



Начинаем работать



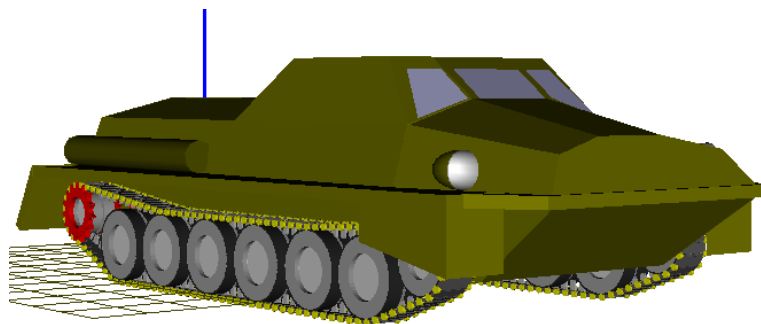
# Создание моделей и анализ динамики гусеничных машин

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ГМ .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. СОЗДАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ И ДОБАВЛЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ – ГУСЕНИЦЫ .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. ЗАДАНИЕ СТРУКТУРЫ ГУСЕНИЦЫ .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. СОЗДАНИЕ ПОДВЕСКИ.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5. ДОБАВЛЕНИЕ ВЕДУЩЕГО КОЛЕСА .....</b>	<b>11</b>
<b>1.6. ДОБАВЛЕНИЕ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КОЛЕСА .....</b>	<b>13</b>
<b>1.7. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ГУСЕНИЧНОЙ ЦЕПИ .....</b>	<b>14</b>
<b>1.8. ДОБАВЛЕНИЕ АМОРТИЗАТОРОВ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.9. СОЗДАНИЕ ПОЛНОЙ МОДЕЛИ ГМ .....</b>	<b>18</b>
1.9.1. Добавление тела: корпус ГМ .....	18
1.9.2. Присоединение гусеницы к корпусу .....	20
1.9.3. Добавление второй гусеницы и ее присоединение к корпусу ГМ.....	21
1.9.4. Поправка положения ГМ в вертикальном направлении .....	22
<b>2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГМ.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ТЕСТЫ .....</b>	<b>27</b>
2.2.1. Тест на равновесие .....	27
2.2.2. Натяжение гусеницы .....	30
2.2.3. Вертикальная прокатка .....	34
2.2.4. Тест начальных скоростей .....	35
<b>2.3. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГМ.....</b>	<b>36</b>
2.3.1. Движение по пути с гармоническими неровностями .....	36
2.3.2. Моделирование прыжка .....	39
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>40</b>

# 1. Введение

Данное руководство поможет пользователю понять основные принципы создания моделей гусеничных машин (ГМ) в программном комплексе «Универсальный механизм» (UM), методы и приемы моделирования их динамических свойств. Модель ГМ, которая будет создаваться с использованием данного руководства, представлена ниже.



Модель ГМ

Предполагается, что пользователь ознакомился с разделом руководства, посвященном введению в моделирование в ПК UM (файл [gs\\_UM.pdf](#)<sup>1</sup>), и умеет выполнять в UM простые действия: создать новую модель, добавлять тела и шарниры (**UM Input**) и работать в программе моделирования движения (**UM Simulation**).

Введение в модуль моделирования ГМ не охватывает все возможности UM в данном направлении. Подробная информация о модуле содержится в [Главе 18](#) руководства пользователя, файл **18\_UM\_Caterpillar.pdf**.

Готовая модель ГМ, созданию которой посвящено данное руководство, включено в список моделей, поставляемых вместе с UM. Путь к модели:

[{Данные UM}\SAMPLES\Tracked\\_Vehicles\gsTV.](#)

---

<sup>1</sup> [www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs\\_um.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs_um.pdf)

## 2. Создание модели ГМ

### 2.1. Исходные данные

В качестве прототипа для модели ГМ рассматривается быстроходный легкий транспортер – тягач. На рис. 2.1 представлены некоторые данные о конструкции и геометрических параметрах движителя этой машины, взятые из работы [1].

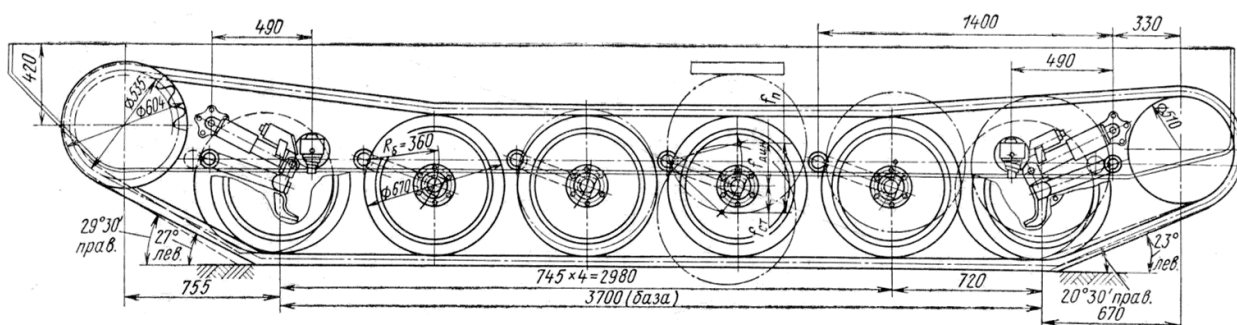




Рис. 2.1. Исходные данные для модели ГМ

Напомним, что целью данного раздела документации является помощь пользователю в изучении последовательности работы с модулем моделирования ГМ. Поэтому при разработке модели не предполагается точное следование конструктивным особенностям и точным значениям параметров реального прототипа.

## 2.2. Создание новой модели и добавление подсистемы – гусеницы

1. Откройте программу ввода **UM Input** и создайте новую модель с помощью команды меню **Файл | Новый объект** или с помощью кнопки  на панели инструментов.
2. Сохраните модель под некоторым именем с помощью команды меню **Файл | Сохранить как...** или с помощью кнопки  на панели инструментов.
3. Добавьте подсистему **Гусеница**. Для этого
  - в списке элементов выделите мышкой пункт **Подсистемы**
  - щелкните правой кнопкой мыши на данном пункте списка и выполните команду контекстного меню **Добавить элемент в группу «Подсистемы» | Гусеница**, рис. 2.2.

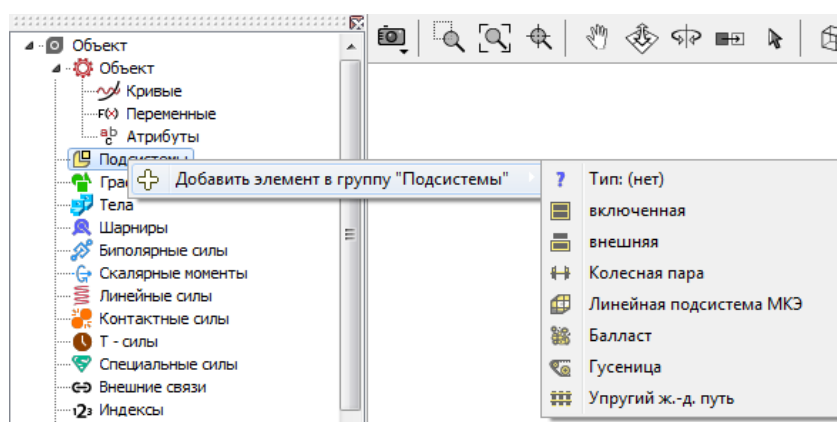


Рис. 2.2. Добавление подсистемы типа «Гусеница»

В результате этих действий в окне инспектора появляется мастер модели гусеницы.

В редактируемое поле **Имя инспектора** измените имя подсистемы на **Левая гусеница**.

## 2.3. Задание структуры гусеницы

1. Моделируемая ГМ имеет индивидуальную торсионную подвеску, содержащую шесть опорных катков. Каждый каток будет описан отдельной стандартной подсистемой, см. Гл. 18, п. Блок индивидуальной торсионной подвески. Поэтому в поле **Подсистемы подвески** на вкладке **Параметры | Структура** инспектора следует задать 6 подсистем, рис. 2.3.
2. ГМ не имеет поддерживающих катков, поэтому указываем 0 в соответствующем поле на рис. 2.3.
3. Гусеничный обвод тягача МТ-Л с шестью опорными катками имеет 108 звеньев (траков).

Параметры

Идентификатор: Subs1

Звездочка    Направляющее колесо

Структура    Гусеница    Подвеска

Привод

Задний     Передний

Положение гусеницы

Левая     Правая

Отдельное направляющее колесо

Подсистемы подвески: 6

Поддерживающие катки: 0

Траки: 108

Рис. 2.3. Параметры структуры гусеницы

## 2.4. Создание подвески

Поскольку мы указали 6 подсистем подвески, то в таблице геометрических данных на вкладке **Параметры | Подвеска** инспектора автоматически появляются шесть полей для продольных координат, определяющих положение каждой из подсистем ( $X_{c1} \dots X_{c6}$ ), рис. 2.4. Кроме того, в таблице следует задать радиус опорных катков ( $R$ ) и их ширину ( $W$ ). Все размеры указываются в метрах. Тип подвески (индивидуальная торсионная) задается на этой же вкладке. В нашем случае следует оставить значение “по умолчанию”: *torsion\_bar\_wheel*.

Параметры

Идентификатор: Subs1

Звездочка	Направляющее колесо	
Структура	Гусеница	Подвеска

Тип подвески:  
torsion\_bar\_wheel

Синтезировать

Число подсистем:

Параметр	Значение
R	0.35
W	0.3
Xc1	0
Xc2	0
Xc3	0
Xc4	0
Xc5	0
Xc6	0

Рис. 2.4. Неинициализированные значения геометрических параметров подвески

Следуя данным на рис. 2.1, заполняем поля таблицы конкретными числовыми значениями, рис. 2.5. Обратите внимание, что начало отсчета в продольном направлении расположено на уровне ведущего колеса.

Структура		Гусеница		Подвеска	
Тип подвески:					
torsion_bar_wheel					
Синтезировать					
Число подсистем:					
Параметр	Значение				
R	0.335				
W	0.3				
Xc1	0.755				
Xc2	1.5				
Xc3	2.245				
Xc4	2.99				
Xc5	3.735				
Xc6	4.455				

Рис. 2.5. Значения геометрических параметров подвески тягача МТ-Л

Щелкните на кнопке **Синтезировать** для создания модели подсистемы по введенным данным; подвеска отобразится в анимационном окне, рис. 2.6.

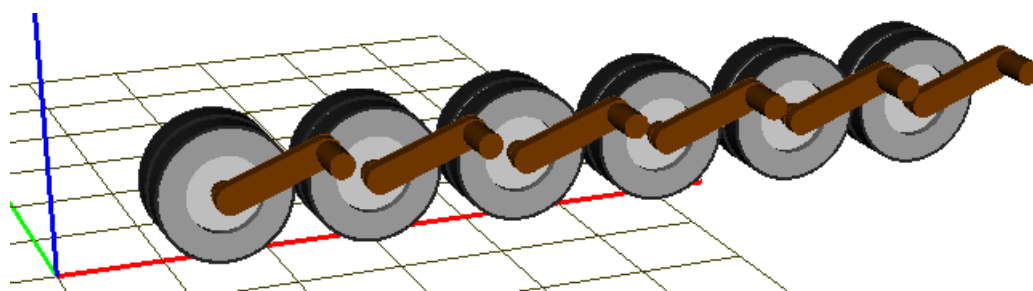
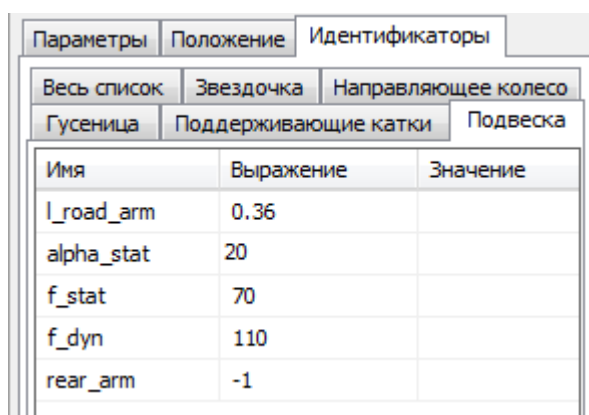


Рис. 2.6. Первый вариант подвески

Теперь надо скорректировать параметры подвески. Для этого используется вкладка **Идентификаторы | Подвеска** инспектора, рис. 2.7. Установите значение длины рычага торсиона 0.36 м (идентификатор  $l_{road\_arm}$ ). Поскольку все подсистемы подвески содержит одинаковый набор идентификаторов, то появляется окно, в котором надо указать, в каких подсистемах принять введенное значение параметра, рис. 2.8. По умолчанию значение назначается всем одноименным идентификаторам.



Имя	Выражение	Значение
l_road_arm	0.36	
alpha_stat	20	
f_stat	70	
f_dyn	110	
rear_arm	-1	

Рис. 2.7. Параметры торсионной подвески

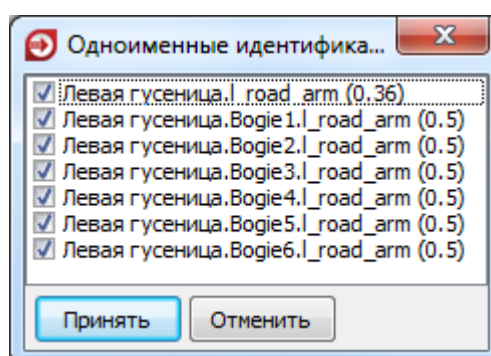


Рис. 2.8. Назначение численного значения подсистемам

Значения идентификаторов, определяющих положение подвески при статическом положении ( $\alpha_{stat}$ ), статический ( $f_{stat}$ ) и максимальный динамический ( $f_{dyn}$ ) прогибы оставим без изменения (см. [Главу 18](#) руководства, п. *Блок индивидуальной торсионной подвески*).

Как видно на рис. 2.1, у пяти катков балансиры должны быть направлены по ходу назад, а у переднего – по ходу вперед. В нашей же модели пока все балансиры направлены по ходу вперед. За данное направление отвечает идентификатор ( $rear\_arm$ ). При этом направлению назад соответствует значение +1. Для того, чтобы задать нужные направления балансирам, назначьте идентификатору  $rear\_arm$  на рис. 2.7 значение +1 и нажмите клавишу Enter. В окне назначения одноименных идентификаторов снимите галочку в последней строке, рис. 2.9. В результате у пяти первых катков направления балансиров изменятся на противоположные, рис. 2.10.

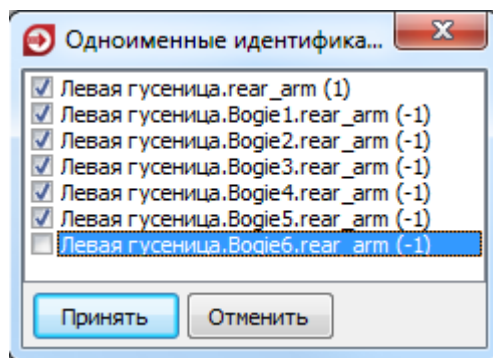


Рис. 2.9. Направления балансиров

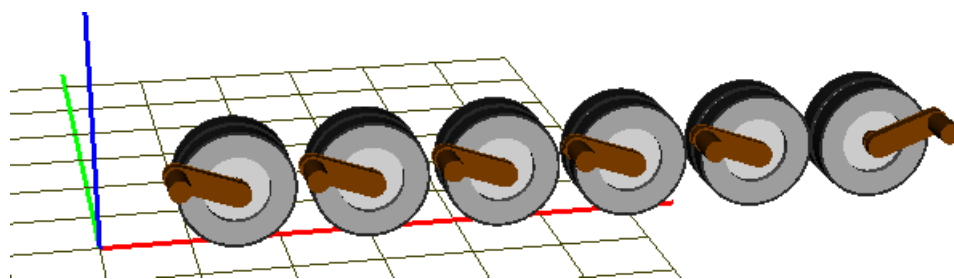




Рис. 2.10. Подвеска с модифицированными значениями параметров

## 2.5. Добавление ведущего колеса

На вкладке **Параметры** | **Звездочка** (рис. 2.11) выполните следующие действия.

Назначьте профиль зубу звездочки с помощью встроенного редактора кривых. Для этого

- щелчком на кнопке  откройте редактор, рис. 2.12.
- используя кнопку , прочитайте заранее созданный файл с профилем {Данные УМ}\Caterpillar\Profiles\Sprocket1.spf.

В таблице задайте число зубьев, отношение шага ведущего колеса к длине звена гусеницы  $t_k / t_r$  и геометрические параметры: ширину, вертикальную и продольную координаты центра, рис. 2.11.

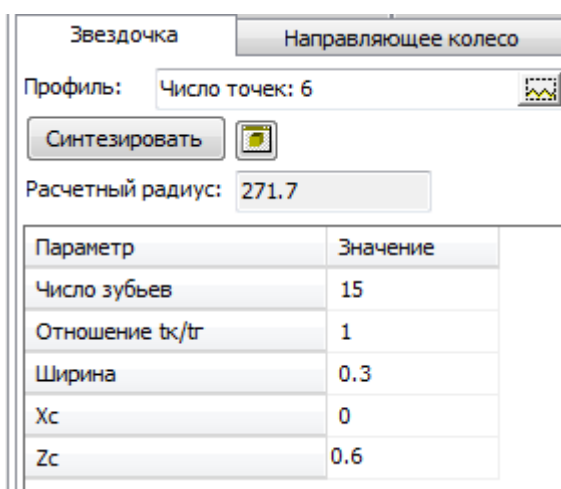


Рис. 2.11. Геометрические параметры звездочки

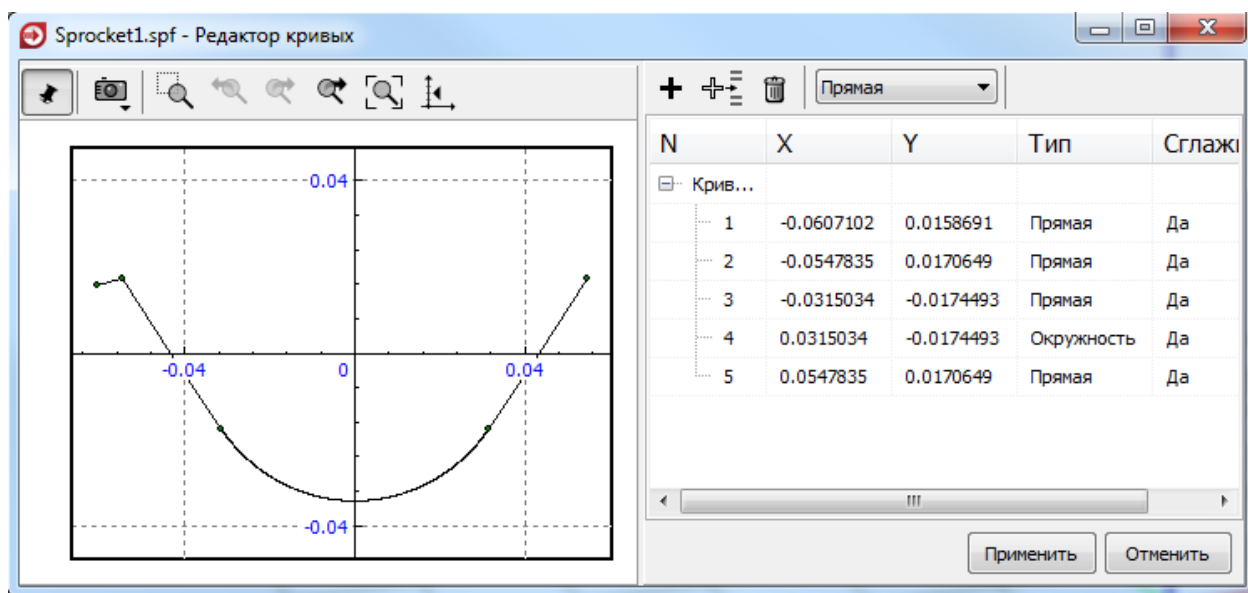



Рис. 2.12. Профиль зуба

Используйте кнопку  для предварительного просмотра образа звездочки, рис. 2.13. Обратите внимание, что радиус звездочки рассчитывается автоматически по длине отдельного звена цепи и по числу зубьев, и в результирующем варианте может не соответствовать предварительному просмотру.

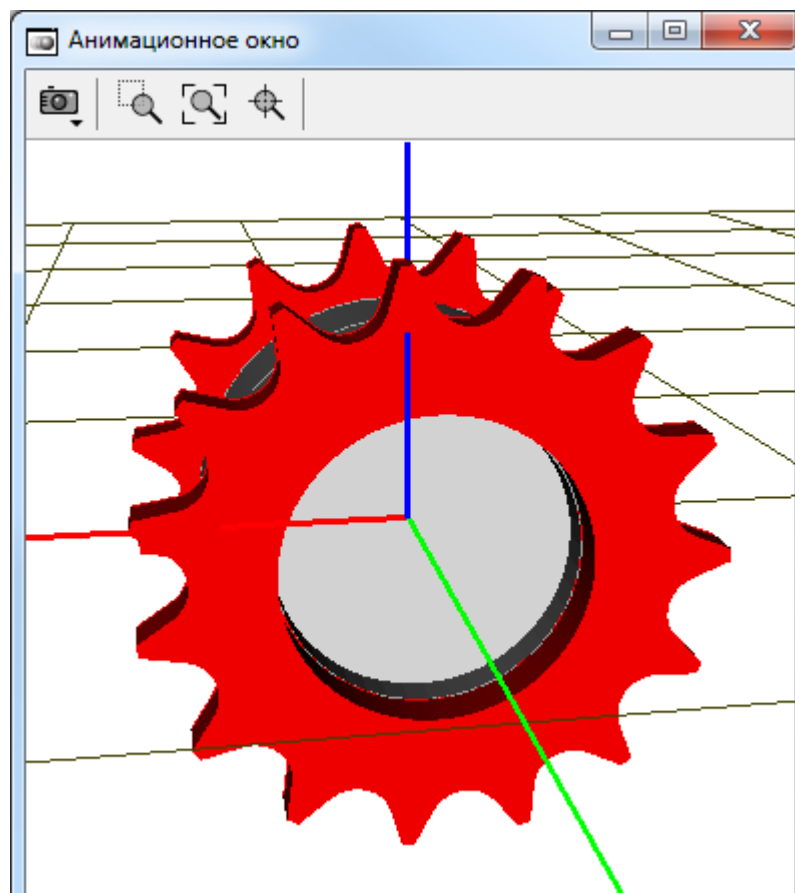


Рис. 2.13. Окно предварительного просмотра звездочки

Используйте кнопку **Синтезировать** для добавления ведущего колеса к модели, рис. 2.14.

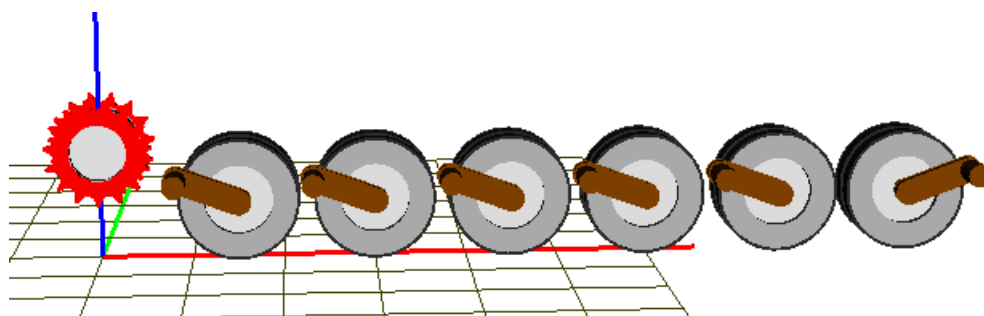


Рис. 2.14. Добавление звездочки

## 2.6. Добавление направляющего колеса

На вкладке **Параметры** | **Направляющее колесо**, рис. 2.15.

Выберите упрощенную модель направляющего колеса на кривошипе (тип: `idler_crank_simple`).

В таблице задайте геометрические параметры направляющего колеса (в метрах), как указано на рис. 2.15: радиус, ширину и координаты центра.

Звездочка		Направляющее колесо	
Тип колеса с натяжным устройством:			
idler_crank_simple			
<input type="button" value="Синтезировать"/>			
Параметр	Значение		
R	0.255		
W	0.3		
Xc	5.125		
Zc	0.495		

Рис. 2.15. Параметры направляющего колеса

Используйте кнопку **Синтезировать** для добавления направляющего колеса к модели, рис. 2.16.

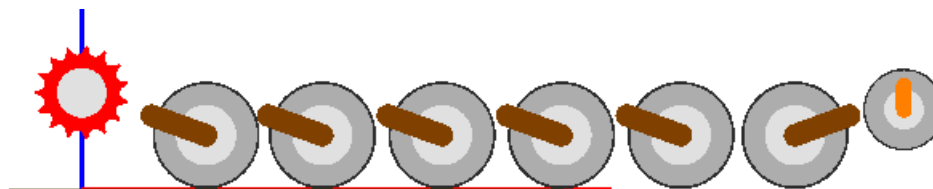
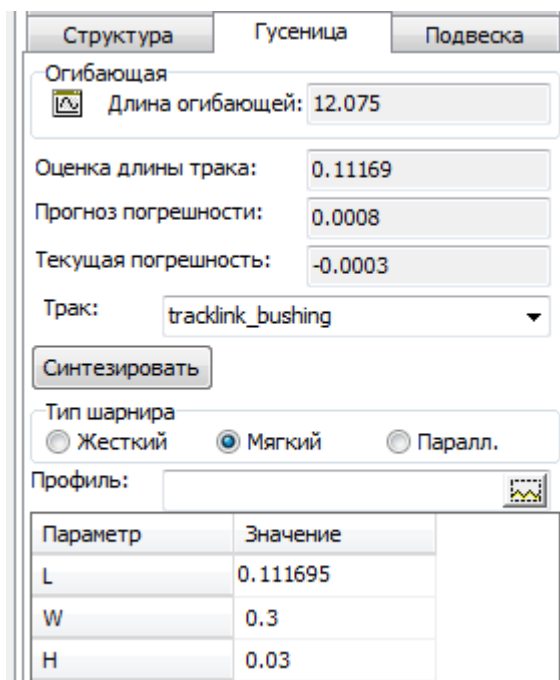


Рис. 2.16. Добавление направляющего колеса с механизмом натяжения гусеницы

## 2.7. Создание модели гусеничной цепи

Модель гусеничной цепи состоящей из заданного пользователем числа звеньев (траков) создается на вкладке **Параметры | Гусеница**, рис. 2.17.



Параметр	Значение
L	0.111695
W	0.3
H	0.03

Рис. 2.17. Параметры гусеничной цепи с корректно заданной длиной трака L

Выберите тип трака **tracklink\_bushing**, что соответствует резинометаллическому («мягкому») шарниру.

Задайте предлагаемое программой значение длины трака L, скопировав его из поля «Оценка длины трака».

Используя кнопку **Синтезировать**, сгенерируйте гусеничную цепь, рис. 2.18.

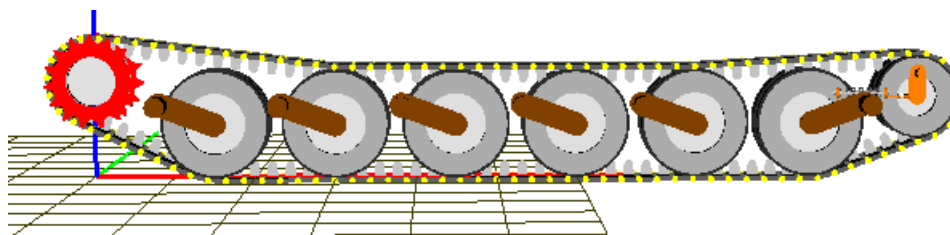


Рис. 2.18. Добавление гусеничной цепи

## 2.8. Добавление амортизаторов

Описание процесса добавления амортизаторов.

Перейдите к редактированию гусеницы, используя кнопку **Редактировать**, рис. 2.19.

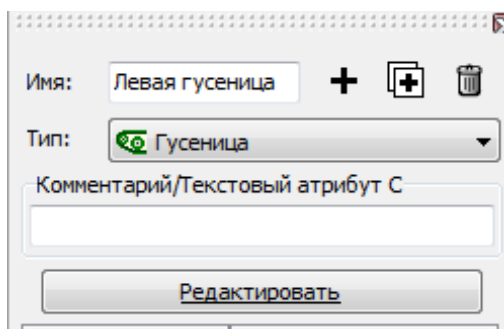


Рис. 2.19. Кнопка перехода в режим редактирование подсистемы

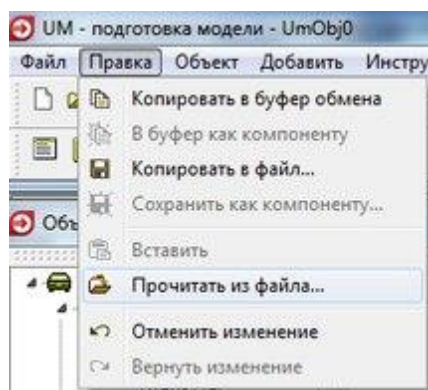


Рис. 2.20. Команда меню для добавления элементов к модели

Из базы данных добавьте модель амортизатора. Для этого используется команду меню **Правка | Прочитать из файла...** и выберите файл **{Данные УМ}\Caterpillar\Dampers\Damper1**.

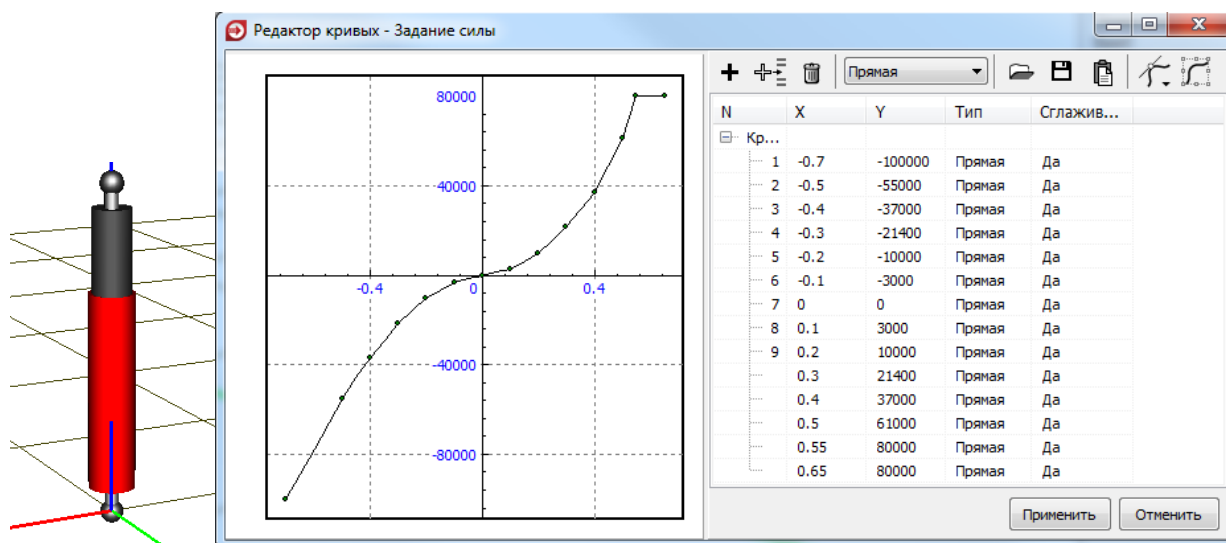


Рис. 2.21. Графический образ и нелинейная характеристика амортизатора

Данный файл содержит полное описание нелинейного амортизатора (группа **Биполярные силы** списка элементов модели) вместе с графическим образом, рис. 2.21. Характеристика амортизатора близка к одной из приведенных в работе [1], рис. 2.22.

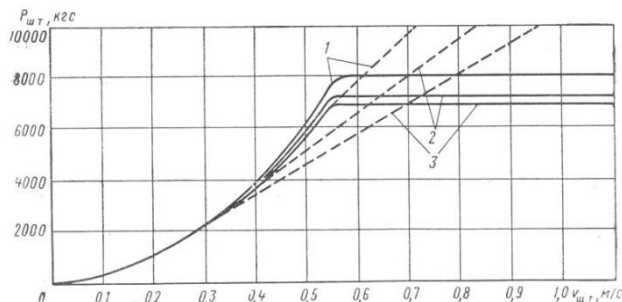



Рис. 2.22. Характеристики амортизаторов из работы [1]

Переименуйте элемент и задайте тела, к которым присоединен амортизатор, и координаты точек прикрепления в СК каждого из тел, как это приведено на рис. 2.23, слева. Обратите внимание на использование идентификатора `side_key`, с помощью которого для правой гусеницы поперечная координата амортизатора автоматически изменит знак.

Для того, чтобы добавить второй (передний) амортизатор, скопируйте первый с помощью кнопки , измените имя, второе тело и координаты точек прикрепления, как на рис. 2.23, справа.

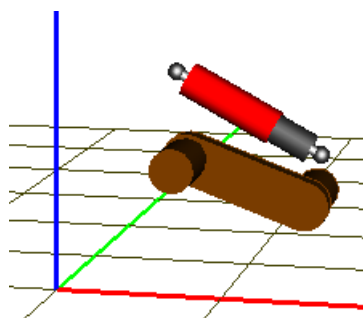
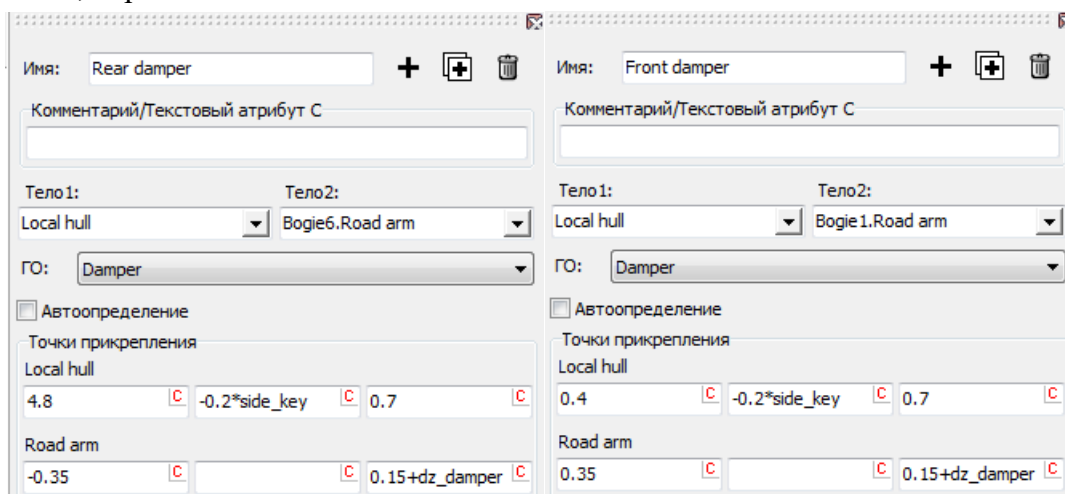


Рис. 2.23. Назначение тел и координат

Для того, чтобы закончить процесс добавления амортизаторов, закройте подсистему щелчком на кнопке **Принять**, рис. 2.24.

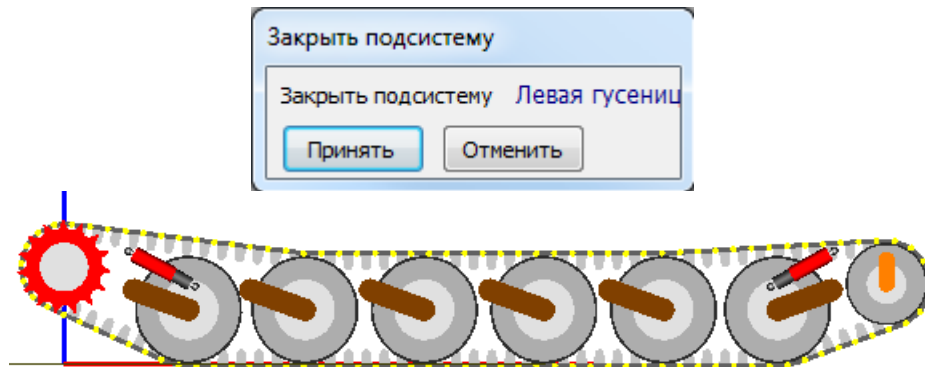


Рис. 2.24. Модель гусеницы с добавленными амортизаторами

Сохраните готовую модель левой гусеницы в файл.

**Замечание.** Мы создали упрощенную модель гусеницы, не описав несколько элементов.

## 2.9. Создание полной модели ГМ

Для завершения модели ГМ следует добавить корпус и вторую гусеницу.

### 2.9.1. Добавление тела: корпус ГМ

1. Прочитайте графический образ корпуса ГМ, который имеется в базе данных, рис. 2.25. Для этого используйте команду меню **Правка | Прочитать из файла...** и выберите файл

{Данные УМ}\Caterpillar\Images\Hull1.img

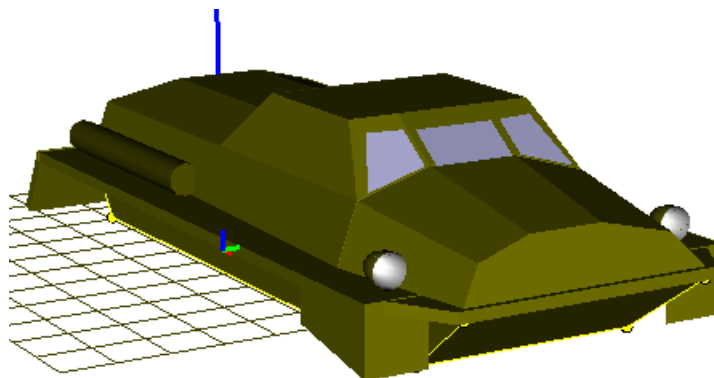


Рис. 2.25. Графический образ корпуса ГМ

2. Добавьте к модели тело, соответствующее корпусу:
  - выберите элемент **Тела** в списке элементов модели, рис. 2.26;

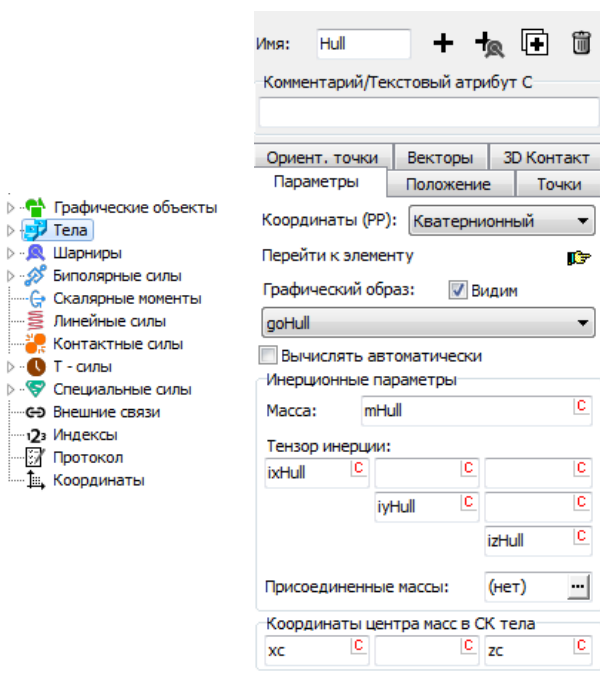


Рис. 2.26. Добавление тела – корпус ГМ

- создайте новое тело щелчком на кнопке **+** инспектора;

- задайте имя, графический образ и инерционные параметры: массу, моменты инерции относительно центральных осей, координаты центра масс.

Рекомендуется параметризовать инерционные параметры с помощью идентификаторов, как это сделано в примере на рис. 2.26. Пример численных значений параметров приведен на рис. 2.27.

Имя	Выражение
v0	20
mhull	8000
ixhull	5000
iyhull	4.0000000E+4
izhull	4.0000000E+4
xc	2.7
zc	0.6

Рис. 2.27. Пример численных значений инерционных параметров корпуса

3. Добавьте к модели шарнир, вводящий шесть степеней свободы корпуса относительно СК0:
  - выберите элемент **Шарниры** в списке элементов модели, рис. 2.28;
  - создайте новый шарнир щелчком на кнопке **+** инспектора;
  - задайте тела шарнира и тип **6 степеней свободы**.

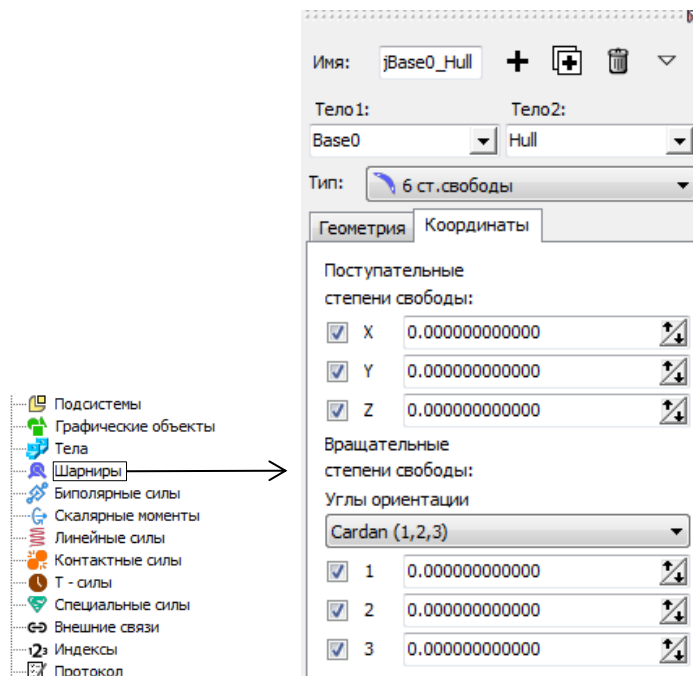


Рис. 2.28. Добавление шарнира для корпуса

**Замечание 1.** Обратите внимание, что при задании тел шарнира важен порядок. По правилам UM шарнир данного типа вводит координаты второго тела относительно первого, то есть корпуса ГМ относительно СК0, а не наоборот.

**Замечание 2.** Как известно, любые три угла ориентации имеют вырожденное положение. Например, углы Эйлера вырождаются при нулевых значениях координат, поэтому крайне редко используются в технических приложениях. Мы не рекомендуем использовать углы, обладающие данным свойством, то есть последовательности поворотов, в которых первый и последний повороты осуществляются вокруг одноименных осей (3,1,3; 1,2,1 и д.п.). В примере мы выбрали углы с последовательностью поворотов 1,2,3. Они вырождаются в том случае, когда поворот вокруг средней оси (Y) равен 90 градусов, то есть, фактически, только при переворотах ГМ. Большой наглядностью отличаются самолетные углы с последовательность поворотов 3,1,2.

### 2.9.2. Присоединение гусеницы к корпусу

В созданной к этому моменту модели корпус ГМ никак не связан с гусеницей, рис. 2.29, слева.

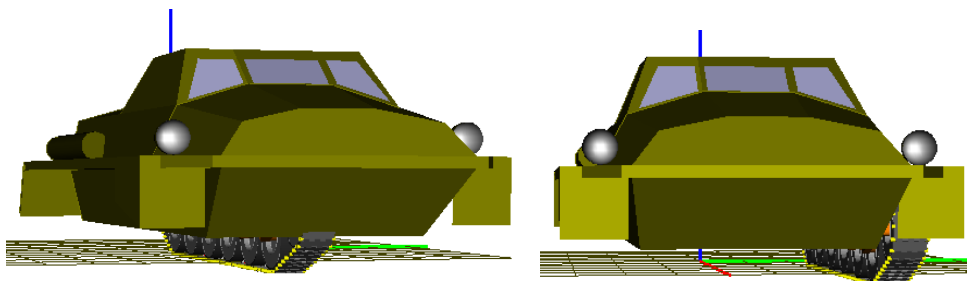


Рис. 2.29. Несвязанные и связанные корпус и гусеница

Чтобы присоединить элементы левой гусеницы к корпусу, следует жестко связать локальный корпус гусеницы с корпусом ГМ. Это можно сделать, связав эти тела шарниром с нулевым числом степеней свободы. Такой шарнир можно ввести несколькими способами: шарнир типа «6 степеней свободы» с выключенными координатами, шарнир обобщенного типа с одним элементарным преобразованием типа «сдвиг на постоянный вектор» **tc**.

- Добавьте новый шарнир.
- Назначьте связанные тела (корпус ГМ и локальный корпус левой гусеницы).
- Выберите тип шарнира **Обобщенный**.
- Добавьте элементарное преобразование щелчком на нижней кнопке **+**.
- Задайте сдвиг гусеницы в поперечном направлении на половину ширины колеи. В примере на рис. 2.30 ширина колеи задана идентификатором `gauge=2.6 м`.

В результате этой последовательности действий мы жестко связали локальный корпус гусеницы с корпусом ГМ, рис. 2.29, слева, и все шарниры и силовые элементы, соединяющие тела гусеницы с локальным (фиктивным) корпусом, теперь фактически связаны с корпусом ГМ.

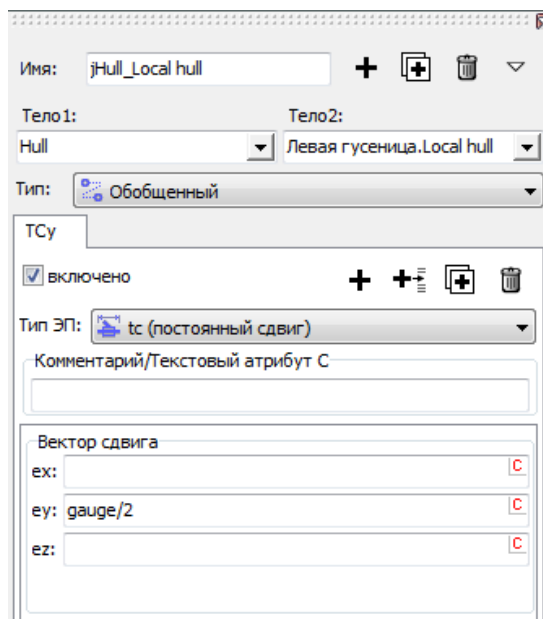



Рис. 2.30. Шарнир, жестко связывающий корпус ГМ и локальный корпус левой гусеницы

### 2.9.3. Добавление второй гусеницы и ее присоединение к корпусу ГМ

Перейдите к подсистеме, соответствующей левой гусенице и скопируйте ее щелчком на кнопке . Переименуйте подсистему и в группе **Положение гусеницы** задайте **Правая**, рис. 2.31.

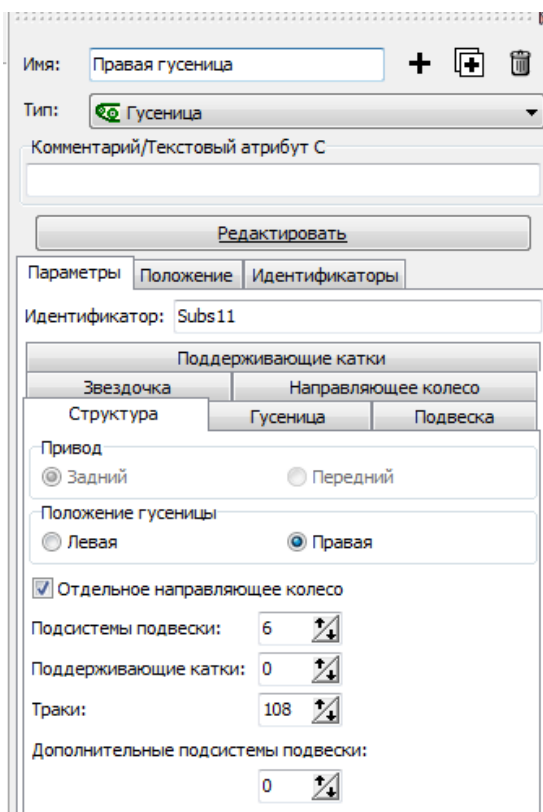


Рис. 2.31. Создание правой гусеницы

По аналогии с п. *Присоединение гусеницы к корпусу*, создайте шарнир, жестко связывающий локальный корпус правой гусеницы с корпусом ГМ, рис. 2.32. Обратите внимание, что в этом случае сдвиг в поперечном направлении имеет противоположный знак по сравнению с левой гусеницей.

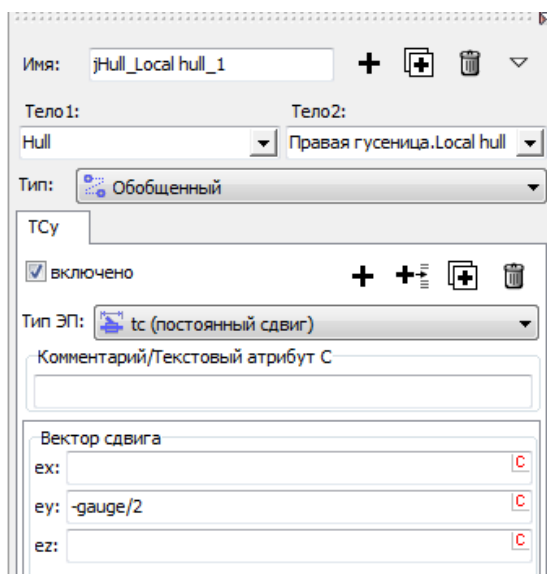


Рис. 2.32. Шарнир, жестко связывающий корпус ГМ и локальный корпус правой гусеницы

#### 2.9.4. Поправка положения ГМ в вертикальном направлении

Обратим внимание, что модель автоматически создается так, что нижняя часть опорных катков находится точно в горизонтальной плоскости СК0. Это также означает, что нижние траки гусеницы находятся ниже уровня нулевой вертикальной координаты, рис. 2.33. А поскольку при моделировании динамики ГМ предполагается, что поверхность идеально ровного грунта имеет нулевую вертикальную координату, то в созданном виде нижние траки «находятся под землей». Этот факт можно проигнорировать, но в результате в первых динамических тестах возникнут интенсивные процессы, связанные с «выталкиванием» траков на поверхность. Чтобы избежать этого, всю ГМ целиком рекомендуется сдвинуть вверх по вертикали на толщину траков.

Прежде всего, заметим, что по умолчанию толщина траков задается идентификатором *htracklink*, однако он присутствует в подсистемах – гусеницах, и «не виден» в головной части модели ГМ. Рекомендуется ввести такой же идентификатор в головной части. Для этого (рис. 2.34)

- щелкните правой кнопкой мыши на списке идентификаторов модели ГМ и выполните команду контекстного меню **Добавить из подсистемы**;
- в появившемся списке идентификаторов (после некоторых поисков!) выберите идентификатор *htracklink* и дважды щелкните на нем;
- убедитесь, что идентификатор появился в головном списке.

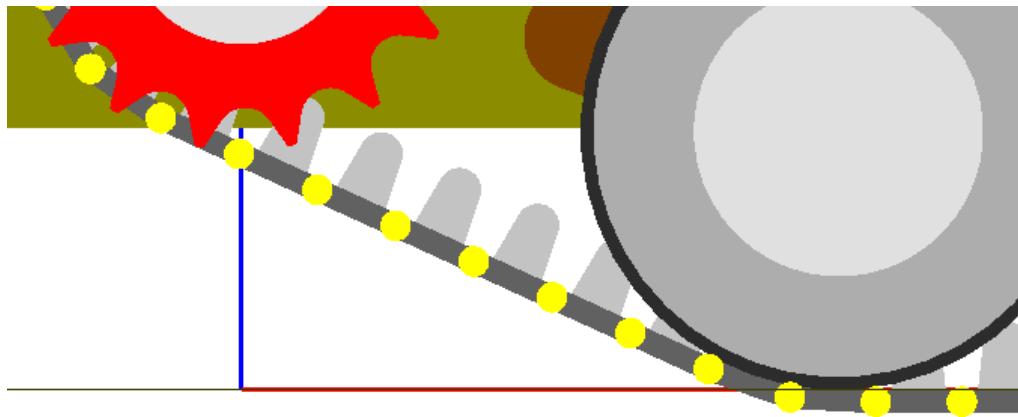


Рис. 2.33. Траки гусеницы находятся ниже уровня нулевой вертикальной координаты

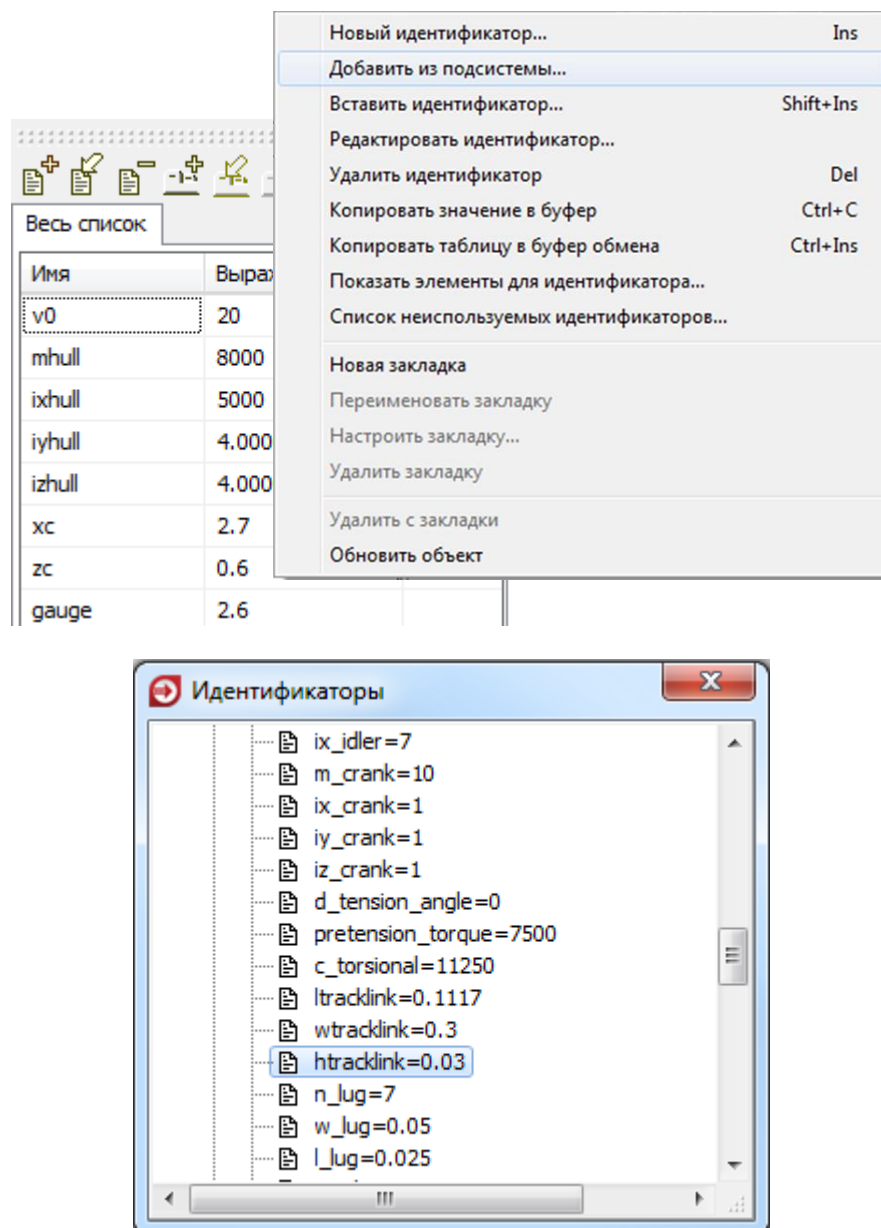


Рис. 2.34. Добавление идентификатора толщины трака из подсистемы

Теперь для того, 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, рис. 2.35. Результат представлен на рис. 2.36.

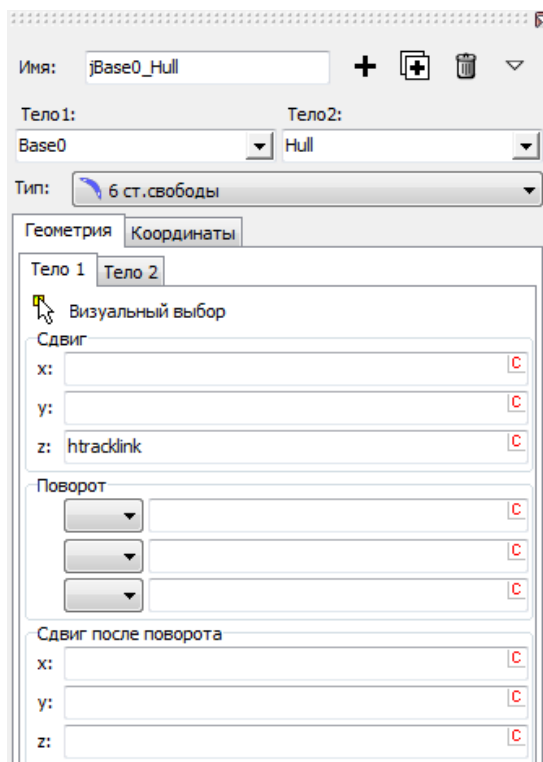


Рис. 2.35. Вертикальный сдвиг ГМ на толщину траков

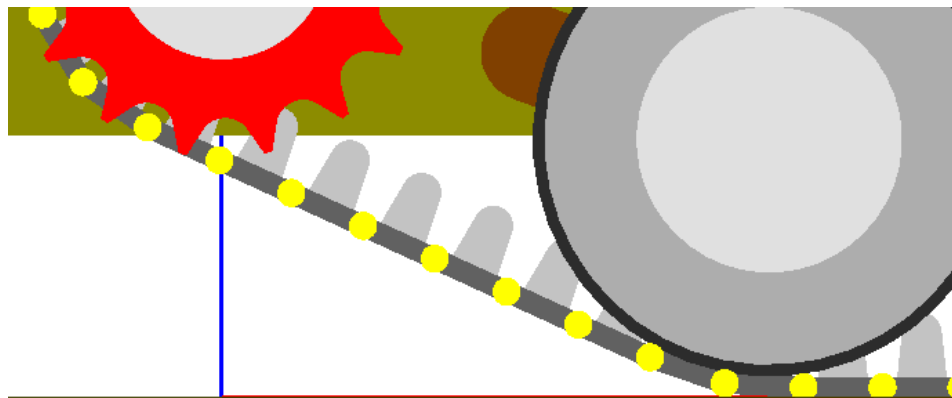
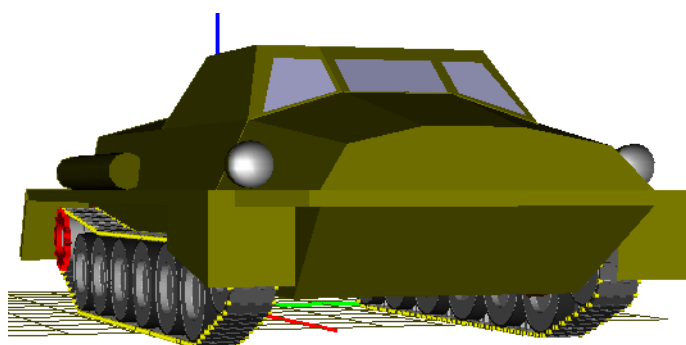


Рис. 2.36. Траки гусеницы находятся на уровне нулевого значения вертикальной координаты

Теперь можно перейти к первым тестам по моделированию динамики ГМ.



## 3. Моделирование динамики ГМ

### 3.1. Общие замечания

Компьютерная модель ГМ обычно имеет очень большое число степеней свободы, поэтому требует использования компьютеров повышенной производительности. Например, созданная выше модель ГМ имеет 1332 степени свободы. Рекомендуется использовать компьютеры с многоядерными процессорами, используя многопоточные вычислительные процессы, реализованные в UM 6.0.

Как правило, модель ГМ создается полностью параметризованной. Некоторые идентификаторы не могут быть изменены в программе моделирования, а требуют переформирования моделей гусениц. Это параметры, влияющие на геометрию гусеничного обвода и ведущего колеса:

- радиусы катков;
- координаты центров катков;
- толщина трака.

Другие идентификаторы могут быть изменены без переформирования гусеничного обвода. В частности, это все параметры, характеризующие силовые взаимодействия (коэффициенты жесткости, диссипации и т.д.). Для того чтобы изменить эти параметры не требуется возвращаться в программу ввода. Обычно изменение параметров производится непосредственно в программе моделирования на вкладке **Идентификаторы** инспектора подготовки процесса моделирования, рис. 3.1.

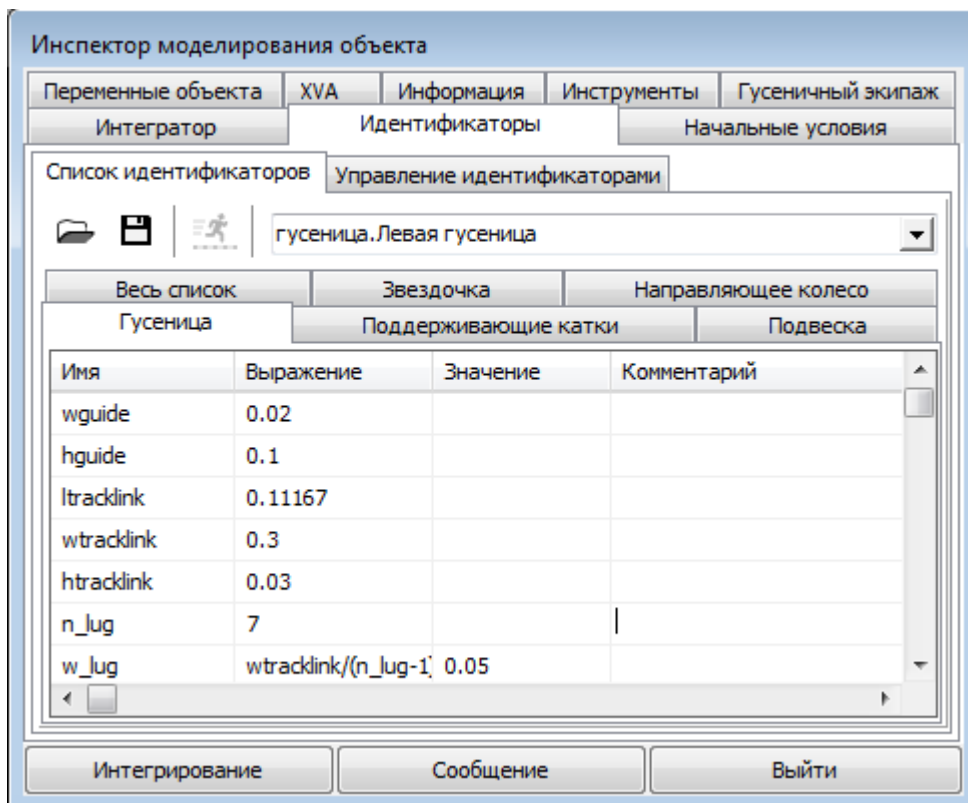


Рис. 3.1. Список идентификаторов модели в программе моделирования

Измененные значения идентификаторов могут сохраняться в специальных файлах \*.rag и могут использоваться в последующих расчетах.

Для проведения каждого из тестов можно использовать заранее подготовленные настройки параметров модели и UM, выбрав из списка, доступного по команде меню **Файл | Загрузить конфигурацию | {Имя теста}**, рис. 3.2.

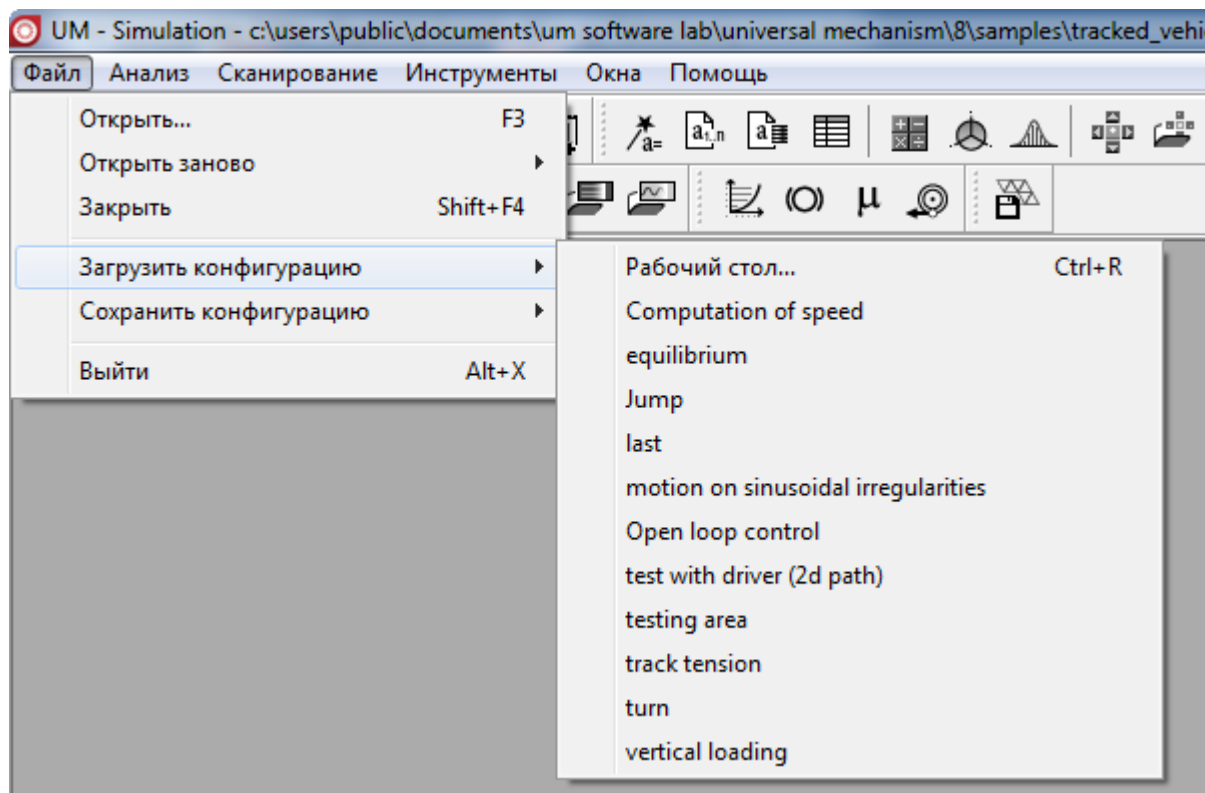


Рис. 3.2. Список конфигураций для выполнения тестов

## 3.2. Предварительные тесты

Предварительные тесты предназначены для подготовки модели к исследованию динамических свойств. В частности, к предварительным тестам относится задание необходимого натяжения гусеничного обвода.

### 3.2.1. Тест на равновесие

В качестве первого знакомства с динамической моделью рассмотрим вспомогательный тест «Равновесие». Цель выполнения теста – привести модель ГМ в состояние равновесия. Дело в том, что после автоматического синтеза модели положения тел, в частности траков, только приближенно соответствуют равновесным.

Перед началом тестов надо установить соответствие расчетных параметров подвески и значений идентификаторов, заданных «по умолчанию». В частности, важным параметром является средняя статическая нагрузка на одно колесо, в случае торсионной подвески заданное идентификатором  $p_{stat}$ . Значение этого параметра, в частности, зависит от натяжения гусеницы. Пусть расчетное значение этого параметра 7 кН. Данное значение можно установить с использованием вкладки **Идентификаторы** инспектора. Обратите внимание,

что данный идентификатор определен в подсистеме подвески, и чтобы модифицировать его, следует в выпадающем списке выбрать одну из подсистем подвески, рис. 3.3.

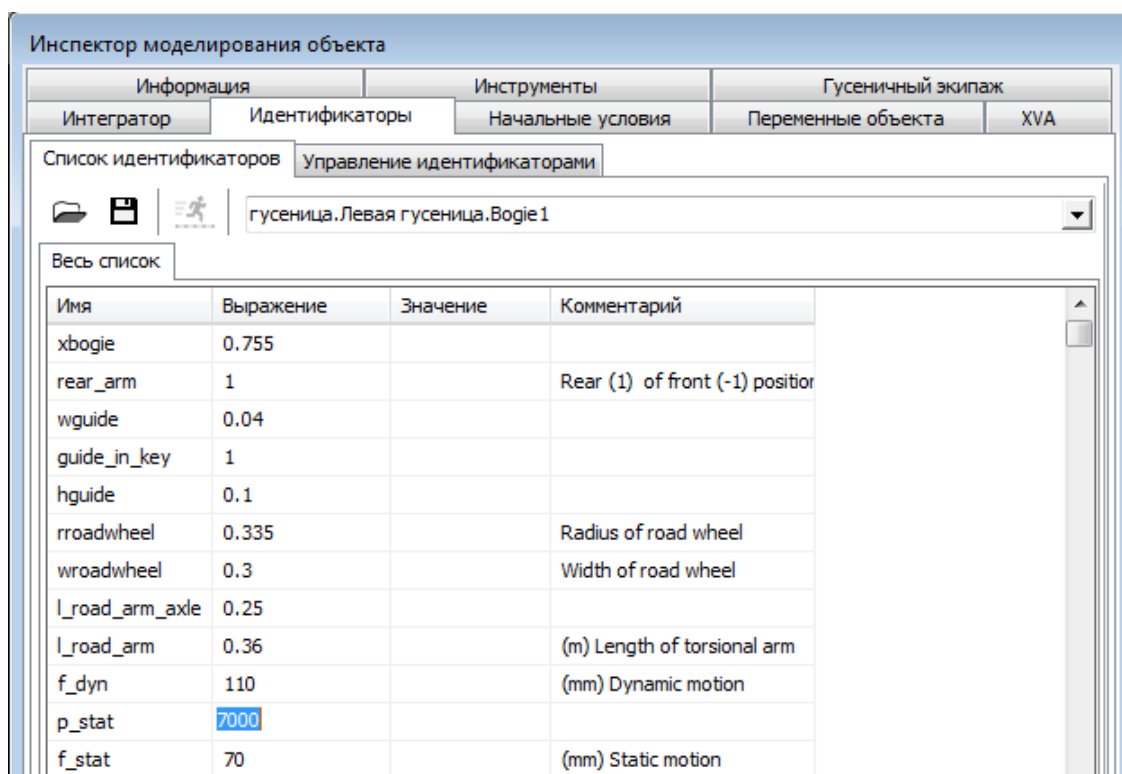


Рис. 3.3. Модификация параметров

Загрузите модель ГМ в программу моделирования. Откройте инспектор моделирования объекта с помощью команды меню **Анализ | Моделирование....** Перейдите на вкладку **Гусеничный экипаж | Тесты**. Из списка тестов выберите **Равновесие**, рис. 3.4.

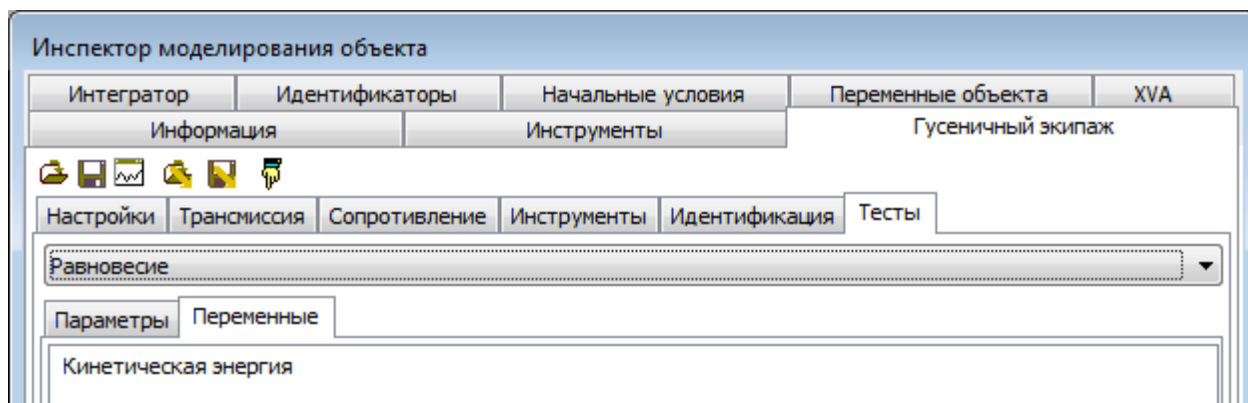



Рис. 3.4. Тест «Равновесие»

Откройте графическое окно с помощью кнопки  на панели инструментов. С помощью мышки перетащите в это окно переменную **Кинетическая энергия** с вкладки **Переменные** теста.

Запустите процесс моделирования щелчком на кнопке **Интегрирование** в нижней части инспектора. В нашем тесте в течение 7 секунд кинетическая энергия упала до значения меньше 1 Дж, рис. 3.5, то есть ГМ практически находится в положении равновесия.

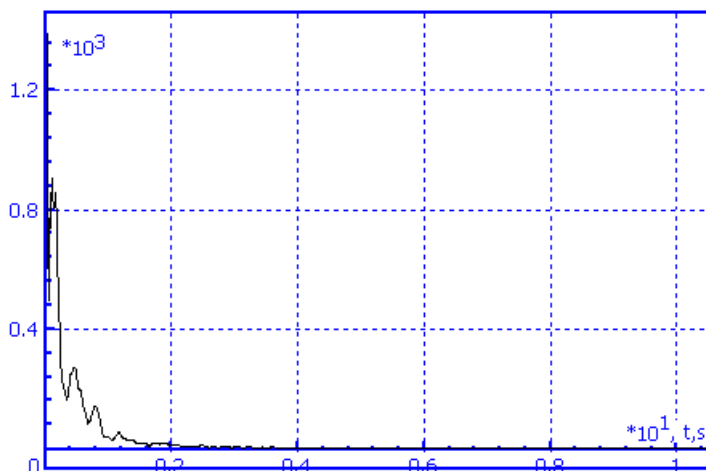




Рис. 3.5. График падения кинетической энергии в процессе выполнения теста

После примерно 7 секунд моделирования перейдите в режим паузы с помощью кнопки  в окне параметров процесса моделирования или с помощью клавиши Esc на клавиатуре. Сохраните текущие значения координат и скоростей в файл \*.xv с любым именем с помощью кнопки **Записать** в нижней части окна паузы. Прервите процесс интегрирования с помощью соответствующей кнопки.

Прочитайте сохраненные значения координат с помощью кнопки  на вкладке **Начальные условия | Координаты** инспектора. Задайте нулевые значения скоростям тел с помощью кнопки  $v=0$ . Положения тел, входящих в гусеницу, до и после выполнения теста, представлены на рис. 3.6. Напомним, что гусеница не натянута.

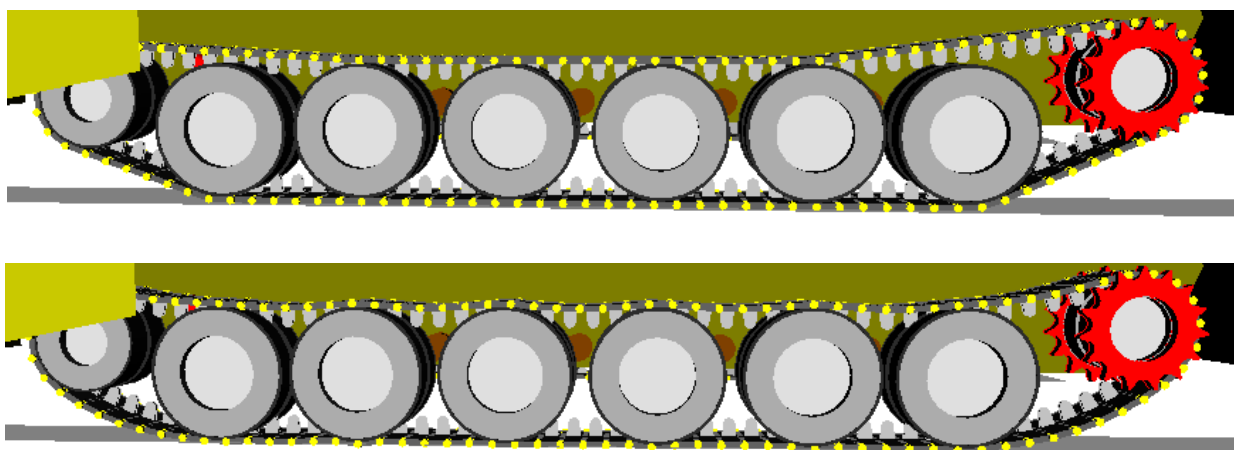


Рис. 3.6. Вид гусеницы до и после выполнения теста «Равновесие»

Перейдем теперь к выполнению теста натяжения гусеницы.

### 3.2.2. Натяжение гусеницы

Выберите тест «Натяжение через преднатяг». В данном тесте будет подобрано предварительное значение силы в сайлентблоках (резинометаллических шарнирах, соединяющих траки), обеспечивающих желаемое натяжение гусеницы. Обратите внимание, что есть также тест «Натяжение гусеницы», в котором желаемое натяжение реализуется через удлинение натяжного устройства, однако этот способ используется в случае жестких шарниров.

Параметры теста приведены на рис. 3.7. Во-первых, в группе **Идентификаторы** приведены имена идентификаторов, параметризующих продольное усилие в сайлентблоках, моделирующих резинометаллические шарниры. Увеличение этого параметра приводит к увеличению натяжения гусеницы. Обратите внимание, что данные идентификаторы были найдены автоматически, поскольку для них использован стандартный идентификатор *track\_tension*.

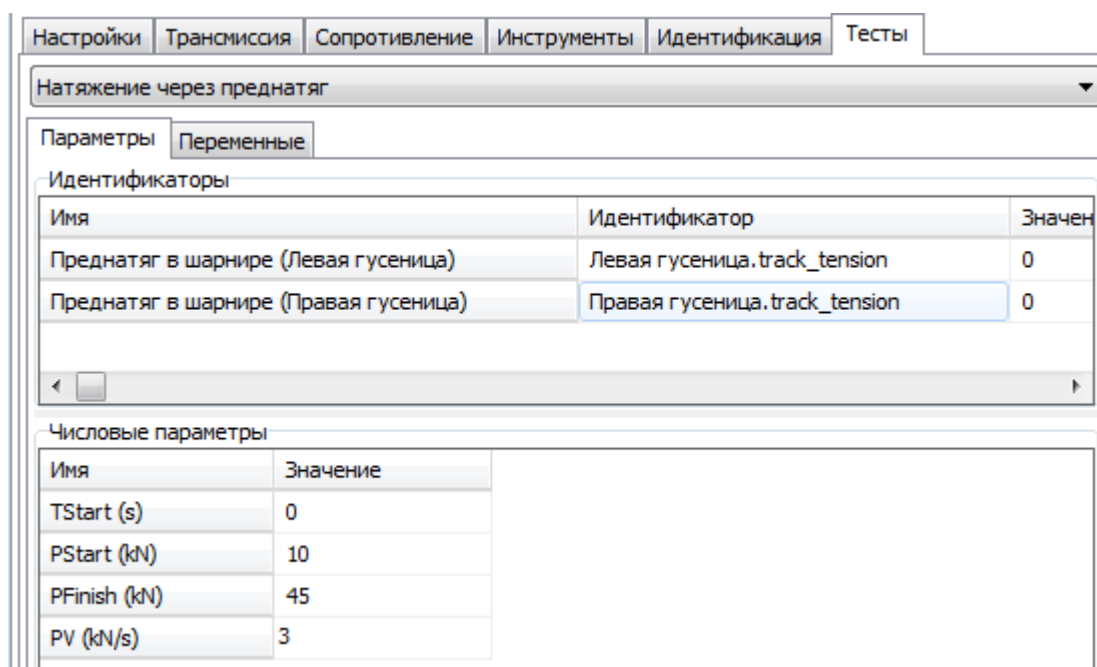


Рис. 3.7. Параметры теста «Натяжение через преднатяг»

Задайте числовые параметры теста, как на рис. 3.7. Равномерное увеличение усилия в сайлентблоке начинается с момента старта процесса интегрирования с 10 кН до 45 кН со скоростью 3 кН/с.

Откройте новое графического окно или удалите переменные из имеющегося окна. Перенесите мышкой три переменные из списка стандартных переменных, рис. 3.8:

- Преднатяг в шарнире (Левая гусеница)
- Среднее натяжение (Левая гусеница)
- Среднее натяжение (Правая гусеница)

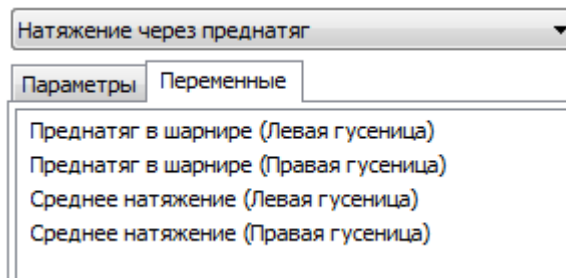


Рис. 3.8. Список стандартных переменных теста «Натяжение через преднатяг»

Отложите величину преднатяга (то есть исходного продольного усилия в сайлентблоке, параметризованного идентификатором *track\_tension*) вдоль оси абсцисс, рис. 3.9:

- выделите переменную в списке переменных окна;
- щелчком по правой кнопке мыши вызовите контекстное меню;
- выполните команду Отложить переменную по абсциссе.

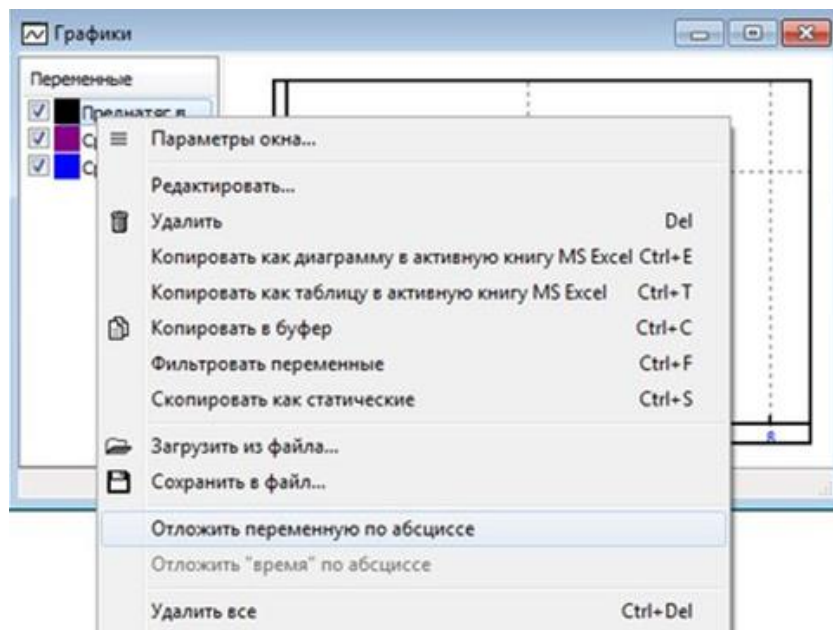


Рис. 3.9. Выполнение операции «отложить переменную по абсциссе»

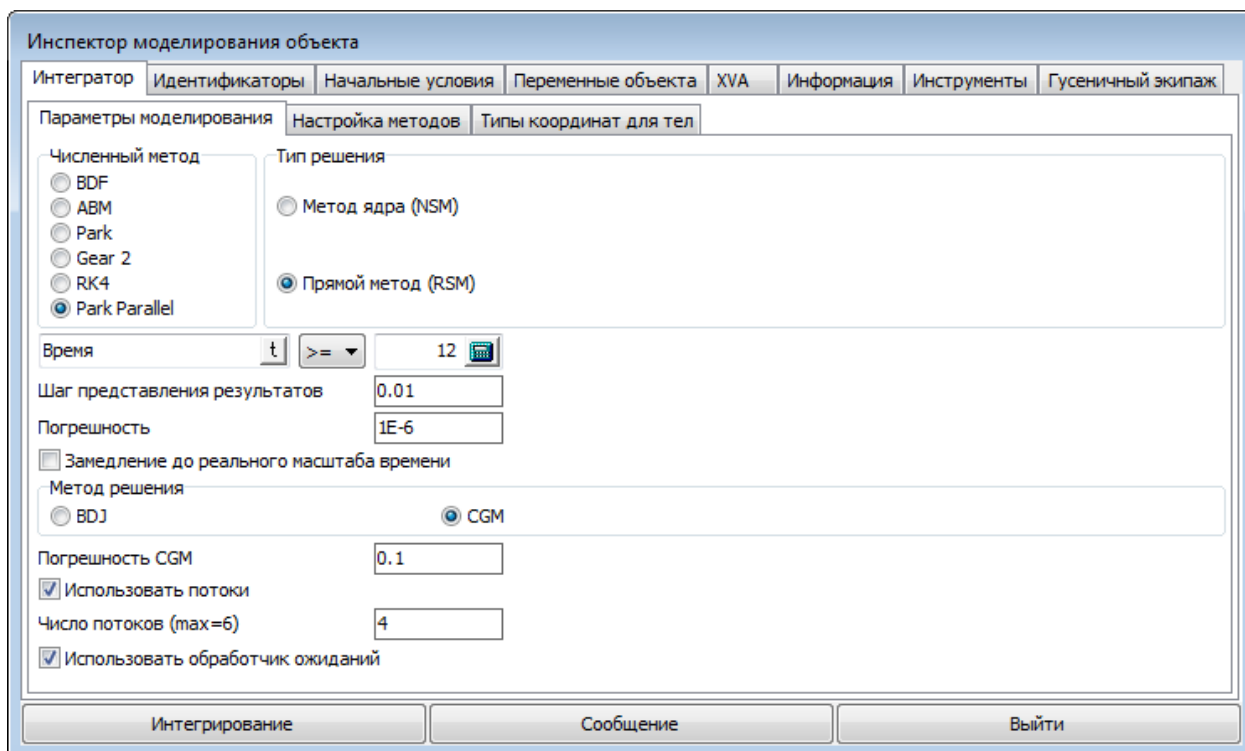


Рис. 3.10. Задание времени моделирования

Установите время моделирования 12 с на вкладке **Интегратор | Параметры моделирования** инспектора и запустите процесс щелчком на кнопке **Интегрирование**.

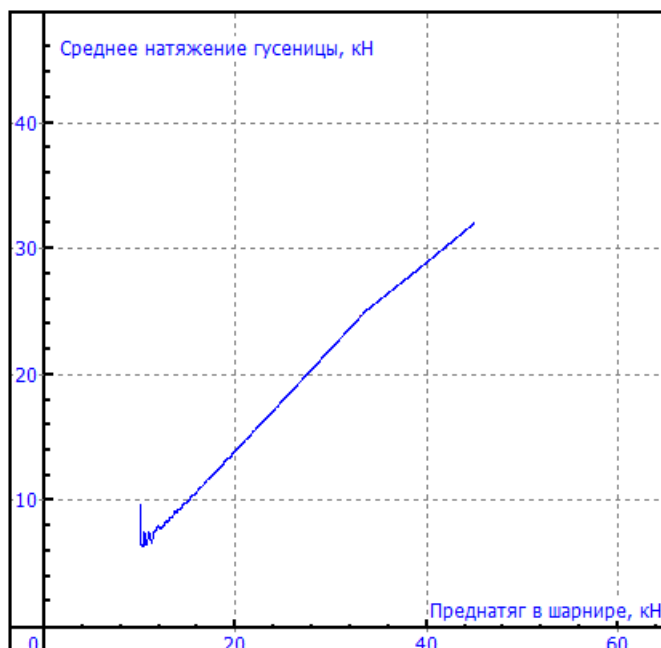


Рис. 3.11. Зависимость среднего натяжения гусеницы от преднатяга в шарнире

Обсудим основной результат теста – зависимость среднего натяжения гусеницы (среднее арифметическое значения растягивающих усилий в резинометаллических шарнирах) от величины преднатяга, рис. 3.11. Зависимость имеет два линейных участка: до значений

преднатяга примерно 34 кН натяжение линейно растет. При значении 34 кН имеется перелом характеристики, соответствующий достижению усилия в натяжном устройстве критического значения преднатяга пружины этого устройства (в нашем примере это значение было задано 50 кН). При дальнейшем увеличении натяжения гусеницы происходит сжатие пружины натяжного устройства.

Эти выводы подтверждаются зависимостями от преднатяга усилия в натяжном устройстве и угла поворота кривошипа натяжного устройства, представленными на рис. 3.12.

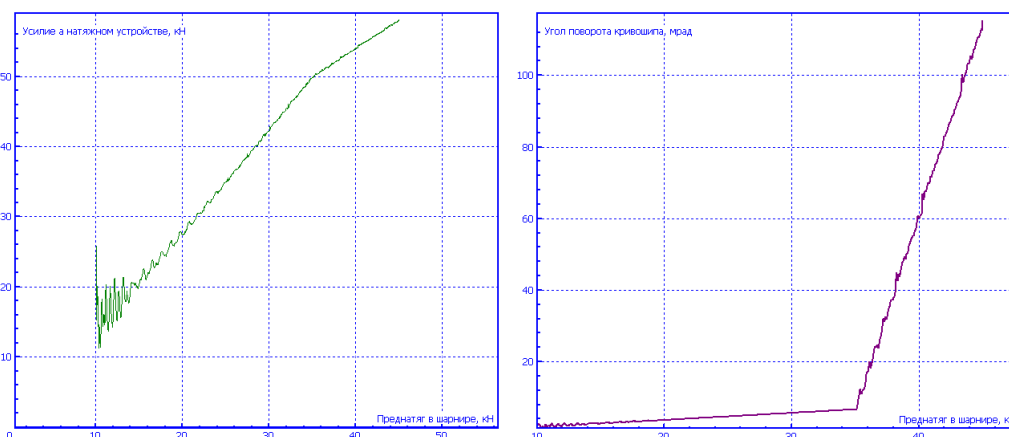


Рис. 3.12. Зависимость усилия в натяжном устройстве (слева) и угла поворота кривошипа (справа) от преднатяга в шарнире

Теперь с помощью графика на рис. 3.11 можно установить значения преднатяга в резинометаллическом шарнире, реализующего желаемое значение натяжения гусеницы. Пусть необходимо установить натяжение гусеницы 20 кН. Тогда из графика следует, что для этого надо задать значение преднатяга примерно 26 кН.

Прервите режим паузы и задайте найденное значение преднатяга на вкладке инспектора **Гусеничный экипаж | Настройки | Общие** для дальнейшего использования в других тестах.

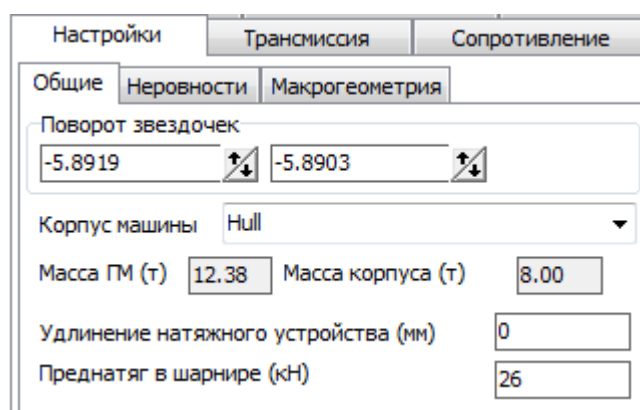



Рис. 3.13. Назначение преднатяга в шарнире для дальнейшего использования

Осталось выполнить последнюю задачу теста: рассчитать положения тел в равновесии при заданном значении натяжения гусеницы:

- установите тест **Равновесие**

- выполните тест в течение примерно 7 секунд
- в режиме паузы сохраните значения координат помощью кнопки **Записать**
- прервите режим паузы, прочитайте значения сохраненных координат на вкладке **Координаты** инспектора, обнулите скорости и еще раз сохраните координаты в файл по кнопке .

Используйте это файл всякий раз, когда надо назначить значения координат в равновесии ГМ при заданном натяжении гусеницы.

### 3.2.3. Вертикальная прокачка

Данный тест позволяет построить нелинейную вертикальную жесткостную характеристику подвески при нагружении центра тяжести корпуса медленно меняющейся периодической вертикальной силой.

Выберите соответствующий тип теста и назначьте параметры периодической силы, рис. 3.14.

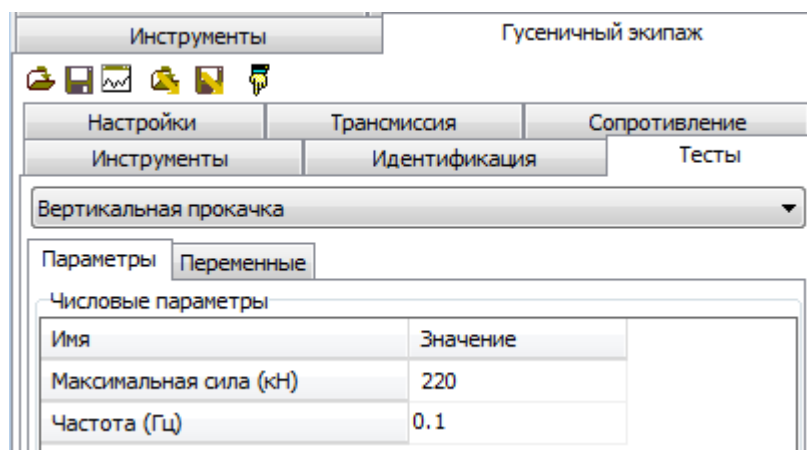


Рис. 3.14. Параметры теста «вертикальная прокачка»

Откройте графическое окно и перенесите в него переменные теста, рис. 3.15. Отложите ход подвески по абсциссе.



Рис. 3.15. Переменные теста «вертикальная прокачка»

Выполните тест. Результаты в нашем случае представлены на рис. 3.16. Выход на ограничения вертикального прогиба колес происходит при значении вертикального хода, близкого к заданному значению 110 мм, параметризованному идентификатором  $f\_dun$ , рис. 3.3.

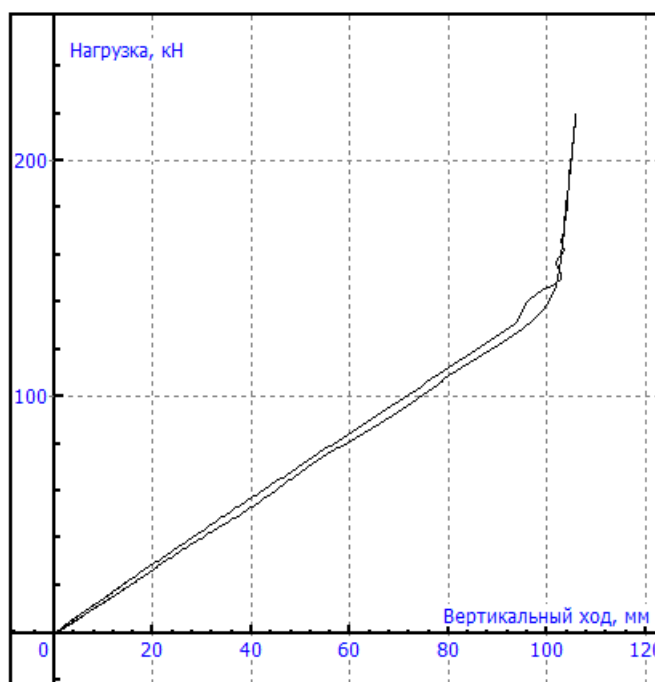


Рис. 3.16. Результат теста «вертикальная прокатка»

### 3.2.4. Тест начальных скоростей

Тест необходим для того, чтобы программа могла автоматически рассчитать скорости тел по заданной начальной скорости ГМ при выполнении основных тестов. Как правило, достаточно создать файл начальных условий, соответствующий одной скорости, например, 5 м/с, чтобы программа в дальнейшем рассчитывала значения скоростей тел по любой начальной скорости ГМ с помощью этого файла и масштабного коэффициента.

Выберите соответствующий тип теста и назначьте скорость теста и время разгона до этого значения, рис. 3.17.

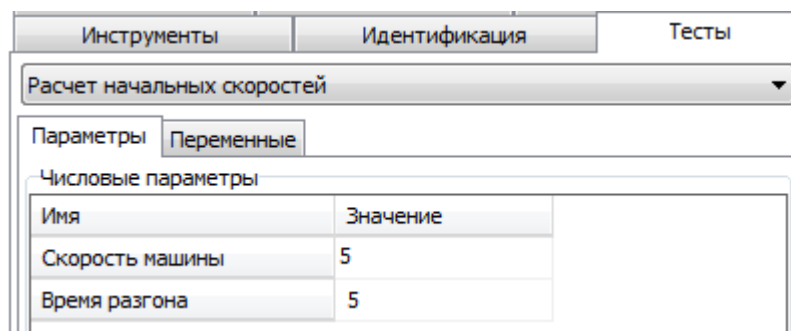


Рис. 3.17. Параметры теста «расчет начальных скоростей»

Откройте графическое окно и перенесите в него переменные теста (окружные скорости на звездочках), рис. 3.18.

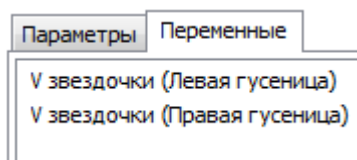


Рис. 3.18. Переменные теста «расчет начальных скоростей»

Выполните тест. Графики зависимостей окружных скоростей от времени представлены на рис. 3.19.

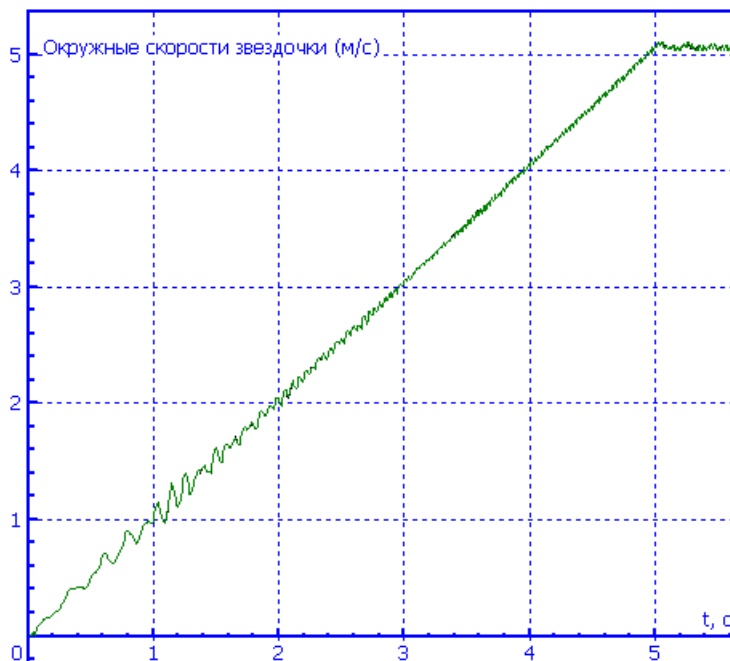


Рис. 3.19. Зависимость окружных скоростей от времени

После выхода из режима паузы, **подтвердите сохранение результатов**. Значения координат и скоростей всех тел будут сохранены в каталоге модели в файле с именем 50.ttv и использованы в каждом основном динамическом тесте, в котором начальная скорость движения ГМ отлична от нуля.

### 3.3. Прямолинейное движение ГМ

Это основной тест исследования плавности хода и нагруженности элементов ГМ при продольном движении без поворотов. Здесь мы рассмотрим два теста с движением по неровной путевой структуре.

#### 3.3.1. Движение по пути с гармоническими неровностями

Выберите тип теста «Движение по прямой» и назначьте значение коэффициента усиления, рис. 3.20. Этот параметр будет использоваться при поддержании постоянной скорости продольного движения ГМ или при заданном графике изменения скорости «По профилю». При выборе режима **Выбег** коэффициент усиления не используется.

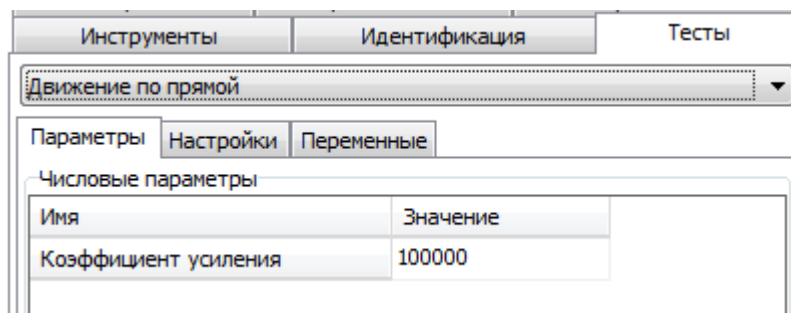



Рис. 3.20. Параметр теста «Движение по прямой»

Для задания вертикальной синусоидальной неровности дороги используйте вкладку **Гусеничный экипаж | Настройки | Неровности**, рис. 3.21. Обратите внимание, что при нулевом сдвиге фазы  $x_0$  неровности под левой и правой гусеницей одинаковые, а при положительном значении  $x_0$  неровности под левой гусеницей «опережают» неровность под правой гусеницей на данную величину. После задания параметров неровности, ее график можно просмотреть по кнопке , рис. 3.22.

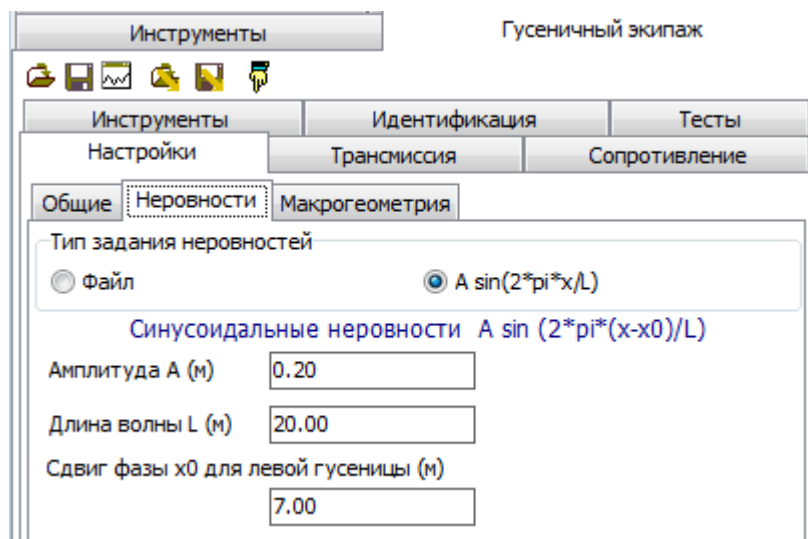


Рис. 3.21. Параметры синусоидальной вертикальной неровности дороги

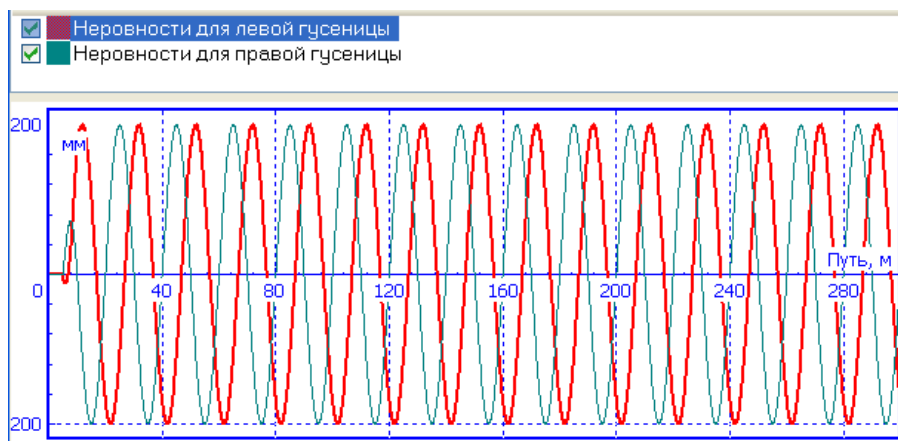


Рис. 3.22. Графики синусоидальных неровностей под левой (жирная линия) и правой гусеницей

Откройте анимационное окно и выберите режим слежения камерой за корпусом ГМ. Это действие рекомендуется, поскольку ГМ быстро выедет за видимые пределы окна. Для этого наведите курсор мыши на корпус, щелчком правой кнопки вызовите контекстное меню и выполните команду **Следить камерой за Hull**, рис. 3.23.

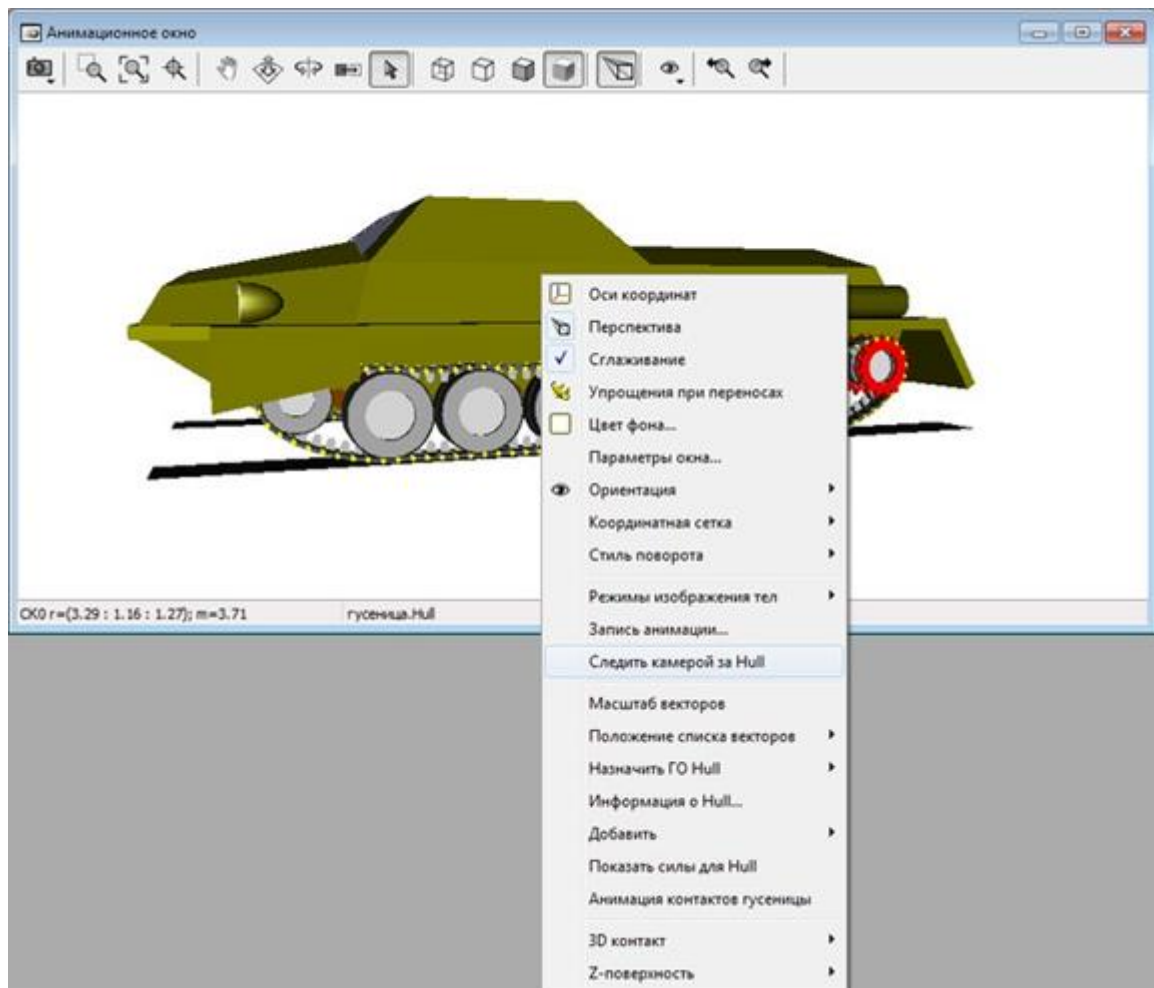


Рис. 3.23. Задание режима слежения камерой

Назначьте скорость движения ГМ 10 м/с на вкладке Идентификаторы инспектора, рис. 3.24.

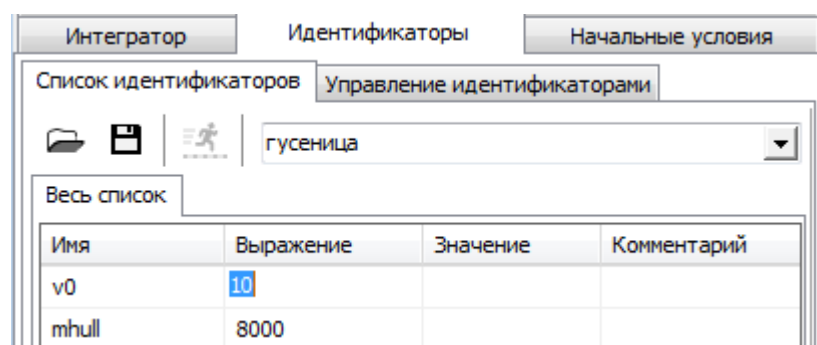


Рис. 3.24. Задание скорости ГМ



Откройте графическое окно и создайте с помощью мастера переменных для него переменные, которые интересуют в процессе движения ГМ, например, вертикальное и горизонтальное ускорение корпуса в некоторой точке.

Запустите процесс моделирования.

### 3.3.2. Моделирование прыжка

Для задания вертикальной неровности в виде трамплина воспользуемся заранее созданным профилем дороги в файле

{Данные УМ}\Caterpillar\Irregularities\jump\_25\_1.irr.

На вкладке **Гусеничный экипаж | Настройки | Неровности** назначьте тип неровностей **Файл** и щелчком на кнопках  назначьте файл левой и правой колее, рис. 3.25. График профиля дороги можно просмотреть по кнопке , рис. 3.26.

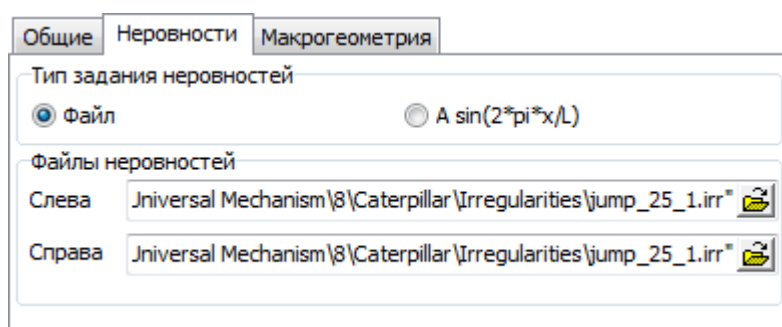


Рис. 3.25. Задание файла неровности

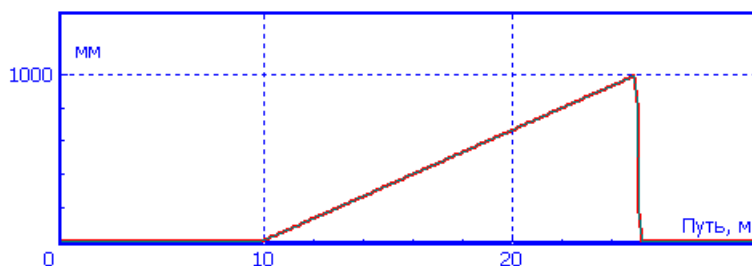


Рис. 3.26. График неровности для моделирования прыжка

Назначьте скорость ГМ 10 м/с и выполните моделирование.

## **4. Список литературы**

- [1] Гусеничные транспортеры-тягачи / Под ред. В.Ф. Платонова. – М.: Машиностроение. – 1972.