено текстовым атрибутом типа *C Idler*, рис. 1.35.

3. **Описание элементов, связанных с остовом (корпусом).**

В отличие от компонент, моделирующих подвески, компоненты направляющих колес не содержатся внутри включенных подсистем, поэтому не вводится локальный корпус. Все шарниры и силовые элементы, которые будут связаны с локальным корпусом гусеницы, внутри компоненты соединяются с телом Base0. При включении компоненты в гусеницу с использованием мастера создания модели гусеницы базовое тело автоматически заменяется программой на локальный корпус гусеницы.

Стандартные модели натяжных колес близки по описанию, поэтому более подробно опишем первую из них.

### 1.2.1.4.2.1. Направляющее колесо на кривошипе (упрощенная модель)

Рассмотрим упрощенную модель направляющего колеса с натяжным устройством на кривошипе, рис. 1.36. Имя данной стандартной компоненты: *idler\_crank\_simple*. Упрощение данной модели по сравнению с уточненной (*idler\_crank*) состоит в том, что силовые параметры натяжного устройства приводятся к вращательному шарниру, соединяющему кривошип с корпусом ГМ.

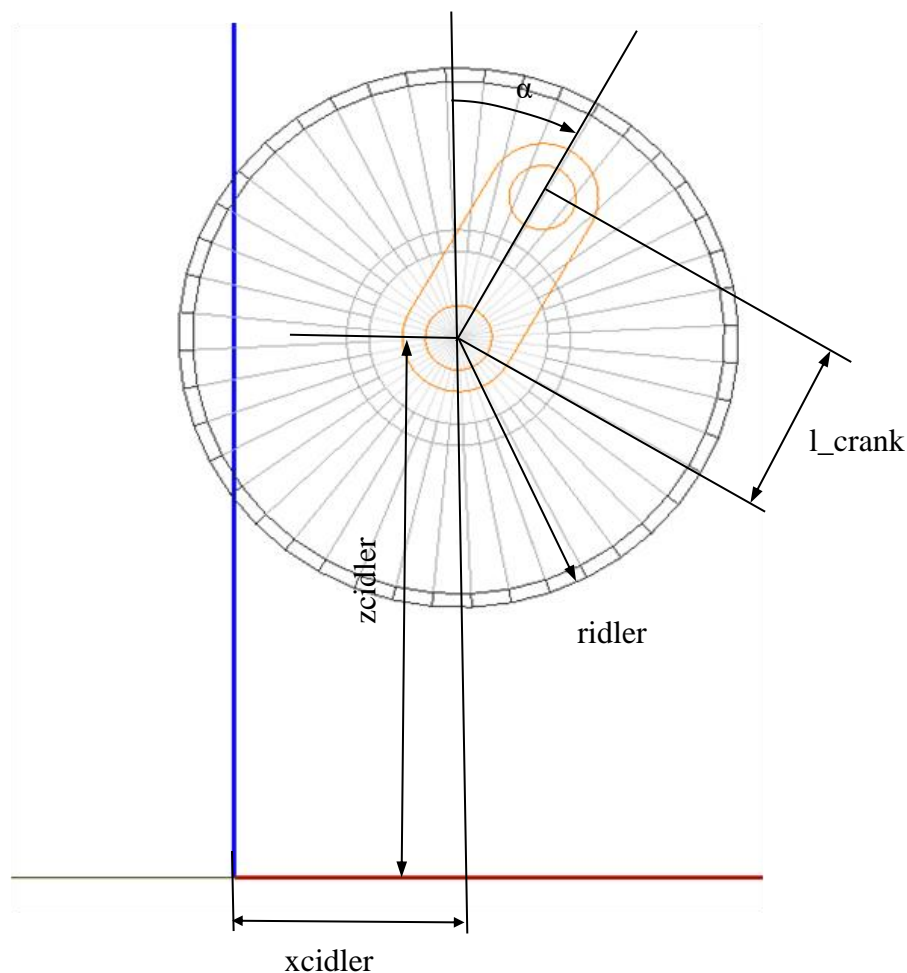


Рис. 1.36. Параметризация геометрических параметров упрощенной модели натяжного колеса на кривошипе

Модель содержит натяжное колесо и шарнирно связанный с ней кривошип, а также шарнир, соединяющий кривошип с корпусом ГМ.

1. **Путь к файлу** компоненты:

{Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\idler\_crank\_simple.dat.

2. **Идентификаторы.** Наряду с параметрами, приведенными в табл. 1.10, для задания геометрических размеров модели используются идентификаторы в табл. 1.11, рис. 1.36.

Таблица 1.11

Идентификатор	Комментарий
<i>l_crank</i>	Длина кривошипа – расстояние между вращательными шарнирами
<i>crank_angle_0</i>	Угол $\alpha$ – номинальный поворот кривошипа. Направление поворота зависит от значения идентификатора <i>rear_drive_key</i> . На рис. 1.36 указано положительное значение угла поворота при <i>rear_drive_key</i> =1

3. Тела.

Модель содержит два тела.

- Направляющее колесо (*Idler*), помеченное стандартным текстовым атрибутом типа C: *Idler*.
- Кривошип натяжного устройства (*Tension crank*).

Инерционные параметры тел заданы идентификаторами, табл. 1.12.

Таблица 1.12

Идентификаторы, параметризующие инерционные параметры тел

Тело	Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>Idler</i>	<i>m_idler</i>	100	(кг) Масса
	<i>ix_idler</i>	7	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости колеса
	<i>iy_idler</i>	15	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колеса
<i>Tension crank</i>	<i>m_crank</i>	10	(кг) Масса
	<i>ix_crank</i>	1	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно продольной осей кривошипа
	<i>iy_crank</i>		
	<i>iz_crank</i>		

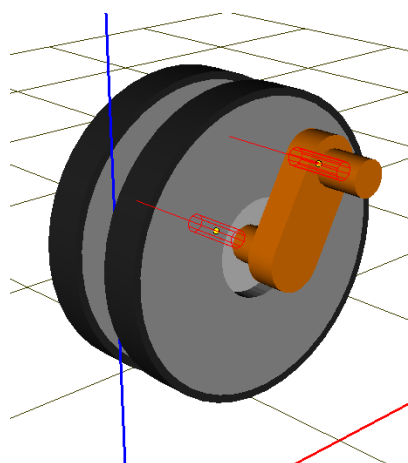


Рис. 1.37. Шарниры направляющего колеса и кривошипа

#### 4. Шарниры.

Модель содержит два вращательных шарнира, рис. 1.37.

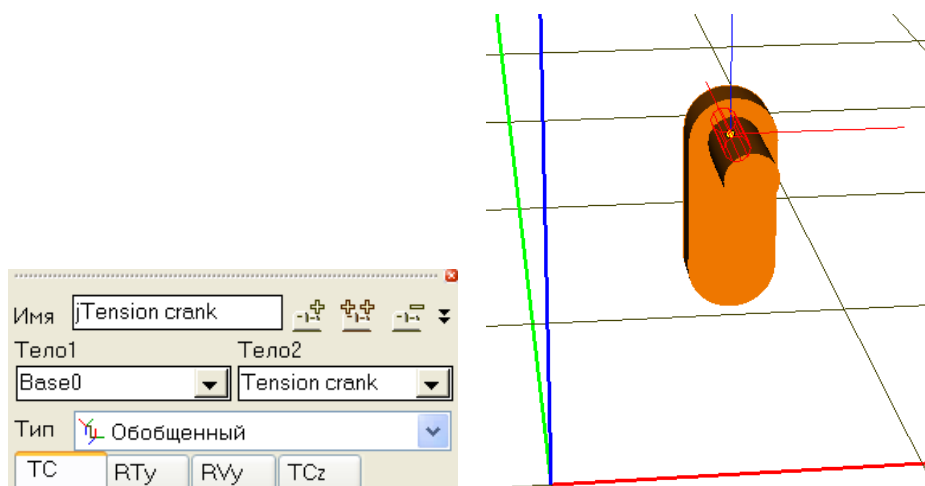


Рис. 1.38. Шарнир jTension crank и СК тел

Шарнир *jTension crank* задает вращательную степень свободы кривошипа относительно корпуса. В модели компоненты этот шарнир задает вращение кривошипа (тело *Tension crank*) относительно СК0 (тело *Base0*). Для задания вращательного шарнира используется шарнир *обобщенного типа*, содержащий четыре элементарных преобразования. Рассмотрим их подробно.

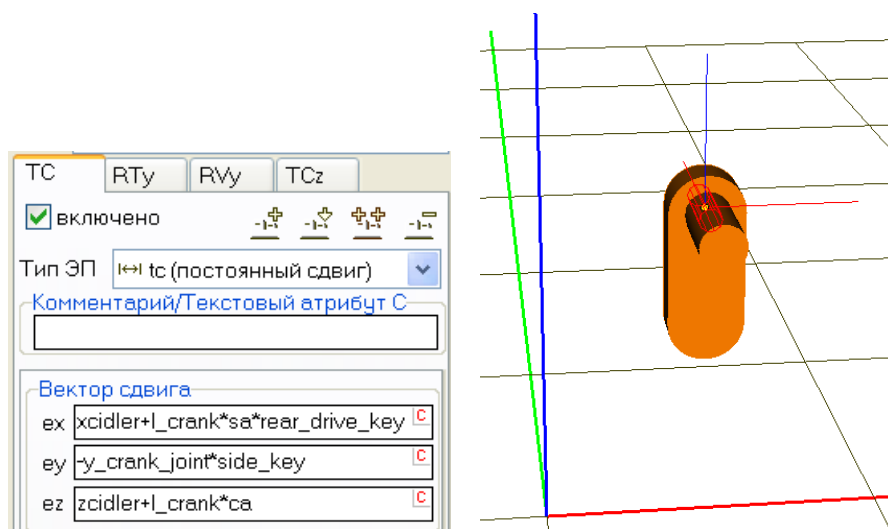


Рис. 1.39. Первое ЭП: сдвиг

*Первое ЭП* типа *tc* переводит СК первого тела в шарнирную точку, лежащую на оси кривошипа (результат смещения СК показан на рис. 1.39 тонкими линиями):

- сдвиг вдоль оси X задан выражением

$$xcidler+l\_crank*sa*rear\_drive\_key,$$

при этом идентификатор *xcidler* задает положение центра колеса в продольном направлении,  $sa = \sin(crank\_angle\_0*dtor)$ ;

- сдвиг вдоль оси Y

$-y\_crank\_joint*side\_key,$

обратите внимание, что направление сдвига в поперечном направлении зависит от значения идентификатора  $side\_key$  ( $\pm 1$ );

- сдвиг вдоль оси Z:

$zcidler+l\_crank*ca,$

$ca = \cos(crank\_angle\_0*dtor)$

Второе ЭП типа  $tt$  осуществляет поворот на угол, параметризованный идентификатором  $crank\_angle\_0$  (угол  $\alpha$  на рис. 1.36) вокруг оси шарнира, рис. 1.40.

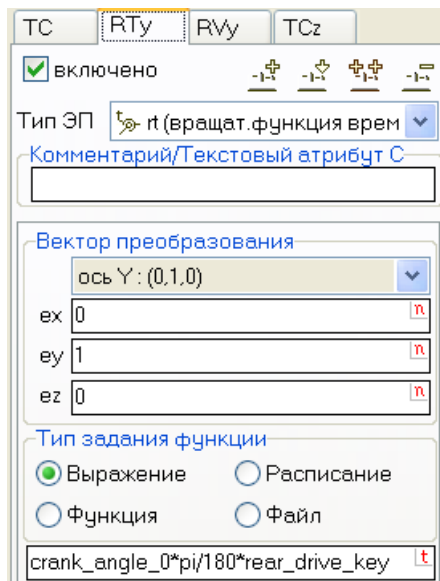


Рис. 1.40. Второе ЭП: поворот на постоянный угол, заданный идентификатором

Третье ЭП типа  $tv$  вводит вращательную степень свободы, рис. 1.41. Здесь же описан шарнирный момент, соответствующий силовой реализации натяжного устройства.

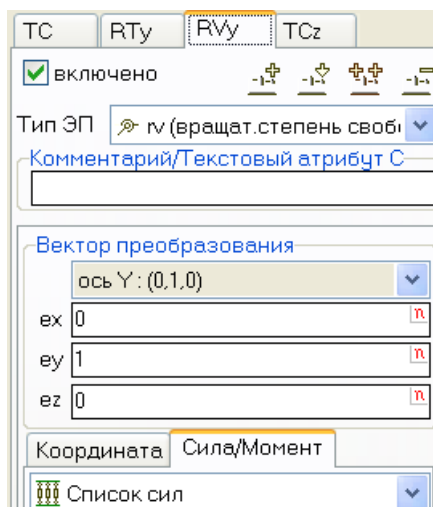


Рис. 1.41. Третье ЭП: Введение вращательной степени свободы кривошипа

Четвертое ЭП типа  $tc$  переводит СК в систему координат кривошипа, рис. 1.42.

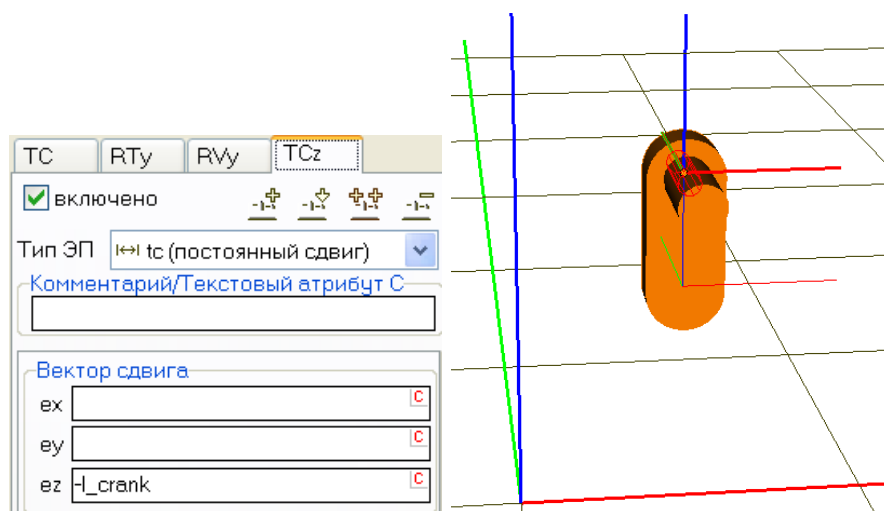


Рис. 1.42. Четвертое ЭП: постоянный сдвиг в СК кривошипа (изображена жирными линиями)

Шарнир вращательного типа *jdler\_Tension crank* вводит вращательную степень свободы колеса относительно кривошипа, рис. 1.43.

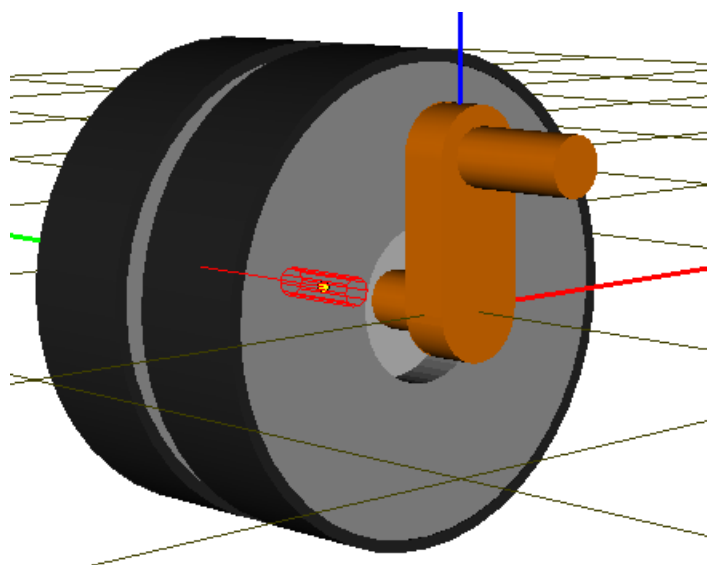


Рис. 1.43. Шарнир *jdler\_Tension crank*

### 5. Шарнирный момент, реализующий натяжное и амортизирующее устройства

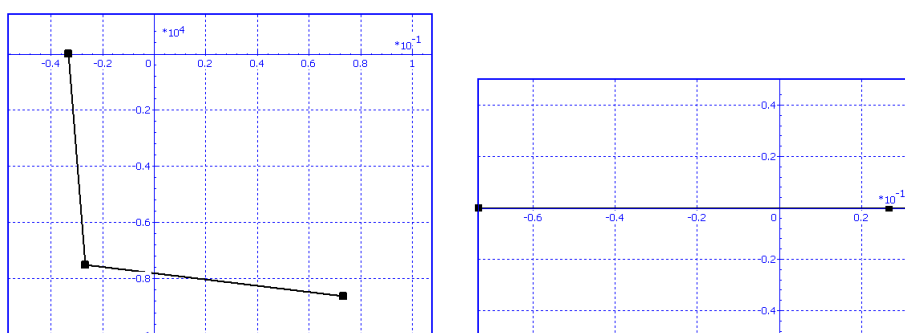
Модель натяжного и амортизирующего устройства реализует следующие свойства реального прототипа:

- преднатяг пружины натяжного устройства (идентификатор *pretension*);
- линейную жесткость натяжной пружины (идентификатор *c\_tension\_spring*), реализующую односторонние амортизирующие свойства устройства при сжимающем усилии, превышающем величину преднатяга;
- блокирующие свойства устройства в сторону растяжения путем введения жесткости на растяжение в 100 раз превышающую жесткость пружины;
- возможность реализации желаемого натяжения гусеницы путем изменения длины ненагруженного натяжного устройства; для параметризации изменения длины исполь-

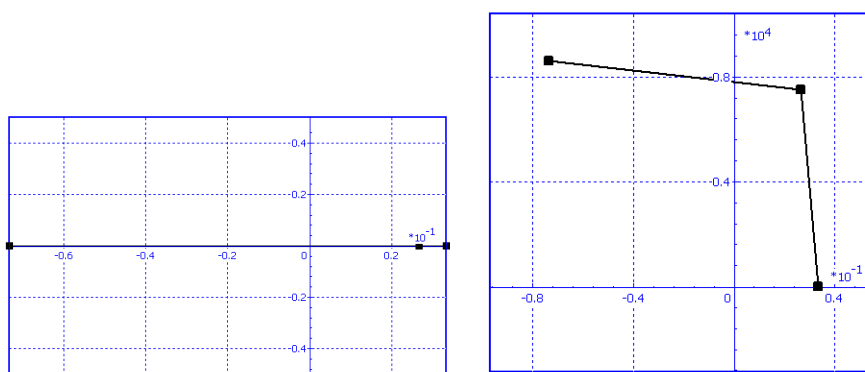
зуется идентификатор *dl\_tension\_rod*; увеличение значения этого идентификатора приводит к увеличению силы натяжения гусеницы.

В упрощенной модели, которая рассматривается в данном разделе, перечисленные свойства реализуются в виде нелинейного шарнирного момента. При этом производится упрощенный пересчет параметров пружины, работающей на растяжение/сжатие к шарниру кривошипа:

- $d\_tension\_angle = dl\_tension\_rod / l\_crank$  – угловой аналог изменения длины ненагруженного натяжного устройства;
- $pretension\_torque = pretension * l\_crank$  – момент силы преднатяга;
- $c\_torsional = c\_tension\_spring * \sqrt{l\_crank}$  – угловая жесткость, имитирующая линейную жесткость пружины.



rear\_drive\_key=1



rear\_drive\_key=-1

Рис. 1.44. Силовые характеристики шарнирного момента для заднеприводной и переднеприводной ГМ при *dl\_tension\_rod*=5мм

Поскольку одна и та же модель натяжного устройства может быть использована как для заднеприводной (*rear\_drive\_key*=1), так и для переднеприводной (*rear\_drive\_key*=-1) ГМ, при которых силовые характеристики момент-угол зеркально отражаются относительно начала отсчета, шарнирный момент имеет два слагаемых, одно из которых нулевое при *rear\_drive\_key*=1, у другое – при *rear\_drive\_key*=-1, рис. 1.44. Таким образом, реализуется корректная модель для разных типов привода. Крутая часть характеристика реализуют блокирующие свойства натяжного устройства при растяжении и сжатии вплоть до до-

стижения значения преднатяга (перелом характеристики). Пологая часть моделирует амортизирующие свойства устройства при сжатии силой, большей значения преднатяга.

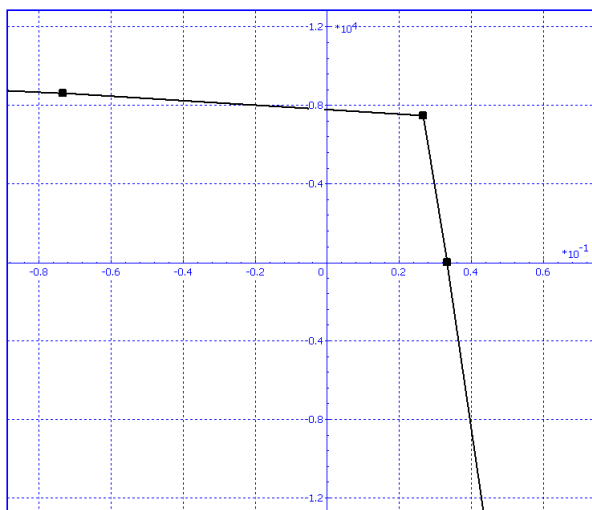


Рис. 1.45. Линейная аппроксимация характеристики при выходе за пределы области задания

**Замечание.** При поточечном задании силовых характеристик следует иметь в виду, что при выходе значения абсциссы за пределы графика происходит линейная аппроксимация характеристики, рис. 1.45.

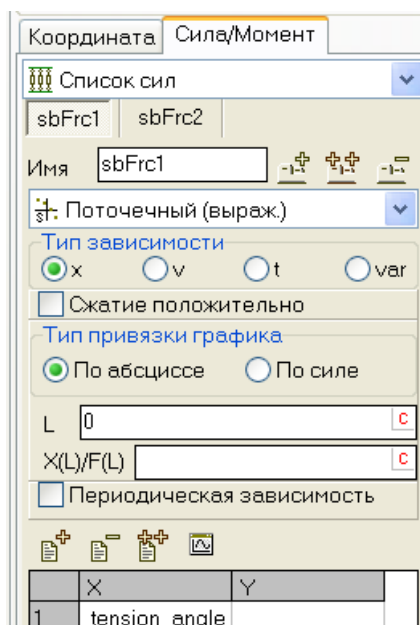


Рис. 1.46. Шарнирный момент

	X	Y
1	-d_tension_angle	
2	-d_tension_angle+pretension_torque/c_torsional/100	-pretension_torque*(rear_drive_key+1)/2
3	-d_tension_angle+pretension_torque/c_torsional/100+0.1	(-pretension_torque-c_torsional*0.1)*(rear_drive_key+1)/2

a)

	X	Y
1	$d\_tension\_angle - pretension\_torque / c\_torsional / 100 - 0.1$	$(pretension\_torque + c\_torsional * 0.1) * (1 - rear\_drive\_key) / 2$
2	$d\_tension\_angle - pretension\_torque / c\_torsional / 100$	$pretension\_torque * (1 - rear\_drive\_key) / 2$
3	$d\_tension\_angle$	

б)

Рис. 1.47. Задание характеристик шарнирного момента, работающих при rear\_drive\_key=1 (а) и rear\_drive\_key=-1 (б)

Шарнирный момент имеет тип Список сил, который содержит два элемента типа Поточечный (выражения), рис. 1.46. Зависимости точек на характеристиках от идентификаторов представлены на рис. 1.47.

### 1.2.1.4.2.2. Направляющее колесо на кривошипе (уточненная модель)

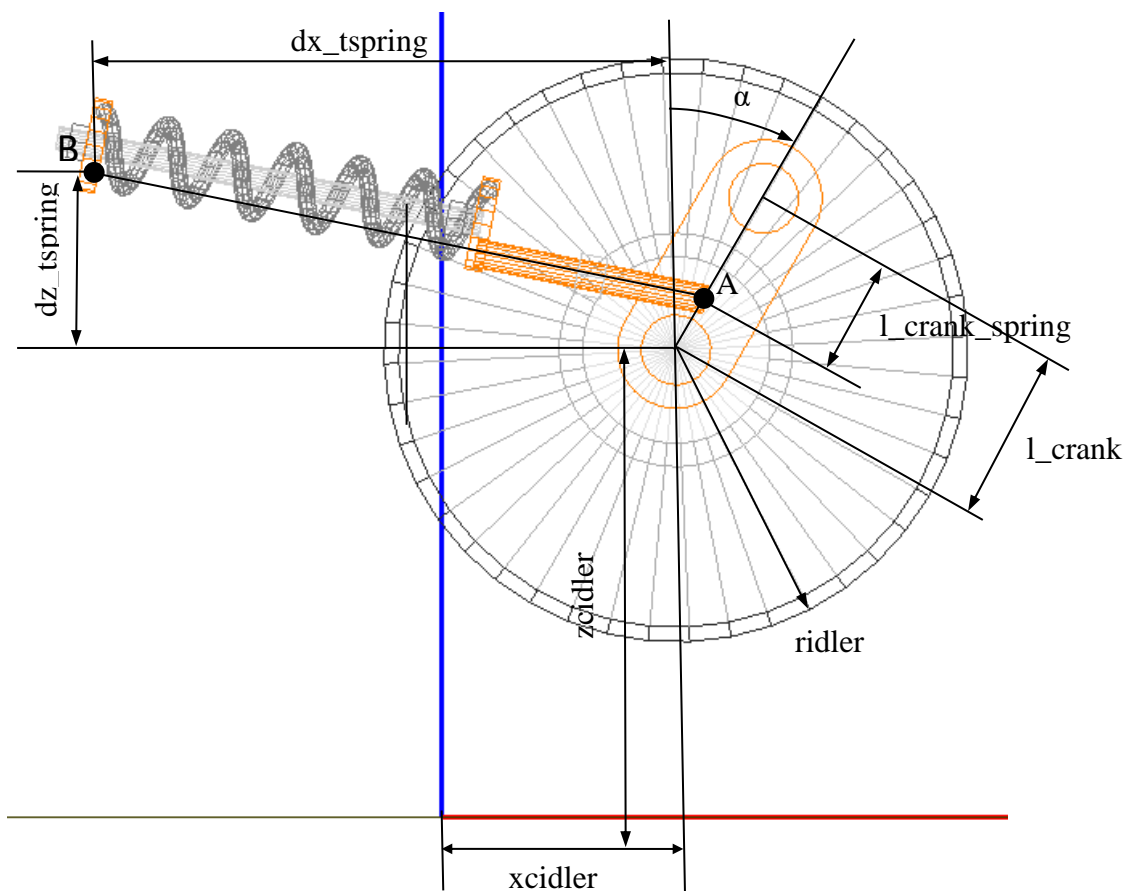


Рис. 1.48. Параметризация геометрических параметров уточненной модели натяжного колеса на кривошипе

В отличие от предыдущей модели, в данном случае натяжное устройство описано более подробно в виде отдельного силового элемента. Силовой элемент одной стороной прикреплен к кривошипу в точке А, другой – к телу Base0, рис. 1.48.

#### 1. Путь к файлу компоненты:

{Данные УМ} \Caterpillar\subsystems\idler\_crank.dat.

2. **Идентификаторы.** Наряду с параметрами, приведенными в табл. 1.10, 1.11 для геометрических размеров модели используются идентификаторы, указаны в табл. 1.13, рис. 1.48.

Таблица 1.13

Идентификатор	Комментарий
<i>l_crank_spring</i>	Расстояние от шарнира кривошип-остов до точки прикрепления натяжного силового элемента. Определяет положение точки А
<i>dx_tspring</i> , <i>dz_tspring</i>	Определяют положение точки прикрепления силового элемента к остову В относительно центра колеса

3. **Тела.** См. модель предыдущего раздела.
4. **Шарниры.** См. модель предыдущего раздела. Отличие заключается в отсутствии шарнирного момента.
5. **Силовой элемент натяжного и амортизирующего устройства.**

Для моделирования амортизирующей пружины с преднатягом и механизма натяжного устройства используется биполярный силовой элемент *Tension spring*. Его модель реализует свойства механизма, сформулированные в предыдущем пункте. Силовая характеристика, аналогичная рис. 1.44 при *rear\_drive\_key=1* задается выражением

$$pretension + heavi(l\_tension\_spring - x) * c\_tension\_spring * (l\_tension\_spring - x) + heavi(-l\_tension\_spring + x) * (-c\_tension\_spring * 100 * (-l\_tension\_spring + x))$$

где *x* – текущая длина элемента, *l\_tension\_spring* – идентификатор длины ненагруженного элемента, *pretension* – идентификатор преднатяга, *c\_tension\_spring* – жесткость пружины, функция Хевисайда

$$heavi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

Длина ненагруженного элемента выражается через геометрические и силовые параметры модели по формуле

$$l\_tension\_spring = \sqrt{\sqrt{dx\_tspring + dl\_crank\_spring * sa} + \sqrt{dz\_tspring - dl\_crank\_spring * ca}} + dl\_tension\_rod - pretension / c\_tension\_spring / 100$$

Данное выражение состоит из трех частей. Произведем их разбор.

- $\sqrt{\sqrt{dx\_tspring + dl\_crank\_spring * sa} + \sqrt{dz\_tspring - dl\_crank\_spring * ca}}$  – длина элемента при нулевых значениях координат;
- *dl\_tension\_rod* – дополнительное удлинение элемента; поскольку длина ненагруженного элемента увеличивается вместе с параметром *dl\_tension\_rod*, изменение последнего может быть использовано для создания необходимого натяжения гусеницы, в частности, в случае траков с жесткими шарнирами;
- *pretension/c\_tension\_spring/100* – дополнительное слагаемое, обеспечивающее равенство нулю силы при нулевом дополнительном удлинении *dl\_tension\_rod=0*.

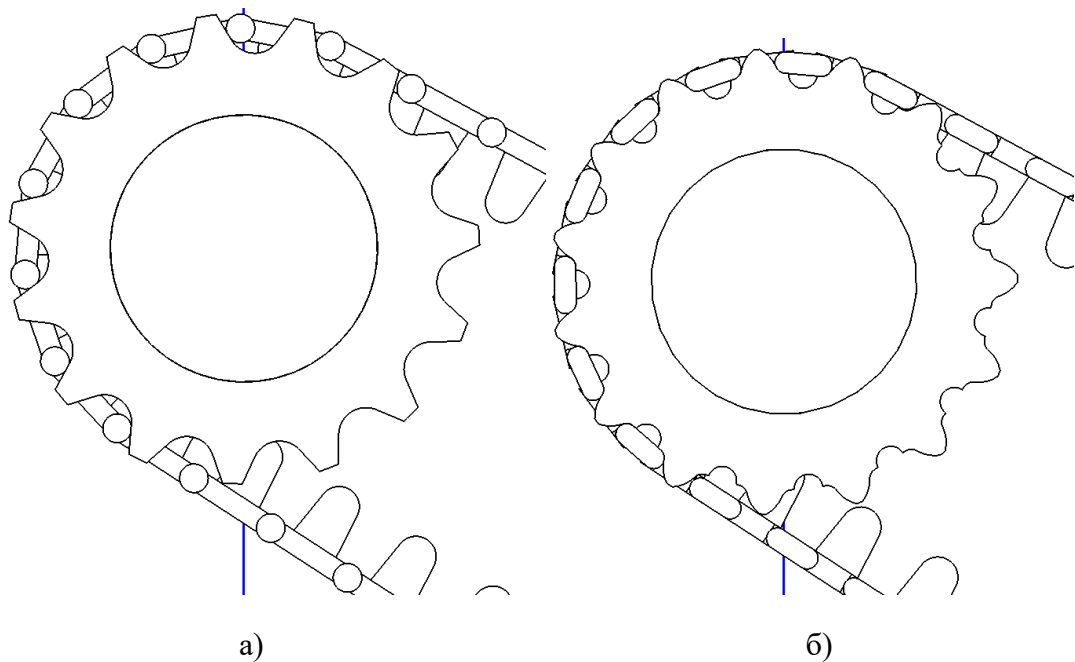
**1.2.1.4.3. Ведущее колесо****1.2.1.4.3.1. Геометрические параметры ведущего колеса**

Рис. 1.49. Фрагменты модели гусеницы с одним шарниром (а) и двумя параллельными резинометаллическими шарнирами (б)

В УМ реализованы гусеничные движители с цевочным зацеплением со следующими типами шарниров

- жесткий шарнир, рис. 1.49 а,
- один резинометаллический шарнир на звено, рис. 1.49 а,
- два параллельных резинометаллических шарнира на одно звено с соединительной скобой, рис. 1.49 б.

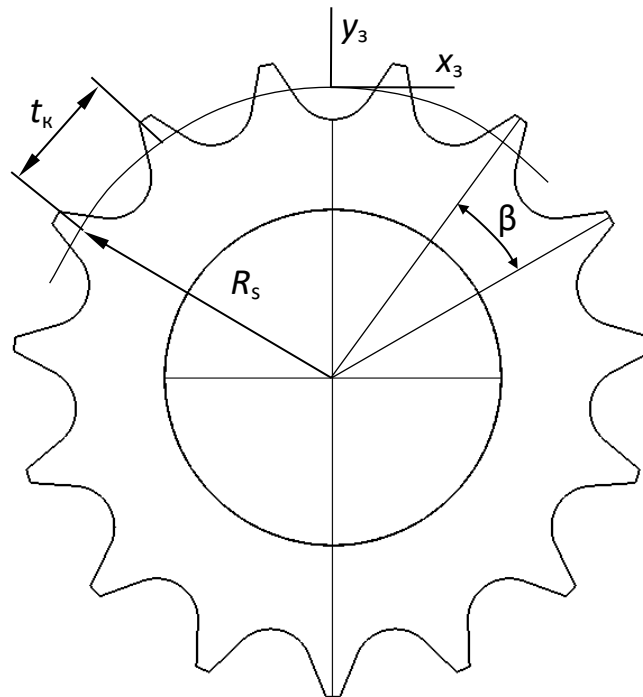


Рис. 1.50. Параметры звездочки для гусеницы с одним шарниром на трак

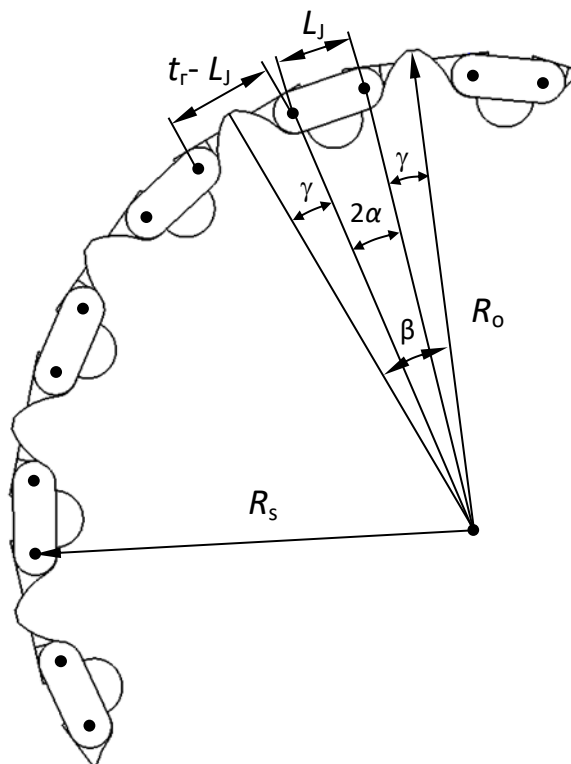


Рис. 1.51. Параметры звездочки для гусеницы с параллельными шарнирами

К основным параметрам, определяющим геометрию звездочки и зацепления, относятся (рис. 1.50, ):  
 $Z$  – число зубьев;

$R_s$  – номинальный радиус колеса по центрам цевок;

$R_o$  – радиус колеса по вершинам зубьев;

$h$  – высота зуба над окружностью номинального радиуса,  $h = R_o - R_s$ .

$t_k$  – шаг колеса;

$t_r$  – шаг гусеницы;

$L_j$  – расстояние между параллельными шарнирами соседних трактов;

$D = \frac{t_k}{t_r}$  отношение шага колеса к шагу гусеницы.

Основными параметрами в этом списке, которые задает пользователь, являются  $Z$ ,  $t_2$  и  $D$ . Остальные параметры для гусеницы с одним шарниром на трак рассчитываются по формулам

$$t_k = Dt_r,$$

$$R_s = \frac{t_k}{2 \sin \beta/2} = \frac{t_k}{2 \sin \pi/Z}.$$

В случае гусеницы с двумя параллельными резинометаллическими шарнирами радиус  $R_s$  рассчитывается из соотношения (рис. 1.51), [1]

$$t_k - L_j + L_j \cos \frac{\beta}{2} = \sin \frac{\beta}{2} \sqrt{4R_s^2 - L_j^2},$$

то есть

$$R_s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\left(t_k - L_j + L_j \cos \frac{\beta}{2}\right)^2}{\sin^2 \frac{\beta}{2}} + L_j^2}.$$

Задание геометрии зацепления требует также описание профилей зуба звездочки и цевки.

### 1.2.1.4.3.2. Автоматический генератор профилей зуба звездочки

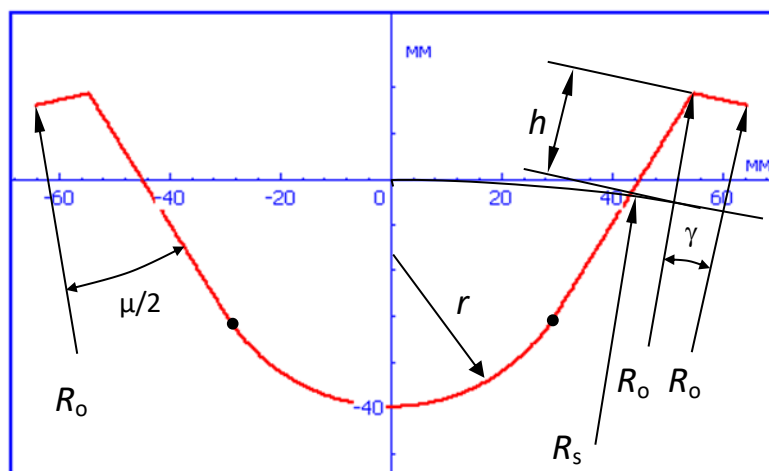


Рис. 1.52. Шаблон профиля ведущего колеса гусеницы с одним шарниром на звено

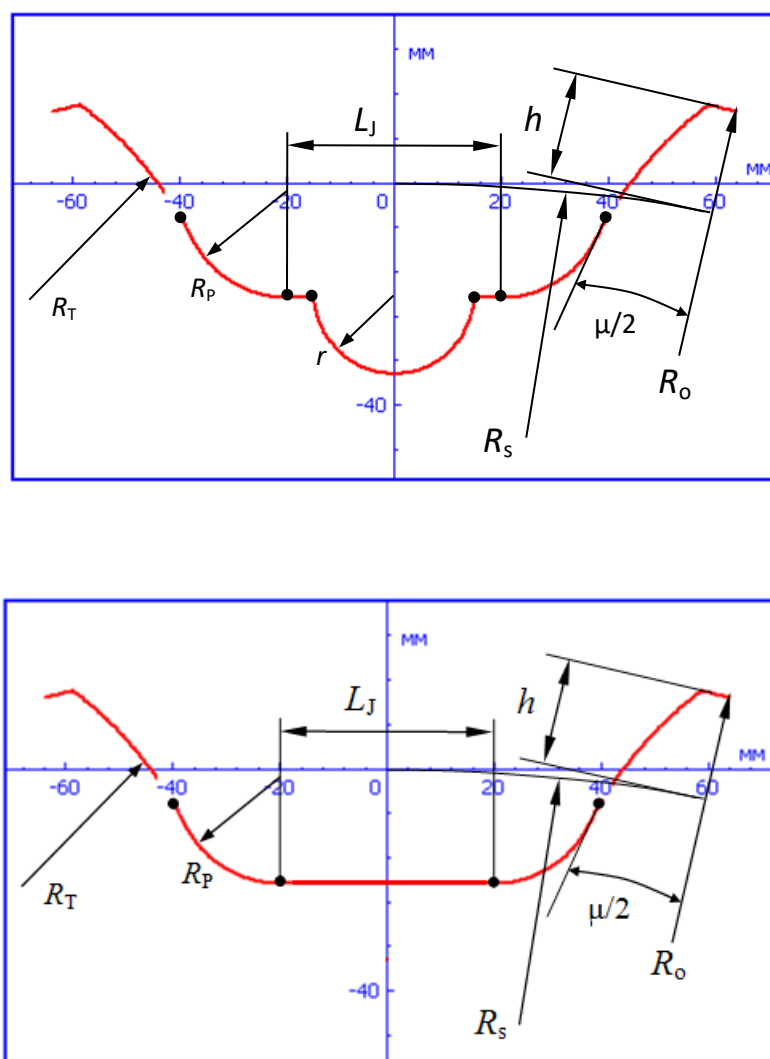
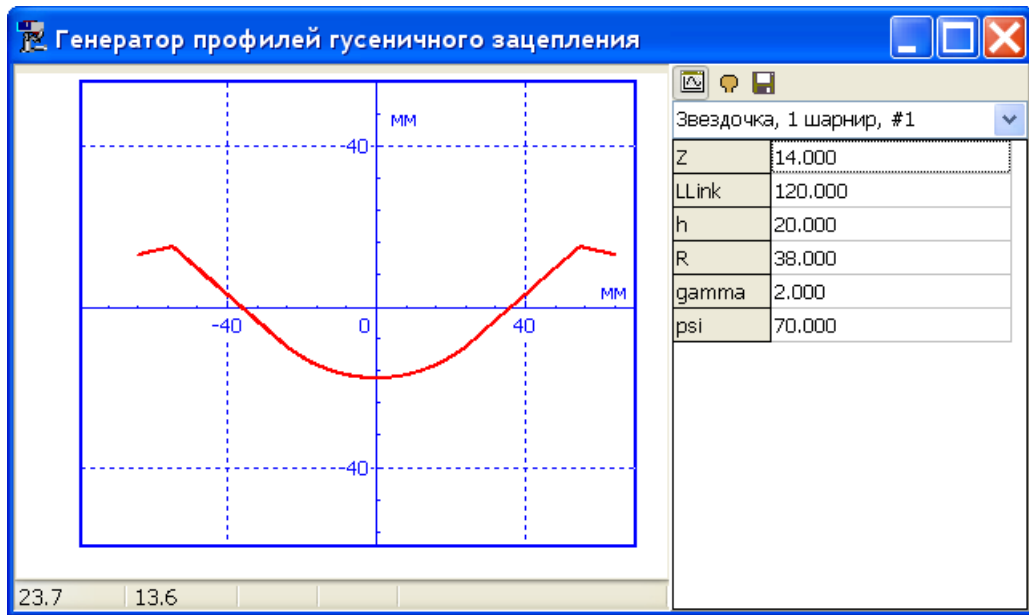


Рис. 1.53. Шаблоны профиля ведущего колеса гусеницы с параллельными шарнирами

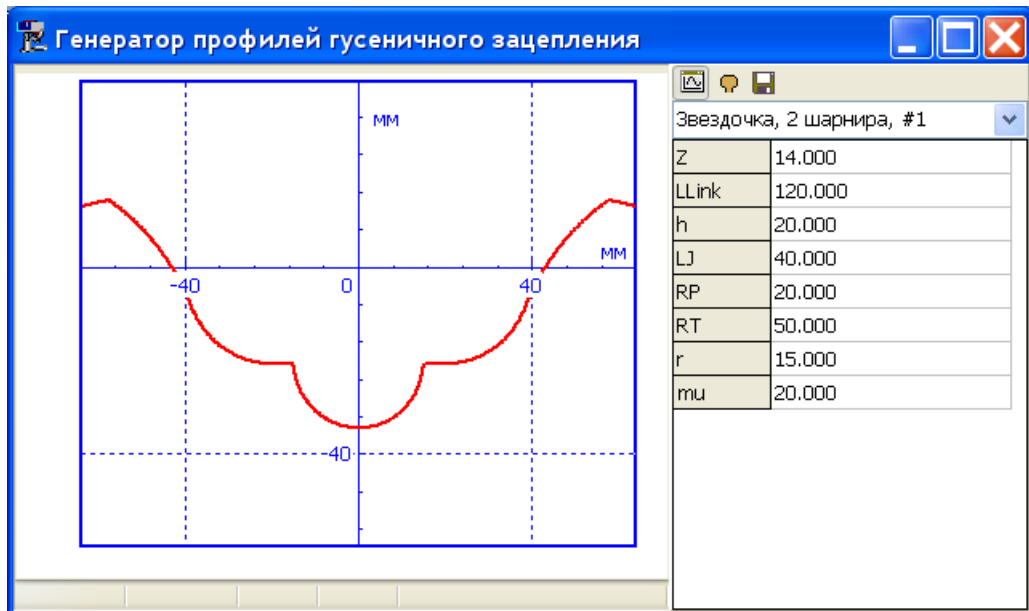
В УМ автоматизировано создание профиля ведущего колеса двух типов: гусеницы с цилиндрическими цевками (рис. 1.52), [2] и гусеницы с параллельными шарнирами, рис. 1.53, [1].

Для автоматического создания профилей указанного типа следует выполнить следующие действия.

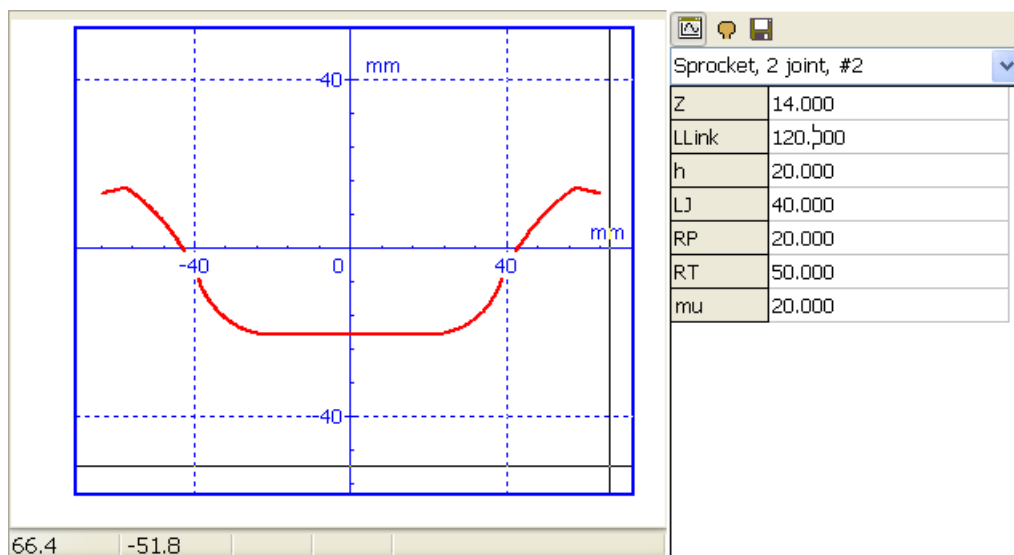
1. Запустить программу ввода **UM Input**.
2. Открыть инструмент создания профилей с использованием команды меню **Инструменты | Генерировать профили зацеплений**.
3. В появившемся окне выбрать тип профиля из выпадающего списка.



а)







б)



в)

Рис. 1.54. Параметры профиля зуба звездочки

- Звездочка, 1 шарнир, #1, рис. 1.52, рис. 1.54 а; список параметров:
    - Z – число зубьев;
    - LLink =  $t_r$  – длина звена, мм;
    - h – высота зуба над окружностью, проходящей через центры шарниров, мм,  $h = R_0 - R_S$ ;
    - R – радиус межзубцовой впадины, мм;
    - gamma – угол, задающий ширину вершины зуба, градусы;
    - psi – угол заострения зуба, градусы;
  - Звездочка, 2 шарнира, #1, #2, рис. 1.53, рис. 1.54 б, в; список параметров:
    - Z – число зубьев;
    - LLink =  $t_r$  – длина звена, мм;
    - h – высота зуба над окружностью, проходящей через центры шарниров, мм,  $h = R_0 - R_S$ ;
    - LJ – расстояние между осями параллельных шарниров соседних звеньев, мм;
    - RP – радиусы цевки, мм;
    - RT – радиус профиля зуба, мм;
    - R – радиус межзубцовой впадины, мм;
    - mu – угол заострения зуба, измеряемый по точке сопряжения радиусов RT и RP на профиле зуба, градусы.
4. После задания параметров профиля используйте кнопку  для того, чтобы рассчитать профиль и отобразить его в окне.
  5. Используйте кнопку  для записи профиля в файл.
- Используйте кнопки   для получения изображения профиля (рис. 1.54) или шаблона с изображением параметров, рис. 1.52, рис. 1.53.

**Замечание.** Параметры длины вводятся в миллиметрах, однако при записи в файл координаты точек записываются в метрах.

**1.2.1.4.3.3. Задание профилей зуба и цевки с помощью редактора кривых**

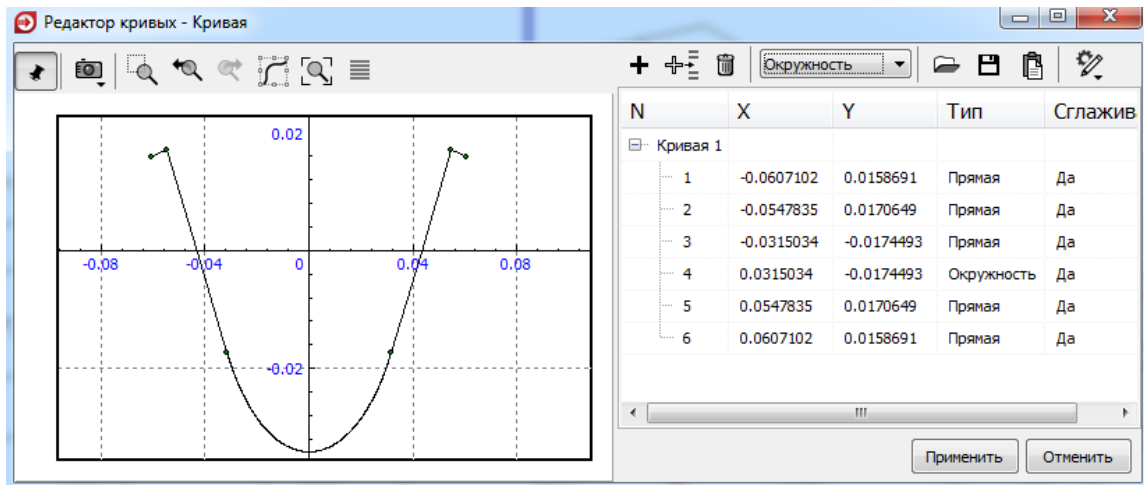


Рис. 1.55. Пример задания профиля зуба звездочки в редакторе кривых

Для создания собственных профилей зуба ведущего колеса пользователь может использовать окно редактора кривых. Профиль задается в системе координат  $x_3z_3$ , начало которой находится на окружности номинального радиуса, как правило, в центре межзубцовой впадины (рис. 1.50, рис. 1.55). Подробное описание работы с редактором кривых можно найти в Руководстве пользователя, Глава 3, п. Конструктор объекта | Редактор 2D кривых.

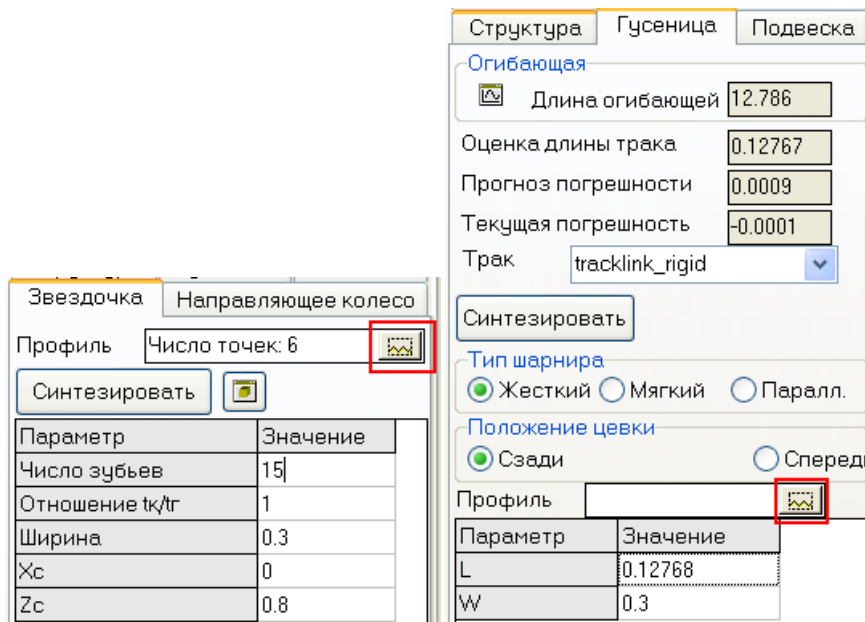



Рис. 1.56. Создание и редактирование профилей зуба ведущего колеса и цевки

Для вызова редактора кривых используются кнопки  на закладках **Звездочка** и **Гусеница** мастера создания гусеничного движителя, рис. 1.56.


*Координаты точек задаются в метрах.*

Одним из возможных способов задания профилей является использование внешних редакторов. Координаты точек записываются в текстовый файл в две колонки. Разделителем должен быть пробел. Первая колонка содержит координаты точек вдоль оси абсцисс в порядке возрастания. Пример:

-0.0607102	0.0158691
-0.0547835	0.0170649
-0.0315034	-0.0174493
0.0315034	-0.0174493
0.0547835	0.0170649
0.0607102	0.0158691



Рис. 1.57. Сглаживание кривой с помощью сплайна

Файл зачитывается в редакторе с помощью кнопки . Следует использовать мелкий шаг задания точек на кривой, не более одного миллиметра по оси абсцисс. Для сглаживания кривых рекомендуется использовать сплайн, предварительно выделив сглаживаемый участок, рис. 1.57.

1.2.1.4.3.4. Шаблон модели звездочки

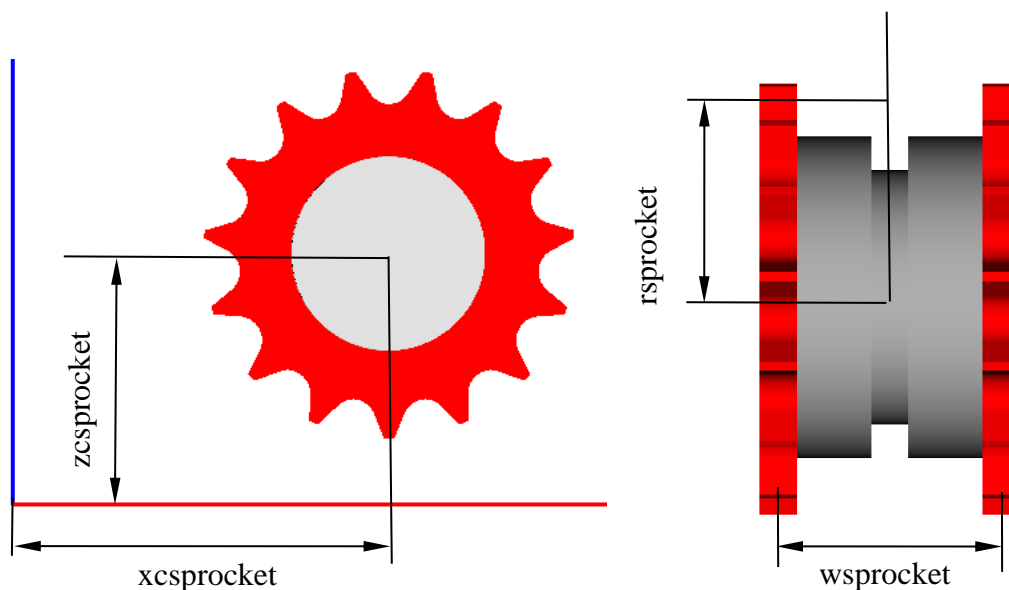


Рис. 1.58. Идентификаторы геометрических размеров звездочки

Шаблон модели звездочки в виде УМ компоненты содержится в файле {Данные УМ} \Caterpillar\subsystems\sprocket.dat.

Элементы описания модели ведущего колеса

1. Стандартные идентификаторы, табл. 1.14, рис. 1.58.

Таблица 1.14

Идентификатор	Комментарий
<i>wguide</i>	Ширина паза для прохода гребня гусеничного звена
<i>hguide</i>	Глубина паза для прохода гребня гусеничного звена
<i>xcsprocket</i>	Положение центра ведущего колеса в продольном направлении
<i>zcsprocket</i>	Положение центра ведущего колеса в вертикальном направлении
<i>wsprocket</i>	Ширина ведущего колеса
<i>rsprocket</i>	Номинальный радиус $R_s$ , рис. 1.51
<i>traction_torque</i>	Стандартный идентификатор для тягового или тормозного момента, приложенного к звездочке со стороны трансмиссии

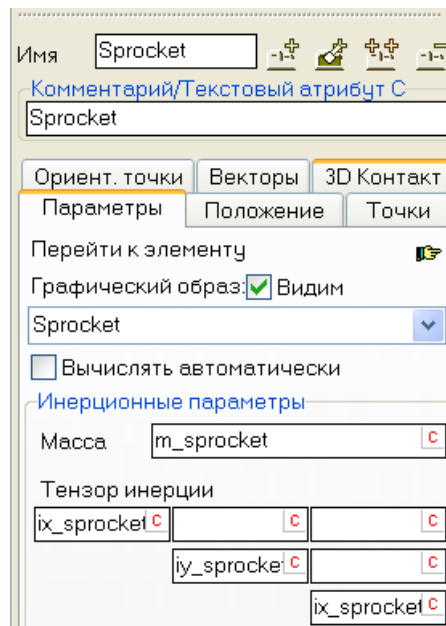


Рис. 1.59. Параметры тела, моделирующего ведущее колесо

2. Тела.

Модель содержит единственное тело *Sprocket*, помеченное текстовым атрибутом типа C: *Sprocket*, рис. 1.59. Этот атрибут используется программой для идентификации тела, соответствующего звездочке. Инерционные параметры колеса заданы идентификаторами, табл. 1.15.

Таблица 1.15

**Параметризация инерционных параметров тел**

Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>m_sprocket</i>	100	(кг) Масса
<i>ix_sprocket</i>	15	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости колеса
<i>iy_sprocket</i>	20	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси колеса

3. Шарниры.

Модель содержит единственный вращательный шарнир *jSprocket*, соединяющий ведущее колесо с телом *Base0*. При добавлении компоненты в модель гусеницы тело *Base0* автоматически заменяется программой на локальный корпус гусеницы.

**Замечание.** Шаблон звездочки не содержит профиль зуба. Пользователь задает его с помощью мастера создания модели гусеницы.

1.2.1.4.4. Звено цепи

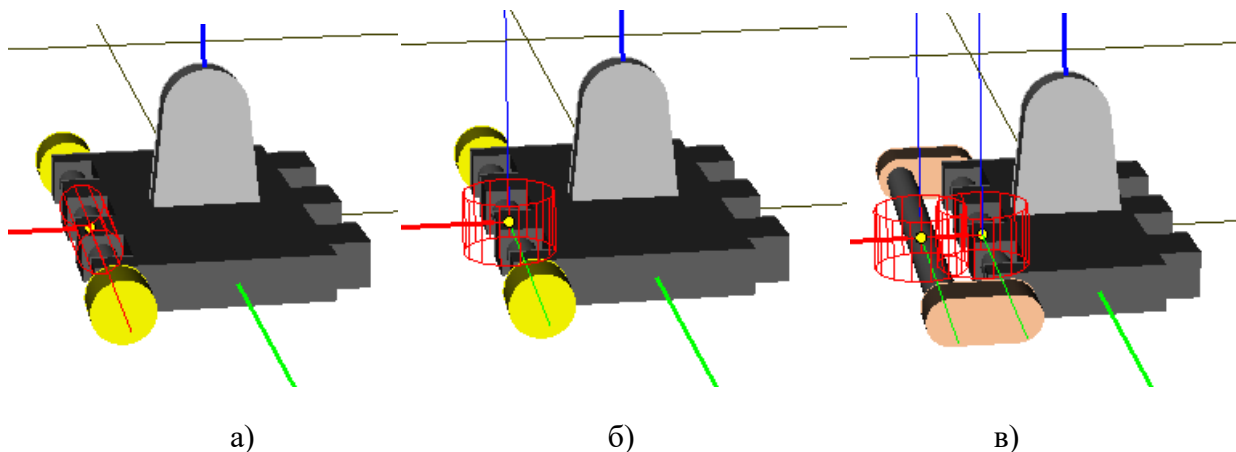


Рис. 1.60. Стандартные модели звеньев цепи

В качестве стандартных моделей отдельного звена цепи в УМ поставляются три компонента, различающиеся по типу шарнира:

TrackLink\_Rigid с жестким шарниром, рис. 1.60 а;

TrackLink\_Bushing с упругим шарниром, рис. 1.60 б);

TrackLink\_Parallel с двумя параллельными резинометаллическими шарнирами, рис. 1.60 в.

**Стандартные элементы**

1. **Стандартные идентификаторы:** любая компонента, описывающая звено цепи, должна содержать стандартные идентификаторы, табл. 1.16.

Таблица 1.16

Идентификатор	Комментарий
<i>ltracklink</i>	Длина звена
<i>wtracklink</i>	Ширина звена
<i>htracklink</i>	Высота звена
<i>wsprocket</i>	Ширина ведущего колеса (ширина звена по цевкам)

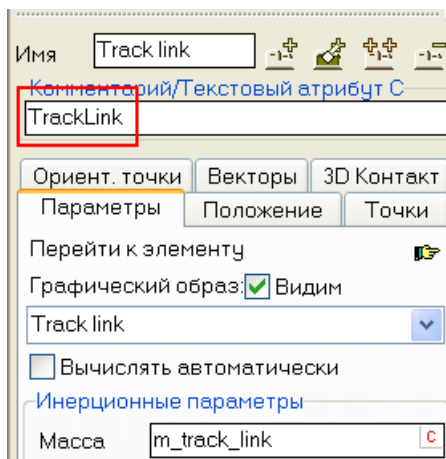


Рис. 1.61. Стандартный текстовый атрибут звена

2. **Стандартный элемент:** текстовый атрибут звена. Тело, моделирующее основной элемент звена, должно быть помечено текстовым атрибутом типа *C TrackLink*, рис. 1.61.

### 1.2.1.4.4.1. Звено с жестким шарниром

Компонента моделирует отдельное звено гусеничной цепи с жестким (вращательным) шарниром. Описанная в модели шарнирная сила позволяет задавать трение и упругость при повороте звена.

1. **Путь к файлу компоненты:**

{Данные УМ} \Caterpillar\subsystems\TrackLink\_Rigid.dat.

2. **Тела.**

Модель содержит одно тело *TrackLink*, помеченное стандартным текстовым атрибутом типа *C:TrackLink*. Инерционные параметры звена заданы идентификаторами, табл. 1.17.

Таблица 1.17

**Параметризация инерционных параметров**

Идентификатор	Комментарий
<i>m_track_link</i>	(кг) Масса
<i>ix_track_link</i> , <i>iy_track_link</i> <i>iz_track_link</i>	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно центральных осей звена

3. **Шарниры.**

Модель содержит два шарнира:

внутренний шарнир с шестью степенями свободы для тела *TrackLink*, который автоматически удаляется при добавлении звена к гусеничной цепи;

шарнир *jTrack link* вращательного типа, соединяющий данное звено с внешним телом; при создании модели гусеницы в качестве второго тела автоматически назначается звено, следующее в цепи непосредственно за данным.

4. **Тип цевочного зацепления (внешнее, внутреннее)**

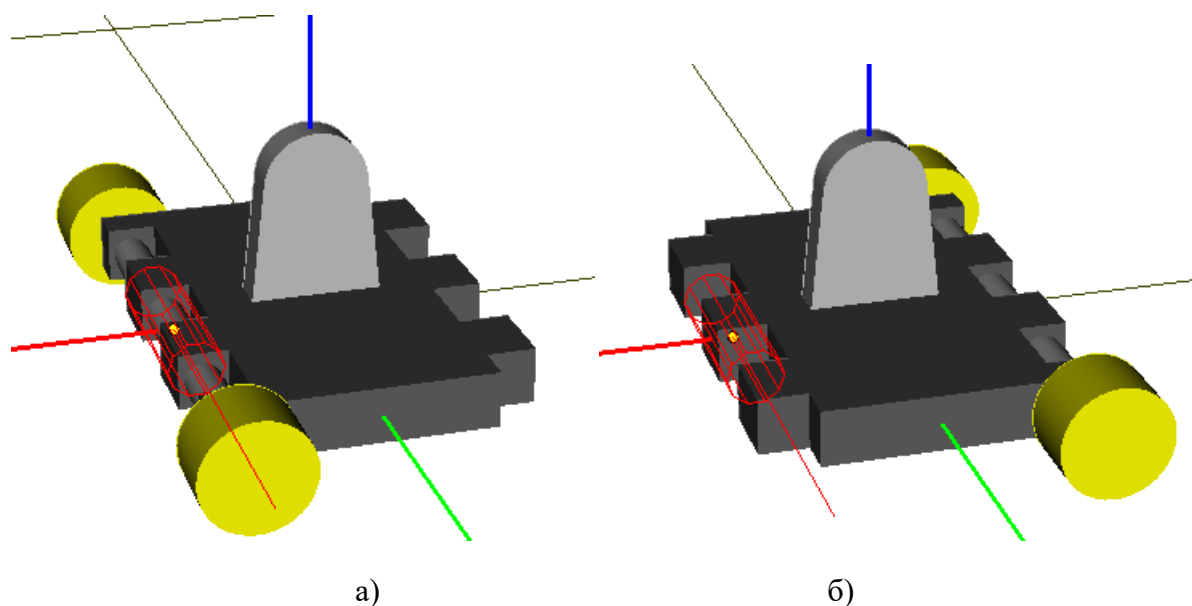


Рис. 1.62. Внутреннее (а) и внешнее (б) цевочное зацепления

Тип цевочного зацепления задается идентификатором `pin_key`: 1 для внутреннего и -1 для внешнего зацеплений [3], рис. 1.62.

### 5. Шарнирная сила

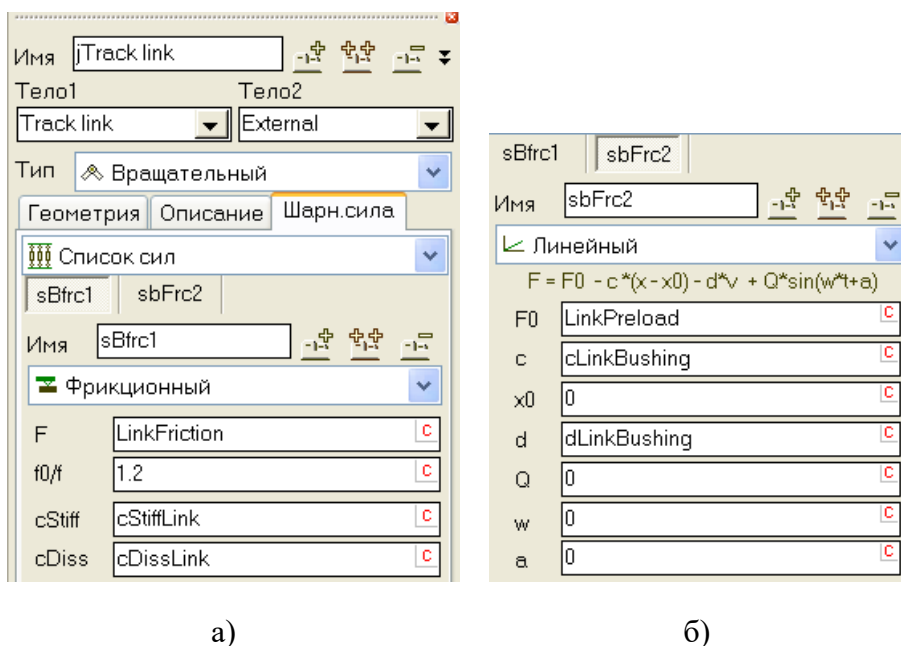


Рис. 1.63. Шарнирная сила

Шарнирная сила позволяет моделировать момент трения в шарнире и линейный упруго-диссипативный момент, действующие параллельно, рис. 1.63.

**Момент трения.** При повороте в шарнире возникает момент трения, величина которого задана идентификатором *LinkFriction* (Нм). В режиме сцепления коэффициенты угловой жесткости и диссипации заданы идентификаторами *cStiffLink* (Нм/рад), *cDissLink* (Нмс/рад). Для выключения трения следует задать нулевые значения этим трем идентификаторам.

**Упруго-диссипативный момент** задается коэффициентами жесткости и диссипации *cLinkBushing* (Нм/рад), *dLinkBushing* (Нмс/рад). Возможный преднатяг задается идентификатором *LinkPreload* (Нм) – величина момента при нулевом значении угла поворота в шарнире. Для выключения линейного момента следует задать нулевые значения всем трем идентификаторам.

### 1.2.1.4.4.2. Звено с упругим шарниром

Компонента моделирует отдельное звено гусеничной цепи с упругим шарниром.

**Путь к файлу** компоненты:

*{Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\TrackLink\_Bushing.dat.*

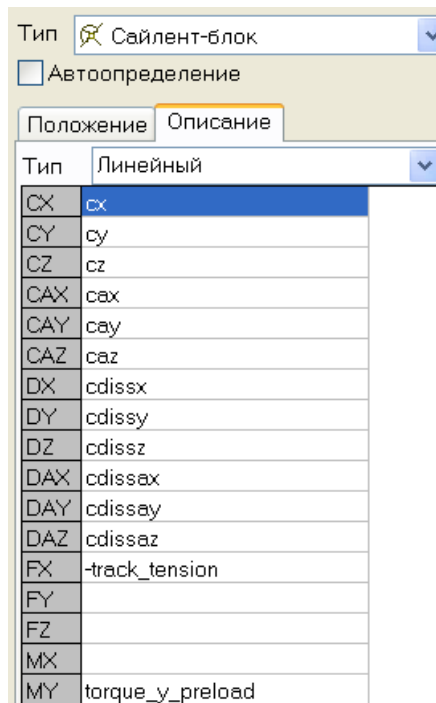


Рис. 1.64. Параметры упругой связи

Описание модели звена в значительной мере повторяет описание звена с жестким шарниром. Основное отличие заключается в том, что вращательный шарнир заменяется на упругую связь, описанную специальной силой типа линейный сайлент-блок, рис. 1.64.

Коэффициенты жесткости по направлениям локальной системы координат звена заданы идентификаторами

- cx (Н/м, продольная жесткость),
- cy (Н/м, поперечная жесткость),
- cz (Н/м, жесткость при вертикальном сдвиге)
- cax (Нм/рад, угловая жесткость при повороте вокруг продольной оси),
- cay (Нм/рад, угловая жесткость при повороте вокруг оси шарнира),
- caz (Нм/рад, угловая жесткость при повороте вокруг вертикальной оси).

Демпфирующие свойства шарнира заданы с помощью коэффициентов линейной диссипации, рассчитываемых по доле демпфирования от критического  $\beta_{ax}$  для поступательных степеней свободы и  $\beta_{axa}$  для вращательных степеней свободы. Значения этих идентификаторов по умолчанию 0.1. Для получения подробной информации о понятии «доля демпфирования от критического» см. [Глава 2](#), п. *Методика расчета параметров контакта*.

Для реализации заданного натяжения гусеничного обвода в случае резинометаллического шарнира используется продольное усилие в сайлентблоке, параметризованное стандартным идентификатором *track\_tension*.

Преднатяг (момент при нулевом угле поворота соседних звеньев вокруг поперечной оси) задается идентификатором *torque\_y\_preload*.

### 1.2.1.4.4.3. Звено с параллельными резинометаллическими шарнирами

Компонента моделирует отдельное звено гусеничной цепи с параллельными шарнирами. Пальцы параллельных шарниров двух соседних звеньев связаны жесткой скобой и образуют дополнительное тело для каждого звена.

Таким образом, описание модели отличается от звена с упругим шарниром введением дополнительного тела *Link-Link*, шарнира с шестью степенями свободы *jBase0\_Link-Link* и дополнительного сайлент-блока, связывающего тело *Link-Link* с внешним телом, принадлежащим следующему звену.

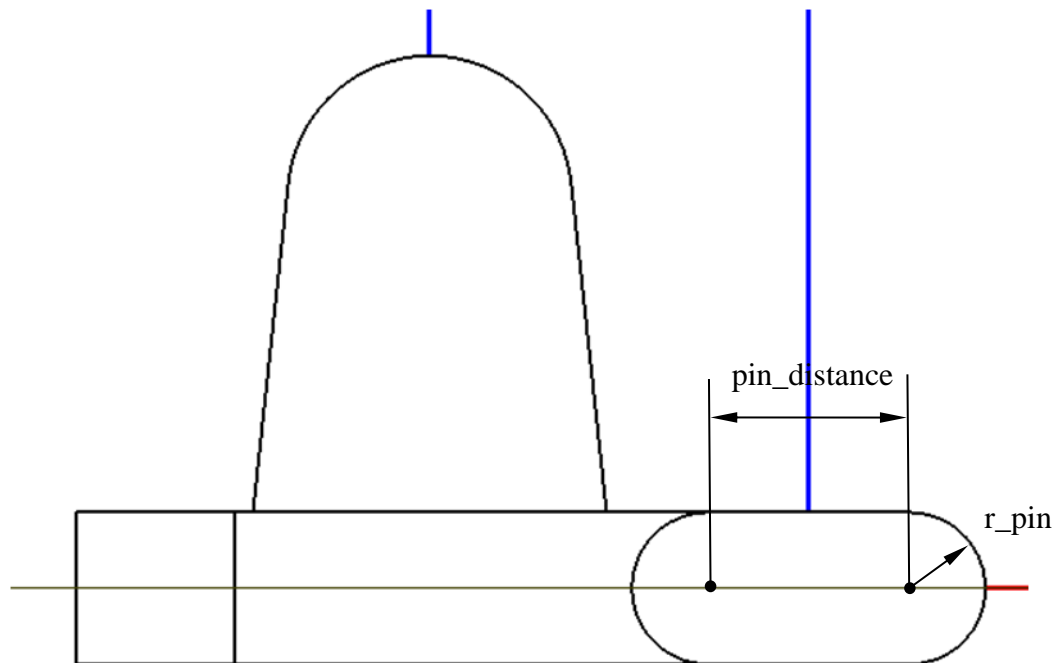


Рис. 1.65. Геометрические размеры цевки

Также модель содержит два дополнительных стандартных идентификатора, рис. 1.65:

- *pin\_distance* (м) – расстояние между осями шарниров соседних звеньев,  $L_1$  на рис. 1.51;
- *r\_pin* (м) – радиус цевки.

**Путь к файлу** компоненты:

*{Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\TrackLink\_Parallel.dat.*

1.2.1.4.5. Поддерживающий каток

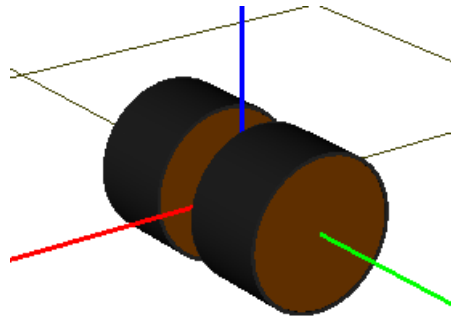


Рис. 1.66. Модель поддерживающего катка

Модель гусеницы может включать любое число поддерживающих катков. В частности, этот элемент может отсутствовать.

Шаблон модели катка в виде UM компоненты содержится в файле *{Данные UM}\Caterpillar\subsystems\roller.dat*.

**Элементы описания модели ведущего колеса.**

Стандартные идентификаторы, табл. 1.18.

Таблица 1.18

Идентификатор	Комментарий
<i>wguide</i>	Ширина паза для прохода гребня гусеничного звена
<i>hguide</i>	Глубина паза для прохода гребня гусеничного звена
<i>rroller</i>	Радиус катка
<i>wroller</i>	Ширина катка

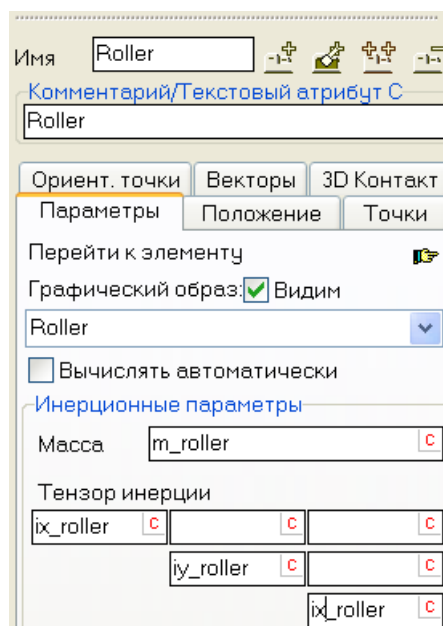


Рис. 1.67. Параметры тела, моделирующего поддерживающий каток

## 2. Тела.

Модель содержит единственное тело *Roller*, помеченное текстовым атрибутом типа C: *Roller*, рис. 1.67. Этот атрибут используется программой для идентификации тела, соответствующего катку. Инерционные параметры колеса заданы идентификаторами, табл. 1.19.

Таблица 1.19

**Параметризация инерционных параметров тел**

Идентификатор	Значение по умолчанию	Комментарий
<i>m_roller</i>	20	(кг) Масса
<i>ix_roller</i>	2	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости катка
<i>iy_roller</i>	1	(кг·м <sup>2</sup> ) Момент инерции относительно оси катка

## 3. Шарниры.

Модель содержит единственный вращательный шарнир *jRoller*, соединяющий каток с телом *Base0*. При добавлении компоненты в модель гусеницы тело *Base0* автоматически заменяется программой на локальный корпус гусеницы.

## 1.2.2. Примеры разработки новых элементов гусеницы

В данном разделе мы рассмотрим пример разработки новых компонент, моделирующих элементы конструкции гусеничного движителя.

Заметим, что новые компоненты могут быть получены с помощью модификации существующих, в том числе стандартных компонент. Например, таким образом можно изменить графические образы элементов, импортировав их из САПР.

### 1.2.2.1. Разработка блока балансирной подвески с тремя опорными катками

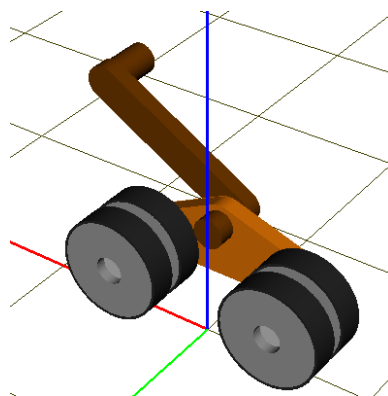




Рис. 1.68. Модель – аналог создаваемой каретки

#### 1. Выбор аналога и создание файла новой компоненты.

В качестве аналога примем модель балансирной подвески с двумя опорными катками и одним рычагом, рис. 1.68, п. 1.2.1.4.1.5. "Балансирная каретка с двумя катками и одним рычагом", с. 1-30. Цель модификации – добавить третий опорный каток, связанный вращательным шарниром с балансиром.


- Откройте программу ввода **UM Input**.
- Создайте новый объект с помощью кнопки  на панели инструментов или с помощью команды меню **Файл | Новый объект**.
- С помощью кнопки  на панели инструментов или команды меню **Правка | Прочитать из файла** прочитайте файл

*{Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\bogie\_2wheel\_1arm.dat.*

Программа добавит к созданному объекту подсистему, содержащую каретку, изображенную на рис. 1.68, а также список выделенных идентификаторов.

- Сохраните объект в файл как новую компоненту в любое место, доступное для записи, например

*{Данные УМ}\Caterpillar\subsystems\bogie\_3wheel\_1arm.dat*

- с помощью кнопки  на панели инструментов или команды меню **Файл | Сохранить как компоненту**.

Обратите внимание, что *имя файла будет именем компоненты*. Можно использовать название файла, написанное по-русски. Расширение файла должно быть *.dat*.

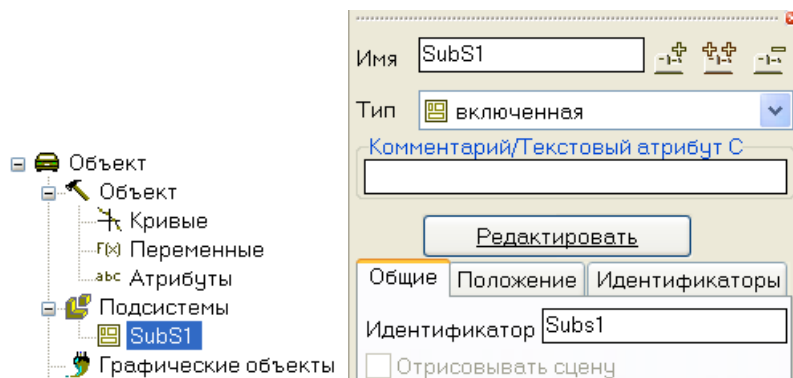


Рис. 1.69. Переход к редактированию подсистемы

2. Модификация модели каретки.

- Выберите подсистему *Subs1* в списке элементов и перейдите к ее редактированию с помощью кнопки **Редактировать** в окне инспектора, рис. 1.69. Откроется новый объект, содержащий полное описание каретки.

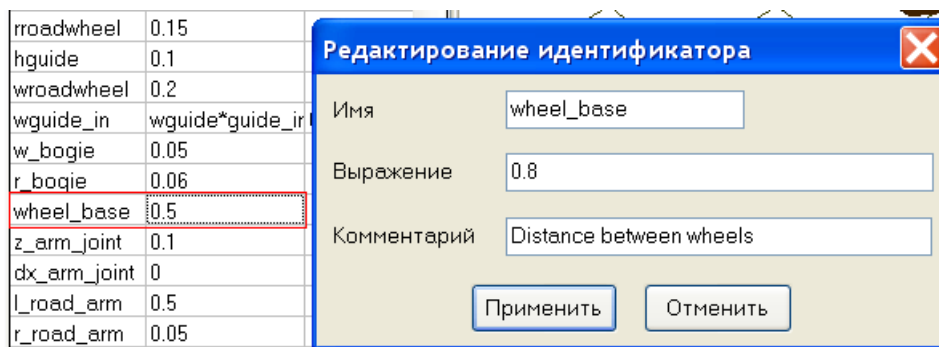


Рис. 1.70. Изменение базы каретки

- Двойным щелчком на идентификаторе *wheel\_base* откройте окно редактирования идентификатора и измените его значение на 0.8, рис. 1.70.

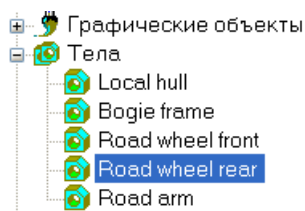


Рис. 1.71. Переход к параметрам тела

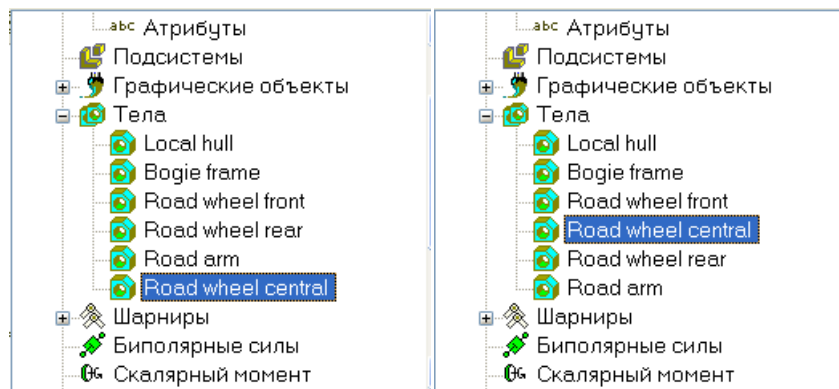


Рис. 1.72. Перенос тела в списке

- Перейдите к описанию катка *Road wheel rear* (задний опорный каток), рис. 1.71, и скопируйте его, используя кнопку . Переименуйте новое тело, например, *Road wheel central* (не забудьте нажать Enter после ввода имени). Перенесите с помощью мыши тело в списке, поставив его между передним и задним катками, рис. 1.72.

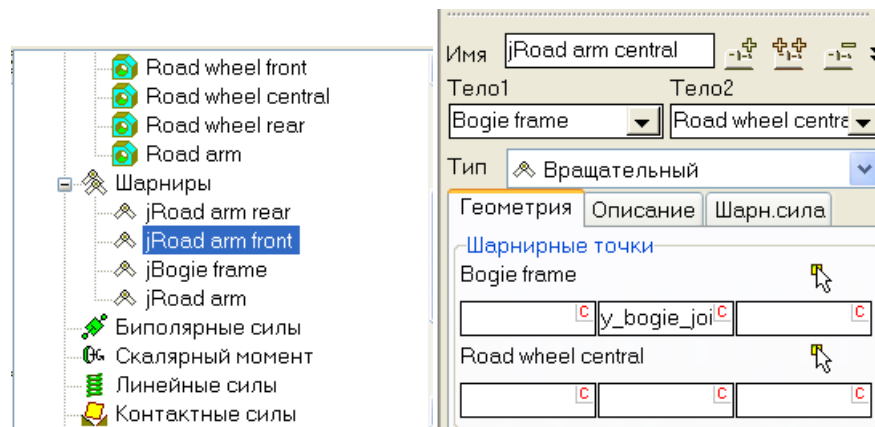


Рис. 1.73. Переход к параметрам шарнира. Параметры нового шарнира

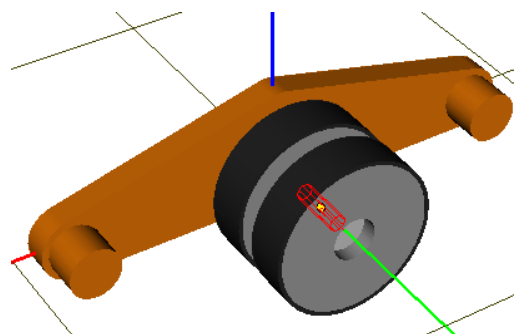


Рис. 1.74. Изображение новой кинематической пары

- Перейдите к описанию шарнира *jRoad wheel rear*, рис. 1.73, и скопируйте его, используя кнопку . Переименуйте новый шарнир, например, *jRoad wheel central* (не забудьте нажать Enter после ввода имени). Назначьте второе тело *Road wheel central*. Задайте нулевое значение продольной координаты шарнирной точки на теле *Bogie frame* (балансир). Измененные параметры нового шарнира приведены на

рис. 1.73 справа. В анимационном окне новая кинематическая пара отобразится как на рис. 1.74.

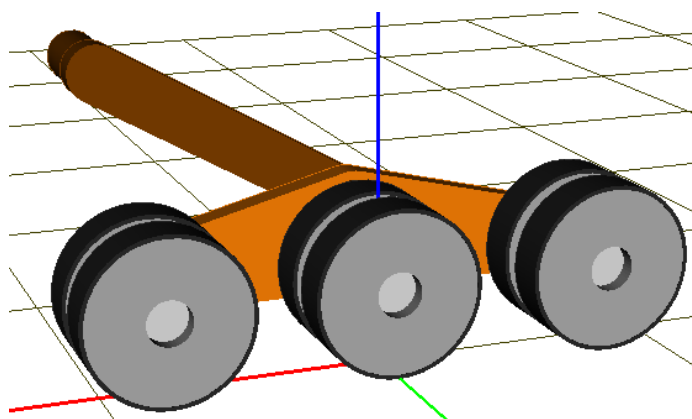


Рис. 1.75. Окончательный вид модели каретки

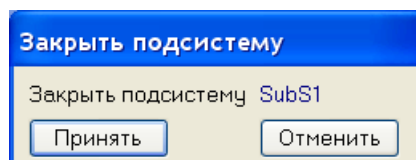



Рис. 1.76. Закреть окно подсистемы с сохранением изменений

- Модель полностью описана, рис. 1.75. Примите изменения, внесенные в подсистему, с помощью кнопки **Принять** окна «Закреть подсистему», рис. 1.76.
- Сохраните измененную модель каретки с помощью кнопки  на панели инструментов или команды меню **Файл | Сохранить как компоненту**.
- Закройте окно модели без сохранения.

После создания компоненты ее необходимо *зарегистрировать* (п. 1.2.3. "Регистрация компонент, моделирующих элементы гусеницы", с. 1-68).

### 1.2.3. Регистрация компонент, моделирующих элементы гусеницы

Для того чтобы элементы гусеницы, разработанные пользователем, могли быть использованы мастером создания модели гусеницы, необходимо зарегистрировать новые компоненты.

В настоящей версии УМ предусмотрена регистрация следующих компонент, п. 1.2.1.4.2. "Направляющее колесо и натяжное устройство", с. 1-34:

- компонента блока подвески
- компонента направляющего колеса и натяжного устройства
- компонента звена гусеничной цепи

Для регистрации компоненты следует выполнить следующие действия.

3. Откройте программу **UM Input**. Если он уже открыт, закройте все УМ объекты.

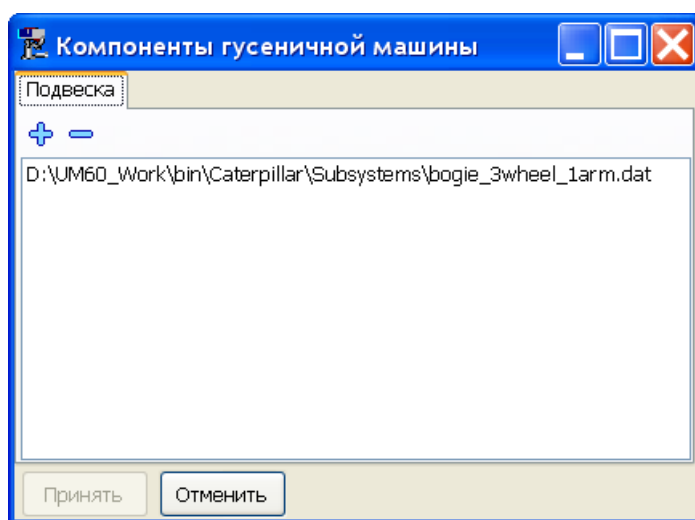


Рис. 1.77. Инструмент регистрации компонент гусеницы

4. Откройте окно "Компоненты гусеничной машины" используя команду меню **Инструменты | Компоненты гусеничной машины**, рис. 1.77. Если этот пункт неактивен, проверьте, закрыты ли все УМ объекты в программе ввода.
5. Для регистрации новой компоненты выберите нужную закладку (например, **Подвеска** при регистрации блока подвески), и, используя кнопку **+**, выберите нужный файл.
6. Для отмены регистрации выделите соответствующий элемент списка и щелкните на кнопке **-**.
7. Для записи внесенных изменений в реестр компьютера используйте кнопку **Принять**. Для того, чтобы отказаться от внесения изменений, используйте кнопку **Отменить**.

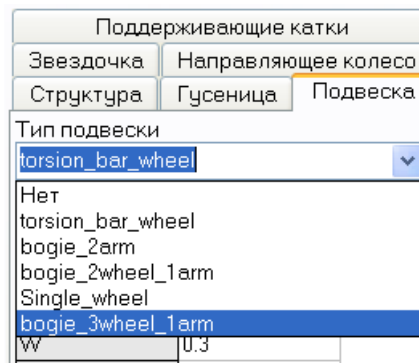


Рис. 1.78. Список стандартных и зарегистрированных компонент блоков подвески

После регистрации компонент они становятся доступными в мастере создания модели гусеницы, рис. 1.78.

**Замечание.** Регистрация происходит на локальной машине. Для того чтобы использовать компоненту на другом компьютере, следует повторить регистрацию нужных файлов на этом компьютере.

## 1.2.4. Создание модели гусеницы

Для автоматического создания модели гусеницы используется специальный инструмент, носящий название «мастер модели гусеницы». Подробно опишем последовательность шагов, необходимых для создания модели ГМ.

При описании процесса создания модели мы будем использовать некоторые параметры гусеничного транспортера-тягача МТ-Л, приведенные в работе [1].

### 1.2.4.1. Подготовка процесса

Если модель не может быть создана с использованием стандартных компонент, описанных в данном руководстве, пользователь должен создать собственные компоненты, п. 1.2.2. *"Примеры разработки новых элементов гусеницы"*, с. 1-64. Для этого доступны три типа элементов конструкции:

- блоки подвески,
- направляющее колесо с натяжным устройством,
- звено цепи гусеницы.

Пользователь может изменить в стандартных компонентах графические образы тел и силовых элементов, добавить новые силовые элементы или модифицировать существующие.

Создав новые компоненты, пользователь должен зарегистрировать их, п. 1.2.3. *"Регистрация компонент, моделирующих элементы гусеницы"*, с. 1-68.

Следует также создать файлы профилей зуба звездочки и, при необходимости, цевки, пп. 1.2.1.4.3.2. *"Автоматический генератор профилей зуба звездочки"*, с. 1-47, 1.2.1.4.3.3. *"Задание профилей зуба и цевки с помощью редактора кривых"*, с. 1-51.

### 1.2.4.2. Добавление подсистемы – гусеницы

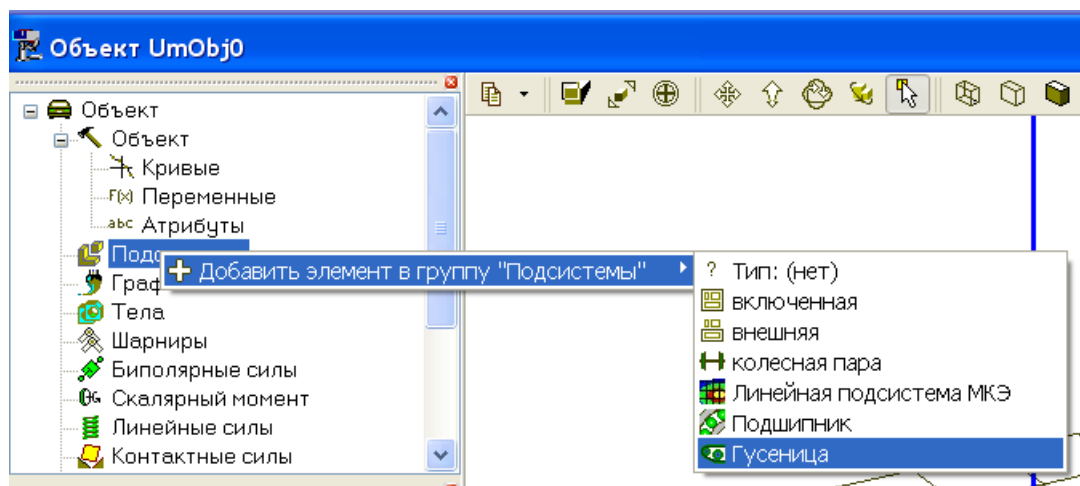


Рис. 1.79. Добавление подсистемы типа «Гусеница»

1. Создайте новую модель в программе ввода.
2. Добавьте подсистему **Гусеница**. Для этого
  - выделите мышкой элемент списка **Подсистемы**;
  - щелкните правой кнопкой мыши и выполните команду контекстного меню **Добавить элемент в группу «подсистемы» | Гусеница**, рис. 1.79.

В результате этих действий в окне инспектора появляется мастер модели гусеницы. На закладке **Параметры** мастера содержатся инструменты описания конструкции гусеницы, вкладки

- Структура,
- Подвеска,
- Звездочка,
- Направляющее колесо,
- Поддерживающие катки,
- Гусеница.

### 1.2.4.3. Задание структуры модели

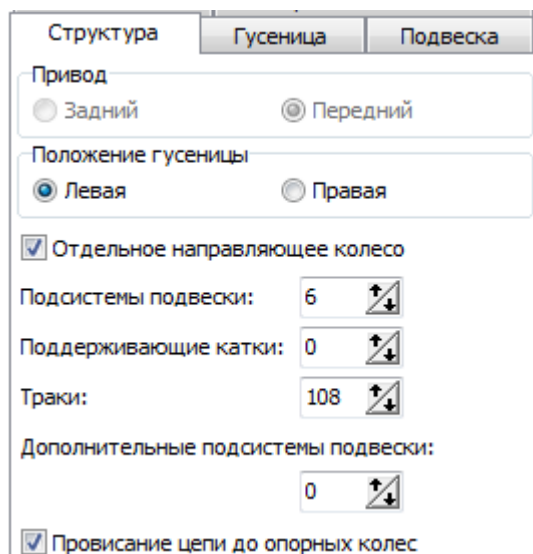


Рис. 1.80. Параметры структуры гусеницы

На вкладке **Структура** мастера следует задать (рис. 1.80)

- тип гусеницы **Левая/Правая**;
- число подсистем (блоков) подвески, см. п. 1.2.1.4.1. *"Подсистемы подвески"*, с. 1-10; данное число не может быть нулевым;
- число поддерживающих катков (может быть 0);
- число траков (звеньев) в гусеничной цепи;
- число дополнительных подсистем подвески - для генерирования движителя с несколькими различными типами подвесок, рис. 1.81.

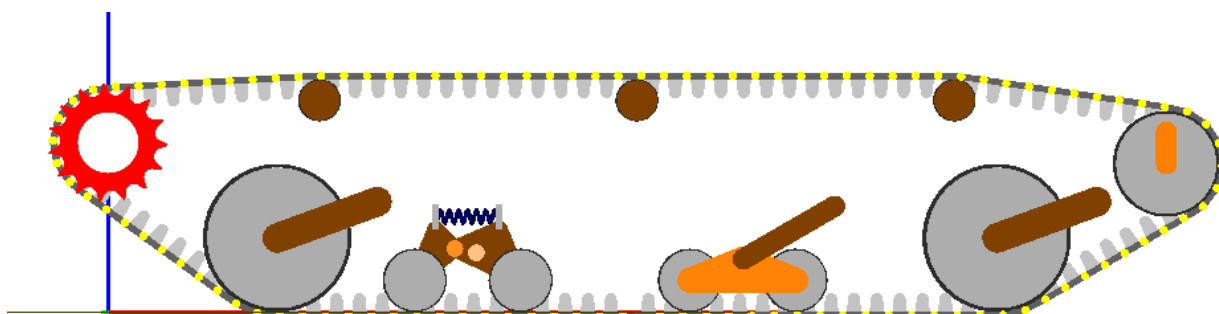


Рис. 1.81. Пример гусеничного движителя с тремя различными типами подвесок (только с целью иллюстрации возможностей)

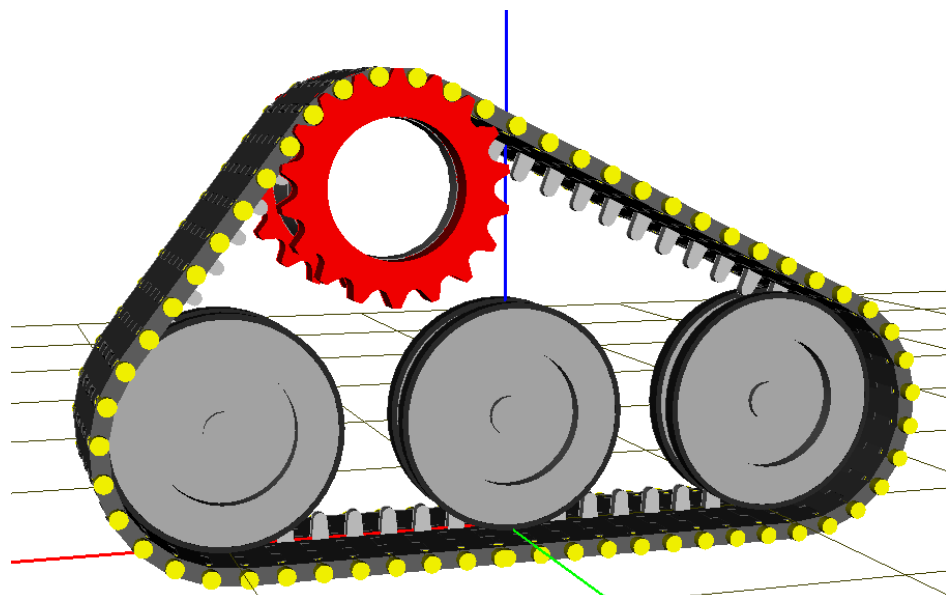
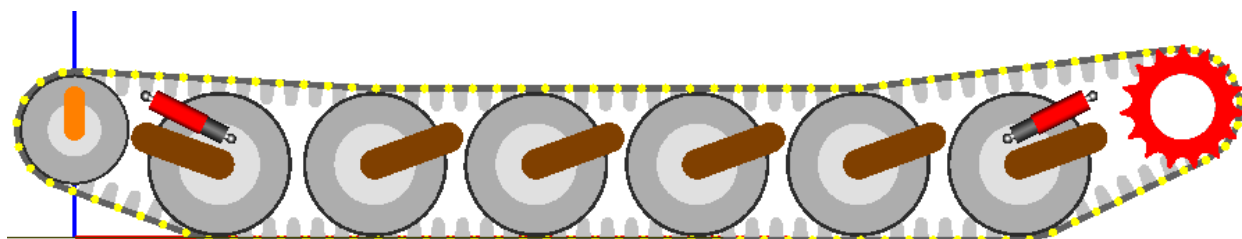
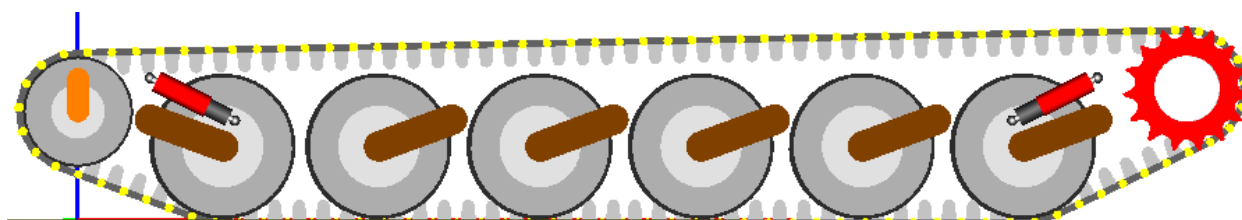


Рис. 1.82. Пример гусеничного движителя без натяжного колеса

Направляющее колесо может отсутствовать в модели. В этом случае следует снять галочку в поле **Отдельное направляющее колесо**, рис. 1.82.



а)



б)

Рис. 1.83. Гусеничный движитель без опорных катков при включенном (а) и выключенном (б) флаге провисания опорной цепи

Флаг **Провисание цепи до опорных** колес используется только в том случае, когда в модели отсутствуют поддерживающие катки, рис. 1.83.

### 1.2.4.4. Создание подвески

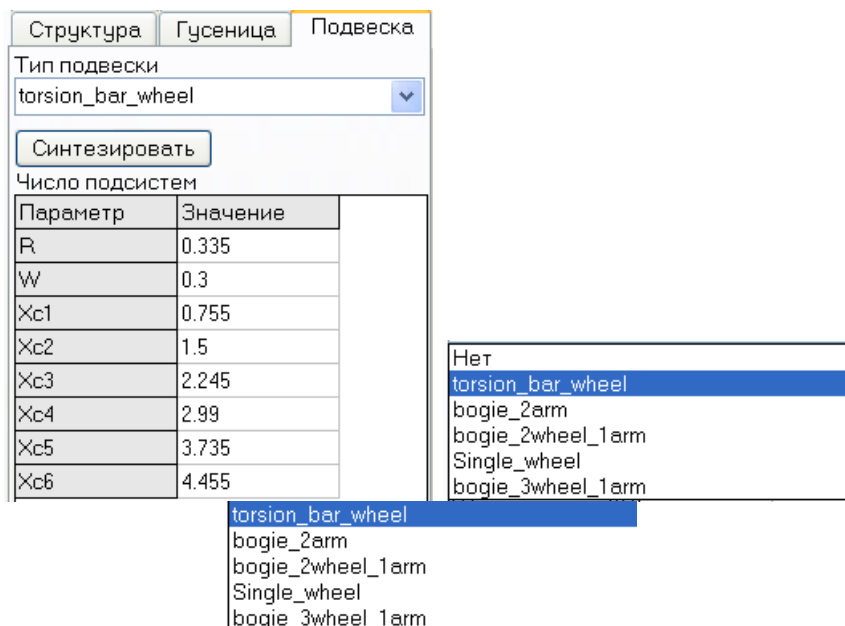


Рис. 1.84. Параметры подвески

На вкладке **Подвеска**

1. Выберите тип подвески с помощью выпадающего списка
2. В таблице задайте геометрические параметры подвески (в метрах), см. п. 1.2.1.4.1.1. "Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески", с. 1-11, табл. 1.1.
  - R – радиус опорных катков, соответствует стандартному идентификатору *rroadwheel*.
  - W – ширина опорных катков, соответствует стандартному идентификатору *wroadwheel*.
  - Xc1... – продольные координаты, задающие положение отдельных подсистем подвески в продольном направлении; число координат равно числу подсистем, задаваемых на вкладке **Структура**; значение продольной координаты соответствует стандартному идентификатору *xbogie*.

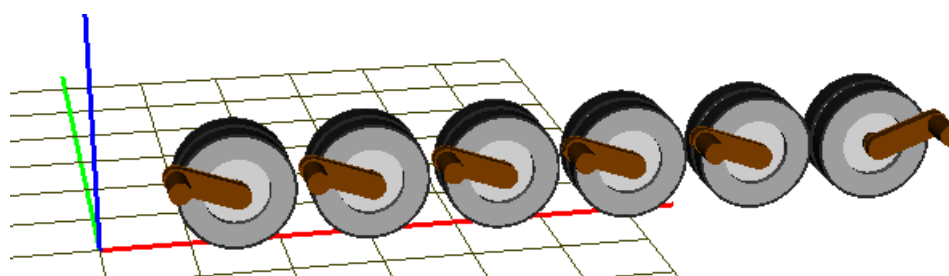


Рис. 1.85. Синтезированная подвеска

- Щелкните на кнопке **Синтезировать** для создания модели подсистемы по введенным данным; подвеска отобразится в анимационном окне.
- Используйте вкладку **Идентификаторы | Suspension** для модификации численных значений выделенных идентификаторов.

- При необходимости внесите изменения и обновите подвеску с помощью кнопки **Синтезировать**.
- Задайте численные значения параметров подвески, соответствующие создаваемой модели.

### 1.2.4.5. Добавление ведущего колеса

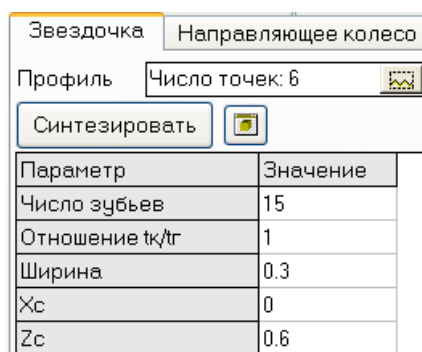


Рис. 1.86. Параметры звездочки

На вкладке **Звездочка** выполните следующие действия.

1. Назначьте профиль зубы звездочки с помощью встроенного редактора кривых. Для этого
  - щелчком на кнопке откройте редактор,
  - прочитайте заранее созданный файл с профилем, используя кнопку .
2. В таблице задайте число зубьев, отношение шага ведущего колеса к длине звена гусеницы  $t_k/t_r$  и геометрические параметры, см. табл. 1.14.
  - Ширина – соответствует идентификатору *wsprocket*,
  - $X_c$ ,  $Z_c$  – продольная и вертикальная координаты, соответствуют идентификаторам *xcsprocket*, *zcsprocket*.
3. Используйте кнопку для предварительного просмотра образа звездочки.

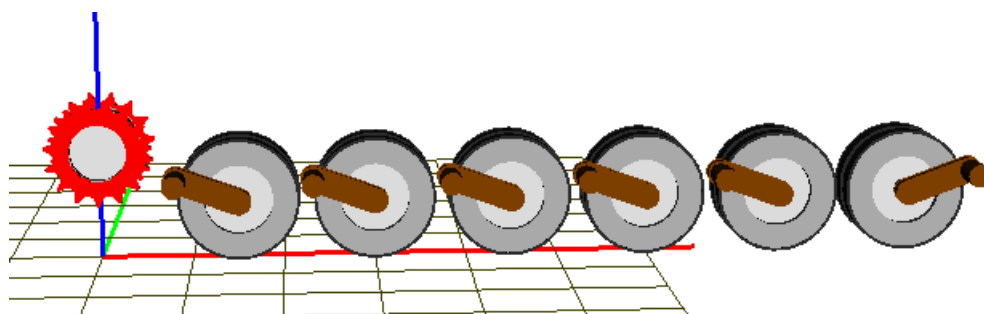


Рис. 1.87. Добавление звездочки

4. Используйте кнопку **Синтезировать** для добавления ведущего колеса к модели, рис. 1.87.

**Замечание.** Радиус ведущего колеса рассчитывается автоматически на последнем этапе создания модели гусеничного движителя, когда определены все геометри-

ческие параметры модели, в частности, длина отдельного звена гусеничной цепи. На текущем этапе для расчета радиуса используется предварительное значение длины звена, которое в дальнейшем (и как правило) будет изменено.

#### 1.2.4.6. Добавление направляющего колеса

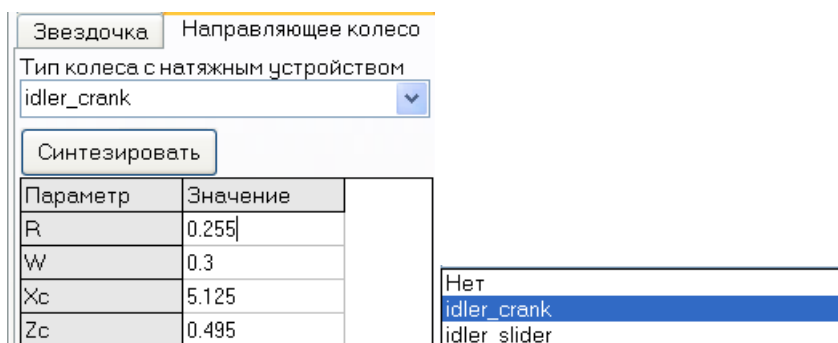


Рис. 1.88. Параметры направляющего колеса

Используется вкладка **Направляющее колесо**, рис. 1.88.

1. Выберите тип механизма натяжения гусеницы из выпадающего списка.
2. В таблице задайте геометрические параметры направляющего колеса (в метрах), табл. 1.10.
  - R – радиус направляющего колеса, соответствует стандартному идентификатору `ridelr`,
  - W – ширина колеса, соответствует стандартному идентификатору `widler`,
  - Xc, Zc – продольная и вертикальная координаты центра направляющего колеса, соответствуют стандартным идентификаторам `xcidler`, `zcidler`.
3. Используйте кнопку **Синтезировать** для добавления направляющего колеса к модели, рис. 1.89.
4. Задайте численные значения параметров механизма натяжения гусеницы, соответствующие создаваемой модели.

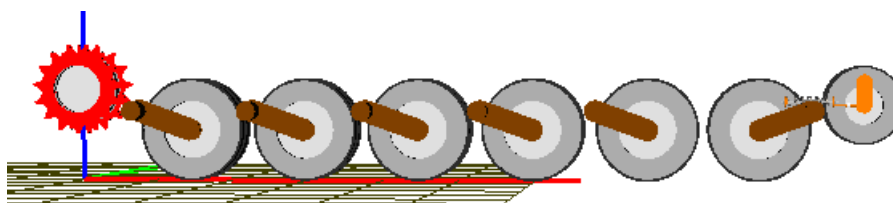


Рис. 1.89. Добавление направляющего колеса с механизмом натяжения гусеницы

### 1.2.4.7. Добавление поддерживающих катков




Параметр	Значение
R	0.1
W	0.3
Xc1	1
Zc1	0.9
Xc2	2.5
Zc2	0.9
Xc3	4
Zc3	0.9

Рис. 1.90. Параметры поддерживающих катков

На вкладке **Поддерживающие катки**, рис. 1.90.

1. В таблице задайте геометрические параметры поддерживающих катков (в метрах), табл. 1.10.
  - R – радиус катка, соответствует стандартному идентификатору *rroller*,
  - W – ширина катка, соответствует стандартному идентификатору *wroller*,
  - Xc..., Zc... – продольная и вертикальная координаты центров катков.
2. Используйте кнопку **Синтезировать** для добавления катков к модели.

### 1.2.4.8. Создание модели гусеничной цепи

Модель гусеничной цепи, состоящей из заданного пользователем числа звеньев (траков), создается на вкладке **Гусеница**, рис. 1.91. Гусеничная цепь может быть добавлена к модели только в том случае, если пользователь корректно описал все остальные элементы подвески, то есть блоки подвески, направляющее и натяжное колеса, поддерживающие катки (если предусмотрены). По заданным геометрическим параметрам модели программа строит огибающую кривую, соответствующую гусеничному обводу и по заданному числу звеньев определяет длину звена, соответствующую введенным геометрическим данным. Кнопка  используется для вызова графического окна с изображением кривой прогнозируемого гусеничного обвода, рис. 1.92.

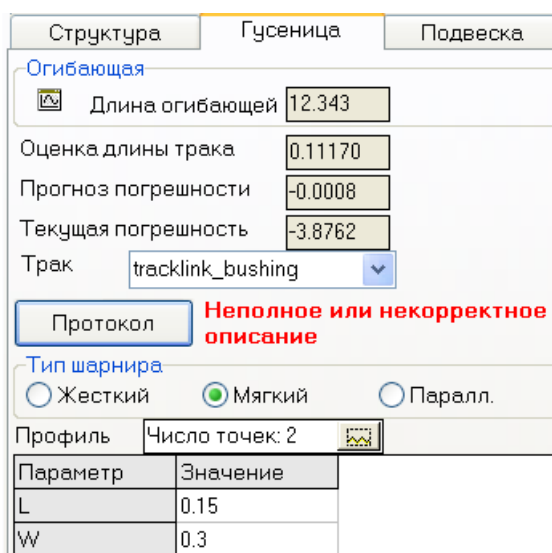


Рис. 1.91. Параметры гусеничной цепи с некорректно заданной длиной трака

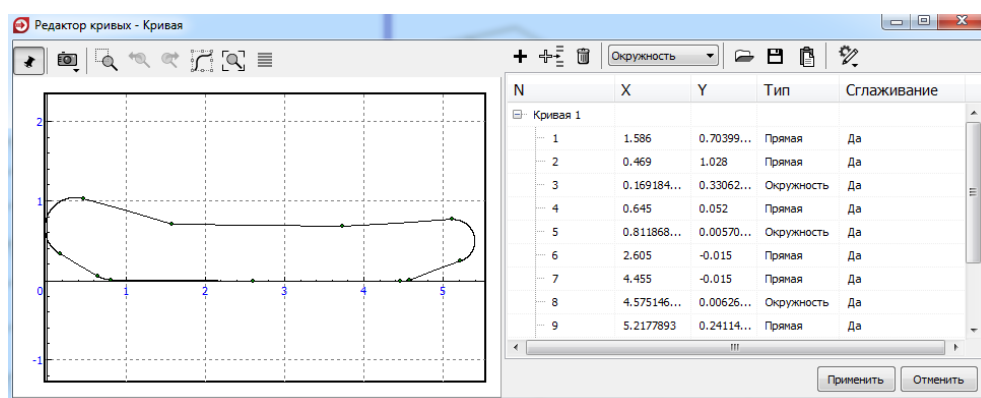


Рис. 1.92. Гусеничный обвод

Расчетные значения длины огибающей, длины трака, ошибок в замыкании цепи при предлагаемой и заданной пользователем длины трака (параметр L на рис. 1.91) указываются в таблице, представленной на рис. 1.91.

Если геометрические параметры подвески заданы неполно или неверно, и программа не может построить огибающую, то пользователь может получить комментарии, щелкнув на кнопке **Протокол**.

Программа также сообщает о невозможности построения гусеничной цепи, если заданная пользователем длина трака не удовлетворяет условию замыкания цепи и величина погрешности превышает длину одного звена, рис. 1.91, то есть в гусеничном обводе имеются лишние или недостающие звенья. В этом случае рекомендуется скорректировать ошибочно введенные геометрические параметры (координаты центров катков и их радиусы). Если рекомендуемая длина трака отличается от заданной на несколько долей миллиметра, то желательно установить рекомендуемую длину трака, чтобы улучшить геометрическое условие замыкания цепи.

При корректно заданных параметрах подвески, появляется кнопка **Синтезировать**, рис. 1.93. После щелчка на этой кнопке генерируется гусеничная цепь, содержащую заданное число звеньев.

Огибающая

Длина огибающей 12.075

Оценка длины трака 0.11169

Прогноз погрешности 0.0002

Текущая погрешность -0.0008

Трак tracklink\_bushing

Синтезировать

Тип шарнира

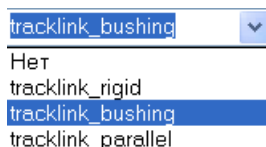
Жесткий  Мягкий  Паралл.


Профиль Число точек: 2

Параметр	Значение
L	0.11170
W	0.3

Рис. 1.93. Параметры гусеничной цепи с корректно заданной длиной трака L

Таким образом, при корректном описании подвески, для создания модели цепи следует выполнить следующие действия.



1. Выберите тип звена из выпадающего списка.
2. Если выбран тип звена, отличный от стандартного, то следует указать **тип шарнира** (жесткий мягкий или параллельный).
3. Задайте профиль цевки с помощью редактора кривых с использованием кнопки .
4. Задайте длину, ширину и высоту трака (параметры L, W, H, м).
5. Используйте кнопку **Синтезировать** для создания гусеничной цепи, рис. 1.94.

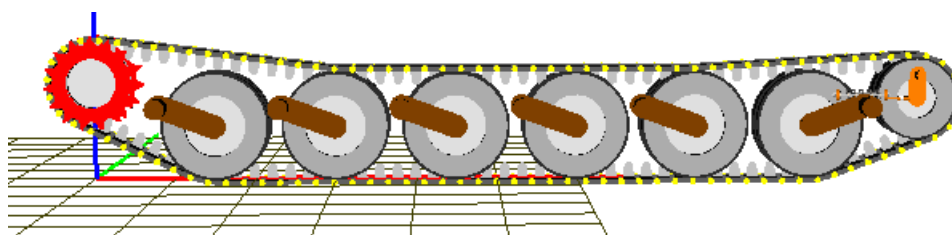
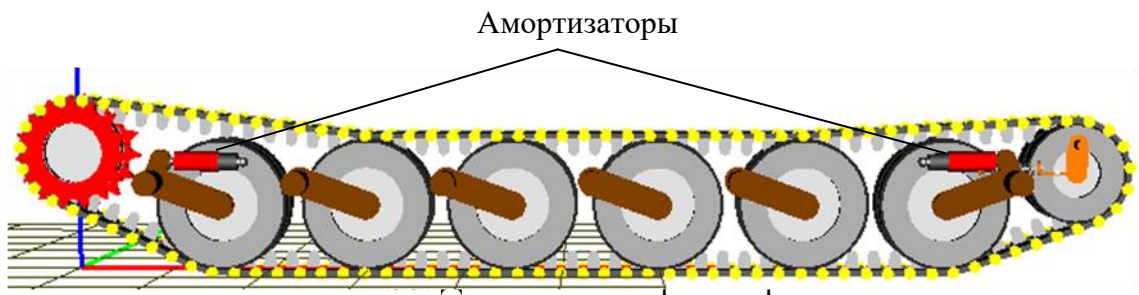


Рис. 1.94. Добавление гусеничной цепи

#### 1.2.4.9. Доработка модели гусеницы. Добавление амортизаторов

При необходимости к созданной модели гусеницы следует добавить амортизаторы, дополнительные упоры и пр., рис. 1.95. Для этого используются стандартные средства УМ по описанию силовых элементов.



Амортизаторы могут моделироваться биполярными силовыми элементами. Пример модели гидравлического амортизатора с характеристикой, приведенной в работе [1], представлен на рис. 1.96. Для задания такой модели следует указать

- тела, соединенные амортизатором;
- координаты точек прикрепления в СК каждого из тел;
- тип биполярного силового элемента: **Поточечный (числа)**;
- выбрать тип зависимости ( $v$  – скорость);
- выбрать тип задания характеристики: сжатие положительно (положительная скорость соответствует работе элемента на сжатие – прямой ход);
- задать точки на характеристике амортизатора в порядке роста скорости; сила задается в ньютонах, скорость – в метрах в секунду.

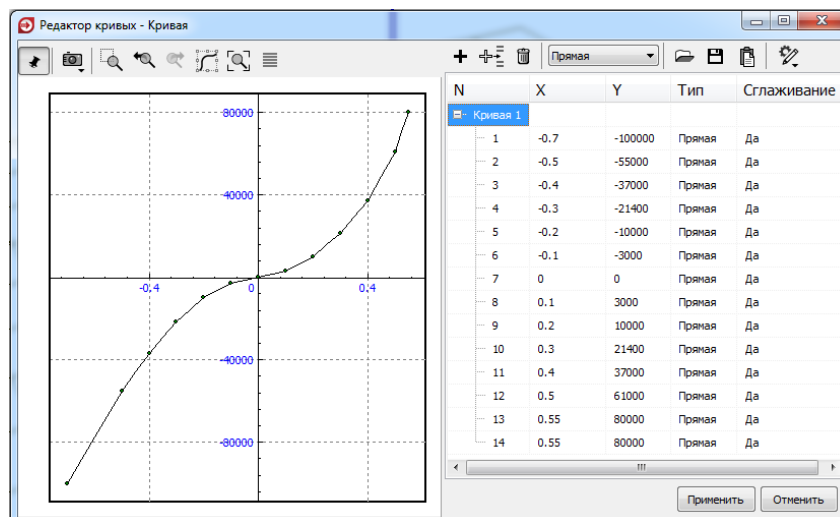
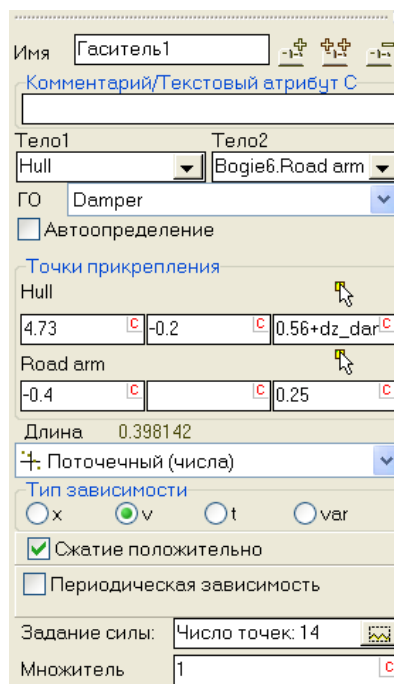


Рис. 1.96. Модель амортизатора, заданная биполярным силовым элементом типа Поточный (числа)

Для моделирования фрикционных амортизаторов рекомендуется использовать биполярный силовый элемент типа **Фрикционный**.

Рекомендуется обратиться к [Главе 2](#) руководства пользователя для получения дополнительной информации о создании силовых элементов.

## 1.2.5. Создание модели ГМ

В предыдущем разделе описан процесс создания модели отдельной гусеницы ГМ. Здесь мы остановимся на методике разработки полной модели, для чего следует добавить корпус ГМ, вторую гусеницу, связать гусеницы с корпусом и, при необходимости, создать модель трансмиссии.

### 1.2.5.1. Добавление корпуса

Для добавления корпуса к модели ГМ следует выполнить следующие действия.

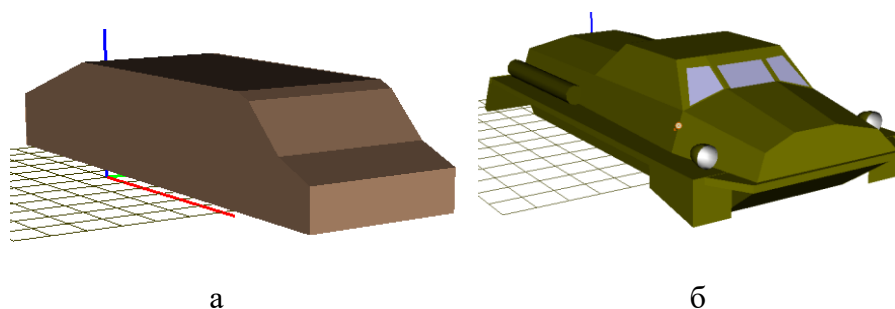


Рис. 1.97. Схематический (а) и более реалистичный (б) графические образы корпуса ГМ

1. Создать графический образ, соответствующий корпусу. Образ может быть как схематичным, сильно упрощенным, так и импортированным из САПР, т.е. более реалистичным, рис. 1.97. Для результатов моделирования графический образ не имеет значения.

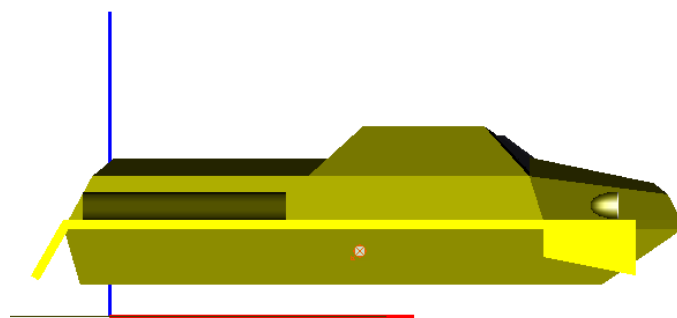


Рис. 1.98. Система координат корпуса ГМ, совпадающая с СК0 при нулевых значениях координат

2. Добавить к модели тело, соответствующее корпусу, назначить ему графический образ. Задать инерционные параметры (массу, моменты инерции, координаты центра тяжести в СК корпуса). Желательно выбрать СК корпуса таким образом, чтобы она совпадала с СК0 при нулевых значениях координат, рис. 1.98. В соответствии с этим создается или сдвигается графический образ и задаются координаты центра тяжести.

**Замечание 1.** Обратите внимание, что моменты инерции тел задаются в центральной СК, то есть в СК с началом в центре тяжести тела и с направлением осей параллельно осям СК тела.

**Замечание 2.** Для внутренней идентификации корпуса программой рекомендуется использовать стандартное имя Hull или одноименный текстовый атрибут (см., например, п. 1.2.6.2.8. "Действия после добавления трансмиссии с модели ГМ", с. 1-98).

The image shows a software interface for defining inertia parameters for a component named "Hull". The interface includes the following elements:

- Имя:** Hull (highlighted with a red box)
- Комментарий/Текстовый атрибут C:** Hull (highlighted with a red box)
- Ориент. точки:** Векторы, 3D Контакт, Параметры, Положение, Точки
- Координаты (PP):** Кватернионный
- Перейти к элементу:** Видим
- Графический образ:** goHull
- Вычислять автоматически
- Инерционные параметры:**
  - Масса:** mHull
  - Тензор инерции:**
    - ixHull, iyHull, izHull (each with a small red 'c' icon)
  - Присоединенные массы:** (нет)
- Координаты центра масс в СК тела:**
  - xс, zс (each with a small red 'c' icon)

Рис. 1.99. Параметризованные инерционные параметры корпуса ГМ

Если инерционные параметры кузова известны неточно и/или могут меняться в процессе исследования динамики ГМ, то их следует параметризовать, рис. 1.99.

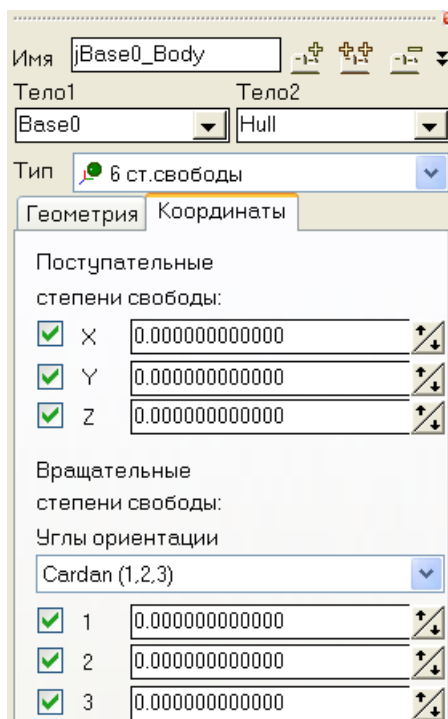


Рис. 1.100. Шарнир, вводящий шесть степеней свободы корпуса относительно СКО

3. Добавить шарнир с шестью степенями свободы, вводящий координаты корпуса относительно СКО, рис. 1.100. Первым телом в шарнире должно быть Base0, вторым – корпус.

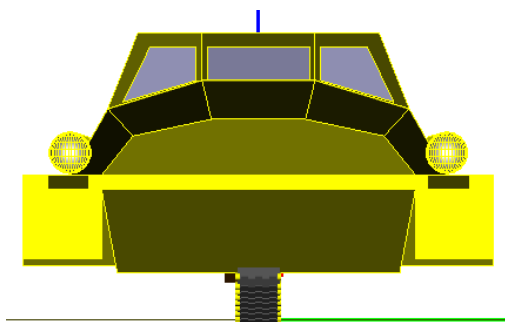


Рис. 1.101. Модель с добавленным корпусом

В результате выполнения этих пунктов к модели добавляется корпус, однако он пока не связан с ходовой частью. Кроме того, ходовая часть модели пока содержит только одну – левую половину, расположенную по центру корпуса, рис. 1.101.

### 1.2.5.2. Назначение связи гусеницы с корпусом

Здесь мы остановимся на случае индивидуальной подвески ГМ.

Для назначения связи кинематических и силовых элементов гусеницы с корпусом следует жестко связать корпус ГМ с *локальным корпусом* гусеницы, см. п. 1.2.1.4.1.1. "Стандартные элементы и идентификаторы блоков подвески", с. 1-11. Основанием для этого является описанная ранее методика, в соответствии с которой кинематические и силовые элементы гусеницы соединяются именно с *локальным корпусом*.

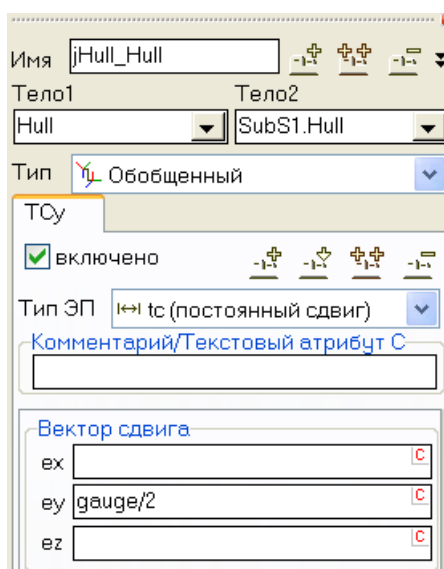


Рис. 1.102. Шарнир, жестко связывающий корпус ГМ с локальным корпусом гусеницы

Для задания жесткой связи корпуса ГМ с локальным корпусом гусеницы следует ввести шарнир с нулевым числом степеней свободы, рис. 1.102:

- добавьте шарнир;
- назначьте первое тело – корпус ГМ, второе – локальный корпус гусеницы; в примере на рис. 1.102 это тела Hull и Subs1.Hull соответственно;
- выберите тип шарнира: **Обобщенный**;
- добавьте элементарное преобразование и назначьте его тип *tc* (постоянный сдвиг);

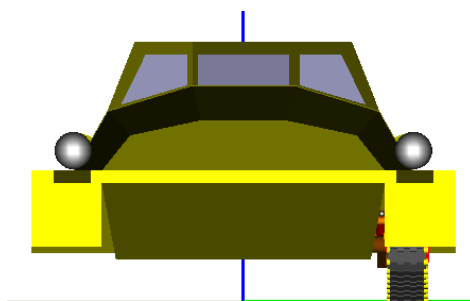


Рис. 1.103. Модель с одной гусеницей

- задайте поперечный сдвиг гусеницы относительно корпуса (половина расстояния между гусеницами) – поле *ey* на рис. 1.102. С этой целью рекомендуется использовать идентификатор ширины колеи со стандартным именем *gauge* (см. п. 1.2.6.2.8. "Действия после добавления трансмиссии с модели ГМ", с. 1-98).

На рис. 1.103 показан результат действий в данном разделе – ГМ с одной гусеницей.

### 1.2.5.3. Добавление второй гусеницы

Для того чтобы завершить формирование модели ходовой части ГМ следует добавить вторую гусеницу. С этой целью

- перейдите к подсистеме – гусенице в инспекторе описания объекта;

- скопируйте подсистему щелчком на кнопке ;

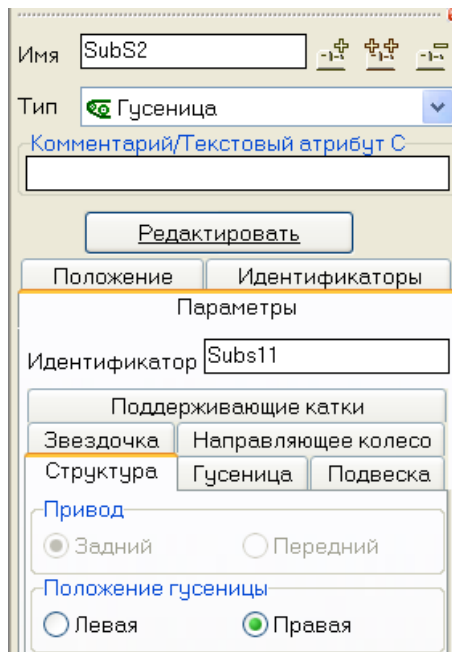


Рис. 1.104. Задание положения гусеницы – правая

- задайте положение гусеницы – правая на вкладке **Положение | Структура**, рис. 1.104;
- скопируйте шарнир, связывающий локальный корпус левой гусеницы с корпусом ГМ;

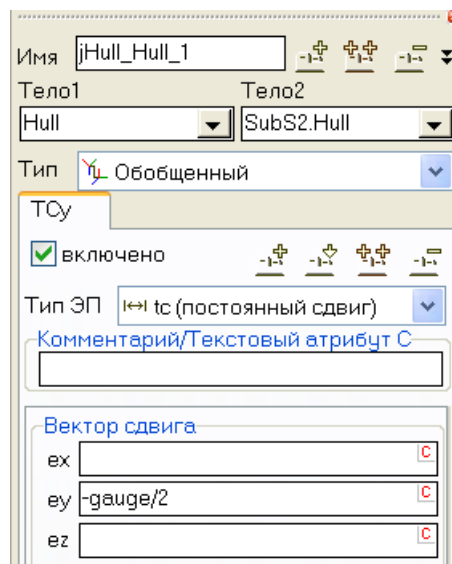


Рис. 1.105. Шарнир, жестко связывающий корпус ГМ с локальным корпусом правой гусеницы

- задайте второе тело – локальный корпус правой гусеницы (Subs2.Hull на рис. 1.105);

- измените знак в сдвиге гусеницы в продольном направлении (поле *ey* на рис. 1.105).

#### 1.2.5.4. Коррекция положения ГМ в вертикальном направлении

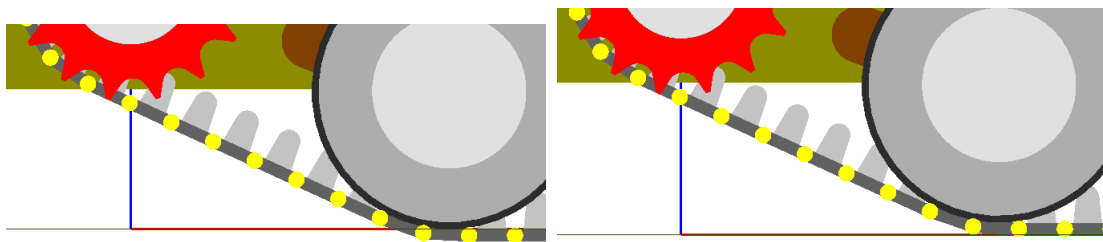


Рис. 1.106. Подъем модели по вертикали

Для того чтобы избежать интенсивных переходных процессов при выполнении первого теста с моделью ГМ, ее надо поднять по вертикали на высоту траков, рис. 1.106.

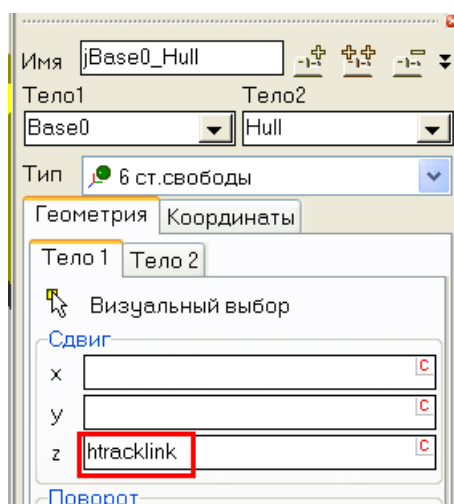


Рис. 1.107. Вертикальный сдвиг ГМ на толщину траков

Чтобы поднять модель ГМ, достаточно перейти к шарниру, определяющему координаты корпуса ГМ относительно СК0, и на вкладке **Геометрия** | **Тело1** задать вертикальный сдвиг с использованием идентификатора *htracklink*, рис. 1.107.

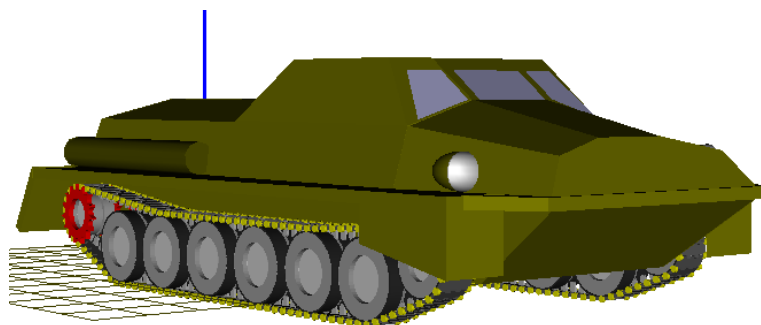


Рис. 1.108. Завершенная модель ходовой части ГМ

Модель ходовой части ГМ построена, рис. 1.108. Теперь, при необходимости, модель может быть дополнена трансмиссией, включающей механизм поворота, п. 1.2.6. *"Модель трансмиссии и механизма поворота"*, с. 1-89.

### 1.2.6. Модель трансмиссии и механизма поворота

Модель трансмиссии ГМ включает двигатель внутреннего сгорания, механизм передачи мощности к ведущему колесу и механизм поворота. Основные элементы трансмиссии описаны в [Главе 22](#) «Моделирование трансмиссии». Здесь мы подробно остановимся на моделях, включенных в базу данных УМ, различающихся по типу механизма поворота.

#### 1.2.6.1. Добавление модели трансмиссии из базы данных

База данных моделей трансмиссии ГМ размещена в папке {Данные УМ}\Caterpillar\Driveline и включает файлы, перечисленные в табл. 1.20. Названия файлов основано на английском наименовании механизма поворота, например, “Clutch – Brake” соответствует системе управления поворота с бортовыми фрикционными, рис. 1.109.

Таблица 1.20

Пункт меню добавления трансмиссии	Файл трансмиссии	Описание модели, п.
Фрикционные муфты	Clutch – Brake.dat	1.2.6.3. <i>"Система управления поворотом с бортовыми фрикционными"</i> , с. 1-100.
Планетарный механизм	Planetary steering.dat	1.2.6.4. <i>"Система управления поворотом с планетарным механизмом"</i> , с. 1-102.
Регулируемый дифференциал	Controlled differential steering.dat	1.2.6.5. <i>"Система управления поворотом с регулируемым дифференциалом"</i> , с. 1-104.
Двойной дифференциал (Майбах)	Maybach double differential.dat	1.2.6.6. <i>"Двойной дифференциал (Майбах)"</i> , с. 1-106.
Двойной дифференциал	Double differential steering.dat	1.2.6.7. <i>"Двойной дифференциал"</i> , с. 1-109.
Двойной дифференциал SU	Double differential steering SU.dat	1.2.6.8. <i>"Двойной дифференциал (SU)"</i> , с. 1-110.
Тройной дифференциал	Triple differential steering.dat	1.2.6.9. <i>"Тройной дифференциал"</i> , с. 1-111.
Бесступенчатый механизм	Double differential steering HSD.dat	1.2.6.10. <i>"Бесступенчатый механизм поворота"</i> , с. 1-112.

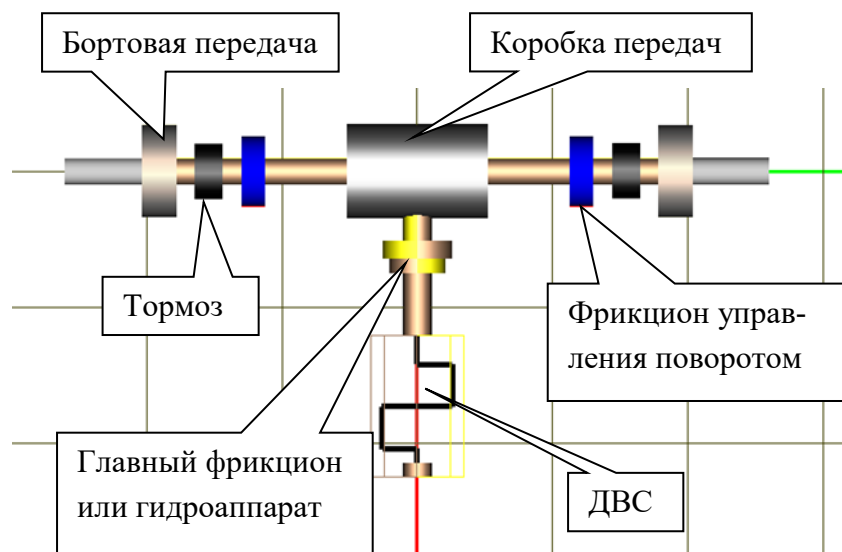


Рис. 1.109. Модель трансмиссии с бортовыми фрикционами

Для добавления стандартной трансмиссии к ГМ следует загрузить ГМ в программе ввода, воспользоваться пунктом основного меню **Инструменты | Добавить механизм трансмиссии** и щелкнуть по пункту меню с нужной моделью, рис. 1.110. После этого к ГМ добавятся элементы, описанные в соответствующем файле, и автоматически будет выполнен ряд действий по установке соответствий параметров ГМ и модели трансмиссии. Соответствие между пунктами меню и файлами моделей трансмиссии установлено в табл. 1.21.

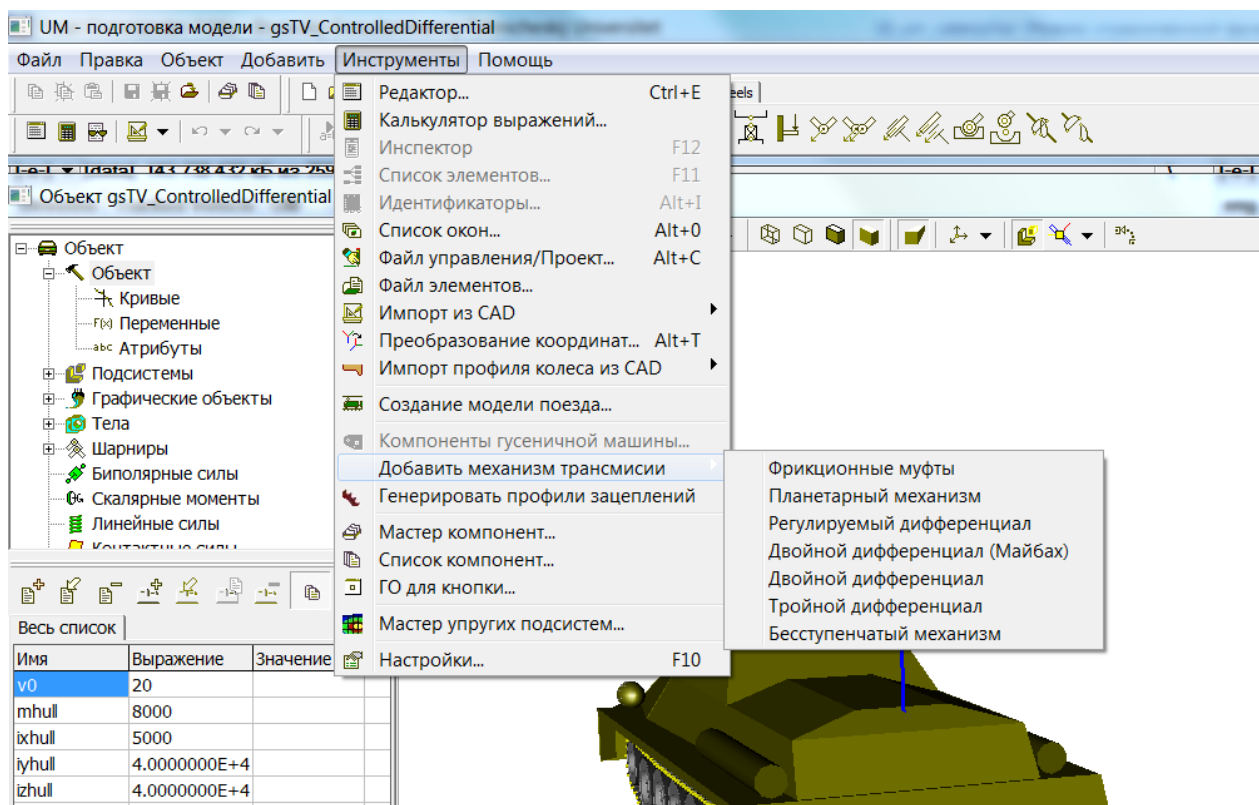


Рис. 1.110. Добавление трансмиссии к модели ГМ

### 1.2.6.2. Общие элементы стандартных моделей трансмиссии

Рассмотрим элементы трансмиссии, представленные во всех моделях базы данных UM. В качестве примера рассмотрим элементы файла Clutch – Brake.dat, содержащего модель системы управления поворота с бортовыми фрикционами.

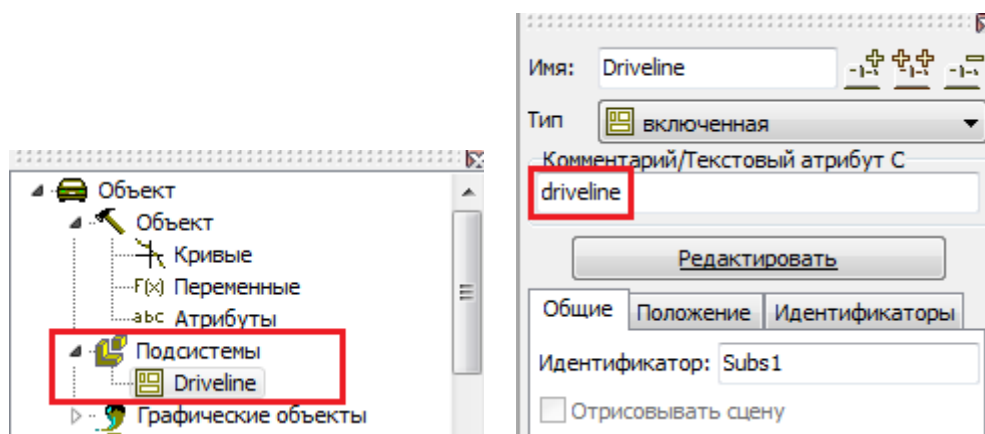


Рис. 1.111. Подсистема с моделью трансмиссии

Файл модели трансмиссии содержит объект, включающий одну подсистему – собственно модель трансмиссии. Подсистема помечается текстовым атрибутом ‘driveline’, рис. 1.111.

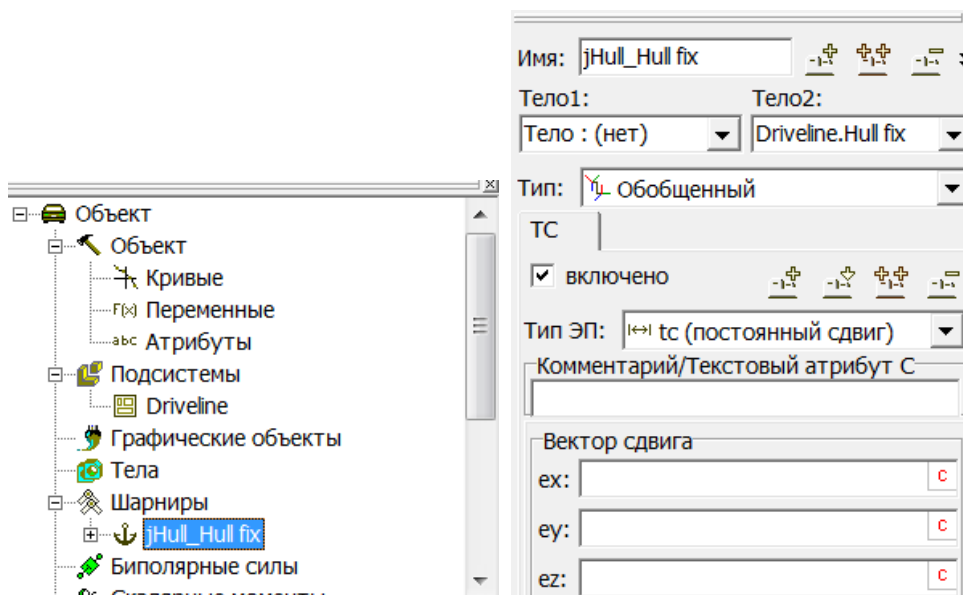


Рис. 1.112. Шарнир для жесткой связи фиктивного тела трансмиссии с корпусом ГМ

Кроме подсистемы трансмиссии объект содержит один шарнир (рис. 1.112), первое тело которого не определено, а второе – фиктивное тело трансмиссии ‘Hull fix’, п. 1.2.6.2.1. "Фиктивное тело трансмиссии", с. 1-92. Шарнир используется для жесткой связи фиктивного тела с корпусом ГМ после добавления трансмиссии к ГМ.

### 1.2.6.2.1. Фиктивное тело трансмиссии

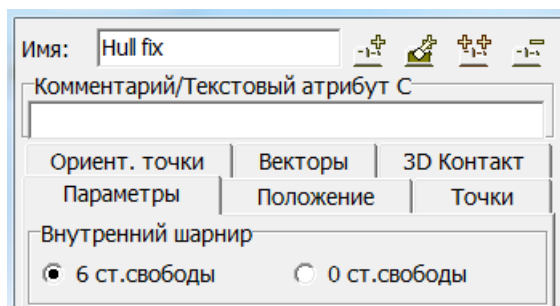



Рис. 1.113. Фиктивное тело

Фиктивное тело в модели трансмиссии водится для того, чтобы описать относительно него все шарниры и силовые элементы, связанные в действительности с корпусом ГМ. При добавлении трансмиссии к ГМ фиктивное тело жестко связывается с корпусом ГМ специальным шарниром, рис. 1.112.

Фиктивное тело имеет нулевые инерционные параметры и внутренний шарнир с шестью степенями свободы (рис. 1.113), который автоматически удаляется после фиксации тела с корпусом ГМ. Обратите внимание, что для создания тела с внутренним шарниром используется кнопка .

1.2.6.2.2. Двигатель внутреннего сгорания

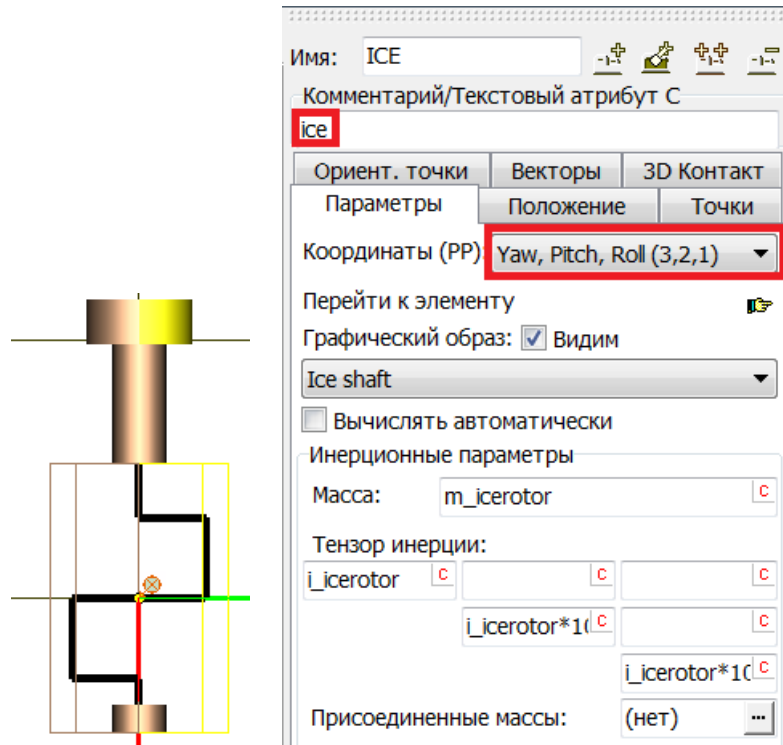


Рис. 1.114. Вал ДВС

Параметры и характеристики ДВС описываются в программе моделирования и подробно документированы в [Главе 22](#) руководства пользователя. В модели двигатель представлен одним телом и одним шарниром.

Тело, упрощенно моделирующее двигатель, учитывает инерционные свойства коленчатого вала, кривошипно-ползунных механизмов и жестко связанных с валом элементов (например, маховика). Инерционные свойства параметризованы. Важно точное задание момента инерции относительно оси вращения, идентификатор `i_icerotor`. Тело должно быть обязательно помечено текстовым атрибутом `ice`, рис. 1.114, по которому программа распознает присутствие ДВС в модели трансмиссии.

Обратите внимание, что телу назначена последовательность вращений (3,2,1) (yaw, pitch, roll – рыскание, тангаж, крен) в списке **Координаты (PP)**. Это связано с тем, что для интегрирования уравнений движения ГМ используется численный метод Park Parallel (PP), и тело может быстро вращаться относительно оси X связанной системы координат. В таких случаях рекомендуется выбирать последовательность углов ориентации, при которой последний поворот осуществляется вокруг оси быстрого вращения или 1 (т.е. X) в данном случае.

Вращательный шарнир вводит вращательную степень свободы для вала двигателя и одновременно задает идентификатор момента в двигателе. Для момента рекомендуется использовать стандартный идентификатор `ice_torque`, рис. 1.115.

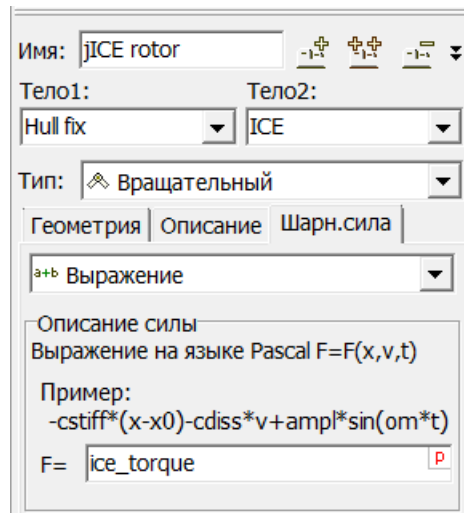


Рис. 1.115. Шарнир, задающий вращение вала и момент

1.2.6.2.3. Передача момента от двигателя: главный фрикцион и гидроаппарат

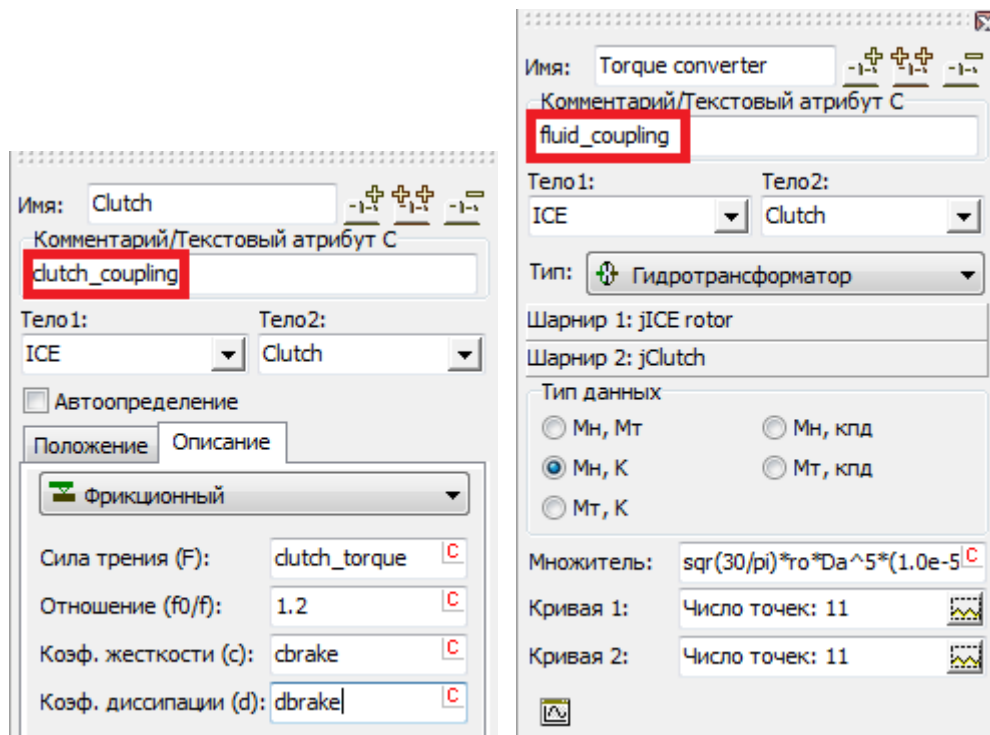


Рис. 1.116. Силовые элементы, моделирующие сцепление и гидроаппарат

Для передачи момента от вала двигателя к коробке передач используется либо сцепление, либо гидроаппарат, рис. 1.116.

**Главный фрикцион** моделируется силовым элементом "скалярный момент" типа "фрикционный". Особенностью модели сцепления является назначение силовому элементу текстового атрибута *clutch\_coupling* и параметризация величины момента трения с помощью идентификатора (по умолчанию – *clutch\_torque*), используемого программой для назначения расчетного значения момента трения в зависимости от положения педали сцепления.

В модель трансмиссии также включен **гидроаппарат** – специальный силовой элемент типа "гидротрансформатор". С целью автоматической идентификации гидроаппарата модели соответствующего силового элемента назначается текстовый атрибута *fluid\_coupling*, рис. 1.116.

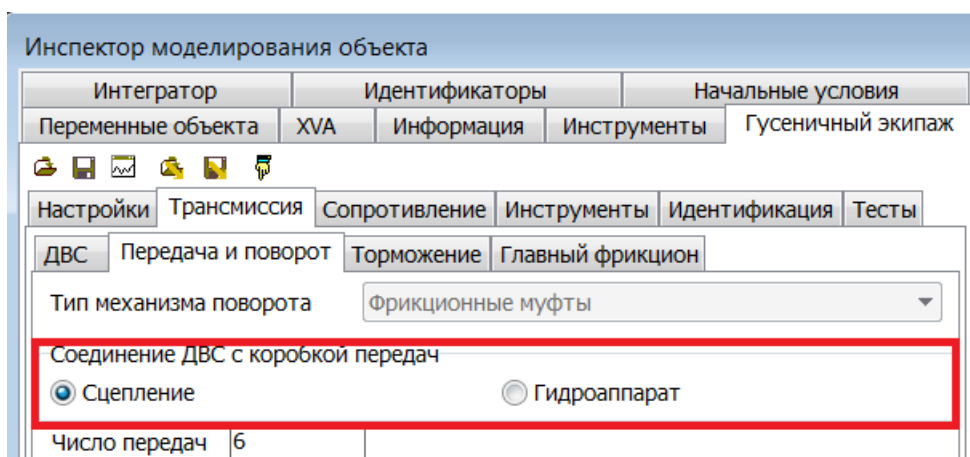


Рис. 1.117. Выбор типа связи двигателя с коробкой передач

Перед началом моделирования пользователь может выбрать один из двух элементов в качестве активного и деактивировать другой, рис. 1.117.

#### 1.2.6.2.4. Коробка передач

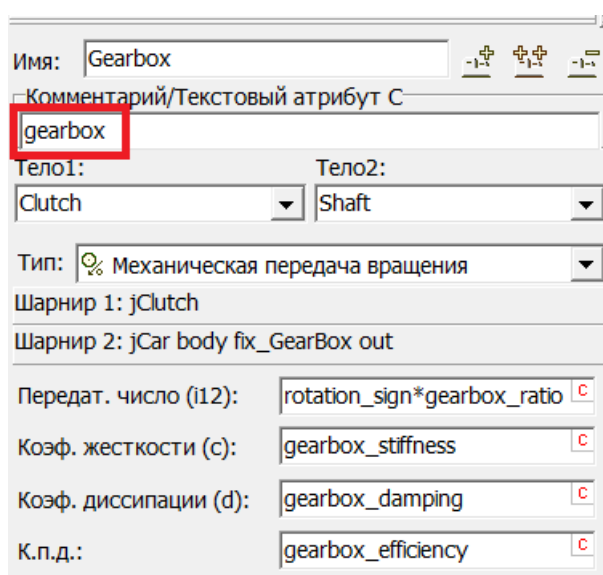


Рис. 1.118. Силовой элемент – модель коробки передач

Коробка передач в упрощенном виде моделируется специальным силовым элементом типа «механическая передача вращения», рис. 1.118.

Для успешной идентификации силового элемента при моделировании трансмиссии используется стандартный текстовый атрибут типа *gearbox*.

Описание силового элемента параметризовано с помощью идентификаторов «по умолчанию»:

- gearbox\_ratio – передаточное число, принимающее нужное значение для каждой ступени передачи,
- gearbox\_stiffness – коэффициент жесткости силового элемента (Нм/рад),
- gearbox\_efficiency – КПД передачи.

Для правильного задания направления вращения выходного вала передачи используется идентификатор – множитель, принимающий значение 1 или -1 – rotation\_sign на рис. 1.118.

#### 1.2.6.2.5. Остановочный тормоз

Остановочный тормоз моделируется двумя шарнирными моментами фрикционного типа, рис. 1.119. Моменты тормозят вращение входящих валов бортовых передач. Для параметризации используется идентификатор brake\_torque (рекомендуемый идентификатор). В случае системы поворота с бортовыми фрикционными остановочными тормозами используются для уменьшения радиуса поворота, причем при правом повороте отключается левый тормоз, а при левом – правый. Для отключения используются идентификаторы turn\_right (равен единице при правом повороте) и turn\_left (равен единице при левом повороте). Соответственно выражения для моментов трения в левом и правом тормозах определяются выражениями

$$brake\_torque*(1-turn\_right),$$

$$brake\_torque*(1-turn\_left).$$

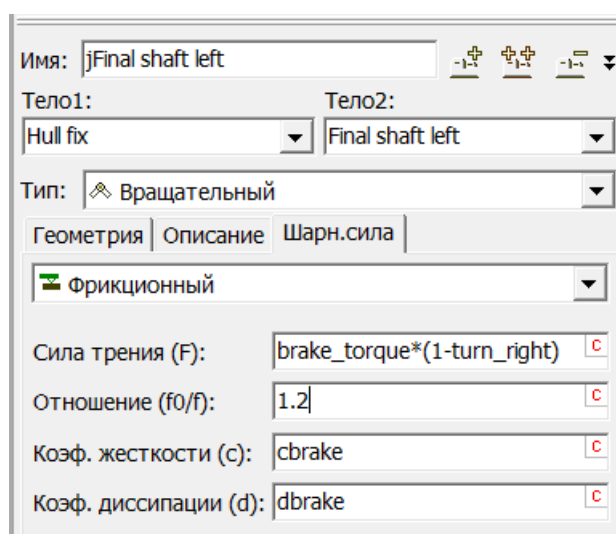


Рис. 1.119. Шарнирный фрикционный момент

#### 1.2.6.2.6. Бортовые передачи

Бортовые передачи моделируются специальными силовыми элементами типа «Механическая передача вращения», рис. 1.120. Особенностью описания элементов является:

- задание внешнего тела в качестве второго тела передачи (External); ведущей колеса назначаются программой автоматически после добавления трансмиссии к ГМ;

- элементы помечаются текстовыми атрибутами *Left sprocket* (левое ведущее колесо) и *Right sprocket* (правое ведущее колесо), что позволяет программе идентифицировать левый и правый элементы;
- параметры элементов заданы идентификаторами.

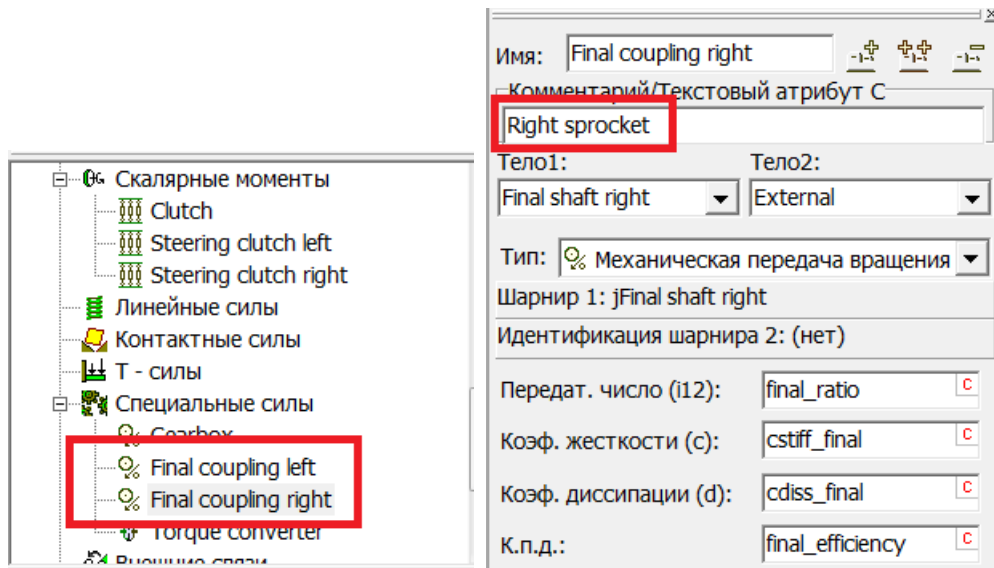


Рис. 1.120. Правая бортовая передача

### 1.2.6.2.7. Идентификаторы

Модель трансмиссии содержит идентификаторы, которые используются для управления процессами. Выделим два типа идентификаторов:

**Управляющие идентификаторы** (рис. 1.121) добавляются к модели ГМ и используются программой непосредственно для управления трансмиссией.

Имя	Выражение
throttle_position	0
gearbox_position	0
clutch_position	0
brake_position	0
steering_brake_left_position	0
steering_brake_right_position	0
turn_factor	0

Рис. 1.121. Управляющие идентификаторы трансмиссии

**Идентификаторы, параметризующие силовые элементы**, также используются программой и пользователем для управления трансмиссией. В основном эти параметры указаны в предыдущих пунктах. Приведем список идентификаторов с указанием целей их введения.

*Gauge* – ширина колеи. Используется для задания геометрических размеров и положения элементов трансмиссии. Позволяет использовать одни и те же модели с ГМ, имеющими различную ширину колеи.

*Gearbox\_ratio* – передаточное число коробки передач. Автоматически изменяется программой после изменения ступени передачи, задаваемой управляющим идентификатором *gearbox\_position*.

*Brake\_torque* – величина тормозного момента. Численное значение назначается программой в зависимости от положения педали тормоза, задаваемой идентификатором *brake\_position*.

*Ice\_torque* – момент на валу двигателя. Автоматически рассчитывается программой в соответствии с моделью ДВС в зависимости от положения педали акселератора, задаваемого идентификатором *throttle\_position*.

*Clutch\_torque* – момент в сцеплении. Используется только при наличии главного фрикциона. Автоматически рассчитывается программой в соответствии с моделью сцепления в зависимости от положения педали сцепления, задаваемого идентификатором *clutch\_position*.

*Sprocket\_front* – идентификатор, принимающий значение 1 соответствует переднеприводным ГМ, а -1 – заднеприводным. Идентификатор используется в стандартных подсистемах трансмиссий для параметризации размещения элементов трансмиссии.

*Turn\_right, turn\_left* – признаки поворота направо или налево.

**Идентификаторы, рассчитывающие текущие значения передаточных отношений трансмиссии** дают программе информацию о связи угловой скорости вращения вала двигателя со скоростью ГМ. Например, эта информация используется для расчета радиусов поворота ГМ.

*Main\_ratio* (км/ч / об/м) – отношение скорости ГМ к числу оборотов двигателя при передаточном отношении коробки передач, равном 1. Например, в случае системы поворота с бортовыми фрикционами идентификатор рассчитывается в соответствии с выражением

$$r\_sprocket/final\_ratio*3.6*pi/30,$$

где *r\_sprocket* – радиус ведущего колеса.

*Transmission\_ratio* (км/ч / об/м) – отношение скорости ГМ к числу оборотов двигателя при текущем значении передаточного отношения коробки передач, т.е.

$$transmission\_ratio=main\_ratio/gearbox\_ratio.$$

*Steer\_ratio* (км/ч / об/м) – отношение величины понижения скорости при повороте к числу оборотов двигателя.

*Steer\_speed\_ratio* – отношение скорости отстающей гусеницы к скорости забегающей при повороте. Например, для механизма поворота типа "Майбах", идентификатор рассчитывается в соответствии с выражением

$$steer\_speed\_ratio=(transmission\_ratio-steer\_ratio)/transmission\_ratio.$$

#### 1.2.6.2.8. Действия после добавления трансмиссии с модели ГМ

При добавлении модели трансмиссии из базы данных к ГМ программа выполняет следующие действия.

1. Назначается тип механизма поворота в зависимости от выбранной модели. Тип используется алгоритмами управления поворота.
2. В подсистему трансмиссии передается значение ширины колеи. Данное действие выполняется, если в подсистеме трансмиссии и модели ГМ одновременно имеются идентификаторы *gauge* (п. 1.2.5.2. "Назначение связи гусеницы с корпусом", с. 1-84, п. 1.2.6.2.7. "Идентификаторы", с. 1-97).

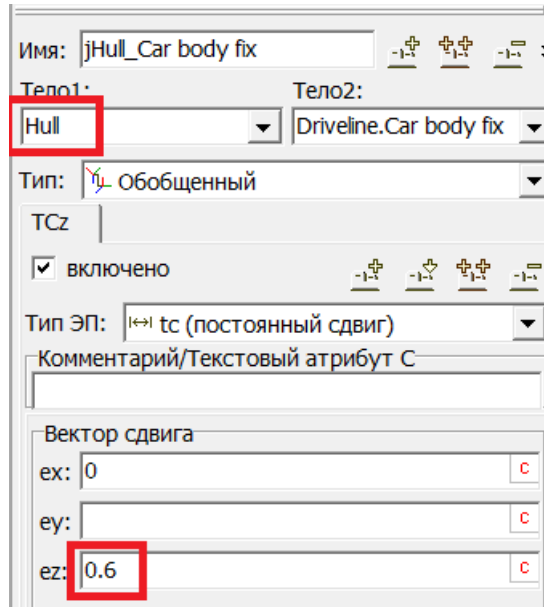


Рис. 1.122. Шарнир, связывающий фиктивное тело с корпусом ГМ

3. Фиктивное тело трансмиссии жестко связывается с корпусом ГМ (п. 1.2.6.2.1. "Фиктивное тело трансмиссии", с. 1-92). При этом в соответствующем шарнире корпус ГМ назначается первым телом (корпусу должен быть назначен текстовый атрибут *Hull*, п. 1.2.5.1. "Добавление корпуса", с. 1-82) и выполняется сдвиг, связанный с положением ведущего колеса, рис. 1.122.
4. В зависимости от положения ведущего колеса назначается значение идентификатора *sprocket\_front*.

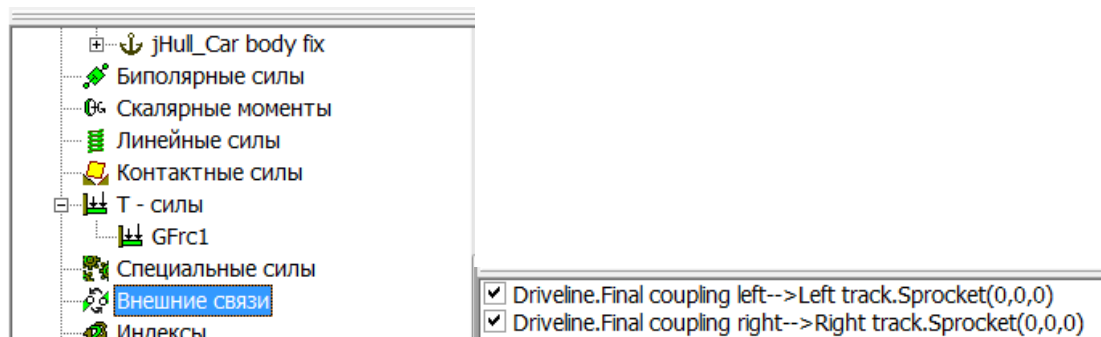


Рис. 1.123. Внешние элементы с назначенными вторыми телами

5. Силовым элементам, моделирующим бортовые передачи, вместо внешних тел автоматически назначаются соответствующие ведущие колеса. Данное действие выполняется, если элементам назначены необходимые текстовые атрибуты, в противном слу-

чае назначение внешних тел на вкладке Внешние связи следует выполнить “вручную”, рис. 1.123.

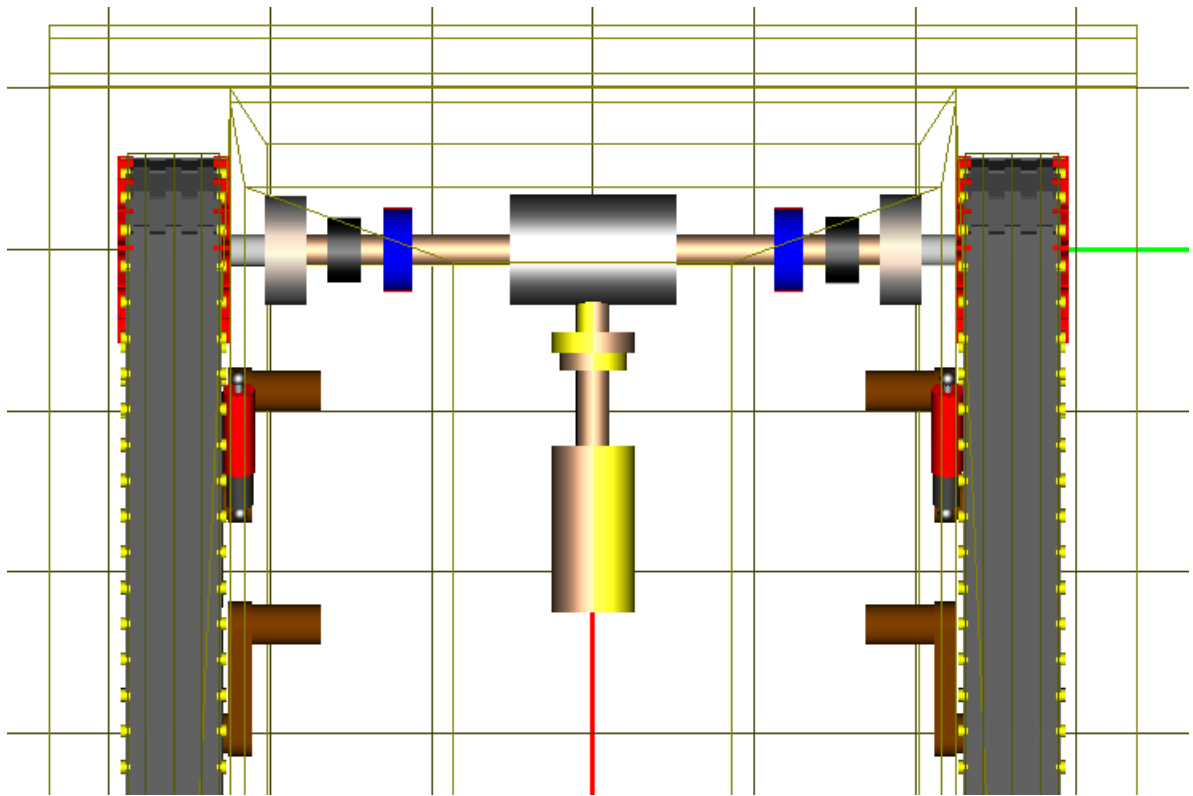


Рис. 1.124. Модель ГМ с трансмиссией

Если все перечисленные действия выполнены корректно, то ГМ с трансмиссией полностью готова к моделированию, рис. 1.124.

### 1.2.6.3. Система управления поворотом с бортовыми фрикционами

Описание работы механизма см. в [4], [5], [6]. Поворот происходит благодаря отключению одного из двух бортовых фрикционов и включения с одной стороны остановочного тормоза для уменьшения радиуса поворота.

Большая часть модели трансмиссии описана в п. 1.2.6.2. "Общие элементы стандартных моделей трансмиссии", с. 1-91. Здесь мы остановимся на моделях бортовых фрикционов.

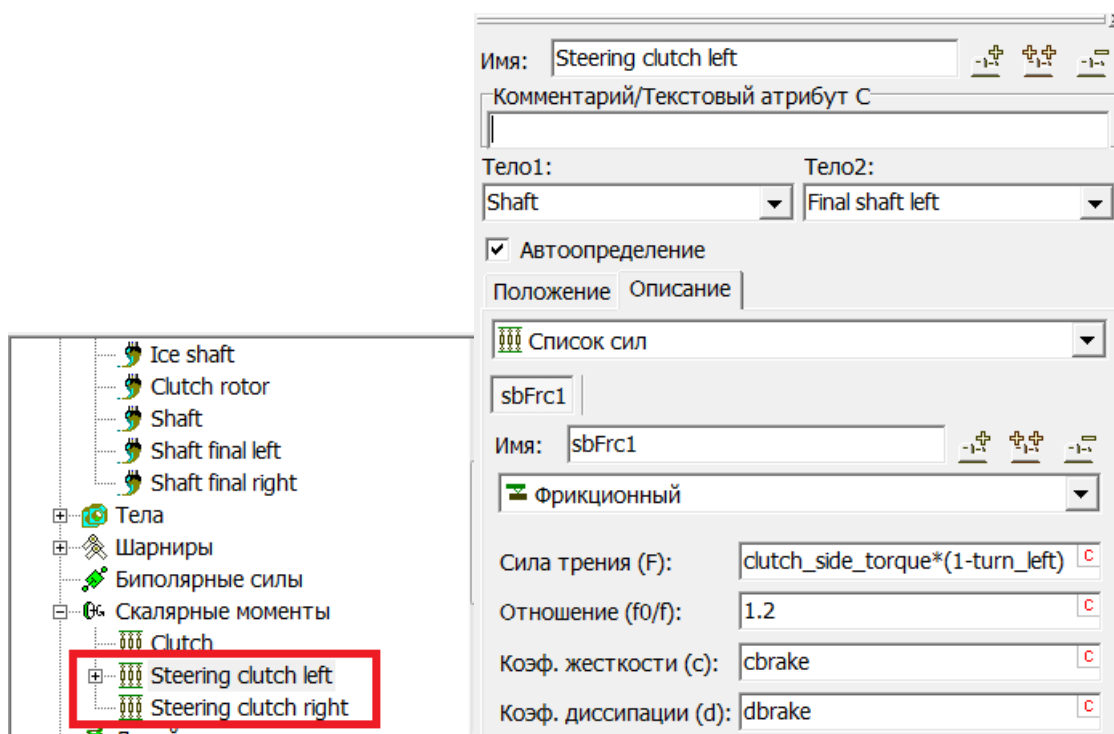


Рис. 1.125. Бортовые фрикционы

Бортовые фрикционы или фрикционные муфты системы управления поворотом ГМ моделируются скалярным моментом фрикционного типа, рис. 1.125. Силовые элементы связывают выходной вал коробки передач (тело Shaft) с входными валами бортовых передач (тела Final shaft left и Final shaft right). Момент трения при включенном фрикционе параметризован идентификатором *clutch\_side\_torque*. Включение и выключение фрикционов осуществляется с помощью идентификаторов *turn\_right* (правый поворот), *turn\_left* (левый поворот), п. 1.2.6.2.7. "Идентификаторы", с. 1-97. При нулевых значения идентификаторов фрикционы включены и происходит прямолинейное движение. При *turn\_right*=1 отключается правый фрикцион для правого поворота, а при *turn\_left*=1 – левый фрикцион.

1.2.6.4. Система управления поворотом с планетарным механизмом

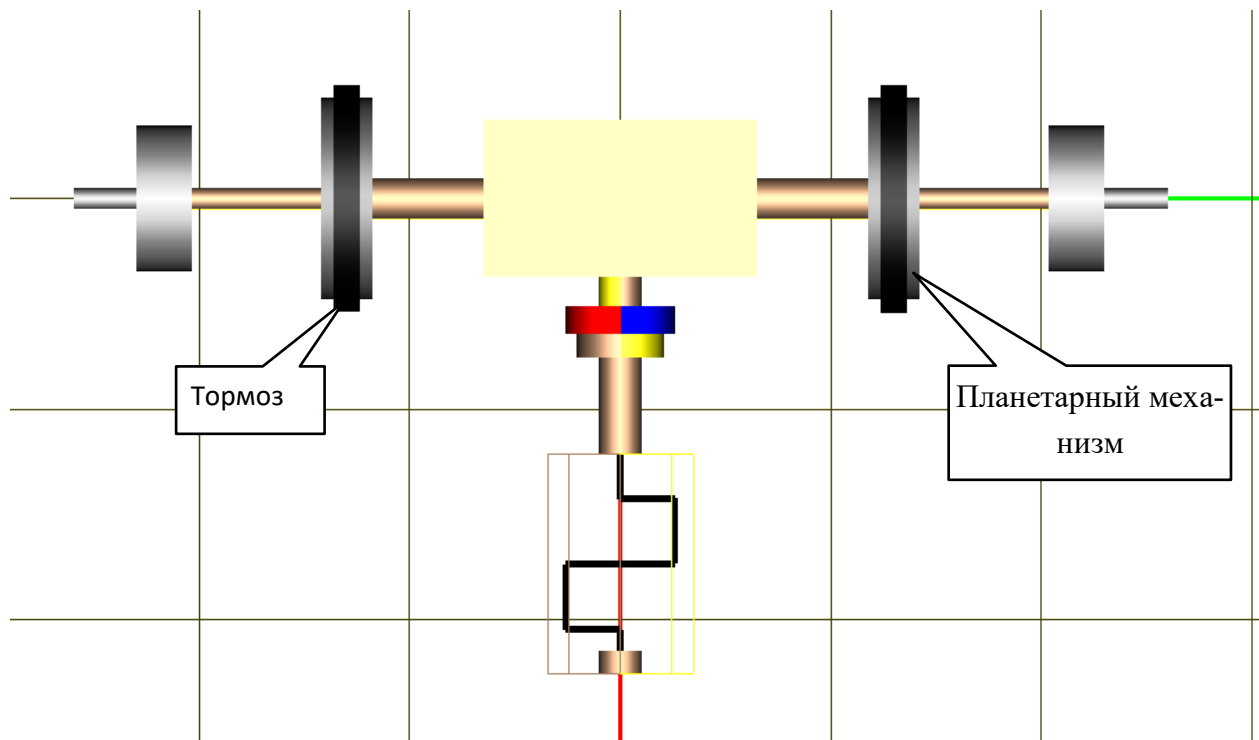


Рис. 1.126. Трансмиссия и система управления поворотом с планетарным механизмом

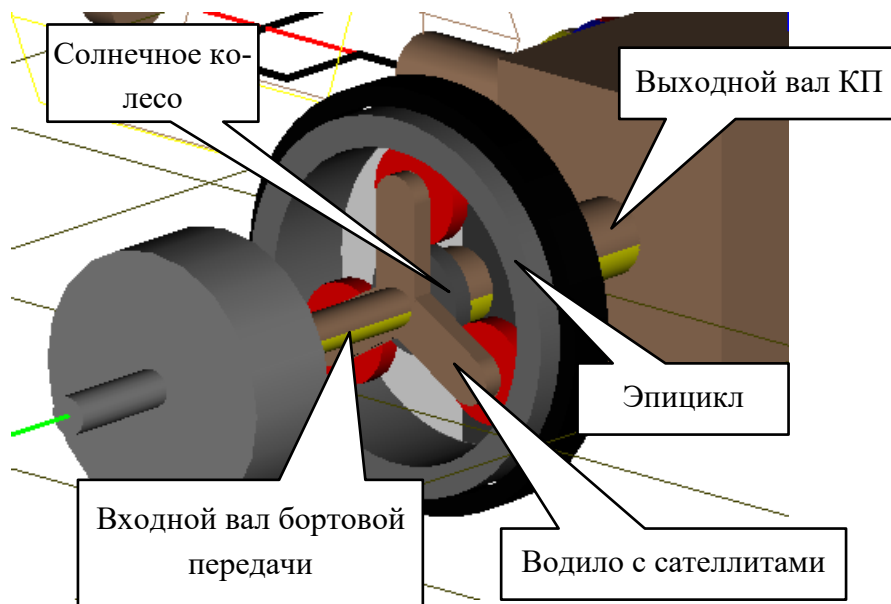


Рис. 1.127. Планетарный механизм поворота

Описание работы механизма см. в [4]. В модели реализованы два планетарных механизма, у которых солнечные шестерни жестко связаны с выходным валом коробки передач (общее тело для этих трех элементов – Output shaft), рис. 1.127. Входной вал бортовой передачи жестко связан с водилом (тела Carrier left и Carrier right).

Два фрикциона во включенном состоянии связывают водило и эпицикл (тела Annulus left и Annulus right) каждого из планетарных механизмов, так что каждый из планетарных механизмов вращаются как твердое тело.

Тормоза останавливают эпициклы планетарных механизмов.

Описание силовых элементов и фрикционов аналогично приведенным в п. 1.2.6.2.5. "Остановочный тормоз", с. 1-96 (тормоза) и 1.2.6.3. "Система управления поворотом с бортовыми фрикционами", с. 1-100 (фрикционы).

При прямолинейном движении фрикционы включены, а тормоза выключены. При повороте фрикцион на отстающей гусенице выключается, а тормоз включается, что приводит к уменьшению скорости вращения водила.

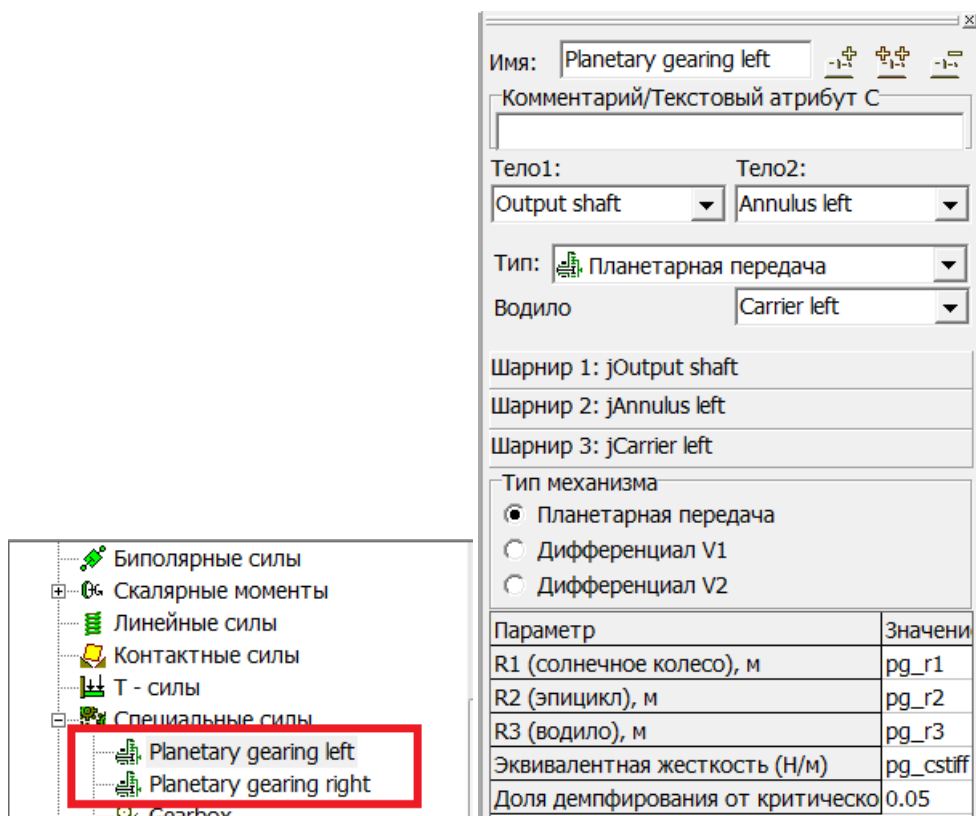


Рис. 1.128. Модель планетарного механизма

Рассмотрим модель планетарной передачи. Для упрощенного моделирования используется специальный силовой элемент типа 'Планетарная передача', рис. 1.128.

Радиусы элементов планетарного механизма параметризованы, что позволяет задать необходимые геометрические размеры передачи. В списке идентификаторов рассчитываются основные передаточные отношения

*annulus\_ratio* – передаточное число механизма при заторможенном солнечном колесе;

*sun\_ratio* – передаточное число механизма при заторможенном эпицикле.

Заметим, что последний идентификатор определяет отношение скорости ведущей звездочки отстающей гусеницы к скорости звездочки забегающей гусеницы – основной параметр кинематики поворота рассматриваемого механизма поворота, см. [4].

1.2.6.5. Система управления поворотом с регулируемым дифференциалом

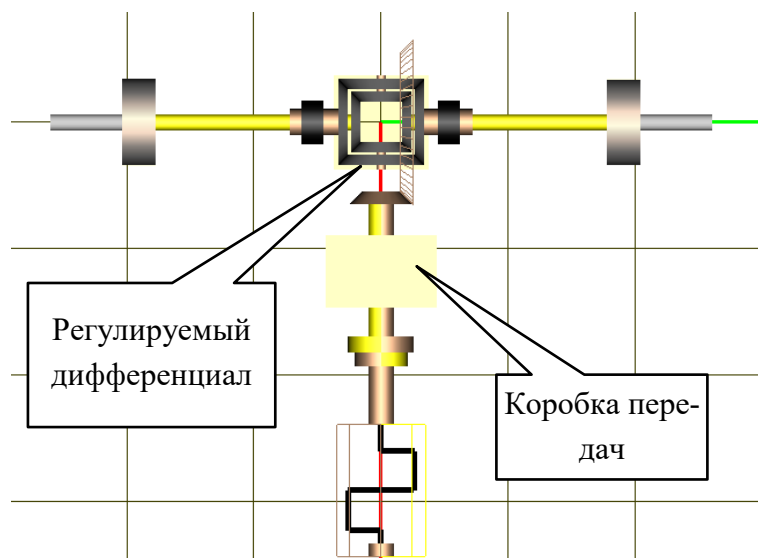


Рис. 1.129. Трансмиссия и система управления поворотом с регулируемым дифференциалом

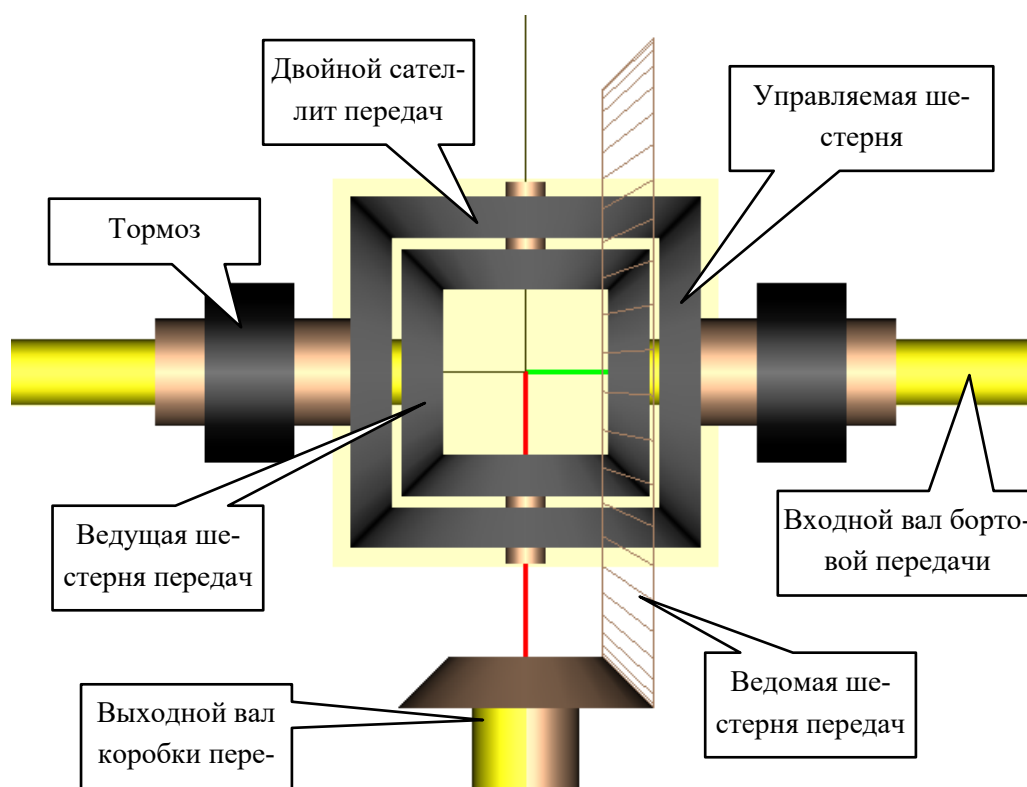


Рис. 1.130. Регулируемый дифференциал

Описание работы механизма см. в [4], [5], [6].

Большая часть модели трансмиссии описана в п. 1.2.6.2. "Общие элементы стандартных моделей трансмиссии", с. 1-91. Остановимся здесь на модели управляемого дифференциала, которая образована семью телами:

*Differential housing* – корпус дифференциала;

Sun wheel left и Sun wheel right – ведущие шестерни и жестко связанные с ними входные валы бортовых передач;

Planet wheel 1 и Planet wheel 2 – два двойных сателлита;

Controlled wheel 1 и Controlled wheel 2 – две управляемые шестерни.

Все перечисленные тела имеют вращательные степени свободы относительно корпуса ГМ, кроме сателлитов, оси вращения которых связаны с корпусом дифференциала.

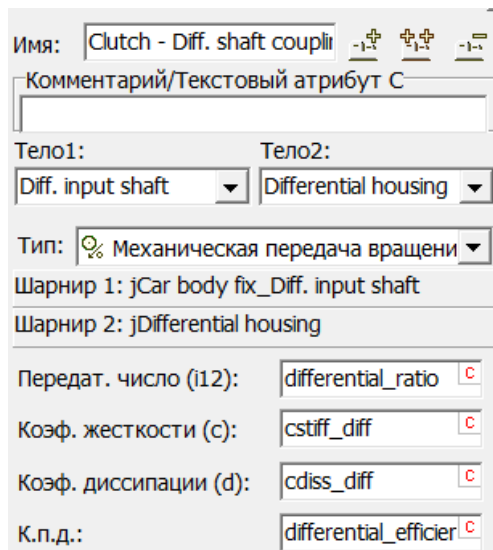


Рис. 1.131. Передача вращения корпусу дифференциала

Специальный силовой элемент типа ‘Механическая передача вращения’ передает вращение от выходного вала коробки передач к корпусу дифференциала. Передаточное число параметризовано идентификатором *differential\_ratio*.

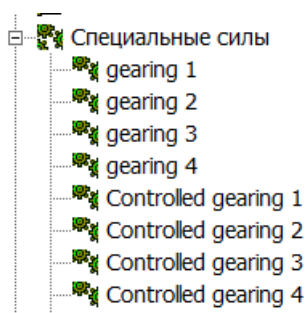


Рис. 1.132. Зубчатые зацепления дифференциала

Восемь конических зубчатых зацеплений с передаточным числом 1 моделируют дифференциал:

Gearing 1: шестерни Sun wheel left и Planet wheel 1;

Gearing 2: шестерни Sun wheel left и Planet wheel 2;

Gearing 3: шестерни Sun wheel right и Planet wheel 1;

Gearing 4: шестерни Sun wheel right и Planet wheel 2;

Controlled gearing 1: шестерни Planet wheel 1 и Controlled wheel 2;

Controlled gearing 2: шестерни Planet wheel 2 и Controlled wheel 2;

Controlled gearing 3: шестерни Planet wheel 1 и Controlled wheel 1;

## Controlled gearing 4: шестерни Planet wheel 2 и Controlled wheel 2.

Управление поворотом осуществляется с помощью тормозов, замедляющих вращение управляемых шестерен вплоть до останова. При прямолинейном движении оба тормоза выключены, и описанный механизм работает как обычный дифференциал. При повороте тормоз на стороне отстающей гусеницы включается и замедляет вращение связанной с ним управляемой шестерни. В результате замедляется вращение ведущей шестерни на стороне тормоза и ускоряется вращение другой ведущей шестерни. При этом скорость продольного движения ГМ не замедляется. При одновременном включении тормозов они работают как остановочный тормоз ГМ. Тормозные моменты описаны в шарнирах, задающих вращение управляемых шестерен относительно корпуса ГМ.

### 1.2.6.6. Двойной дифференциал (Майбах)

Рассматриваемый механизм использовался в немецком танке времен Великой Отечественной войны PzKw V «Пантера», описание можно найти в работах [5], [6].

Основным элементом механизма передачи и поворота являются суммирующие планетарные передачи, эпициклы которых связаны с главным валом передачи (тело *Main shaft*), а водила – с входными валами бортовых передач (тела *Carrier left*, *Carrier right*). Солнечные колеса (тела *Sun wheel left*, *Sun wheel right*) при прямолинейном движении неподвижны и фиксируются тормозами, при этом блокировочные фрикционы (специальные силы *Steering clutch left*, *Steering clutch right*) отключены.

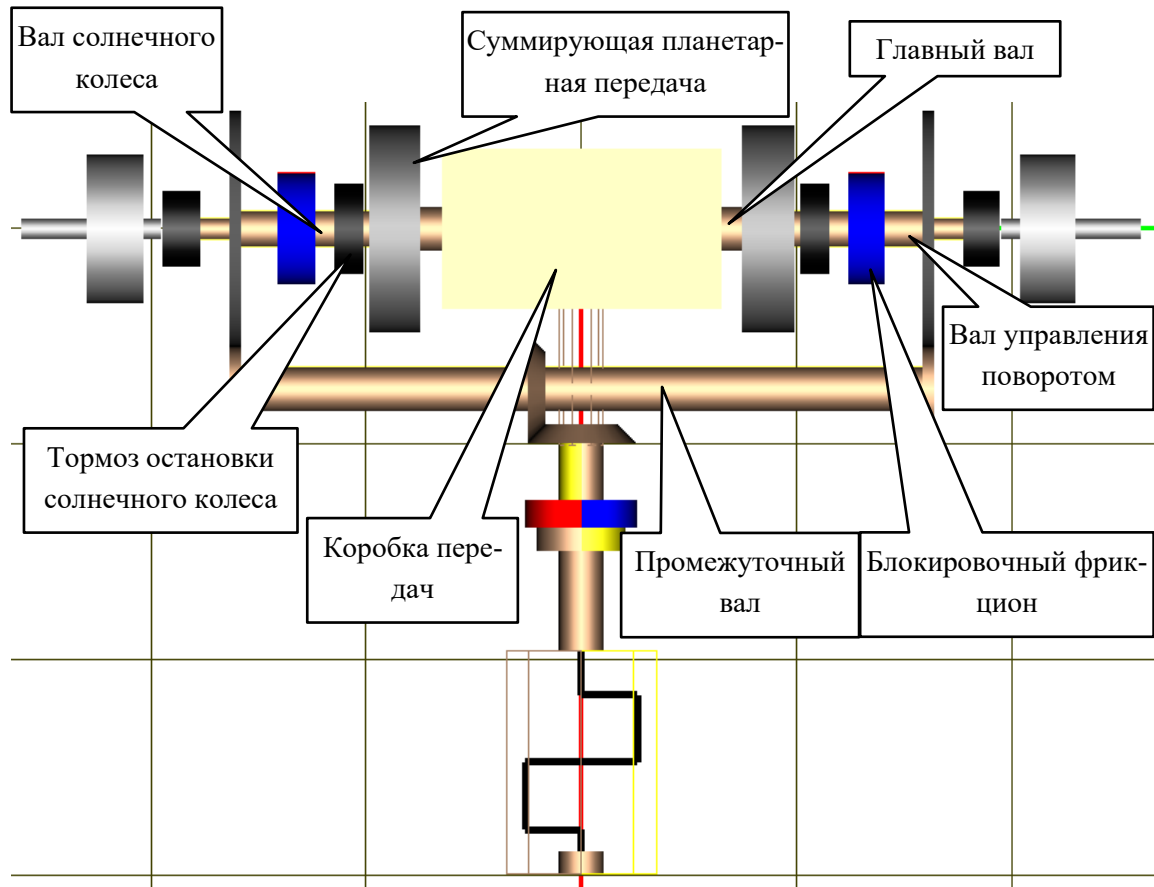


Рис. 1.133. Двухпоточный механизм передачи и поворота 'Майбах'

При повороте включается блокировочный фрикцион на стороне отстающей гусеницы, и соответствующее солнечное колесо планетарной передачи приводится во вращательное движение через цепочку: промежуточный вал (тело *Secondary shaft*) – зубчатое зацепление (*Steer gear left/right*) – вал управления поворотом (тело *Steering shaft left/right*) – блокировочный фрикцион – вал солнечного колеса. Вращение солнечного колеса замедляет водило и, соответственно, отстающую гусеницу. Таким образом, при повороте скорость ГМ снижается.

Рассмотрим силовые элементы модели, опуская стандартные, описанные в п. 1.2.6.2. "*Общие элементы стандартных моделей трансмиссии*", с. 1-91.

*Secondary shaft coupling* – механическая передача вращения с единичным передаточным отношением приводит во вращение промежуточный вал.

*Planetary gearing left/right* – суммирующие планетарные механизмы, элемент аналогичен описанному в п. 1.2.6.4. "*Система управления поворотом с планетарным механизмом*", с. 1-102.

*Steer gear left/right* – зубчатые передачи вращения от промежуточного вала к солнечному колесу при поворотах. Передаточное число параметризовано идентификатором *steering\_ratio*.

*Steering clutch left/right* – скалярные моменты, моделирующие блокировочные фрикционы. Моменты трения заданы выражениями

$$steering\_clutch\_torque * turn\_left,$$

$$steering\_clutch\_torque * turn\_right,$$

где идентификатор *steering\_clutch\_torque* параметризует величину момента включенного фрикциона.

Тормоза остановки солнечных колес описаны как шарнирные моменты во вращательных шарнирах *jSun left/right*. Моменты трения заданы выражениями

$$steering\_brake\_torque * (1 - turn\_left),$$

$$steering\_brake\_torque * (1 - turn\_right),$$

где идентификатор *steering\_brake\_torque* соответствует величине момента трения включенного тормоза.

Выражения для моментов в блокировочных фрикционах и тормозах показывают, что при прямолинейном движении ( $turn\_left = turn\_right = 0$ ) фрикционы отключены, а тормоза включены. При левом повороте ( $turn\_left = 1, turn\_right = 0$ ) включается левый фрикцион и отключается левый тормоз, при правом повороте ( $turn\_left = 0, turn\_right = 1$ ) включается правый фрикцион и отключается правый тормоз.

Обратите внимание, что энергия на главный вал поступает через коробку передач, минуя промежуточный вал.

Приведем два полезных вспомогательных соотношения. Первое соотношение связывает скорость гусеницы и угловую скорость коленчатого вала двигателя при заторможенном солнечном колесе

$$v = \frac{i_a r_s}{i_{fin} i_{gb}} \omega = k_{main} \omega.$$

Здесь  $i_a = \frac{r_2}{(2r_3)}$  (идентификатор *annulus\_ratio*) – передаточное отношение планетарного механизма при заторможенном солнечном колесе,  $r_s$  – радиус ведущего колеса (идентификатор *r\_sprocket*),  $i_{fin}$  – передаточное число бортовой передачи (идентификатор *final\_ratio*),  $i_{gb}$  – передаточное число коробки передач (идентификатор *gearbox\_ratio*). Параметру  $k_{main}$  соответствует идентификатор *transmission\_ratio*, причем в выражении для этого идентификатора учитывается, что скорость измеряется в км/ч, а угловая скорость – в оборотах в минуту:

$$transmission\_ratio = r\_sprocket/gearbox\_ratio/final\_ratio*annulus\_ratio*3.6*pi/30.$$

Второе соотношение связывает скорость гусеницы и угловую скорость коленчатого вала двигателя при заторможенном эпицикле

$$v = \frac{i_s r_s i_{steer}}{i_{fin}} \omega = k_{steer} \omega.$$

Здесь  $i_s = \frac{r_1}{(2r_3)}$  (идентификатор *sun\_ratio*) – передаточное отношение планетарного механизма при заторможенном эпицикле,  $i_{steer}$  – передаточное число зубчатой передачи вращения от промежуточного вала к солнечному колесу (идентификатор *steering\_ratio*). Параметру  $k_{steer}$  соответствует идентификатор *steer\_ratio*, причем в выражении для этого идентификатора учитывается, что скорость измеряется в км/ч, а угловая скорость – в оборотах в минуту:

$$steer\_ratio = r\_sprocket*steering\_ratio/final\_ratio*sun\_ratio*3.6*pi/30.$$

В качестве примера использования введенных параметров приведем связь между скоростями отстающей ( $v_i$ ) и забегающей гусениц ( $v_a$ ) при повороте:

$$v_i = \frac{(k_{main} - k_{steer})}{k_{main}} v_a.$$

В модели для этого отношения используется идентификатор *steer\_speed\_ratio*.

### 1.2.6.7. Двойной дифференциал

Недостатком механизма поворота ‘Майбах’ является снижение скорости ГМ при повороте. Модификация механизма, рассмотренная в данном разделе, позволяет движение с постоянной скоростью, рис. 1.134.

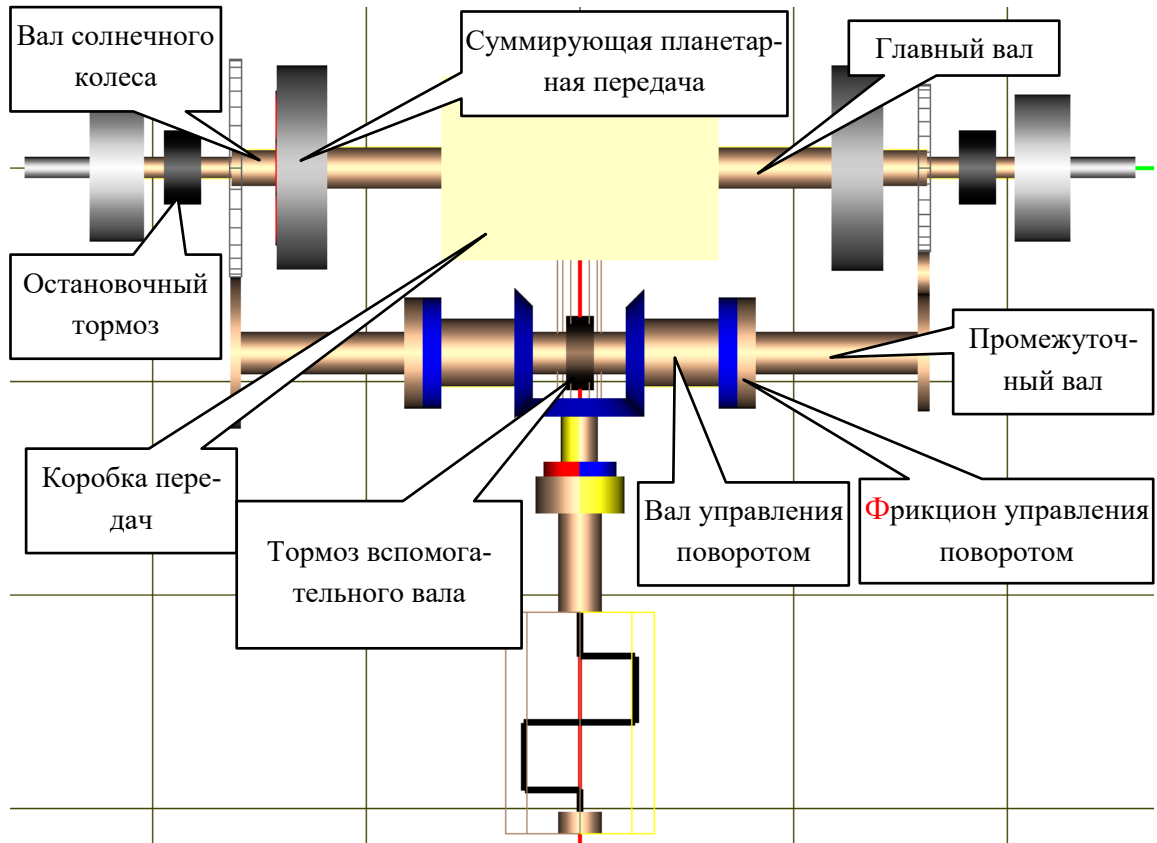


Рис. 1.134. Двухпоточный механизм передачи и поворота с двойным дифференциалом

Промежуточный вал механизма поворота (тело *Secondary shaft*) связан зубчатыми передачами с валами солнечных колес суммирующих планетарных передач. Зубчатые передачи моделируются специальными силовыми элементами *Steer gear left* и *Steer gear right*. Передаточное число параметризовано идентификатором *steering\_ratio*. При прямолинейном движении ГМ промежуточный вал заторможен, а фрикционы управления поворотом (скалярные моменты *Steering clutch left/right*) выключены.

При повороте тормоз вспомогательного вала (фрикционный момент в шарнире *jSecondary shaft*) отключается, а один из фрикционов включается (левый при правом повороте), задавая вращение вала в нужную сторону. При этом валы солнечных колес суммирующих планетарных передач вращаются в разных направлениях, повышая скорость забегающей и понижая скорость отстающей гусениц.

Приведем выражение связи между скоростями отстающей ( $v_i$ ) и забегающей гусениц ( $v_o$ ) при повороте:

$$v_i = \frac{k_{main} - k_{steer}}{k_{main} + k_{steer}} v_0$$

### 1.2.6.8. Двойной дифференциал (SU)

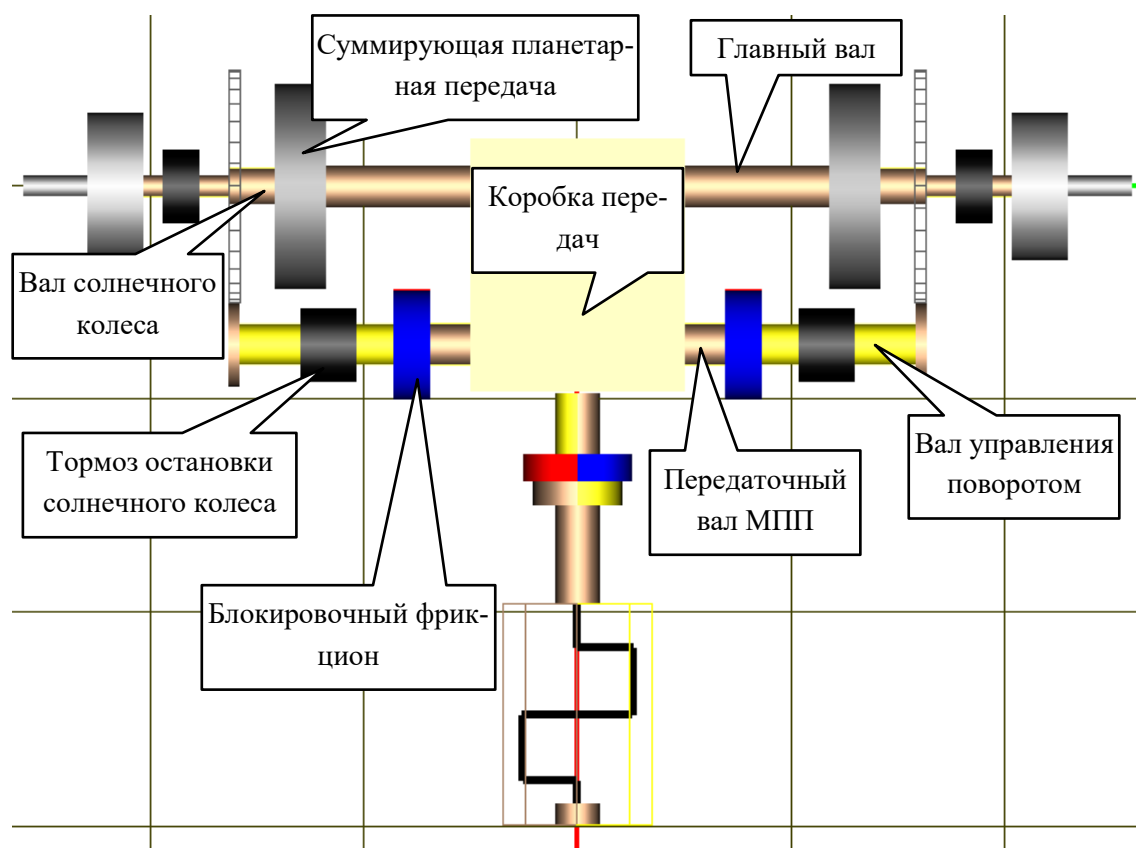


Рис. 1.135. Модифицированный двухпоточный механизм передачи и поворота

В СССР разработана модификация механизма поворота ‘Майбах’, используемая в гусеничных транспортерах – тягачах, см. [1]. Механизм, модель которого изображена на рис. 1.135, содержит те же основные элементы, что и механизм ‘Майбаха’, однако имеются принципиальные отличия.

При прямолинейном движении ГМ блокировочные фрикционы включены, а тормоза солнечных колес – отключены, т.е. вращение ведущих звездочек суммируется планетарной передачей из двух потоков. Коробка передач связывает вращение передаточного вала с главным. Таким образом, передаточный вал разветвляет энергию на два потока, которые суммируются планетарными механизмами на водиле.

Механизм реализует также прямолинейное движение на передачах замедленного ряда, при которых оба блокировочных фрикциона отключены, а тормоза включены, то есть энергия передается гусеницам одним потоком.

При повороте фрикцион на стороне отстающей гусеницы выключается, а соответствующий тормоз – включается, т.е. солнечное колесо останавливается, и скорость гусеницы на данной стороне замедляется. Как и в случае механизма ‘Майбах’, при повороте скорость ГМ снижается.

В отличие от модели ‘Майбах’ тормоза солнечных колес заданы шарнирным моментом в шарнире, задающем вращение валов управления поворотом, рис. 1.135.

Приведем выражение связи между скоростями отстающей ( $v_i$ ) и забегающей гусениц ( $v_o$ ) при повороте:

$$v_i = \frac{k_{main}}{k_{main} + k_{steer}} v_0$$

### 1.2.6.9. Тройной дифференциал

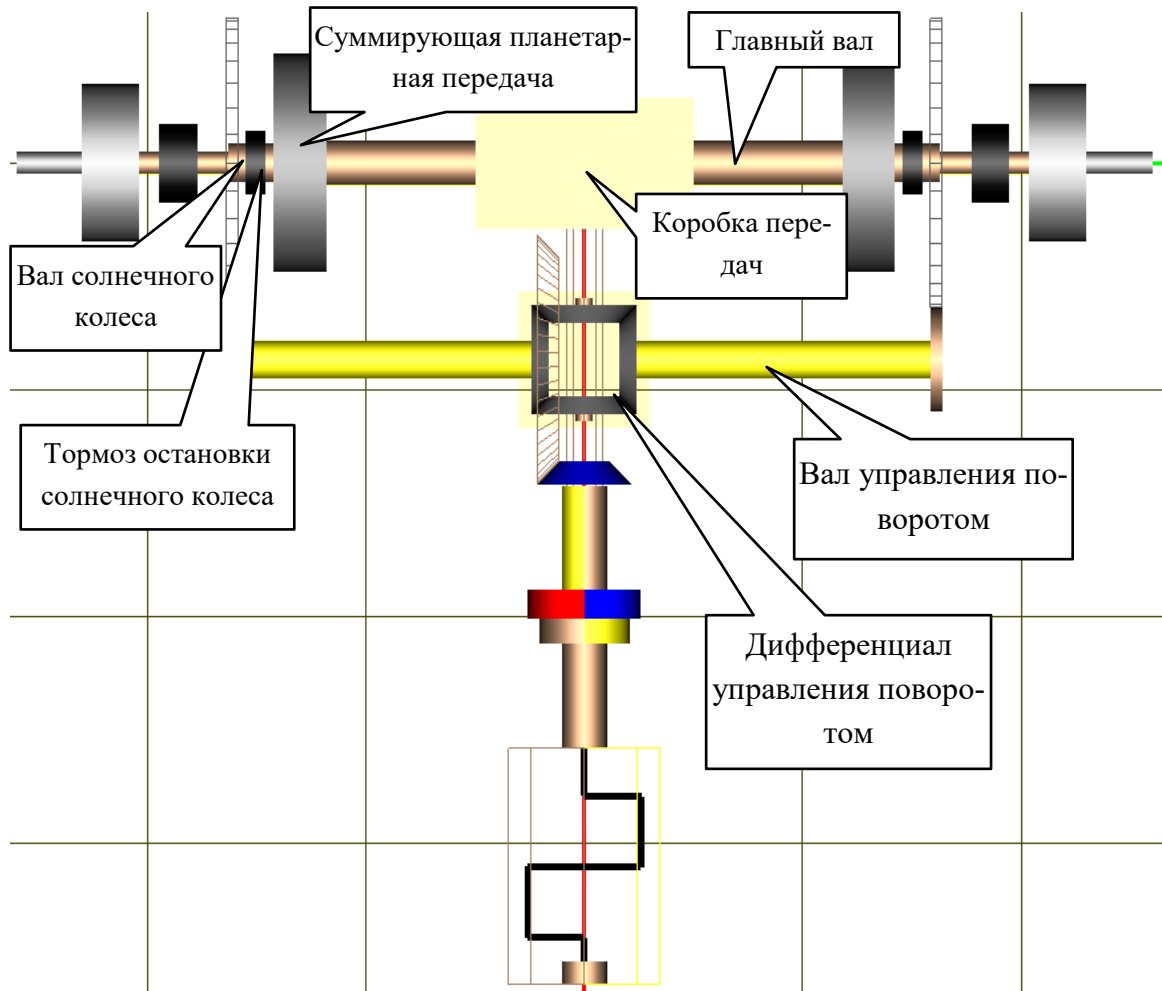


Рис. 1.136. Двухпоточный механизм передачи и поворота с тройным дифференциалом

Данная модификация механизма управления поворотом с двойным дифференциалом, описанного в п. 1.2.6.7. "Двойной дифференциал", с. 1-109, позволяет отказаться от двух фрикционов, заменив их тормозами остановки солнечных колес.

При прямолинейном движении ГМ тормоза солнечных колес отключены. При повороте включается тормоз, соответствующий солнечному колесу со стороны отстающей гусеницы. При этом угловая скорость солнечного колеса со стороны забегающей гусеницы увеличивается благодаря дифференциалу управления поворотом.

1.2.6.10. Бесступенчатый механизм поворота

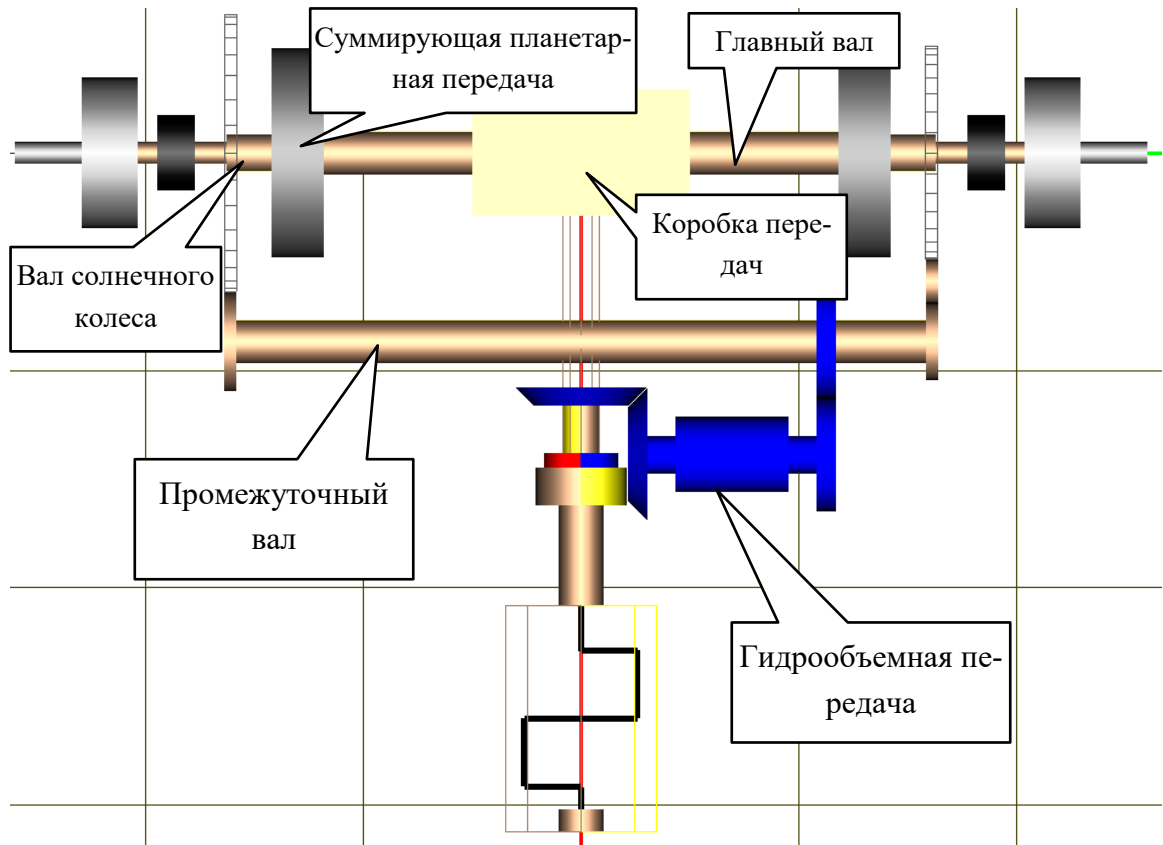


Рис. 1.137. Бесступенчатый механизм поворота

Гидрообъемная передача позволяет задавать поворот ГМ с непрерывным изменением радиуса. Управляющим параметром является нормированный угол поворота шайбы насоса, параметризованный идентификатором *steering\_angle*. Управляющий параметр изменяется в интервале  $[-1,1]$ .

## 1.3. Моделирование динамики ГМ

В данной главе мы остановимся не на общих вопросах моделирования, а только на его особенностях, связанных с динамикой ГМ. *Пользователю рекомендуется ознакомиться с содержанием Главы 4 руководства пользователя “Программа моделирования” для изучения возможностей моделирования динамики и отображения результатов.*

### 1.3.1. Модели силовых взаимодействий

Рассмотрим некоторые особенности внутреннего описания в УМ взаимодействия тел модели ГМ друг с другом и с окружающей средой.

#### 1.3.1.1. Взаимодействие звездочки с цевками

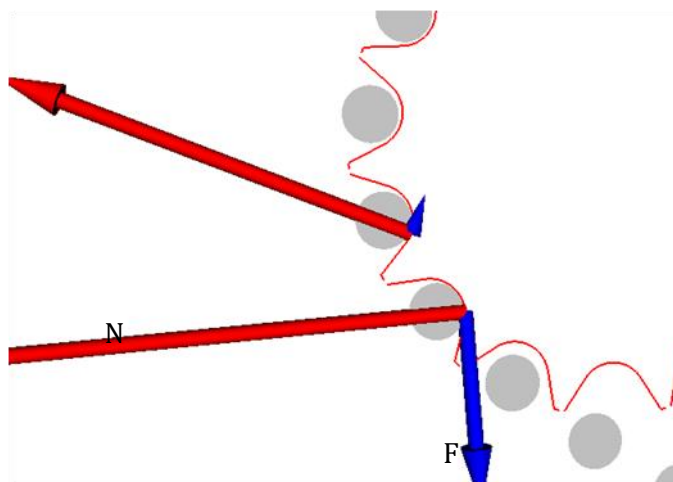


Рис. 1.138. Силы в цевочном зацеплении

Для создания передачи тяговых и тормозных усилий реализованы силы контактного взаимодействия звездочки с цевками. Силы возникают при внедрении профиля цевки в профиль зуба и имеют две составляющие, рис. 1.138: нормальную силу  $\mathbf{N}$  и силу трения  $\mathbf{F}$ . Нормальная составляющая силы линейно зависит от величины и скорости внедрения. Описание математической модели контактных сил можно найти в Главе 2 руководства пользователя, п. *Силовые элементы | Контактные силы | Тип точка-плоскость.*

Коэффициенты контактной жесткости и диссипации, а также коэффициент трения задаются пользователем, см. п. 1.3.4.4.1. *"Параметры контактов гусеницы"*, с. 1-142.

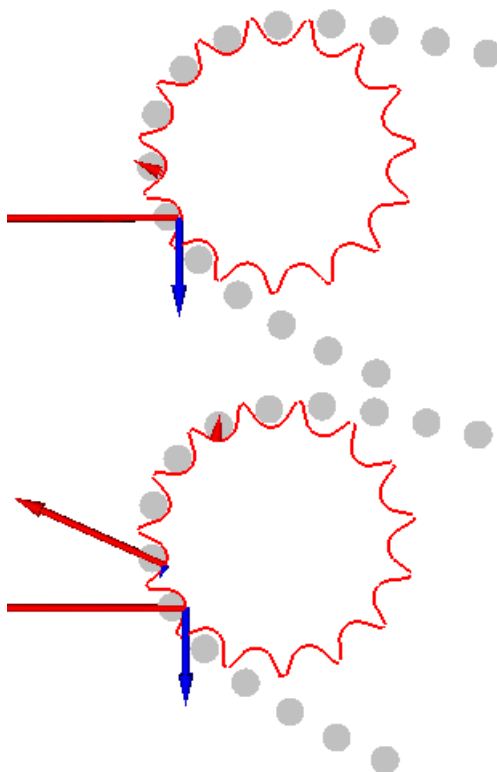


Рис. 1.139. Окно анимации взаимодействия звездочек с цепками

Силы взаимодействия звездочки и цепок отображаются в специальном анимационном окне, рис. 1.139. Для того, чтобы открыть это окно используется команда меню **Инструменты | Контакты звездочек гусеницы**.

При поперечном сдвиге гусеничного звена относительно звездочки, а также при повороте вокруг продольной оси возникают удерживающие силы и момент, модели которых описаны в п. 1.3.1.5. "Удерживающие силы и момент", с. 1-122.

### 1.3.1.2. Взаимодействие звеньев гусеницы с грунтом

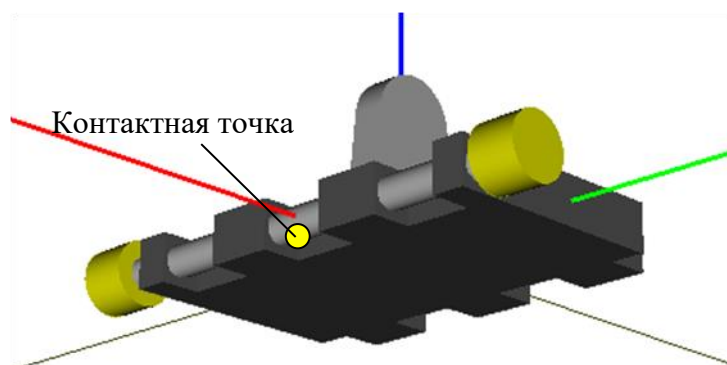


Рис. 1.140. Контактная точка для отдельного звена

В основе модели взаимодействия звеньев гусеничной цепи с грунтом лежит стандартный контактный силовой элемент типа “точка – Z поверхность”. С каждым звеном связывается одна контактная точка, находящаяся в середине переднего ребра прямоугольника, ограничивающего нижнюю поверхность звена, рис. 1.140. Z – поверхность учитывает неровности под каждой из гусениц, что позволяет моделировать движения по неровным поверхностям.

Описание математической модели контактных сил можно найти в [Главе 2](#) руководства пользователя, п. *Силовые элементы | Контактные силы | Тип точка-плоскость (точки – Z поверхность)*.

Предусмотрено два подхода к моделированию грунта: без учета и с учетом просадки.

#### 1.3.1.2.1. Модель грунта без учета просадки

В данном случае используется линейная упруго-диссипативная модель нормальной контактной силы

$$N = -c_g \Delta - d_g \dot{\Delta},$$

где  $\Delta, \dot{\Delta}$  – глубина внедрения контактной точки в поверхность грунта с учетом неровностей и ее производная по времени,  $c_g, d_g$  – коэффициенты жесткости и диссипации грунта. Коэффициент демпфирования задается с помощью доли демпфирования  $\beta_g$  в соответствии с формулой

$$d_g = 2\beta_g \sqrt{c_g m_t},$$

где  $m_t$  – масса трака.

Коэффициенты контактной жесткости и доля демпфирования, а также коэффициент трения задаются пользователем, см. п. 1.3.4.4.1. *"Параметры контактов гусеницы"*, с. 1-142.

Данная модель может быть использована для моделирования поверхностей, не подверженных существенным уплотнениям под воздействием нагрузки (бетон, асфальт и т.д.).

### 1.3.1.2.2. Модель Беккера грунта с учетом просадки

Для моделирования грунтов с учетом просадки вследствие уплотнения используется модель Беккера [7], [4]

$$p = \left( \frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z^n. \quad (1.1)$$

Здесь  $p$  – нормальное давление трака на грунт;  $b$  – минимальный размер пятна контакта (длина трака);  $n$ ,  $k_c$ ,  $k_\varphi$  – параметры модели,  $z$  – просадка грунта.

Для расчета сил трения используется формула Мора-Кулона для максимального напряжения сдвига

$$\tau_{max} = c + p \tan \varphi,$$

где  $c$  – истинная вязкость материала,  $p$  – нормальное давление,  $\varphi$  – угол сопротивления внутреннему сдвигу.

Для расчета текущего значения напряжения сдвига в литературе, посвященной механике грунтов, приводится эмпирическая формула [4]

$$\tau(j, z) = (c + p \tan \varphi) \left( 1 - e^{-\frac{j}{K}} \right),$$

где  $j$  – величина сдвига трака по отношению к положению, при котором он пришел в контакт с грунтом,  $K$  – эмпирическая константа.

В настоящее время в УМ используется несколько упрощенная формула расчета напряжения

$$\tau(j, z) = \begin{cases} \frac{(c + p \tan \varphi)}{K} j, j < j^* \\ \tau_{max}, j < j^* \end{cases}, j^* = \frac{K \tau_{max}}{c + p \tan \varphi}. \quad (1.2)$$

Формула (1.1) справедлива для этапа нагружения грунта. При разгрузке нормальное давление рассчитывается по линейной модели, рис. 1.141.

$$p = p_u - k_u(z - z_u). \quad (1.3)$$

Здесь  $p_u$ ,  $z_u$  – нормальное давление и просадка в момент перехода от режима нагружения к режиму разгрузки,  $k_u$  – коэффициент жесткости зависит от просадки. Коэффициент жесткости растет вместе с  $z_u$  вследствие уплотнения грунта, причем обычно используется линейная модель увеличения жесткости

$$k_u = k_0 + A_u z_u, \quad (1.4)$$

зависящая от двух эмпирических констант  $k_0$ ,  $A_u$ . Заметим, что в области малых просадок зависимость (1.4) дает слишком малое значение коэффициента жесткости. В этих случаях программа автоматически увеличивает жесткость.

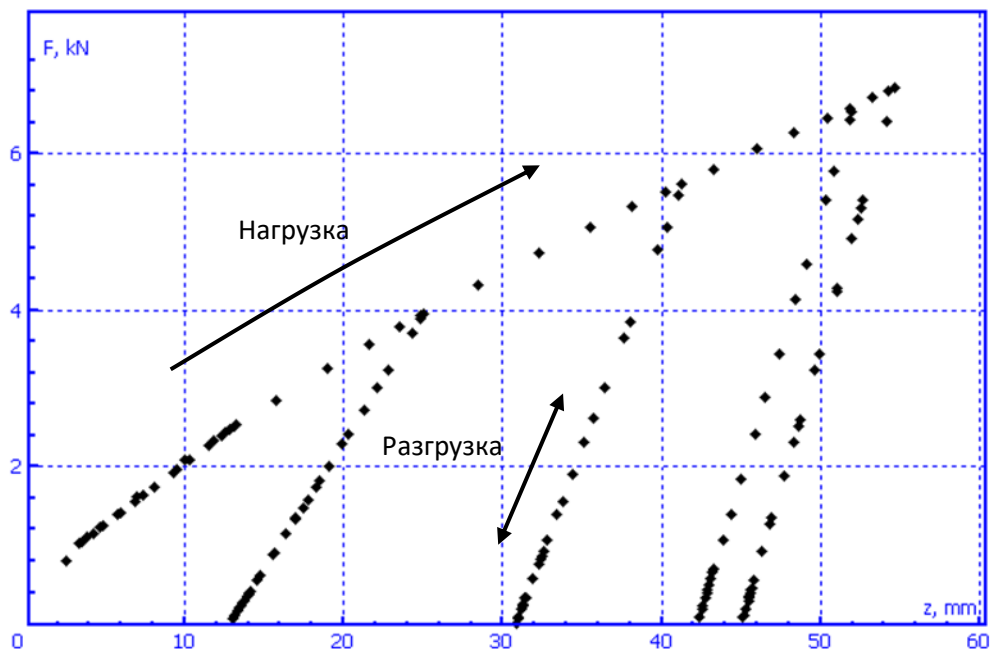


Рис. 1.141. Пример зависимости силы давления трака на грунт от просадки при нагружении и при разгрузении

Для расчета величины нормальной силы и силы трения напряжения умножаются на площадь трака  $S$ ,

$$N = pS, F_{fr} = \tau S.$$

Таким образом, модель взаимодействия трака с грунтом (1.1)-(1.4) определяется восьмью эмпирическими параметрами

$$n, k_c, k_\varphi, c, \varphi, K, k_0, A_u,$$

которые зависят от типа и состава грунта, влажности, температуры и т.д. Данные параметры определяются с помощью экспериментальных полевых исследований. Работы [7], [4] содержат более пятидесяти примеров значения параметров, которые могут использоваться на практике. В базу данных УМ включена таблица параметров грунтов из работы [4]. Несколько характеристик грунта из базы данных представлены на рис. 1.142.

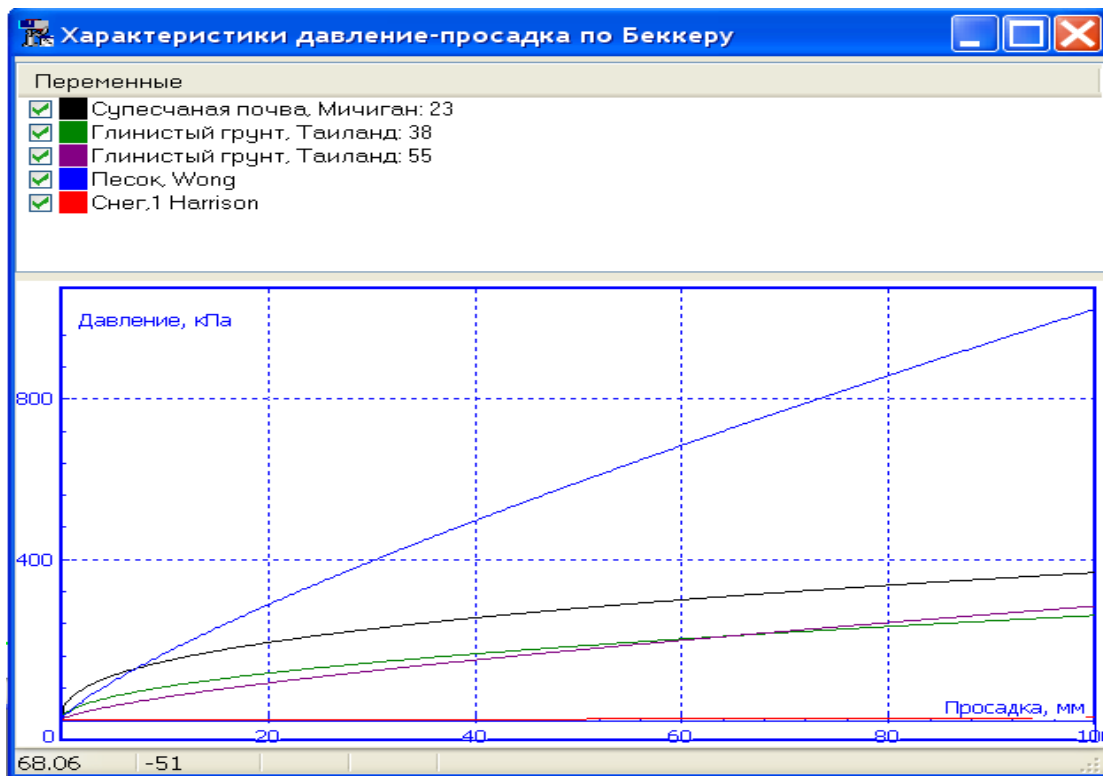


Рис. 1.142. Зависимость давления от просадки

### 1.3.1.3. Качение катков по звеньям гусеничной цепи

При качении опорных катков, направляющего колеса и роликов по гусеничной цепи учитываются следующие силы:

- нормальные реакции;
- силы трения;
- удерживающие силы в поперечном направлении;
- удерживающие моменты при перекосах.

1.3.1.4. Нормальные силы взаимодействия катка с гусеницей

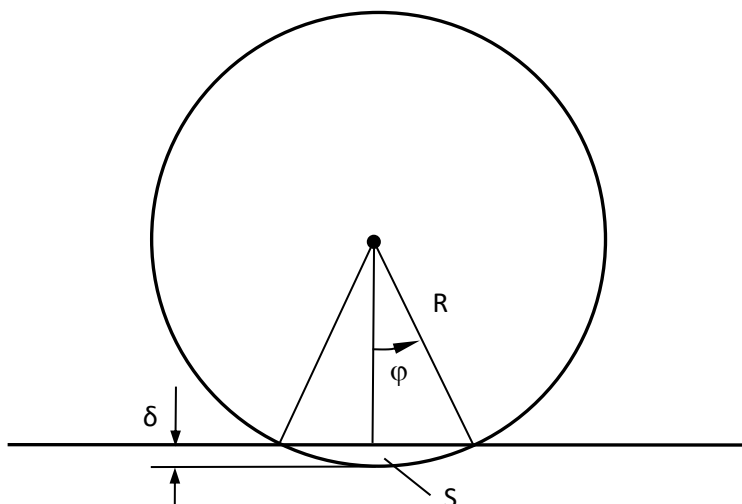


Рис. 1.143. Схема условного внедрения колеса в плоскость

Рассмотрим сначала модель взаимодействия упругого колеса с плоскостью. Основное предположение: сила контакта пропорциональна площади внедрения «жесткого контура колеса» в плоскость при вертикальном смещении центра колеса на величину внедрения  $\delta$ , рис. 1.143.

$$F = \kappa S, \tag{1.5}$$

где  $\kappa$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий упругие свойства колеса, а  $S$  – площадь внедрения. Выразим площадь внедрения через величину внедрения  $\delta$  и угол  $\varphi$

$$S = \frac{2}{3} R^2 \varphi^3, \varphi = \sqrt{\frac{2\delta}{R}}. \tag{1.6}$$

Подставляя соотношения (1.6) в формулу (1.5), получим зависимость силы от внедрения

$$F = \frac{2}{3} \kappa R^2 \varphi^3 = \frac{4}{3} \kappa \sqrt{2R} \delta^{\frac{3}{2}}.$$

Заметим, что полученная зависимость имеет ту же степень, что в известной формуле герцевского контакта двух полупространств. Это является обоснованием корректности основного предположения.

Выведем зависимость коэффициент жесткости от внедрения, вычисляя производную от силы по внедрению

$$c(\delta) = \frac{dF}{d\delta} = 2\kappa R^2 \varphi^2 \frac{d\varphi}{d\delta} = 2\kappa R \varphi = 2\kappa \sqrt{2R\delta}.$$

Полученные зависимости позволяют легко определить параметры модели по заданному значению коэффициента жесткости  $c$  при заданной (например, статической) нагрузке  $P$  или по заданному прогибу  $\delta_0$  под нагрузкой  $P$

$$\delta_0 = \frac{3P}{2c}, \kappa = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c^3}{3PR}} \quad (1.7)$$

Приведем также преобразованные зависимости силы и переменного коэффициента жесткости

$$F = P \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right)^{\frac{3}{2}}, c(\delta) = \frac{dF}{d\delta} = c \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Полученные соотношения следует обобщить на случай контакта колеса с многозвеном (ломаной линией), которые моделирует гусеничную цепь.

Примем следующее основное допущение: нормальная сила перпендикулярна отдельному отрезку ломаной линии (звену цепи) и пропорциональна площади внедренной окружности под отрезком.

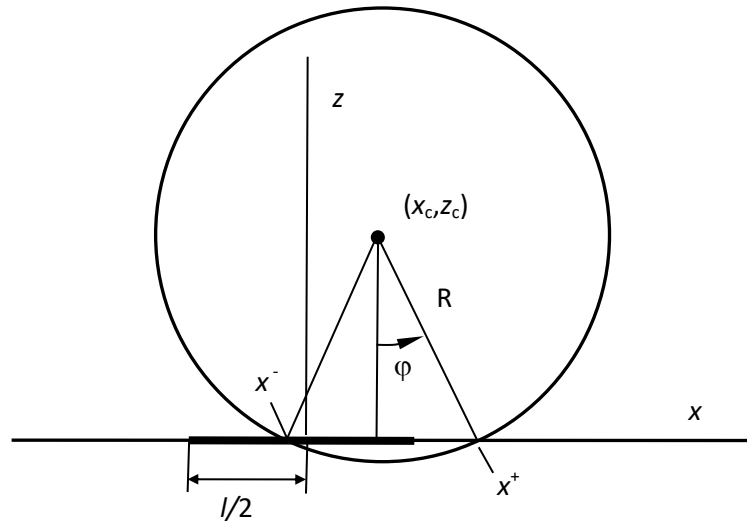


Рис. 1.144. Схема внедрения колеса и отдельного звена цепи

В системе координат, связанной с отдельным звеном, имеем (рис. 1.144)

$$x^\pm = x_c \pm R \sin \varphi.$$

Поэтому условия существования контакта приобретают следующий вид (одновременное выполнение двух условий):

$$\left\{ x^- < \frac{1}{2} \right\} \cap \left\{ x^+ > -\frac{1}{2} \right\}.$$

Силу и момент лучше определять в СК, начало отсчета которой находится под центром окружности.

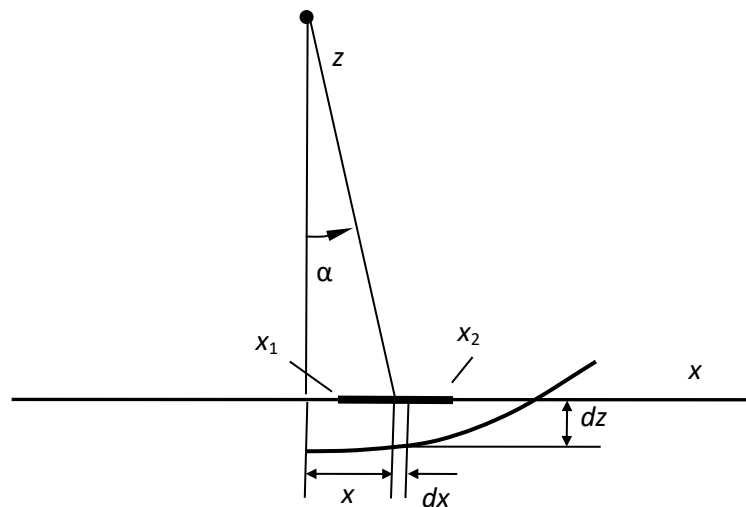


Рис. 1.145. Расчетная схема для определения площади внедрения колеса для отдельного звена

Используя уравнение окружности, получим формулу для внедрения в зависимости от продольной координаты

$$dz = \left| R - \delta - \sqrt{R^2 - x^2} \right| \approx \left| R - \delta - R \left( 1 - \frac{x^2}{2R^2} \right) \right| = \delta - \frac{x^2}{2R}.$$

Сила определится по формуле

$$dF = \kappa dx dz,$$

$$F = \kappa \int_{x_1}^{x_2} \left( \delta - \frac{x^2}{2R} \right) dx = \kappa \left( \delta x - \frac{x^3}{6R} \right) \Big|_{x_1}^{x_2}$$

при этом границы интервала интегрирования определяются условиями

$$x_1 = \max \left\{ -b, -\frac{1}{2} - x_c \right\}, x_2 = \min \left\{ b, \frac{1}{2} - x_c \right\},$$

$$b = \sqrt{2R\delta}.$$

Проверка: при  $-x_1 = x_2 = b$  имеем формулу силы, полученную выше при опирании на плоскость.

Для расчета точки приложения равнодействующей силы следует вычислить момент сил относительно начала отсчета

$$dM = x dF = \kappa x dx dz,$$

$$M = \kappa \int_{x_1}^{x_2} \left( \delta x - \frac{x^3}{2R} \right) dx = \kappa \left( \frac{\delta x^2}{2} - \frac{x^4}{8R} \right) \Big|_{x_1}^{x_2}$$

Теперь по отношению величин момента и силы найдем координату приложения равнодействующей распределенной нагрузки

$$x^* = \frac{M}{F} + x_c.$$

### 1.3.1.5. Удерживающие силы и момент

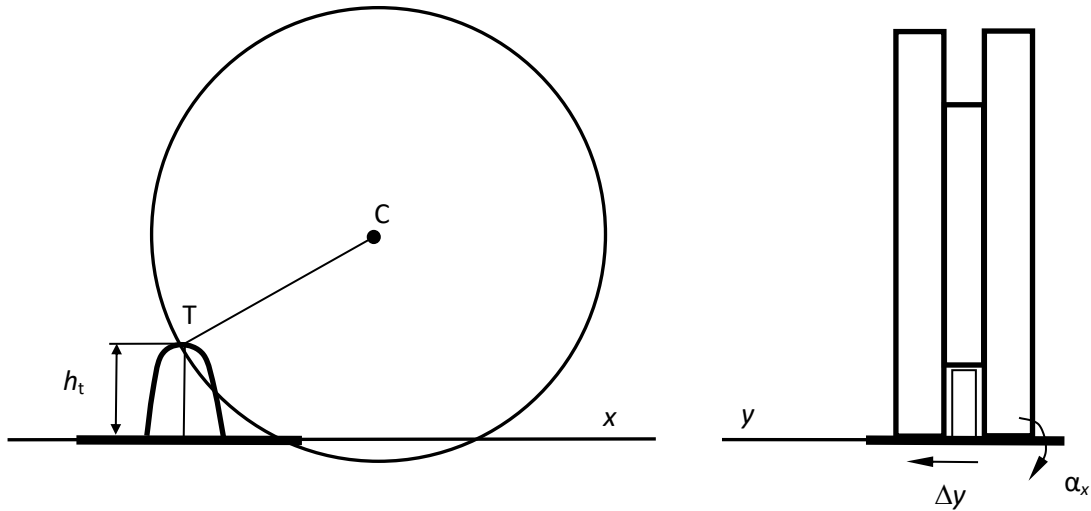


Рис. 1.146. Расчетная схема для определения удерживающей силы и момента

Для удержания гусеницы от поперечного смещения относительно катков и от перекоса вокруг оси продольного движения вводятся поперечная сила и момент вокруг продольной оси звена, рассчитываемые в системе координат звена по формулам (силы действуют на звено)

$$\begin{aligned} F_y &= -c_y \Delta y - d_y \Delta \dot{y}, \\ M_x &= -c_{ax} \alpha_x - d_{ax} \omega_x. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Здесь  $\Delta y$  – смещение звена относительно колеса в поперечном направлении,  $\alpha_x, \omega_x$  – угол поворота и угловая скорость звена относительно плоскости колеса в продольном направлении (рис. 1.146);  $c_y, d_y$  – коэффициенты жесткости и диссипации взаимодействия в поперечном направлении,  $c_{ax}, d_{ax}$  – коэффициенты угловой жесткости и диссипации.

Условием возникновения силы и момента является вход в контакт гребня звена с катком, выражаемый условием

$$TC < R,$$

где  $T$  – верхняя точка гребня звена, положение которой задается высотой гребня  $h_t$ , рис. 1.146,  $R$  – радиус колеса.

Пользователь задает следующие параметры, определяющие модель сил: коэффициент жесткости  $c_y$ , долю демпфирования  $\beta_y$ , высоту гребня  $h_t$  (см. п. 1.3.4.4.1. "Параметры контактов гусеницы", с. 1-142). Остальные параметры рассчитываются автоматически по формулам

$$d_y = 2\beta_y \sqrt{m_l c_y}, c_{ax} = c_y l^2, d_{ax} = 2\beta_y \sqrt{J_{lx} c_{ay}},$$

где  $m_l, l, J_{lx}$  – масса трака, его длина и момент инерции относительно продольной оси.

### 1.3.1.6. Блокирующие сила и момент в горизонтальной плоскости

В ряде тестов, в которых ГМ неподвижна в продольном направлении, используется модель линейной упруго-диссипативной силы, приложенной к центру масс корпуса ГМ и препятствующей ее движению в горизонтальной плоскости и аналогичный момент, блокирующий разворот вокруг вертикальной оси

$$\begin{aligned} F_x &= -c_{xy}\Delta x - d_{xy}\Delta\dot{x}, \\ F_y &= -c_{xy}\Delta y - d_{xy}\Delta\dot{y}, \\ M_z &= -c_{xy}\gamma - d_{xy}\dot{\gamma}, \\ d_{xy} &= 2\beta_{xy}\sqrt{m_h c_{xy}}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Здесь  $\Delta x, \Delta y$  – смещение центра масс корпуса ГМ в продольном и поперечном направлениях,  $\gamma$  – поворот кузова вокруг вертикальной оси;  $c_{xy}, d_{xy}$  – коэффициенты жесткости и диссипации,  $\beta_{xy}$  – доля демпфирования от критического,  $m_h$  – масса корпуса ГМ.

Пользователь задает численные значения коэффициента жесткости  $c_{yx}$  и долю демпфирования  $\beta_{xy}$  (см. п. 1.3.4.4.2. "Блокировка движения в горизонтальной плоскости", с. 1-143).

### 1.3.1.7. Методика расчета коэффициента жесткости в контакте опорного катка с гусеничной цепью

Для расчета параметров контакта опорного катка с гусеничной цепью можно использовать две методики. В соответствии с первой из них, следует знать значение прогиба упругого катка  $\delta_0$  под действием заданной статической нагрузки  $P$ . После этого рассчитывается значение коэффициента жесткости контакта при статической нагрузке  $P$  в соответствии с формулой (1.7)

$$c = \frac{3P}{2\delta_0}.$$

В соответствии со второй методикой пользователь должен задать непосредственно значение коэффициента жесткости  $c$  при статической нагрузке  $P$ .

Для коэффициентов жесткости в контактах звеньев цепи с направляющим колесом и поддерживающими катками можно принять то же значение, что и для опорных катков, поскольку эти параметры оказывают значительно меньшее влияние на результаты, по сравнению с параметрами контактов опорных катков.

Коэффициенты контактной жесткости и диссипации (через долю демпфирования от критического), а также коэффициент трения задаются пользователем, см. п. 1.3.4.4.1. "Параметры контактов гусеницы", с. 1-142.

## 1.3.2. Управление движением ГМ

### 1.3.2.1. Общие сведения о модели управления ГМ

Под управлением движением подразумевается планомерное изменение продольной скорости и организация поворотов ГМ.

В случае упрощенной модели ГМ, которая не включает модель трансмиссии, управление движением осуществляется за счет задания желаемой скорости вращения ведущих колес (ВК). Пусть  $v_l, v_r$  – текущие значения окружных скоростей левого и правого ВК, рассчитываемых по формуле  $v = \omega R_S$ , где  $\omega$  – угловая скорость ВК и его радиус по центрам цевок. Обозначим  $V_l, V_r$  – желаемые значения этих скоростей в данный момент времени. В этом случае на ВК подается момент, пропорциональный рассогласованию скоростей

$$M_l = -k(\omega_l R_S - V_l), M_r = -k(\omega_r R_S - V_r),$$

где  $k$  – коэффициент усиления.

При движении ГМ по прямой желаемые скорости одинаковые и задаются пользователем в виде графика продольной скорости в зависимости от времени или пройденного пути

$$V_l = V_r = \begin{cases} V(t), t - \text{время,} \\ V(s), s - \text{пройденный путь.} \end{cases}$$

Для организации поворота задается желаемая разность окружных скоростей ВК

$$\Delta V = V_r - V_l.$$

Положительное значение этой величины соответствует левому повороту, а отрицательное – правому.

Предусмотрено два способа задания поворота [8] которые для краткости назовем *симметричным* и *односторонним*. При симметричном способе скорость ВК, соответствующего забегающей гусенице, увеличивается на  $\frac{\Delta V}{2}$ , а отстающей – уменьшается на эту же величину, то есть

$$V_l = V - \Delta \frac{V}{2}, V_r = V + \Delta \frac{V}{2},$$

где  $V$  – задаваемая скорость продольного движения. Такое управление соответствует случаю, когда в качестве механизма поворота используется простой дифференциал.

При одностороннем управлении поворотом скорость ВК забегающей гусеницы поддерживается равной желаемой скорости продольного движения, а для отстающей гусеницы уменьшается не величину  $\Delta V$ ,

$$V_l = \begin{cases} V - \Delta V, \Delta V > 0, \\ V, \Delta V < 0, \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} V, \Delta V > 0, \\ V + \Delta V, \Delta V < 0. \end{cases}$$

Данный случай в упрощенном виде моделирует торможение бортовым фрикционом или планетарным механизмом поворота.

Величина  $\Delta V$ , определяющая радиус поворота ГМ, может быть задана явным образом как функция времени или пройденного пути, что соответствует управлению поворотом *без обратной связи* (см. п. 1.3.4.5.6.2. "Тест: управление без обратной связи", с. 1-161). В другом варианте эта величина определяется внутренней моделью водителя и позволяет автоматически следовать заданной траектории движения (см. п. 1.3.4.5.6.3. "Тест с водителем", с. 1-162).

### 1.3.2.2. Модель водителя

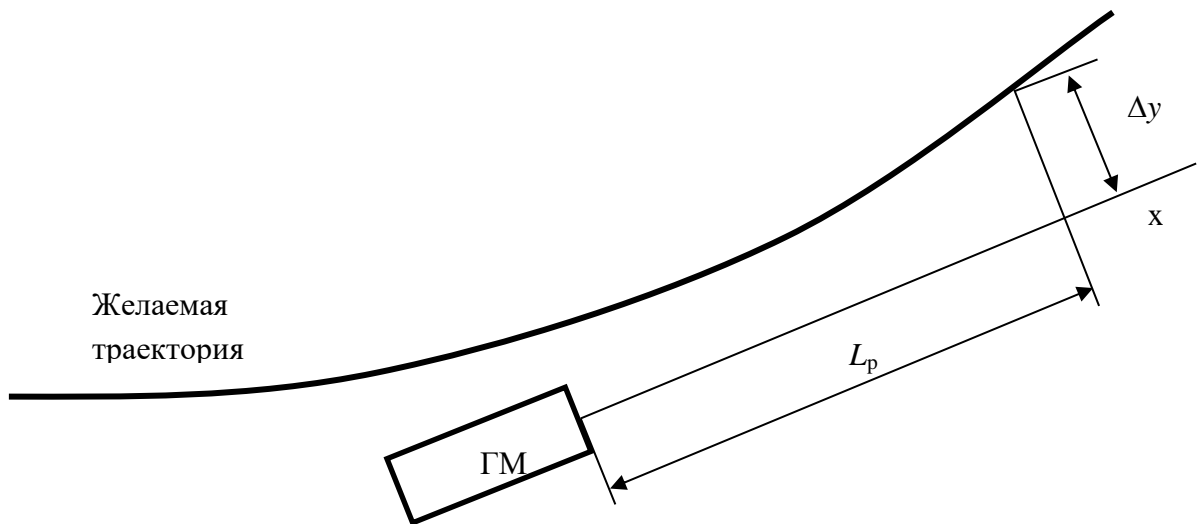


Рис. 1.147. К модели водителя

Рассмотрим модель водителя, реализованного в UM Caterpillar. Пусть задана траектория, которой должен следовать водитель, рис. 1.147. Схема управления следующая: в момент времени  $t$  «водитель» оценивает расстояние  $\Delta y(t)$  до желаемой траектории от точки, находящейся прямо по курсу ГМ (ось  $x$ ) на расстоянии  $L_p = T_p v_x$ , где  $T_p, v_x$  – время «прогноза», задаваемое пользователем, и скорость продольного движения ГМ. Управление строится по закону

$$\Delta V = K \Delta y(t - t_d),$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент усиления,  $t_d$  – запаздывание реакции водителя.

Таблица 1.21

#### Параметры модели с водителем

Параметр	Наименование	Рекомендуемый интервал значений	Значение по умолчанию
$T_p$	Время прогноза	1-2с	1с
$t_d$	Запаздывание реакции	>0.1с	0.1с
$K$	Коэффициент усиления	3-6	4

Численные значения параметров системы управления следования траектории (модель водителя), табл. 1.21, могут зависеть от скорости движения, траектории и модели ГМ. Пользователю следует экспериментально подбирать значения, обеспечивающие устойчивость движения ГМ в интересующей области скоростей и траекторий.

### 1.3.2.3. Геометрия управляемого движения ГМ

#### 1.3.2.3.1. Прямолинейное движение

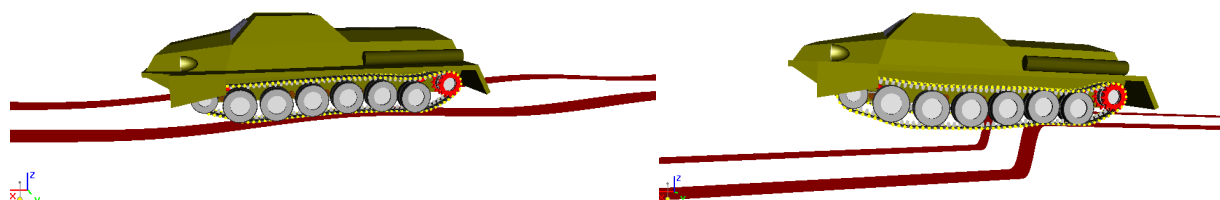


Рис. 1.148. Пример задания синусоидальных неровностей и препятствия в виде трамплина при движении ГМ по прямой

В данном случае модель водителя не используется, поскольку автоматически поддерживается одинаковая скорость левого и правого ВК (п. 1.3.4.5.6.1. "Тест: движение по прямой", с. 1-161). При движении могут учитываться вертикальные неровности и препятствия различной формы.

#### 1.3.2.3.2. Плоская кривая

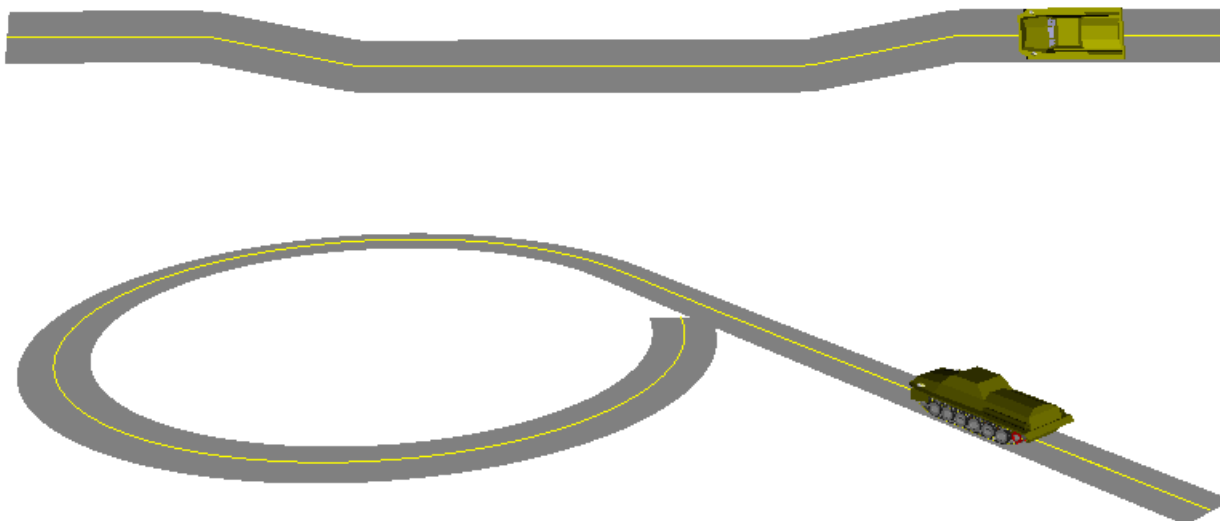



Рис. 1.149. Примеры задания траекторий управляемого движения ГМ

Пользователь задает плоскую кривую, которой должна следовать ГМ под управлением модели водителя. При движении могут учитываться вертикальные микронеровности.

Для задания кривой используется специальный инструмент, доступный по команде меню **Инструменты | Создание макрогеометрии**, рис. 1.150. Траектория движения создается в редакторе кривых, для вызова которой используется кнопка .

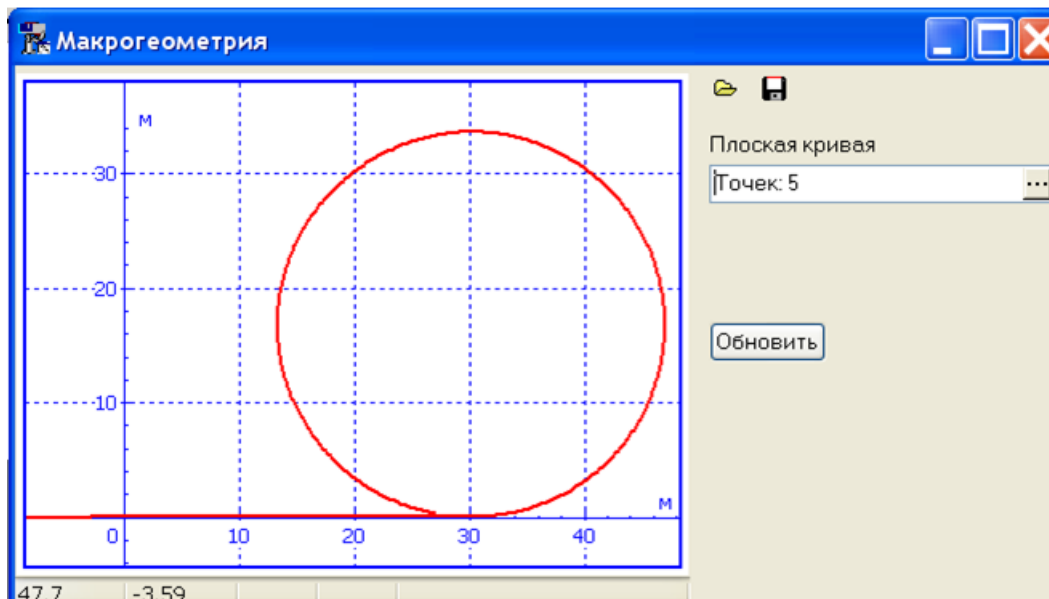


Рис. 1.150. Инструмент создания файла с траекторией управляемого движения ГМ

### 1.3.2.3.3. Испытательный полигон

Испытательный полигон представляет собой поверхность с набором тестовых препятствий, которые преодолевает ГМ в соответствии с заданным пользователем маршрутом. Графический образ полигона создается в одной из САПР программ и импортируется в **UM Input** стандартными средствами. Графический образ испытательного полигона сохраняется пользователем в файл \*.img. База данных UM содержит два полигона:

- {Данные УМ}\Caterpillar\TestingArea\TestingArea.img (рис. 1.151),
- {Данные УМ}\Caterpillar\TestingArea\SandPit.img.

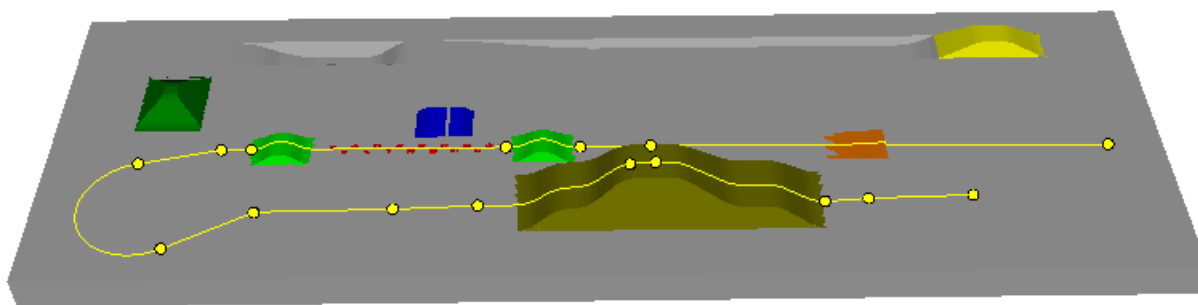


Рис. 1.151. Пример полигона и маршрута

Не все графические объекты могут быть использованы для испытательного полигона. К графическому образу испытательного полигона предъявляется ряд требований.

- Файл \*.img должен содержать только один графический образ.

- Из предыдущего пункта следует, что графический образ испытательного полигона не должен включать графические элементы типа "Графический объект". Это ссылочный тип. Графические объекты, на которые ссылаются такие графические элементы, сохраняются отдельно и в итоговом файле \*.img получается больше одного графического объекта.
- При описании графических элементов в графическом образе сцены все размеры нужно выражать только численными константами без использования параметризации. Файл \*.img не должен включать секцию с описанием идентификаторов модели.

Если графический образ не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к файлам испытательного полигона, то при попытке загрузки такого графического образа появится следующее сообщение об ошибке:

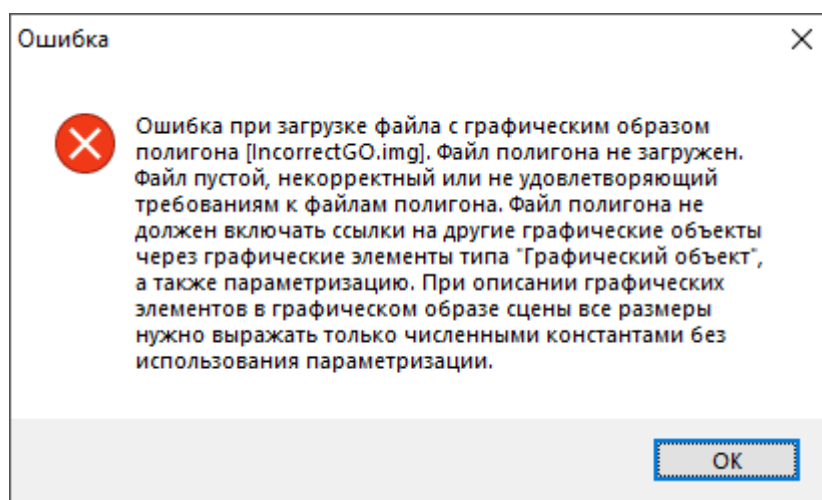


Рис. 1.152. Ошибка при загрузке файла испытательного полигона

Для полигона пользователь создает набор маршрутов, по которым будет двигаться ГМ под управлением модели водителя с заданной переменной продольной скоростью. Особенности описания набора маршрутов на испытательном полигоне описаны в п. 1.3.4.1.3.1 "Задание маршрутов на испытательном полигон", с. 1-136. Наряду с препятствиями, при движении могут задаваться микронеровности поверхности.

### 1.3.3. Классификация динамических тестов

Моделирование динамики ГМ в УМ основано на системе тестов. Приведем их перечень на текущий момент:

1. равновесие,
2. натяжение гусеницы,
3. натяжение через преднатяг,
4. расчет начальных скоростей,
5. вертикальная прокачка,
6. движение по прямой,
7. управление без обратной связи,
8. тест с водителем.

Тесты можно разделить на вспомогательные и основные. К первому типу относятся тесты 1-5, ко второму – 6-8. Вспомогательные тесты служат цели расчета начального состояния ГМ и подготовки выполнения основных тестов. Основные тесты предназначены собственно для изучения динамических свойств ГМ.

Тесты 1-5 выполняются с неподвижной в продольном направлении ГМ, тесты 6-8 позволяют рассчитывать динамические показатели в движении с учетом нервноностей поверхности, по которой движется ГМ.

**Замечание.** Рекомендуется выполнять вспомогательные тесты в той последовательности, в которой они приведены в данном списке.

### 1.3.4. Подготовка модели ГМ к моделированию

Перед выполнением динамических тестов пользователь должен выполнить определенные действия по подготовке модели ГМ. С этой целью используется вкладка **Гусеничный экипаж** инспектора моделирования объекта.

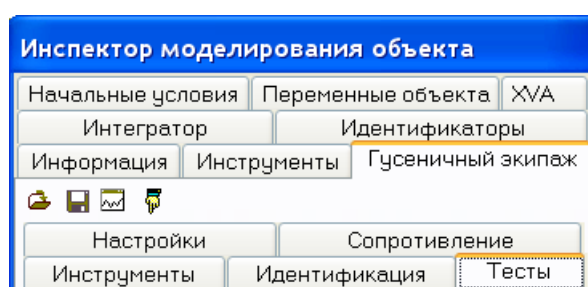




Рис. 1.153. Инспектор моделирования объекта


Загрузите модель ГМ в программу моделирования **UM Simulation**. Вызовите инспектор моделирования с помощью команды меню **Анализ | Моделирование**, рис. 1.153. Альтернативные варианты: кнопка  на панели инструментов или клавиша **F9**.



**Замечание.** Инспектор содержит несколько полезных вкладок общего назначения: **Идентификаторы**, **Интегратор**, **Начальные условия**, **Инструменты**, **Переменные объекта**, ознакомиться с которыми можно в [Главе 4](#) руководства

пользователя “Программа моделирования”, п. *Режим однократного интегрирования уравнений движения* | *Подготовка процесса интегрирования.*

Рассмотрим перечень основных элементов, доступных на вкладке **Гусеничный экипаж**.

**Кнопка**  – сохранение параметров ГМ и настроек, введенных пользователем на данной вкладке, в текстовый файл \*.tvc (файл конфигурации ГМ).

**Кнопка**  – чтение параметров ГМ и настроек из ранее созданного файла конфигурации ГМ \*.tvc.

**Кнопка**  – показать в графическом окне текущие неровности под левой и правой гусеницей, п. 1.3.4.1.2.4. *“Примеры неровностей”*, с. 1-134. С этой целью также используется кнопка  на панели инструментов.

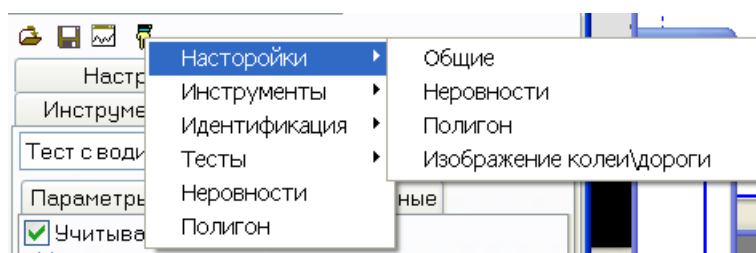



Рис. 1.154. Меню быстрого доступа к данным

**Кнопка**  вызывает меню быстрого доступа к различным вкладкам и данным, рис. 1.154.

Вкладка **Настройки**: используется для ввода и отображения ряда параметров ГМ (в частности, регулирующих натяжение гусеницы), задания неровностей поверхности под гусеницами, выбора полигона и некоторых других вспомогательных параметров, см. п. 1.3.4.1. *“Вкладка “Настройки”*, с. 1-131.

Вкладка **Соппротивление** предназначена для задания параметров аэродинамического сопротивления, п. 1.3.4.2. *“Вкладка “Соппротивление”*, с. 1-140.

Вкладка **Инструменты**: создание файлов, задающих управление поворотом без обратной связи, изменение скорости ГМ в зависимости от времени или пройденного пути, п. 1.3.2.1. *“Общие сведения о модели управления ГМ”*, с. 1-124, п. 1.3.4.3. *“Вкладка “Инструменты”*: задание скорости”, с. 1-140.

Вкладка **Идентификация**: задание параметров контактных сил, блокировки продольного движения в тестах, в которых ГМ не движется в продольном направлении, назначение идентификаторов для управляющих моментов на звездочке, параметров грунта с просадкой, п. 1.3.4.4. *“Вкладка “Идентификация”*, с. 1-141.

Вкладка **Тесты** используется для выбора текущего динамического теста и задания его параметров.

### 1.3.4.1. Вкладка "Настройки"

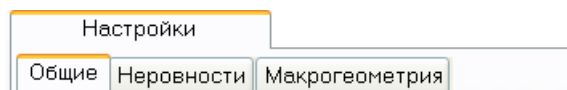


Рис. 1.155. Элементы вкладки Настройки

Настройка модели включает три элемента:

- общие настройки,
- неровности под каждой из гусениц,
- параметры макрогеометрии.

#### 1.3.4.1.1. Общие настройки

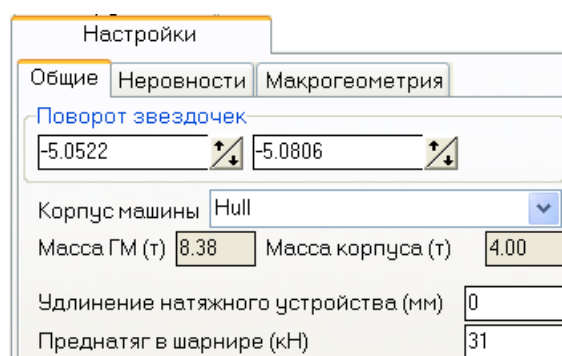


Рис. 1.156. Общие настройки

Общие настройки (рис. 1.156) позволяют выполнить следующие действия.

1. Задать начальное значение угла поворота звездочки в градусах; в текущей версии модуля ГМ практически не используется, поскольку начальный поворот звездочек при котором цевки находятся в межзубцовых впадинах, рассчитывается программой автоматически.
2. Назначить тело модели, являющееся корпусом ГМ. Программа делает это автоматически, назначая в качестве корпуса тело с наибольшей массой, однако пользователь может при необходимости изменить назначение, например, если имеется прицеп с большой массой, который программа и назначит в качестве корпуса ГМ в соответствии с указанным критерием.
3. Назначить удлинение натяжного устройства и/или преднатяг в упругом шарнире с целью достижения необходимого значения натяжения гусениц. Численные значения этих параметров рассчитываются в процессе выполнения тестов Натяжение гусеницы (п. 1.3.4.5.2. "Тест: натяжение гусеницы", с. 1-148) и Натяжение через преднатяг (п. 1.3.4.5.3. "Тест: натяжение через преднатяг", с. 1-152).

### 1.3.4.1.2. Задание неровностей

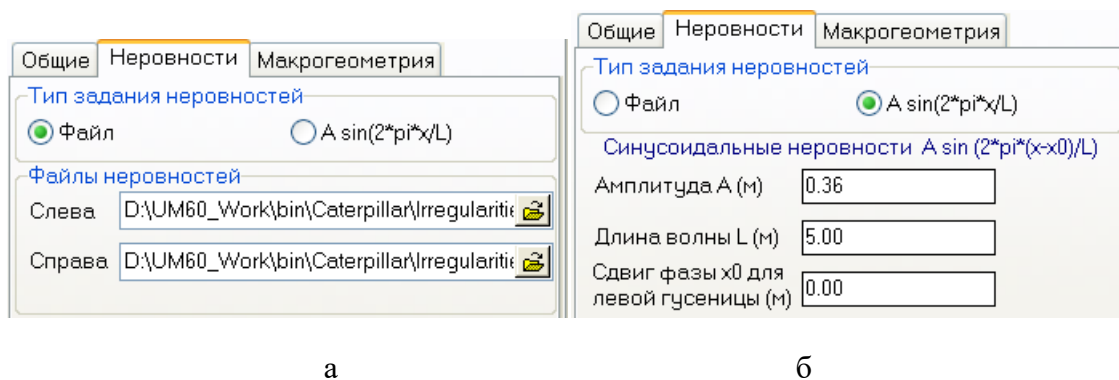


Рис. 1.157. Задание файловых (а) или синусоидальных (б) неровностей


В тесте прямолинейного движения ГМ, п. 1.3.4.5.6. "Тесты с продольным движением ГМ", с. 1-159, могут задаваться неровности для левой и правой колеи. Предусмотрено два типа задания неровностей: файловые и синусоидальные, рис. 1.157.

#### 1.3.4.1.2.1. Файловые неровности

Неровности для отдельной гусеницы задаются в текстовой файле \*.irr.


*Формат файла.* Файл неровностей содержит две колонки. Первая из них содержит продольную координату в метрах, начиная с нуля. Вторая колонка содержит значения вертикальных неровностей в метрах. Пример:

```
0 -0.00540956
0.1 -0.00553727
0.2 -0.00564776
0.3 -0.00574484
0.4 -0.00583378
0.5 -0.00592044
0.6 -0.00601059
0.7 -0.00610933
```

*Создание файлов.* Для создания файлов неровностей может быть использован специальный инструмент, первоначально созданных для генерирования неровностей рельсов. Для вызова данного инструмента используется команда меню **Инструменты | Создание неровностей** или кнопку  на панели инструментов.

Подробная документация по использованию инструмента создания неровностей может быть найдена в [Главе 12](#), п. *Микропрофиль пути* (генерация файлов случайных неровностей по спектральным характеристикам) и в [Главе 8](#), п. *Моделирование динамики рельсовых экипажей | Создание неровностей путевой структуры | Создание файлов неровностей*.

*Место хранения файлов.* Стандартные файлы неровностей расположены в каталоге {Данные УМ}\Caterpillar\Irregularities. Рекомендуется хранить файлы, созданные пользователем, либо в этом стандартном каталоге, либо в каталоге модели исследуемой ГМ.

*Назначение файлов неровностей.* Для назначения файлов неровностей для левой и правой колеи щелчком на соответствующей кнопке  вызовите стандартное окно открытия файла и выберите нужный файл, рис. 1.157а.

### 1.3.4.1.2.2. Синусоидальные неровности

В этом случае неровности рассчитываются по формуле

$$z = a \sin \frac{2\pi}{L} (x - x_0),$$

где  $a$  – амплитуда,  $L$  – длина волны (период),  $x$  – продольная координата (путь, проеденный ГМ с момента начала движения),  $x_0$  – сдвиг фазы неровности (для правой колеи).

### 1.3.4.1.2.3. Плавный заезд на неровности

Чтобы избежать скачков сил при заезде на неровности на начальном этапе движения, неровности обнуляются на первых пяти метрах пути и далее сглаживаются на переходном участке с помощью функции, изменяющейся от 0 до 1.

В случае синусоидальных неровностей переходный участок сглаживания имеет длину 10м. Сглаживание осуществляется с помощью квадратичной функции, то есть на участке от 5 до 15м неровности умножается на  $(x-5)^2/100$ .

В случае файловых неровностей переходный участок сглаживания имеет длину 5м. Сглаживание осуществляется с помощью линейной функции, то есть на участке от 5 до 10м неровности умножается на  $(x-5)/5$ . В качестве примера рассмотрим неровность постоянной высоты 10мм. В действительности при моделировании будет учитываться неровность, представленная на рис. 1.158.

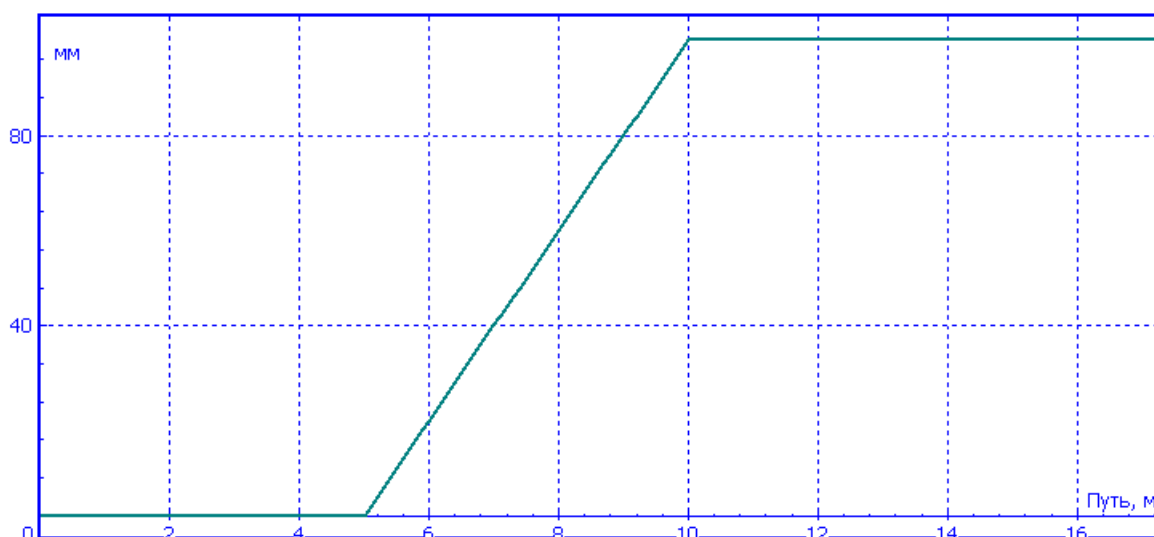



Рис. 1.158. Плавный заезд на неровности

### 1.3.4.1.2.4. Примеры неровностей

После назначения неровностей можно просмотреть их график, щелкнув на кнопку . Так, на рис. 1.159 приведен пример синусоидальных неровностей при следующем значении параметров:

$A=100\text{мм}$ ,  $L=8\text{м}$ ,  $x_0=2\text{м}$ .

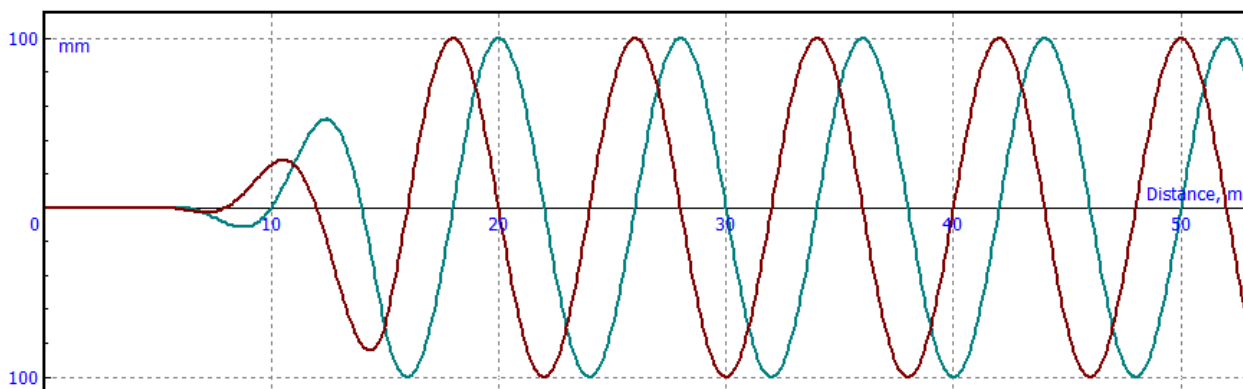


Рис. 1.159. Пример синусоидальной неровности

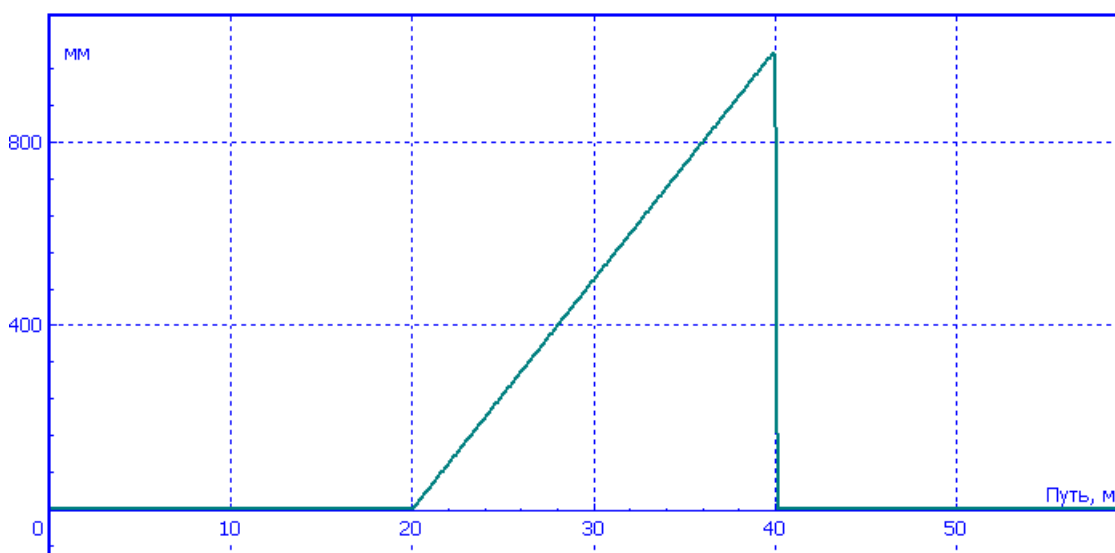


Рис. 1.160. Пример файловой неровности

Пример файловой неровности, предназначенной для моделирования прыжка ГМ, представлен рис. 1.160.

### 1.3.4.1.2.5. Визуализация неровностей в анимационном окне

При прямолинейном движении ГМ в анимационном окне рисуются колеи с учетом заданных неровностей. На рис. 1.161 приведены примеры анимационных окон с изображением неровностей, соответствующих рис. 1.159, рис. 1.160.

Колеи изображаются в виде полос, ширину и цвет которых пользователь может настроить на вкладке **Макрогеометрия**, п. 0.

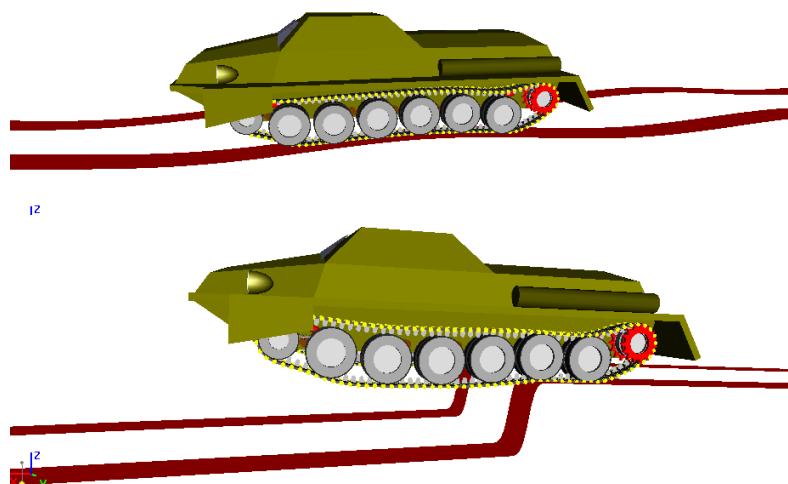



Рис. 1.161. Примеры изображения неровностей в анимационном окне

### 1.3.4.1.3. Задание параметров макрогеометрии

#### 1.3.4.1.3.1. Задание маршрутов на испытательном полигоне

##### Задание полигона

Используя кнопку  (рис. 1.162) выберите файл \*.img, содержащий предварительно созданный графический образ полигона. Требования к графическому образу испытательного полигона описаны в п. 1.3.2.3.3 "Испытательный полигон", с. 1-127.

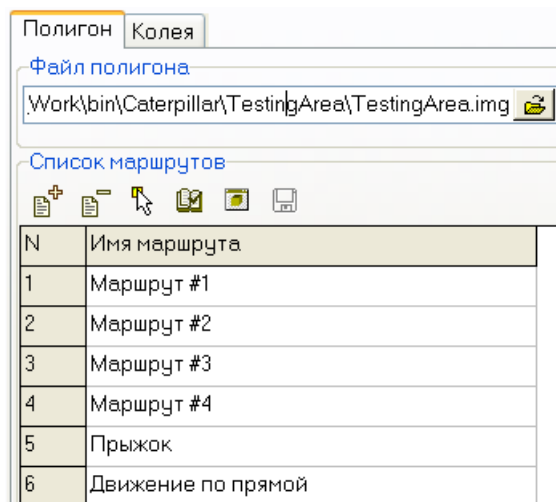


Рис. 1.162. Параметры полигона

##### Создание и редактирование маршрутов

Маршрут – это кривая, задаваемая пользователем на полигоне, которой следует ГМ под управлением встроенной модели водителя.

Используются следующие функции:



*Добавление нового маршрута к списку.*



*Удаление выделенного маршрута из списка.*



*Добавление нового маршрута и переход в режим задания ключевых точек маршрута с помощью мышки.*

Поле щелчка на данной кнопке появляется анимационное окно с изображением полигона, в котором пользователь мышкой указывает набор маркеров (ключевых точек) на маршруте (рис. 1.163). Следует руководствоваться следующими правилами задания маркеров.

- Первая и вторая точка должны быть расположены на горизонтальном участке полигона и определяют начальное положение ГМ (расположение СК0 относительно полигона), так что начало отсчета СК0 размещается в первой точке, а ось X продольного движения проходит через вторую точку, рис. 1.164.
- Маркеры размещаются в положениях, соответствующих изменению направления движения, а также в точках, где предполагается начать и закончить изменение продольной скорости движения, рис. 1.165.
- После назначения ключевых точек следует закрыть анимационное окно и подтвердить сохранение результатов ввода.

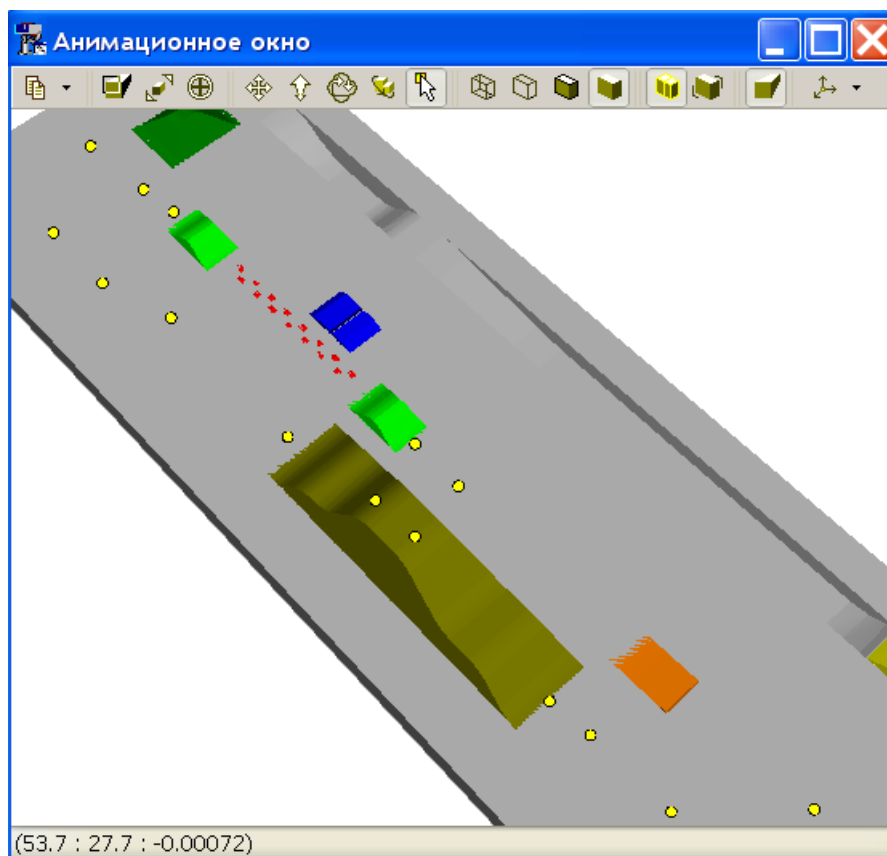


Рис. 1.163. Задание ключевых точек маршрута

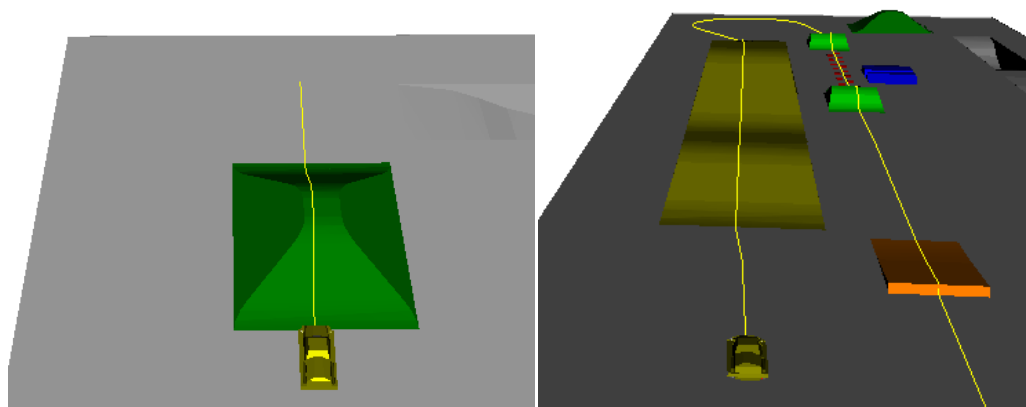


Рис. 1.164. Примеры начальных положений ГМ для различных маршрутов

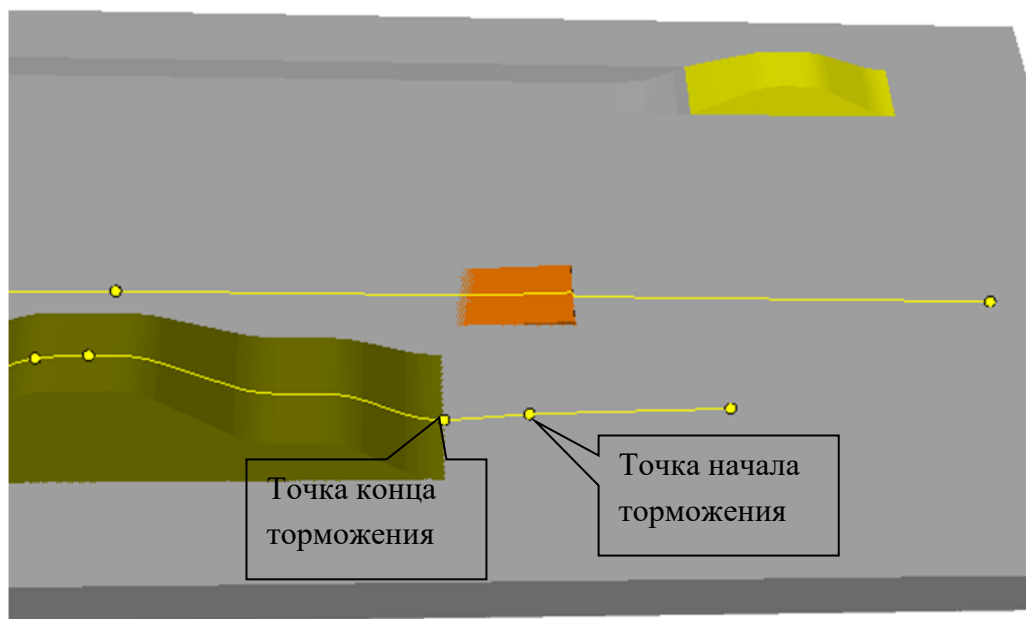


Рис. 1.165. Маркеры, соответствующие началу и концу торможения

 Редактирование выделенный маршрут в окне создания кривых.

После щелчка на этой кнопке появляется редактор кривых, содержащий маршруты, рис. 1.166.

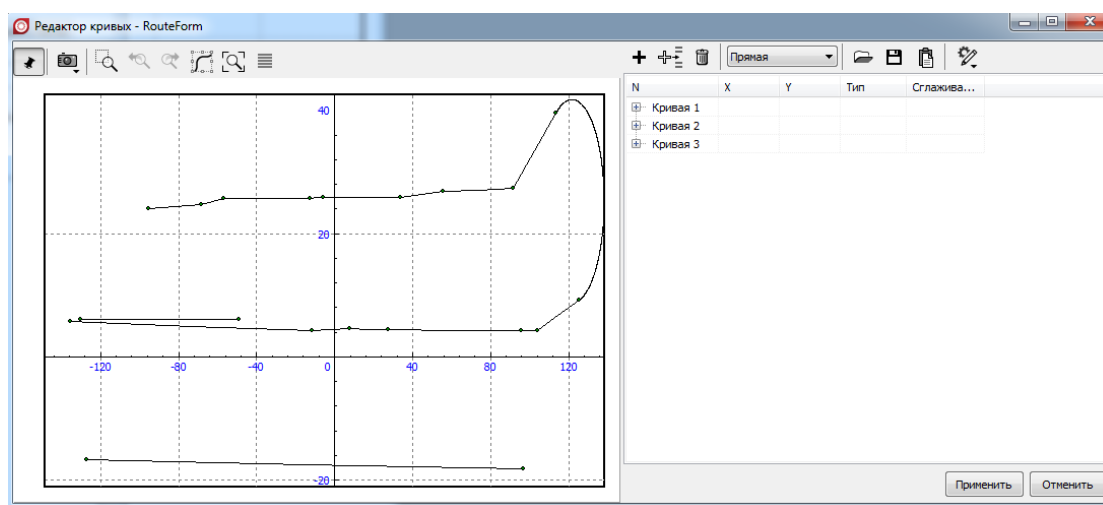


Рис. 1.166. Маршруты в редакторе кривых. Все кривые, кроме последней, скрыты

В окне редактора кривых пользователь может

- скорректировать координаты точек;
- удалить или добавить любое число точек;
- ввести сглаживание маршрута с помощью дуг окружностей или сплайнов, рис. 1.167.

Подробные сведения о данном инструменте можно найти в [Главе 3](#) руководства пользователя, п. *Редактор кривых*.

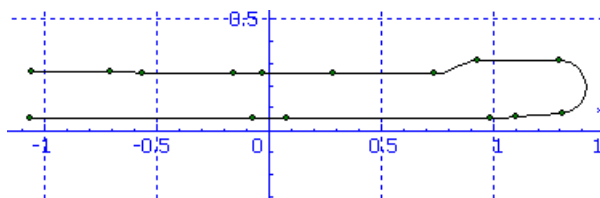



Рис. 1.167. Маршрут после редактирования

 *Просмотр текущего маршрута в новом анимационном окне.*

Следует выделить нужный маршрут в списке и щелкнуть на данной кнопке. Появится анимационное окно с изображением полигона и маршрута с маркерами. Если подвести курсор мыши к маркеру, то в статусной строке внизу окна появятся координаты маркера и *расстояние* до него вдоль маршрута  $S$ , рис. 1.168.

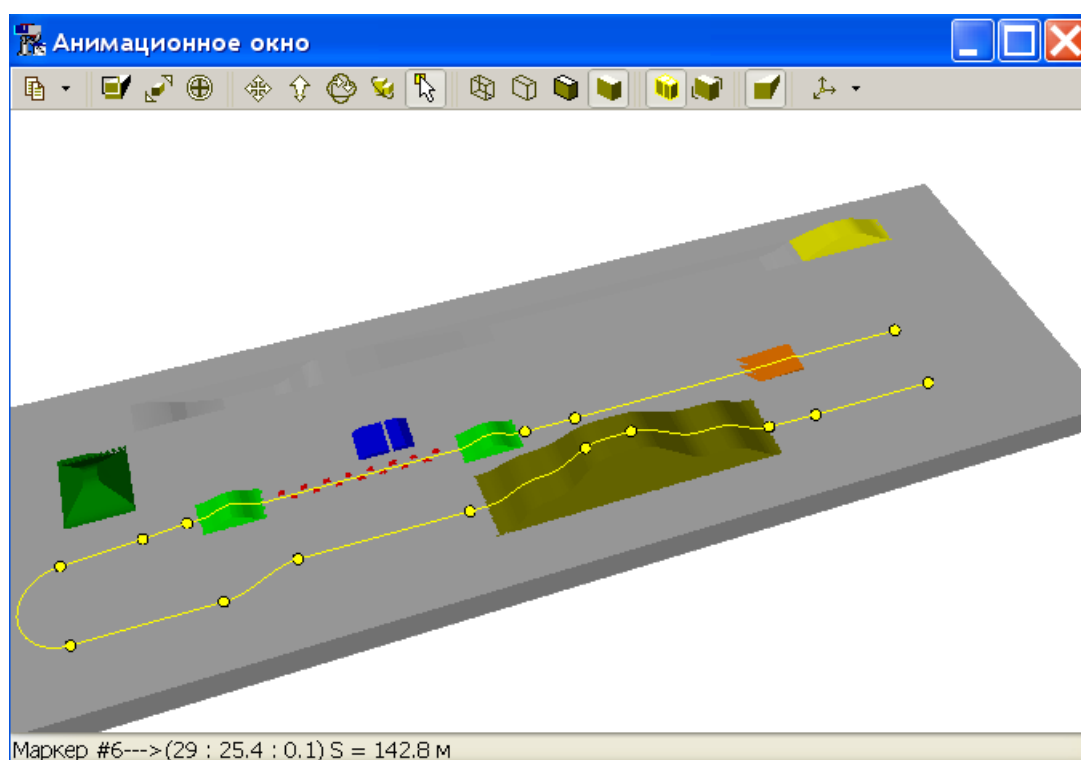



Рис. 1.168. Маршрут в анимационном окне

 *Сохранить список маршрутов в файл.*

Маршруты сохраняются в текстовый файл с расширением \*.rt с тем же именем, что и графический образ полигона и в тот же каталог. Например, для полигона

`{Данные УМ} \Caterpullar\TestingArea\TestingArea.img`

маршруты будут сохранены в файл

`{Данные УМ}\Caterpullar\TestingArea\TestingArea.rt.`

### 1.3.4.1.3.2. Параметры графического образа колес

На вкладке пользователь может изменить следующие параметры изображения левой и правой колес (для тестов прямолинейного движения и управления без обратной связи, рис. 1.162, п. 1.3.4.1.2.5. "Визуализация неровностей в анимационном окне", с. 1-134):

- ширину полотна колеи;
- шаг дискретизации кривой неровности, которой следует колея в вертикальном направлении;
- цвет изображения полос.

Для теста с водителем при движении по плоской кривой:

- ширину полотна дороги.

Для теста с водителем:

- цвет и толщину линии, отмечающей маршрут, рис. 1.164.

Все изменения сразу же отображаются в открытых анимационных окнах.

### 1.3.4.2. Вкладка "Сопротивление"

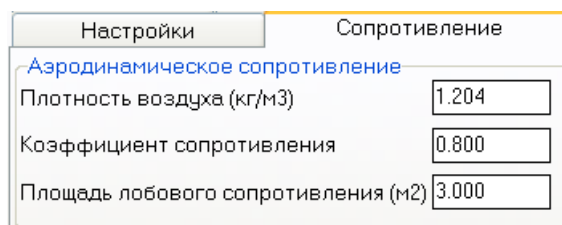


Рис. 1.169. Параметры сопротивления движению ГМ

На данной вкладке указываются параметры сопротивления, которые учитываются в тестах с продольным движением ГМ.

Аэродинамическое сопротивление задается тремя параметрами:

- плотность воздуха  $\rho$ ,
- коэффициент аэродинамического сопротивления  $c_w$ ,
- площадь проекции ГМ на плоскость, перпендикулярную оси машины (A).

Расчетная формула для силы [9]

$$W = c_w A \left(\frac{\rho}{2}\right) v^2,$$

где  $v$  – скорость движения ГМ.

### 1.3.4.3. Вкладка "Инструменты": задание скорости

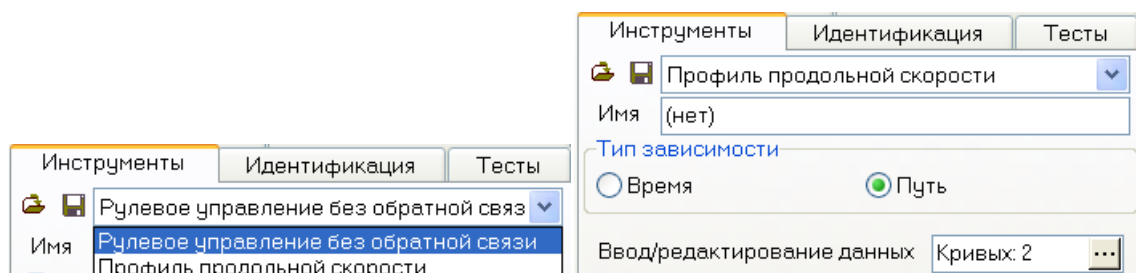


Рис. 1.170. Вкладка Инструменты: задание скорости

Вкладка **Инструменты** используется для задания значения скорости в зависимости от времени или пройденного пути, п. 1.3.2.1. "Общие сведения о модели управления ГМ", с. 1-124:

- закона приращения скорости  $\Delta V$  при управлении поворотом ГМ без обратной связи;
- профиля скорости  $V$  продольного движения.

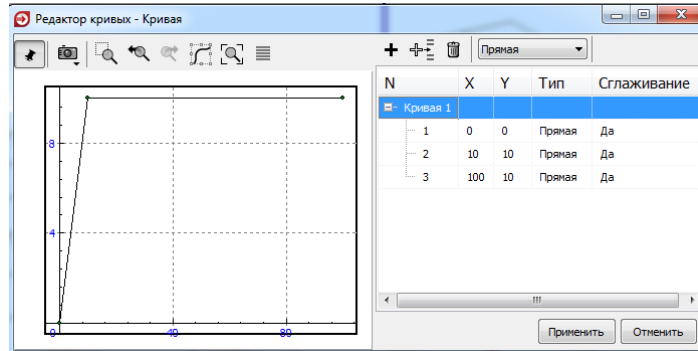



Рис. 1.171. Пример задания графика скорости

Для задания графика скорости  $V$  или приращения скорости  $\Delta V$  следует щелчком на кнопке  вызвать редактор кривых и задать значения скорости в зависимости от времени или пути в дискретных точках. На рис. 1.171 приведен пример задания зависимости скорости от времени, в соответствии с которым ГМ приобретает скорость 10м/с в течение 10 секунд равноускоренного движения, а затем движется с постоянной скоростью.

**Замечание.** При задании зависимости скорости от пути график не должен начинаться с нулевого значения скорости.

#### 1.3.4.4. Вкладка "Идентификация"

Инструменты		Идентификация	Тесты
Параметры контактов гусеницы			
Параметры контактов гусеницы			
Блокировка движения			
Тяговые моменты			
Характеристики грунта			
Жесткость грунта (Н/м)		1E8	
Beta для грунта		0.2	
Коэффициент трения грунта		0.5	
Жесткость звездочки (Н/м)		10000000	
Beta для звездочки		0.2	
Коэффициент трения звездочки		0.2	
Жесткость опорных катков (Н/м)		10000000	
Beta для опорного катка		0.2	
Коэффициент трения катков		0.5	
Жесткость направл. колеса (Н/м)		10000000	
Beta для направл. колеса		0.2	

Рис. 1.172. Идентификация параметров модели ГМ

На вкладке **Идентификация** выполняется идентификация параметров модели ГМ (рис. 1.172):

- параметры контактов гусеницы;
- параметры блокировки движения в горизонтальной плоскости;
- идентификация тяговых моментов, приложенных к ведущим колесам;
- параметры, характеризующие свойства грунта с просадкой.

#### 1.3.4.4.1. Параметры контактов гусеницы

Таблица 1.22

**Параметры контактных сил для гусеницы**

Параметр	Значение по умолчанию	Комментарий
Жесткость грунта (Н/м)	1.0e8	Параметры грунта без просадки, см. п. 1.3.1.2.1. "Модель грунта без учета просадки", с. 1-115.
Beta для грунта	0.2	
Коэффициент трения грунта	0.3	
Жесткость звездочки (Н/м)	1.0e7	см. п. 1.3.1.1. "Взаимодействие звездочки с цевками", с. 1-113.
Beta для звездочки	0.2	
Коэффициент трения звездочки	0.2	
Жесткость опорных катков (Н/м)	1.0e6	см. п. 1.3.1.7. "Методика расчета коэффициента жесткости в контакте опорного катка с гусеничной цепью", с. 1-123.
Beta для опорного катка	0.2	
Коэффициент трения катков	0.5	
Жесткость направл. колеса (Н/м)	1.0e6	
Beta для направл. колеса	0.2	
Жесткость поддерж.катков (Н/м)	1.0e6	
Beta для поддерж.катков	0.2	см. п. 1.3.1.5. "Удерживающие силы и момент", с. 1-122.
Поперечная жесткость (Н/м)	1.0e8	
Beta для поперечного контакта	0.2	
Высота гребня звена (мм)	100	Ограничивает ход траков относительно корпуса по вертикали. Ограничение игнорируется, если заданное число более 10м, в частности, игнорируется при значении «по умолчанию»
Максимальный вертикальный ход траков (мм)	100000	

В таблице (рис. 1.172, табл. 1.22) задаются значения параметров контактного взаимодействия гусеницы с грунтом, катками и звездочкой (п. 1.3.1. "Модели силовых взаимодействий", с. 1-113).

Замечание. Слово Beta в табл. 1.22 соответствует доле демпфирования от критического  $\beta$ , используемой для расчета коэффициента демпфирования  $d$  по заданному значению коэффициента жесткости  $c$  и массе тела  $m$  (как правило, берется меньшая масса из пары взаимодействующих тел) в соответствии с формулой  $d = 2\beta\sqrt{mc}$ .

### 1.3.4.4.2. Блокировка движения в горизонтальной плоскости

Числовые параметры	
Имя	Значение
Жесткость блока	1E9
Доля демпфирования блока	0.3

Рис. 1.173. Параметры блокировки движения

Блокировка используется в тестах, для которых фиксируется движение ГМ в горизонтальной плоскости. В данной таблице задается значение коэффициента жесткости и доля демпфирования от критического, см. п. 1.3.1.6. *"Блокирующая сила и момент в горизонтальной плоскости"*, с. 1-123.

### 1.3.4.4.3. Тяговые моменты

В данной таблице следует указать идентификаторы тяговых моментов, п. 1.2.1.4.3.4. *"Шаблон модели звездочки"*, с. 1-53, табл. 1.14. Если используется стандартный шаблон звездочки, то идентификаторы назначаются автоматически.

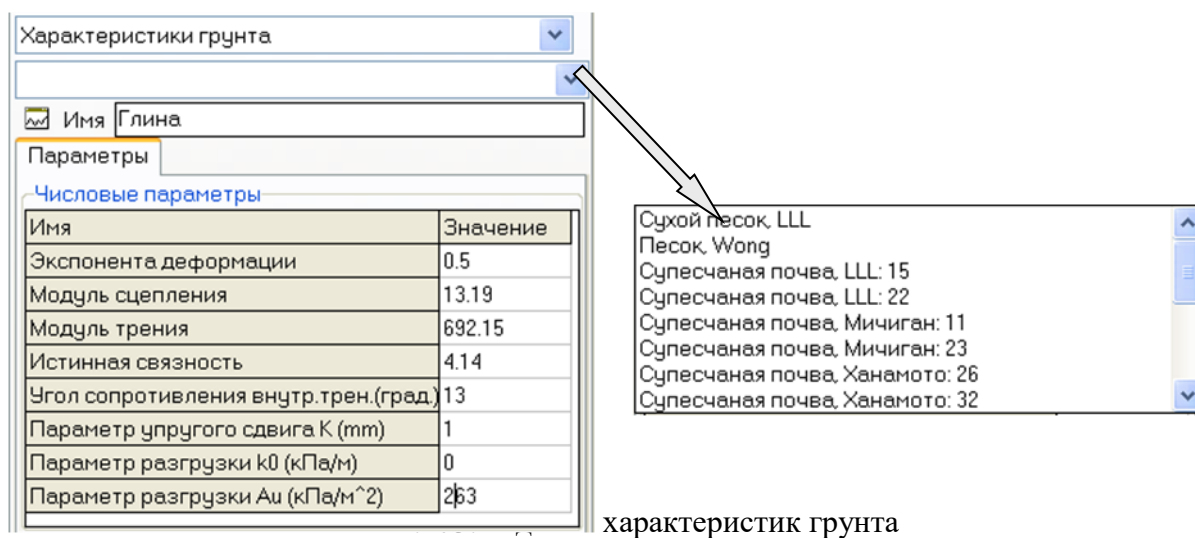
Если пользователь переименовал имя данного идентификатора в шаблоне звездочки, то он должен выбрать соответствующие идентификаторы из списка после двойного щелчка на поле идентификатора, рис. 1.174.

Имя	Идентификатор
Левый тяговый момент	Левая гусеница.traction_torque
Правый тяговый момент	Правая гусеница.traction_torque

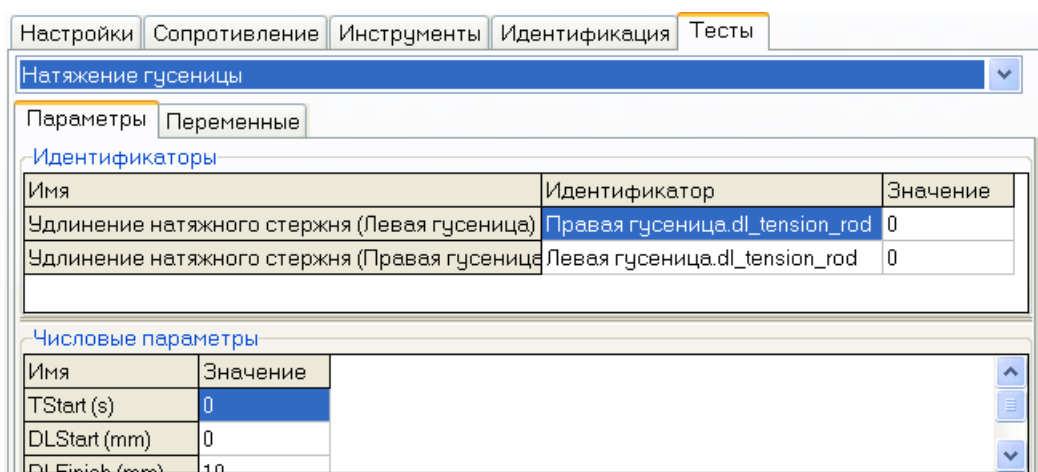
Рис. 1.174. Назначение идентификаторов тяговых моментов

### 1.3.4.4.4. Характеристики грунта с просадкой

При выполнении основных тестов может быть заданы параметры грунта с просадкой, п. 1.3.1.2.2. *"Модель Беккера грунта с учетом просадки"*, с. 1-116. Численные значения параметров могут быть заданы как непосредственно в полях таблицы на рис. 1.175, так и выбраны из базы данных с помощью выпадающего списка.



### 1.3.4.5. Вкладка "Тесты"



(а)



(б)

Рис. 1.176. Пример теста (а) и список доступных тестов (б)

Перед выполнением моделирования пользователь должен назначить один из тестов из списка на рис. 1.176 и выполнить необходимые действия по инициализации параметров связанных с тестом.

С каждым из тестов могут быть связаны параметры двух типов (вкладка **Параметры** на рис. 1.176):

- *идентификаторы*; инициализация в данном случае заключается в назначении идентификатора модели; рекомендуется при создании модели использовать стандартные имена идентификаторов – в этом случае назначение происходит автоматически;
- *числовые параметры*: пользователь должен назначить численные значения этим параметрам.

Для большинства тестов создается список стандартных переменных (вкладка **Переменные** на рис. 1.176). В процессе выполнения теста пользователь может получить графики этих переменных, если перед началом теста (или в режиме паузы) перетащит мышкой переменные в графическое окно.

#### 1.3.4.5.1. Тест: равновесие

##### Цель выполнения теста.

Вспомогательный тест, предназначенный для приведения ГМ в состояние равновесия. Необходимость этого теста заключается в том факте, что после создания модели ГМ в программе ввода положение ее тел определено синтезатором гусеницы приближенно, рис. 1.178. Поэтому при старте процесса моделирования будут наблюдаться интенсивные переходные процессы. Тест используется именно для того, чтобы устранить эти переходные процессы. Как правило, это первый тест, который выполняется с новой моделью ГМ.

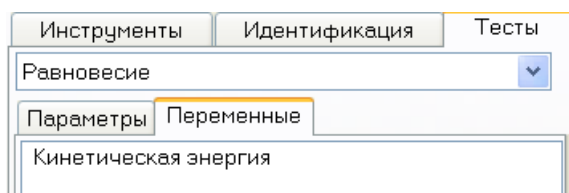


Рис. 1.177. Переменная теста Равновесие

**Замечание.** В данном тесте автоматически отключается трение между траками и грунтом.

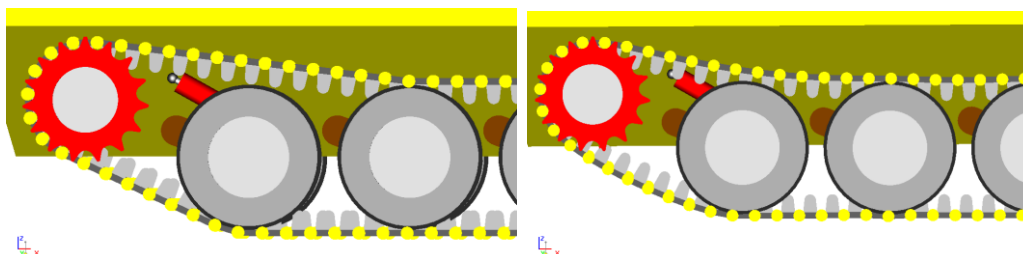


Рис. 1.178. Положение звеньев гусеницы до и после выполнения теста на равновесие

##### Инициализация параметров теста.

Тест не требует дополнительной инициализации параметров.

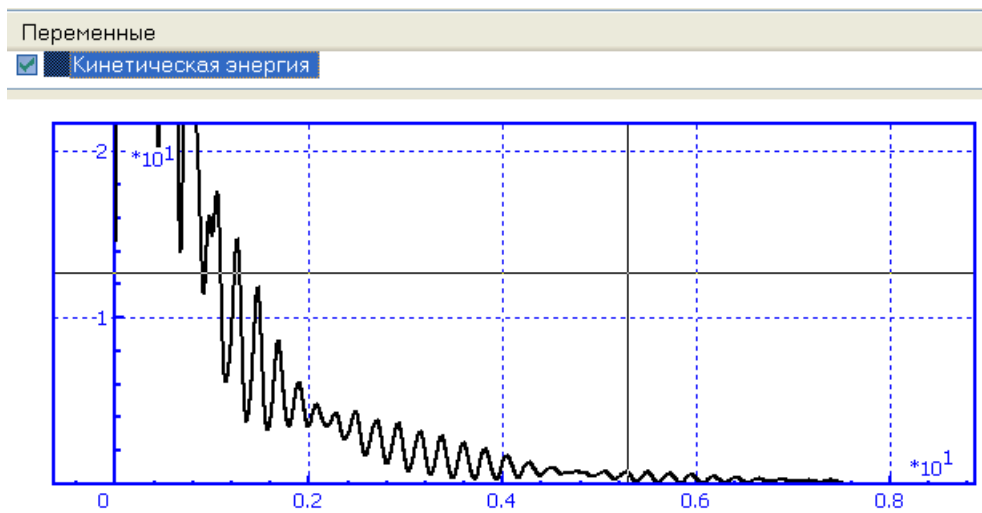


Рис. 1.179. Падение кинетической энергии ГМ в процессе выполнения теста

**Переменные теста.**

В распоряжение пользователя предоставляется единственная переменная: суммарная кинетическая энергия ГМ. Тест прерывается пользователем, когда значение энергии становится достаточно малым, рис. 1.179.

Во время выполнения теста полезными могут быть также графики нагрузок на опорные катки, рис. 1.180. Эти переменные доступны в Мастере переменных.

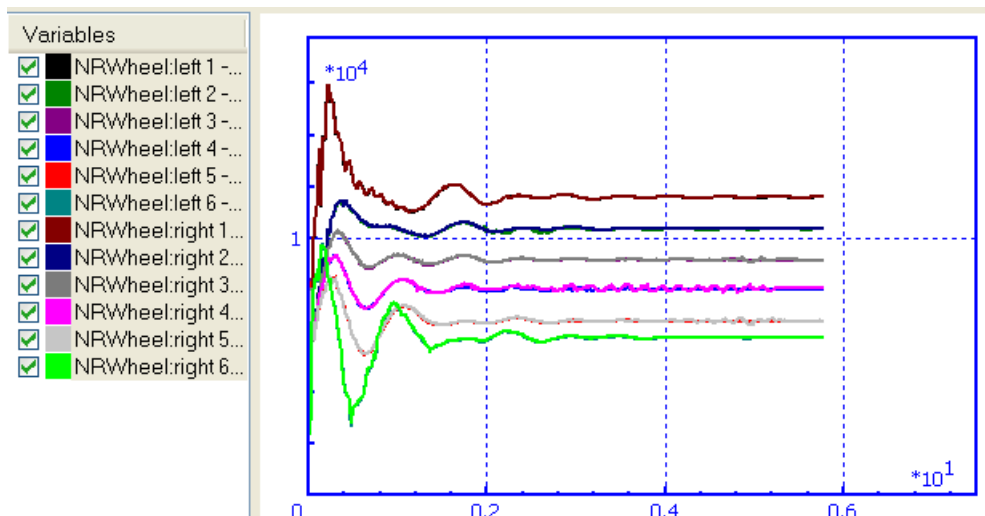


Рис. 1.180. Нагрузки на катки

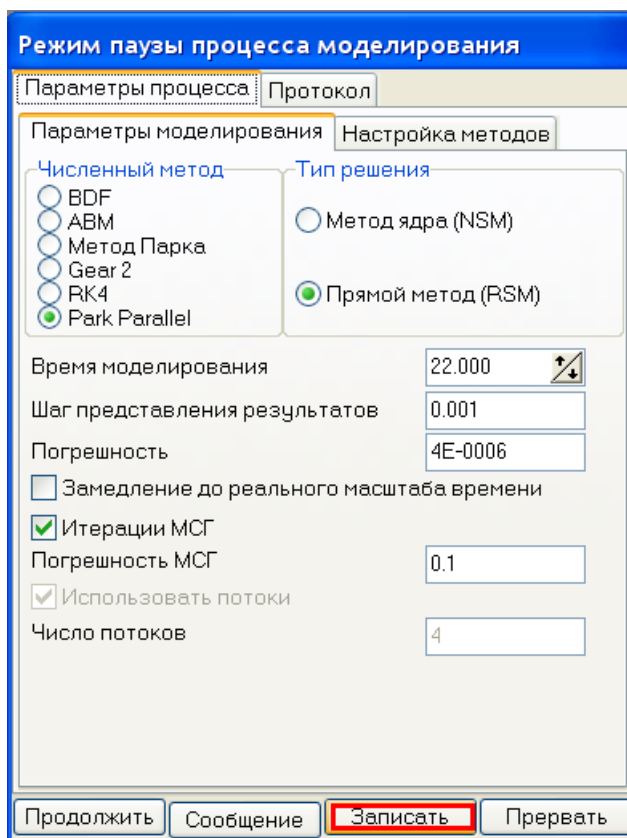






Рис. 1.181. Сохранение положения тел в режиме паузы

**Результаты теста.**

Перед прерыванием теста следует

- перейти в режим паузы; для этого надо либо дождаться окончания выделенного для теста интервала времени, либо щелкнуть на кнопке  окна параметров процесса интегрирования, либо использовать клавишу ESC;
- щелкнуть на кнопке **Сохранить** и указать имя файла \*.xv, в котором следует сохранить значения координат; рис. 1.181;
- прервать процесс моделирования с помощью соответствующей кнопки;
- в Инспекторе моделирования объекта следует
  - перейти на закладку **Начальные условия**;
  - прочитать только что сохраненные файл с помощью кнопки ;
  - установить нулевые значения скоростям (кнопка );
  - сохранить координаты в файл с помощью кнопки .

Созданный файл может быть использован в других тестах в качестве начальных условий.

**Замечание.** Вместо теста **Равновесие** может быть использован тест **Натяжение гусеницы**.

### 1.3.4.5.2. Тест: натяжение гусеницы

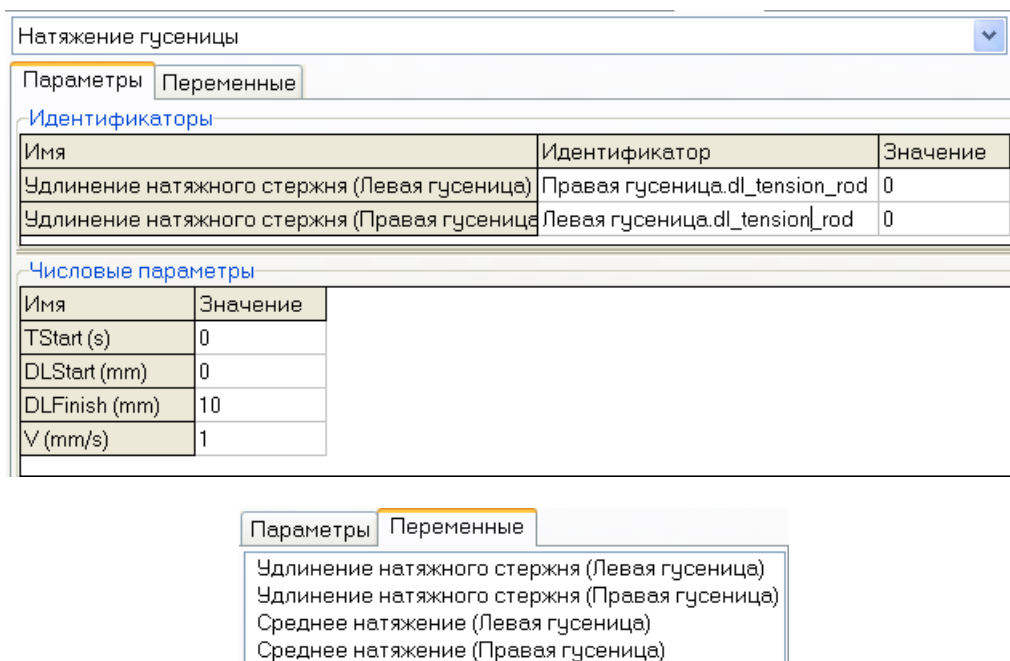


Рис. 1.182. Параметры и переменные теста «Натяжение гусеницы»

#### Цель выполнения теста.

Вспомогательный тест, призванный установить необходимое натяжение гусеницы с жесткими шарнирами. Изменение натяжения происходит в результате увеличения длины силового элемента, моделирующего механизм натяжного устройства, см. п. 1.2.1.4.2. "Направляющее колесо и натяжное устройство", с. 1-34.

**Замечание.** В данном тесте автоматически отключается трение грунта.

#### Инициализация параметров теста.

*Идентификаторы:* указываются идентификаторы для левой и правой гусеницы, параметризующие удлинение силового элемента, натягивающее цепь. Стандартный идентификатор: *dl\_tension\_rod*. Если пользователь использует с этой целью другой идентификатор, то его можно выбрать из списка идентификаторов после двойного щелчка левой кнопкой мыши на поле таблицы с именем идентификатора (рис. 1.182, второй столбец таблицы).

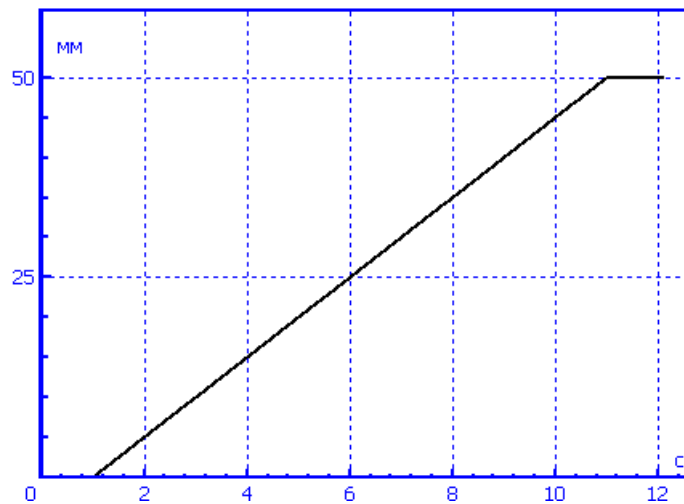


Рис. 1.183. Пример зависимости удлинения от времени

*Числовые параметры* задают процесс изменения длины натяжного стержня (точнее, параметризирующего идентификатора, указанного в таблице):

TStart (с): момент начала удлинения стержня;

DLStart (мм): начальное значение удлинения;

DLFinish (мм): конечное значение удлинения;

V (мм/с): скорость изменения длины.

На рис. 1.183 приведен график зависимости удлинения натяжного элемента в зависимости от времени при следующих значениях параметров:

TStart=1; DLStart=0; DLFinish=50; V=5.

#### **Переменные теста.**

Список стандартных переменных теста (рис. 1.182) гусеницы содержит величину параметра удлинения и усредненное значение  $S$  натяжения для каждой гусеницы, вычисляемое по формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n},$$

где  $S_i$  – сила реакции в  $i$ -м шарнире гусеницы,  $n$  – число траков.

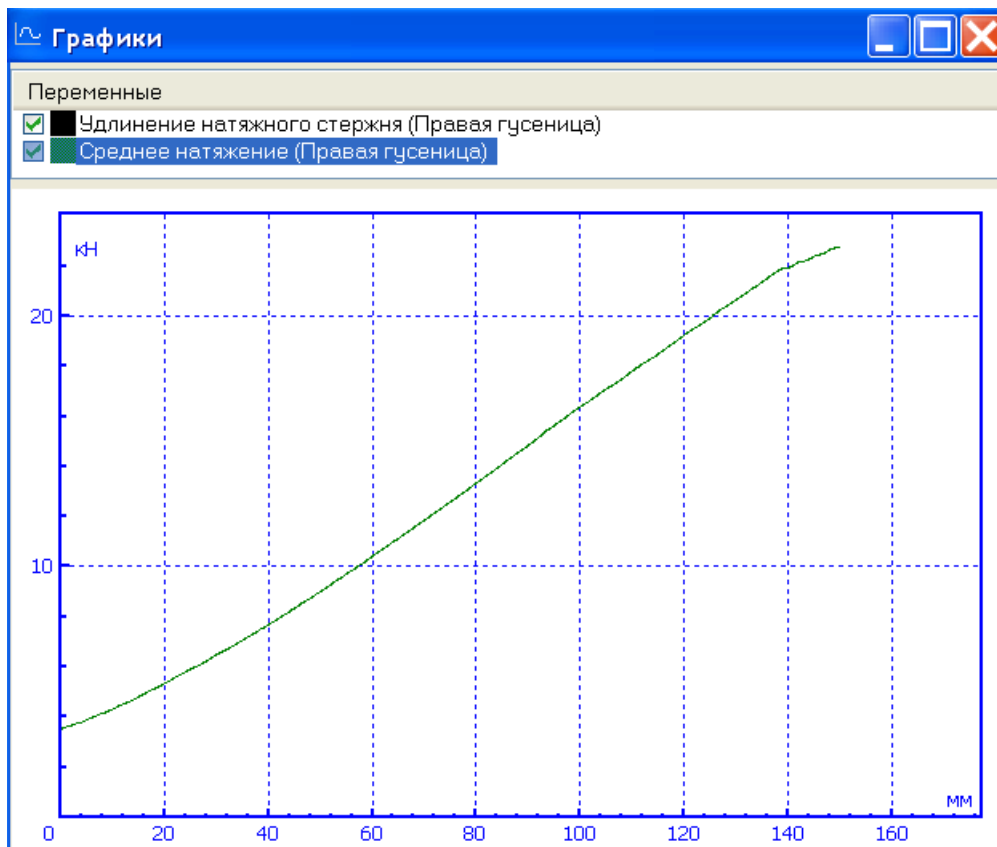


Рис. 1.184. Пример зависимости силы натяжения гусеницы от удлинения

### Результаты теста.

Основным результатом теста является зависимость среднего натяжения гусеницы от удлинения натяжного механизма, пример которой приведен на рис. 1.184. Для получения этого графика следует перед началом моделирования

- открыть новое графическое окно;
- перенести в него мышкой из таблицы на рис. 1.182 две переменные для одной из гусениц (удлинение и среднее натяжение);

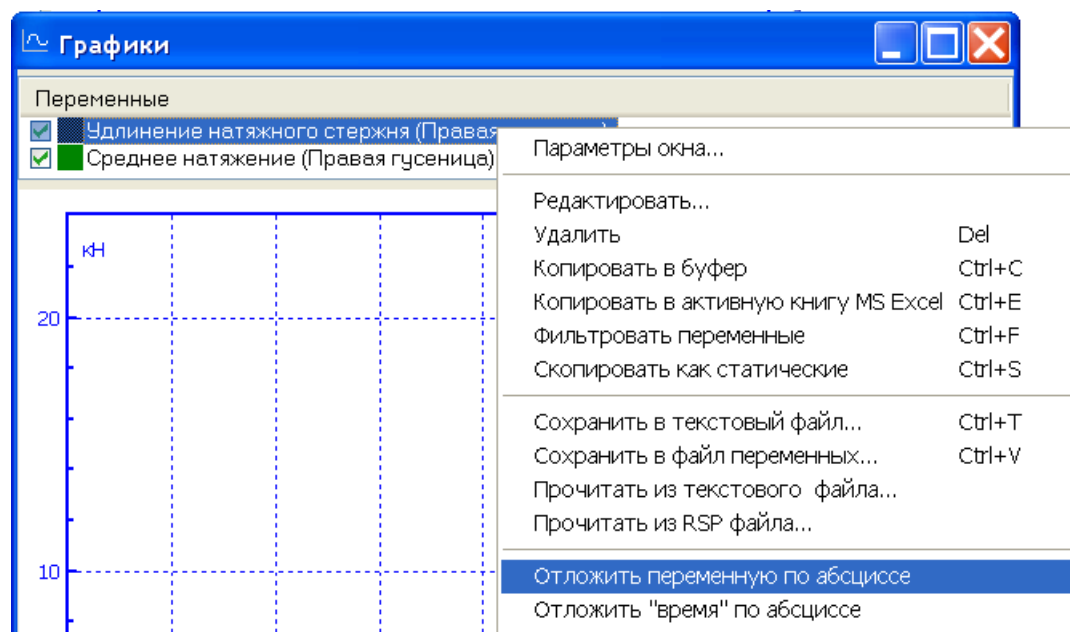


Рис. 1.185. Назначение переменной, откладываемой по абсциссе

- отложить удлинение вдоль оси абсцисс (выделить переменную в списке графического окна, щелчком по правой кнопке мыши вызвать контекстное меню и выполнить команду **Отложить переменную по абсциссе**, рис. 1.185).

После выполнения моделирования следует

- по графику (рис. 1.184) определить удлинение  $l^*$  по необходимому значению натяжения;
- выполнить еще раз этот же тест, задавая в качестве максимального удлинения найденное значение  $l^*$ ;
- после окончания теста в режиме паузы сохранить начальные условия и выполнить действия по назначению этих координат в качестве текущих, описанные в п. 1.3.4.5.1. "*Тест: равновесие*", с. 1-145;
- наконец, задать удлинение  $l^*$  в качестве стандартного в поле «Удлинение натяжного устройства» на вкладке **Настройки | Общие**, п. 1.3.4.1.1. "*Общие настройки*", с. 1-131, рис. 1.156.

**Замечание.** При каждом изменении значения натяжения гусеницы следует повторить данный тест и находить новые значения начальных условий.

1.3.4.5.3. Тест: натяжение через преднатяг

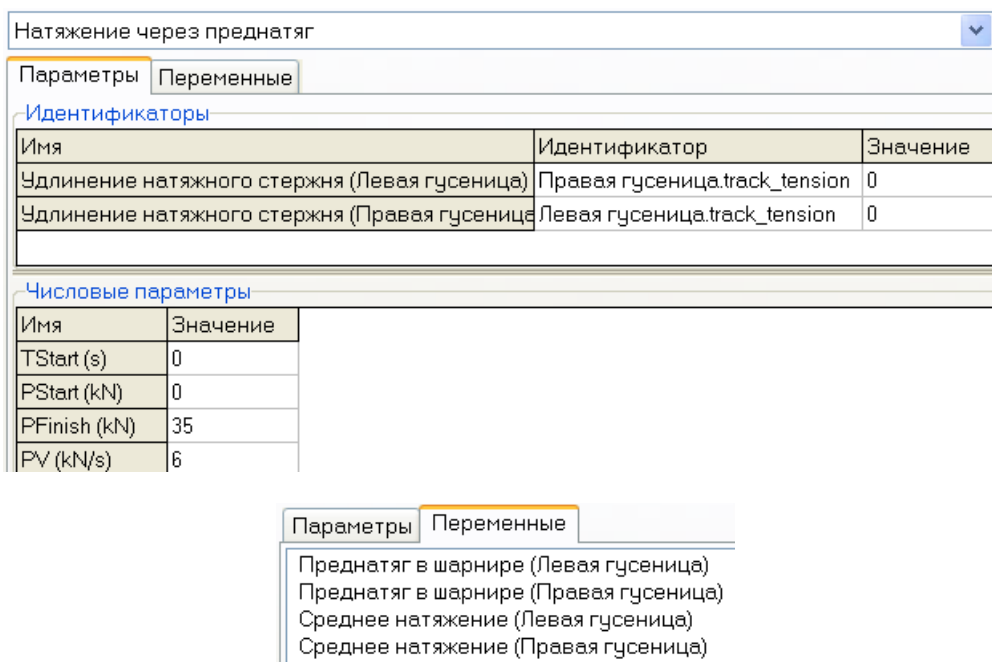


Рис. 1.186. Параметры и переменные теста «Натяжение через преднатяг»

**Цель выполнения теста.**

Вспомогательный тест, призванный установить необходимое натяжение гусеницы с *мягкими и параллельными шарнирами*. Изменение натяжения происходит в результате увеличения параметра преднатяга в упругом шарнире.

**Замечание.** В данном тесте автоматически отключается трение грунта.

**Инициализация параметров теста.**

*Идентификаторы:* указываются идентификаторы для левой и правой гусеницы, параметризующие преднатяг в упругом шарнире. Стандартный идентификатор: track\_tension. Если пользователь использует с этой целью другой идентификатор, то его можно выбрать из списка идентификаторов после двойного щелчка левой кнопкой мыши на поле таблицы с именем идентификатора (рис. 1.186, второй столбец таблицы).

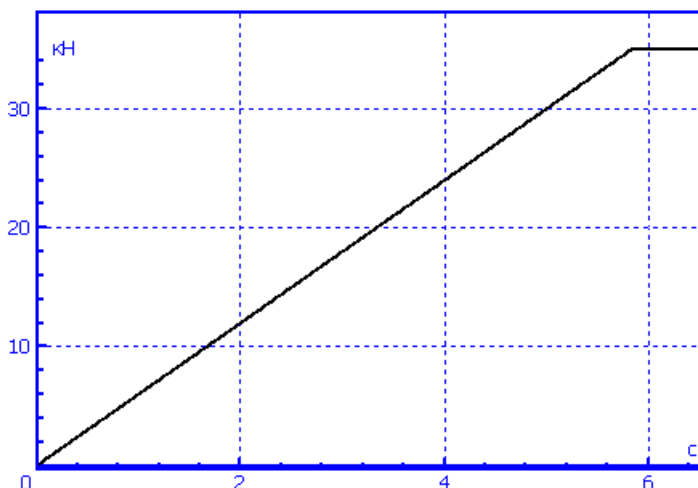


Рис. 1.187. Пример зависимости преднатяга в шарнире от времени

Числовые параметры задают процесс изменения преднатяга (точнее, параметризующего идентификатора, указанного в таблице):

TStart (с): момент начала увеличения натяжения;

PStart (кН): начальное значение преднатяга;

PFinish (кН): конечное значение преднатяга;

PV (кН/с): скорость изменения преднатяга.

На рис. 1.187 приведен график численного значения преднатяга в зависимости от времени при следующих значениях параметров:

$$TStart=0; PStart=0; PFinish=35; V=6.$$

### Переменные теста.

Список стандартных переменных теста (рис. 1.186) гусеницы содержит величину преднатяга и усредненное значение  $S$  натяжения для каждой гусеницы, вычисляемое по формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n},$$

где  $S_i$  – сила в  $i$ -м упругом шарнире гусеницы,  $n$  – число шарниров.

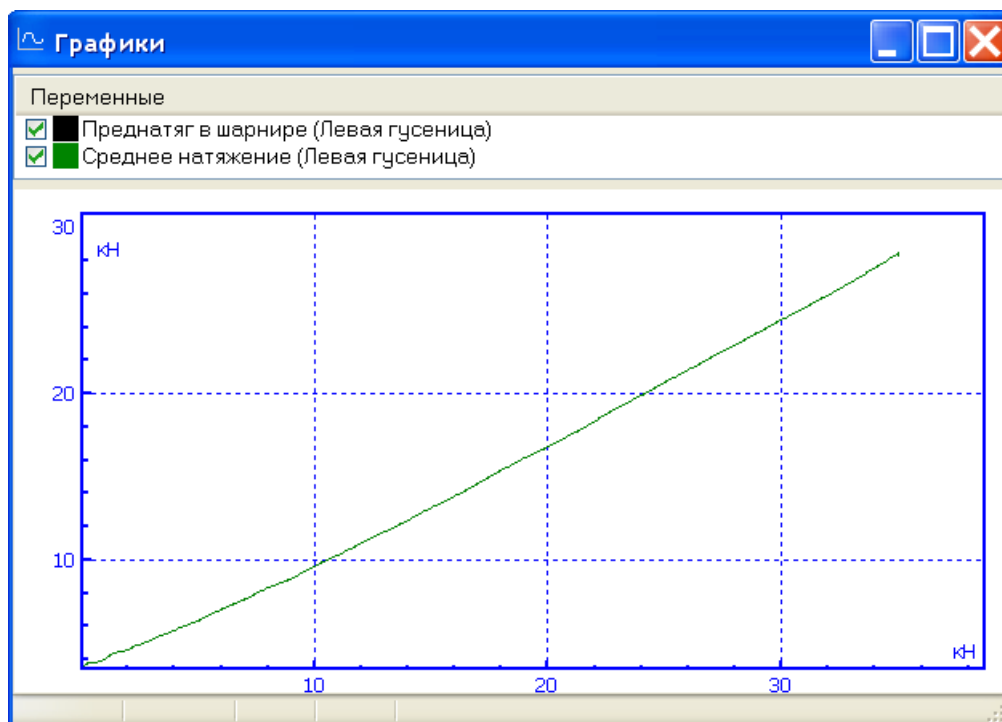


Рис. 1.188. Пример зависимости силы натяжения гусеницы от преднатяга в шарнире

**Результаты теста.**

Основным результатом теста является зависимость среднего натяжения гусеницы от преднатяга в шарнире, пример которой приведен на рис. 1.188. Для получения этого графика следует перед началом моделирования

- открыть новое графическое окно;
- перенести в него мышкой из таблицы на рис. 1.186 две переменные для одной из гусениц (преднатяг и среднее натяжение гусеницы);

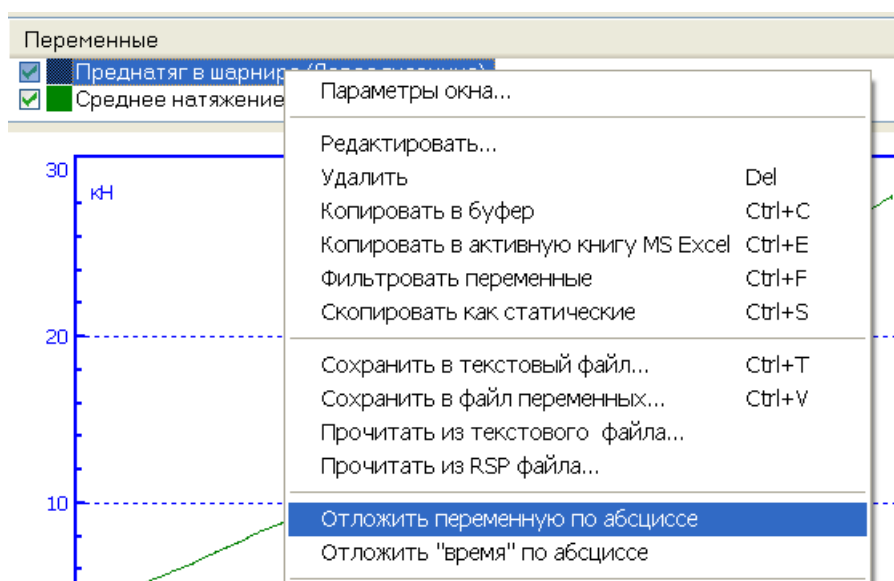


Рис. 1.189. Назначение переменной, откладываемой по абсциссе

- отложить преднатяг вдоль оси абсцисс (выделить переменную в списке графического окна, щелчком по правой кнопке мыши вызвать контекстное меню и выполнить команду **Отложить переменную по абсциссе**, рис. 1.189).

После выполнения моделирования следует

- по графику (рис. 1.188) определить преднатяг  $P^*$  по необходимому значению натяжения;
- выполнить еще раз этот же тест, задавая в качестве максимального преднатяга найденное значение  $P^*$ ;
- после окончания теста в режиме паузы сохранить начальные условия и выполнить действия по назначению этих координат в качестве основных, описанные в п. 1.3.4.5.1. "*Тест: равновесие*", с. 1-145;
- наконец, задать преднатяг  $P^*$  в качестве стандартного в поле «Преднатяг в шарнире» на вкладке **Настройки | Общие**, п. 1.3.4.1.1. "*Общие настройки*", с. 1-131, рис. 1.156.

**Замечание.** При каждом изменении значения натяжения гусеницы следует повторить данный тест и находить новые значения начальных условий.

### 1.3.4.5.4. Тест: вертикальная прокатка

#### Цель выполнения теста.

Вспомогательный тест для определения жесткостной характеристики подвески в виде графика вертикальная сила – перемещение. При выполнении теста к центру масс корпуса прикладывается гармоническая сила, направленная вниз

$$F = F_0(1 - \cos(2\pi ft))/2,$$

где  $F_0$  – максимальное значение силы,  $f$  – частота возмущения в герцах.

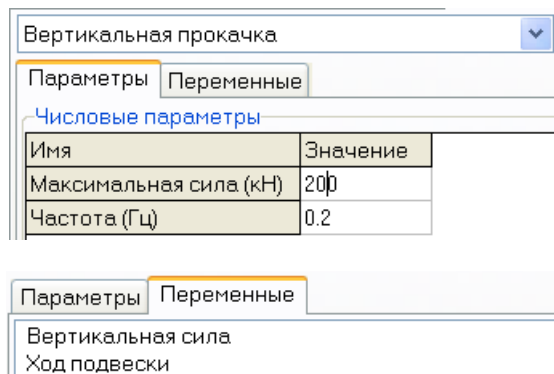


Рис. 1.190. Параметры и переменные теста Вертикальная прокатка

#### Инициализация параметров теста.

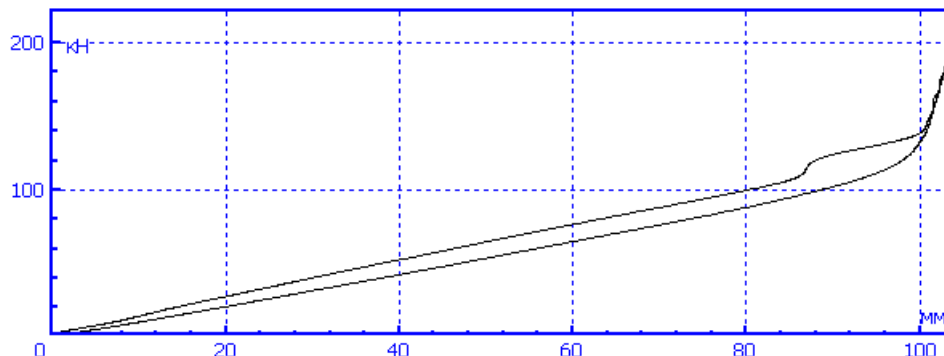
Пользователь задает два числовых параметра: максимальную силу  $F_0$  и частоту возмущения, рис. 1.190.

#### Переменные теста.

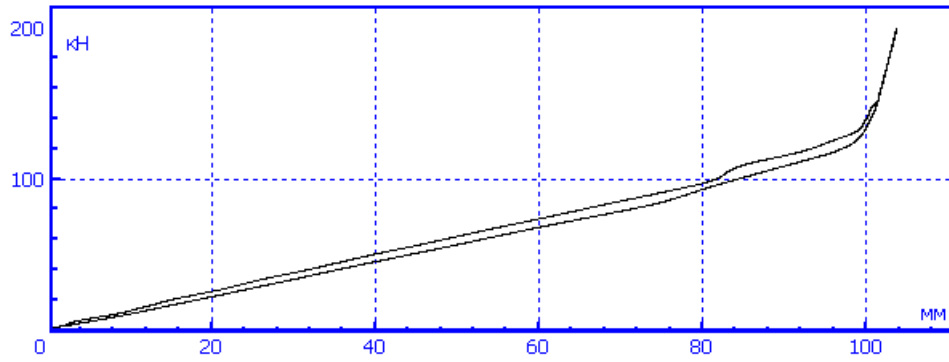
Список стандартных переменных тела содержит значение возмущающей силы (кН) и вертикальное перемещение центра масс корпуса (мм).

#### Результаты теста.

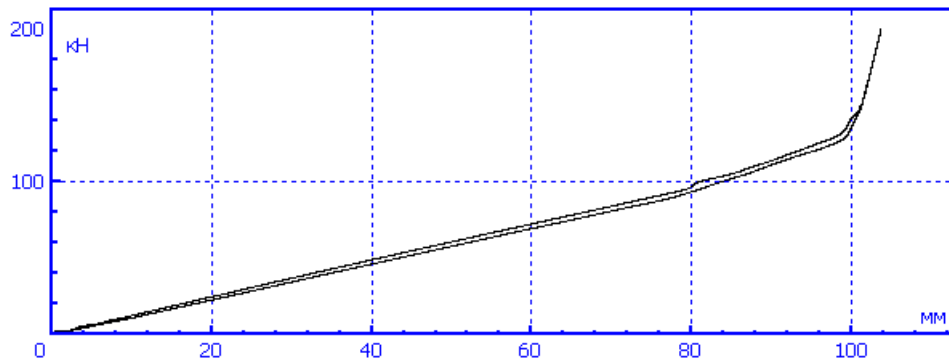
Основным результатом теста является график зависимости между вертикальной нагрузкой и прогибом подвески, характеризующий нелинейную жесткость системы подвески, рис. 1.191.



$f=0.2$  Гц



$f=0.1$  Гц



$f=0.05$  Гц

Рис. 1.191. Пример зависимости перемещения корпуса от величины вертикальной силы при разных значениях частоты возмущения

Для получения этого графика следует перед началом моделирования

- открыть новое графическое окно;
- перенести в него мышкой из таблицы на рис. 1.190 обе переменные;
- отложить переменную «ход подвески» по оси абсцисс.

### 1.3.4.5.5. Тест: расчет начальных скоростей

#### Цель выполнения теста.

Вспомогательный тест, предназначенный для создания файла начальных условий, используемого для расчета начальных скоростей тел в модели ГМ при условии, что начальная скорость продольного движения ГМ отлична от нуля. В результате выполнения этого теста появляется возможность исследовать динамику движения ГМ, движущейся в момент начала моделирования с произвольной заданной пользователем скоростью.

Тест выполняется следующим образом. В начальный момент ГМ неподвижна. Затем производится равноускоренный разгон гусеницы ГМ, при котором корпус ГМ неподвижен, а полотно дороги движется в обратном направлении с постоянным ускорением. После достижения заданной скорости ее увеличение прекращается, то есть полотно дороги начинает двигаться равномерно. После окончания теста пользователю предлагается сохранить результаты в файл. При подтверждении сохранения начальные условия записываются в каталоге модели в файл [численное значение скорости\*10].tvv, например, файл 50.tvv рассчитан при скорости 5 м/с.

При выполнении тестов с продольным движением пользователь может задать любую начальную скорость ГМ. При старте теста программа находит предварительно созданный файл \*.tvv с наиболее близким значением скорости (если таких файлов несколько) и автоматически пересчитывает скорости тел модели с учетом сохраненных в файле значений. Практика показывает, что достаточно создать один файл \*.tvv со средней скоростью движения, чтобы программа удовлетворительно подбирала начальные условия для любой продольной скорости ГМ.

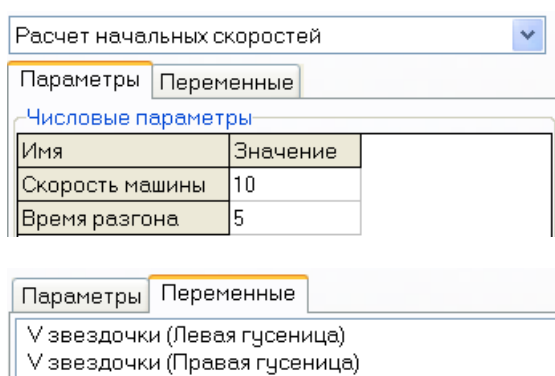


Рис. 1.192. Параметры и переменные теста Расчет начальных скоростей

#### Инициализация параметров теста.

Список параметров теста содержит две численные константы: скорость ГМ и время разгона от нулевой скорости до заданного движения при равномерном увеличении скорости.

#### Переменные теста.

Две стандартные переменные равны окружным скоростям звездочки

$$v = \omega R_s,$$

где  $\omega, R_s$  – угловая скорость ведущего колеса и радиус по центрам цевок. Пример представлен на рис. 1.193.

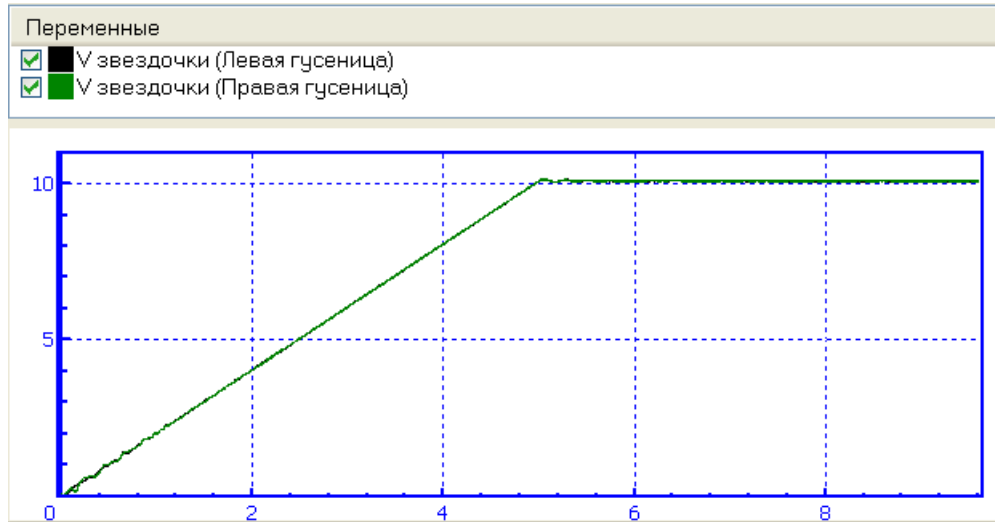


Рис. 1.193. Пример зависимости стандартных переменных от времени при выполнении теста

### 1.3.4.5.6. Тесты с продольным движением ГМ

Имеется три основных теста с продольным движением ГМ:

- движение по прямой;
- управление без обратной связи;
- тест с водителем.

Рассмотрим общие параметры и настройки этих тестов.

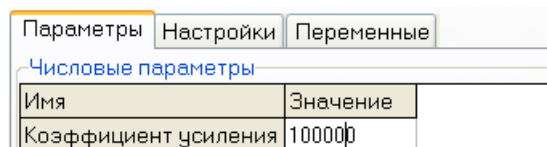


Рис. 1.194. Ввод коэффициента усиления

1. **Коэффициент усиления  $k$**  (рис. 1.194) при управлении окружной скоростью ВК, п. 1.3.2.1. "Общие сведения о модели управления ГМ", с. 1-124.

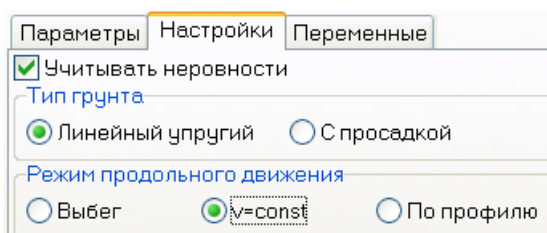


Рис. 1.195. Настройки тестов

2. Ключ **Учитывать неровности** (рис. 1.195) включает/выключает неровности, п. 1.3.4.1.2. "Задание неровностей", с. 1-132.
3. Переключатель **Тип грунта** позволяет выбрать либо модель грунта без учета просадки (п. 1.3.1.2.1. "Модель грунта без учета просадки", с. 1-115), либо грунт с просадкой (п. 1.3.1.2.2. "Модель Беккера грунта с учетом просадки", с. 1-116). В первом случае коэффициент жесткости, доля демпфирования и коэффициент трения, определяющие свойства грунта, задаются в таблице контактных параметров, п. 1.3.4.4.1. "Параметры контактов гусеницы", с. 1-142. Во втором случае – в таблице параметров грунта с просадкой, п. 1.3.4.4.4. "Характеристики грунта с просадкой", с. 1-143.
4. **Режим продольного движения** ГМ позволяет задать один из следующих вариантов:

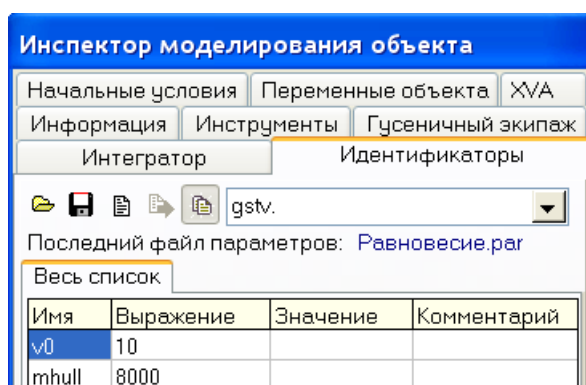


Рис. 1.196. Стандартный идентификатор скорости  $v_0$

- **выбег** (движение по инерции без поддержания скорости – только для теста движения по прямой); начальная скорость задается через стандартный идентификатор  $v_0$  в списке идентификаторов, рис. 1.196;
- **$v=const$**  движение с поддержание постоянной скорости; скорость в данном случае задается через стандартный идентификатор  $v_0$ ;
- **по профилю**: движение с переменной скоростью, заданной графиком.

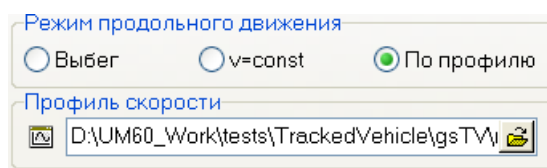



Рис. 1.197. Выбор файла с графиком скорости

В режиме движения по профилю следует выбрать предварительно созданный файл (см. п. 1.3.4.3. "Вкладка "Инструменты": задание скорости", с. 1-140) с законом изменения скорости, используя кнопку  на рис. 1.197.

**Замечание.** Перед выполнением тестов следует выполнить тест расчета начальных скоростей, п. 1.3.4.5.5. "Тест: расчет начальных скоростей", с. 1-158.

### 1.3.4.5.6.1. Тест: движение по прямой

#### Цель выполнения теста.

Данный тест является одним из основных тестов, позволяющих оценить динамику ходовой части ГМ. Моделируется прямолинейное движение ГМ в соответствии с заданным профилем скорости (зависимость скорости от времени или пройденного пути, в частности, при постоянной скорости) с учетом заданных профилей левой и правой колеи.

Профиль поверхности под каждой из гусениц задается на вкладке **Настройки | Неровности**, п. 1.3.4.1.2. "Задание неровностей", с. 1-132.

#### Результаты теста.

К результатам теста относится все стандартные кинематические и динамические характеристики, графики которых могут быть получены с использованием мастера переменных, см. [Главу 4](#), пп. *Мастер переменных, Список переменных*.

### 1.3.4.5.6.2. Тест: управление без обратной связи

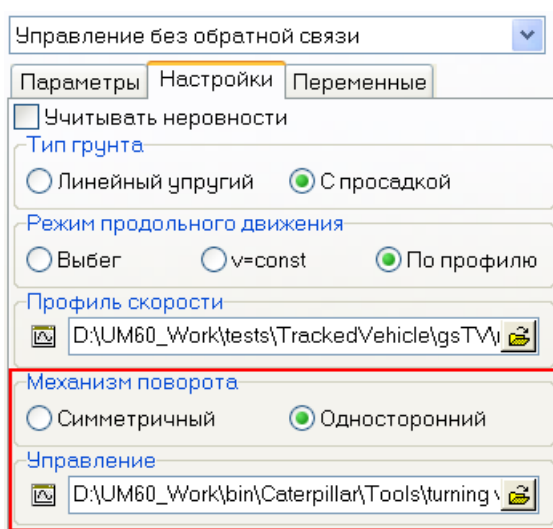


Рис. 1.198. Настройки теста с управлением без обратной связи

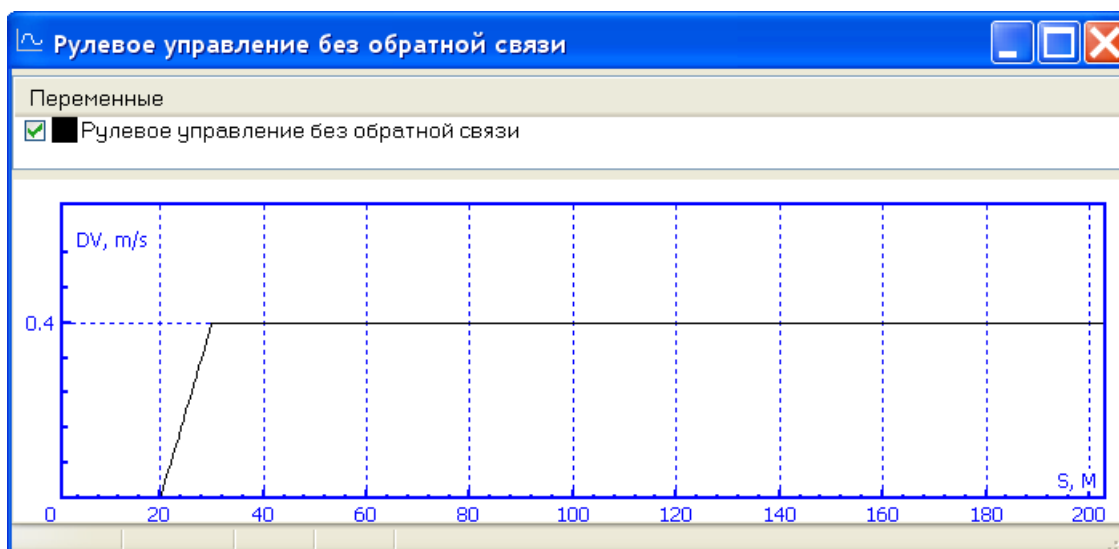


Рис. 1.199. График приращения скорости  $\Delta V$  в зависимости от пройденного пути

**1.3.4.5.6.3. Тест с водителем**

Дополнительно к стандартным параметрам тестов с продольным движением (п. 1.3.4.5.6. "Тесты с продольным движением ГМ", с. 1-159), следует указать, рис. 1.200:

- **механизм поворота**, п. 1.3.2.1. "Общие сведения о модели управления ГМ", с. 1-124;
- **метод задания макрогеометрии:**
  - 2D кривая, п. 1.3.2.3.2. "Плоская кривая", с. 1-126, следует выбрать заранее созданный файл с графиком кривой, которой будет следовать ГМ под управлением модели водителя;
  - 3D полигон, п. 1.3.2.3.3. "Испытательный полигон", с. 1-127, 1.3.4.1.3.1. "Задание маршрутов на испытательном полигон", с. 1-136, следует также выбрать маршрут движения из списка.

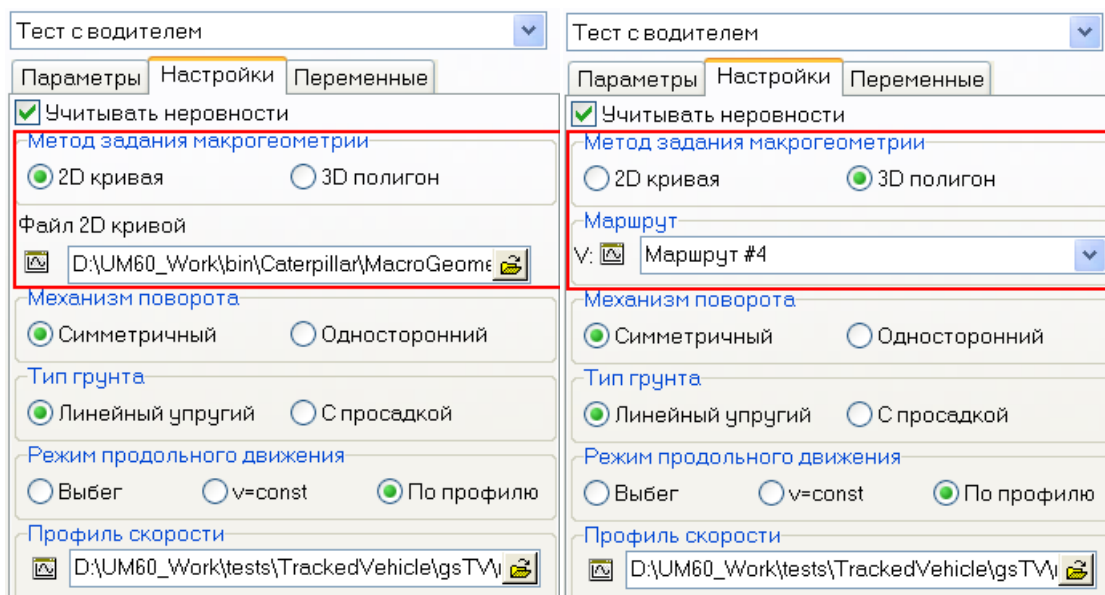


Рис. 1.200. Параметры теста с водителем

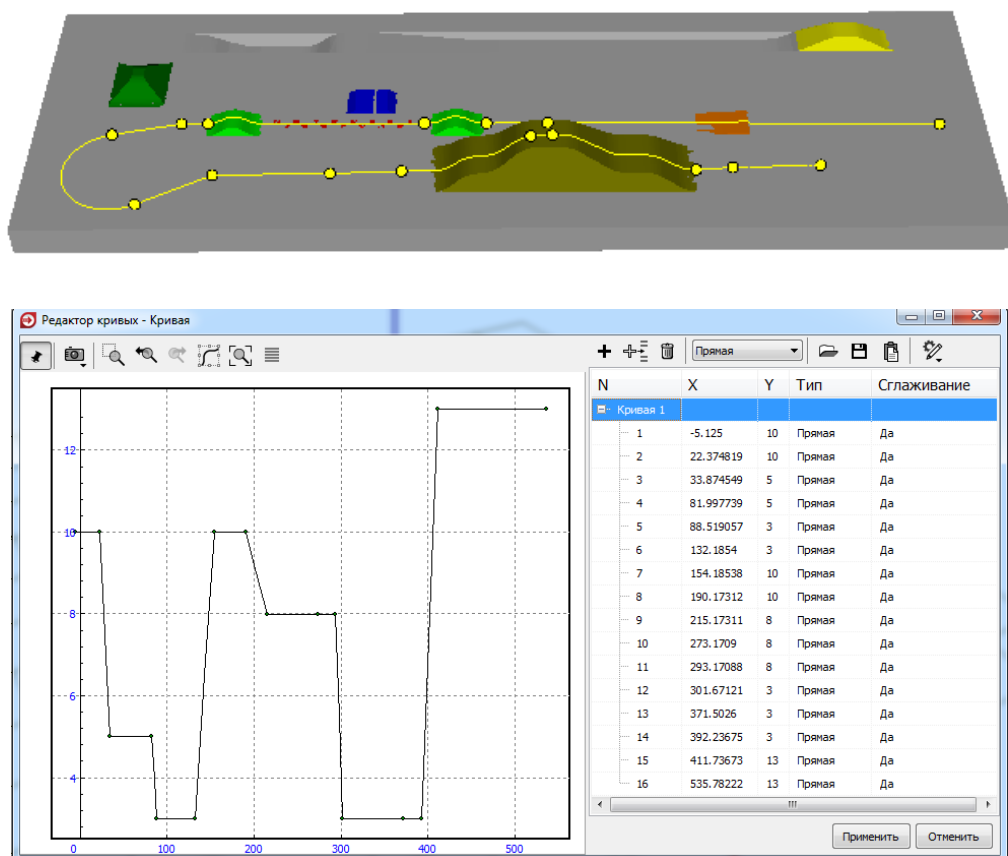

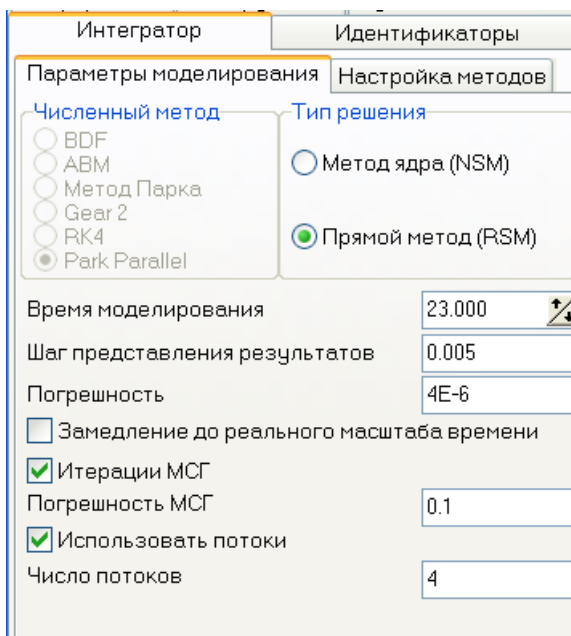


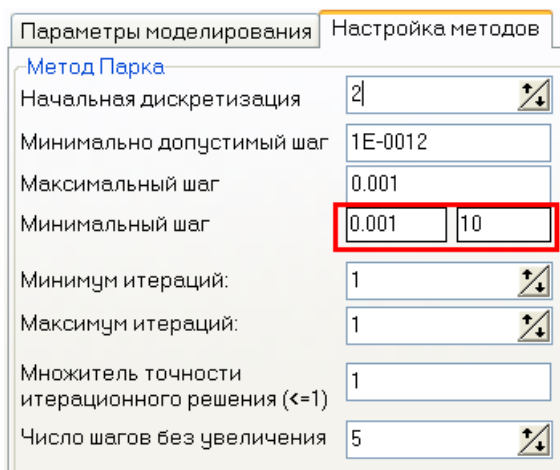
Рис. 1.201. Задание скорости вдоль маршрута. Точки на графике соответствуют маркерам маршрута

Для задания графика скорости движения ГМ по маршруту испытательного полигона следует использовать кнопку . После щелчка на этой кнопке пользователь переходит на вкладку задания скорости, п. 1.3.4.3. "Вкладка "Инструменты": задание скорости", с. 1-140. Автоматически создаваемый график содержит все маркеры маршрута, сдвинутые против оси X на длину ГМ. Пользователь может редактировать график в редакторе кривых, рис. 1.201, сохранить в файл и назначить этот файл на вкладке параметров теста (Профиль скорости, рис. 1.200).

### 1.3.5. Численный метод



а)



б)

Рис. 1.202. Рекомендуемые настройки численного метода

При моделировании динамики ГМ используется численный метод **Park parallel**, разработанный авторами программного комплекса «Универсальный механизм» в 2009 году специально для решения динамических задач большой размерности, в том числе на многоядерных процессорах и впервые реализованный в UM60.

Параметры численного метода устанавливаются на вкладке **Интегратор** инспектора моделирования. Типовые настройки численного метода представлены на рис. 1.202. Следует обратить внимание на следующие особенности численного метода.

1. Флаг **Использовать потоки** следует использовать только в случае многоядерного процессора, в противном случае моделирование будет выполняться медленнее, чем с использованием одного потока;
2. Значение параметра **Число потоков** не должно превосходить число ядер процессора. Пользователю следует опытным путем установить оптимальное число потоков;
3. Параметр **Погрешность МСГ** (метода сопряженных градиентов) подбирается пользователем таким образом, чтобы моделирование выполнялось быстрее.

### 1.3.6. Список специализированных переменных

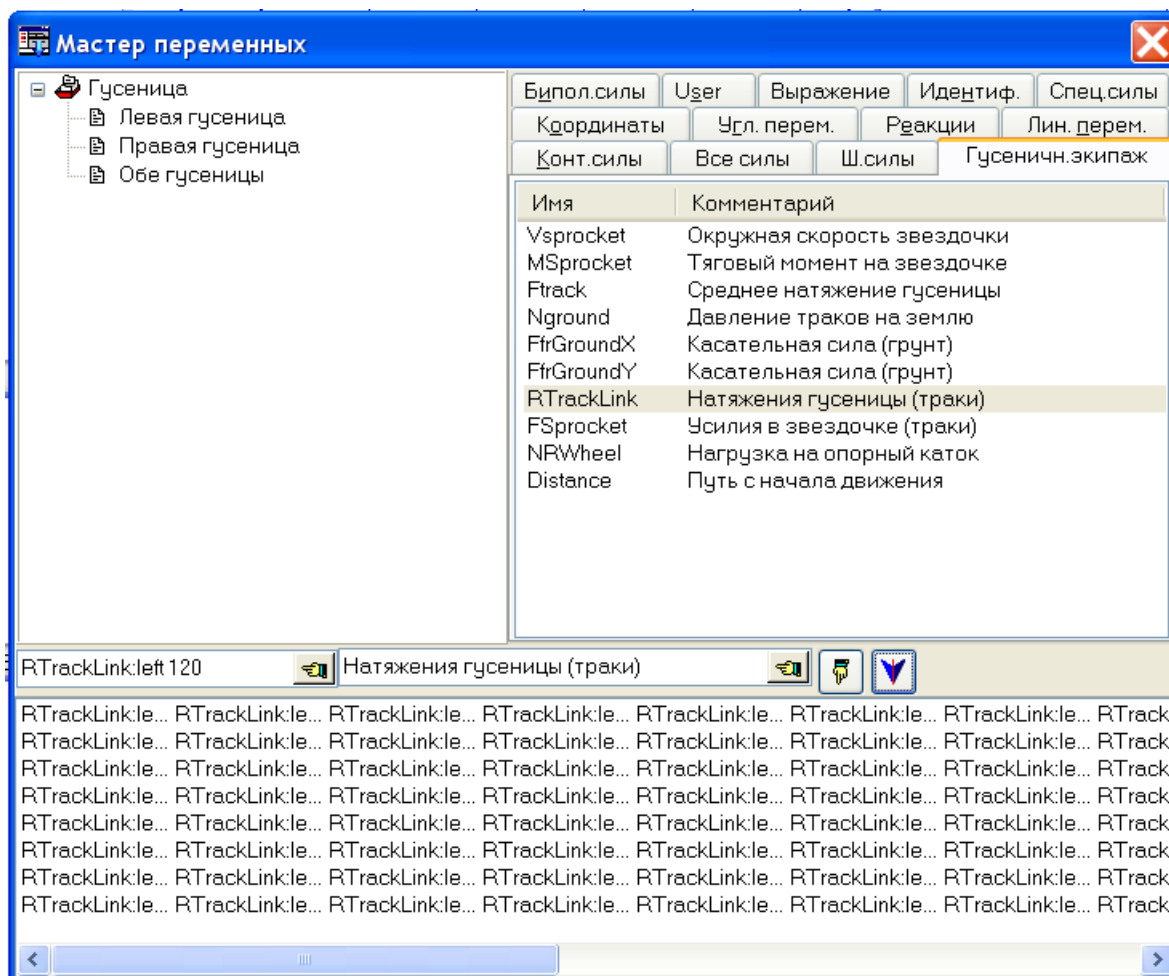



Рис. 1.203. Список специализированных переменных ГМ

Анализ динамики ГМ основан на построении зависимости от времени переменных, определяющих динамику ГМ. Основная часть переменных создается с использованием мастера переменных. Для вызова мастера используется команда меню **Инструменты | Мастер переменных** или кнопка  на панели инструментов. Создание стандартных кинематических и динамических переменных описано в [Главе 4](#), пп. *Мастер переменных*, *Список переменных*.

Здесь мы остановимся только на переменных, относящихся исключительно к динамике ГМ, вкладка **Гусеничный экипаж**, рис. 1.203, табл. 1.23.

Таблица 1.23

Имя переменной	Комментарий
VSpocket	(м/с) Окружная скорость на звездочке $v = \omega R_s$ , где $\omega, R_s$ – угловая скорость ведущего колеса и радиус по центрам цевок.
MSpocket	(Нм) Момент на звездочке при поддержании заданной скорости.
FTrack	(Н) Среднее натяжение гусеницы $S = \sum_{i=1}^n S_i/n$ , где $S_i$ – сила в $i$ -м шарнире гусеницы, $n$ – число траков.
NGround	(Н) Нормальная сила, действующая со стороны трака на грунт. Число переменных равно числу траков
FFrGroundX	(Н) Сила трения, действующая на трак в продольном направлении. Число переменных равно числу траков
FFrGroundY	(Н) Сила трения, действующая на трак в поперечном направлении. Число переменных равно числу траков
RTrackLink	(Н) Продольная сила в шарнире $S_i$ для отдельного трака. Число переменных равно числу траков.
FSpocket	(Н) Модуль силы взаимодействия цевки трака с ведущим колесом. Число переменных равно числу траков.
NRWheel	(Н) Давление на отдельное опорное колесо. Число переменных равно числу опорных колес.
Distance	(м) Путь, пройденный ГМ с момента начала моделирования. Используется для теста движения по прямой.

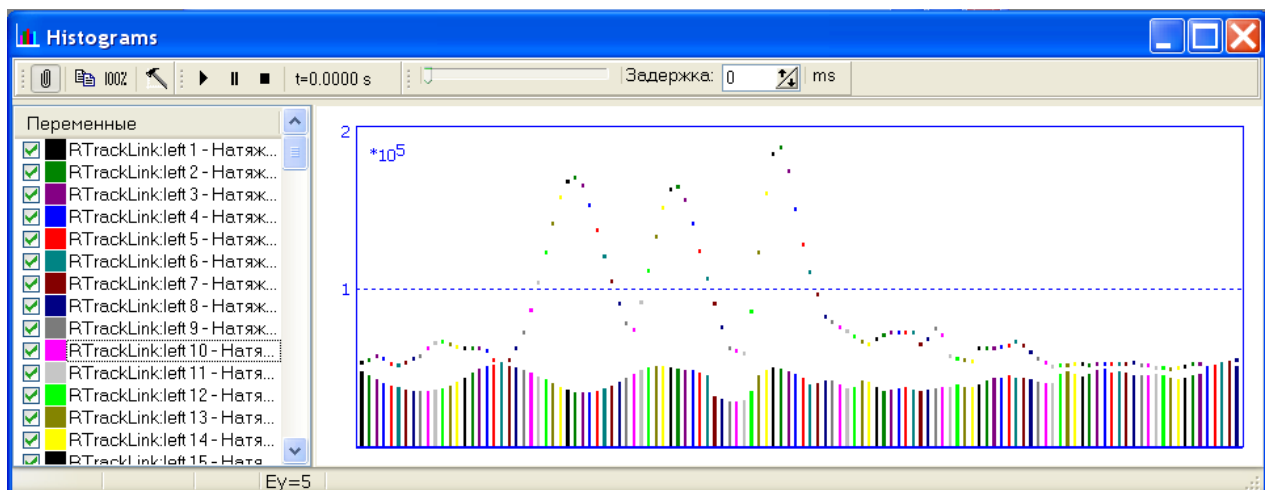


Рис. 1.204. Отображение большого списка переменных в окне гистограмм

**Замечание.** Переменные, число которых равно числу траков, удобно отображать в окне построения гистограмм, рис. 1.204.

### 1.3.7. Особенности организации многовариантных расчетов

Исследование динамики ГМ с использованием модуля планирования численного эксперимента UM Experiments имеет ряд важных особенностей, которые мы обсуждаем в данном разделе.

#### 1.3.7.1. Использование стандартных внутренних идентификаторов

Для удобства организации многовариантных расчетов динамики ГМ в модуле UM Experiments, введены внутренние стандартные идентификаторы для параметров ГМ и неровностей, задаваемых в программе моделирования. Данные идентификаторы могут быть использованы для варьирования соответствующих параметров при составлении плана эксперимента.

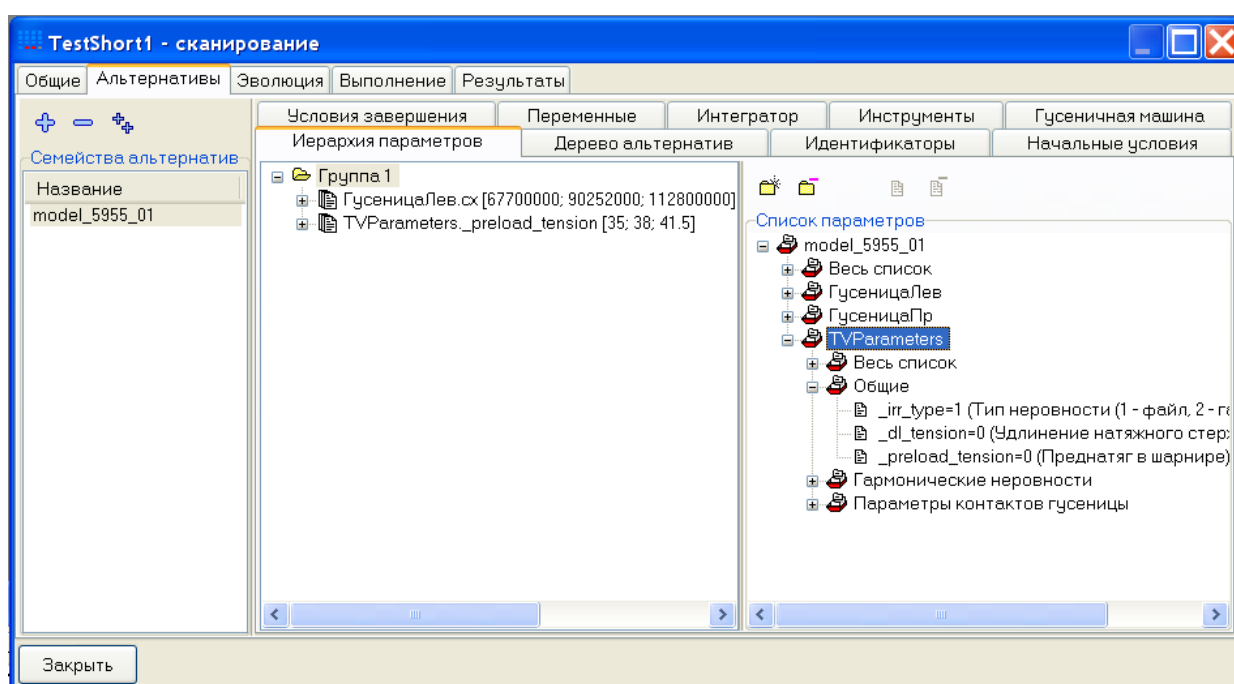


Рис. 1.205. Использование внутренних стандартных идентификаторов

Список внутренних стандартных идентификаторов доступен в дереве параметров на вкладке **Альтернативы | Иерархия параметров | Список параметров**, ветвь **TVParameters**, рис. 1.205.

В примере на рис. 1.205 использован стандартный внутренний идентификатор `_preload_tension` для выполнения трех расчетов при различных значениях продольной жесткости в резинометаллическом шарнире, заданной обычным идентификатором `sx`, при одновременном изменении преднатяга в шарнире, обеспечивающего заданное натяжение гусеницы (см. тест, описанный в п. 1.3.4.5.3. "Тест: натяжение через преднатяг", с. 1-152, см. также рис. 1.156). В соответствии с планом эксперимента будет выполнено три расчета:

- расчет 1: `sx=67 700 000 Н/м, _preload_tension=35 кН;`
- расчет 2: `sx=90 252 000 Н/м, _preload_tension=38 кН;`
- расчет 3: `sx=112 800 000 Н/м, _preload_tension=41.5 кН.`

Полный список стандартных внутренних идентификаторов приведен в табл. 1.24.

Таблица 1.24

**Список стандартных внутренних идентификаторов**

Ветвь дерева идентификаторов	Имя идентификатора	Комментарий
Общие	_irr_type	Тип задания неровностей: 1 – файл, 2 – синусоидальные неровности, п. 1.3.4.1.2. "Задание неровностей", с. 1-132, рис. 1.157.
	_dl_tension	(мм) Удлинение натяжного устройства, п. 1.3.4.1.1. "Общие настройки", с. 1-131, рис. 1.156.
	_preload_tension	(кН), преднатяг в шарнире, п. 1.3.4.1.1. "Общие настройки", с. 1-131, рис. 1.156.
Гармонические неровности см. п. 1.3.4.1.2. "Задание неровностей", с. 1-132, рис. 1.157	_a	(м), амплитуда
	_l	(м) Длина волны
	_x0	(м) Сдвиг фазы левой неровности
Параметры контактов гусеницы см. п. 1.3.4.4. "Вкладка "Идентификация", с. 1-141.	_c_ground	(Н/м) Жесткость контакта грунт/трак
	_beta_ground	(Нс/м) Доля демпфирования в контакте грунт/трак
	_ffr_ground	Коэффициент трения в контакте грунт/трак
	_c_sprocket	(Н/м) Жесткость контакта звездочка/цевка
	_beta_sprocket	Доля демпфирования контакта звездочка/цевка
	_ffr_sprocket	Коэффициент трения контакта звездочка/цевка
	_c_roadwheel	(Н/м) Жесткость контакта опорный каток/трак
	_beta_roadwheel	Доля демпфирования контакта опорный каток/трак
	_ffr_wheel	Коэффициент трения контакта опорный каток/трак
	_c_idler	(Н/м) Жесткость контакта направляющее колесо/трак
	_beta_idler	Доля демпфирования контакта направляющее колесо/трак
_c_roller	(Н/м) Жесткость контакта поддерживаю-	

		щий каток/трак
	_beta_roller	Доля демпфирования поддерживающий каток/трак
	_c_lateral	(Н/м) Поперечная жесткость при смещении трака относительно катка
	_beta_lateral	Доля демпфирования при смещении трака относительно катка
	_h_guidetooth	(мм) Высота гребня звена

Приведем пример многовариантного расчета движения по неровностям различной длины и высоты с разными скоростями, рис. 1.206.

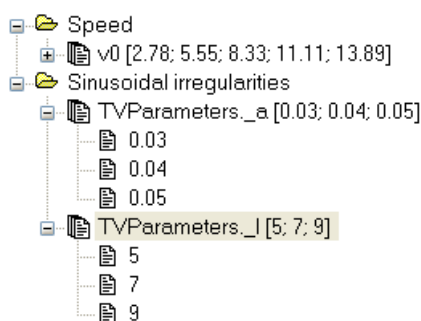


Рис. 1.206. Расчет движения по неровностям с разными скоростями

В данном примере составлен план численного эксперимента, содержащего 15 расчетов при пяти значениях скоростей (10, 20, 30, 40, 50 км/ч). Для каждого значения скорости ГМ движется по трем вариантам синусоидальных неровностей:

- вариант 1: амплитуда 3 см, длина 5 м;
- вариант 2: амплитуда 4 см, длина 7 м;
- вариант 3: амплитуда 5 см, длина 9 м.

### 1.3.7.2. Условие завершения численных экспериментов по пройденному пути

При планировании экспериментов с движением ГМ с различной скоростью удобно задать условие завершения каждого эксперимента не по времени, а по пройденному пути. В результате во всех экспериментах путь, пройденный ГМ, будет одинаковым. Для этого при создании плана экспериментов следует выполнить следующие действия:

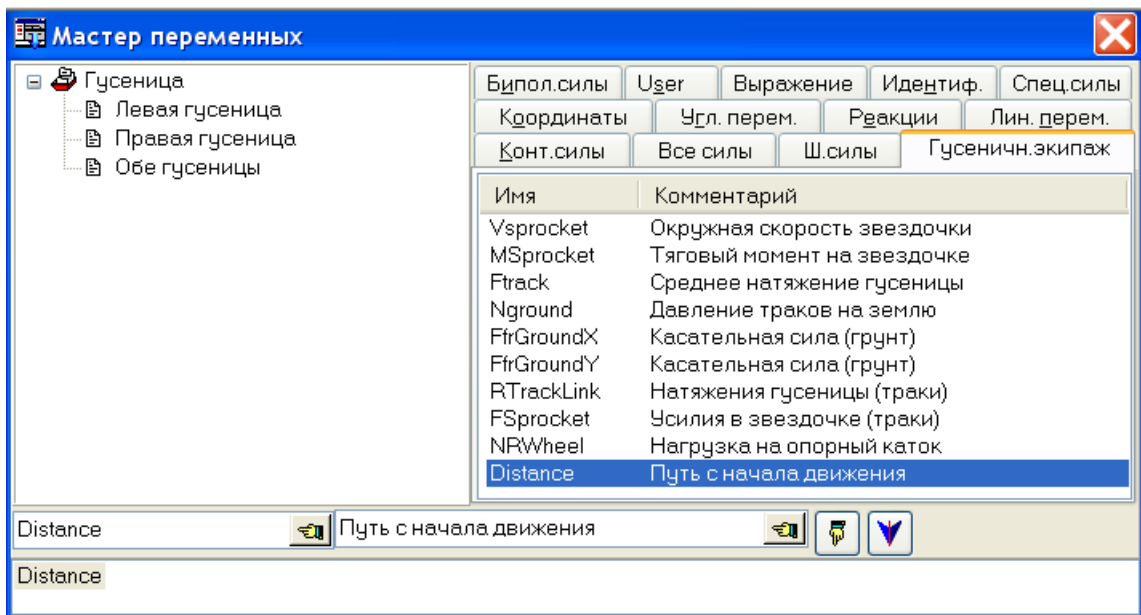


Рис. 1.207. Переменная: пройденный путь

- создать переменную, соответствующую пройденному пути в мастере переменных, рис. 1.207;
- перетащить переменную с помощью мышки в поле на вкладке **Альтернативы** | **Условия завершения**, рис. 1.208;

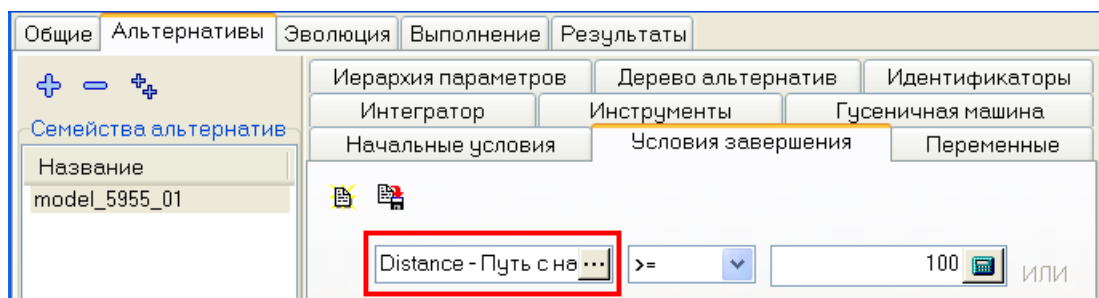


Рис. 1.208. Задание условия завершения

- задать значение пройденного пути (100 м на рис. 1.208).

## Список литературы

- [1] Гусеничные транспортеры-тягачи / Под ред. В.Ф. Платонова. М.: Машиностроение. 1972.
- [2] Барский И.Б. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 1980. 335 с.
- [3] Медведев М.И. Гусеничное сцепление трактора. М.: Машиностроение, 1985. 268 с.
- [4] Вонг. Дж. Динамика наземных транспортных средств. – М.: Машиностроение. 1982. 284 с.
- [5] Edwards P., Differentials, the Theory and Practice. 3. Tank steering systems. Constructor Quarterly, No. 1, Sept 1988.
- [6] Johns W.E., Tracked Vehicle Steering. <http://www.gizmology.net/tracked.htm>.
- [7] Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность-машина. М.: Машиностроение. 1973.- 520с.
- [8] Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение. 1975.
- [9] Аэродинамика автомобиля / Под ред. В.-Г.Гухо. М.: Машиностроение. 1987. 424 с.
- [10] Буров С.С. Конструкция и расчет танков. — М.: ВА БТВ, 1973. — 603 с.