



Моделирование динамики автомобилей

Рассмотрены особенности создания моделей колесных машин и исследования их динамики

Оглавление

12. МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ.....	1-6
12.1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	1-6
12.2. БАЗОВАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ	1-8
12.3. МАКРО- И МИКРОПРОФИЛЬ ПУТИ	1-8
12.3.1. Задание макропрофиля с помощью кривых	1-9
12.3.2. Движение автомобиля по триангулированной поверхности (полигон).....	1-11
12.3.2.1. Создание файлов триангулированных поверхностей в формате UM	1-13
12.3.2.2. Задание маршрутов.....	1-14
12.3.3. Микропрофиль пути	1-19
12.3.3.1. Библиотека файлов микропрофиля пути	1-19
12.3.3.2. Создание файлов микропрофиля пути.....	1-22
12.3.3.2.1. Инструмент создания неровностей.....	1-22
12.3.3.2.2. Неровности, генерируемые по спектральной плотности мощности (СПМ)	1-23
12.3.3.2.3. Модели неровностей	1-25
12.3.3.2.3.1. ISO 8608	1-26
12.3.3.2.3.2. Wong.....	1-28
12.3.3.2.3.3. Dixon.....	1-28
12.3.3.2.3.4. Эксперимент	1-29
12.3.3.2.3.5. Колея	1-30
12.3.3.2.4. Другие способы задания неровностей	1-30
12.3.3.2.4.1. По формуле	1-30
12.3.3.2.4.2. Просадка (единичная неровность).....	1-30
12.3.3.2.4.3. Из файла	1-30
12.3.3.2.4.4. По точкам.....	1-31
12.3.3.3. Выбор микропрофиля пути.....	1-32
12.3.4. Профиль тестового участка дороги.....	1-33
12.4. ВОДИТЕЛЬ.....	1-35
12.4.1. Модель МакАдама	1-35
12.4.2. Модель непрерывного управления с прогнозированием	1-39
12.4.3. Комбинированная модель	1-41
12.4.4. Подбор параметров непрерывного управления	1-43
12.5. КОНТАКТ ШИНЫ С ДОРОГОЙ.....	1-45
12.5.1. Одноточечная и многоточечная модели контакта шины с дорогой.....	1-45
12.5.2. Модель Fiala	1-49
12.5.3. Магическая формула Пасейки	1-52
12.5.4. Табличное задание параметров шины (табличная модель).....	1-55
12.5.5. Комбинированное скольжение	1-58
12.5.6. Переходные процессы в шине	1-59
12.5.7. Модель TMEasy.....	1-61
12.5.8. Мастер описания параметров шины.....	1-66
12.5.9. Выбор модели контактных сил.....	1-68
12.5.10. Визуализация сил между шиной и дорогой.....	1-69
12.5.11. Создание приближенной модели Fiala по номинальным значениям параметров шины	1-70
12.5.11.1. Оценка вертикальной жесткости и демпфирования	1-71
12.5.11.2. Оценка коэффициента сопротивления боковому уводу.....	1-71
12.5.11.3. Оценка коэффициента продольной жесткости шины	1-71
12.5.11.4. Коэффициенты продольной и поперечной статической жесткости шины.....	1-72
12.6. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ АВТОМОБИЛЯ	1-72
12.6.1. Сопротивление воздуха	1-72
12.6.2. Сопротивление качению шины.....	1-76

12.7. СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ.....	1-77
12.7.1. Модели колеса.....	1-77
12.7.1.1. Жесткое колесо.....	1-77
12.7.1.2. Упругое колесо.....	1-78
12.7.2. Визуальный компонент «Колесо».....	1-80
12.7.3. Пружины подвески и гасители колебаний.....	1-82
12.7.4. Моделирование листовых рессор.....	1-83
12.7.4.1. Безынерционная модель листовой рессоры.....	1-84
12.7.5. Пневматические рессоры.....	1-85
12.7.6. Сайлент-блоки.....	1-85
12.7.7. Рулевое управление.....	1-86
12.7.8. Силовой элемент для упрощенного управления скоростью продольного движения.....	1-87
12.7.9. Блокировка вращения колес.....	1-88
12.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСМИССИИ.....	1-90
12.8.1. Описание элементов трансмиссии при создании модели автомобиля.....	1-92
12.8.1.1. Двигатель внутреннего сгорания.....	1-92
12.8.1.2. Сцепление.....	1-93
12.8.1.3. Коробка передач. Главная передача.....	1-94
12.9. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЕЙ.....	1-96
12.9.1. Подготовка к моделированию.....	1-96
12.9.1.1. Многомодульные автомобили.....	1-98
12.9.1.2. Идентификация подсистем автомобиля.....	1-100
12.9.1.2.1. Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью.....	1-101
12.9.1.2.2. Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес.....	1-103
12.9.1.2.3. Идентификация рулевого управления.....	1-104
12.9.1.2.4. Параметризация модели водителя.....	1-106
12.9.1.2.5. Идентификаторы управления трансмиссией.....	1-107
12.9.1.3. Вкладка «Инструменты» для создания файлов данных.....	1-108
12.9.1.3.1. Задание графиков поворота рулевого колеса и скорости движения.....	1-109
12.9.1.3.2. Создание файлов профилей тестового участка дороги.....	1-109
12.9.1.3.3. Ограничение силы тяги при упрощенном управлении скоростью.....	1-111
12.9.1.3.4. Логика переключения передач.....	1-112
12.9.1.4. Общие настройки процесса моделирования динамики автомобиля.....	1-114
12.9.1.4.1. Задание файлов неровностей для левой и правой колеи.....	1-114
12.9.1.4.2. Настройка модели контакта шины с дорогой.....	1-114
12.9.1.4.3. Изображение сил для шины.....	1-115
12.9.1.4.4. Изображение дороги.....	1-116
12.9.1.4.5. Изображение поверхности в режиме управления без обратной связи.....	1-117
12.9.1.4.6. Переворот автомобиля.....	1-118
12.9.2. Переносимость модели с одного компьютера на другой.....	1-121
12.9.3. Режимы продольного движения и управление скоростью.....	1-122
12.9.3.1. Скоростные режимы при упрощенном управлении скоростью.....	1-124
12.9.3.2. Скоростные режимы при управлении трансмиссией.....	1-124
12.9.3.2.1. Режим «Выбег».....	1-125
12.9.3.2.2. Режимы « $v=const$ », «По профилю».....	1-128
12.9.3.2.3. Режим «Управление».....	1-128
12.9.3.3. Контроллер трансмиссии.....	1-129
12.9.3.3.1. Параметры автоматического управления трансмиссией.....	1-129
12.9.3.3.2. Автоматическое переключение передачи.....	1-130
12.9.3.3.3. Управление педалью акселератора и тормозом.....	1-132
12.9.4. Тесты с моделью автомобиля как инструмент исследования динамики.....	1-137
12.9.4.1. Общая информация.....	1-137
12.9.4.2. Задание параметров для тестов.....	1-139
12.9.4.3. Переменные.....	1-139
12.9.4.4. Тест «Равновесие».....	1-140
12.9.4.4.1. Режим расчета начальных условий автомобиля.....	1-141
12.9.4.4.2. Расчет общего типа с неподвижным автомобилем.....	1-147
12.9.4.4.3. Пример расчета начальных условий легкового автомобиля.....	1-147
12.9.4.4.4. Пример построения амплитудно-частотной характеристики нелинейных колебаний легкового автомобиля.....	1-150

12.9.4.5. Поворот рулевого колеса на месте	1-160
12.9.4.6. Управление без обратной связи	1-164
12.9.4.7. Тест с водителем	1-167
12.9.4.7.1. Общие параметры теста	1-167
12.9.4.7.2. Особенности теста с водителем при задании траектории 2D кривой	1-170
12.9.4.7.2.1. Выбор файла макрогеометрии	1-170
12.9.4.7.2.2. Учет микропрофя дороги	1-170
12.9.4.7.2.3. Использование профилей тестового участка	1-171
12.9.4.7.3. Особенности теста с водителем при движении по триангулированной поверхности ...	1-173
12.9.4.7.3.1. Задание полигона и маршрута	1-173
12.9.4.7.3.2. Начальные условия для теста с движением по полигону	1-173
12.9.4.7.3.3. Модель взаимодействия шины с дорогой	1-176
12.9.4.8. Тренажер	1-177
12.9.4.8.1. Общая информация о тесте «тренажер»	1-177
12.9.4.8.2. Тренажер для автомобиля с моделью трансмиссии	1-178
12.9.4.8.3. Тренажер для автомобиля без модели трансмиссии	1-179
12.9.4.9. Вертикальная прокачка	1-180
12.9.4.10. Горизонтальная прокачка	1-182
12.9.4.11. Создание переменных	1-183
12.10. ОСОБЕННОСТИ ЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА АВТОМОБИЛЕЙ.....	1-184
12.10.1. Режимы линейного анализа автомобиля	1-184
12.10.2. Анализ влияния параметров модели водителя	1-185
12.10.3. Пример анализа линеаризованных уравнений упрощенной модели автомобиля	1-188
12.10.3.1. Упрощенная модель автомобиля	1-188
12.10.3.2. Уравнения движения упрощенной модели	1-190
12.10.3.3. Корневые годографы: зависимость собственных значений от параметров управления	1-198
12.10.3.3.1. Влияние параметра K	1-198
12.10.3.3.2. Влияние параметра K_d	1-203
12.10.3.3.3. Влияние параметра K_f	1-203
12.10.3.3.4. Корневые годографы для полной модели легкового автомобиля	1-205
12.10.3.3.5. Корневой годограф линейного осциллятора с демпфированием, пропорциональным коэффициенту жесткости	1-205
12.11. ВСТАВКА ТЕКСТУР В МОДЕЛЬ УМ (ФОТО СО СПУТНИКА).....	1-208
12.11.1. Создание и получение размеров участка карты	1-208
12.11.2. Добавление текстур в модель УМ	1-210
12.11.3. Запуск моделирование	1-214
12.12. БИБЛИОТЕКА АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОДВЕСОК.....	1-217
12.12.1. Введение	1-217
12.12.2. Краткое описание моделей	1-218
12.12.2.1. Зависимая подвеска с направляющими рычагами	1-218
12.12.2.2. Подвеска на двойных поперечных рычагах	1-219
12.12.2.3. На косых рычагах	1-220
12.12.2.4. Подвеска Макферсона	1-221
12.12.2.5. Торсионно-рычажная подвеска	1-222
12.12.2.6. Многорычажная подвеска	1-223
12.12.3. Структура моделей и параметризация	1-224
12.12.3.1. Параметризация размеров и точек крепления подвески	1-224
12.12.3.2. Параметризация колес	1-225
12.12.3.3. Моделирование рулевого управления	1-226
12.12.3.4. Моделирование ведущих колес	1-228
12.12.3.5. Описание инерционных параметров	1-228
12.12.4. Пример сборки автомобиля и анализа его динамики	1-229
12.12.4.1. Создание модели	1-229
12.12.4.1.1. Добавление кузова	1-229
12.12.4.1.2. Включение подвесок с помощью метода подсистем	1-230
12.12.4.1.3. Соединение подвесок с кузовом	1-233
12.12.4.2. Подготовка к моделированию	1-235
12.12.4.2.1. Настройка шин	1-235
12.12.4.2.2. Идентификация модели	1-236

12.12.4.2.3. Настройка неровностей	1-238
12.12.4.2.4. Определение предварительной нагрузки в пружинах подвески	1-239
12.12.4.2.5. Поворот рулевого колеса на месте	1-242
12.12.4.3. Тесты с водителем	1-244
12.12.4.3.1. Поворот на 90 °	1-244
12.12.4.3.2. Смена полосы движения	1-246
12.12.5. Доступные модели автомобилей и конфигурации	1-248
12.12.5.1. BMW 3-й серии	1-248

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1-249
--------------------------------	--------------

1. Модуль моделирования автомобилей

1.1. Общая информация

Программный комплекс «Универсальный механизм» включает в себя специализированный модуль для анализа динамики автомобилей **UM Automotive**. Модуль включает в себя дополнительные программные инструменты, интегрированные в ядро программы, а также поставляемые отдельно библиотеки типовых элементов подвески и трансмиссии. Разработанный модуль включает в себя следующие основные компоненты:

- инструменты задания и визуализации макрогеометрии дороги;
- инструменты задания и визуализации микропрофиля дорожного покрытия;
- библиотека файлов микропрофиля и спектров микропрофиля дорожного покрытия;
- математические модели сил в контакте между колесом и дорогой;
- математические модели стратегий управления транспортным средством – модели водителя.

Модуль предназначен для решения следующих задач:

- определения параметров колебаний автомобиля при различных видах возмущений от дорожных неровностей;
- оптимизации по различным критериям параметров и характеристик элементов подвесок и трансмиссии автомобиля с учетом ограничений, вызванных условиями их работы;
- определения динамических параметров автомобиля при совершении различных маневров;
- изучение влияния привода на устойчивость и управляемость автомобиля;
- расчета выходных показателей, определяющих удержание автомобилем дороги при управляемом и неуправляемом движении.

Обзор основных типов и конструкций подвесок и систем рулевого управления можно найти в работах Й. Раймпеля [1] [2]. Особенности подходов к исследованию динамического поведения автомобилей подробно изложены, например, в работе [3] под ред. А. А. Хачатурова.

Ряд динамических тестов и критериев оценки поведения автомобилей при их прохождении описывается в стандартах ISO и SAE, см. [4], [5]¹. Набор этих тестов включает смену полосы движения без снижения скорости, преодоление препятствия, равномерное круговое движение, торможение в повороте, выключение двигателя в повороте и другие тесты. Данные о динамических характеристиках автомобиля, полученные на основе анализа отдельных маневров, но без данных о действиях водителя – работа в режиме «открытого

¹ Приведен неполный список стандартов ISO, относящихся к динамике транспортных средств.

Полную информацию можно найти на сайте ISO www.iso.org в разделе TC 22 / SC 9 “Vehicle dynamics and road-holding ability”.

контура» управления – позволяют выявить объективные динамические показатели автомобиля.

1.2. Базовая система координат

В УМ принято, что базовая инерциальная система координат (СК0), относительно которой исследуется движение автомобиля, удовлетворяет следующим стандартным требованиям:

- ось Z вертикальна, ось X соответствует положению продольной оси экипажа при его идеальном положении в момент начала движения;
- начало координат расположено на уровне дороги в ее идеальном горизонтальном состоянии.

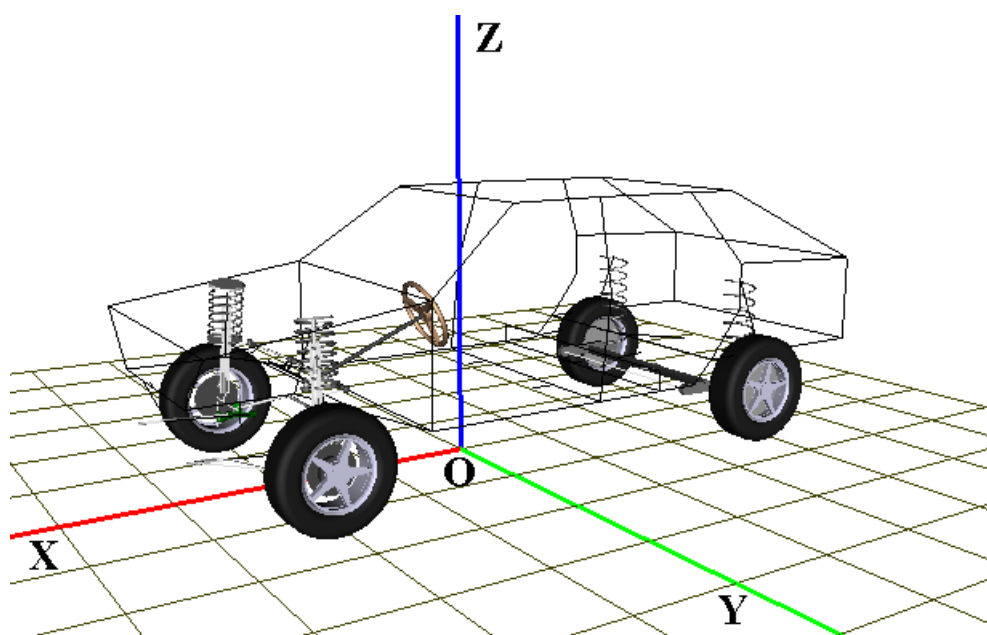


Рис. 1.1. Базовая система координат

1.3. Макро- и микропрофиль пути

Профиль дороги делится на три составляющие – макропрофиль, микропрофиль и шероховатости, что обусловлено различным воздействием их на автомобиль.

Вертикальный макропрофиль, состоящий лишь из длинных плавных неровностей (длина волны 100 м и более), практически не вызывает колебаний автомобиля на подвеске, но заметно влияет на динамику автомобиля, режим работы двигателя и трансмиссии. В УМ реализовано два метода задания макропрофиля:

- с помощью кривых, задающих горизонтальный и вертикальный профили траектории, которой следует водитель при движении автомобиля, и кривой, задающей уклон дороги, см. п. 1.3.1. *Задание макропрофиля с помощью кривых*;
- с помощью триангулированной трехмерной поверхности, п. 1.3.2. *Движение автомобиля по триангулированной поверхности (полигон)*.

Микропрофиль состоит из вертикальных неровностей (длина волны от 10 см до 100 м), вызывающих заметные колебания автомобиля на подвеске, но не содержит длительных спусков и подъемов, изменяющих режим работы двигателя.

Шероховатости (длина волны менее 10 см) сглаживаются шинами и не вызывают ощутимых колебаний автомобиля, но влияют на работу шин (сцепление, износ и т.п.), см. [3].

1.3.1. Задание макропрофиля с помощью кривых

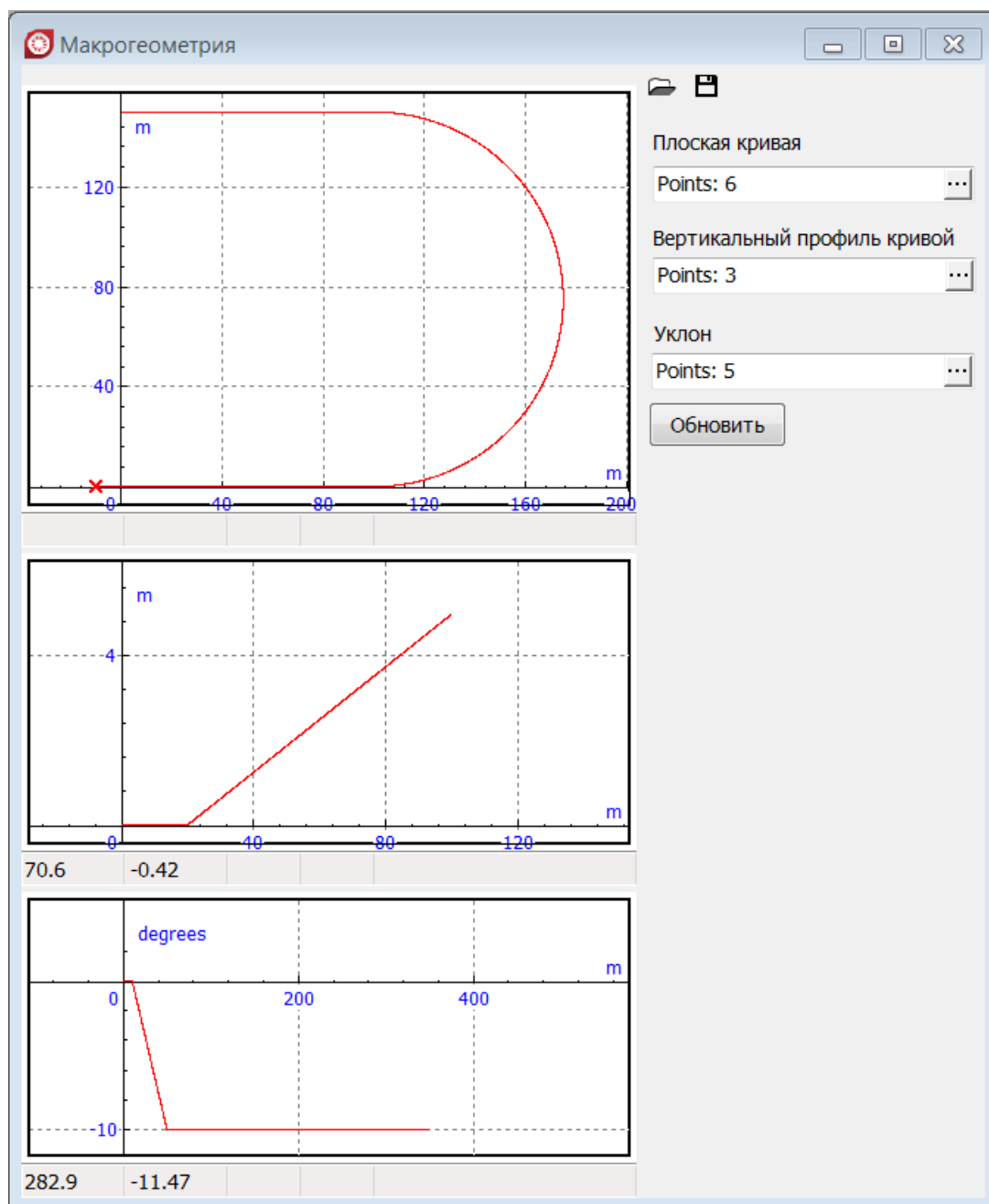



Рис. 1.2. Мастер описания макрогеометрии пути.
 План (сверху), вертикальный профиль (посередине), уклон (снизу) пути

В данном случае макропрофиль пути описывается при помощи трех плоских кривых: плана пути, вертикального профиля пути и уклона пути, рис. 1.2. Эти плоские кривые представляют собой набор точек, соединенных прямыми, дугами окружности и сплайнами. План пути задается координатами точек (X_i, Y_i) в базовой инерциальной системе координат. Вертикальный профиль пути задается точками (Z_i, s_i) , где Z_i – вертикальная координата пути в СК0, s_i – пройденный путь (расстояние вдоль реальной траектории пути).

Профиль уклона пути задается точками (γ_i, s_i) , где γ_i – угол поперечного уклона дороги (градусы). Все три профиля пути (горизонтальный, вертикальный и уклон) сохраняются вместе в одном *.mgf файле. Файлы *.mgf по умолчанию располагаются в каталоге {Данные УМ}\car\macrogeometry.

Чтобы создать новый файл макрогеометрии пути, в программе **UM Simulation** используйте пункт меню **Инструменты/Создание макрогеометрии**. Мастер создания макрогеометрии пути представлен на рис. 1.2.

Кривые профилей описываются в *редакторе кривых* (см. рис. 1.3) по нажатию кнопки . Подробнее о редакторе кривых см. [Глава 3](#). п. *Редактор кривых*.

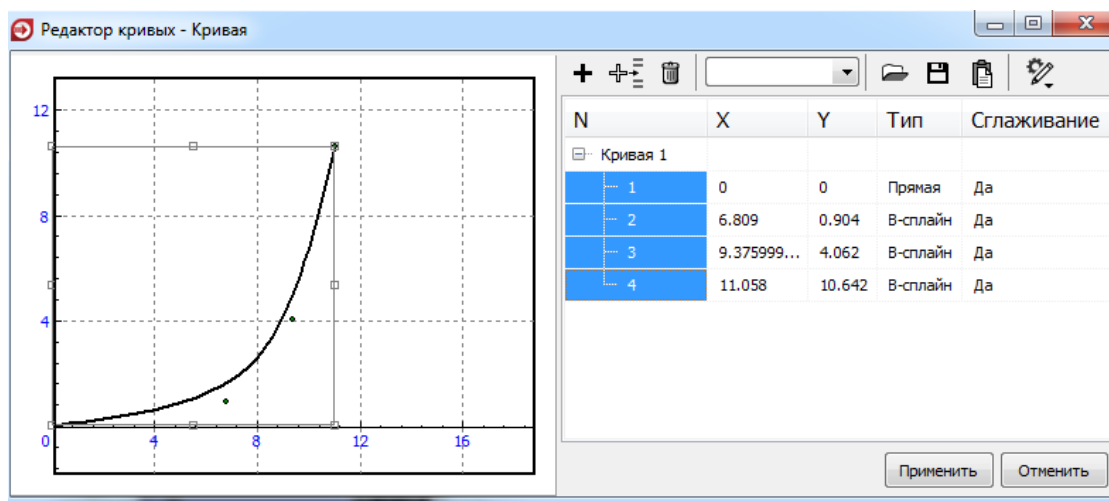


Рис. 1.3. Редактор кривых

Используйте кнопку **Обновить** на рис. 1.2 для синхронизации вертикального и горизонтального профилей. После нажатия этой кнопки синтезируется новый вертикальный профиль, причем число точек нового вертикального профиля будет равно числу точек горизонтального и путевая координата S_i будет рассчитана по горизонтальному профилю автоматически.

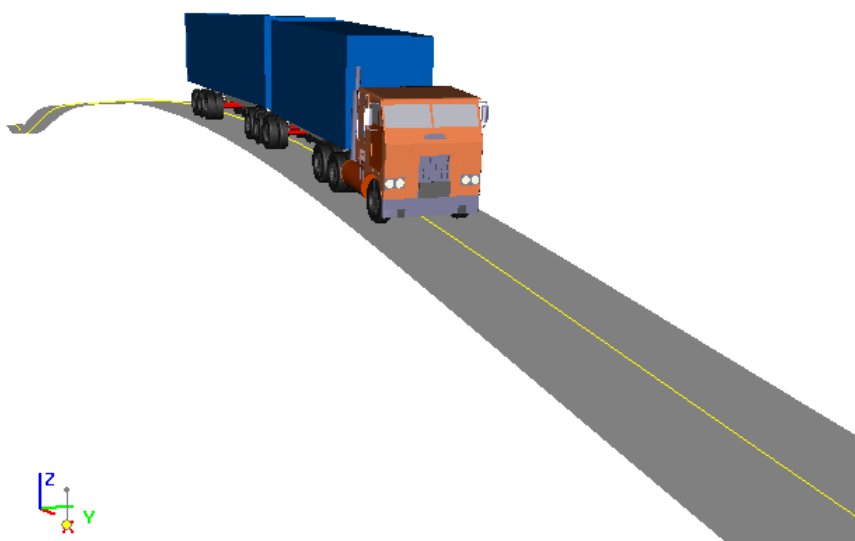


Рис. 1.4. Вертикальный макропрофиль

Замечание 1. Рекомендуется начинать кривую горизонтального и вертикального профиля из начала отсчета (0, 0); в начале пути вставлять прямой участок в плане и профиле.

Замечание 2. Модель водителя с ПИД и прогнозированием второго порядка (ПИД-ПВП модель водителя) использует производную от отклонения, которая должна иметь непрерывную первую производную, для чего для сглаживания вводимых данных на криволинейных участках нужно вводить сопряжение точек сплайнами.

1.3.2. Движение автомобиля по триангулированной поверхности (полигон)



Рис. 1.5. Пример движения автомобиля по триангулированной дороге

Дополнительные возможности создания комбинации макропрофиля и микропрофиля дает использование триангулированной поверхности (полигона), появившееся в УМ 2023. Рельеф поверхности/дороги в данном случае задается в виде файла, содержащего графический образ поверхности как набор графических элементов типа ASC (набор треугольников), рис. 1.5. Автомобиль следует маршруту - заданной пользователем траектории на поверхности (желтая кривая на рис. 1.5). При расчете взаимодействия колеса с дорогой учитывается реальная геометрия поверхности. Триангуляция рельефа местности может быть получена с использованием современных средств видеосъемки.

Файлы триангулированных поверхностей хранятся в стандартном каталоге {**Данные УМ**}\Car\TestingArea\. Конкретный путь зависит от установки УМ, пример:

```
c:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\2023\Car\TestingArea\
```

Стандартная поставка УМ 2023 содержит три файла триангуляции дорожного полотна и пересеченной местности:

- Road.img – пример триангулированной поверхности дороги с пересечением, рис. 1.5;

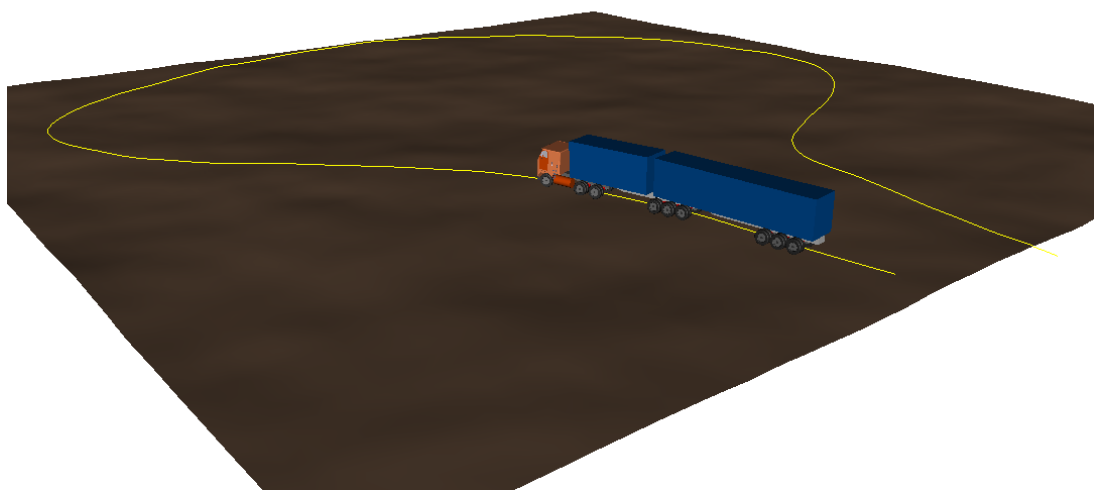


Рис. 1.6. Квадратная область пересеченной местности

- Square testing ground.img – пример квадратной области пересеченной местности;



Рис. 1.7. Пересеченная местность с наклоном

- Surface with slope.img – пересеченная местность с наклоном в продольном и поперечном направлениях.

1.3.2.1. Создание файлов триангулированных поверхностей в формате UM

Поверхность должна быть предварительно создана и сохранена в формате STL. Для создания может быть использованы CAD программы или редакторы типа Blender 3D. Для создания файла поверхности в формате UM

- запустите программу ввода UMinput.exe;
- откройте окно конвертации STL файлов с помощью команды меню **Инструменты | Импорт из CAD | Файлы *.stl**;

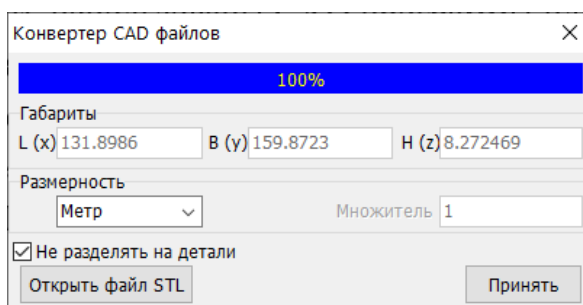


Рис. 1.8. Конвертер STL файлов

- откройте файл с помощью кнопки **Открыть файл STL** (рис. 1.8); при необходимости смените размерность; включите опцию **Не разделять на детали** и выполните конвертацию с помощью кнопки **Принять**.

При успешной конвертации создается модель UM, содержащая графически образ поверхности, рис. 1.9.

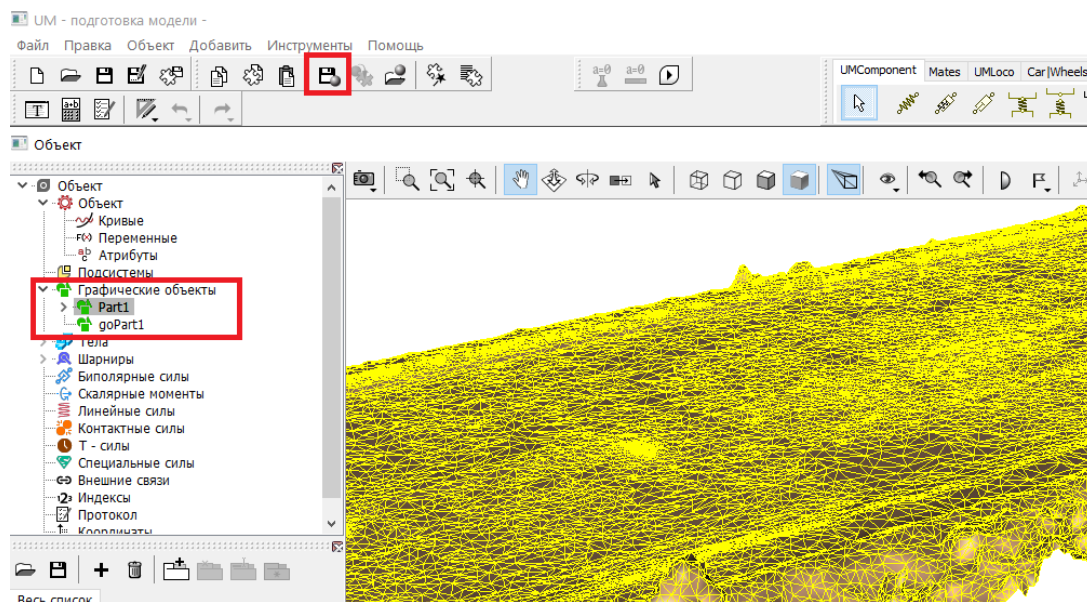



Рис. 1.9. Графический образ поверхности

Для добавления поверхности в базу данных перейдите к графическому объекту Part1 (рис. 1.9) и сохраните его в стандартной папке с файлами полигонов автомобильного модуля с помощью кнопки  на панели инструментов, рис. 1.10.

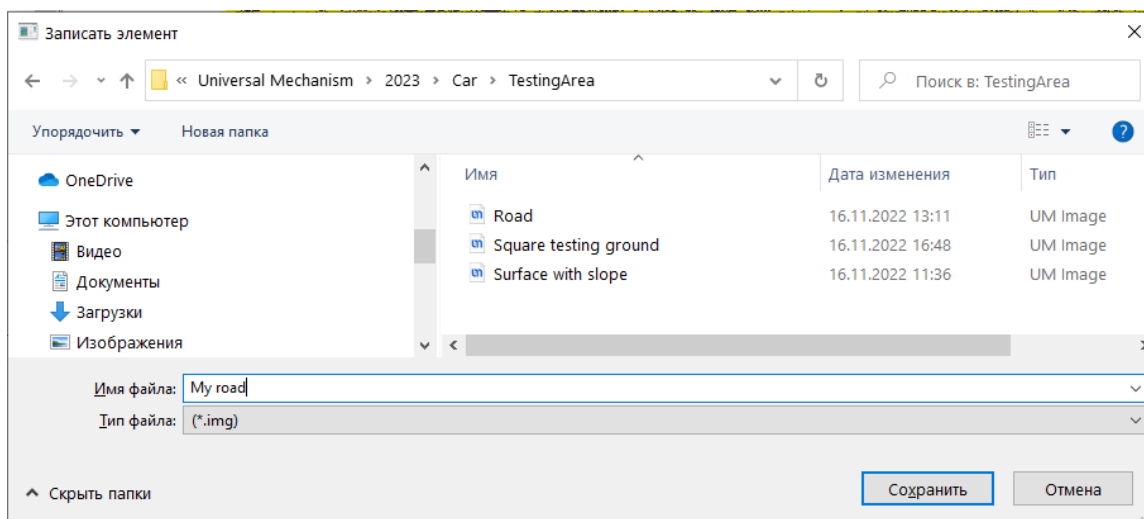


Рис. 1.10. Сохранение файла под именем *My road* в базу данных триангулированных поверхностей

1.3.2.2. Задание маршрутов

Для использования триангулированной поверхности в тестах с водителем следует задать список маршрутов, которым будет следовать автомобиль. Для задания и редактирования списка следует

- запустить программу моделирования UMSimulation.exe;
- загрузить любую модель автомобиля;
- открыть окно инспектора моделирования и вкладку Автомобиль | Полигон, рис. 1.11;

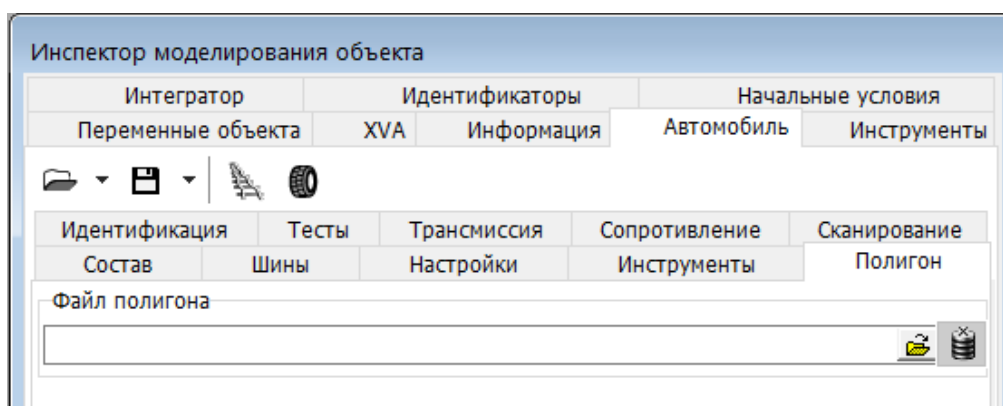



Рис. 1.11. Вкладка задания полигона и маршрутов

Задание полигона

Используя кнопку  (рис. 1.11) выберите файл *.img, содержащий предварительно созданный графический образ полигона. Если для выбранного файла уже был создан список маршрутов, отобразится в таблице (route - маршрут).

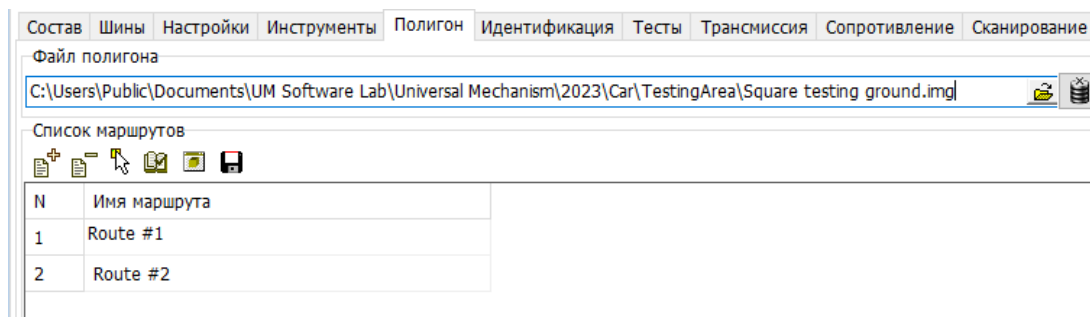





Рис. 1.12. Список маршрутов

Создание и редактирование маршрутов

Маршрут – это кривая, задаваемая пользователем на полигоне, которой следует автомобиль 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 анимационного окно с изображением полигона, в котором пользователь мышкой указывает набор маркеров (ключевых точек) на маршруте (рис. 1.13). Следует руководствоваться следующими правилами задания маркеров.

- Первая и вторая точки определяет начальное положение автомобиля, так что начало отсчета СК0 размещается в первой точке, а ось X продольного движения определяется второй точкой, рис. 1.14.

- Маркеры размещаются в положениях, соответствующих изменению направления движения, а также в точках, где предполагается начать и закончить изменение продольной скорости движения, рис. 1.15.
- После назначения ключевых точек следует закрыть анимационное окно и подтвердить сохранение результатов ввода.

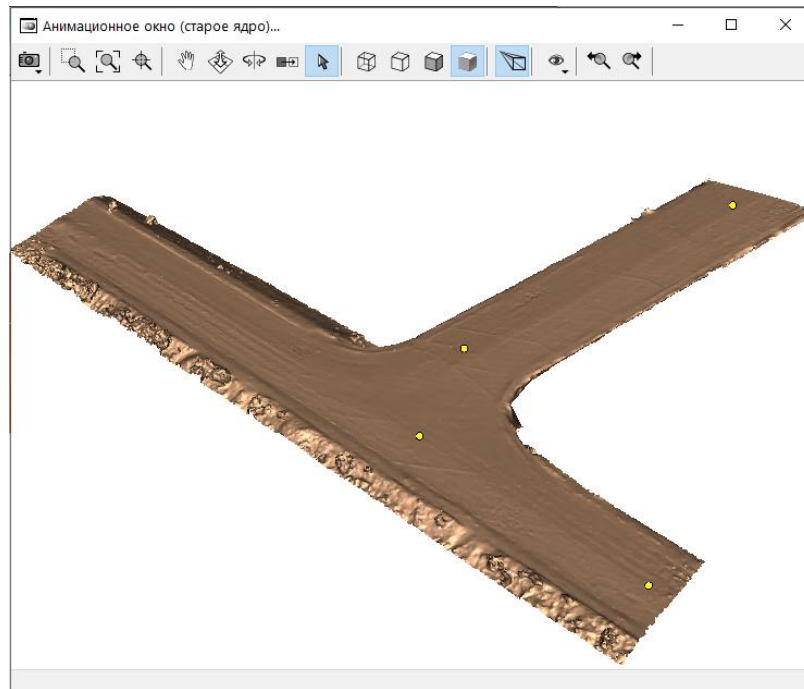


Рис. 1.13. Задание ключевых точек маршрута

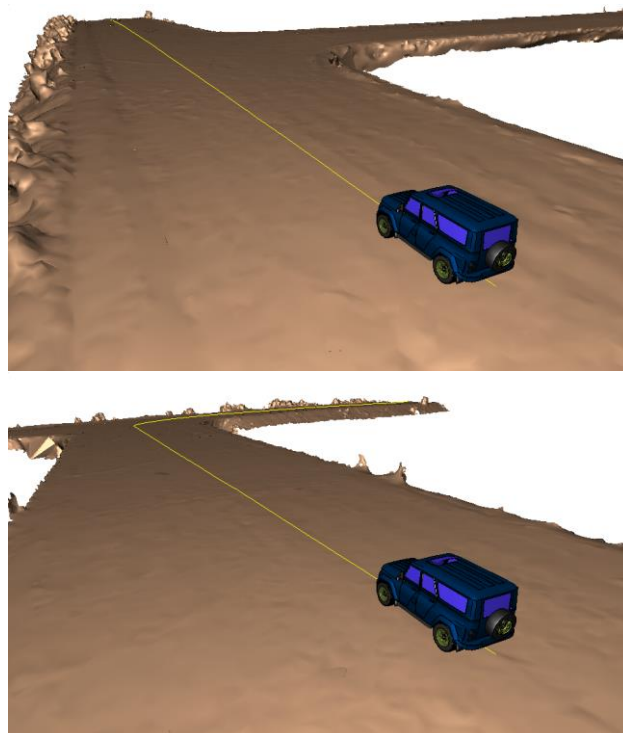


Рис. 1.14. Примеры начальных положений автомобиля для различных маршрутов

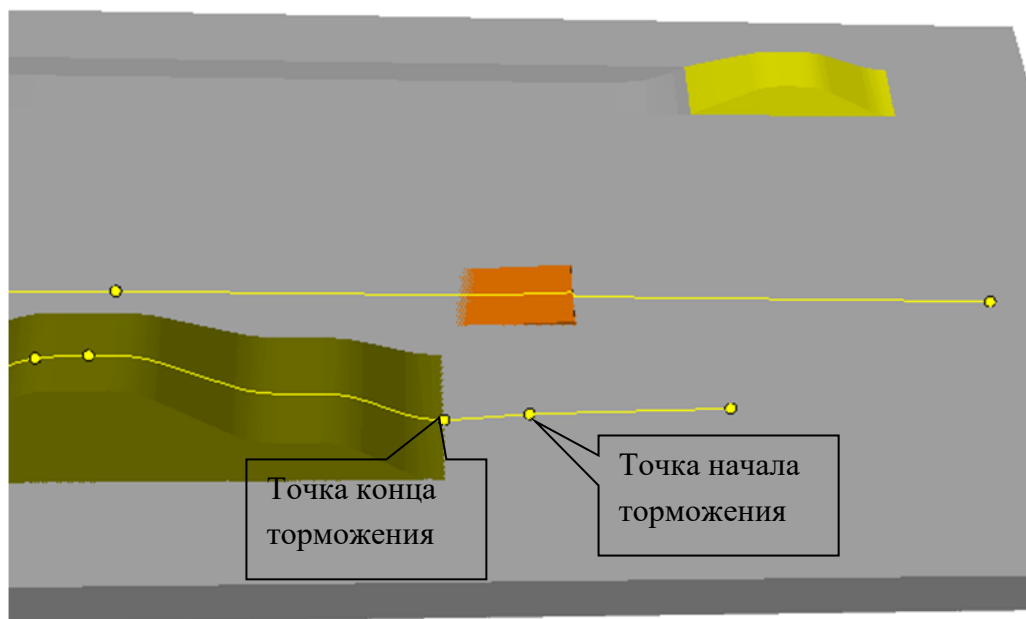




Рис. 1.15. Маркеры, соответствующие началу и концу торможения

 Редактирование выделенного маршрута в окне редактора кривых.

Для редактирования маршрута выделите его в списке, щелкните на кнопке . Появится редактор кривых, рис. 1.16.

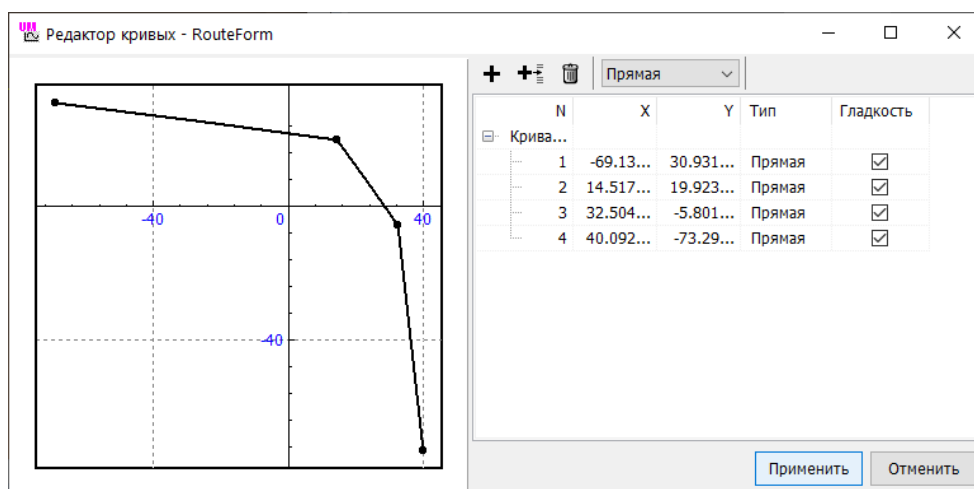


Рис. 1.16. Исходный маршрут в редакторе кривых

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. 1.17.

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

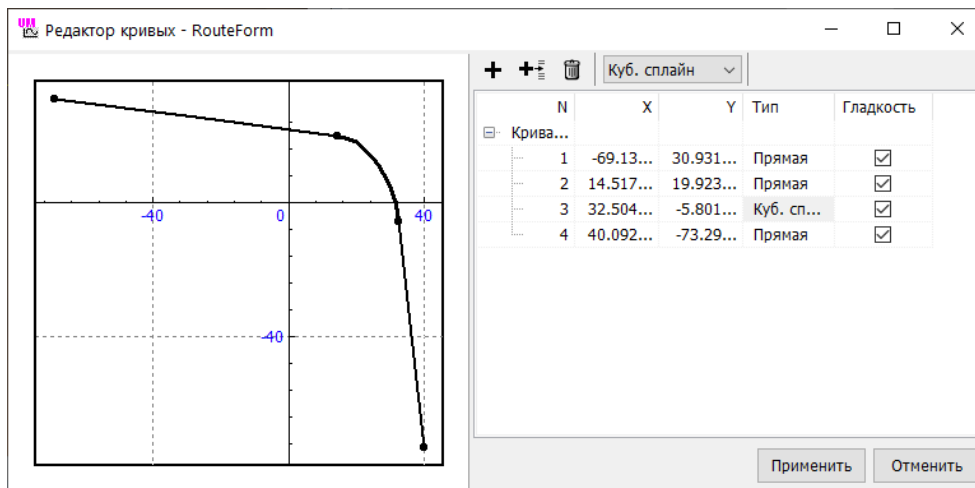


Рис. 1.17. Маршрут после редактирования

📺 *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. 1.18.

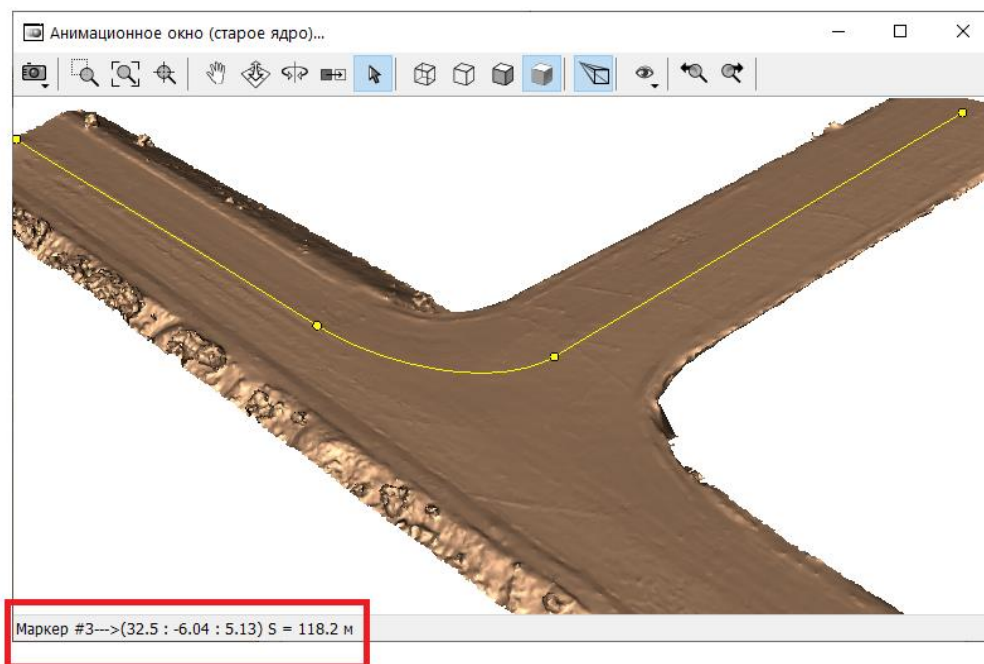


Рис. 1.18. Маршрут в анимационном окне

💾 *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} \Car\TestingArea\Road.img

маршруты будут сохранены в файл

{Данные УМ} \Car\TestingArea\Road.rt.

1.3.3. Микропрофиль пути

Микропрофиль пути в программе задается реализацией в зависимости от пути. Микропрофиль пути хранится в файле **.irr*² отдельно для левой и правой колеи. Файлы **.igt* – текстовые файлы, состоящие из двух столбцов, разделенных одним или более пробелом. Первый столбец – путевая координата, второй столбец – неровности. Путевая координата и неровности задаются в метрах. При генерации файлов **.irr* при помощи *Мастера создания неровностей* шаг по пути автоматически принимается равным 0,1 м. В процессе расчета динамики для сглаживания неровностей используется бета-сплайн. В качестве десятичного разделителя в файлах **.irr* используется точка. Ниже приведен пример файла **.irr*:

```
0 -0.0247274
0.1 -0.0266635
0.2 -0.0283658
0.3 -0.0294865
0.4 -0.0299168
0.5 -0.0298581
0.6 -0.0297213
0.7 -0.029892
0.8 -0.0304888
```

1.3.3.1. Библиотека файлов микропрофиля пути

В поставку программного комплекса «Универсальный механизм» в конфигурации с модулем **УМ Automotive** входит библиотека спектров и реализаций неровностей, соответствующих различным дорожным покрытиям и их состояниям.

Спектры полусуммы и полуразности неровностей приводятся по [3] и соответствуют расстоянию между колеями 1,8 м. По этим спектрам с помощью инструмента создания файлов неровностей синтезированы файлы неровностей, входящие в эту библиотеку.

О том, как создать новые файлы неровностей см. п. 1.3.3.2. "Создание файлов микропрофиля пути", с. 1-22.

Спектры неровностей

Путь к файлам спектров: {Данные УМ}\car\irregularities\spectrum.

Файл *.crv	Комментарий*
concrete+, concrete-	Цементобетон на жестком основании
asphalt_fine+, asphalt_fine-	Асфальт в хорошем состоянии
asphalt_satisfactory+, asphalt_satisfactory-	Асфальт в удовлетворительном состоянии
cobble+, cobble-	Булыжник в удовлетворительном состоянии

² От английского irregularities – неровности

*Постфиксы + и - соответствуют спектрам полусуммы (+) и полуразности (-) микро-профилей.

Для синтеза реализаций неровностей для левых и правых колес автомобиля по спектрам полусуммы и полуразности используйте закладку **Колея** в разделе описания отдельного профиля. Обратите внимание, что частота в файлах спектров, входящих в библиотеку, задана в радианах в секунду и при генерации неровностей нужно включать флажок **Круговая частота**, см. рис. 1.23.

Неровности

Путь к файлам неровностей: {Данные УМ}\car\irregularities.

Файл *.irr	Комментарий*
concrete_left, concrete_right	Цементобетон на жестком основании
asphalt_fine_left, asphalt_fine_right	Асфальт в хорошем состоянии
asphalt_satisfactory_left, asphalt_satisfactory_right	Асфальт в удовлетворительном состоянии
cobble_left, cobble_right	Булыжник в удовлетворительном состоянии

*Постфиксы **left** и **right** обозначают левую и правую колею соответственно

Графики неровностей для левой и правой колеи для неровностей из библиотеки представлены на рисунках ниже.

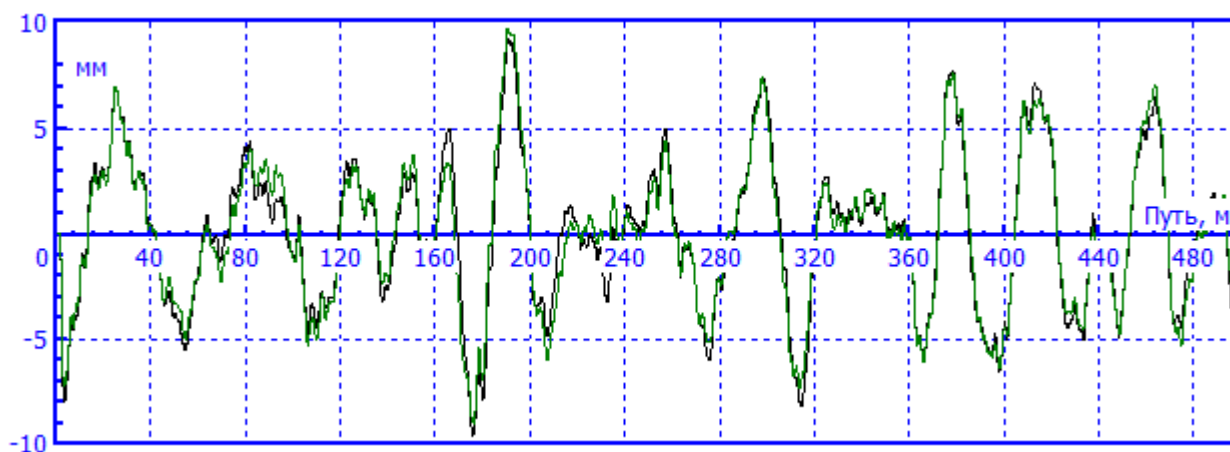


Рис. 1.19. Цементобетон на жестком основании

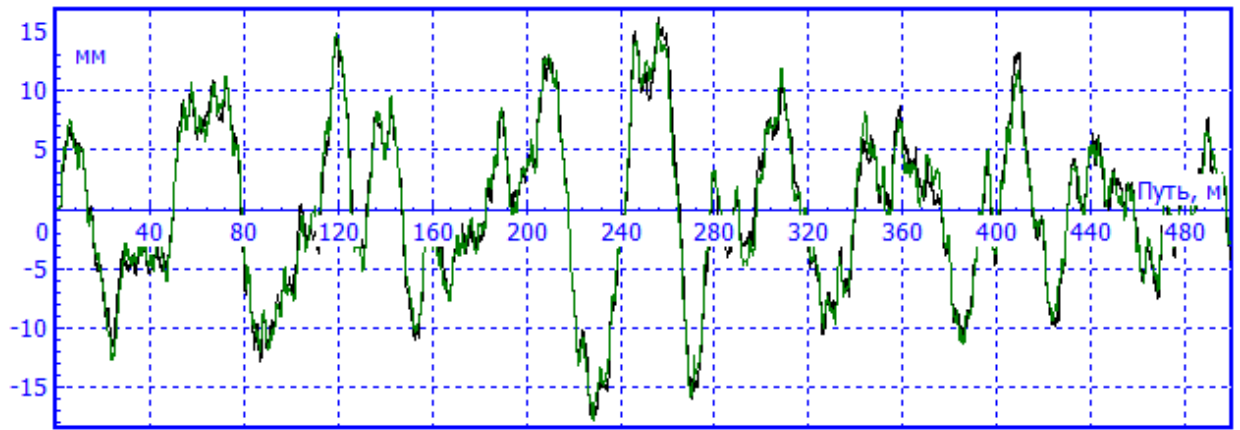


Рис. 1.20. Асфальт в хорошем состоянии

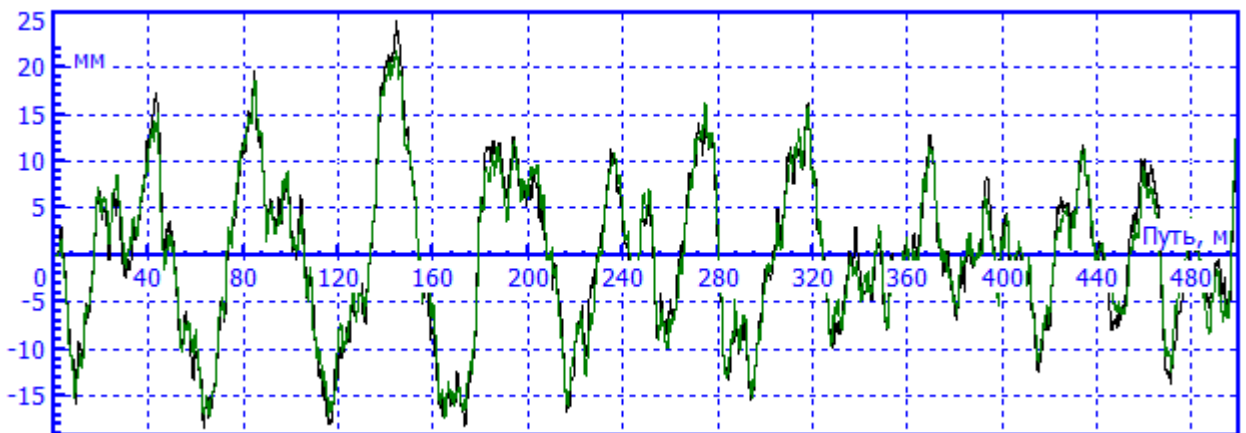


Рис. 1.21. Асфальт в удовлетворительном состоянии

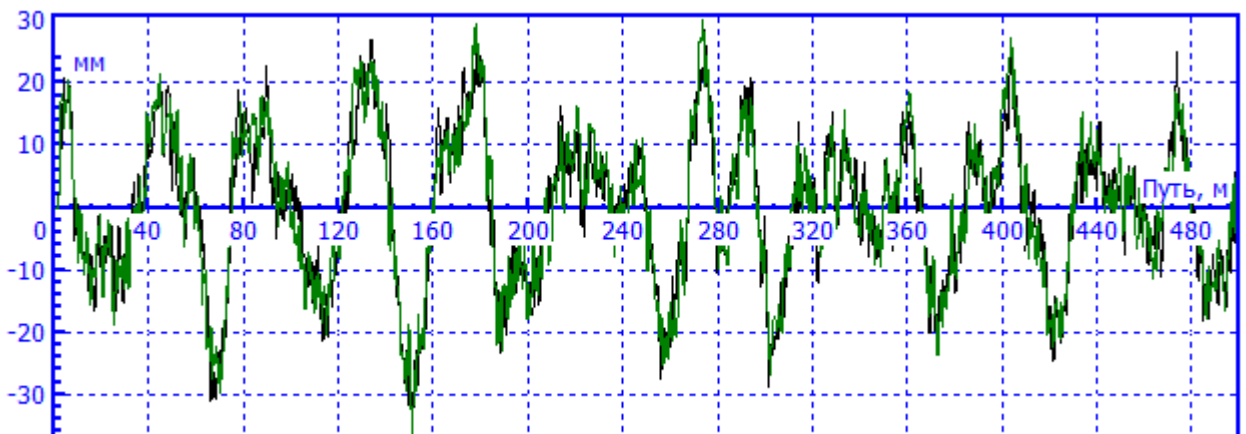


Рис. 1.22. Булыжник в удовлетворительном состоянии

1.3.3.2. Создание файлов микропрофиля пути

1.3.3.2.1. Инструмент создания неровностей

Для создания микропрофиля (в дальнейшем – неровностей) используется специальный инструмент, встроенные в программу **UM Simulation**. Для открытия окна создания неровностей пути используйте пункт меню **Инструменты | Создание неровностей...**, рис. 1.23.

Окно разделено на две части: в верхней части окна находится результирующий профиль, в нижней описываются отдельные профили, из которых формируется результирующий.

Результирующий профиль, график которого располагается в верхней части окна, представляет собой сумму отдельных неровностей. Список отдельных профилей составляющих результирующий профиль показывается слева вверху (рис. 1.23). Таким образом, в результирующем профиле можно наложить одну неровность на другую, «склеить» участки различных неровностей вдоль пути и т.д.

Удаление или выключение отдельного элемента из списка составляющих профиля удаляет соответствующую составляющую из результирующего профиля.

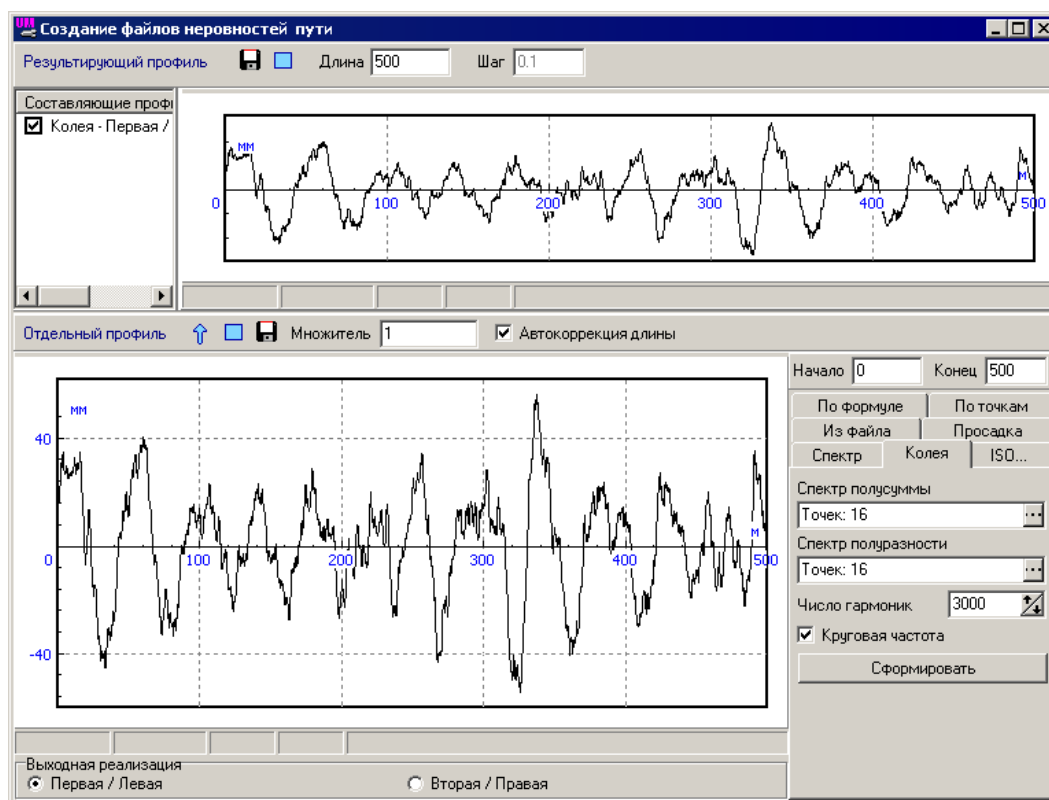




Рис. 1.23. Мастер создания неровностей

Порядок работы

Результирующий профиль формируется как сумма *отдельных профилей*. Сформируйте отдельный профиль в нижней части окна. С помощью кнопки  добавьте текущий отдельный профиль к результирующему. При добавлении отдельного профиля используйте поля **Начало**, **Конец** и **Множитель**. При создании результирующего профиля есть воз-



возможность, как наложить различные неровности друг на друга по вертикали, так и соединить различные участки отдельных профилей вдоль пути.

Готовый результирующий профиль нужно сохранить в отдельный *.irr файл при помощи кнопки  на панели **Результирующий профиль**.




Элементы управления

Рассмотрим структуру данного инструмента и назначение отдельных элементов управления.

Рассмотрим назначение кнопок и полей на верхней панели инструментов:

- кнопка  – для записи результирующей неровности в файл;
- кнопка  – для очистки (сброса) результирующей неровности;
- в поле **Длина** вводится длина результирующей неровности в метрах.

Рассмотрим назначение кнопок на нижней панели инструментов.

- кнопка  – для добавления текущей единичной неровности к результирующему профилю;
- кнопка  – для записи текущей неровности в файл;
- кнопка  – для очистки текущей неровности;
- поле **Множитель** – при добавлении к результирующему профилю текущая неровность умножается на число, указанное в данном поле. Рассмотрим пример. У пользователя имеется неровность, полученная в результате измерений в виде текстового файла, причем значение неровности представлено в миллиметрах. С помощью закладки. **По точкам** данная неровность может быть принята. Однако перед пересылкой в результирующий профиль следует установить 0,001 в качестве множителя.
- ключ **Автокоррекция длины** – при включенном ключе длина результирующей неровности автоматически увеличивается, чтобы полностью вместить добавляемую неровность;
- поле **Начало** – указывает, от какого значения продольной координаты будет добавлена текущая неровность к результирующему профилю; заметим, что график отдельной неровности в нижнем окне всегда начинается от нуля, то есть, при добавлении к результирующему профилю будет сдвинут на величину, указанную в качестве начала неровности;
- поле **Конец** – указывает длину текущей неровности, точнее, длина равна разности между конечной и начальной продольной координатой.

1.3.3.2.2. Неровности, генерируемые по спектральной плотности мощности (СПМ)

Путевые неровности могут быть заданы по спектральным плотностям мощности (СПМ) $S(n)$, $S(\omega)$, являющейся функцией пространственной частоты n (цикл/м) или циклической пространственной частоты $\omega = 2\pi n$ (рад/м). Для генерирования высот неровно-

стей z используется широко известный алгоритм, основанный на разложении Райса-Пирсона:

$$z(s_k) = \sum_{i=0}^N \sqrt{2S(n_i)2\pi\Delta n} \cos(2\pi n_i s_k + \varphi_i), s_k = k\Delta s, n_i = n_0 + i\Delta n,$$

где Δs – шаг неровностей, м; N – число гармоник; $S(n)$ – спектральная плотность неровностей пути, м²/цикл/м; Δn – шаг по частоте, цикл/м; n_0 – минимальная частота, φ_i – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале $[-\pi, \pi]$.

Обычно для аппроксимации СПМ микропрофиля используются функции вида [6]

$$S(n) = Cn^w$$

с некоторыми постоянными C, w , то есть в логарифмическом масштабе график СПМ является прямой линией, наклон которой определяется отрицательной постоянной w :

$$LgS = C + wlg n$$

Для построения микропрофиля левой и правой колеи удобно использовать коэффициент корреляции $\rho(n)$, оценки которого в зависимости от частоты при различных значениях ширины колеи $2b$ предложены в работе [7], рис. 1.24. С помощью коэффициента корреляции можно получить СПМ полусуммы S_+ и полуразности S_- высот неровностей левой и правой колеи по значению СПМ S одного сечения [3]

$$S_+(n) = \frac{S(n)(1 + \rho(n))}{2},$$

$$S_-(n) = \frac{S(n)(1 - \rho(n))}{2},$$

Генерируя по СПМ S_+, S_- с помощью формулы Райса-Пирсона реализации полусуммы и полуразности микропрофилей z_+, z_- , получим функции неровностей левой и правой колеи $z_l = z_+ + z_-$, $z_r = z_+ - z_-$.

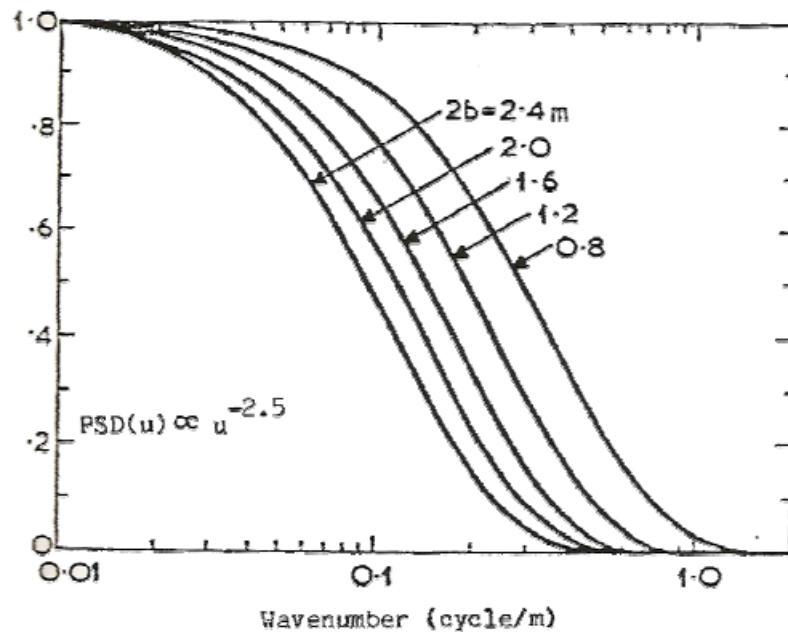


Рис. 1.24. Коэффициент корреляции микропрофилей левой и правой колеи

1.3.3.2.3. Модели неровностей

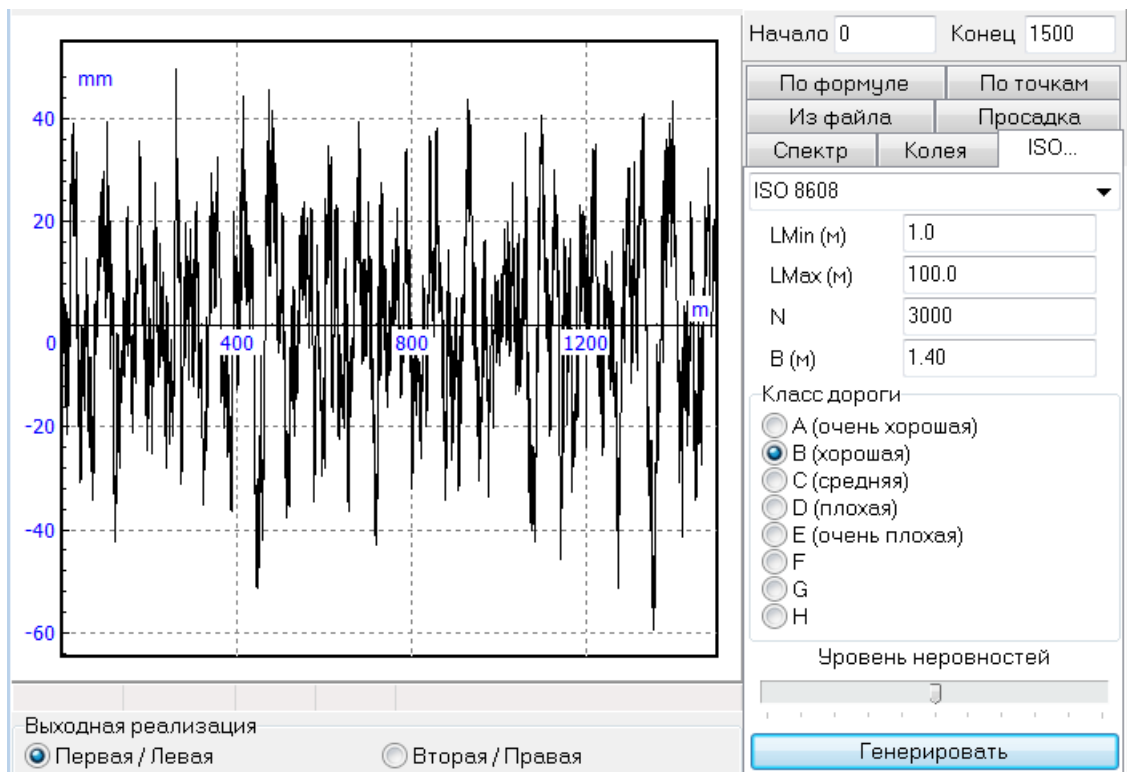


Рис. 1.25. Генерация неровностей левой и правой колеи

Для одновременного генерирования неровностей левой и правой колеи по СПМ следует задать, рис. 1.25:

- тип неровностей (ISO 8608, Wong, Dixon, эксперимент);
- минимальную и максимальную длину неровностей LMin, LMax;
- число гармоник N в реализации;

- ширину колеи В.

После этого следует задать данные, зависящие от типа неровностей, которые будут рассмотрены ниже, и щелчком на кнопке **Генерировать** выполнить расчет реализаций. Выбором типа Выходная реализация можно переключать левую и правую колеи и стандартным образом, описанным в п. 1.3.3.2.1. "Инструмент создания неровностей", с. 1-22, сохранить реализации в два файла.

Рассмотрим теперь различные типы СПМ.

1.3.3.2.3.1. ISO 8608

Стандартом ISO 8608 1995 (e) вводится классификация уровня неровностей (А-Н) и СПМ, которая может быть использована для генерации случайных неровностей. Стандарт определяет СПМ следующим образом, рис. 1.26:

$$S(n) = \begin{cases} S_0(n/n_0)^{w_1}, n < n_0 \\ S_0(n/n_0)^{w_2}, n > n_0 \end{cases}$$

где n – частота (число колебаний на метр). В стандарте ISO 8608 рекомендованы следующие значения параметров, входящих в эту формулу:

$$n_0 = \frac{1}{2\pi}, w_1 = -2, w_2 = -1.5.$$

Параметр S_0 характеризует уровень неровностей в соответствии с табл. 1.1.

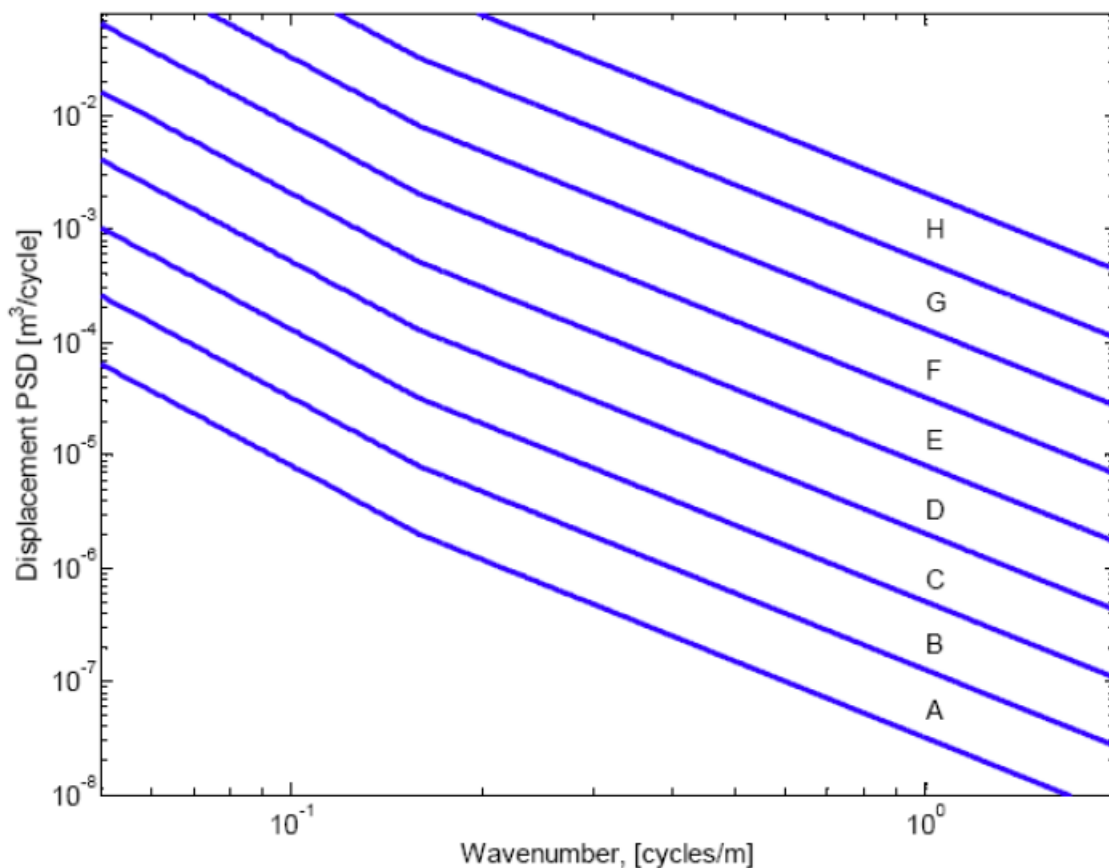


Рис. 1.26. СПМ в соответствии со стандартом ISO 8608

Таблица 1.1

Классификация уровней неровностей по стандарту ISO 8608

Класс дороги	Уровень неровностей, S_0 ($\times 10^{-6}m^3/cycles$)
A (очень хорошая)	<8
B (хорошая)	8-32
C (средняя)	32-128
D (плохая)	128-512
E (очень плохая)	512-2048
F	2048-8192
G	8192-32768
H	>32768

Для генерации неровностей следует дополнительно задать класс дороги и уровень неровностей в пределах выбранного класса, рис. 1.25.

На рис. 1.27 показаны неровности класса B, средний уровень $S_0 = 20 \times 10^{-6}$, LMin = 3 м, LMax = 30 м, число гармоник N = 3000.

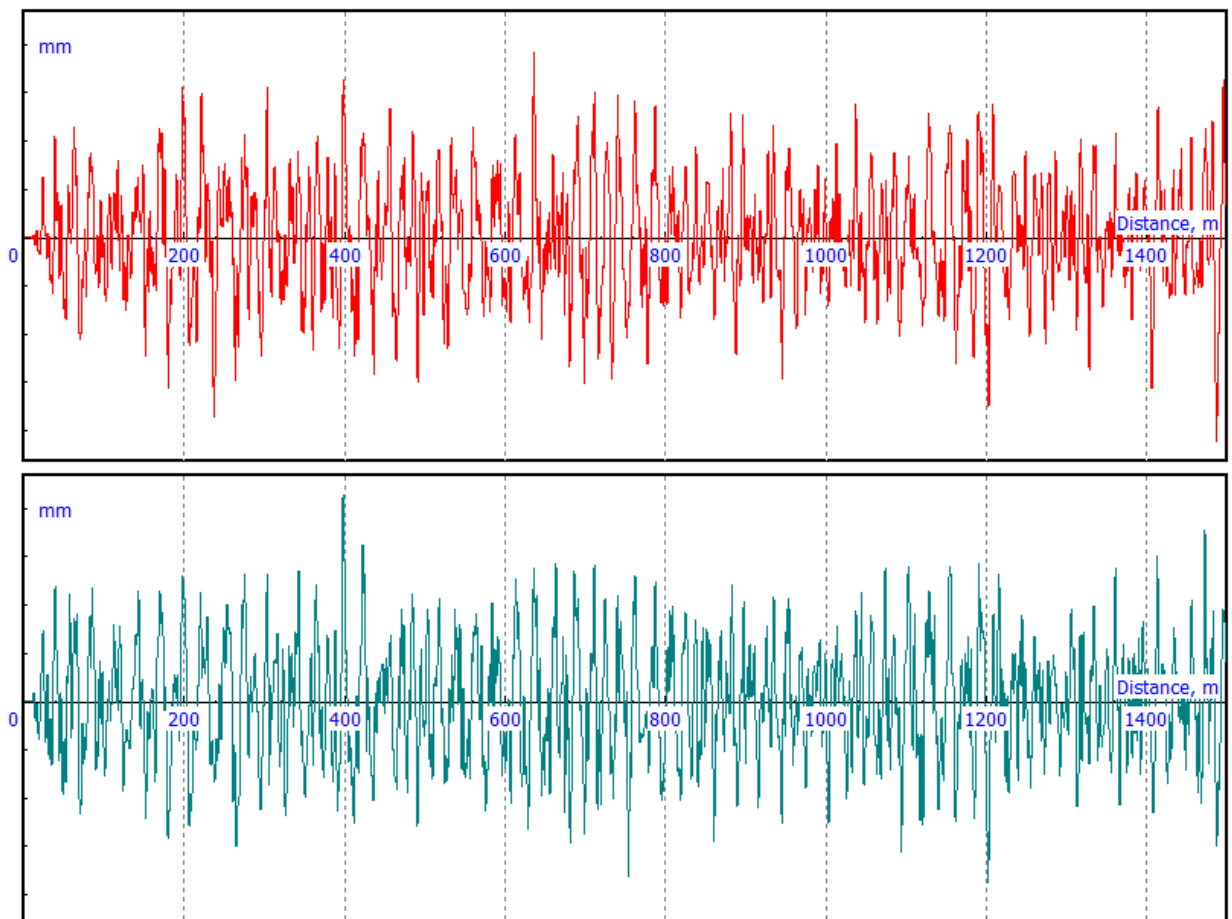


Рис. 1.27. Пример неровностей для левой и правой колес

1.3.3.2.3.2. Wong

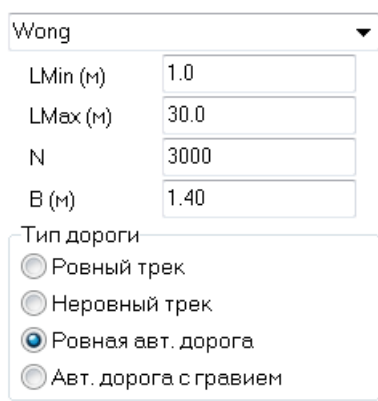


Рис. 1.28. Параметры неровностей из книги Дж. Вонга [6]

Таблица 1.2

Значения параметров СПМ из книги Дж. Вонга [6]

Описание дорожных условий	w	C
Ровный трек	-3.8	4.3×10 ⁻¹¹
Неровный трек	-2.1	8.1×10 ⁻⁶
Ровная автомобильная дорога	-2.1	4.8×10 ⁻⁷
Автомобильная дорога с гравием	-2.1	4.4×10 ⁻⁶

В книге Дж. Вонга [6] приведены данные по параметрам СПМ $S(n) = Cn^{-w}$ для некоторых типов дорог, табл. 1.2, рис. 1.28.

1.3.3.2.3.3. Dixon



Рис. 1.29. Классификация неровностей по Диксону, [8]

Rating	S mean (cm ³ /c)	S range (cm ³ /c)	ISO class	ISO description
2	4	<8	A	very good
3	8			
4	16	8–32	B	good
5	32			
6	64	32–128	C	average
7	128			
8	256	128–512	D	poor
9	512			
10	1024	512–2048	E	very poor
11	2048			
12	4096	2048–8192	F	—
14	16384	8192–32768	G	—
16	65536	>32768	H	—

В работе Дж. Диксона [8] предлагается расширенная классификация неровностей, включающая стандарт ISO 8608 в качестве частного случая. Класс дороги устанавливается от 2 до 16 с удвоением параметра S_0 с увеличением класса на единицу, что соответствует росту уровня неровностей в $\sqrt{2}$ раз. Используется та же математическая формула для СПМ, что и в ISO 8608

$$S(n) = \begin{cases} S_0(n/n_0)^{w_1}, & n < n_0 \\ S_0(n/n_0)^{w_2}, & n > n_0 \end{cases}$$

$n_0 = 1/2\pi$. Параметры w_1, w_2 являются свободными и задаются пользователем. По умолчанию предлагается $w_1 = w_2 = -2,5$.

1.3.3.2.3.4. Эксперимент

Рис. 1.30. Параметры СПМ

В данном случае пользователь получает возможность внести произвольные значения параметров СПМ неровностей, задаваемой формулой

$$S(n) = \begin{cases} S_0(n/n_0)^{w_1}, & n < n_0 \\ S_0(n/n_0)^{w_2}, & n > n_0 \end{cases}$$

рис. 1.30. Таким образом, данный тип задания является наиболее общим из рассмотренных выше и, в частности, может реализовать СПМ, полученную с использованием экспериментальных данных.

1.3.3.2.3.5. Колея

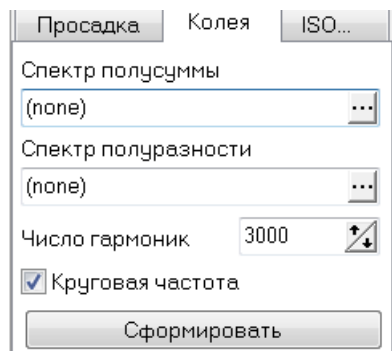



Рис. 1.31. СПМ типа «колея»


Как и выше, данный инструмент используется для синтеза коррелированных неровностей и появился в УМ раньше методов, описанных выше в данном разделе.

Задайте графики спектра полусуммы и полуразности, при необходимости воспользуйтесь файлами спектров из библиотеки, см. п. 1.3.3.1. "Библиотека файлов микропрофиля пути", с. 1-19. При формировании неровностей с использованием спектров из библиотеки не забывайте включать флажок **Круговая частота**, так как частота этих спектров задана в рад/с.

По спектрам полусуммы и полуразности строится две реализации. Условно назовем их левая и правая. С помощью кнопок Выходная реализация выберите ту реализацию, которая в данный момент отображается в окне отдельный профиль и будет добавлена к результирующему профилю при нажатии кнопки .

1.3.3.2.4. Другие способы задания неровностей


1.3.3.2.4.1. По формуле

В поле **Функция неровности** следует указать аналитическое выражение $f(x)$ для неровности с использованием стандартных функций ([Глава 3](#), п. *Стандартные функции и константы*) и нажать на клавишу **Enter** или щелкнуть на кнопке  в правой части поля ввода. Можно также выбрать одно из стандартных выражений в выпадающем меню: **модуль синуса** и **Единичный горб**.


1.3.3.2.4.2. Просадка (единичная неровность)

Используется для описания единичной неровности. Длина неровности определяется разностью положений начала и конца неровности, задаваемых в полях **Начало** и **Конец**. Для задания амплитуды и знака (горб/просадка) используйте поле **Множитель**.

1.3.3.2.4.3. Из файла

Читает неровность из ранее созданного файла *.irr. Для выбора файла используйте кнопку  в правой части. В результирующий график отсылается часть неровности, длина которой определяется парой **Начало** и **Конец**.

1.3.3.2.4.4. По точкам

Неровности задаются в виде набора точек, задаваемых в редакторе кривых ([Глава 3](#), п. *Конструктор объекта/Редактор кривых*). Для вызова редактора используйте кнопку . С помощью данного редактора можно, в частности, ввести измеренную неровность. Для этого данные должны быть представлены в любом текстовом редакторе в виде двух колонок. В первой колонке размещается продольная координата, во второй – величина неровности, например,

```
0 0
0.05 2.011
0.10 5.321
....
```

Обратите внимание, что продольная координата в окне редактора кривых вводится в метрах, а величина неровности – в миллиметрах. Если по тем или иным причинам Вы ввели неровности в других единицах измерения, то перевести неровности в миллиметры можно используя поле **Множитель**.

Для ввода этих данных из буфера выполните следующие действия:

- удалите все ранее введенные координаты точек
- скопируйте данные в буфер из любого текстового редактора стандартным образом;
- активизируйте мышкой редактор кривых и вставьте в него данные (Ctrl+V или Shift+Insert).

Обратите внимание, что при поточечном вводе неровностей точки можно вводить с любым шагом по продольной координате. Однако следует помнить, что при записи файлов неровностей *.irr через описанные точки будет проведен В-сплайн, и в выходной файл точки будут помещены точки с шагом 0,1 м. В-сплайн используется для сглаживания профиля неровностей. Таким образом, профиль, записанный в выходной *.irr файл, будет несколько отличаться от оригинального профиля введенного поточечно из-за особенностей сглаживания В-сплайном. Физический смысл такого сглаживания – фильтрация мелких неровностей самой шиной.

1.3.3.3. Выбор микропрофиля пути

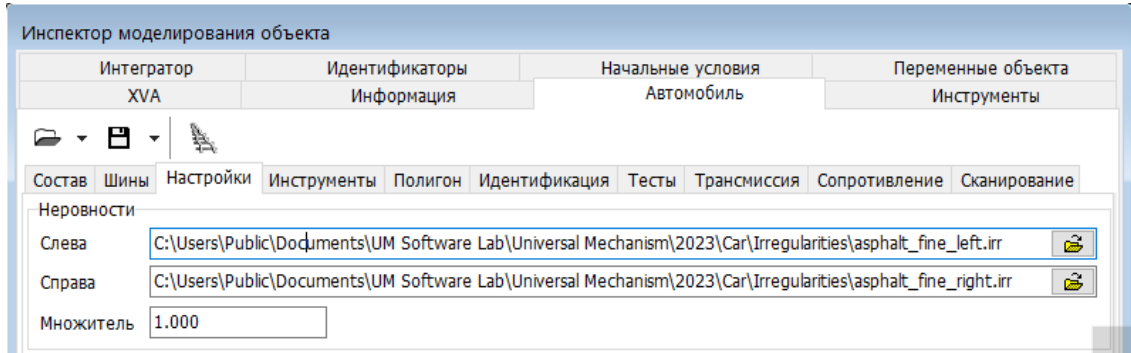



Рис. 1.32. Назначение файлов неровностей

Для назначения файлов микропрофиля пути используется закладка **Автомобиль | Настройки** в **Испекторе моделирования объекта**, рис. 1.32. Неровности для левых и правых колес автомобиля задаются отдельно. Пути к файлам неровностей сохраняются в файле автомобильных настроек *.car.

Число, заданное в поле **Множитель** позволяет понизить или увеличить неровности умножением на это число.

Для вывода в отдельном окне текущих неровностей пути нажмите кнопку  на панели инструментов закладки **Автомобиль**, рис. 1.33.

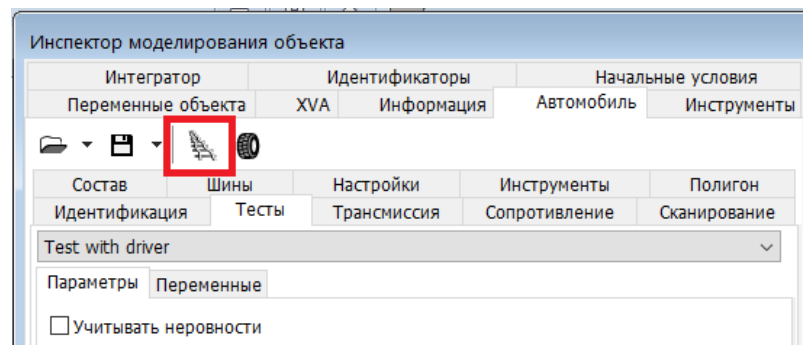


Рис. 1.33. Кнопка отображения графиков неровностей

Неровности пути сглаживаются на первых двух метрах пути, чтобы обеспечить плавный старт экипажа с постепенным заездом на неровности. Таким образом, в начальный момент времени экипаж находится на абсолютно горизонтальной поверхности, см. рис. 1.34.

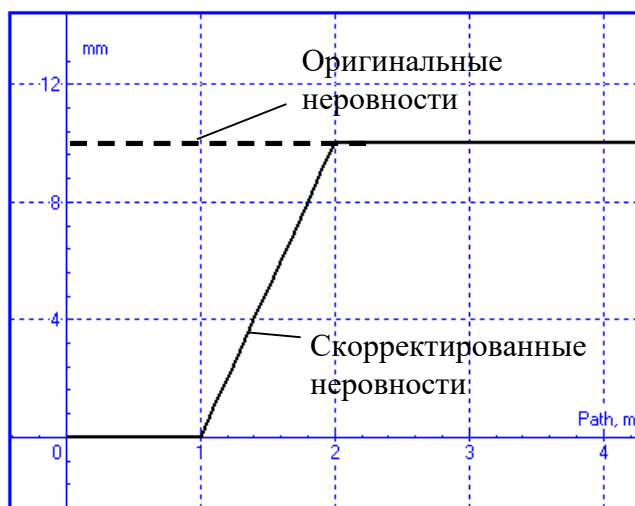


Рис. 1.34. Автоматическая коррекция неровностей

1.3.4. Профиль тестового участка дороги



Рис. 1.35. Лежачий полицейский

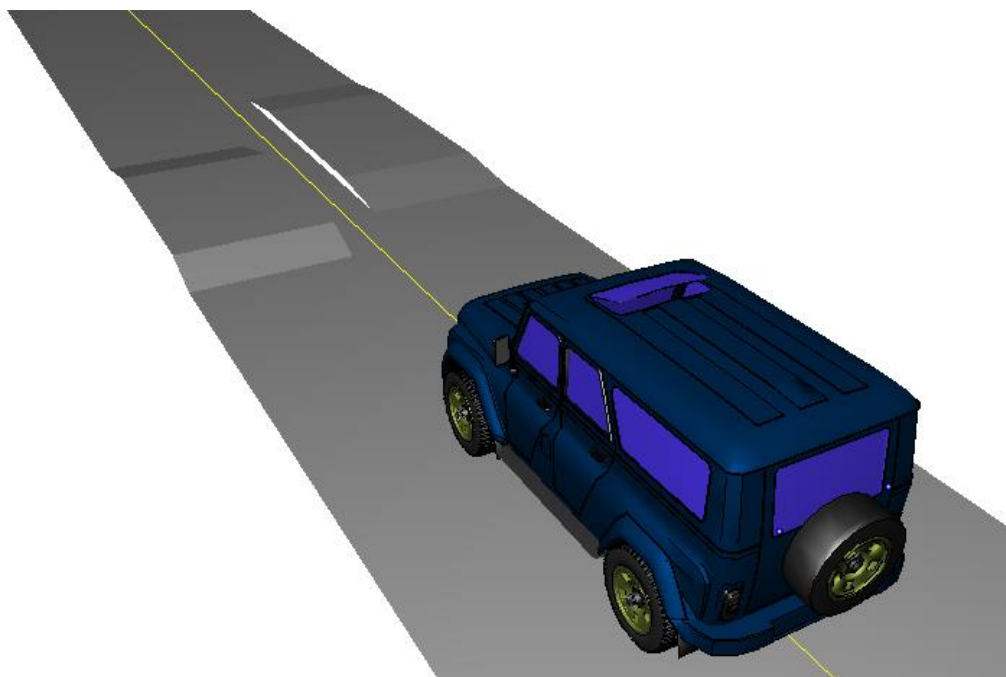


Рис. 1.36. Несимметричные неровности дороги для левой и правой колес

Профили тестового участка (ПТУ) представляют собой геометрические отклонения дороги от идеального состояния, которые нельзя рассматривать как плавные и мелкие неровности. Например, ступенька на рис. 1.50, лежащий полицейский на рис. 1.35 или несимметричные неровности на рис. 1.36 могут рассматриваться в УМ только как ПТУ. Данный инструмент может быть использован только в тесте с водителем при задании макрогеометрии движения автомобиля с помощью плоской кривой, см. пп. 1.3.1. *«Задание макропрофиля с помощью кривых»*,

Создание файлов ПТУ описано в разделе 1.9.1.3.2. *«Создание файлов профилей тестового участка дороги»*.

Особенности модели шины при использовании ПТУ обсуждаются в п. 1.5.1. *«Одноточечная и многоточечная модели контакта шины с дорогой»*.

Задание файлов ПТУ в тесте с водителем см. в п. 1.9.4.7.2.3. *«Использование профилей тестового участка»*.

1.4. Водитель

1.4.1. Модель МакАдама

Модель *МакАдама* является одной из наиболее эффективных и распространенных компьютерных моделей водителя. В основе модели лежат упрощенные линейные уравнения движения автомобиля с двумя степенями свободы. Угол поворота рулевого колеса выбирается из условий минимизации отклонения прогнозируемой траектории экипажа от заданной желаемой траектории.

Управление u (желаемое значение угла поворота колеса) является кусочно-постоянной функцией. Рассмотрим экипаж в момент времени t_k , для которого рассчитывается очередное значение управления (рис. 1.37). Не нарушая общности полученных ниже решений, положим $t_k = 0$. Введем инерциальную систему координат $O_v X_v Y_v$, связанную с текущим положением экипажа. Начало отсчета этой СК совпадает с текущим положением середины передней оси автомобиля, ось абсцисс – с продольной осью экипажа.

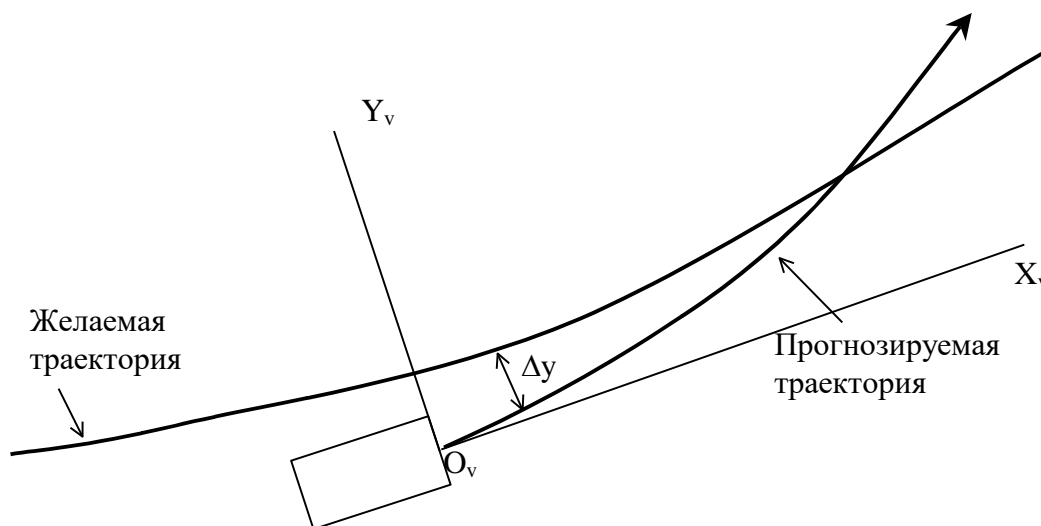


Рис. 1.37. Прогнозируемая и желаемая траектории

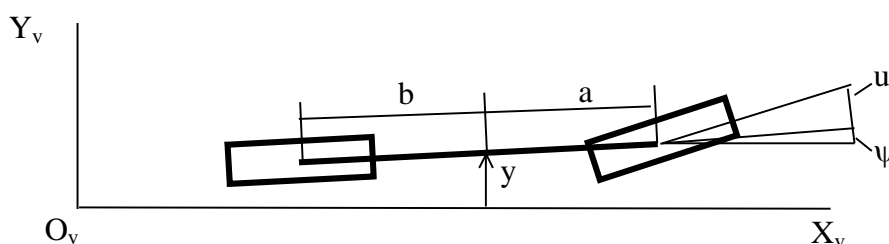


Рис. 1.38. Двухколесная модель автомобиля

При заданном значении угла поворота u управляемого колеса упрощенная модель автомобиля, представленная на рис. 1.38, имеет две степени свободы: поперечное отклонение центра масс y и угол поворота вокруг вертикальной оси ψ . Линейные уравнения движения в этих переменных имеют вид

$$\begin{aligned}
 \dot{y} &= v_x \psi + v_y, \\
 \dot{\psi} &= \omega_z, \\
 M \dot{v}_y &= -\frac{C_f + C_r}{v_x} \dot{y} + \left(\frac{C_r b - C_f a}{v_x} - M v_x \right) \omega_z + C_f u, \\
 I_z \dot{\omega}_z &= \frac{C_r b - C_f a}{v_x} \dot{y} - \frac{C_f a^2 + C_r b^2}{v_x} \omega_z + C_f a u.
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Здесь v_x, v_y – проекции скорости центра масс на продольную и поперечную оси экипажа; ω_z – угловая скорость относительно вертикальной оси; a, b – расстояния от центра масс до передней и задней оси; M, I_z – масса и момент инерции экипажа относительно вертикальной оси; C_f, C_r – приведенные (суммарные) коэффициенты сопротивления боковому выводу передних и задних колес.

Наблюдаемой величиной является поперечная координата центра передней оси, определяемая выражением

$$y_v = y + a\psi. \tag{1.2}$$

Уравнения (1.1), (1.2) являются линейными с постоянными коэффициентами и могут быть записаны в матричной форме.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu, \\
 y_v &= C^T x,
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

$$x = \begin{pmatrix} y \\ \psi \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & v_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{C_f + C_r}{M v_x} & \frac{C_r b - C_f a}{M v_x} - v_x \\ 0 & 0 & \frac{C_r b - C_f a}{I_z v_x} & -\frac{C_f a^2 + C_r b^2}{I_z v_x} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{C_f}{M} \\ \frac{C_f a}{M} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Общее решение системы уравнений (1.3) с учетом предположения $u = const$ имеет вид

$$\begin{aligned}
 x(t) &= e^{At} x_0 + \int_0^t e^{A\tau} B d\tau u, \\
 y_v(t) &= F(t) x_0 + g(t) u.
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Здесь x_0 – матрица-столбец начальных условий, а также введены матрица – строка $F(t)$ размером 1×4 и скалярная функция $g(t)$.

$$F(t) = C e^{At}, g(t) = \int_0^t F(\tau) B d\tau.$$

Фундаментальная матрица системы уравнений e^{At} может быть получена численным решением дифференциальных уравнений с единичной матрицей в качестве начальных условий, т.е. i -й столбец этой матрицы есть решение системы дифференциальных уравнений (1.3) с начальными условиями $x_i=1, x_j=0, i \neq j$. Более экономичный метод расчета фундаментальной матрицы, с точки зрения числа арифметических операций, основан на определении собственных векторов и собственных значений матрицы A .

Пусть $y_d(t)$ – уравнение желаемой траектории (рис. 1.37). Определим управление u , минимизирующее отклонение прогнозируемой траектории $\Delta y(t)=y_d(t)-y_v(t)$ от желаемой на интервале времени прогноза T_p . В качестве функционала, характеризующего отклонение, рассмотрим выражение

$$J(u) = \int_0^T (\Delta y(\tau))^2 d\tau = \int_0^T (y_d(\tau) - F(\tau)x_0 - g(\tau)u)^2 d\tau$$

Искомое управление получим из уравнения

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{du} &= 2 \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0 - g(\tau)u)g(\tau)d\tau = \\ &= 2 \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0)g(\tau)d\tau - 2u \int_0^{T_p} g^2(\tau)d\tau = 0 \end{aligned}$$

или

$$u = \frac{\int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0)g(\tau)d\tau}{\int_0^{T_p} g^2(\tau)d\tau}$$

Полученное решение можно упростить, заменяя интегралы конечными суммами. Для этого интервал прогноза T_p разделим на N подинтервалов равной длины.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N (y_d(t_i) - F(t_i)x_0)g(t_i)}{\sum_{i=1}^N g^2(t_i)}, t_i = \frac{iT_p}{N} \tag{1.5}$$

В настоящей версии программы принято $N = 10$.

Для учета реакции водителя введем нейромускульный фильтр, который в операторной форме имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \delta(s) &= D(s)u, \\ D(s) &= \frac{e^{-t_d s}}{1 + T_n s} \end{aligned}$$

Здесь δ – поворот колеса; введены также две постоянные времени: t_d – запаздывание реакции, T_n – нейромускульное запаздывание. Переводя данное соотношение во временную область, получим уравнение

$$T_n \dot{\delta} + \delta = u(t - t_d)$$

С учетом того, что $u(t)$ является кусочно-постоянной функцией, это уравнение имеет аналитическое решение. Пусть t_k – момент времени, в который происходит расчет управления u . Тогда

$$\delta(t) = (\delta_k - u)e^{-\frac{t}{T_n}} + u, \quad t \in [t_k + t_d, t_{k+1} + t_d]$$

$$\delta_k = \delta(t_k + t_d)$$

Умножая угол поворота колеса на передаточное отношение рулевого управления i_s , получим значение угла поворота рулевого колеса $\alpha_s = i_s \delta$.

Итак, управление строится с учетом желаемой траектории на длине $L_p = vT_p$, где v – скорость продольного движения экипажа, а T_p – время прогноза. Однако смена управления может производиться с периодом, меньшим чем T_p . Введем понятие числа шагов управления на интервале прогноза N_u так, что $t_{k+1} = t_k + T_p/N_u$. Например, при $T_p = 1$ с и $N_u = 2$ расчет нового управления будет производиться через каждые 0,5 с.

Табл. 1.3 содержит список параметров, характеризующих модель МакАдама.

Таблица 1.3

Параметры модели МакАдама

Параметр	Наименование	Рекомендуемый интервал значений	Значение по умолчанию
T_p	Время прогноза (прогнозирования)	1–2 с	1 с
t_d	Запаздывание реакции	>0.15 с	0.15 с
T_n	Нфейромускульная задержка	0.1–0.2 с	0.15 с
N_u	Число шагов управления	1–4	2

На рис. 1.39, рис. 1.40 представлены результаты моделирования обгона автомобилем [ВАЗ 2109](#) при движении со скоростью 5 м/с при следующих значениях параметров: $T_p = 2$ с, $t_d = 0.15$ с, $T_n = 0.1$ с, $N_u = 3$.

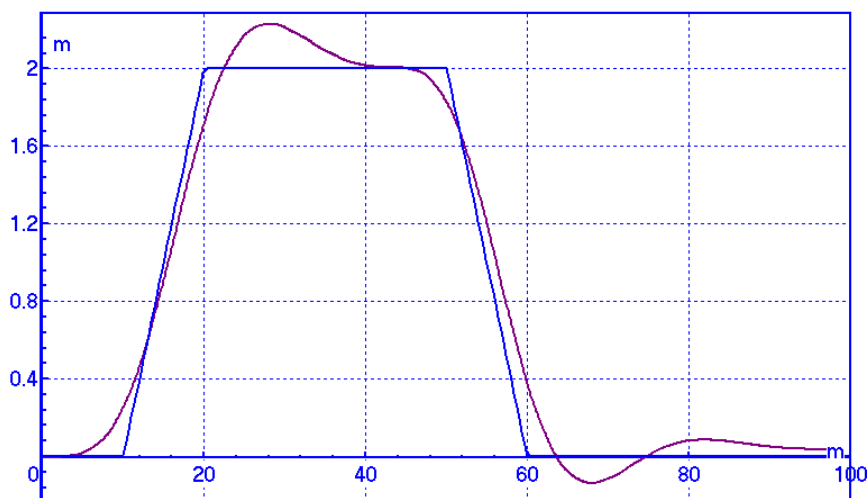


Рис. 1.39. Желаемая и реализованная траектории маневра

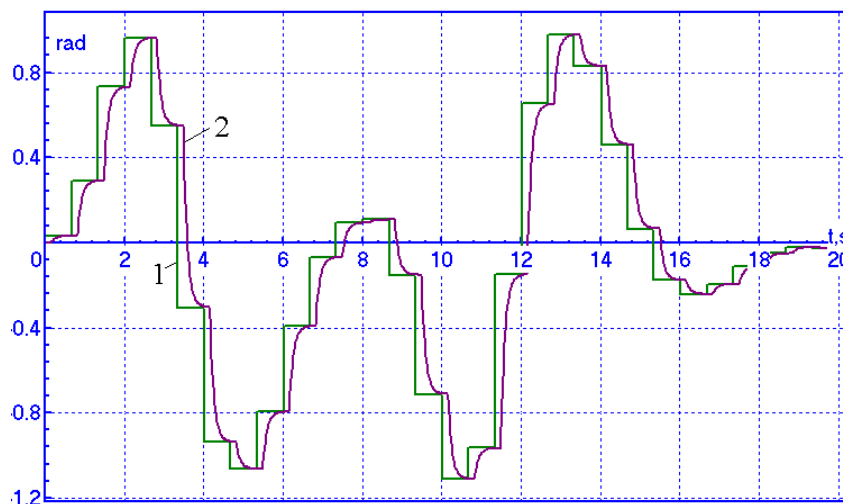


Рис. 1.40. Угол поворота рулевого колеса: управление до (1) и после (2) нейромускульного фильтра

1.4.2. Модель непрерывного управления с прогнозированием

В отличие от модели МакАдама, в данном случае рассматривается непрерывное управление, то есть задающее управление рулевого колеса рассчитывается на каждом шаге интегрирования уравнений движения. Предполагается, что водитель “смотрит” вперед на расстояние L_p , зависящее от скорости продольного движения автомобиля v , $L_p = vT_p$, T_p – время прогноза (прогнозирования). Учитывается также запаздывание реакции водителя t_d .

Схема управления с обратной связью приведена на рис. 1.41. Блок прогнозирования позволяет определить поперечную координату точки на желаемой траектории на расстоянии L_p от центра передней подвески в системе координат экипажа $y_d(t+T_p)$ (рис. 1.37). Водитель прогнозирует поперечное смещение автомобиля y_p за время T_p с использованием текущего значения поперечной скорости по формуле

$$y_p = y(t) + T_p \dot{y}(t) = y(t + T_p) + O(T_p^2 \ddot{y}(t))$$

Управление строится пропорционально рассогласованию между желаемым и прогнозируемым значениями поперечных координат с учетом запаздывания реакции водителя.

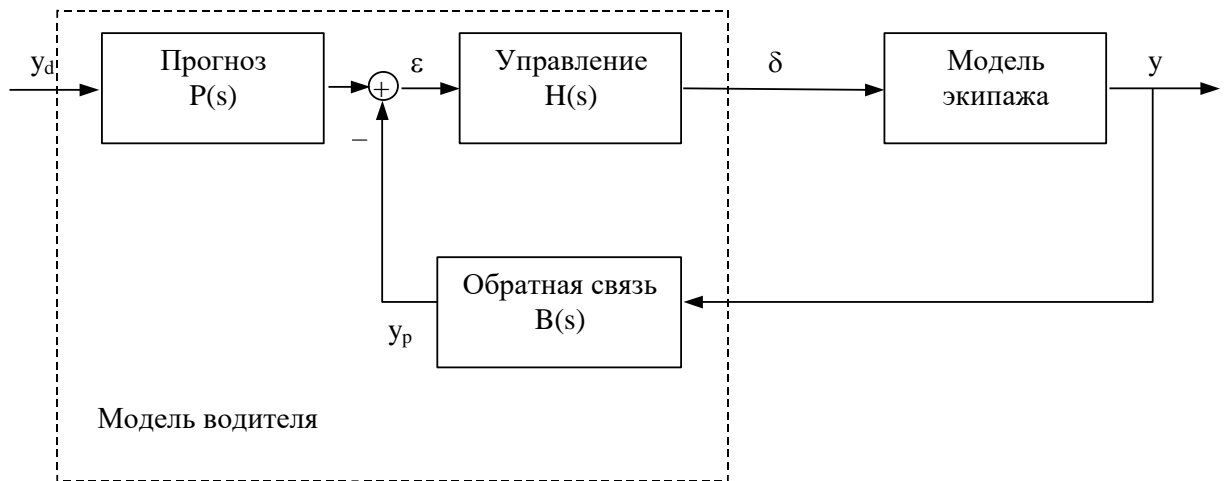


Рис. 1.41. Блок-схема рулевого управления

В операторной форме имеем следующие передаточные функции:

Прогнозирование: $P(s) = e^{T_p s}$

Управление: $H(s) = K e^{-t_d s}, L_p = v T_p$

Обратная связь: $B(s) = 1 + T_p s$

Здесь y, y_p, y_d – реальная, прогнозируемая и желаемая поперечные координаты; δ – угол поворота рулевого колеса; K – коэффициент усиления.

Переводя соотношения, представленные в операторной области, во временную область, получим

$$\varepsilon(t) = y_d(t + T_p) - y_p,$$

$$y_p = T_p \dot{y}(t),$$

$$\delta(t) = K \varepsilon(t - t_d).$$

Таким образом, управление формируется следующим образом

$$\delta(t) = K \left(y_d(t + T_p - t_d) - T_p \dot{y}(t - t_d) \right),$$

$$\alpha_s(t) = i_s \delta(t).$$

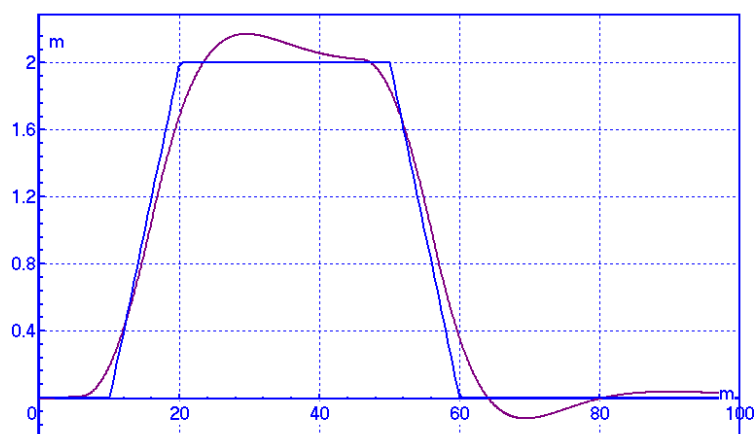


Рис. 1.42. Желаемая и реализованная траектории маневра

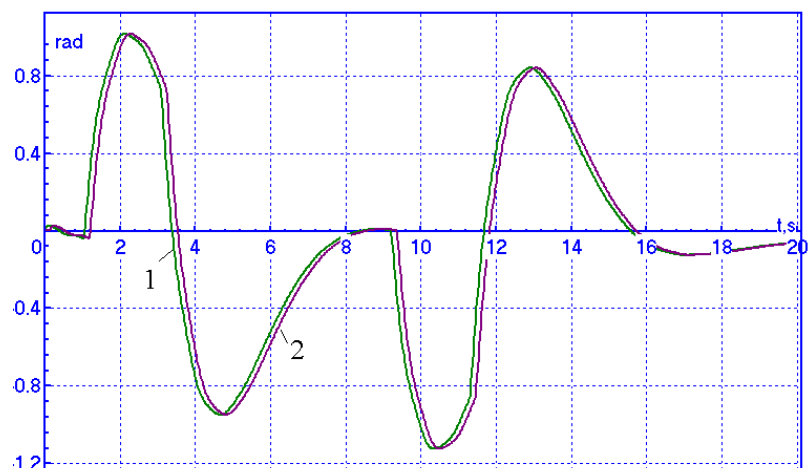


Рис. 1.43. Угол поворота рулевого колеса: задающее управление (1) и управление с запаздыванием (2)

На рис. 1.42, рис. 1.43 представлены результаты моделирования обгона автомобилем [BA3 2109](#) при движении со скоростью 5 м/с при следующих значениях параметров: $T_p = 1$, $t_d = 0.15$ с, $K = 0.1$.

1.4.3. Комбинированная модель

Ранее описанные модели водителя (модель МакАдама и модель с прогнозированием второго порядка) применяются в случаях, когда необходимо получить систему управления по своим характеристикам близкую к реальному водителю. Эти модели не могут гарантировать малое отклонение реального пути автомобиля от заданного. Вместе с тем прохождение стандартных тестов с «водителем» требует очень точного прохождения заданной траектории. При прохождении большинства тестов предполагается, что отклонение траектории движения от заданной не должно превышать 150 мм (рекомендация SAE), а по некоторым рекомендациям и 30 мм. Для прохождения тестов с малым отклонением действительной траектории движения от заданной в УМ реализована комбинация ПИД-контроллера и модели с прогнозированием второго порядка.

$$\delta(t) = K_2 \Delta y + K_d \Delta \dot{y} + K_I \int_0^t \Delta y(\tau) d\tau + K \left(y_d(t + T_p - t_d) - T_p \dot{y}(t - t_d) \right) \quad (1.6)$$

где первые три члена соответствуют ПИД-контроллеру с тремя новыми параметрами K_2, K_d, K_I . Переменная Δy равна отклонению в поперечном направлении центральной точки между передними колесами (контрольной точки) от заданной траектории.

Таким образом, данный тип непрерывного управления использует два слагаемых: управление с предвидением и PID управление контрольной точки. Вторая часть управления позволяет контрольной точке достаточно точно следовать заданной траектории.

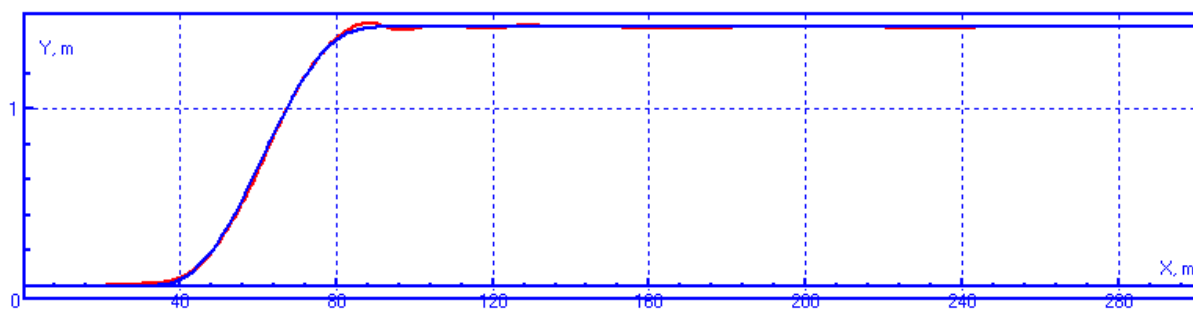


Рис. 1.44. Смена полосы движения. Заданная и реальная траектории

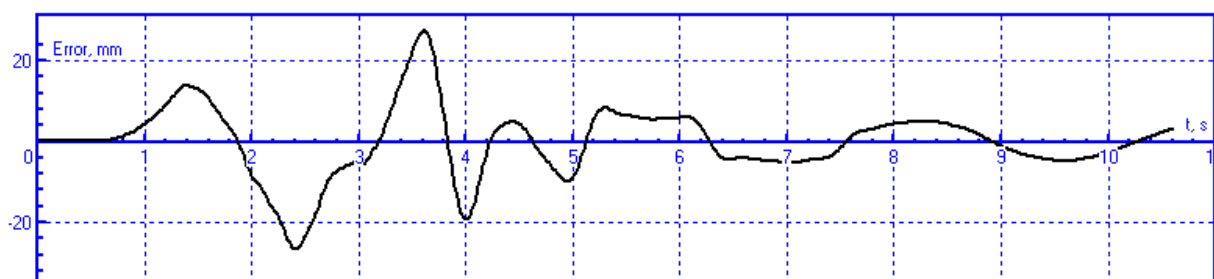


Рис. 1.45. Смена полосы движения. Отклонение траектории от заданной

На рис. 1.44, рис. 1.45 показаны результаты моделирования смены полосы движения для модели грузового автомобиля с прицепом. В процессе моделирования были приняты следующие параметры модели водителя:

$$v = 88 \text{ км/ч}, K_2 = 1.5, K_d = 0.2, K_I = 2, K = 0.075, T_p = 1 \text{ с}, t_d = 0.05 \text{ с}$$

Табл. 1.4 содержит список параметров, характеризующих модель водителя.

Таблица 1.4

Параметры модели с прогнозированием второго порядка

Параметр	Наименование	Значение по умолчанию	
		Легковой автомобиль	Грузовой автомобиль
T_p	Время прогноза (прогнозирования)	1 с	1с
t_d	Запаздывание реакции	0.02 с	0.05с
K	Коэффициент усиления	0.075	0.075
K_2	Коэффициент усиления 2	0.2	1.5
K_d	Коэффициент при дифференциальном члене управления	0.05	0.2
K_I	Коэффициент при интегральном члене управления	0.3	2

Как известно из теории управления движением, интегральный член управления предназначен для компенсации стационарных ошибок в управлении. Такого типа ошибки возникают, например, при действии постоянно действующей силы бокового сопротивления воздуха, или при наличии в модели отклонений в симметрии.

Замечание. Для получения плавных кривых рекомендуется использовать сглаживание сплайнами при описании макрогеометрии пути.

1.4.4. Подбор параметров непрерывного управления

Значения параметров по умолчанию, приведенные в табл. 1.4, часто дают удовлетворительные результаты управления. Однако поведение модели зависит от многих параметров: свойств шин, параметров подвески, скорости движения, виду заданной траектории движения и т.д. Поскольку задача управления автомобилем является нелинейной и не имеет строгого аналитического решения, то в некоторых случаях для достижения заданного качества управления приходится подбирать значения параметров. Для этого мы рекомендуем использовать два подхода: линейный анализ и многовариантные расчеты. Оба подхода используют параметризацию коэффициентов управления, то есть назначение коэффициентам введенных в программе ввода идентификаторов, см п. 0 «

Параметризация модели водителя».

Исследование модели водителя средствами линейного анализа

С помощью построения корневых годографов можно получить важную информацию о влиянии параметров непрерывной модели водителя на *поведении автомобиля при движении по прямой*. В частности, определить область потери устойчивости управления при высоких скоростях движения, см. п. 1.10.3.3 «*Корневые годографы: зависимость собственных значений от параметров управления*».

Исследование модели водителя средствами многовариантного расчета

Для определения значений параметров непрерывного управления, обеспечивающих нужное качество при прохождении автомобилем криволинейных траекторий, рекомендуется использовать многовариантные расчеты. Данный инструмент позволяет быстро получить и обработать результаты моделирования при изменении параметров, заданных идентификаторами.

На рис. 1.46 показаны результаты моделирования движения автомобиля ВАЗ 2109 при прохождении теста смены полосы со скоростью 80км/ч для значений параметра управления $K_2 \in [0, 0.4]$ с шагом 0.05. Соответствующий многовариантный расчет входит в стандартную поставку программы и доступен по пути

{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\MVC\SAE lane change

Для того, чтобы открыть соответствующий многовариантный расчет, используйте в программе моделирования команду меню **Сканирование | Открыть...** и выберите расчет по указанному пути.

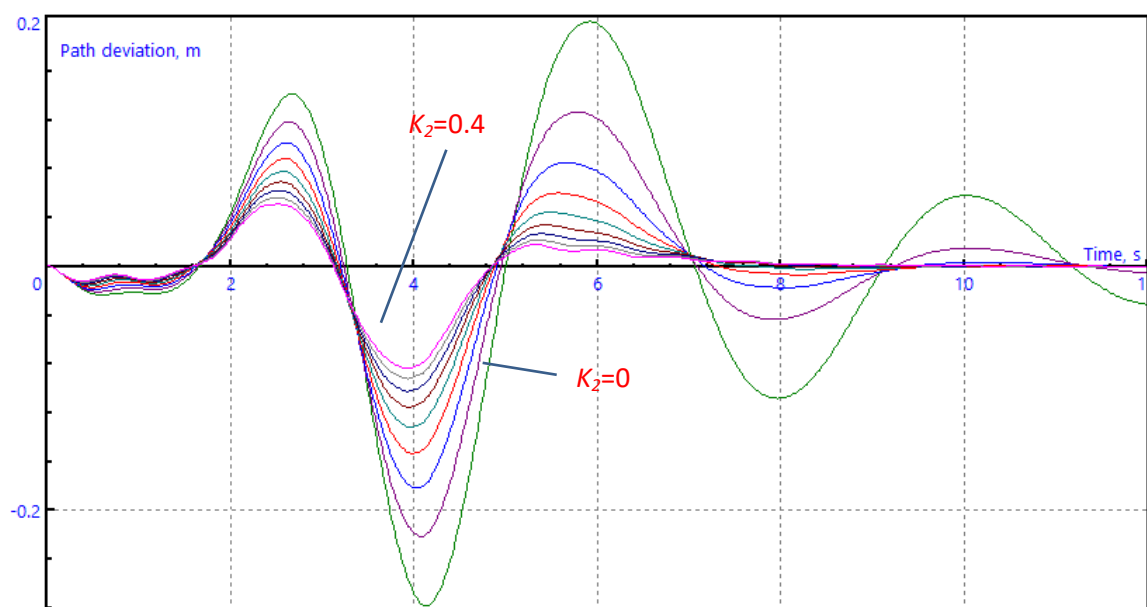


Рис. 1.46. Сравнение результатов теста смены полосы движения при различных значениях параметра управления K_2

1.5. Контакт шины с дорогой

Модели контактных сил позволяют по некоторым параметрам шины (вертикальная жесткость и демпфирование и др.) и по известным кинематическим параметрам шины в каждый момент времени (угол бокового увода, проскальзывание (пробуксовка), угол развала и др.), рассчитанным внутри программы моделирования получить значения сил и моментов, действующих в контакте между колесом и дорогой. Известно довольно большое количество моделей контактных сил. В настоящей версии программного комплекса «Универсальный механизм» реализовано три модели контактных сил:

- модель FIALA, см. п. 1.5.2;
- магическая формула Пасейки (Pasejka Magic Formula), см. п. 1.5.3;
- таблично заданная модель, см. п. 1.5.4;
- модель TMEasy, см. п. 1.5.7.

Параметры контактных моделей сохраняются в текстовых файлах *.tr и описываются при помощи мастера задания параметров шины, пункт меню **Инструменты | Параметры модели шины...** По умолчанию файлы с параметрами моделей шин *.tr находятся в каталоге {Данные УМ}\car\tire. Мастер задания параметров шины используется для создания файлов *.tr, назначение конкретной модели контактных сил при расчете динамики экипажа происходит в **Инспекторе моделирования объекта** на закладке **Автомобиль | Шины**.

Ниже рассмотрим реализованные модели сил и мастер задания параметров шины более подробно.

1.5.1. Одноточечная и многоточечная модели контакта шины с дорогой

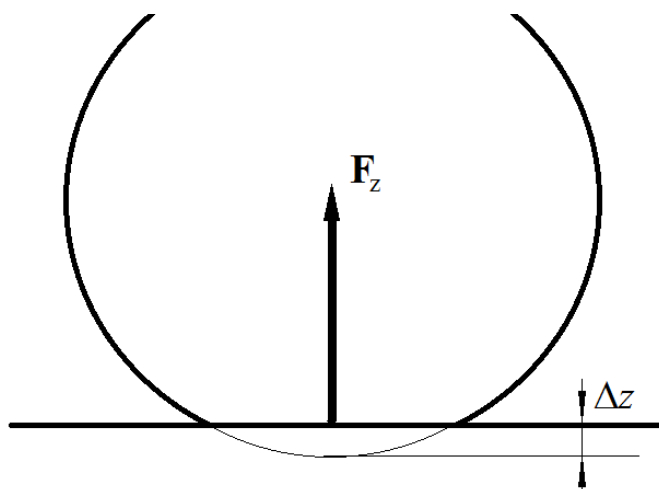


Рис. 1.47. Одноточечный контакт

Одноточечная модель является распространенным методом описания нормальной силы F_z в контакте между дорогой и шиной. Сила зависит от прогиба шины Δz , который можно рассчитать как максимальное проникновение жесткого круга колеса в линию дороги, как показано на рис. 1.47,

$$F_z = F_z(\Delta z, \Delta \dot{z}).$$

Обычно используется линейная зависимость силы от Δz и ее производной по времени $\Delta \dot{z}$.

$$F_z = -k_z \Delta z - d_z \Delta \dot{z}. \quad (1.1)$$

Сила приложена к точке максимального внедрения окружности перпендикулярно локальной линии дороги.

Модель **многоточечного** контакта шины применяется, когда на дороге есть особые неровности, такие как ступеньки, выбоины и тому подобное, рис. 1.48 (см. п. 1.3.4. *Профиль тестового участка дороги*). В таких случаях пятно контакта с шиной может состоять из двух или более отдельных участков. Многоточечный контакт также применяется при движении автомобиля по триангулированной поверхности, п. 1.9.4.7.3.3 *Модель взаимодействия шины с дорогой*.

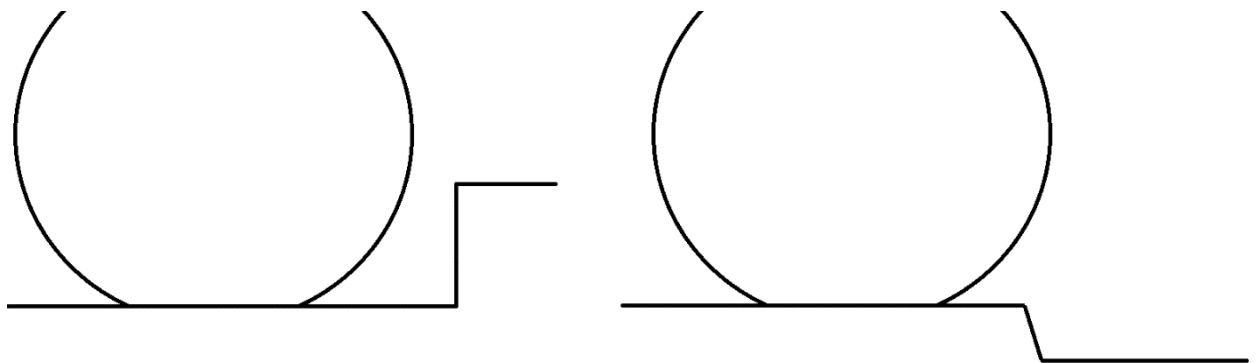


Рис. 1.48. Особые отклонения дороги

В случае многоточечного контакта реализованы два метода:

- дискретный точечный контакт
- упругий распределенный контакт.

В обоих случаях вычисляются области пересечения окружности шин и линии дороги, рис. 1.49.

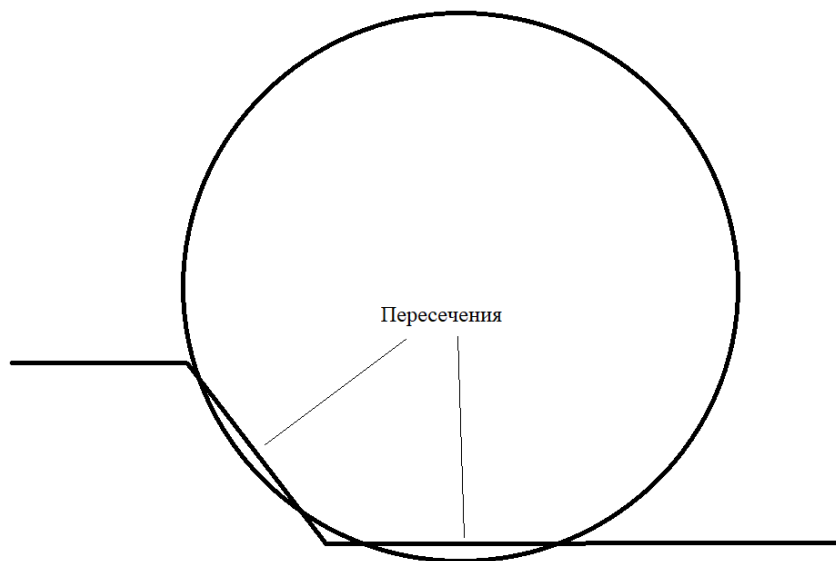


Рис. 1.49. Две области пересечения

Если используется **дискретный точечный контакт**, то нормальная сила в каждой области зависит от глубины максимального пересечения Δz_i ,

$$F_{zi} = -k_z \Delta z_i - d_z \Delta \dot{z}_i.$$

Силы F_{zi} прикладываются в точках максимального пересечения и направлены к центру колеса, рис. 1.50.

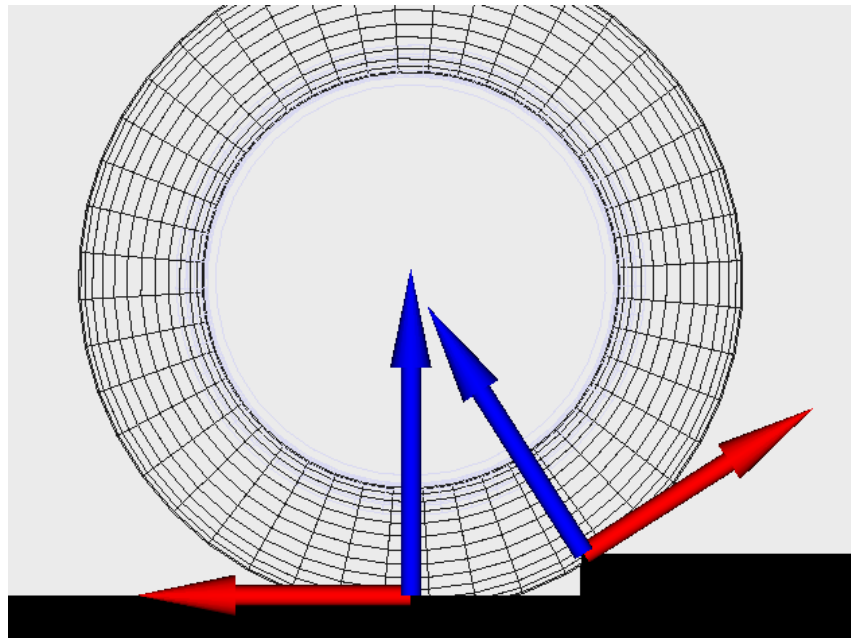


Рис. 1.50. Перекачивание колеса через ступеньку с использованием дискретного точечного контакта

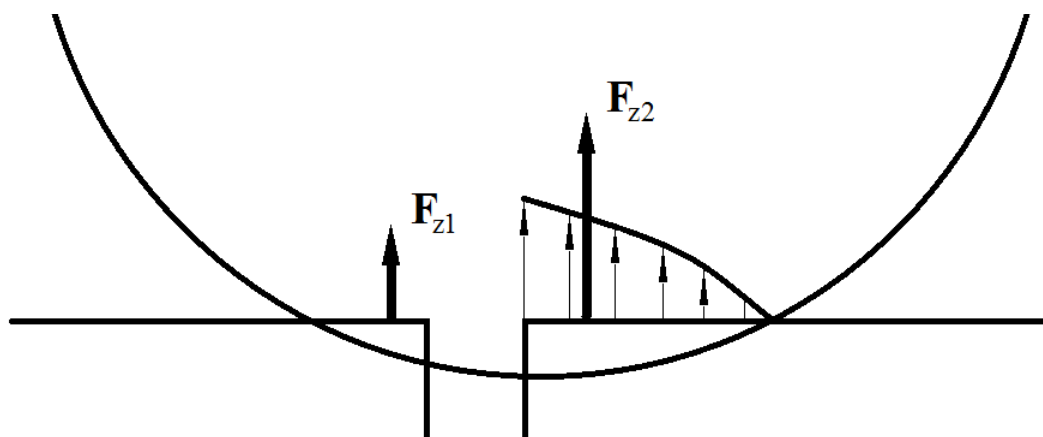


Рис. 1.51. Модель распределенного контакта

В случае **упругого распределенного контакта** нормальная сила для отдельной области контакта рассчитывается как равнодействующая силы распределенной нагрузки. Распределенная нагрузка пропорциональна функции глубины проникновения $q(x)$ вдоль области, рис. 1.51.

$$\mathbf{F}_{zi} = k_{zd} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} q(x) \mathbf{n}(x) dx,$$

где k_{zd} – коэффициент жесткости распределенного контакта, \mathbf{n} – нормаль к поверхности дороги. Если кривая дороги представляет собой прямую линию, упругая составляющая силы пропорциональна площади пересечения,

$$F_{ezi} = k_{zd} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} q(x) dx = k_{zd} A_i, \quad (1.2)$$

Учитывая уравнение (1.2), из формулы (1.1) можно рассчитать коэффициент жесткости k_{zd} по заданному коэффициенту жесткости шины k_z

$$k_{zd} = k_z \Delta z_0 / A_0, \quad (1.3)$$

где Δz_0 — статический прогиб шины, A_0 — площадь пересечения окружности шины с линией дороги в статическом положении. Это означает, что все модели будут давать одинаковую нормальную силу и прогиб шины при статическом положении автомобиля.

Упругий распределенный контакт представляет собой нелинейную зависимость контактной силы от прогиба шины Δz . Согласно уравнению (1.2), для идеального прямого участка дороги имеем

$$F_{ez} = k_{zd} A(\Delta z) = \alpha r^2 - (r - \Delta z)r \sin \alpha \approx k_{zd} \sqrt{2r} \Delta z^{3/2} = (k_{zd} \sqrt{2r} \Delta z^{1/2}) \Delta z, \quad (1.4)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{2\Delta z}{r} - \frac{\Delta z^2}{r^2}} \approx \alpha, \quad \alpha \approx \sqrt{\frac{2\Delta z}{r}}.$$

Здесь α — половина центрального угла колеса для пятна контакта, r — недеформированный радиус шины.

Таким образом, жесткость пропорциональна квадратному корню из прогиба, как и в случае контакта Герца.

Выбор модели контакта зависит от типа особых дорожных неровностей. Дискретный точечный контакт дает хорошие результаты при накатывании на ступеньку и плохие результаты при наезде на небольшую выбоину, как на рис. 1.51. Наоборот, распределенный упругий контакт подходит для небольших выбоин и дает плохие результаты для высоких ступеней.

Распределенный упругий контакт рекомендуется при моделировании движения автомобиля по триангулированной поверхности дороги (по полигону), п. 0.

Особенности теста с водителем при движении по триангулированной поверхности.

Замечание 1 Многоточечный контакт использует кусочно-линейную дискретизацию кривой дороги под колесом на интервале двух радиусов колеса. Значение шага может быть изменено пользователем.

Замечание 2 В модуле **UM Automotive**, особые неровности дороги вводятся с помощью инструмента Профиль тестового участка, п. 1.3.4. *Профиль тестового участка дороги*. В модуле **UM Monorail train** мы используем термин 'Special track deviations', см. Chapter 26, Sect. *Special track deviations* (файл 26_um_monorail_train.pdf).

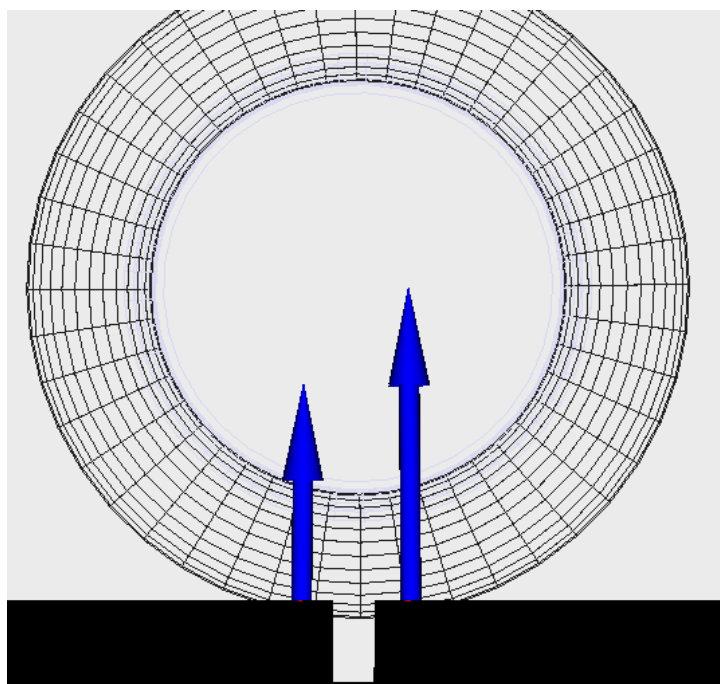


Рис. 1.52. Наезд колеса на небольшую выбоину с использованием модели упругого распределенного контакта

1.5.2. Модель Fiala

Модель шины предложена в статье [9].

Предположения и допущения

- Прямоугольное пятно контакта
- Контактные давления внутри пятна контакта одинаковы
- Шина моделируется как балка на упругом основании
- Контактная сила не зависит от угла развала

Исходные данные

Величина	Параметр контактной модели*	Описание	Источник
α	-	Угол бокового увода	Расчет кинематики контакта в ядре программы
γ	-	Угол развала	Расчет кинематики контакта в ядре программы
s_x	-	Относительное продольное проскальзывание	Расчет кинематики контакта в ядре программы
s_y	-	Относительное поперечное проскальзывание	Расчет кинематики контакта в ядре программы
Δr	-	Вертикальная деформация шины	Расчет кинематики контакта в ядре программы
$V_{\Delta r}$	-	Скорость вертикальной деформации шины	Расчет кинематики контакта в ядре программы
r	R	Радиус ненагруженного колеса	Файл описания модели шины (*.tr)
k_z	Kz	Коэффициент жесткости шины в вертикальном направлении	Файл описания модели шины (*.tr)
k_x	Kx	Коэффициент жесткости шины в продольном направлении	Файл описания модели шины (*.tr)
k_y	Ky	Коэффициент жесткости шины в поперечном направлении	Файл описания модели шины (*.tr)
β_z	BetaZ	Доля вертикального демпфирования от критического	Файл описания модели шины (*.tr)
d_z	-	Коэффициент демпфирования вдоль вертикальной оси. Вычисляется как $d_z = 2\beta_z\sqrt{mk_z}$, где m – масса колеса, кг.	Предварительный расчет параметров модели контактных сил
μ_0	Mu0	Коэффициент трения при нулевом крепе	Файл описания модели шины (*.tr)
μ_1	Mu1	Коэффициент трения при полном скольжении шины	Файл описания модели шины (*.tr)
c_x	Cx	Частная производная от продольной силы по продольному проскальзыванию при нулевом проскальзывании	Файл описания модели шины (*.tr)

		(коэффициент продольной жесткости шины, Н)	
c_y	C_y	Частная производная от поперечной силы по углу бокового увода при нулевом значении угла бокового увода α (коэффициент сопротивления боковому уводу шины, Н/рад)	Файл описания модели шины (*.tr)
c_γ	C_{gamma}	Коэффициент при угле развала при вычислении опрокидывающего момента M_x	Файл описания модели шины (*.tr)
rt	Rtorus	Радиус тороидального сечения шины	Файл описания модели шины (*.tr)

* Обозначение, принятое для данного параметра модели в **Мастере описания параметров шины**, см. п. 1.5.8. "Мастер описания параметров шины", с. 1-66.

Вертикальная сила (Fz)

(1) Нормальная вязко-упругая сила

$$F_z = -k_z \Delta r - d_z V_{\Delta r}.$$

(2) Если колесо оторвалось от дороги ($\Delta r > 0$) или получившаяся вертикальная сила отрицательна $F_z < 0$, то вертикальная сила полагается равной нулю, $F_z = 0$.

Продольная сила (Fx)

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

$$\mu = \mu_0 + (\mu_1 - \mu_0)s$$

$$s^* = \frac{\mu F_z}{2c_x}$$

Случай 1. $|s_x| < s^*$

$$F_x = s_x c_x$$

Случай 2. $|s_x| \geq s^*$

$$F_x = \text{sign}(s_x) \left[\mu F_z - \frac{(\mu F_z)^2}{4|s_x|c_x} \right]$$

Боковая сила (Fy)

$$s' = \frac{3\mu F_z}{c_y}$$

Случай 1. $|s_y| < s'$

$$h = 1 - \frac{c_y |s_y|}{3\mu F}$$

$$F_y = \mu F_z (1 - h^3) \text{sign}(s_y)$$

Случай 2. $|s_y| \geq s'$

$$F_y = \mu F_z \text{sign}(s_y)$$

Стабилизирующий момент (M_z)

Случай 1. $|s_y| < s'$

$$M_z = -2\mu F_z r_t (1 - h) h^3 \text{sign}(s_y)$$

Случай 2. $|s_y| \geq s'$

$$M_z = 0$$

Опрокидывающий момент (M_x)

$$M_x = -c_\gamma \gamma$$

1.5.3. Магическая формула Пасейки

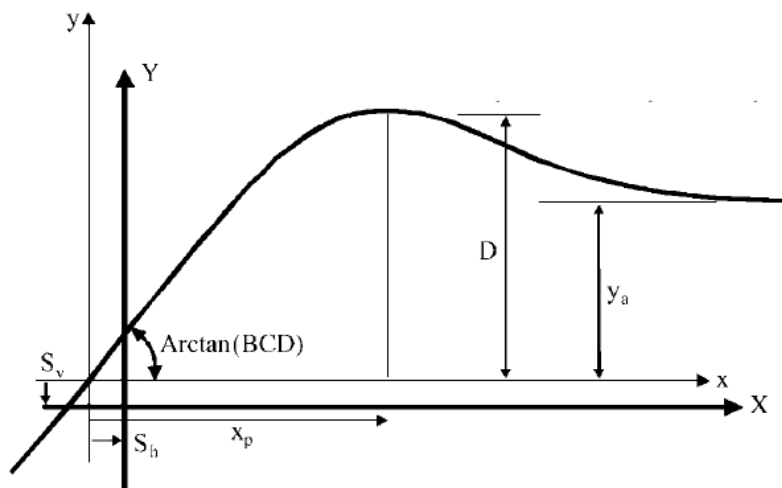


Рис. 1.53. Магическая формула

Общий вид кривых для магической формулы (Magic Formula, MF) приведен на рис. 1.53:

$$Y(x) = D \sin[\text{Carctan}\{Bx - E(Bx - \arctan(Bx))\}] + S_v,$$

$$x = X + S_h$$

где $Y(x)$ может быть продольной (F_x) или боковой (F_y) силой или стабилизирующим моментом (M_z), а X – проскальзывание (для F_x) или угол бокового увода (F_y, M_z).

В соответствии с [10] [11], коэффициенты Магической формулы есть функция вертикальной нагрузки на колесо F_z и угла развала γ .

Продольная сила F_x .

$$\begin{aligned} C &= b_0, \\ D &= F_z(b_1 F_z + b_2), \\ B &= \frac{1}{CD} (b_3 F_z^2 + b_4 F_z) e^{-b_5 F_z}, \\ E &= b_6 F_z^2 + b_7 F_z + b_8, \\ S_h &= b_{11} F_z + b_{12}, \\ S_v &= b_{11} F_z + b_{12}. \end{aligned}$$

Поперечная сила F_y .

$$\begin{aligned} C &= a_0, \\ D &= F_z(a_1 F_z + a_2), \\ E &= a_6 F_z + a_7, \\ B &= \frac{1}{CD} a_3 \sin\left(a_{15} \arctan\left(\frac{F_z}{a_4}\right)\right) (1 - a_5 |\gamma|), \\ S_h &= a_8 \gamma + a_9 F_z + a_{10}, \\ S_v &= (a_{11} F_z + a_{12}) \gamma F_z + a_{13} F_z + a_{14}. \end{aligned}$$

Стабилизирующий момент M_z .

$$\begin{aligned} C &= c_0, \\ D &= (c_1 F_z + c_2) F_z, \\ E &= (c_7 F_z^2 + c_8 F_z + c_9) (1 - c_{10} |\gamma|), \\ B &= \frac{1}{CD} (c_3 F_z^2 + c_4 F_z) (1 - c_6 |\gamma|) e^{-c_5 F_z}, \\ S_h &= c_{11} \gamma + c_{12} F_z + c_{13}, \\ S_v &= (c_{14} F_z^2 + c_{15} F_z) \gamma + c_{16} F_z + c_{17}. \end{aligned}$$

Использование этих формул требует определения коэффициентов $a_0..a_{15}, b_0..b_{10}, c_0..c_{17}$ на основе экспериментальных данных. Значения, принятые в УМ по умолчанию взяты в соответствии с [10]:

$$\begin{aligned} b_0 &= 1.65, b_1 = -21.3, b_2 = 1144, b_3 = 49.6, b_4 = 226, b_5 = 0.069, b_6 = -0.006, \\ b_7 &= 0.056, b_8 = 0.486, b_9 = 0, b_{10} = 0 \\ c_0 &= 2.4, c_1 = -2.72, c_2 = -2.28, c_3 = -1.86, c_4 = -2.73, c_5 = 0.11, c_6 = 0.03, c_7 = -0.07, \\ c_8 &= 0.643, c_9 = -4.04, c_{10} = 0.03, c_{11} = 0.015, c_{12} = 0, c_{13} = 0, c_{14} = -0.066, \\ c_{15} &= 0.945, c_{16} = 0, c_{17} = 0 \end{aligned}$$

Графики боковой силы и стабилизирующего момента в зависимости от угла бокового увода при угле развала $\gamma = 0$ для различных значений вертикальной нагрузки показаны на рис. 1.53, рис. 1.54. Для вычисления этих функциональных зависимостей использовалась *Магическая формула* с приведенными выше коэффициентами.

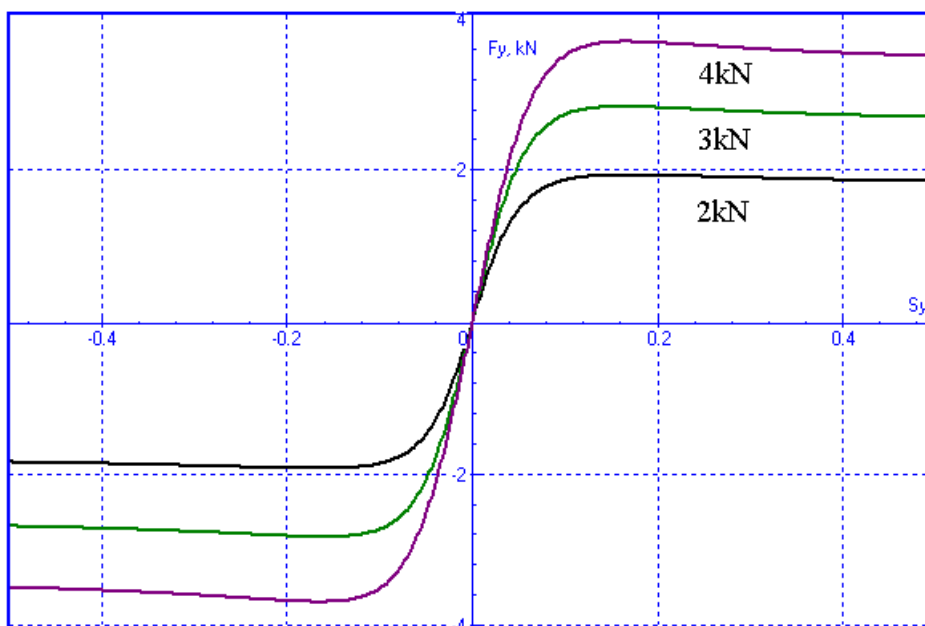


Рис. 1.54. Боковая сила

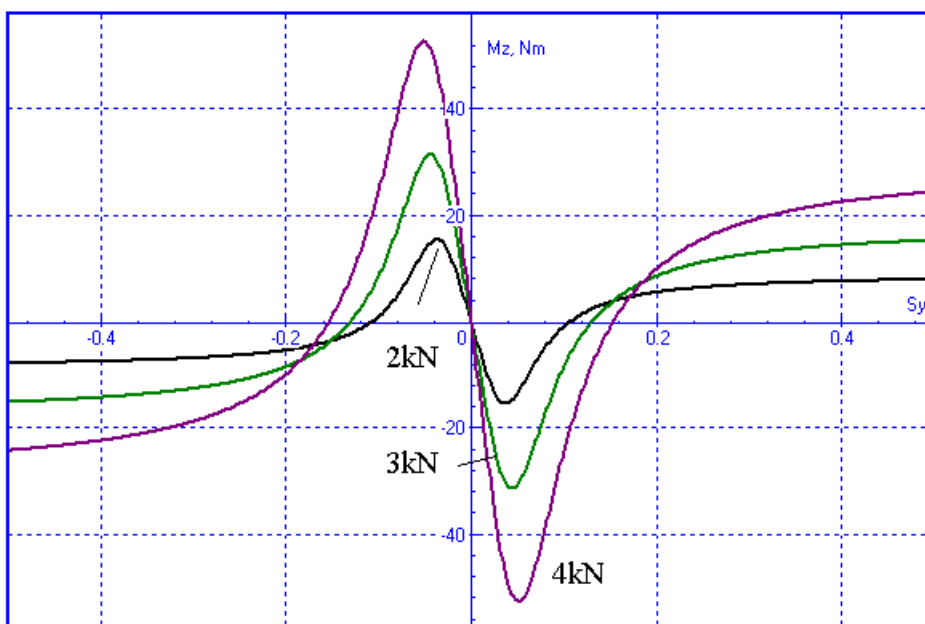


Рис. 1.55. Стабилизирующий момент

1.5.4. Табличное задание параметров шины (табличная модель)

Предположения и допущения

- Контактные силы не зависят от угла развала
- Контактные силы являются антисимметричными функциями угла бокового увода

Исходные данные

Табличная модель задания параметров шины требует наличия экспериментальных данных о продольной, поперечной силе и стабилизирующем моменте, см. рис. 1.55, табл. 1.5, [12].

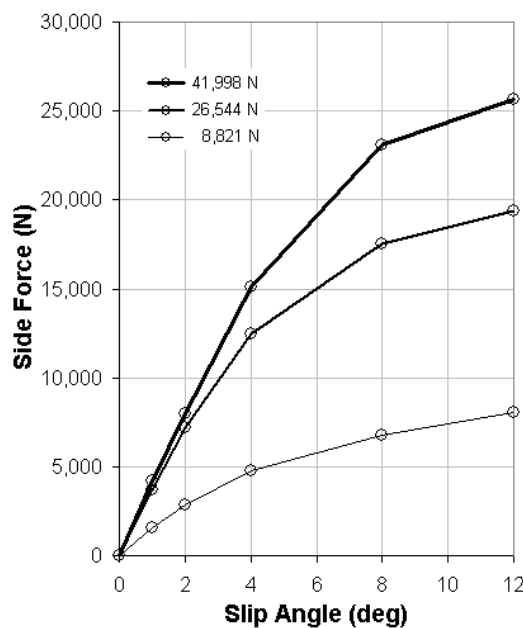


Рис. 1.56. Табличное задание поперечной силы

Таблица 1.5

Табличные данные

Угол бокового увода, градусы	Вертикальная сила, кН		
	8,821	26,544	41,998
	Поперечная сила, кН		
1.00	1,587.8	3,716.2	4,199.3
2.00	2,822.8	7,166.9	7,979.6
4.00	4,763.5	12,475.6	15,119.2
8.00	6,792.4	17,519.0	23,098.8
12.00	8,027.4	19,377.1	25,618.7

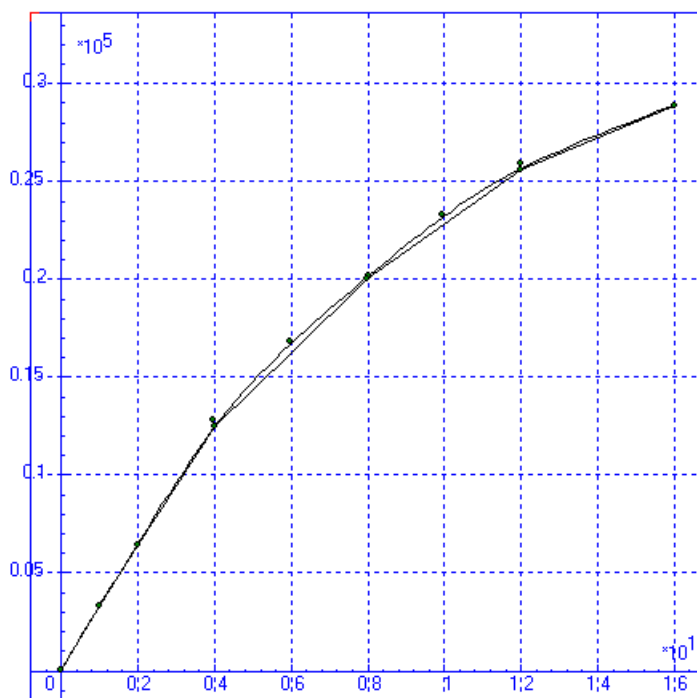


Рис. 1.57. Кусочно-линейная и сглаженная кривые

Пусть $Y(x_j, F_{zj}, i = 1..N_y, j = 1..N_{Fz})$ это некоторый набор табличных данных. Сглаженная модель сил получается в два этапа. Во-первых, сглаживание дискретной характеристики $\hat{Y}(x, F_{zj})$ при помощи В-сплайнов $Y(x_j, F_{zj})$. Эта операция выполняется в редакторе кривых, см. [Главу 3](#), п. *Редактор кривых*. При необходимости к исходно заданным точкам можно добавить дополнительные для того, чтобы приблизить получившийся В-сплайн к заданному виду, см. рис. 1.57.

При расчете сил по табличной модели применяется полиномиальной интерполяция второго порядка для получения сил, как «гладких» функций аргумента и вертикальной нагрузки F_z .

$$Y(x, F_z) = P(F_z, \hat{Y}(x, F_{z1}), \dots, \hat{Y}(x, F_{zN_{Fz}})).$$

Пример сглаженной боковой силы, полученной по табличной модели сил, приведен на рис. 1.58, рис. 1.59.

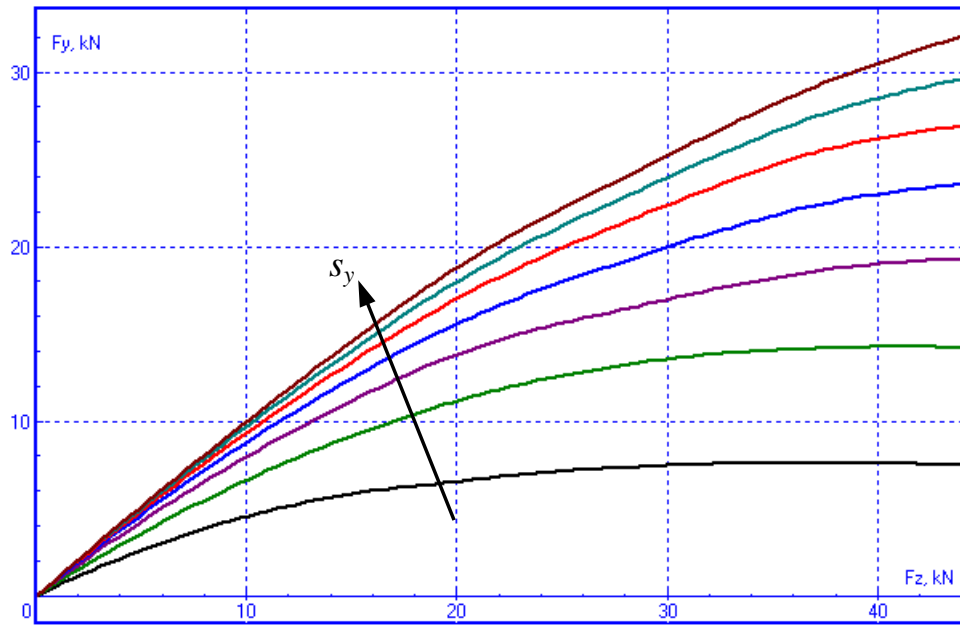


Рис. 1.58. Боковая сила в зависимости от вертикальной нагрузки на колесо

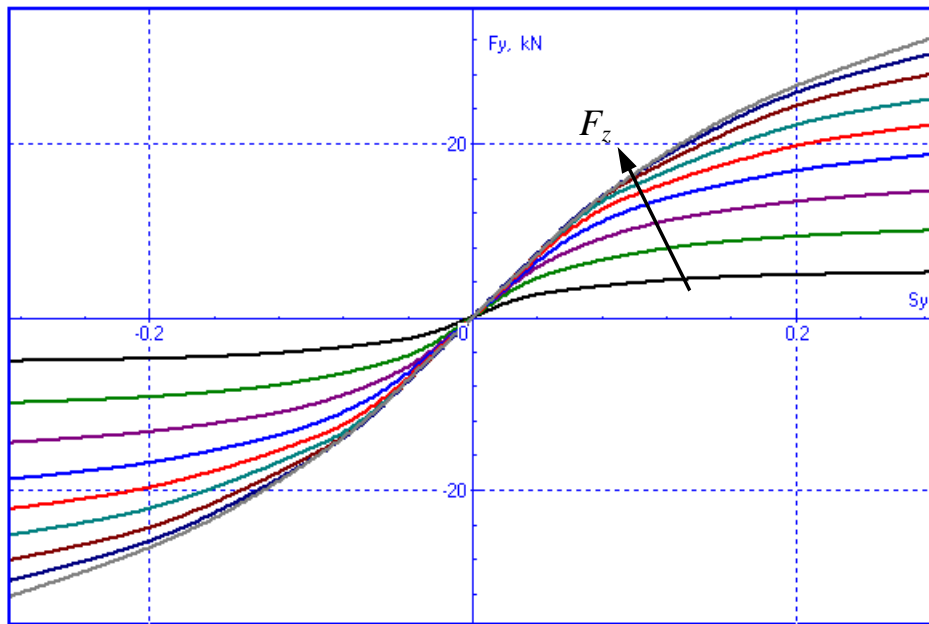


Рис. 1.59. Боковая сила в зависимости от угла бокового увода

1.5.5. Комбинированное скольжение

При больших значениях проскальзывания и/или угла бокового увода обычно используется комбинированная модель продольной и боковой силы.

Пусть α – угол бокового увода, s_x – проскальзывание. Расчет продольной и боковой силы происходит по следующему алгоритму [13]:

$$\sigma_x = \frac{s_x}{1 + s_x}, \sigma_y = \frac{\tan \alpha}{1 + s_x},$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2},$$

$$F_x = \frac{\sigma_x}{\sigma} F_{x0}(\sigma), F_y = \frac{\sigma_y}{\sigma} F_{y0}(\sigma).$$

Здесь F_{x0}, F_{y0} – модели зависимостей продольной и боковой сил в зависимости от соответствующего скольжения, описанные выше.

Режим комбинированного скольжения задается на вкладке Автомобиль | Шины инспектора моделирования, рис. 1.60. Рекомендуется задавать расчет комбинированного скольжения для тестов, при которых возможны режимы торможения.

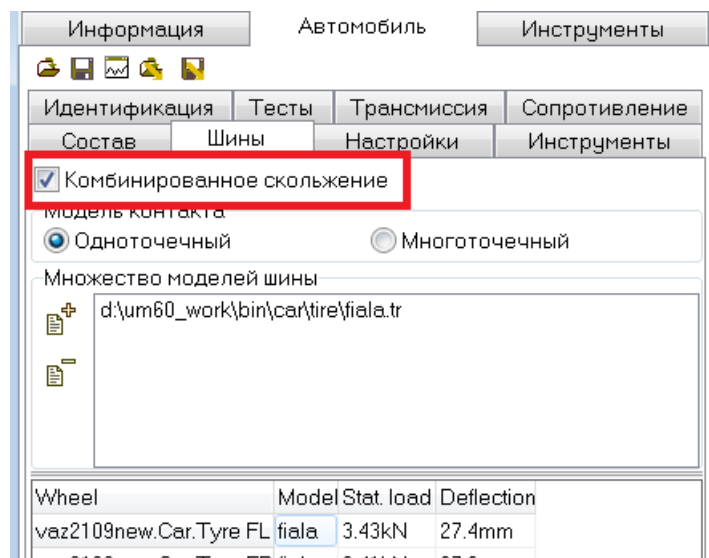


Рис. 1.60. Задание режима комбинированного скольжения

1.5.6. Переходные процессы в шине

В работе [20] предложена упрощенная модель учета переходных процессов в шине, влияющих на фактические значения бокового увода $\lambda = tga$ и проскальзывания s_x , входящих в выражения для сил взаимодействия шины с дорогой. Искомые величины определяются из дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{L_y}{v_x} \frac{d\lambda}{dt} + \lambda = \frac{v_y}{v_x},$$

$$\frac{L_x}{v_x} \frac{ds_x}{dt} + s_x = \frac{\omega R - v_x}{v_x},$$

где v_x, v_y, ω – продольная скорость, скорость бокового увода и угловая скорость вращения шины, R – радиус качения колеса, L_x, L_y – так называемые длины релаксации шины в продольном и поперечном направлениях.

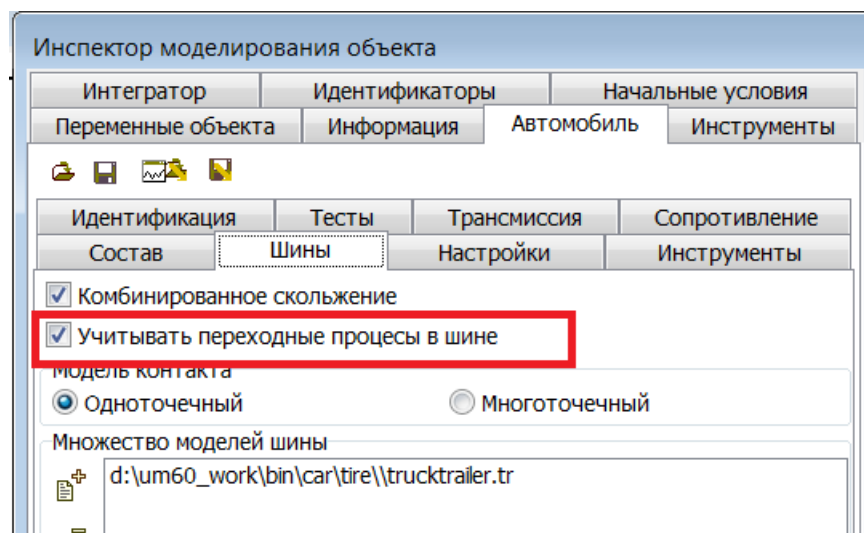


Рис. 1.61. Задание режима учета переходных процессов в шине

Для учета переходных процессов следует активизировать соответствующий ключ в инспекторе моделирования объекта, рис. 1.61.

Основным эффектом учета переходных процессов в шине в соответствии с указанной моделью является замедление значений λ и s_x по сравнению со значениями $\frac{v_y}{v_x}$ и $\frac{\omega R - v_x}{v_x}$. Замедления зависят от длин релаксации и скорости продольного движения, т.е. от постоянных времени $\frac{L_y}{v_x}$ и $\frac{L_x}{v_x}$, рис. 1.62. Длины релаксации шины задаются в метрах в мастере описания параметров шины, рис. 1.63.

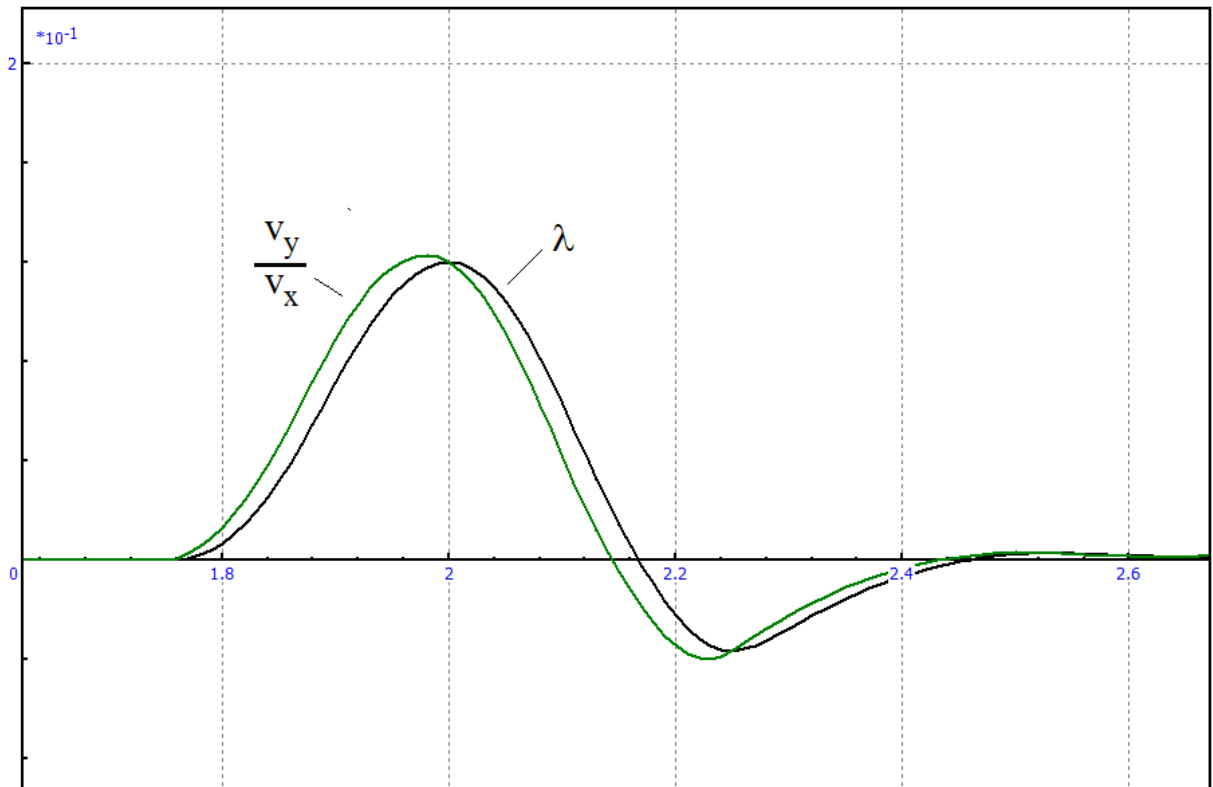


Рис. 1.62. Зависимость от времени переменных λ и v_y/v_x в тесте «рывок руля»

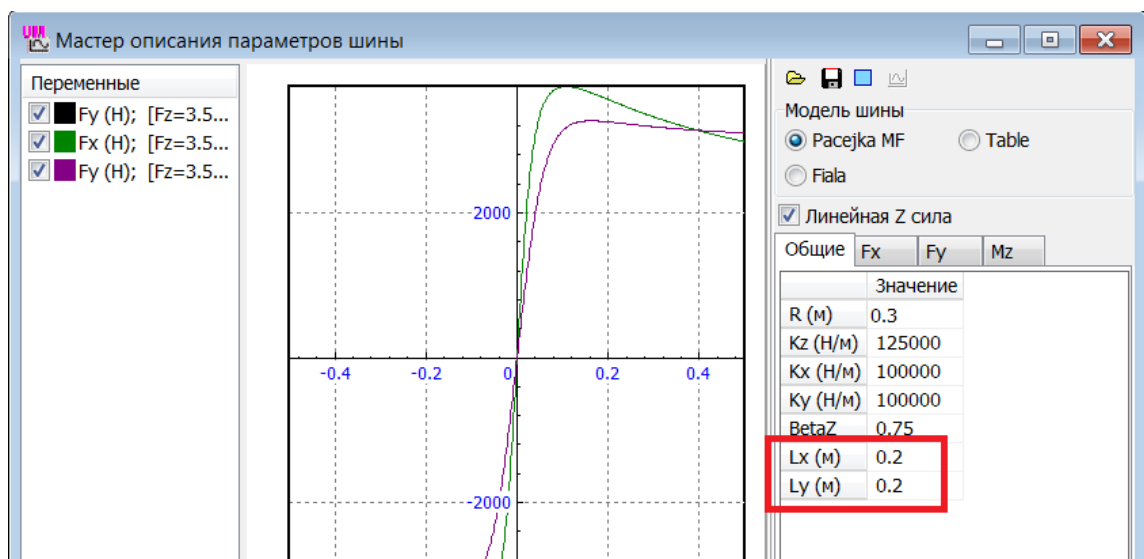


Рис. 1.63. Задание длин релаксации шины

1.5.7. Модель TMEasy

TMEasy является одной из простейших моделей шин. Основным её преимуществом является минимальный набор исходных параметров (по сравнению с другими моделями).

Предположения и допущения

- Контактные силы не зависят от угла развала
- Продольная и боковая силы считаются совместно, т.е. всегда рассчитывается комбинированное скольжение (в отличие от других моделей шин, где комбинированное скольжение опционально).
- Стабилизирующий момент (M_z) является функцией, зависящей от боковой силы F_y

Исходные данные

Для задания модели шины необходимо задать параметры для продольной и боковой силы, а также для динамического смещения шины. ([14], стр. 67, [15])

Продольная сила (F_x)

Зависимость продольной силы от продольного проскальзывания задается с помощью следующего набора параметров:

- Жесткость dF_x^0
- Максимальная продольная сила F_x^M
- Продольное проскальзывание s_x^M
- Продольная сила в режиме чистого скольжения F_x^S
- Продольное проскальзывание s_x^S

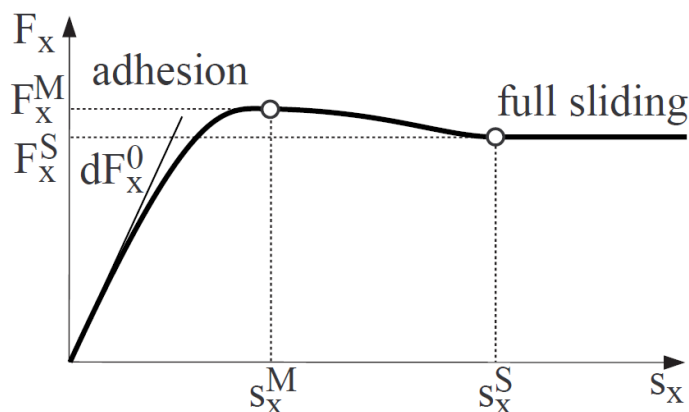


Рис. 1.64. Зависимости продольной силы от продольного проскальзывания

Боковая сила (F_y)

Зависимость боковой силы от поперечного проскальзывания задается с помощью следующего набора параметров:

- Жесткость dF_y^0
- Максимальная боковая сила F_y^M
- Поперечное проскальзывание s_y^M
- Боковая сила в режиме чистого скольжения F_y^S
- Поперечное проскальзывание s_y^S

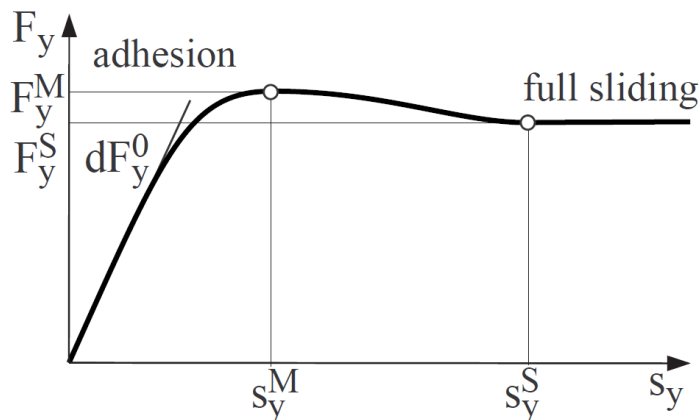


Рис. 1.65. Зависимости боковой силы от поперечного проскальзывания

Комбинированное скольжение

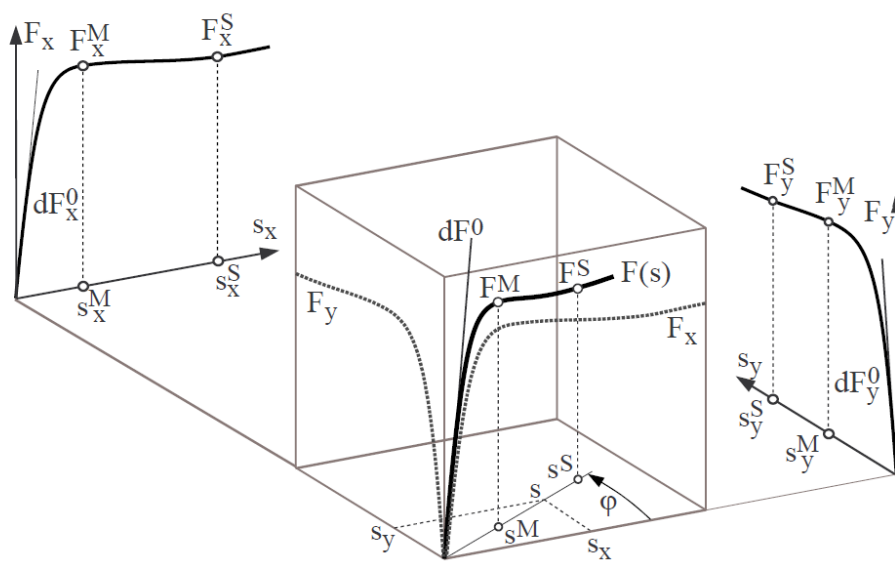


Рис. 1.66. Обобщенная характеристика шины

Комбинированное проскальзывание:

$$s = \sqrt{\left(\frac{s_x}{\hat{s}_x}\right)^2 + \left(\frac{s_y}{\hat{s}_y}\right)^2} \tag{1.7}$$

$$\hat{s}_x = \frac{s_x^M}{s_x^M + s_y^M} + \frac{F_x^M / dF_x^0}{F_x^M / dF_x^0 + F_y^M / dF_y^0} \tag{1.8}$$

$$\hat{s}_y = \frac{s_y^M}{s_x^M + s_y^M} + \frac{F_y^M / dF_y^0}{F_x^M / dF_x^0 + F_y^M / dF_y^0}$$

Параметры обобщенной характеристики:

$$\begin{aligned} dF^0 &= \sqrt{(dF_x^0 \cdot \hat{s}_x \cdot \cos \varphi)^2 + (dF_y^0 \cdot \hat{s}_y \cdot \sin \varphi)^2} \\ s^M &= \sqrt{\left(\frac{s_x^M}{\hat{s}_x} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{s_x^M}{\hat{s}_x} \sin \varphi\right)^2} \\ F^M &= \sqrt{(F_x^M \cos \varphi)^2 + (F_y^M \sin \varphi)^2} \\ s^S &= \sqrt{\left(\frac{s_x^S}{\hat{s}_x} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{s_x^S}{\hat{s}_x} \sin \varphi\right)^2} \\ F^S &= \sqrt{(F_x^S \cos \varphi)^2 + (F_y^S \sin \varphi)^2} \end{aligned} \quad (1.9)$$

где

$$\cos \varphi = \frac{s_x / \hat{s}_x}{s} \quad \sin \varphi = \frac{s_y / \hat{s}_y}{s} \quad (1.10)$$

Обобщенная характеристика:

$$F(s) = \begin{cases} s^M dF^0 \frac{\sigma}{1 + \sigma \left(\sigma + dF^0 \frac{s^M}{F^M} - 2 \right)}, & \sigma = \frac{s}{s^M} & 0 \leq s \leq s^M \\ F^M - (F^M - F^S) \sigma^2 (3 - 2\sigma), & \sigma = \frac{s - s^M}{s^S - s^M} & s^M \leq s \leq s^S \\ F^S, & & s < s^S \end{cases} \quad (1.11)$$

Проецируя обобщенную силу на продольное и поперечное направления, получим соответствующие продольную и боковую силы:

$$F_x = F \cos \varphi \quad F_y = F \sin \varphi \quad (1.12)$$

Стабилизирующий момент (M_z)

Стабилизирующий момент является функцией от боковой силы.

$$M_z = -nF_y, \quad (1.13)$$

где n – динамическое смещение шины (dynamic tire offset)

$$\frac{n}{L} = \left(\frac{n}{L}\right)_0 \begin{cases} 1 - |s_y|/s_y^0 & |s_y| \leq s_y^0 \\ \frac{|s_y| - s_y^0}{s_y^0} \left(\frac{s_y^E - |s_y|}{s_y^E - s_y^0}\right)^2 & s_y^0 \leq |s_y| \leq s_y^E \\ 0 & |s_y| > s_y^E \end{cases} \quad (1.14)$$

где

- $\frac{n}{L}$ – нормализованное динамического смещение
- $\left(\frac{n}{L}\right)_0$ – начальное значение нормализованного динамического смещения
- L – длина пятна контакта
- s_y^0, s_y^E – дополнительные параметры модели, характеризующие поперечные проскальзывания, при которых график динамического смещения пересекает ось абсцисс

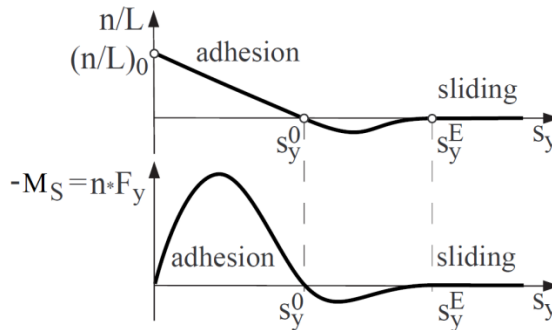


Рис. 1.67. Динамическое смещение и стабилизирующий момент

Список параметров модели шины

Модель TMEasy для одного значения вертикальной силы F_z зависит от тринадцати параметров:

$$dF_x^0, F_x^M, s_x^M, F_x^S, s_x^S, dF_y^0, F_y^M, s_y^M, F_y^S, s_y^S, \left(\frac{n}{L}\right)_0, s_y^0, s_y^E$$

Полное задание модели включает численные значения этих параметров для номинальной вертикальной силы $F_{z, \text{norm}}$ и для удвоенного значения $2F_{z, \text{norm}}$.

Пример модели шины TMEasy [15]

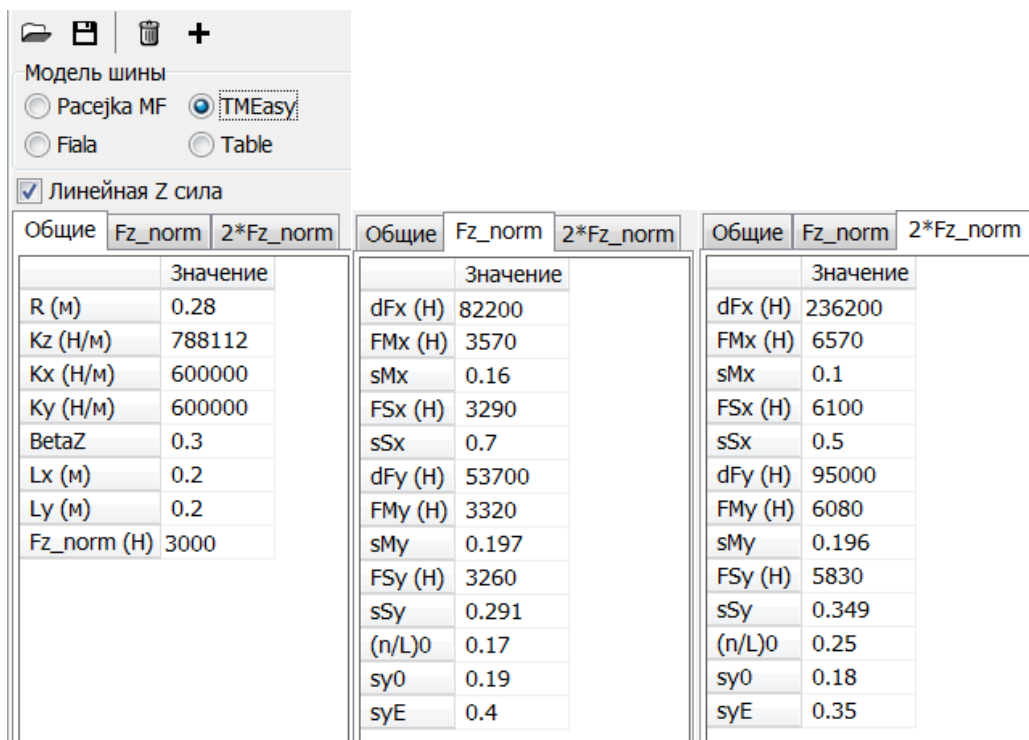


Рис. 1.68. Параметры модели в мастере описания параметров шины

Пример файла модели шины

tmeasy.tr

```
runloaded=0.28;
cstiffz=788112;
cstiffx=600000;
cstiffy=600000;
dampingratioz=0.3;
relaxationx=0.2;
relaxationy=0.2;
linearzforce=true;
```

```
with tire_tmeasy;
fx1_Fz=3000;
fx1_dF=82200;
fx1_FM=3570;
fx1_sM=0.160;
fx1_FS=3290;
fx1_sS=0.700;
```

```
fx2_Fz=6000;
fx2_dF=236200;
fx2_FM=6570;
fx2_sM=0.100;
fx2_FS=6100;
fx2_sS=0.500;
```

```
fy1_Fz=3000;
fy1_dF=53700;
fy1_FM=3320;
fy1_sM=0.197;
fy1_FS=3260;
fy1_sS=0.291;
```

```

fy2_Fz=6000;
fy2_dF=95000;
fy2_FM=6080;
fy2_sM=0.196;
fy2_FS=5830;
fy2_sS=0.349;

```

```

mz1_nL=0.17;
mz1_s0=0.190;
mz1_sE=0.400;

```

```

mz2_nL=0.25;
mz2_s0=0.180;
mz2_sE=0.350;

```

1.5.8. Мастер описания параметров шины

При помощи **Мастера описания параметров шины** (см. рис. 1.69) создаются файлы с параметрами моделей контактных сил *.tr, которые затем используются в процессе моделирования динамики автомобилей.

Для открытия окна **Мастера** используйте пункт меню **Инструменты | Параметры модели шины...**, программа **UM Simulation**.

Мастер не только позволяет задать необходимые параметры контактных моделей, но и визуализировать полученные зависимости контактных сил и моментов.

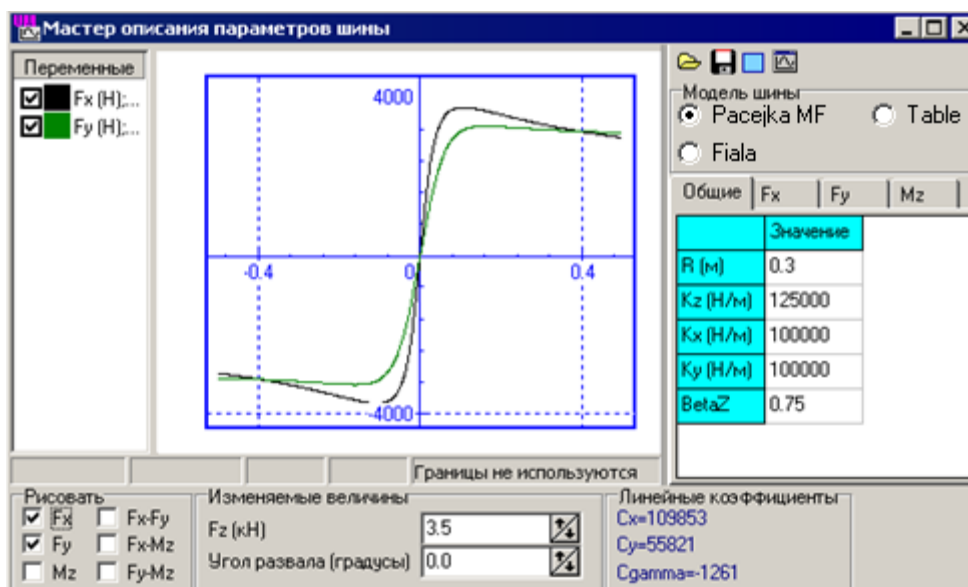




Рис. 1.69. Мастер описания параметров шины

Порядок работы с Мастером

- Выберите модель контактных сил в списке **Модель шины**.
- Задайте все требуемые параметры в списках параметров в правой части окна.
- При необходимости проверьте правильно задания параметров модели путем анализа графиков, см. ниже.
- Сохраните параметры модели в файл *.tr кнопкой .

Построение графиков



После того, как заданы все параметры модели контактных сил, можно построить различные графики зависимостей сил и моментов. Для этого выполните следующие действия.

- В поле **Рисовать** выберите нужный Вам набор характеристик.
- В полях **Изменяемые величины** задайте значения нагрузки и угла развала, для которых Вы хотите построить зависимости. При этом учитывайте особенности моделей контактных сил. Так, например, при использовании модели FIALA контактные силы не зависят от угла развала.
- Нажмите кнопку  для добавления новых зависимостей в поле графиков.

Используйте кнопку  для того, чтобы очистить список зависимостей.

1.5.9. Выбор модели контактных сил

Модели шин, созданный в **Мастере описания параметров шины** назначаются колесам автомобиля в **Инспекторе моделирования объекта** на закладке **Автомобиль | Шины**.

- Используйте кнопки  и  для того, чтобы добавить/удалить нужную модель шины из списка **Множество моделей шины**.
- Ту или иную модель из описанного выше **Множества моделей шины** можно назначить каждому отдельному колесу, для этого используйте контекстное меню, как это показано на рис. 1.70.

Как правило, параметры шин всех колес автомобиля одинаковы. В этом случае в список **Множества моделей шины** достаточно добавить только одну модель шины и назначить эту модель всем колесами автомобиля.

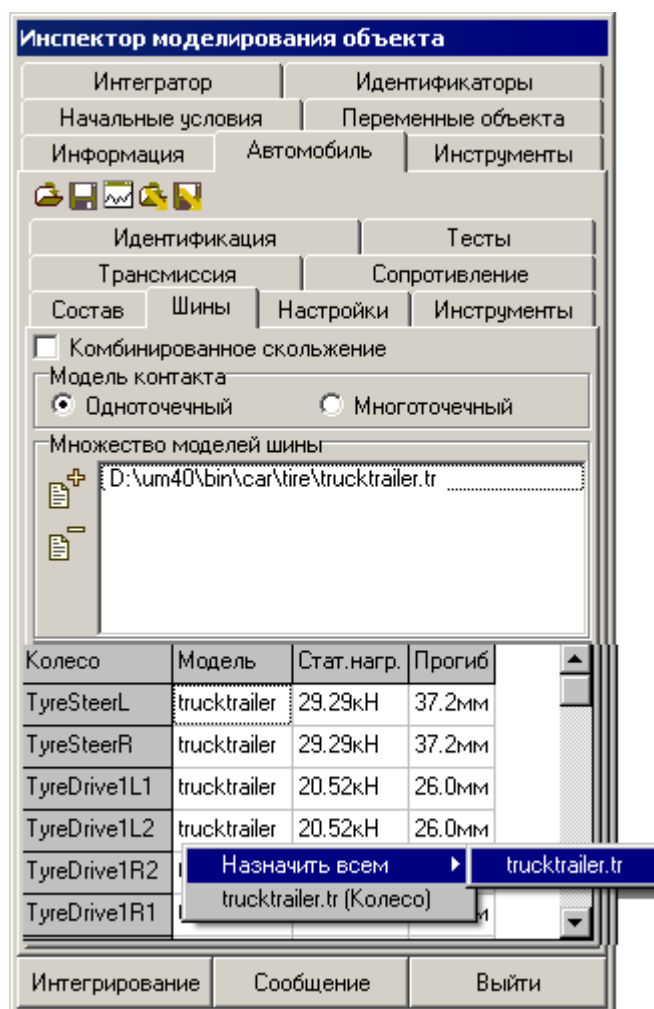



Рис. 1.70. Выбор контактной модели

1.5.10. Визуализация сил между шиной и дорогой

Вертикальный, поперечные, продольные контактные силы между колесом и дорогой могут быть выведены в анимационном окне. Для того, чтобы скрыть/показать контактные силы используйте (рис. 1.71)

- для нового анимационного окна: команду **Показать векторы сил шина/дорога**
- для старого анимационного окна: кнопку  на верхней панели быстрого доступа.

Параметры анимации векторов сил описаны в п. 1.9.1.4.3. “Изображение сил для шины

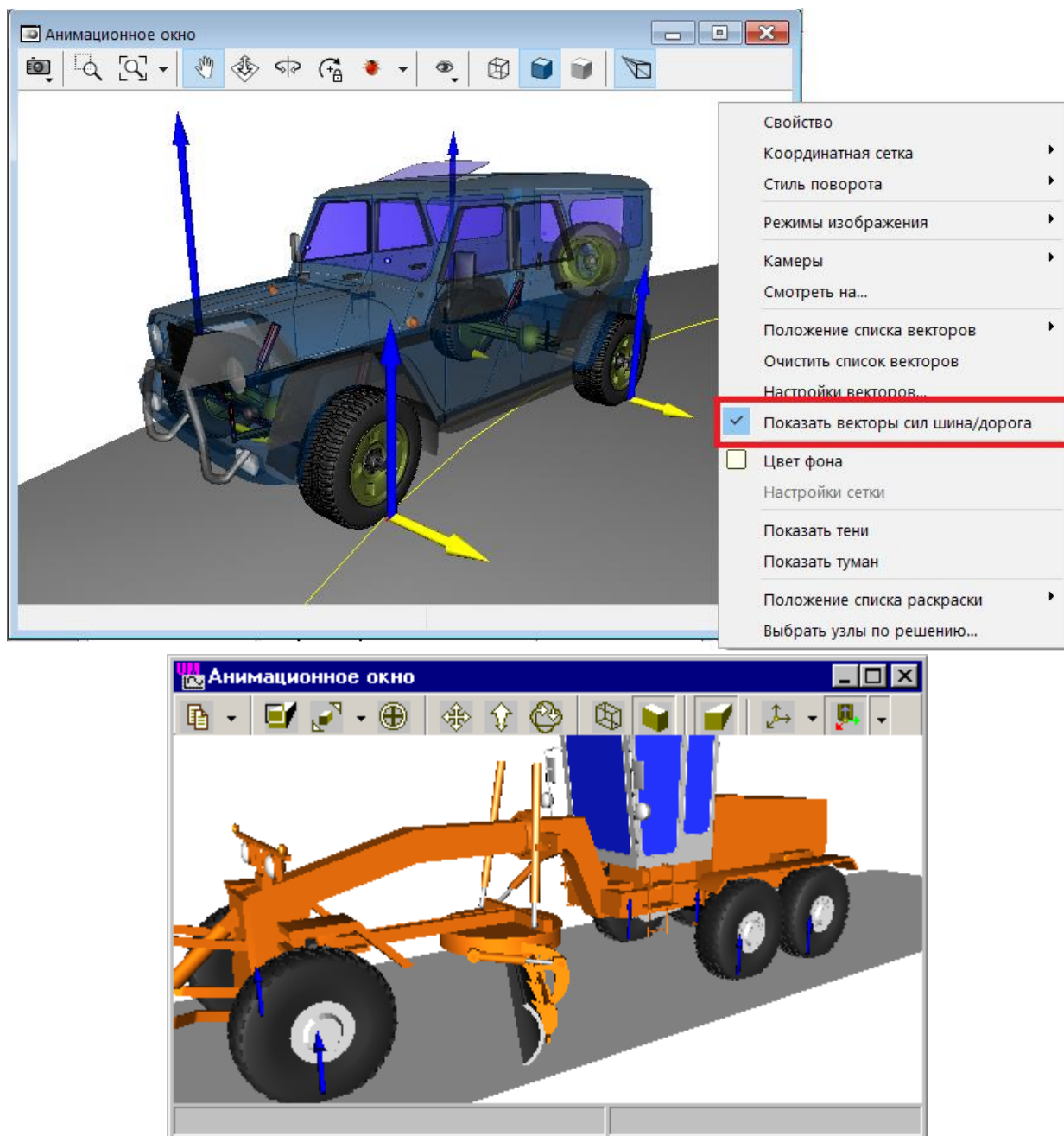


Рис. 1.71. Силы между шинами и дорогой

1.5.11. Создание приближенной модели Fiala по номинальным значениям параметров шины

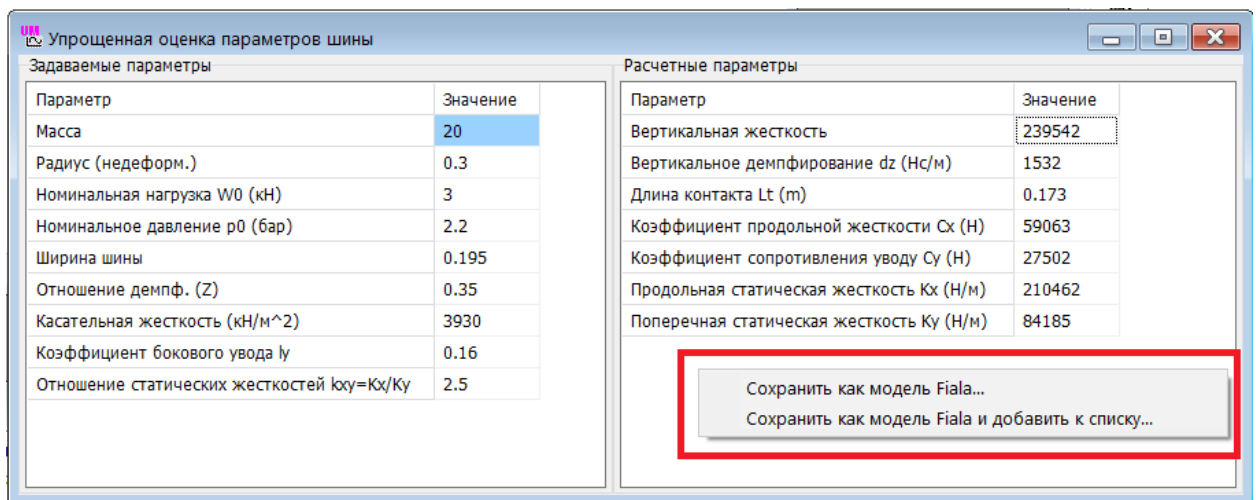
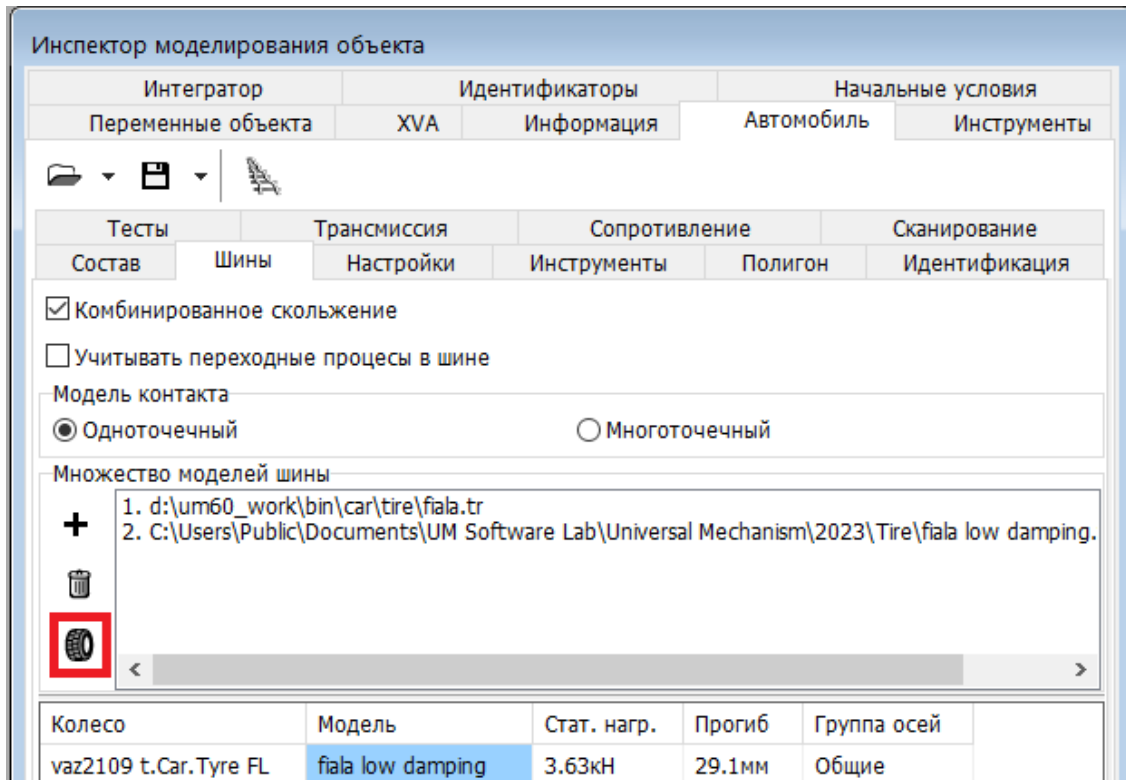


Рис. 1.72. Расчет оценочных параметров модели шины и сохранение в файл

Часто значения параметров шины, входящие в описанные выше модели, неизвестны. В этом случае полезным могут явиться приблизительные оценки этих параметров, которые позволят построить простую модель, такую как Fiala, п. 1.5.2. “Модель Fiala”.

Для расчета используются следующие параметры шины:


- r_w – радиус шины в недеформированном состоянии;
- w – ширина сечения шины;
- W_0 – номинальная нагрузка на шину;

$\beta_z \in [0.3, 0.75]$ – доля демпфирования от критического, только для расчета коэффициента вертикального демпфирования шины d_{z0} ;

k_t – касательная жесткость шины, кПа, значение по умолчанию 3930 кПа;

$\lambda_y \in [0.8, 0.18]$ – коэффициент бокового увода шины для расчета коэффициента сопротивления боковому уводу c_{y0} ;

$k_{xy} = K_x/K_y$ – отношение статических жесткостей шины (продольной к поперечной)

Для вызова окна расчета параметров шины используйте кнопку  на вкладке **Автомобиль | Шины** инспектора моделирования, рис. 1.72. Параметры шины вносятся в левую часть окна, расчетные значения отображаются в правой части. Для сохранения параметров в файл в виде модели Fiala *.tr используются команды всплывающего меню, появляющиеся по щелчку правой кнопкой мыши. Кроме создания файла, модель может быть добавлена в текущий список для назначения колеса модели автомобиля.

1.5.11.1. Оценка вертикальной жесткости и демпфирования

В отчете [16] указывается, что с погрешностью, не превышающей 20% вертикальная жесткость шины может быть рассчитана по формуле

$$K_{z0} = \pi p_0 \sqrt{2Rw}.$$

Коэффициент линейного демпфирования оценивается по значению доли демпфирования от критического β_z

$$d_{z0} = 2\beta_z \sqrt{C_{z0} m_w},$$

где m_w – масса колеса.

1.5.11.2. Оценка коэффициента сопротивления боковому уводу

В соответствии с книгой Дж. Вонга [6], коэффициент бокового увода $\lambda_y \in [0.8, 0.18]$ равен отношению поперечной силы при одном градусе бокового увода к нагрузке на шину. Таким образом, коэффициент сопротивления боковому уводу шины равен

$$c_{y0} = \lambda_y W_0 \frac{180}{\pi}.$$

Таблица значений коэффициентов бокового увода λ_y для различных шин приводится в книге Дж. Вонга [6]. Типичное значение для диагональных шин 0.12, для радиальных 0.16.

1.5.11.3. Оценка коэффициента продольной жесткости шины

Выражение для оценки продольной жесткости шины c_{x0} приведено в книге [6]

$$c_{x0} = k_t \frac{L_t^2}{2}$$

где L_t – длина контактного пятна шины,

$$L_t \approx 2r_w \sqrt{\frac{2W_0}{K_{z0}r_w}}$$

1.5.11.4. Коэффициенты продольной и поперечной статической жесткости шины

Данные параметры необходимы для моделирования стоящего на месте автомобиля. В работе [6] коэффициент продольной статической жесткости рассчитывается через величину коэффициента сопротивления боковому уводу

$$K_y = \frac{c_{y0}}{0.8r_w + L_t/2}.$$

Обычно продольная статическая жесткость шины больше поперечной жесткости в несколько раз, так что

$$K_x = k_{xy}K_y.$$

Рекомендуемое значение $k_{xy} = 2.5$.

1.6. Сопротивление движению автомобиля

1.6.1. Сопротивление воздуха

Сопротивление воздуха зависит от скорости потока воздуха относительно автомобиля V_a , плотности воздуха ρ , коэффициентов аэродинамического сопротивления, площади сопротивления, угла β направления скорости воздушного потока относительно автомобиля (рис. 1.73) и некоторых других параметров. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и площади зависят от рассчитываемой компоненты силы или момента сопротивления [17].

Рассмотрим формулы, используемые в УМ для расчета компонент силы и момента аэродинамического сопротивления относительно локальной СК кузова автомобиля. Направления сил и моментов при положительных значениях и при положительном значении угла направления относительной скорости потока β указаны на рис. 1.74.

- Сила лобового сопротивления

$$R_x = C_x(\beta)A_x \frac{\rho}{2}V_a^2,$$

C_x – коэффициент лобового сопротивления, A_x – лобовая площадь (площадь проекции автомобиля на плоскость, перпендикулярную его продольной оси).

- Сила бокового сопротивления

$$R_y = C_y(\beta)A_y \frac{\rho}{2}V_a^2,$$

C_y – коэффициент бокового сопротивления, A_y – боковая площадь (площадь проекции автомобиля на плоскость, перпендикулярную его поперечной оси).

- Момент крена

$$M_x = C_{ax}(\beta)L_y A_y \frac{\rho}{2} V_a^2$$

L_y – ширина колеи.

- Опрокидывающий момент

$$M_y = C_{ay}(\beta)L_x A_x \frac{\rho}{2} V_a^2$$

C_{ay} – коэффициент аэродинамического опрокидывающего момента, L_y – колесная база автомобиля.

- Поворачивающий момент

$$M_z = C_{az}(\beta)L_x A_y \frac{\rho}{2} V_a^2$$

Приняты следующие упрощенные зависимости коэффициентов аэродинамического сопротивления от угла атаки:

$$C_x(\beta) = C_x(0)\cos\beta, C_y(\beta) = C_y(0)\sin\beta, C_{ax}(\beta) = C_{ax}(0)\sin\beta, \\ C_{ay}(\beta) = C_{ay}(0)\sin\beta, C_{az}(\beta) = C_{az}(0)\sin\beta$$

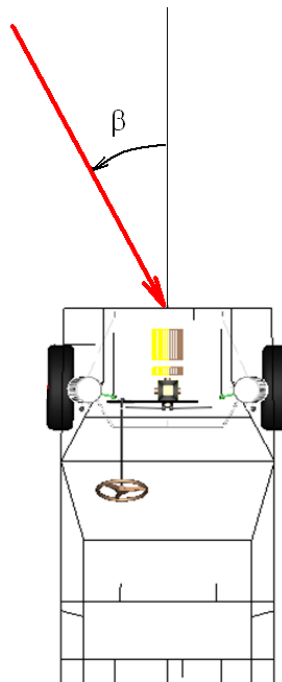


Рис. 1.73. Положительный угол направления относительной скорости воздушного потока

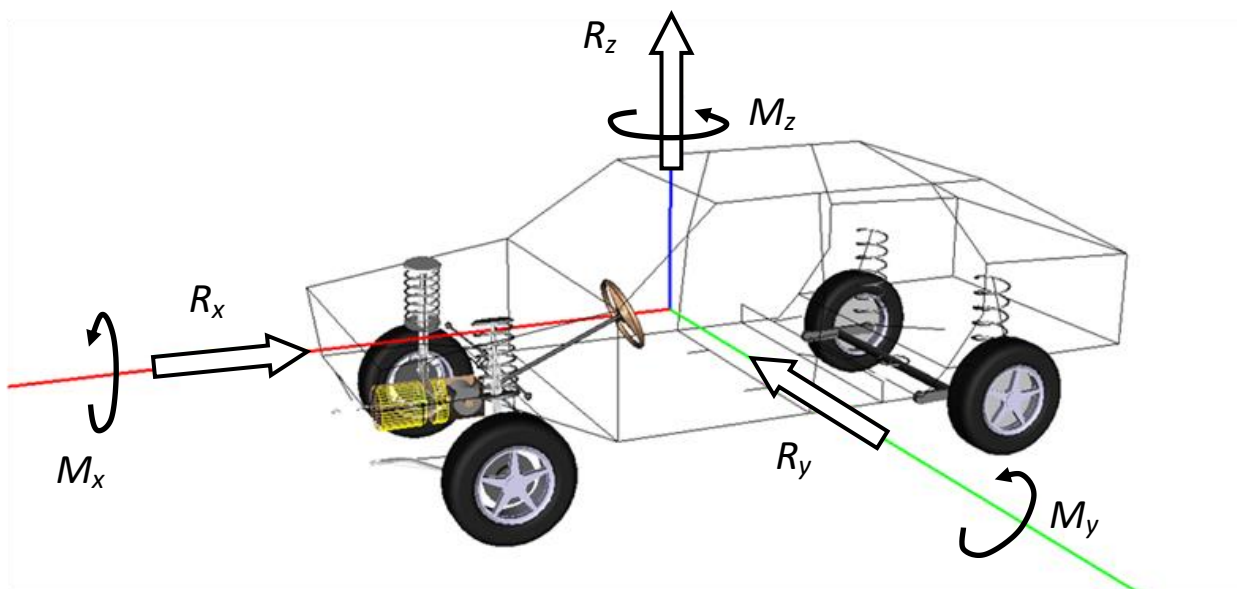


Рис. 1.74. Направления аэродинамических сил и моментов при положительном значении

В работе [18] приведены типичные значения некоторых коэффициентов аэродинамического сопротивления, табл. 1.6.

В соответствии с работой [6], коэффициент аэродинамического подъема C_z изменяется в пределах $0.2 \div 0.5$, коэффициент аэродинамического опрокидывающего момента $C_{ay}(0)$ – в пределах $0.05 \div 0.21$.

Значения коэффициента лобового сопротивления C_x и площади A_x для большинства легковых автомобилей можно найти в интернете. См. например, rc.opelgt.org/indexcw.php.

В программе **UM Simulation** параметры аэродинамического сопротивления автомобиля задаются на вкладке **Автомобиль | Сопротивление | Аэродинамическое** инспектора моделирования, рис. 1.75. Скорость ветра и его направление задаются относительно СК0, причем угол отсчитывается относительно оси X, положительно направление определяется так же, как на рис. 1.73.

Таблица 1.6

Типичные значения коэффициентов аэродинамического сопротивления

Коэффициент	Легковой автомобиль	Фургон	Грузовой автомобиль
$C_x(0)$	$0.3 \div 0.4$	$0.5 \div 0.6$	$0.6 \div 1.2$
$C_y(0)$	$1.8 \div 2.8$	$3.0 \div 4.0$	$4.0 \div 7.0$
$C_{az}(0)$	$0.3 \div 0.8$	$0.04 \div 1.1$	$0.1 \div 1.0$
$C_{ax}(0)$	$0.8 \div 1.2$	$2.0 \div 3.6$	$0.9 \div 1.1$

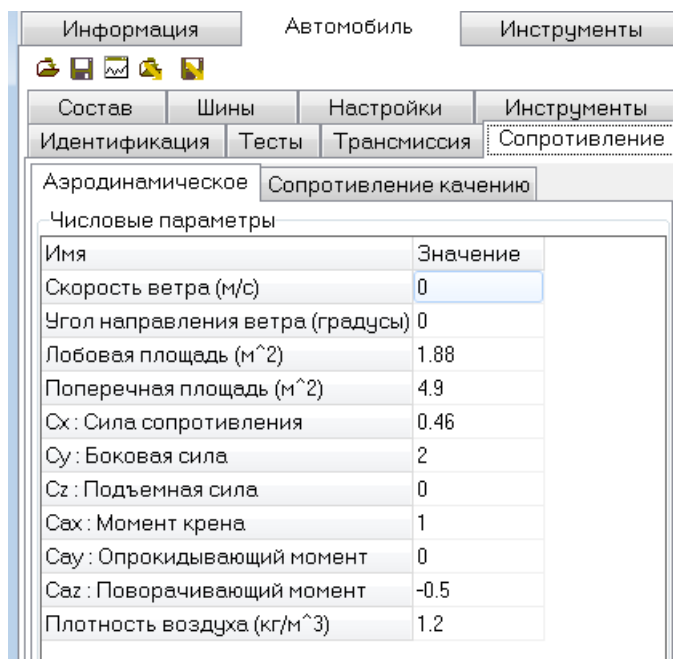


Рис. 1.75. Ввод параметров аэродинамического сопротивления

1.6.2. Сопротивление качению шины

Трение качения учитывается в виде момента сопротивления $T_{rf} = F_{rf}R$, приложенного к колесу против вращения; R – радиус шины. В соответствии с работой [6], сила сопротивления F_{rf} , входящая в это выражение, определяется по формуле

$$F_{rf} = fF_z$$

где f – коэффициент сопротивления, F_z – нормальная сила при взаимодействии шины с дорогой. Коэффициент сопротивления зависит от скорости автомобиля [6].

$$f = f_0 + k_1v + k_2v^2.$$

Здесь v – скорость автомобиля в км/ч, f_0, k_1, k_2 – эмпирические постоянные, определяемые экспериментально. Типичные значения этих постоянных [6] представлены в табл. 1.7.

В программе **UM Simulation** параметры сопротивления качению автомобиля задаются на вкладке **Автомобиль | Сопротивление | Сопротивление качению** инспектора моделирования рис. 1.76.

Таблица 1.7

Параметры трения качения шины

Шина	f0	k1	k2
Радиальная шина, легковой автомобиль	0.0136	0	0.4e-7
Диагональная шина, легковой автомобиль	0.0169	0	0.19e-6
Радиальная шина, грузовой автомобиль	0.006	0	0.23e-6
Диагональная шина грузовой автомобиль	0.007	0	0.45e-6

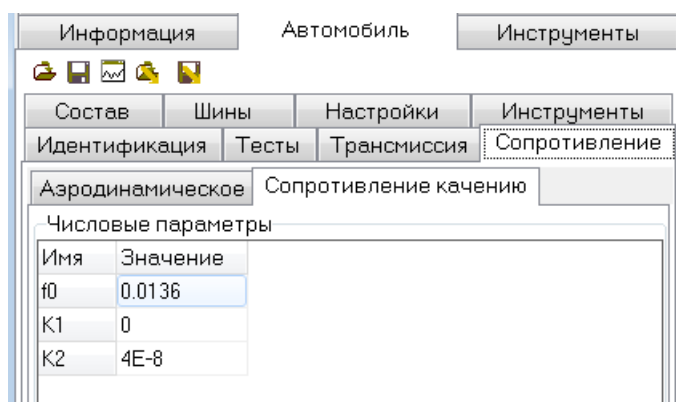


Рис. 1.76. Ввод параметров сопротивления качению

1.7. Создание моделей автомобилей

В данном разделе мы рассмотрим подходы к моделированию основных элементов подвески автомобилей: пружин подвески, амортизаторов, листовых рессор и других силовых элементов подвески, а также подвесок в целом. Проведенные здесь примеры и подходы к моделированию отдельных силовых элементов подвесок и узлов автомобиля носят исключительно рекомендательный характер. Многообразие физической природы различных взаимодействий, технической реализации узлов конструкции и требуемой степени детализации моделей не позволяют в рамках данного руководства привести законченный список различных примеров.

1.7.1. Модели колеса

Начиная с версии УМ 7 в программе предусмотрено две модели колеса, с жестким и упругим креплением шины к дисковому центру. В дальнейшем будем первый вариант называть «жесткое колесо», а второй – «упругое колесо»

1.7.1.1. Жесткое колесо

Жесткое колесо вводится в модель как абсолютно твердое тело со своими инерционными параметрами и графическим образом и специальной силы типа **Шина**, см. рис. 1.77.

- Ось вращения колеса совпадает с осью Y связанной с телом системы координат.
- Для каждого колеса должен быть создана *специальная сила* типа **Шина**. Тело, моделирующее шину, должно назначаться в качестве *второго тела* в силовом элементе; *первым телом*, как правило, назначается Base0.
- Колесо должно соединяться с автомобилем шарниром таким образом, чтобы положительное направление вращения колеса соответствовала движению автомобиля вперед.

Для добавления в модель автомобиля нового колеса проще всего использовать визуальный компонент **Колесо**.

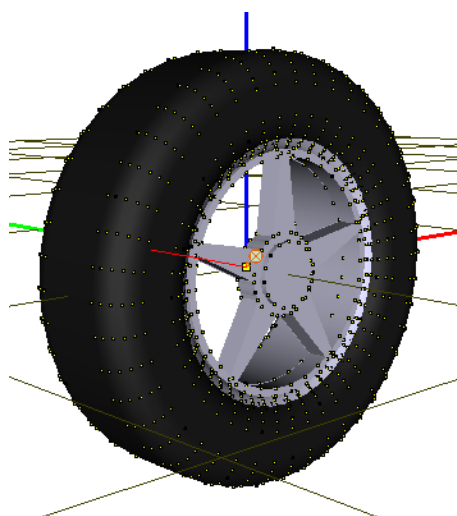


Рис. 1.77. Колесо как твердое тело

1.7.1.2. Упругое колесо

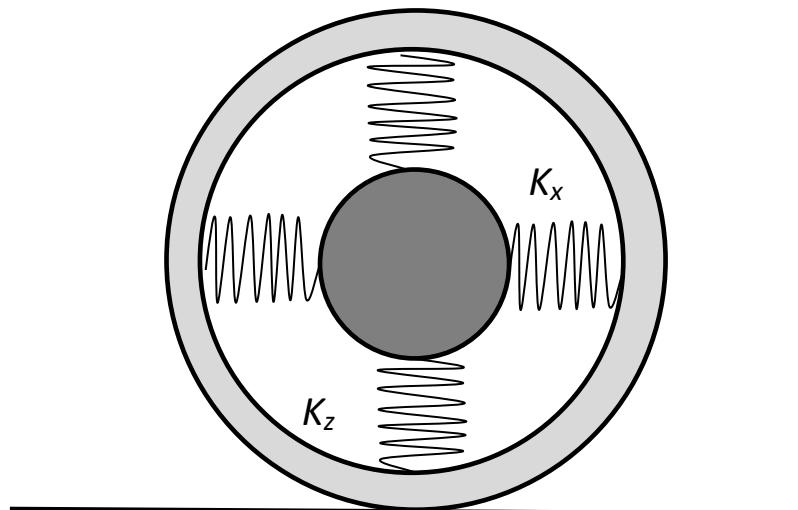


Рис. 1.78. Упругое колесо

Упругое колесо образовано двумя абсолютно твердыми телами – шиной и колесным диском, связанными друг с другом упругим элементом, рис. 1.78. Шина должна иметь относительно колесного диска, как минимум, три степени свободы: сдвиги в вертикальном и продольном направлениях и поворот относительно оси колеса. Допускается также введение сдвига шины относительно центра вдоль оси колеса.

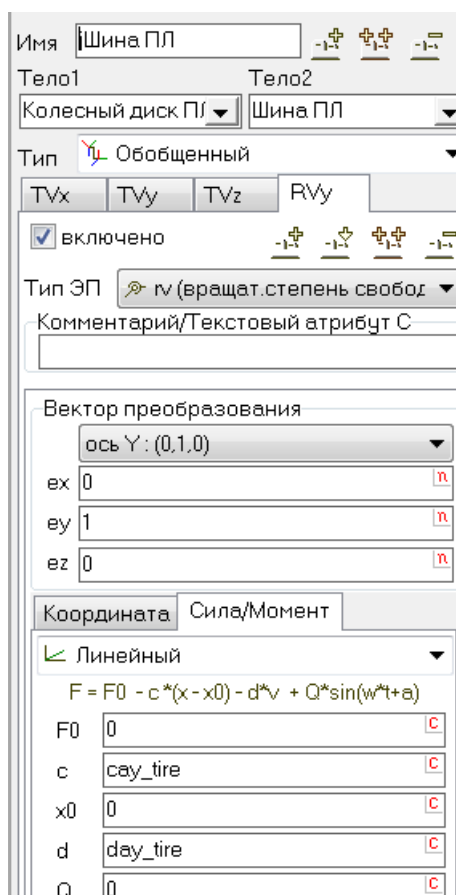


Рис. 1.79. Шарнир для упругого колеса

Для введения степеней свободы шины рекомендуется использовать шарнир обобщенного типа, рис. 1.79. Жесткости упругой связи K_x, K_y, K_z задаются в модели шины, п. 1.5 «Контакт шины с дорогой», и соответствующие силы автоматически рассчитываются в программе моделирования. Угловая упругая связь может быть описана в виде шарнирной силы для соответствующей степени свободы.

Специальный силовой элемент типа «шина» следует назначить соответствующему телу. Графический образ шины назначается колесному диску.

Перед моделированием движения автомобиля следует подтвердить факт использования модели упругого колеса на вкладке **Автомобиль | Шины** инспектора моделирования, рис. 1.79.

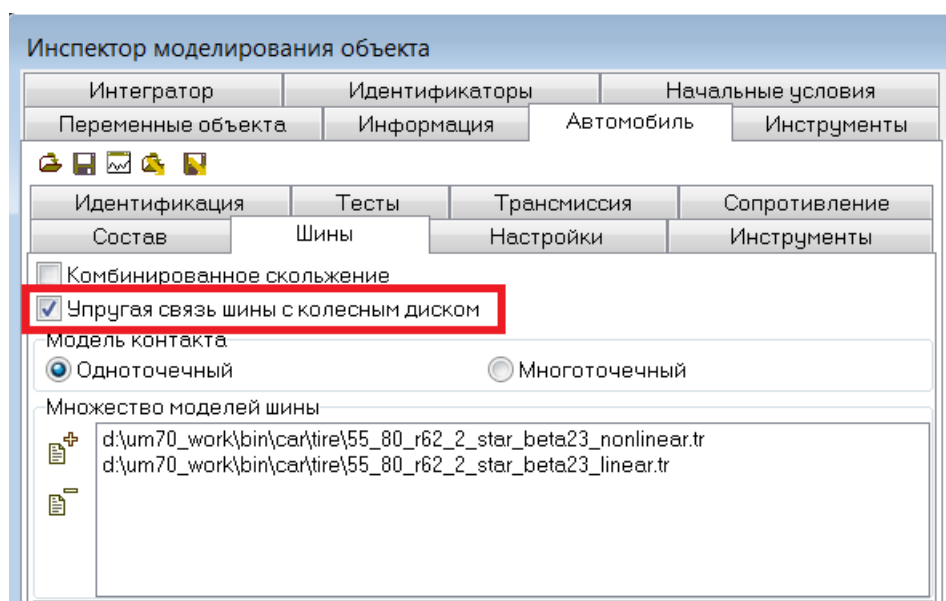


Рис. 1.80. Подтверждение модели упругого колеса

Вертикальная жесткость в контакте шины с дорогой принимается в *десять* раз большей, чем жесткость K_z .

1.7.2. Визуальный компонент «Колесо»

Библиотека **CarComponents.umc** содержит две визуальные компоненты для жесткого колеса, см. рис. 1.81. Обе компоненты добавляют в модель *правые* колеса с полностью параметризованным графическим образом (см. рис. 1.81), инерционными параметрами, специальной силой типа *Шина* и шарниром. Разница между компонентами заключается в модели шарнира.



Рис. 1.81. Визуальные компоненты

Первая компонента '*Правое колесо*' (рис. 1.81 слева) добавляет для колеса скрытый шарнир с 6 степенями свободы и пользователь должен дополнительно создать вращательный шарнир, связывающий колесо с автомобилем.

В противоположность предыдущему способу вторая компонента '*Правое колесо+шарнир*' (рис. 1.81 справа) позволяет непосредственно описывать вращательный шарнир.

Рассмотрим процесс визуального добавления компонент.

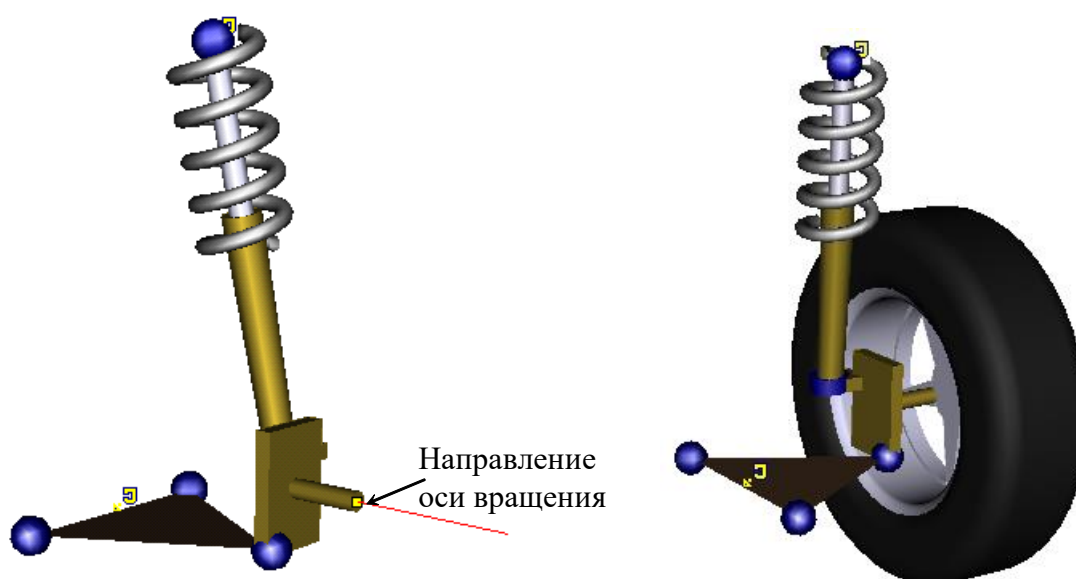


Рис. 1.82. Визуальное добавление колеса и шарнира

Правое колесо. Выберите эту компоненту в палитре компонент и затем щелкните мышкой в нужной точке вспомогательной сетки для добавления колеса в эту точку. После добавления окна появится диалог инициализации новых идентификаторов, установите их в соответствии с параметрами вашего колеса.

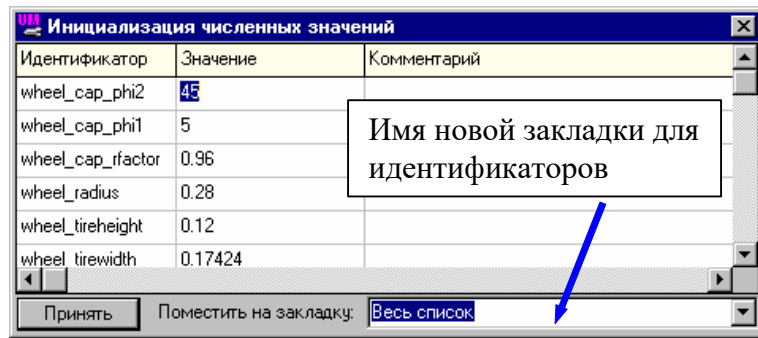


Рис. 1.83. Параметры графического образа колеса и его инерционные параметры

Правое колесо + Шарнир

1. Для тела, к которому присоединяется шарнир (например, стойка или мост), нужно создать вектор, описывающий положение шарнирной точки и направление оси вращения. Кроме того, это тело должно быть в дереве объекта, то есть оно должно быть видно в режиме отображения всего объекта в анимационном окне при сборке.
2. Щелкните на кнопке компоненты и затем выберите начало нужного вектора.
3. Измените идентификаторы модели, соответствующие инерционным параметрам колеса и его графическому образу.

Замечание. Если положительное приращение координаты соответствует движению автомобиля назад, то направление одного из шарнирных векторов нужно изменить на противоположное в диалоге описания шарнира, см. рис. 1.84.

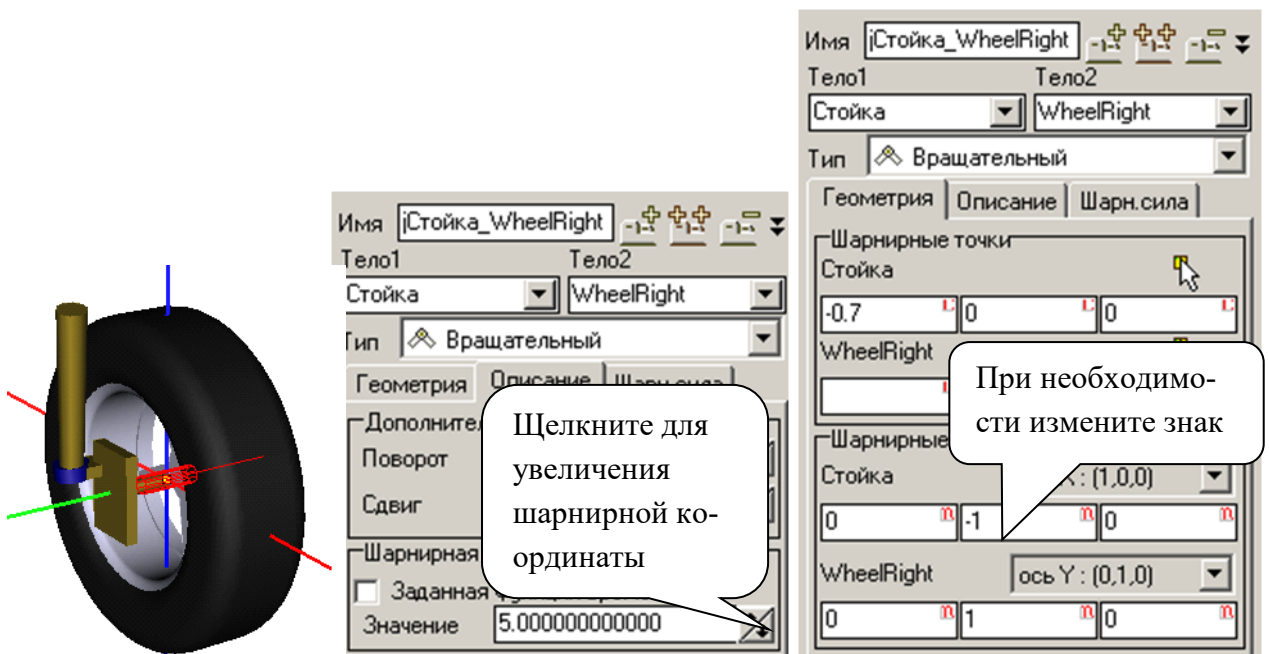


Рис. 1.84. Проверка правильности описания шарнира для колеса

1.7.3. Пружины подвески и гасители колебаний

Линейные пружины подвески могут моделироваться как Линейные силы, подробнее о линейных силах см. [Главу 2](#).

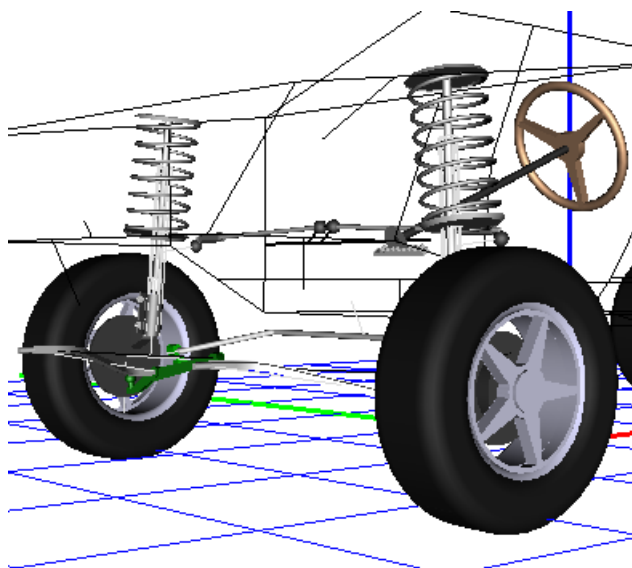


Рис. 1.85. Силовые элементы подвески

Линейные и нелинейные пружины и гасители колебаний могут моделироваться как *биполярные* или *шарнирные* силы, подробнее о биполярных силах см. [Главу 2](#).

1.7.4. Моделирование листовых рессор

Листовые рессоры, рис. 1.86, до недавнего времени были самыми популярными упругими элементами подвески для широкого класса автомобилей. Листовые рессоры одновременно передают продольные, поперечные и вертикальные усилия со стороны моста на кузов, что позволяет не вводить дополнительные силовые элементы и тем самым существенно упростить конструкцию подвески. Эта особенность листовых рессор определила их популярность в течение долгого времени. Вместе с тем листовые рессоры являются также диссипативными элементами – при изгибе листовой рессоры отдельные листы рессоры проскальзывают друг относительно друга и между ними появляются силы трения.

Однако в процессе эксплуатации рабочие характеристики листовых рессор существенно меняются, что в ряде случаев является неприемлемым. И в последнее время не смену листовым рессорам все шире приходят пружины, гасители и пневматические силовые элементы.



Рис. 1.86. Листовые рессоры

Можно предложить два подхода к моделированию листовых рессор: как безынерционный силовой элемент и как инерционную многомассовую систему. Рассмотрим модель листовой рессоры как безынерционного силового элемента подробнее.

1.7.4.1. Безынерционная модель листовой рессоры

При описании безынерционной модели листовой рессоры мы представляем ее как силовой элемент, связывающий два твердых /упругих тела. Отметим следующие особенности модели рессоры.

Модель должна упруго связывать взаимодействующие тела по всем трем (шести) направлениям.

В продольном и поперечном направлении жесткость рессоры гораздо выше, чем в вертикальном.

В продольном и поперечном направлении практически отсутствует гашение, отбор энергии осуществляется только за счет внутренних потерь в металле.

В вертикальном направлении рессора представляет собой силовой элемент с пропорциональным трением. Чем сильнее изогнута рессора, тем выше нормальные усилия между листами и, соответственно, силы сухого трения.

Итак, упруго-диссипативные свойства рессоры в продольном и поперечном направлениях будем моделировать обобщенным линейным силовым элементом. Работу рессоры в вертикальном направлении рекомендуется описывать одним из двух, приведенных ниже способов:

двумя биполярными элементами типа *Упруго-2-фрикционный*;

двумя биполярными элементами типа *Рессора Фанчера*.

Упруго-фрикционная сила

Этот силовой элемент представляет собой элемент с пропорциональным трением, что позволяет эффективно моделировать с его помощью, в том числе листовые рессоры. Расчетная схема безынерционной модели листовой рессоры представлена на рис. 1.87. Более подробную информацию о данном типе элемента см. в [Главе 2](#), п. «Биполярные силы | Упруго – фрикционная сила 2».

Рессора Фанчера

Рессора Фанчера – эффективная модель листовой рессоры, учитывающая потери энергии на трение при работе рессоры в вертикальном направлении.

Заметим, что места прикрепления силовых элементов к раме (в предположении, что рессора соединяет мост и раму автомобиля) не определяются геометрией рессоры, см. рис. 1.87, и выбираются произвольно с таким расчетом, чтобы при наибольшем ходе моста вверх длина элементов не проходила через нулевое значение. Это необходимо для того, чтобы не было вырождения биполярных силовых элементов, которое наступает в случае нулевой длины элемента.

Учитывая тот факт, что листовая рессора работает по всем направлениям, матрицу жесткости для линейного силового элемента нужно рекомендуется задавать как минимум диагональную матрицу жесткости, см. рис. 1.87. С учетом того, что поведение рессоры в вертикальном направлении описывается биполярными силами (рессорой Фанчера или упруго-фрикционной силой) компонент жесткости в вертикальном направлении опущен.

$$\begin{pmatrix} C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{az} \end{pmatrix}$$

Рис. 1.87. Матрица жесткости линейного силового элемента

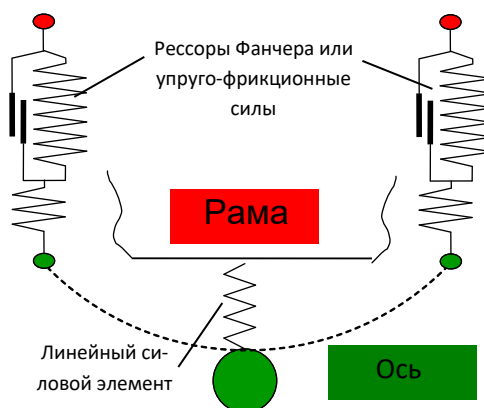


Рис. 1.88. Безынерционная модель листовой рессоры

Отметим также следующее. В реальности масса листовых рессор значительна. При моделировании рессор как безынерционных элементов, с учетом того, что масса рессоры, таким образом, из модели исключена, рекомендуется массу рессоры в равных частях добавлять к массе рамы и моста.

1.7.5. Пневматические рессоры

Пневморессоры моделируются с помощью одноименных специальных силовых элементов ([Глава 2](#), п. Специальные силы / *Пневматические рессоры*) и [Глава 31](#) *Пневматические системы*.

1.7.6. Сайлент-блоки

В УМ реализованы поступательные, вращательные, сферические линейные сайлент-блоки. Математическая модель сайлент-блоков описана в [Главе 2](#), раздел *Специальные силы/Сайлент-блоки*. Порядок добавления и сайлент-блоков и описания их параметров изложен в [Главе 3](#), раздел *Ввод данных/Ввод силовых элементов/Ввод специальных сил/Специальные силы/Сайлент-блоки*.

Используйте шарниры *Общего типа* для описания нелинейных сайлент-блоков и сайлент-блоков с трением. Шарнир должен включать шесть степеней свободы, причем по ограниченным степеням свободы нужно вводить жесткость/диссипацию/трение как шарнирную силу. Математическая модель шарниров общего типа описана в [Главе 2](#), раздел *Шарниры/Обобщенный шарнир*. Особенности описания обобщенных шарниров изложены в [Главе 3](#), раздел *Ввод данных/Ввод шарниров/Ввод обобщенного шарнира*.

1.7.7. Рулевое управление

Чтобы сделать возможным управление автомобилем с открытым или замкнутым контуром управления в модель необходимо ввести специальный шарнирный момент. Этот момент вводится в шарнире, в котором непосредственно осуществляется управление. Если модель автомобиля включает рулевое колесо, как на рис. 1.89, то это будет вращательный шарнир между корпусом и рулевым колесом. Если рулевое колесо не включается в модель, тогда поворот управляемых колес мы будем контролировать в шарнире между корпусом и ступицей колеса.

Момент, контролирующий поворот управляемых колес, вводится как шарнирный момент типа *Выражение* (см. рис. 1.90):

$$-cSteering*(x-SteeringWheelAngle)-dSteering*(v-dSteeringWheelAngle).$$

Здесь $cSteering$ и $dSteering$ – коэффициенты жесткости и демпфирования системы управления, имеют физический смысл жесткости и демпфирования удержания рулевого колеса водителем; $SteeringWheelAngle$ и $dSteeringWheelAngle$ – требуемый углы поворота и угловая скорость в управляемом шарнире, которые рассчитываются в процессе моделирования для выполнения заданных маневров. Пользователь может ввести собственные имена для этих четырех параметров.

Замечание. Для четырех идентификаторов, параметризующих рулевое управление, рекомендуется использовать имена по умолчанию, перечисленные выше. Для коэффициента жесткости по умолчанию также используется идентификатор $kSteering$



Рис. 1.89. Шарнир рулевого колеса

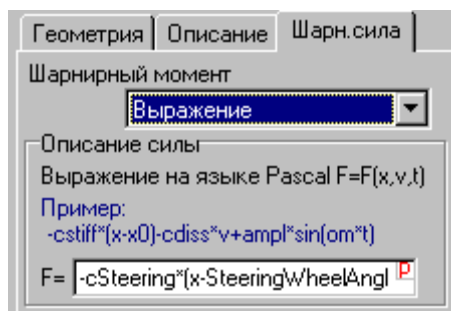


Рис. 1.90. Момент по управлению поворотом колес

Замечание. Идентификаторы для жесткости, требуемого угла поворота и угловой скорости должны быть числами и не могут быть выражены через другие параметры модели.

1.7.8. Силовой элемент для упрощенного управления скоростью продольного движения

В упрощенной модели автомобиля описание трансмиссии обычно отсутствует и дополнительно вводится силовой элемент для поддержания заданной скорости или торможения. В этом случае, чтобы иметь возможность управлять скоростью продольного движения автомобиля, в модель необходимо добавить специальный тяговый момент. Шарнир для приложения этого момента выбирается в зависимости от детализации модели и целей исследования. В простейшем случае момент вводится во вращательном шарнире для ведущих колес (между стойкой/мостом и колесом). В случае, если в модели автомобиля описана трансмиссия, тогда управляющий момент описывается на входе трансмиссии.

Управляющий момент описывается как *Выражение* одним и тем же идентификатором для всех ведущих колес, см. рис. 1.90, например: *MLongitudinalControl*. Обратите внимание, что это – значение по умолчанию идентификатора.

Пользователь может выбрать имя данного идентификатора по своему выбору. Идентификатор должен быть указан в программе моделирования при идентификации подсистем автомобиля, см. п. 1.9.1.2.1 *Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью*.

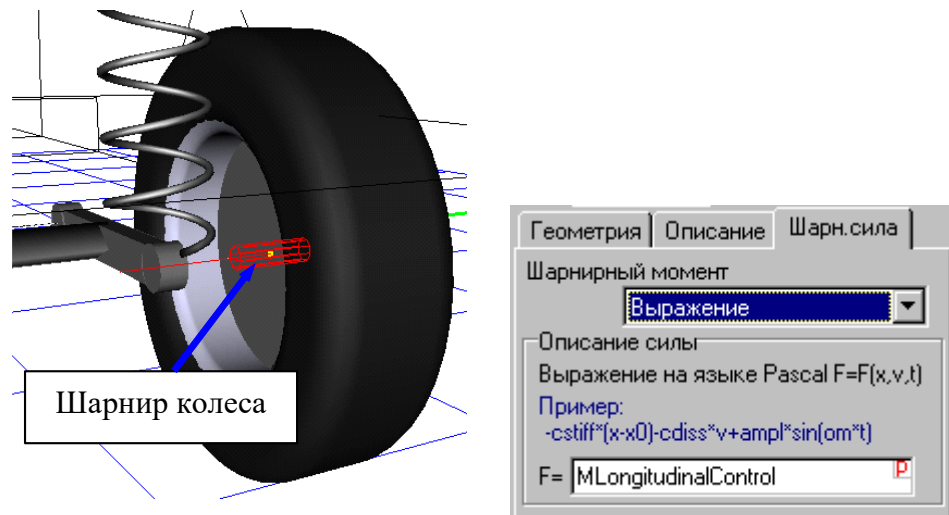


Рис. 1.91. Шарнирный момент

1.7.9. Блокировка вращения колес

Некоторые результаты моделирования доступны только для неподвижного экипажа. Это, например, расчет собственных частот и форм колебаний, вычисление передаточного отношения между рулевым колесом и управляемыми колесами, тесты с гармоническим нагружением вертикальной или поперечной силой и другие тесты.

Поэтому в модель необходимо ввести упруго-диссипативный момент блокирования вращения колес. Предусмотреть такую блокировку нужно как минимум на одной паре колес каждого экипажа. Для четырехколесных автомобилей рекомендуется предусматривать блокировку неуправляемых колес, а управляемые оставлять свободными.

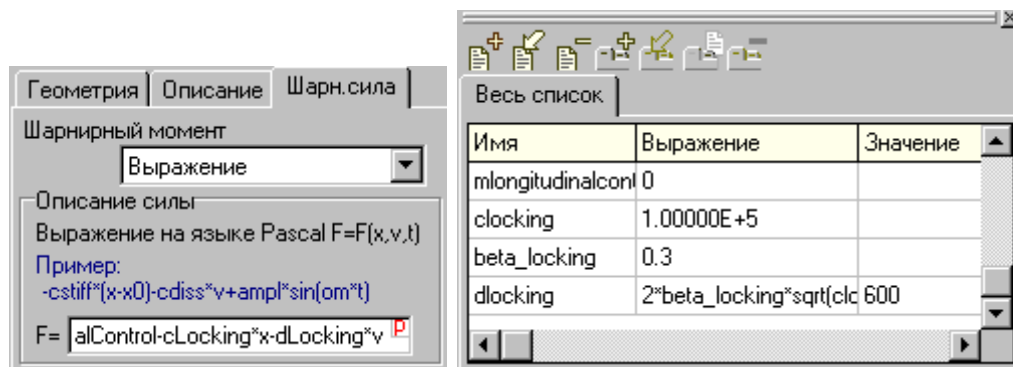


Рис. 1.92. Блокирование вращения колес

Для блокировки колес нужно ввести с модель следующий упруго-диссипативный момент:

$$-cLocking * x - dLocking * v,$$

где $cLocking$ и $dLocking$ – параметры жесткости и демпфирования при блокировании колес (приведены значения по умолчанию идентификаторов). В случае классической компоновки легкового автомобиля, когда задние колеса являются ведущими и неуправляемыми, во вращательный шарнир, связывающий колесо с кузовом, момент для управления

скоростью продольного движения и момент для блокировки колес вводятся параллельно, так, как показано ниже и на рис. 1.92:

$$M_{longitudinalControl} - c_{Locking} * x - d_{Locking} * v.$$

Для того чтобы задавать обоснованный коэффициент диссипации рекомендуется выразить его через долю демпфирования от критического. Для этого введем еще один независимый идентификатор – долю демпфирования от критического, назовем его $\beta_{locking}$. Тогда коэффициент диссипации будет выражаться (см. рис. 1.92) как

$$d_{Locking} = 2 * \beta_{locking} * \sqrt{c_{locking} * I_{wheelY}},$$

где I_{wheelY} – момент инерции колес относительно их оси вращения.

Рекомендуемые значения для коэффициента жесткости и доли демпфирования от критического составляют $c_{Locking} = 1.0 \times 10^5$ Нм/рад, $\beta_{locking} = 0.3$.

1.8. Моделирование трансмиссии

Для моделирования трансмиссии требуется модуль **UM Driveline**. Для того, чтобы проверить наличие этого модуля в текущей конфигурации UM, используйте команду меню **Помощь | О программе**, рис. 1.93. Обычно трансмиссия моделируется в виде набора абсолютно твердых тел, имеющих одну вращательную степень свободы, связанных специальными силовыми элементами. Подробное описание силовых элементов можно найти в руководстве пользователя, [Глава 22](#), файл 22_UM_Driveline.pdf.

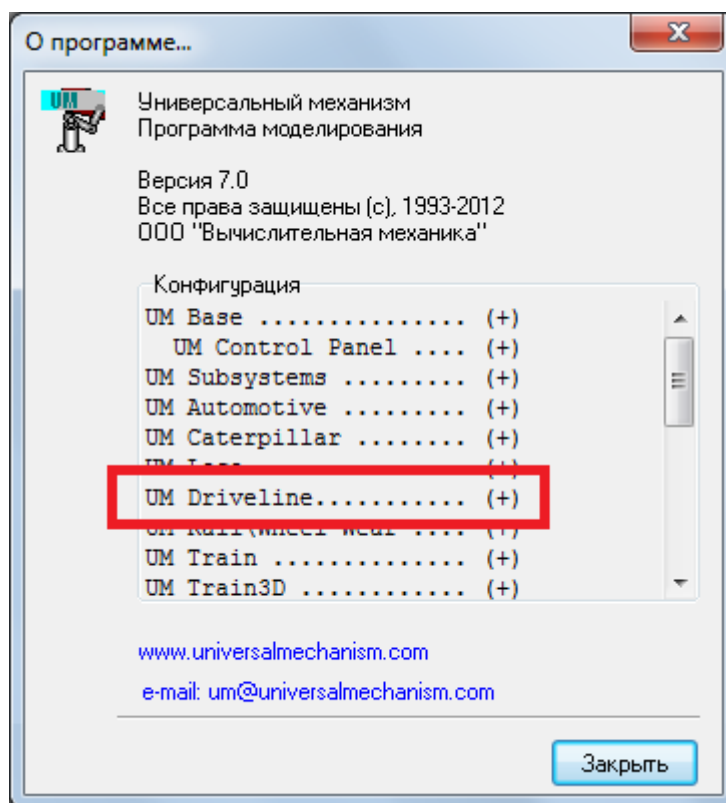


Рис. 1.93. Проверка конфигурации UM

Модель трансмиссии автомобиля в UM, как правил, включает следующие элементы:

- двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- сцепление (механическая коробка передач);
- гидротрансформатор (автоматическая коробка передач);
- коробка передач;
- дифференциал
- тормозная система;
- ABS.

Часть из этих элементов должна описываться силовыми элементами при создании модели автомобиля в программе ввода (сцепление, гидротрансформатор, коробка передач, дифференциал и т.д.). Параметры ДВС, ABS, коробки передач, системы торможения задаются в программе моделирования на соответствующих вкладках инспектора моделирования, рис. 1.94.

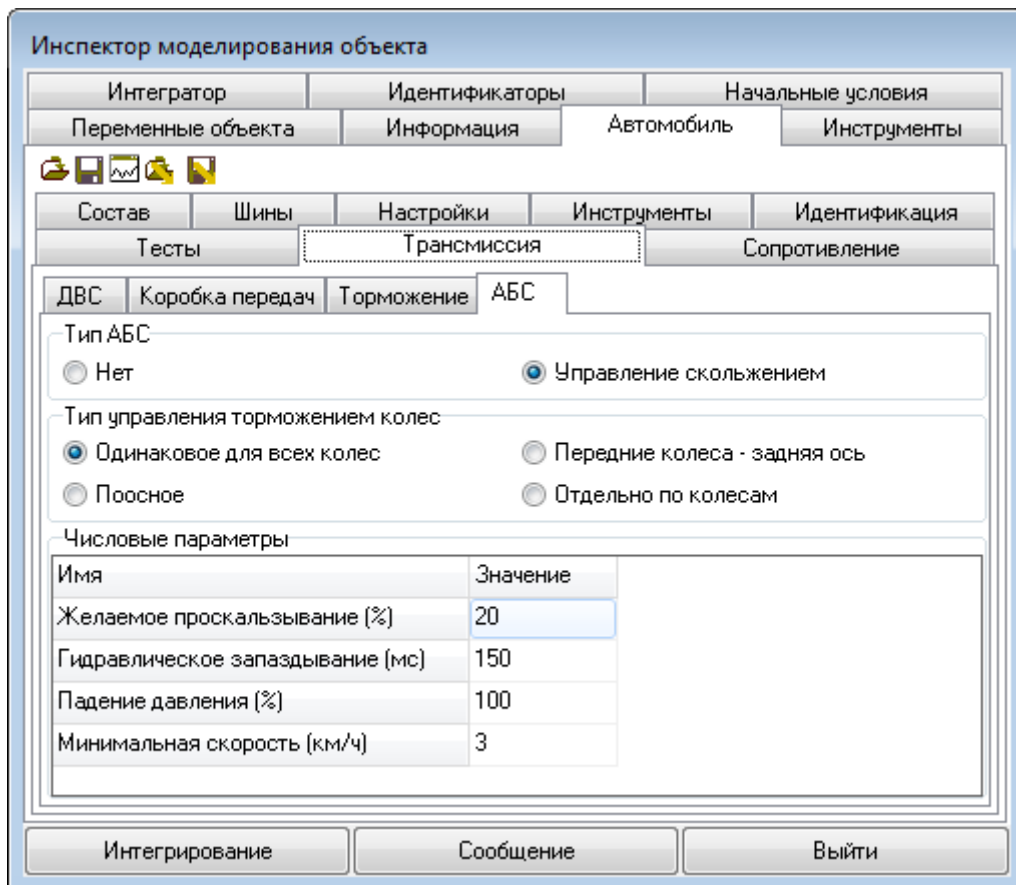


Рис. 1.94. Вкладки параметров элементов трансмиссии автомобиля

1.8.1. Описание элементов трансмиссии при создании модели автомобиля

Здесь мы рассмотрим, каким образом моделируются основные элементы трансмиссии автомобиля в программе ввода.

1.8.1.1. Двигатель внутреннего сгорания

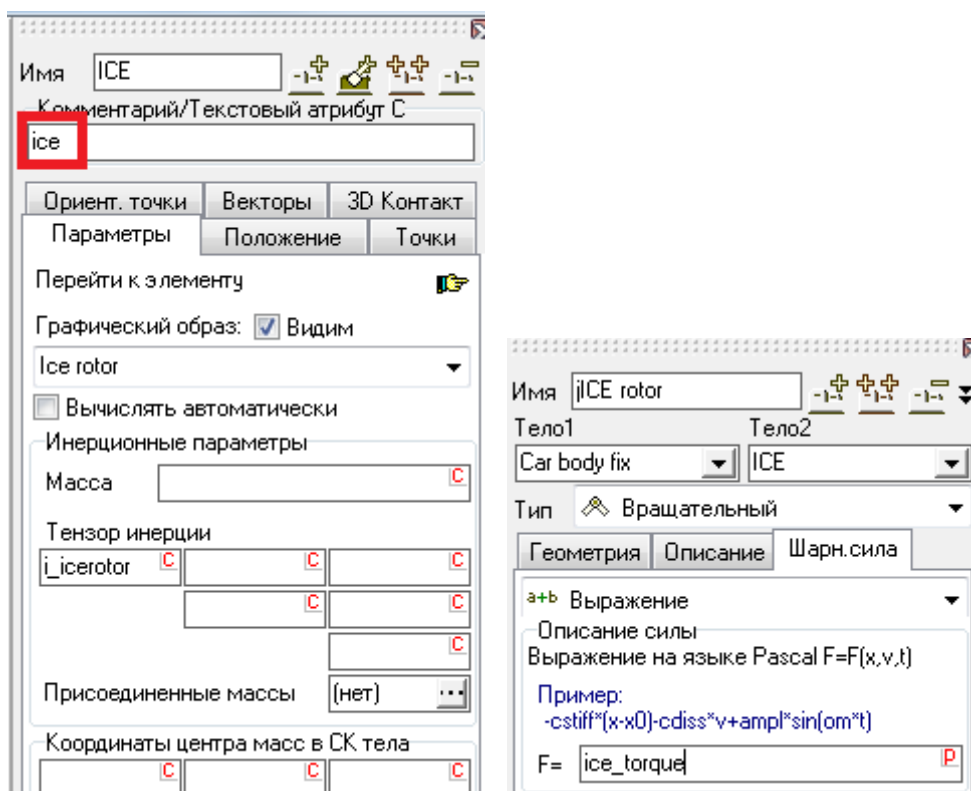


Рис. 1.95. Пример тела, моделирующего коленчатый вал, и соответствующего вращательного шарнира

Следует создать следующие элементы, рис. 1.95.

Тело, которое моделирует коленчатый вал. В качестве момента инерции относительно оси вращения следует задать момент инерции ДВС, приведенный к коленчатому валу (среднее значение момента инерции движущихся частей ДВС). Тело должно быть помечено текстовым атрибутом C "ice" рис. 1.95.

Вращательный шарнир, задающий соответствующую степень свободы коленчатому валу, а также вводящий движущий момент, действующий на коленчатый вал – выходной момент ДВС. Для этого следует задать шарнирную силу типа Выражение и ввести идентификатор момента. Рекомендуется использовать стандартный идентификатор ice_torque, рис. 1.95.

1.8.1.2. Сцепление

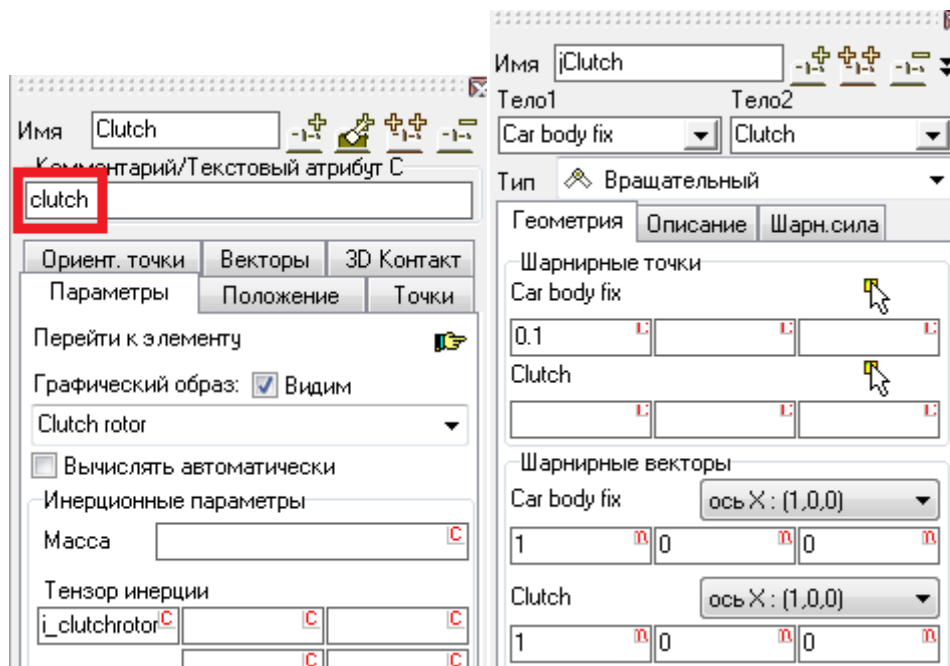


Рис. 1.96. Пример тела, моделирующего ведомый диск сцепления, и соответствующего вращательного шарнира

Фрикционное сцепление в упрощенном виде моделируется одним телом (ведомый диск сцепления) с назначенным ему вращательным шарниром и силовым элементом, задающим трение между ведущим диском, соединенным с коленчатым валом, и ведомым диском. Следует создать следующие элементы, рис. 1.96, рис. 1.97.

- Тело **Ведомый диск** должно быть помечено текстовым атрибутом C "clutch" рис. 1.96.
- **Вращательный шарнир**, задающий соответствующую степень свободы ведомому диску сцепления относительно кузова автомобиля. Не рекомендуется задавать вращение ведомого диска относительно коленчатого вала.

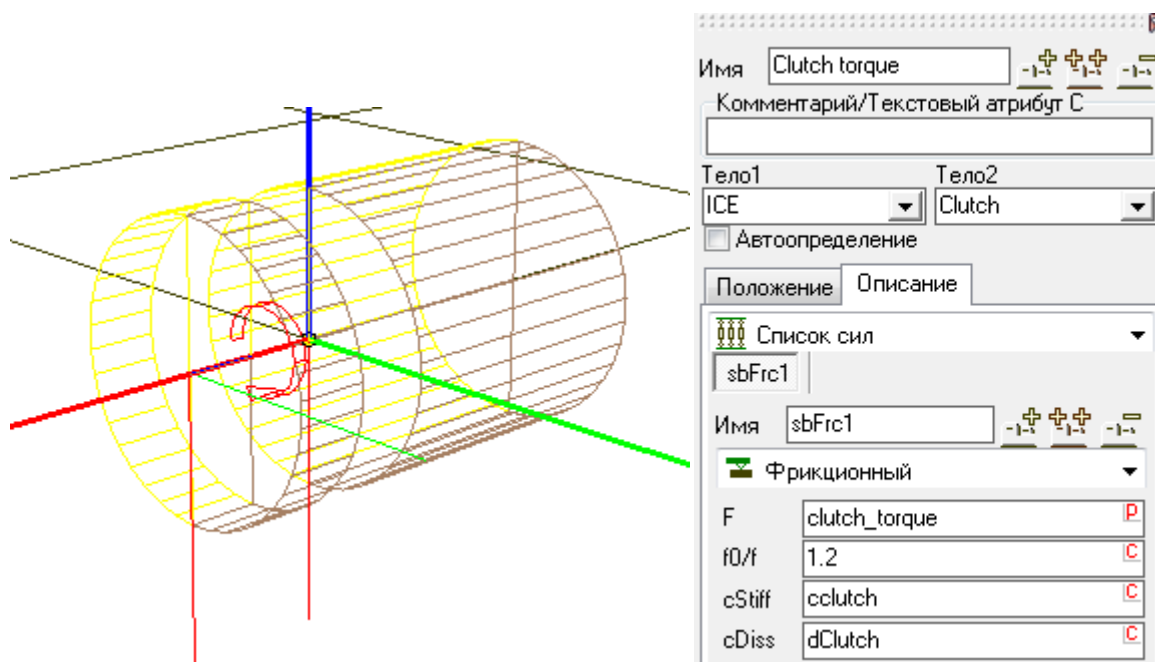


Рис. 1.97. Пример скалярного момента, моделирующего фрикционное сцепление между коленчатым валом и ведомым диском

Скалярный момент, моделирующий фрикционное сцепление между коленчатым валом и ведомым диском. Следует аккуратно задать ориентацию локальных СК силового элемента таким образом, чтобы их оси Z были ориентированы вдоль осей вращения тел (см. [Главу 2](#) руководства пользователя, п. Скалярный момент). Выберите тип момента Фрикционный и задайте величину момента с помощью идентификатора; рекомендуется использовать стандартный идентификатор `clutch_torque`, рис. 1.97.

1.8.1.3. Коробка передач. Главная передача

Для упрощенного моделирования коробки передач и главной передачи рекомендуется использовать *механическую передачу вращения* между парой тел, см. [Главу 22](#) руководства пользователя, раздел *Механическая передача вращения*, файл `22_UM_Driveline.pdf`. Коробку передач и главную передачу удобно объединить в один силовой элемент. В случае моделирования механической коробки передач этот элемент передает вращение напрямую от ведомого вала сцепления на корпус дифференциала. Инерционные параметры промежуточных элементов при этом следует разнести на оставшиеся два тела. При раздельном моделировании коробки передач и главной передачи следует ввести промежуточное тело – выходной вал коробки передач.

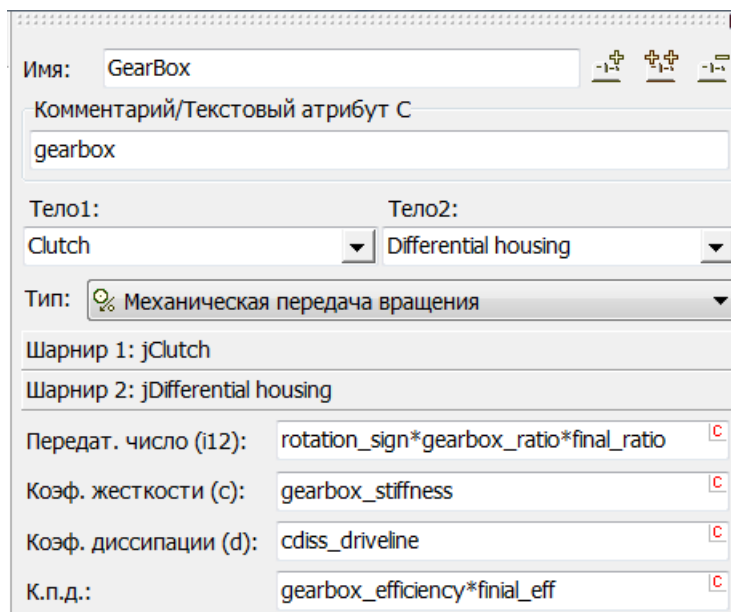


Рис. 1.98. Пример объединенной модели коробки передач и главной передачи

Рассмотрим пример объединенной модели коробки передач и главной передачи.

Для моделирования используется специальная сила типа *Механическая передача вращения*. Параметры элемента принимают следующие значения:

- передаточное число i_{12} :

$$rotation_sign * gearbox_ratio * final_ratio$$

Здесь использованы три идентификатора:

$rotation_sign$ – вспомогательный идентификатор, значение которого равно +1, если колеса вращаются в правильную сторону, и -1, если необходимо изменить направление вращения на противоположное;

$gearbox_ratio$ – идентификатор, выполняющий обязательную параметризацию передаточного числа коробки передач; здесь использовано рекомендуемое имя идентификатора;



$final_ratio$ – передаточное число главной передачи; вместо идентификатора можно использовать численное значение, если его не предполагается изменять в дальнейшем;

- коэффициенты жесткости и диссипации передачи;
- коэффициент полезного действия, характеризующий потерю мощности в трансмиссии; в приведенном примере к.п.д. равен произведению к.п.д. коробки передач $gearbox_efficiency$ (рекомендуемый идентификатор) и к.п.д. главной передачи.

1.9. Моделирование динамики автомобилей

Данный раздел целиком касается особенностей моделирования динамики автомобилей в программе **UM Simulation**. Общая информация о работе в программе моделирования **UM Simulation** изложена в [Главе 4](#) руководства пользователя.

1.9.1. Подготовка к моделированию

Большая часть настроек для моделирования динамики автомобиля выполняется с помощью **Инспектора моделирования объекта**, рис. 1.99. Для открытия инспектора моделирования выберите пункт меню **Анализ | Моделирование...** Данные, введенные на вкладке **Автомобиль** можно сохранить в конфигурационный файл *.car и загрузить данные из него. Для этого используйте кнопки  и  в верхней части вкладки, рис. 1.99.

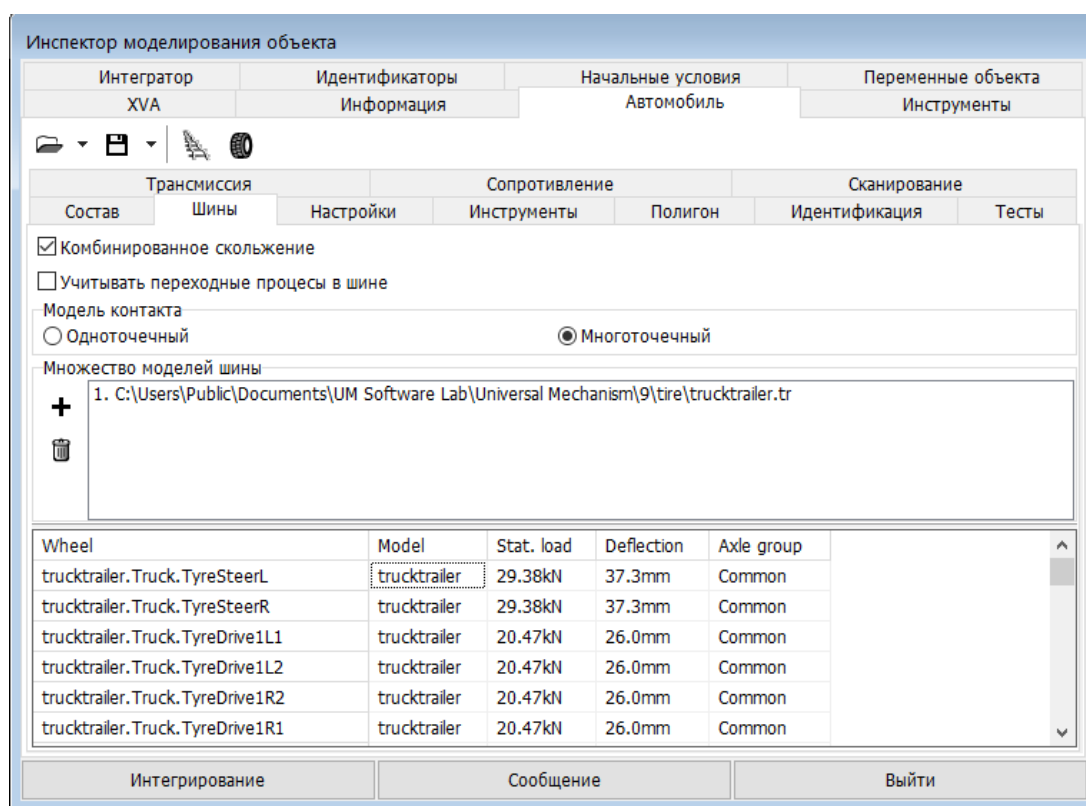


Рис. 1.99. Инспектор моделирования объекта. Вкладка «Автомобиль»

Кроме того, можно использовать автоматическое сохранение настроек в файл last.car. Для этого нужно включить флажок **Конфигурация автомобиля** на закладке **Автосохранение** в окне настроек программы, которое доступно через меню **Инструменты | Настройки**.

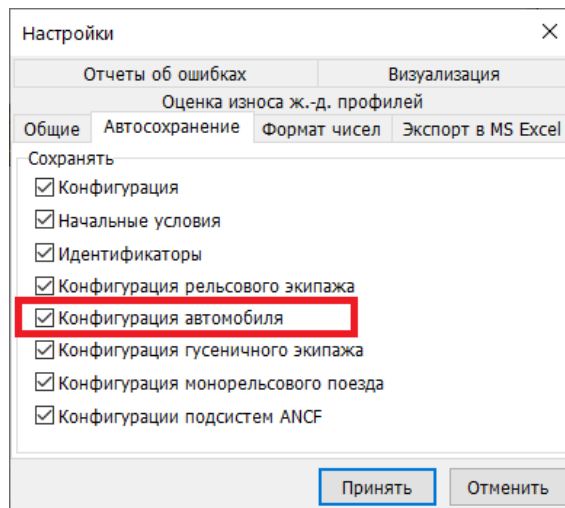


Рис. 1.100. Автоматическое сохранение настроек в программе моделирования

1.9.1.1. Многомодульные автомобили

УМ позволяет исследовать многомодульные модели автомобилей – автопоезда. Первый модуль должен быть автомобиль/тягач с рулевым управлением, остальные модули – прицепы или полуприцепы, см. рис. 1.101, рис. 1.102. Для моделирования многомодульных автомобилей требуется предварительно указать, какие тела принадлежат каждому модулю.

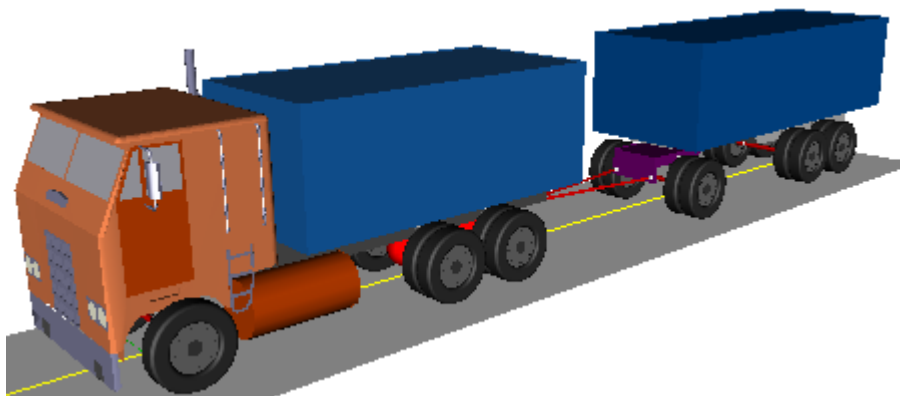


Рис. 1.101. Двухмодульный экипаж: грузовик с прицепом



Рис. 1.102. Трехмодульный экипаж: грузовик с двумя полуприцепами

Для описания структуры в случае многомодульного экипажа перейдите на закладку **Автомобиль/Состав в Инспекторе моделирования объекта**, см. рис. 1.103. На этом рисунке приведен пример описания грузовика с прицепом с рис. 1.101.

Для каждого модуля необходимо выбрать тело, которое является кузовом или его аналогом. По этому телу будет осуществляться контроль скорости продольного движения. Затем с списке тел необходимо выбрать тела, входящие в конкретный модуль и нажать кнопку **Принять** для сохранения изменений, см. рис. 1.103.

Для добавления/удаления модулей используйте кнопки **+** и **🗑**.

Замечание 1. В качестве кузова автоматически выбирается тело с наибольшей массой.

При необходимости в поле **Кузов** выберите другое тело.

Замечание 2. Для того, чтобы добавить тело в текущий модуль необходимо включить флажок, соответствующий этому телу. Флажок можно включить при помощи мыши или с клавиатуры. При работе с клавиатурой снять/установить флажок можно с помощью клавиш *Пробел* и *Enter*.

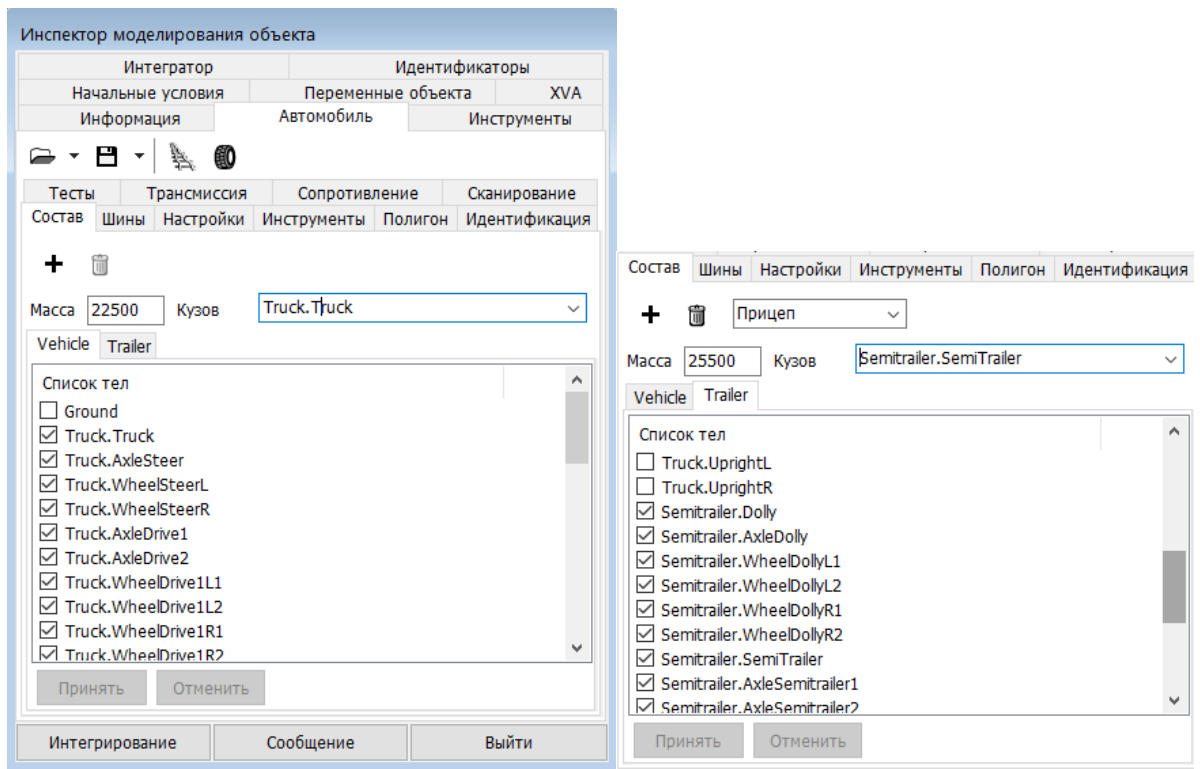


Рис. 1.103. Идентификация многомодульного транспортного средства

1.9.1.2. Идентификация подсистем автомобиля

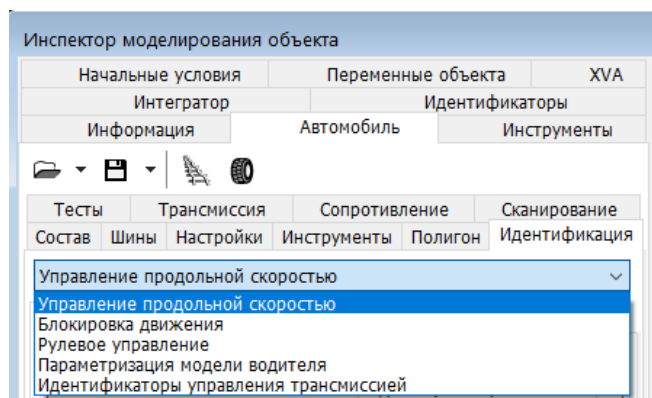


Рис. 1.104. Список подсистем автомобиля для идентификации

Перед началом моделирования движения автомобиля следует выполнить идентификацию его подсистем, список которых представлен на рис. 1.104. Идентификация означает задание численных значений параметров, соответствующих данной модели автомобиля, а также назначение идентификаторов, параметризующих модели силовых элементов.

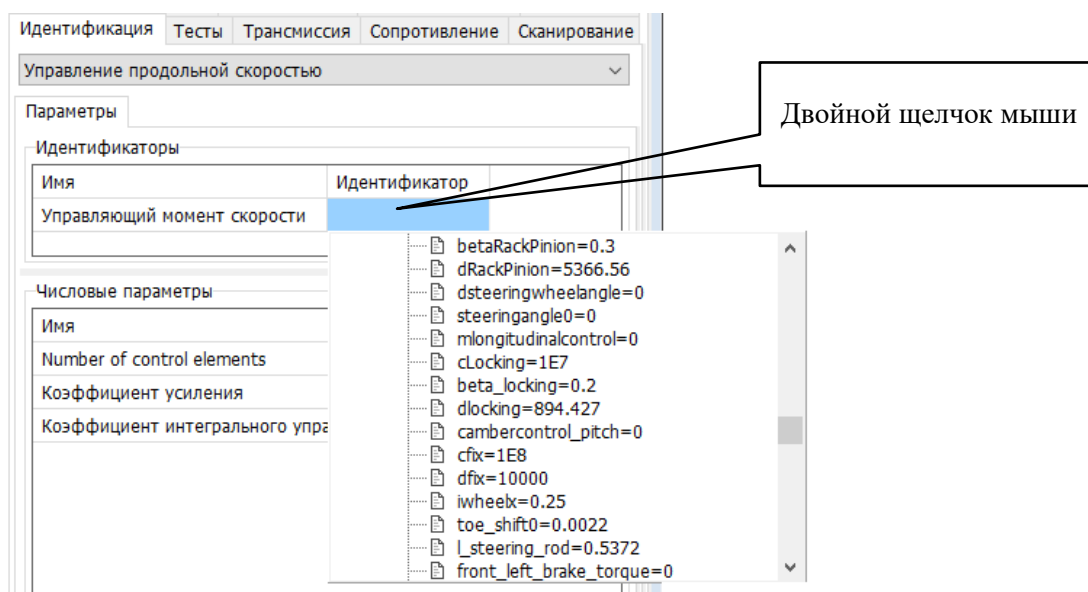


Рис. 1.105. Назначение идентификатора

Для назначения идентификатора следует дважды щелкнуть мышью на поле таблицы и выбрать идентификатор из появившегося списка, рис. 1.105.

[Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью](#)

[Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес](#)

[Идентификация рулевого управления](#)

[Параметризация модели водителя](#)

[Идентификаторы управления трансмиссией](#)

1.9.1.2.1. Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью

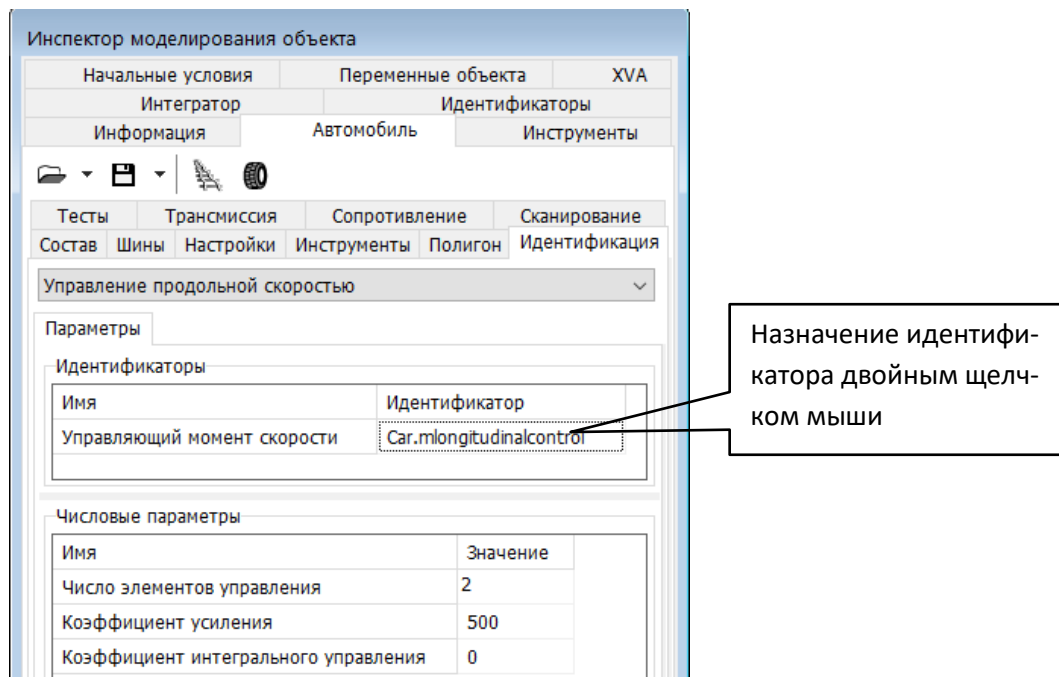


Рис. 1.106. Идентификация управления скоростью продольного движения

Данные параметры используются при упрощенном способе управления продольной скоростью автомобиля, см. п. 1.9.3.1 “Скоростные режимы при упрощенном управлении скоростью”. Идентификация системы управления продольной скоростью в этом случае подразумевает выбор одного параметра и трех численных констант (см. п. 1.7.8. “Силовой элемент для упрощенного управления скоростью продольного движения”, с. 1-87 и рис. 1.106).

Идентификатор:

- Управляющий момент скорости – следует задать идентификатор, параметризующий управляющий момент. Имя по умолчанию: `mlongitudinalcontrol`. Численное значение идентификатора рассчитывается программой в процессе моделирования движения автомобиля.

Замечание. Задание имени идентификатора момента значением по умолчанию позволяет автоматизировать идентификации параметров.

Для выбора идентификатора для управляющего момента скорости дважды щелкните мышкой в соответствующей строке списка. Идентификатор может быть выбран как из списка головного объекта, так и из любой подсистемы. Если модель содержит в подсистемах несколько идентификаторов с тем же именем, их численное значение будет установлено программой равным значению назначенного идентификатора.

Числовые параметры:

- Число элементов управления N : число силовых элементов в модели, в описание которых входит идентификатор управляющего момента (на рисунке это `m longitudinalcontrol`). Например, это число тяговых колес.
- Коэффициент усиления K – коэффициент при пропорциональном члене регулятора скорости.
- Коэффициент интегрального управления K_I – коэффициент при интегральном члене регулятора скорости.

Значение численных параметров задаются напрямую с клавиатуры.

1.9.1.2.2. Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес

Идентификация блокировки вращения колес подразумевает выбор двух идентификаторов модели (см. п. 1.7.9. "Блокировка вращения колес", с. 1-88 и рис. 1.107):

- коэффициента жесткости блокирования (Нм/рад);
- доли демпфирования от критического.

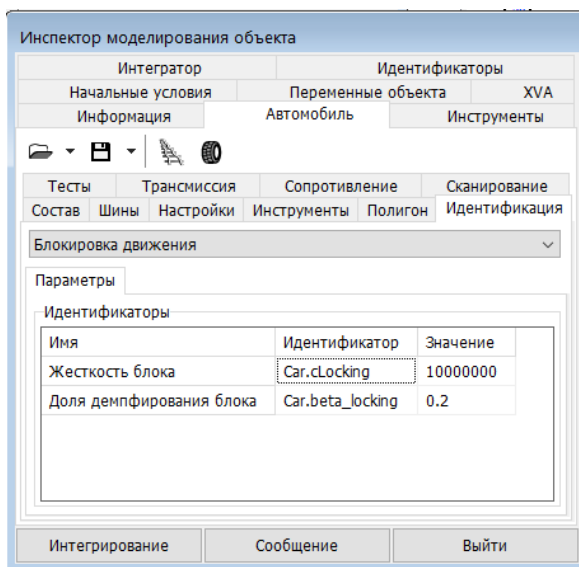


Рис. 1.107. Идентификация блокировки вращения колес

После назначения идентификаторов следует задать их численные значения.

Блокировка колес используется в линейном анализе (рис. 1.108) и статических тестах. В тестах, где предусмотрено движение автомобиля, программа назначает этим идентификаторам нулевые значения автоматически.

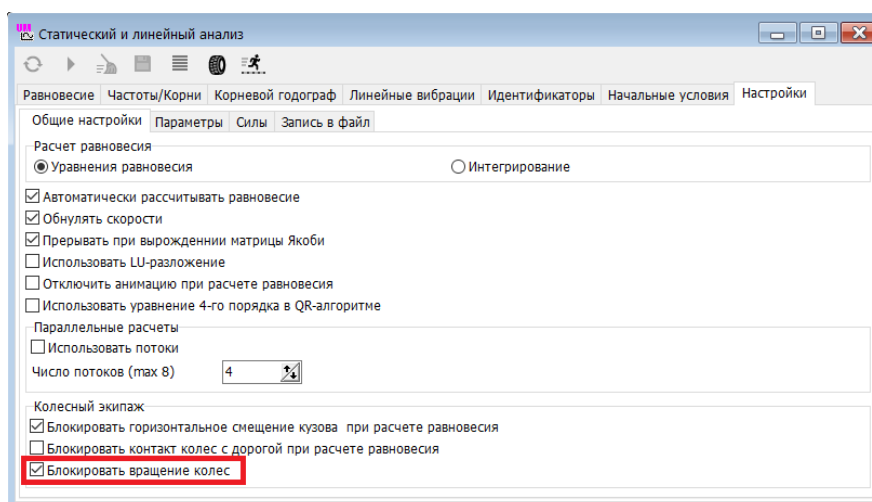


Рис. 1.108. Признак блокировки колес в линейном и статическом анализе

Замечание. Задание идентификаторов значениями по умолчанию позволяет автоматизировать идентификации параметров.

1.9.1.2.3. Идентификация рулевого управления

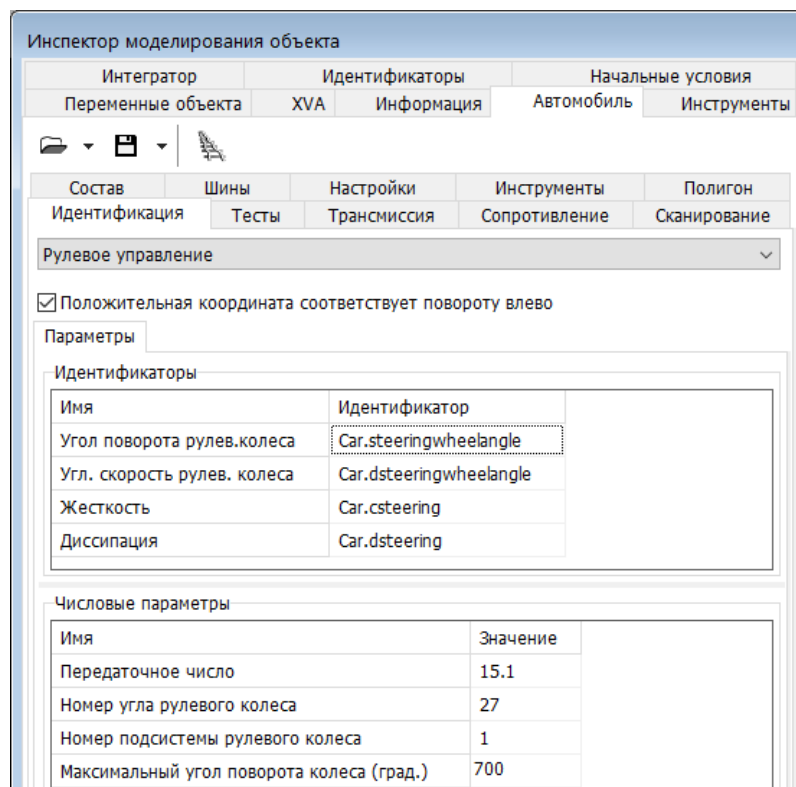


Рис. 1.109. Идентификация системы рулевого управления

Идентификация системы рулевого управления подразумевает выбор четырех Идентификаторов (см. п. 1.7.7. "Рулевое управление", с. 1-6 и рис. 1.109):

- угла поворота рулевого колеса;
- угловой скорости поворота рулевого колес;
- коэффициента жесткости рулевого управления;
- коэффициента диссипации рулевого управления.

Замечание. Задание идентификаторов значениями по умолчанию позволяет автоматизировать идентификации параметров управления.

Следует также задать четыре численные константы:

- передаточного числа рулевого управления;
- номер координаты, и номер подсистемы, соответствующие углу поворота рулевого колеса;
- максимальный угол поворота рулевого колеса.

Передаточное число – это отношение угла поворота в шарнире, в котором вводится управление, к углу поворота колес. В случае, когда модель автомобиля не содержит рулевого управления и поворот колес осуществляется непосредственно в шарнире между колесом и ступицей или мостом, *передаточное число* равно 1. В случае, когда модель автомобиля включает, в том числе и систему рулевого управления, определить данное передаточное число довольно трудоемко. В этом случае для автоматического определения передаточного числа используйте тест *Поворот рулевого колеса на месте*, п. 1.9.4.5.

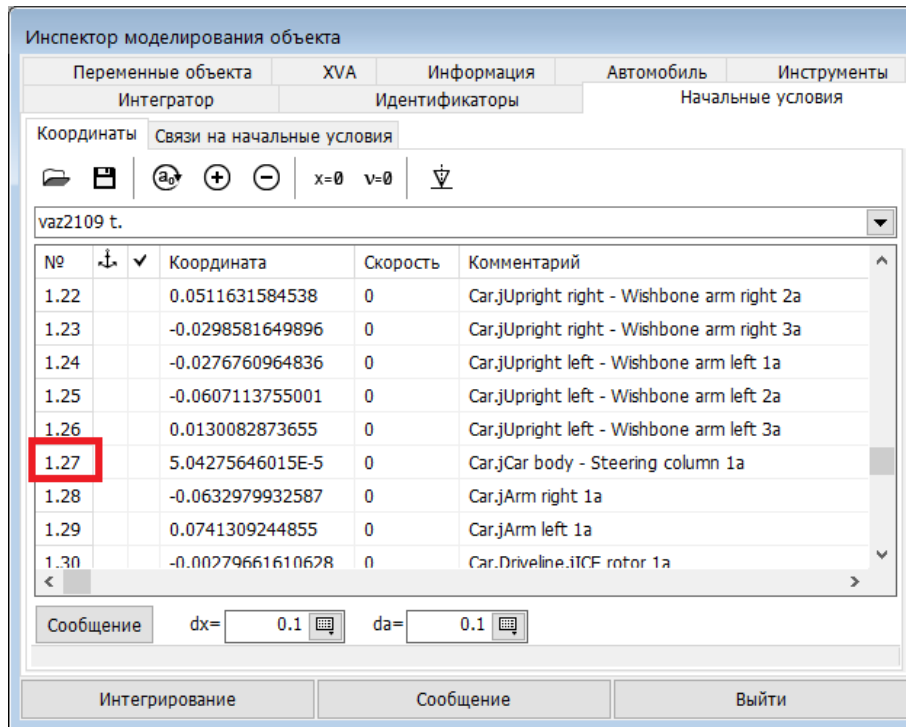


Рис. 1.110. Идентификация номера координаты и подсистемы для рулевого управления

Номер угла рулевого колеса – это индекс координаты в шарнире, отвечающем за поворот системы рулевого управления, например, номер координаты во вращательном шарнире между рулевой колонкой и кузовом (рис. 1.110) или в шарнире между ступицей управляемого колеса и мостом/стойкой в случае, когда система рулевого управления непосредственно не введена в модель.

Первое число в индексе координаты соответствует *номеру подсистемы*. Если модель не использует внешние подсистемы, то это число всегда равно 1.

Эти данные позволяют программе получить доступ к текущему значению координаты поворота руля и используется в тестах 1.9.4.7. «Тест с водителем» (переменная) и 1.9.4.8.1 «Общая информация о тесте «тренажер» (положение трекбара **Руль** при выключенном рулевом управлении)

Максимальный угол поворота колеса – вводит ограничение на рассчитываемое программой управление. Если расчетное значение угла поворота больше этого числа, углу присваивается данное значение.

Замечание. Для автоматического определения передаточного числа используйте тест *Поворот рулевого колеса на месте*, п. 1.9.4.5. "*Поворот рулевого колеса на месте*", с. 1-160.

1.9.1.2.4. Параметризация модели водителя

Назначение идентификаторов для параметров модели водителя используется в линейном анализе для оценки влияния каждого из этих параметров на управление, см. п. 1.10.2 «Анализ влияния параметров модели водителя», а также в многовариантных расчетах при анализе влияния параметров модели управление на движение автомобиля в криволинейных участках дороги, п. 1.4.4 «Подбор параметров непрерывного управления».

Коэффициенты управления

$$T_p, t_d, K, K_2, K_d, K_I$$

входят в модель непрерывного рулевого управления (1.6). В программе ввода к модели автомобиля следует добавить идентификаторы, соответствующие коэффициентам управления (рис. 1.111, слева), и назначить эти идентификаторы в программе моделирования (рис. 1.111, справа).

Нет никаких специальных ограничений на имена идентификаторов.

Для назначения идентификаторов в программе моделирования следует

- перейти на вкладку **Автомобиль | Идентификация инспектора** моделирования,
- выбрать тип данных **Параметризация модели водителя**,
- щелкнуть правой кнопкой мыши (или дважды щелкнуть) в поле второго столбца таблицы и выбрать идентификатор в появившемся списке.

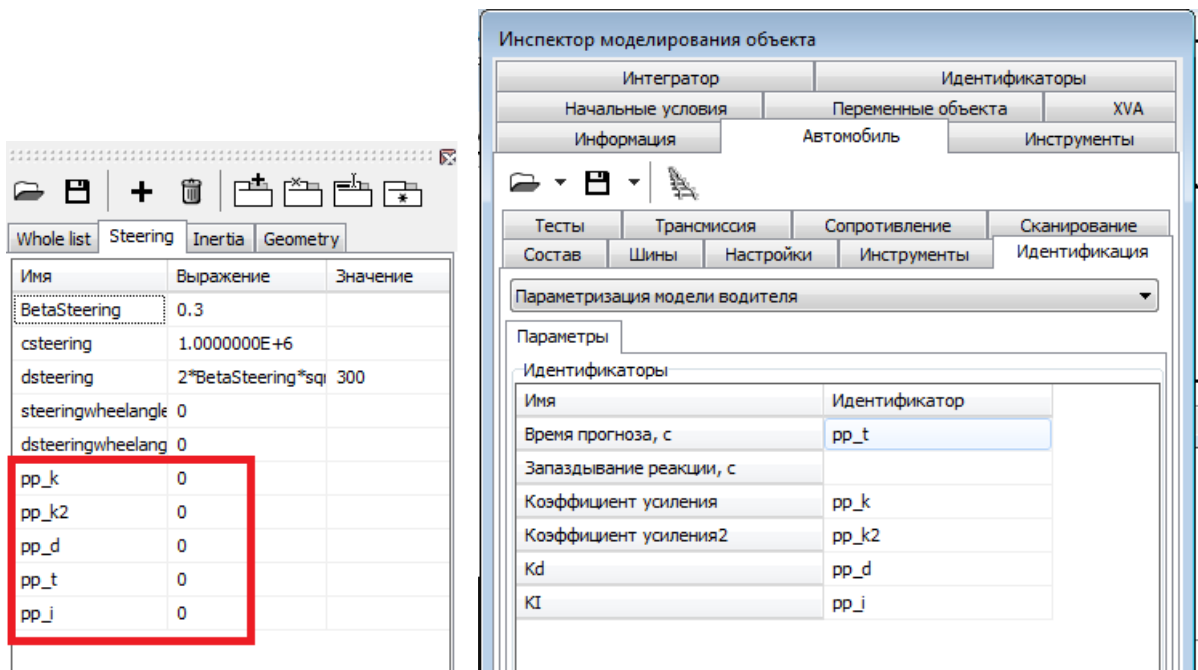
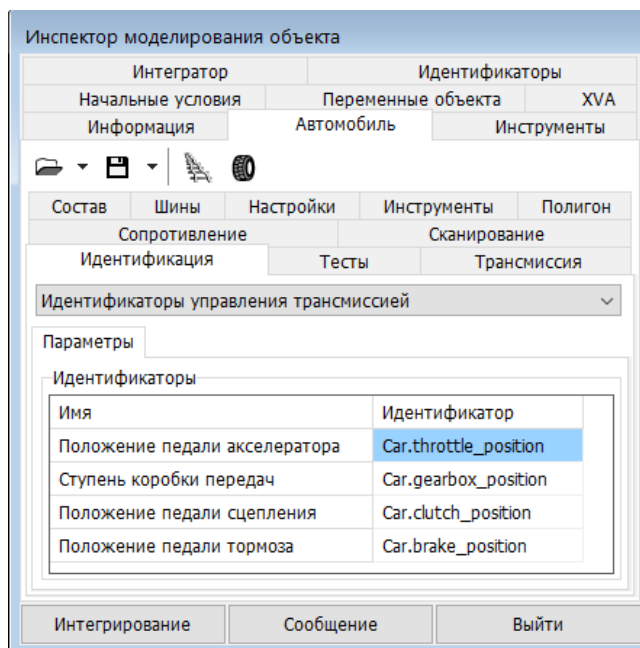


Рис. 1.111. Идентификаторы в программе ввода и их назначение параметрам модели водителя в программе моделирования

1.9.1.2.5. Идентификаторы управления трансмиссией



На данной вкладке назначаются идентификаторы, параметризующие управление трансмиссией. Данное назначение имеет смысл только в случае включения в модель автомобиля трансмиссии (двигатель, коробка передач, сцепление и т.д.), см. п. 1.8. *Моделирование трансмиссии*.

Описание моделирования трансмиссий в UM содержится в [Главе 22](#) руководства пользователя, файл 22_UM_Driveline.pdf. Использование идентификаторов для параметризации управления можно найти в этом файле в разделе *Управление трансмиссией с помощью идентификаторов*.

1.9.1.3. Вкладка «Инструменты» для создания файлов данных

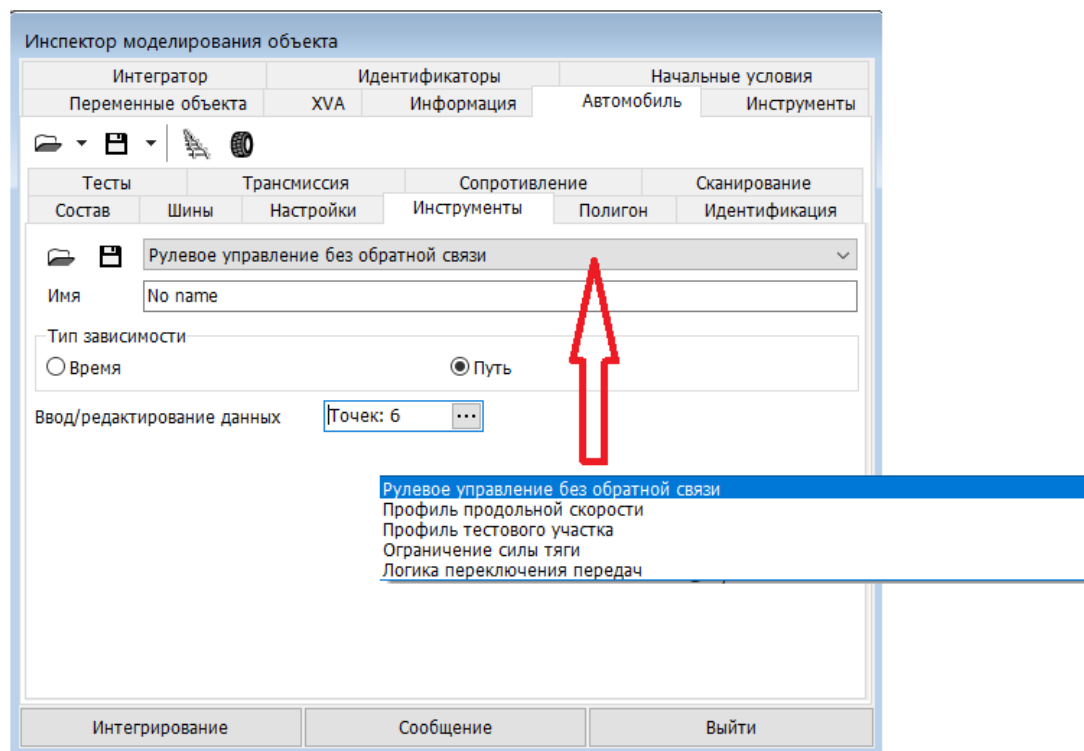




Рис. 1.112. Список типов данных

При выполнении тестов моделирования динамики автомобиля требуются данные различных типов, содержащие необходимую информацию: зависимость угла поворота рулевого колеса от времени для теста управления автомобилем без обратной связи, график зависимости скорости автомобиля от времени или от пройденного пути и т.д. данные такого типа создаются на вкладке **Автомобиль | Инструменты** инспектора, рис. 1.112.

Часть данных может вводиться в зависимости от времени или пройденного пути, например, поворот рулевого колеса или профиль продольной скорости. В этом случае следует установить **Тип зависимости**. Другие данные могут зависеть только от одной переменной, например, профиль тестового участка зависит от продольной координаты.

Для поточечного ввода данных следует перейти к редактору кривых порез кнопку .

Введенные данные сохраняются в файл с использованием кнопки . Ранее созданный файл можно открыть для модификации или просмотра по кнопке .

[Задание графиков поворота рулевого колеса и скорости движения](#)

[Создание файлов профилей тестового участка дороги](#)

[Ограничение силы тяги при упрощенном управлении скоростью](#)

[Логика переключения передач](#)

1.9.1.3.1. Задание графиков поворота рулевого колеса и скорости движения

В Инспекторе моделирования объекта перейдите на закладку Автомобиль | Инструменты.

Далее выберите один из вариантов:

- Рулевое управление без обратной связи;
- Профиль продольной скорости.

Угол поворота рулевого колеса и профиль скорости могут быть функциями как времени, так и продольной координаты, см. рис. 1.112.

Сами функции описываются графически в редакторе кривых, см. рис. 1.113.

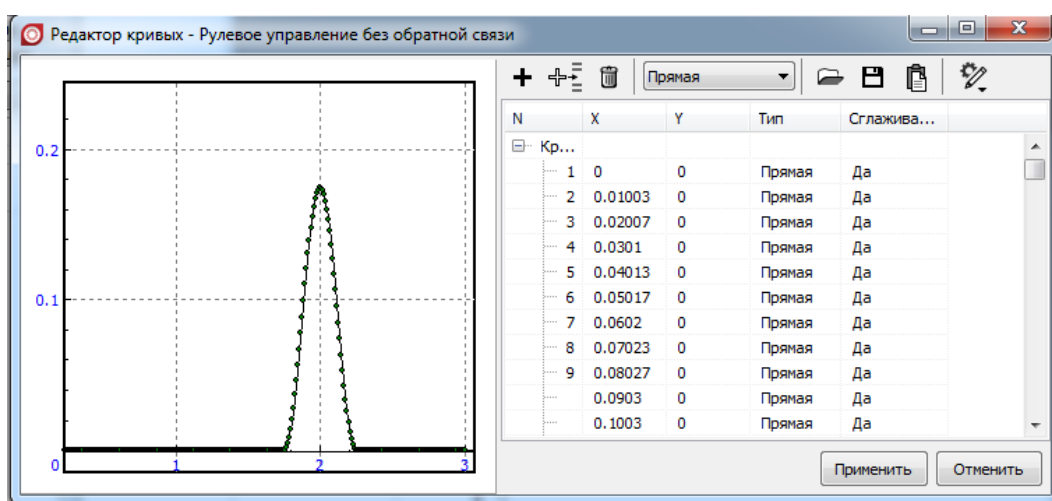


Рис. 1.113. Описание функции в редакторе кривых

Угол поворота рулевого колеса вводится в радианах. Скорость продольного движения – в метрах в секунду.

1.9.1.3.2. Создание файлов профилей тестового участка дороги

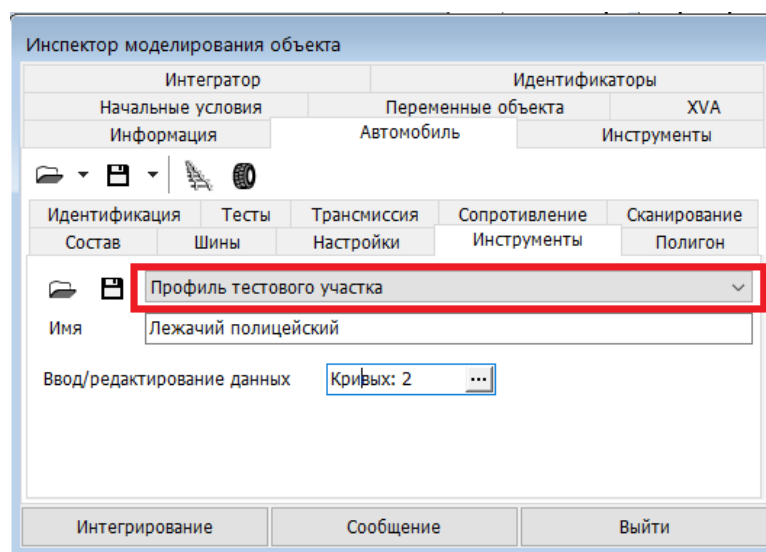



Рис. 1.114. Инструмент для создания профиля тестового участка

Общая информация о профилях тестового участка (ПТУ) содержится в п. 1.3.4. *Профиль тестового участка дороги.*

Использование файла при моделировании описано в п. 1.9.4.7.2.3. *«Использование профилей тестового участка».*

Файлы *.trp с кривыми ПТУ создаются инструментом, расположенным на вкладке **Автомобиль | Инструменты** инспектора моделирования объектов. Выберите пункт **Профиль тестового участка** выпадающего меню и нажмите на кнопку , чтобы открыть редактор кривых для описания ПТУ, рис. 1.114.

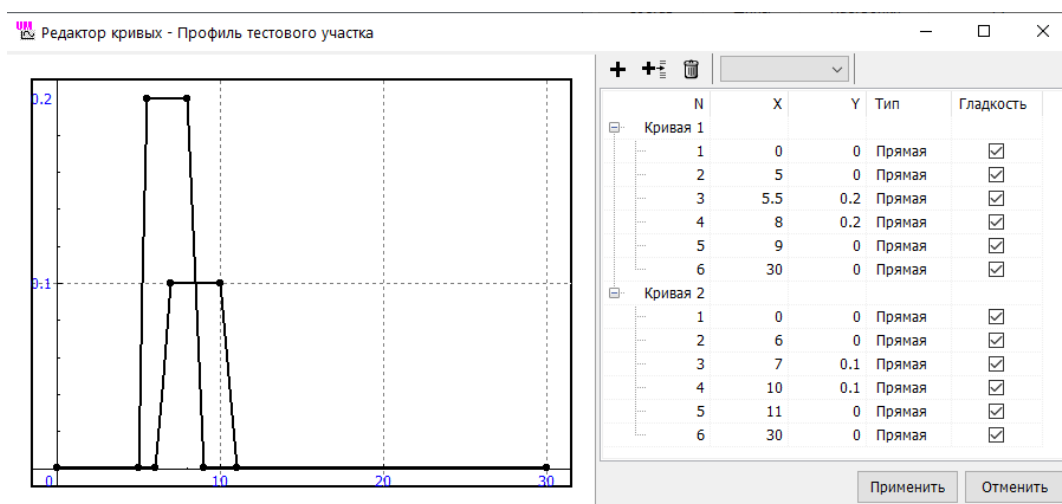


Рис. 1.115. Различные препятствия для левой и правой колеи

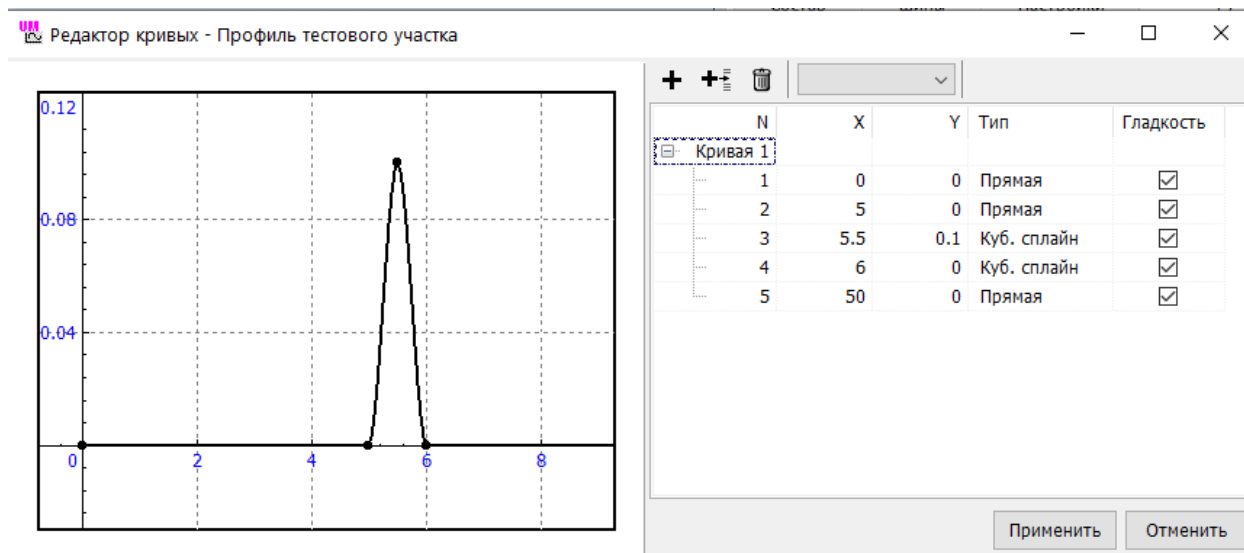


Рис. 1.116. Кривая, задающая ПТУ «лежащий полицейский»

Если профиль для левой и правой колеи разные, пользователь должен ввести две кривые, как показано на рис. 1.115. Первая кривая соответствует левой колее. Если определена только одна кривая, профиль считается идентичным для левой и правой колеи, рис. 1.116.

Используйте кнопку  на вкладке **Инструменты** чтобы сохранить кривые в файл *.trp.

1.9.1.3.3. Ограничение силы тяги при упрощенном управлении скоростью

Ограничение силы тяги представляет собой зависимость предельного суммарного момента, передаваемого на колеса, от скорости автомобиля. Ограничение используется, если реализуется упрощенный метод управления скоростью без моделирования трансмиссии, п. 1.9.3.1 «Скоростные режимы при упрощенном управлении скоростью». Кривая ограничения сохраняется в файле *.tfl. Момент задается в Нм, скорость – в м/с.

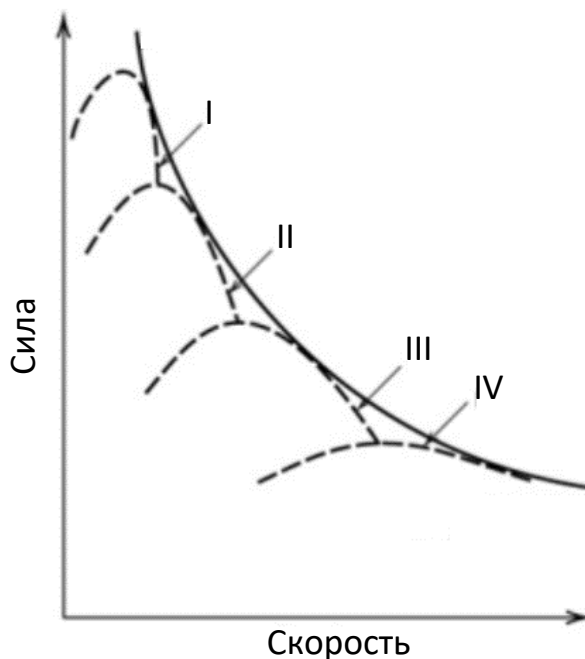


Рис. 1.117. Диаграмма сила-скорость

Для построения зависимости ограничения на величину суммарного момента на тяговых колесах M в зависимости от скорости v можно использовать типичную диаграмму сила-скорость для данного автомобиля. Для упрощенного варианта предлагается использовать кривую ограничения момента по номинальной мощности P_N

$$M < \frac{P_N r}{v}$$

где r – радиус качения. При низких скоростях следует учесть ограничение по проскальзыванию

$$M < \mu F_z r$$

Здесь F_z суммарная вертикальная сила для тяговых колес, μ – коэффициент трения.

Таким образом, ограничивающий суммарный момент на тяговых колёсах определяется формулой

$$M_{max} = \min \left\{ \frac{P_N r}{v}, \mu F_z r \right\}.$$

Рассмотрим пример: двигатель мощностью 50кВт, радиус колес 0.3м, Суммарная нагрузка на тяговые колеса 5000Н, коэффициент трения шины с дорогой 0.8. Соответствующая кривая ограничения момента представлена на рис. 1.118.

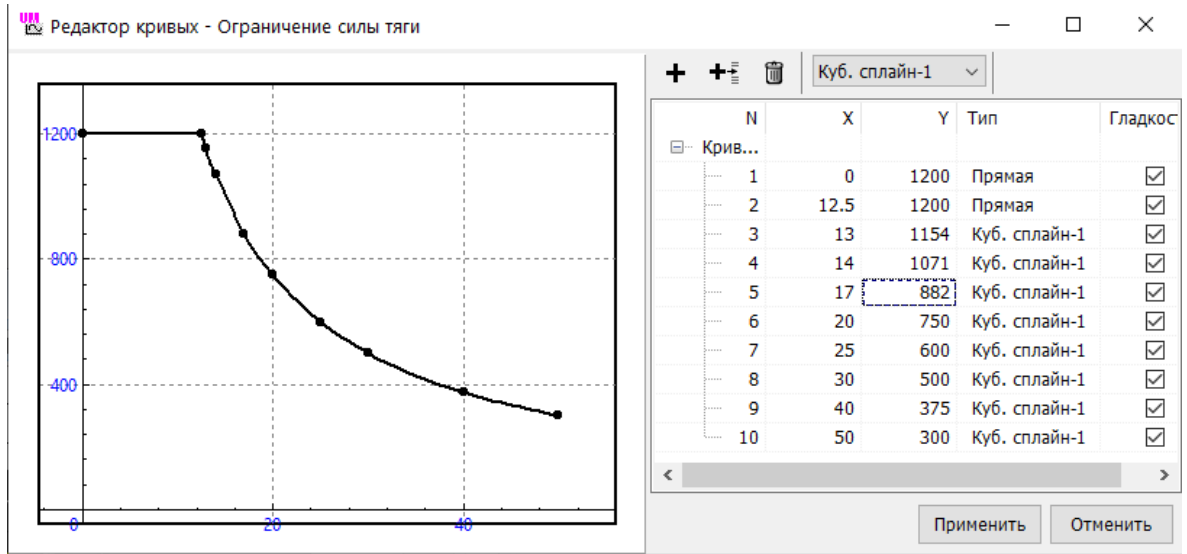


Рис. 1.118. Пример кривой ограничения момента

1.9.1.3.4. Логика переключения передач

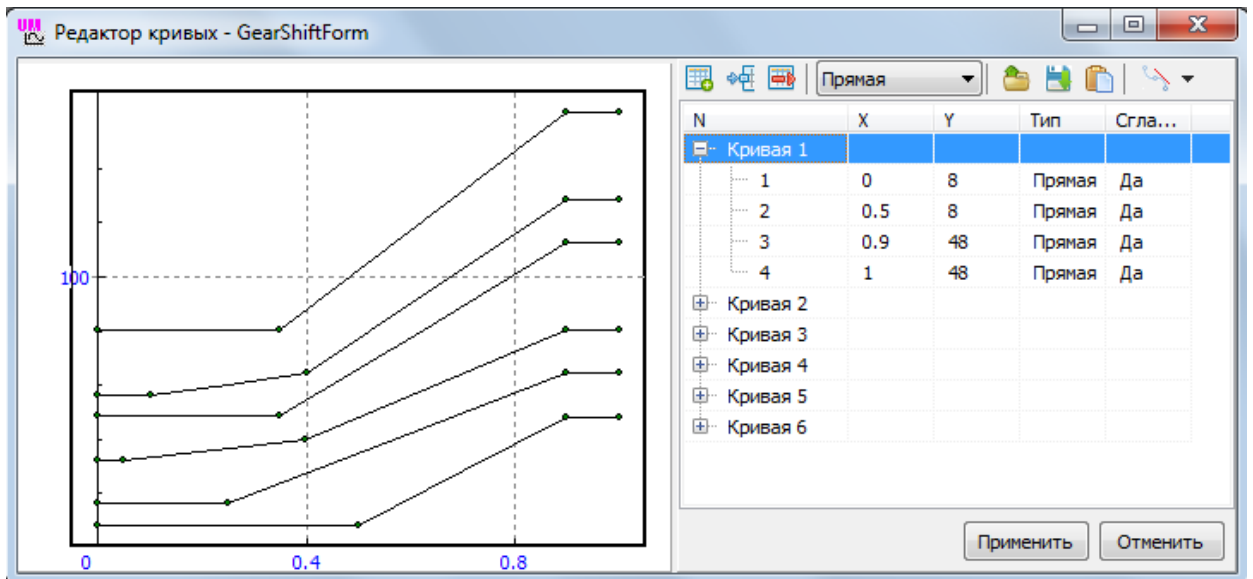


Рис. 1.119. Создание файла переключения передач в редакторе кривых

Файлы *.gss (gear shift schedule) используются для переключения передач в автоматической коробке, а также в модели автоматического управления продольным движением. Файл содержит кривые перехода на повышенную или пониженную ступени в зависимости от скорости продольного движения или угловой скорости вращения ротора двигателя и от положения педали акселератора, рис. 1.119.

Подробную информацию можно найти в [Главе 22](#), файл 22_UM_Driveline.pdf, п. *Файл с кривыми переключения передач.*

1.9.1.4. Общие настройки процесса моделирования динамики автомобиля

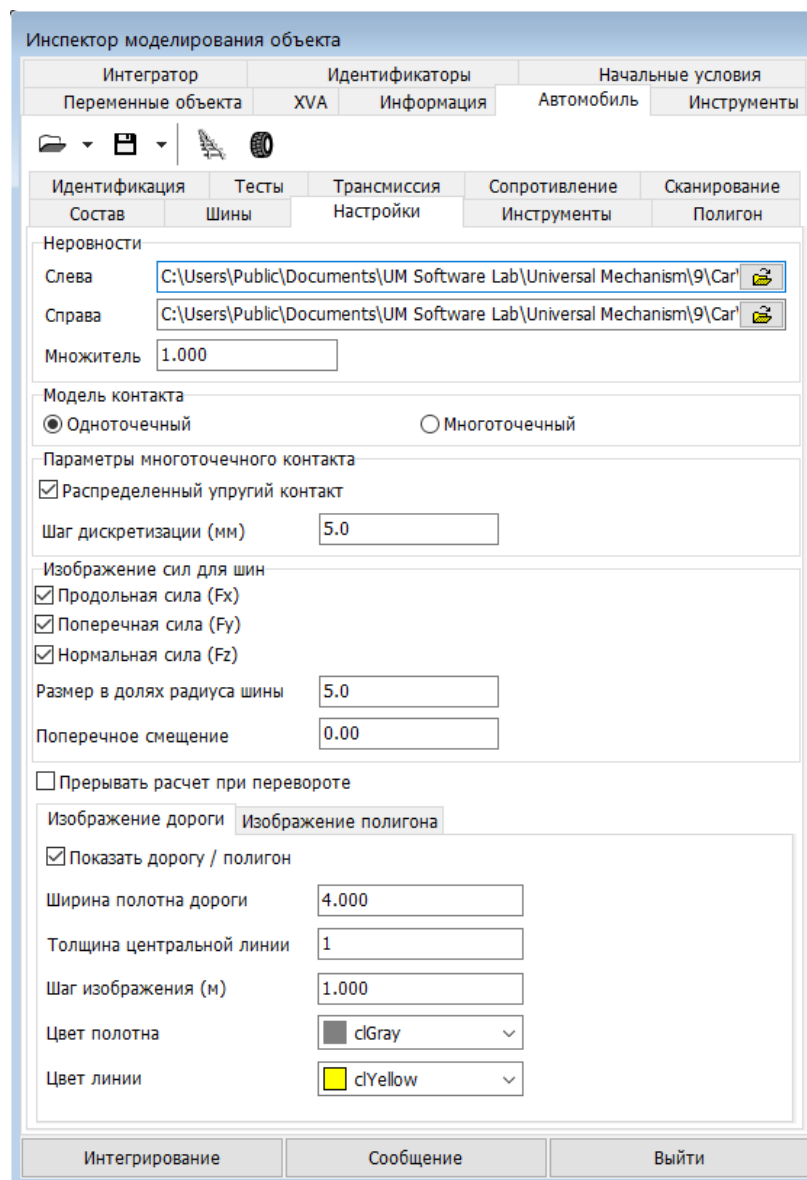



Рис. 1.120. Вкладка общих настроек моделирования автомобиля

Вкладка **Автомобиль** | **Настройки** содержит следующие разделы (рис. 1.120).

1.9.1.4.1. Задание файлов неровностей для левой и правой колес

Для выбора файла следует щелкнуть на кнопке . Создание файлов неровностей описано в разделе 1.3.3. *Микропрофиль пути*.

1.9.1.4.2. Настройка модели контакта шины с дорогой

Пользователь может установить одноточечную или многоточечную модель расчета контакта.

В случае выбора многоточечного контакта можно выбрать тип контакта: дискретный или распределенный (опция **Распределенный упругий контакт**), а также установить желаемое значение шага дискретизации, при этом следует помнить, что уменьшение шага

вместе с уточнением расчета приводит к замедлению процесса моделирования при движении по триангулированной поверхности.

Описание моделей контакта шины с дорогой находится в п. 1.5.1. *Одноточечная и многоточечная модели контакта шины с дорогой.*

1.9.1.4.3. Изображение сил для шины

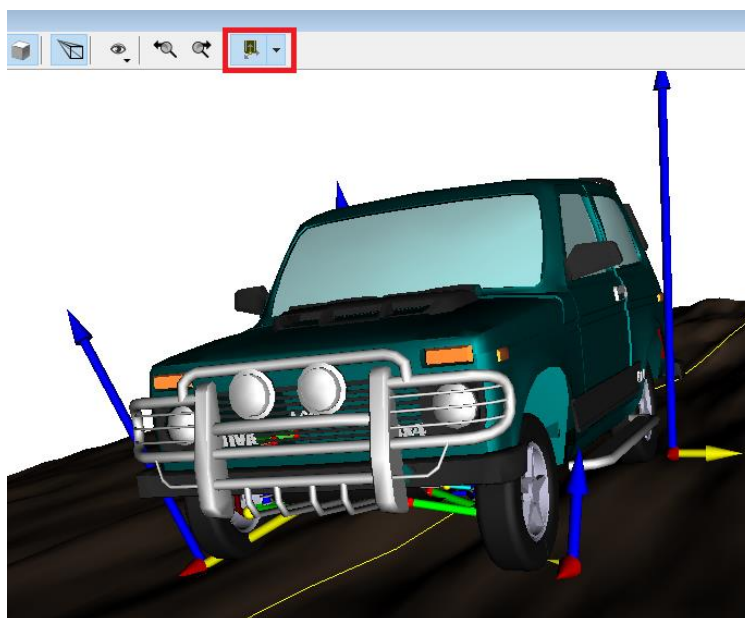


Рис. 1.121. Анимация векторов сил взаимодействия шины с дорогой в окне старого типа

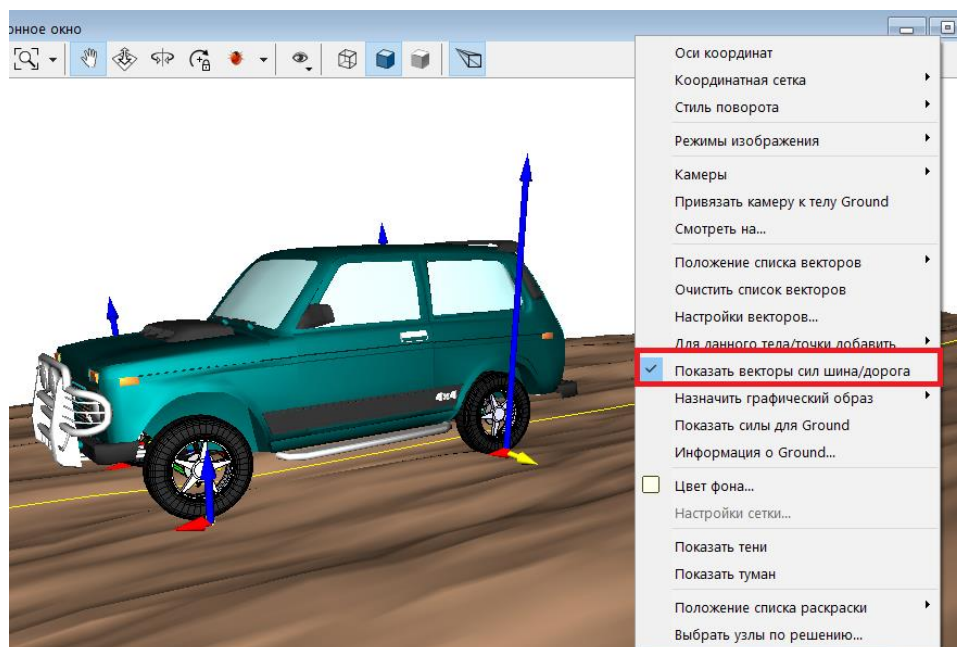

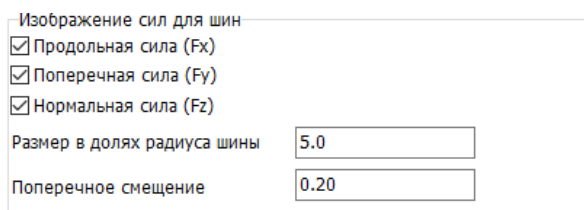


Рис. 1.122. Анимация векторов сил взаимодействия шины с дорогой в окне нового типа

Векторы сил взаимодействия шин с дорогой могут отображаться в анимационном окне в процессе моделирования. Для включения изображения сил следует

- в анимационном окне старого типа использовать кнопку  в верхней части окна, рис. 1.121;

- в анимационном окне нового типа использовать пункт всплывающего меню Показать векторы сил шина дорога, рис. 1.122.



Для настройки анимации векторов сил используется соответствующий раздел общих настроек, рис. 1.120:

- пользователь может выбрать, какие силы рисуются, например, только поперечные силы;

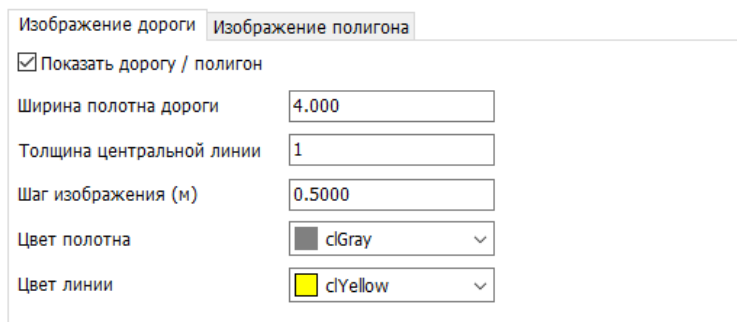
- установить масштаб векторов относительно радиуса шины, указав параметр d (**Размер в долях радиуса шины**) – длина вектора силы F рассчитывается по формуле

$$\frac{Frd}{F_0}$$

где r – радиус первой шины без нагрузки, F_0 – статическая на грузка для первой шины (если успешно пройден тест равновесия) или средняя нагрузка на одно колесо;

- сместить точку, к которой приложены образы сил, наружу от автомобиля, задав ненулевое значение в метрах параметра в поле **Поперечное смещение**.

1.9.1.4.4. Изображение дороги



Пользователь может изменить стиль изображение дороги в анимационном окне:

- Скрыть дорогу (только в новом типе окна);
- Задать ширину полотна в метрах
- Задать шаг изображения полотна в метрах.

Полотно рисуется четырехугольниками, ширина которых в продольном направлении (шаг) может варьироваться. Эти четырехугольники видны в проволочном режиме анимационного окна, рис. 1.123. При использовании профилей тестовых участком рекомендуется уменьшать значение шага для более точной отрисовки профиля, см. пп. 1.3.4 «Профиль тестового участка дороги», 1.9.4.7.2.3. «Использование профилей тестового участка».

- Изменить цвет полотна и траектории, которой следует автомобиль в тесте с водителем.

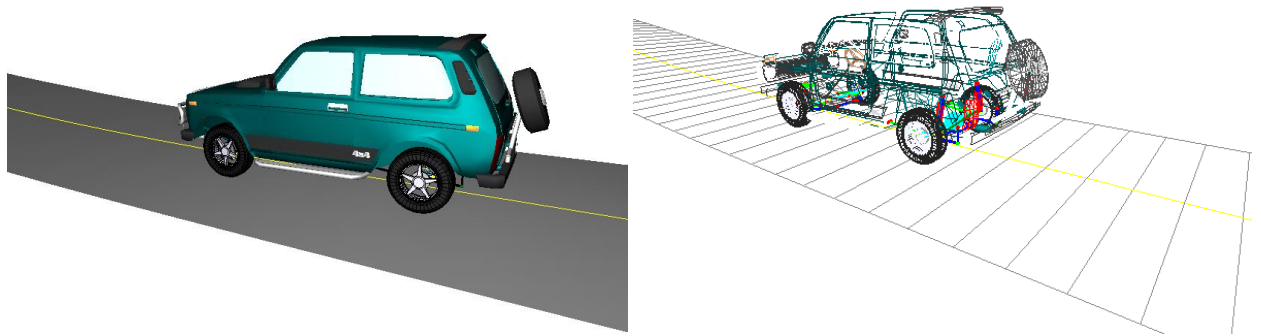


Рис. 1.123. Изображение дороги в полупрозрачном и проволочном режимах окна

1.9.1.4.5. Изображение поверхности в режиме управления без обратной связи

Изображение дороги		Изображение полигона	
Полигон			
X min, м	<input type="text" value="-30.000"/>	X max, м	<input type="text" value="30.000"/>
Y min, м	<input type="text" value="-20.000"/>	Y max, м	<input type="text" value="20.000"/>
Каждая отдельная плита			
Длина, м	<input type="text" value="3.000"/>	Ширина, м	<input type="text" value="2.000"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Использовать текстуры для плит			

В тесте управления без обратной связи горизонтальная поверхность, по которой движется автомобиль, изображается в новом анимационном окне с помощью генерируемой периодической поверхности, рис. 1.124. Размеры образа поверхности могут быть изменены пользователем.



Рис. 1.124. Изображение полигона в новом окне в тесте управления автомобилем без обратной связи

1.9.1.4.6. Переворот автомобиля

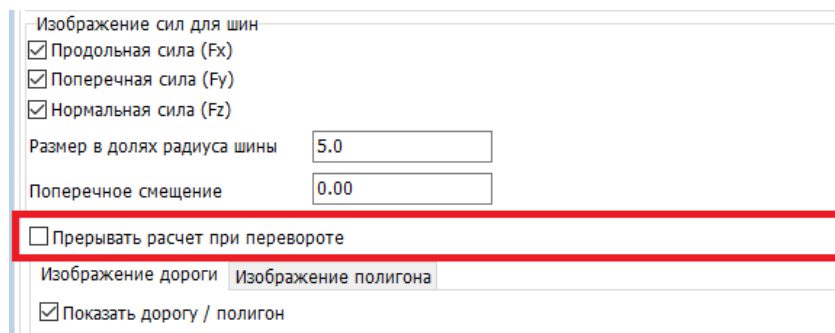


Рис. 1.125. Признак прерывания расчета при перевороте кузова. Прерывание выключено

Предусмотрено два режима моделирования движения автомобиля при перевороте. Режимы переключаются с помощью признака **Прерывать расчет при перевороте**, рис. 1.125.

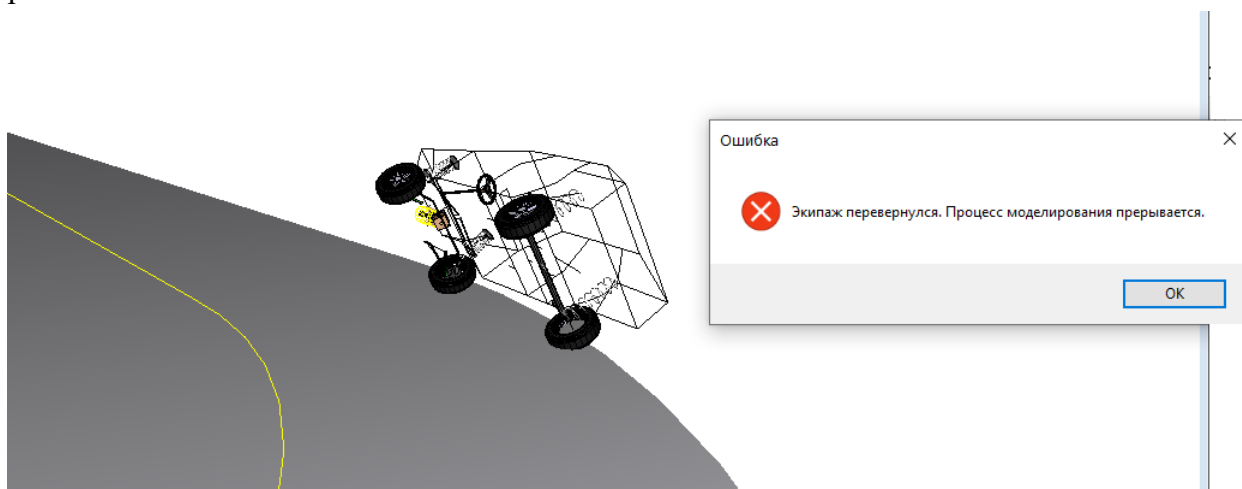


Рис. 1.126. Прерывание моделирования при перевороте

- Режим прерывания моделирования с сообщением об ошибке.

Моделирование прерывается, если исходно горизонтальная плоскость, связанная с кузовом, достигает положения, близкого к вертикальному, или плоскость симметрии одного из колес становится близкой к горизонтальной, рис. 1.126.

- Режим моделирования процесса переворота.

Если не включен режим прерывания моделирования при перевороте, то возможно моделирование полного процесса переворота автомобиля, вплоть до полной остановки при скольжении, рис. 1.127. Для этого следует добавить в модель контактные взаимодействия кузова с рельефом местности при возможном перевороте. В простейшем случае это контактный силовой элемент типа **точки-плоскость**, если автомобиль движется по горизонтальной плоскости, рис. 1.128. Если рельеф местности не является плоскостью, то можно использовать контакт типа **точки-Z-поверхность**.

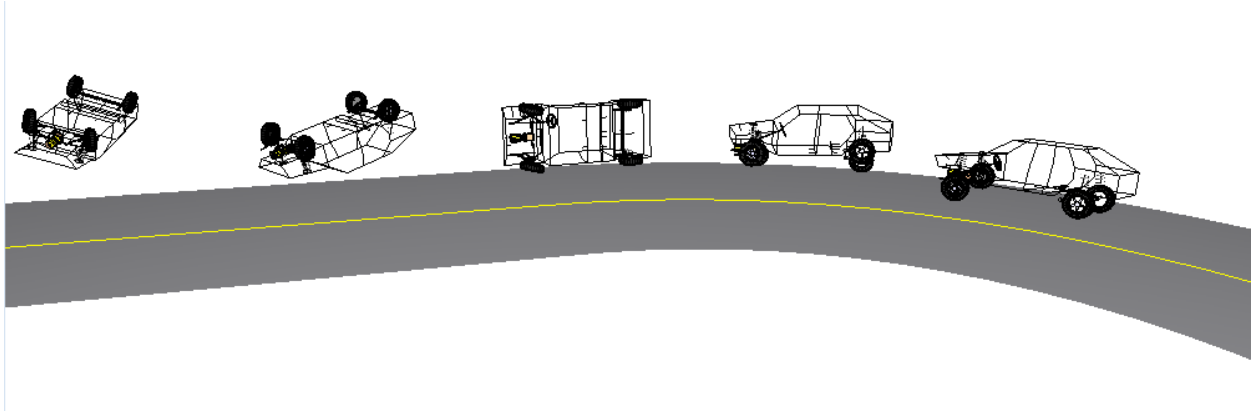


Рис. 1.127. Моделирование процесса переворота с использованием контактных взаимодействий

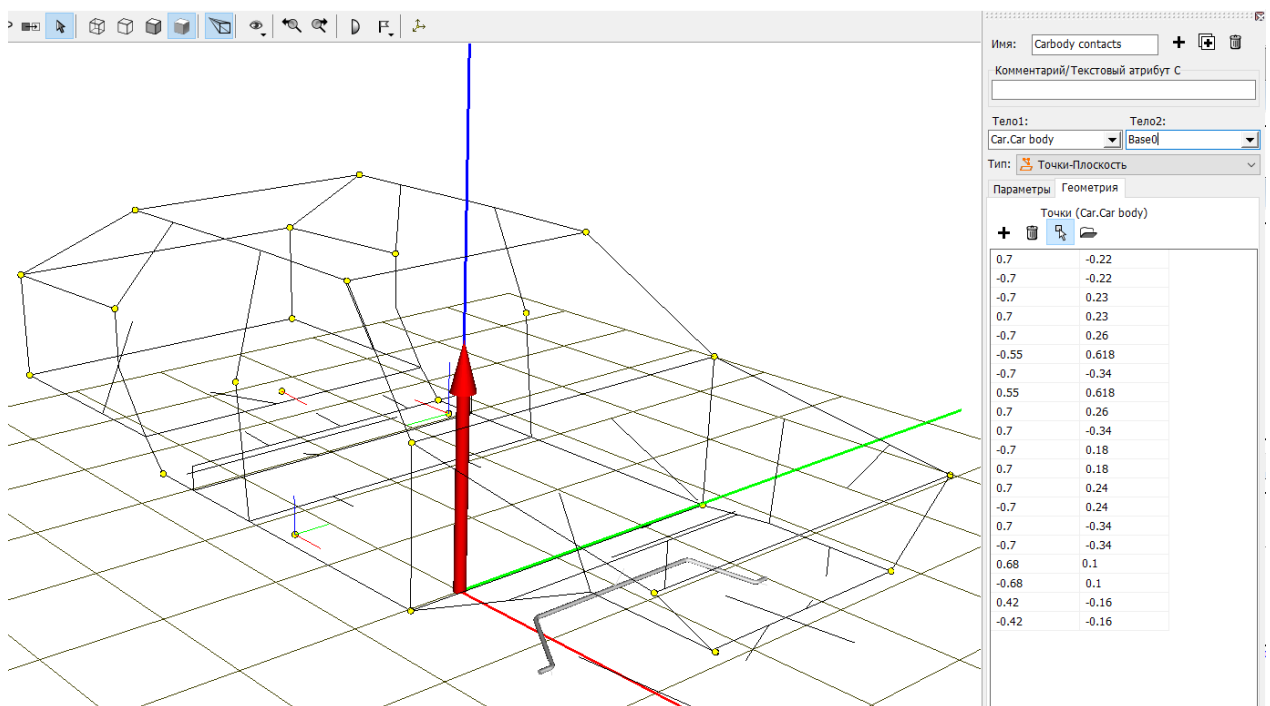


Рис. 1.128. Контактное взаимодействие кузова модели vaz2109 с горизонтальной плоскостью

1.9.2. Переносимость модели с одного компьютера на другой

При выполнении тестов программа использует ряд файлов, без которых моделирование невозможно. Если модель перенести на другой компьютер, то вспомогательные файлы, созданные пользователем, будут обнаружены программой, если они **находятся непосредственно в каталоге модели автомобиля**. Приведем список типов вспомогательных файлов:

- Макрогеометрия (макропрофиль) *.mgf
- Неровности (микропрофиль) *.igr
- Профиль тестового участка *.trp
- Рулевое управление без обратной связи *.ols
- Логика переключения коробки передач *.gss
- Файлы задания триангулированной поверхности и маршрутов *.img, *.igr

1.9.3. Режимы продольного движения и управление скоростью

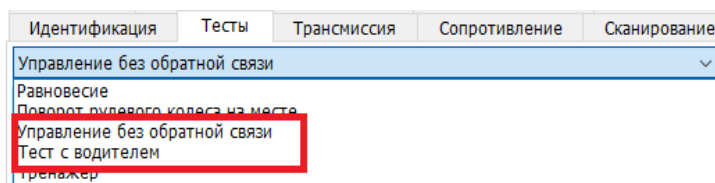
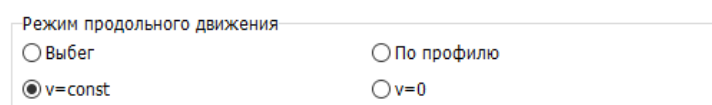
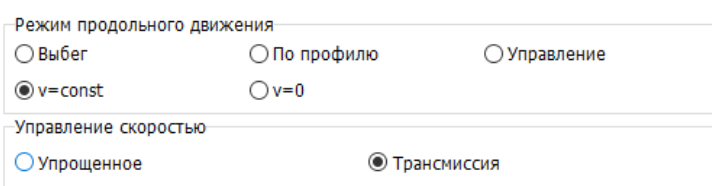


Рис. 1.129. Основные динамические тесты с продольным движением автомобиля



Модель автомобиля без трансмиссии



Модель автомобиля с трансмиссией

Рис. 1.130. Режимы задания продольного движения

Два основных динамических теста с моделью автомобиля используют несколько режимов продольного движения. Основными тестами являются (рис. 1.129):

[Управление без обратной связи](#)

[Тест с водителем](#)

Реализация и число режимов продольного движения зависит от того, включает или нет трансмиссию модель автомобиля. Для модели автомобиля без трансмиссии используется только **упрощенный способ управления скоростью**, параметры которого введены в п. 1.9.1.2.1 “Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью”. В этом случае управляющие моменты непосредственно прикладываются к ведущим колесам автомобиля. Для моделей с трансмиссией, наряду с упрощенным способом, используется **управление трансмиссией**, включающее переключение передач, изменение положения педалей акселератора, сцепления, тормоза и т.д.

Идентификатор v_0 используется для задания начального значения скорости в режимах **Выбег**, **$v=const$** , **Управление**, рис. 1.131. В режиме **По профилю** скорость задается графиком в зависимости от времени или пройденного пути, п. 1.9.1.3.1 «Задание графиков поворота рулевого колеса и скорости движения», значение идентификатора v_0 в этом случае игнорируется. Скорость может быть задана либо в м/с, либо в км/ч. Способ задания для текущей модели регулируется пользователем с помощью окна настроек или уна панели инструментов и сохраняется в файле настроек *.icf, рис. 1.132.

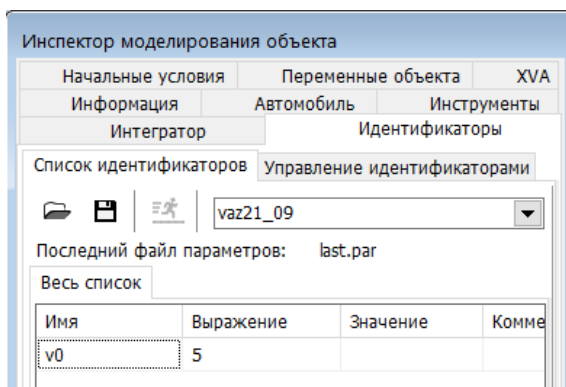


Рис. 1.131. Задание начальной скорости идентификатором v0

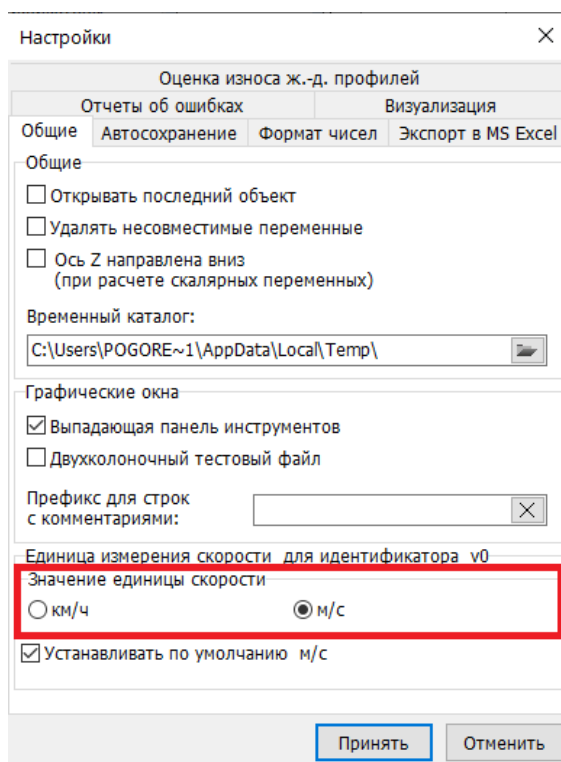
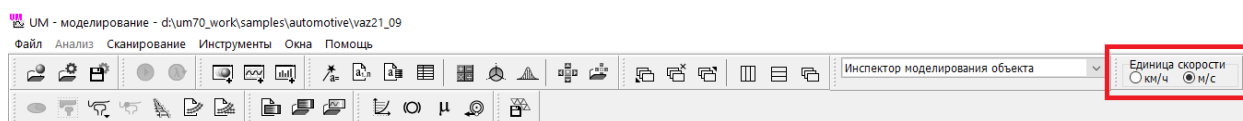


Рис. 1.132. Задание единицы измерения скорости

Режим нулевой скорости $v=0$ аналогичен тесту равновесия и используется, главным образом, для расчета начального положения автомобиля при движении по триангулированной поверхности (полигону), 1.9.4.7.3.2 «Начальные условия для теста с движением по полигону». В отличие от теста равновесия, в данном режиме автоматически включается блокировка кузова. При расчете взаимодействия шин с поверхностью силы трения полагаются равными нулю, то есть поверхность считается абсолютно гладкой.

1.9.3.1. Скоростные режимы при упрощенном управлении скоростью

Предусмотрено четыре режима продольного движения, рис. 1.130.

Выбег

Управление выключено, движение происходит по инерции или под действием продольных сил, заданных в модели автомобиля.

$v=const$, По профилю

К каждому ведущему колесу прикладывается момент, зависящий от рассогласования текущей и заданной скоростей. С этой целью автоматически используется идентификатор момента, указанного пользователем, см пп. 1.7.8 «Силовой элемент для упрощенного управления скоростью продольного движения», 1.9.1.2.1 «Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью».

Система управления скоростью продольного движения использует пропорционально-интегральный закон

$$M = -K(v - v_d) - K_I \int_0^t (v - v_d) dt,$$

где M – момент (идентификатору момента будет присваиваться данное значение),

v – текущее значение продольной скорости движения автомобиля (берется по скорости кузова), м/с,

v_d – требуемое значение продольной скорости, может быть постоянной величиной и функцией времени в зависимости от выбранного типа скоростного режима, м/с,

K, K_I – параметры управления, задаваемые пользователем, п. 1.9.1.2.1. «Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью».

Величина момента может быть ограничена сверху в силу ограничений, накладываемых мощностью двигателя, п. 1.9.1.3.3. «Ограничение силы тяги при упрощенном управлении скоростью».

$v=0$

Режим неподвижного автомобиля описан выше в п. 1.9.3 «Режимы продольного движения и управление скоростью».

1.9.3.2. Скоростные режимы при управлении трансмиссией

Режим продольного движения

Выбег По профилю Управление

$v=const$ $v=0$

Управление скоростью

Упрощенное Трансмиссия

Рис. 1.133. Режимы продольного движения при управлении трансмиссией

Данный раздел применяется для моделей автомобилей с трансмиссией, п. 1.8 «Моделирование трансмиссии». В этом случае имеется возможность использовать как упрощенное управление продольной скоростью, описанное в предыдущем разделе, так и непосредственно управление трансмиссией, включающее

- переключение передачи

- изменение положение педали акселерометра
- управление сцеплением в случае механической коробки передач
- управление тормозом

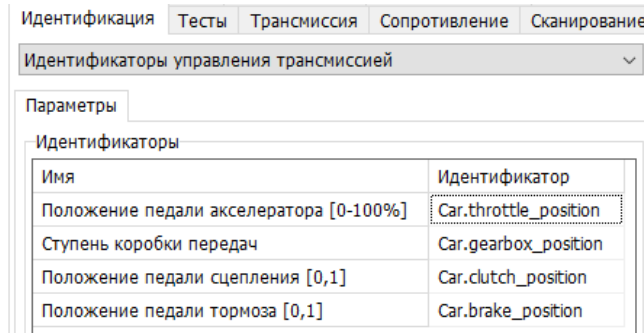


Рис. 1.134. Назначенные идентификаторы для управление трансмиссией

Управление трансмиссией осуществляется с использованием четырех идентификаторов, соответствующих этим пунктам, рис. 1.134, п. 1.9.1.2.5 «Идентификаторы управления трансмиссией».

1.9.3.2.1. Режим “Выбег”

В данном режиме управление трансмиссией осуществляется путем непосредственного задания значений идентификаторам путем задания постоянных или переменных значений. Для задания переменных значений можно использовать как инструмент управления идентификаторами, так и созданную пользователем панель управления. На старт интегрирования программа автоматически запускает двигатель. Если степень передачи не установлена в нейтральное положение, то есть соответствующий идентификатор отличен от нуля, то автоматически рассчитывается частота вращения двигателя в соответствии с заданной идентификатором $v0$ продольной скоростью и передаточным числом коробки передач и главной передачи.

Таблица 1.8

Некоторые варианты значений идентификаторов управления трансмиссией

Идентификатор	Варианты			
	1	2	3	4
Положение педали акселератора (throttle_position)	0	0	>0	>0
Степень коробки передач (gearbox_position)	0	0	>0	-1
Положение педали сцепления (clutch_position)	0	0	0	0
Положение педали тормоза (brake_position)	0	>0	0	0

Несколько вариантов задания значений идентификаторов управления приведено в табл. 1.8. Предполагается, что при установлении заданных значений идентификаторам запускается процесс моделирования и эти значения не меняются пользователем.

Вариант 1. Автомобиль движется по инерции с небольшим замедлением из-за сопротивления воздуха и трения качения колес.

Вариант 2. Автомобиль тормозит.

Вариант 3. Скорость движения стремится к установившемуся значению, величина которого зависит от положения педали акселератора и установленной ступени передач. Значение идентификатора начальная скорости v_0 должно быть положительно.

Вариант 4. Движение назад. Скорость движения стремится к установившемуся значению, величина которого зависит от положения педали акселератора. Значение идентификатора начальная скорости v_0 должно быть отрицательным.

Для переключения передач в данном режиме можно использовать *аппарат управления идентификаторами*. Рассмотрим пример. На момент начала моделирования автомобиль неподвижен ($v_0=0$), педаль акселератора нажата на 20%, передача в нейтральном положении, педаль сцепления отпущена, рис. 1.135. При старте моделирования запускается двигатель. В момент времени 1с сцепление выключается и включается первая передача. В течение следующих 1.5с сцепление отпускается.

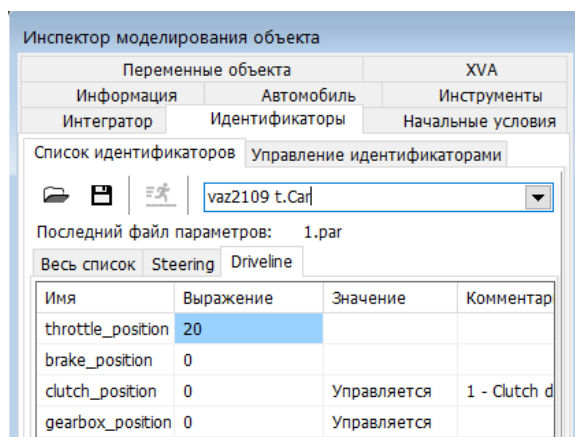


Рис. 1.135. Положение педали акселератора 20%

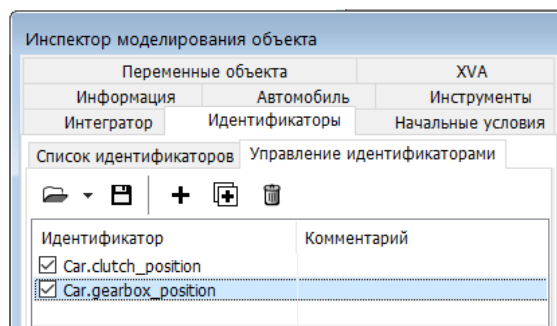


Рис. 1.136. Управление идентификаторами положения педали сцепления и передачи

В данном примере управление осуществляется двумя идентификаторами, рис. 1.136. Зависимости идентификаторов от времени, реализующие описанный сценарий, приведены на рис. 1.137.

Данный пример реализован в модели [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T.](#) Для просмотра следует открыть полную конфигурацию модели **Identifier control for transmission** (управление трансмиссии идентификаторами). Зависимости от времени частоты вращения двигателя и продольной скорости автомобиля при моделировании приведены на рис. 1.138.

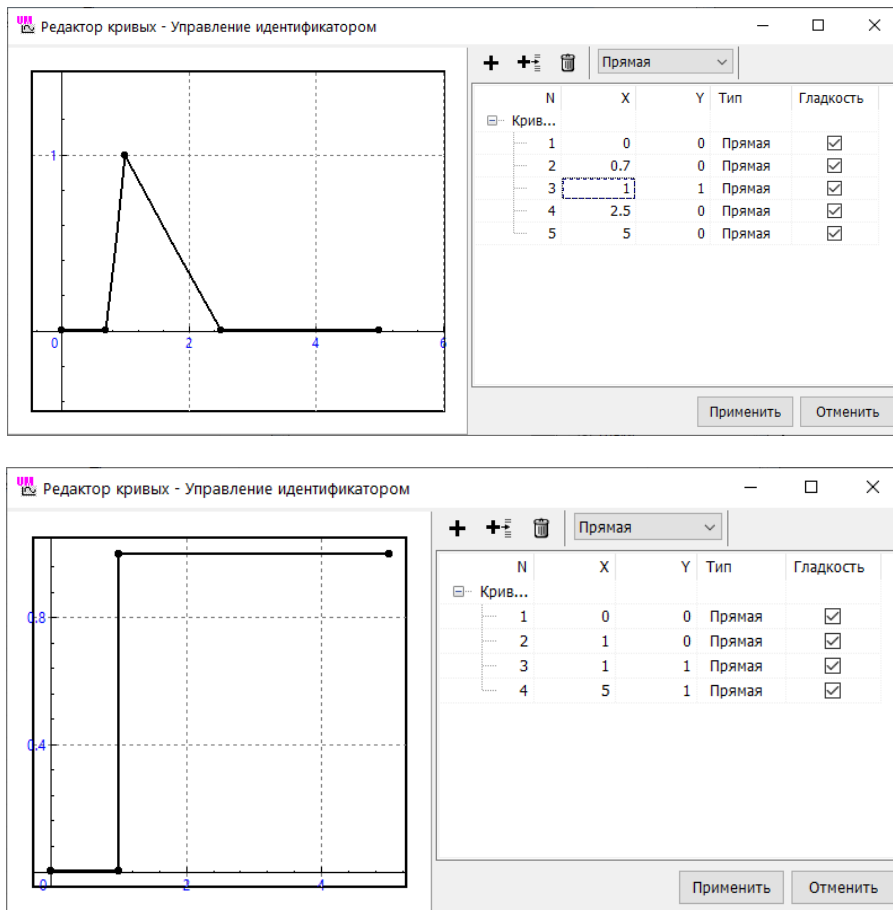


Рис. 1.137. Графики зависимости от времени идентификаторов сцепления и степени передачи

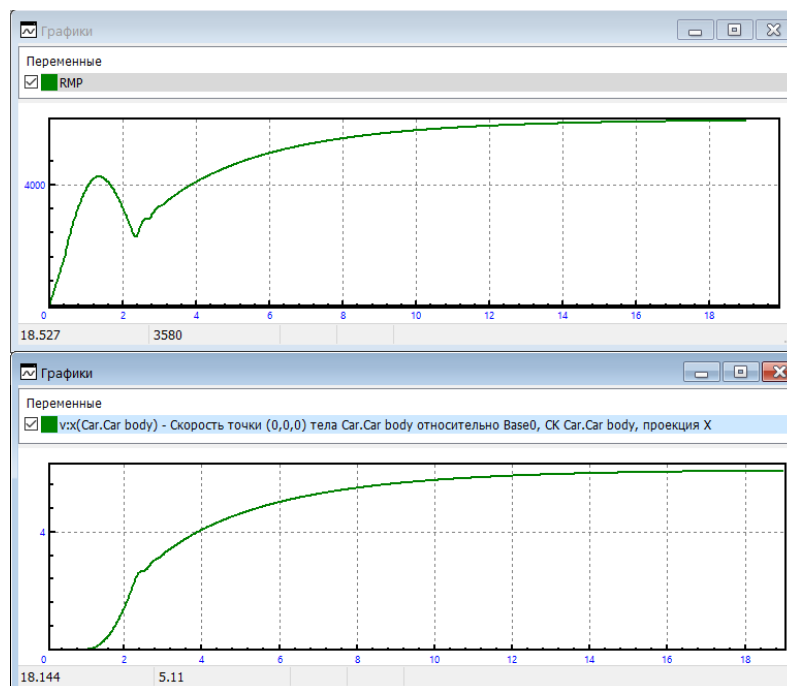


Рис. 1.138. Зависимости от времени частоты вращения двигателя и скорости автомобиля

1.9.3.2.2. Режимы “v=const”, “По профилю”

В этих режимах продольного движения, когда скорость постоянна или задана графиком зависимости от времени или пройденного пути, предусмотрено полное автоматическое управление трансмиссией, п. 1.9.3.3 «Контроллер трансмиссии».

1.9.3.2.3. Режим “Управление”

Данный режим является частичной комбинацией управлений трансмиссией, описанных в пп. 1.9.3.2.1 Режим “Выбег”, 1.9.3.3 «Контроллер трансмиссии»:

- управление педалью акселератора и тормозами осуществляется напрямую через соответствующие идентификаторы, как это описано в режиме **Выбег**;
- переключение передач происходит автоматически под управлением контроллера трансмиссии, п. 1.9.3.3 «Контроллер трансмиссии».

1.9.3.3. Контроллер трансмиссии

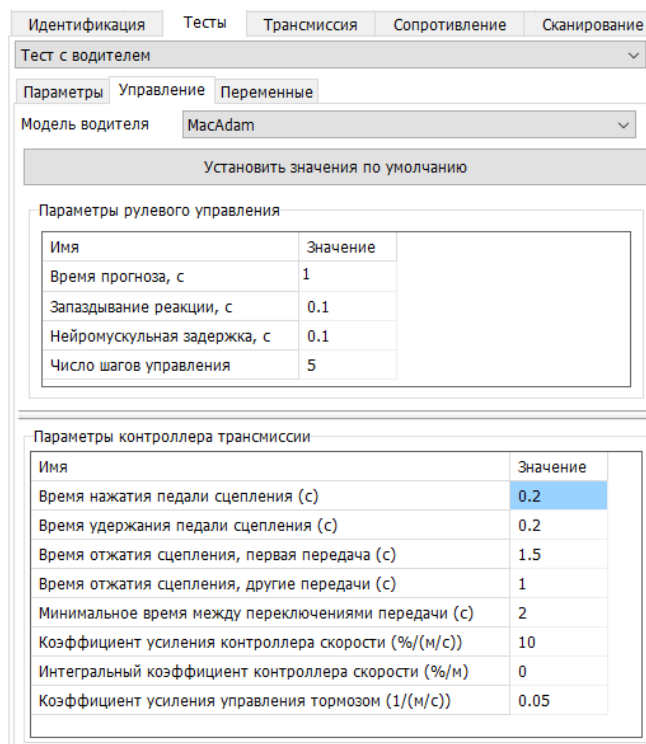


Рис. 1.139. Параметры контроллера трансмиссии

Контроллер трансмиссии – это модель автоматического управления продольным движением автомобиля при наличии в модели трансмиссии, п. 1.8 «*Моделирование трансмиссии*». Основная информация про моделирование трансмиссии содержится в [Главе 22](#).

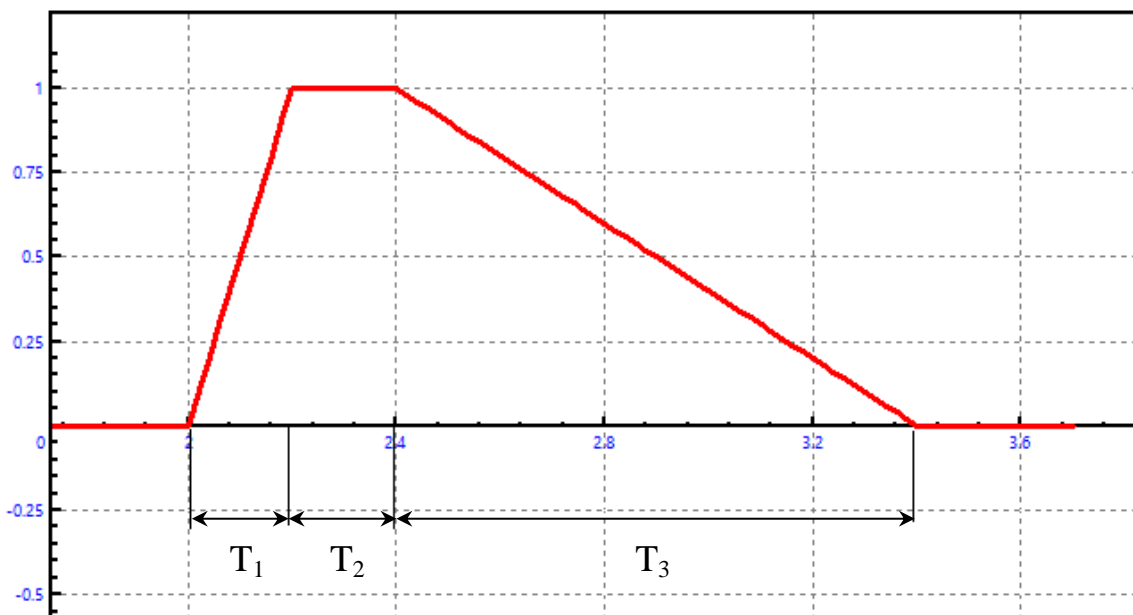
1.9.3.3.1. Параметры автоматического управления трансмиссией

Параметры контроллера доступны на вкладке Управление теста и включают три группы, рис. 1.139.

- Параметры переключения сцепления

Типичный график зависимости идентификатора положения педали сцепления при переключении передачи показан на рис. 1.140. Напомним, что значение 0 соответствует включенному, а 1 – выключенному сцепления. Четыре первых параметра контроллера в таблице соответствуют длительности трех интервалов времени T_1, T_2, T_3 :

- T_1 – Время нажатия педали сцепления (с),
- T_2 – Время удержания педали сцепления (с),
- T_3 – Время отжатия сцепления, первая передача (с),
- T_3 – Время отжатия сцепления, другие передачи (с).



- Минимальное время между переключениями передачи

Контроллер не может изменить ступень передачи, если с последнего переключения прошло время, меньшее данного параметра.

- Параметры управления положением педали акселератора

Реализовано пропорционально-интегральное управление положением педали акселератора по рассогласованию между текущей и заданной скоростью автомобиля:

$K_{acc,p}$ – Коэффициент усиления контроллера скорости

$K_{acc,i}$ – Интегральный коэффициент контроллера скорости

- Применяется пропорциональное управление положения педали тормоза

K_b – Коэффициент усиления управления тормозом.

Данное управление педалями акселератора и тормоза используется в режимах поддержания скорости, описанных в п. 1.9.3.2.2 *Режимы “ $v=const$ ”, “По профилю”*.

1.9.3.3.2. Автоматическое переключение передачи

Для переключения передачи используется файл, содержащий кривые повышения и понижения передачи в зависимости от скорости автомобиля или частоты вращения двигателя, п. 1.9.1.3.4 *«Логика переключения передач»*. Подробную информацию можно найти в [Главе 22](#), файл 22_UM_Driveline.pdf, п. *“Файл с кривыми переключения передач”*. Если в модели автомобиля реализована механическая коробка передач, то перед переключением передачи контроллер выключает сцепление, а после переключения передачи отжимает сцепление, рис. 1.140. Автоматическое переключение передач используется в режимах скорости *“ $v=const$ ”, “По профилю”, “Управление”*.

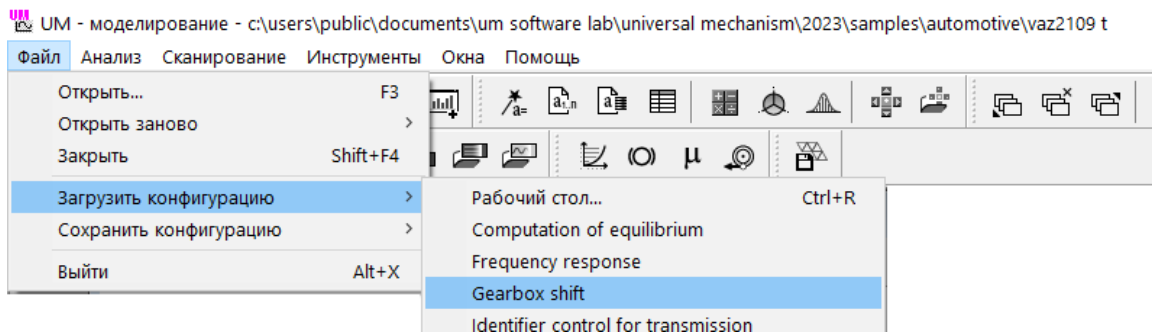


Рис. 1.141. Чтение полной конфигурации

Пример.

Откройте модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#) в программе моделирования и загрузите полную конфигурацию модели **Gearbox shift** (переключение коробки передач). Выполняется моделирование движения по прямой с переменной скоростью при постоянном положении педали акселератора 100%, рис. 1.142.

Зависимости от времени скорости автомобиля, графики автоматического управления сцеплением и переключения передачи при моделировании приведены на рис. 1.143. В процессе выполнения теста автомобиль достигает скорости, близкой к максимальной для заданного типа двигателя.

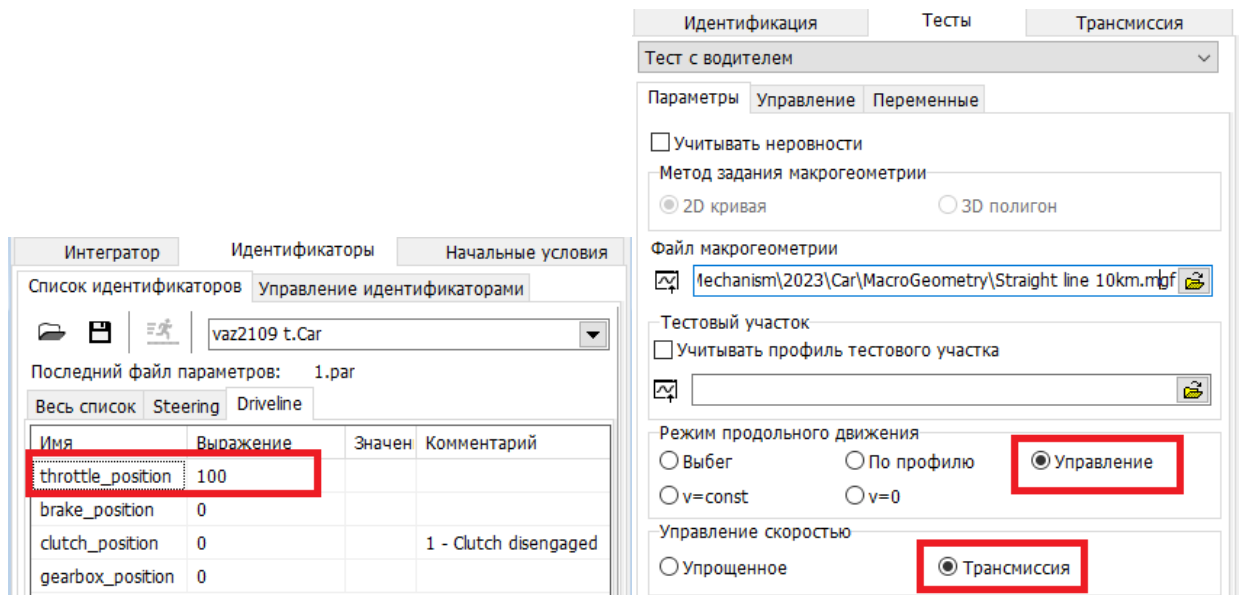


Рис. 1.142. Настройки теста переключения передачи

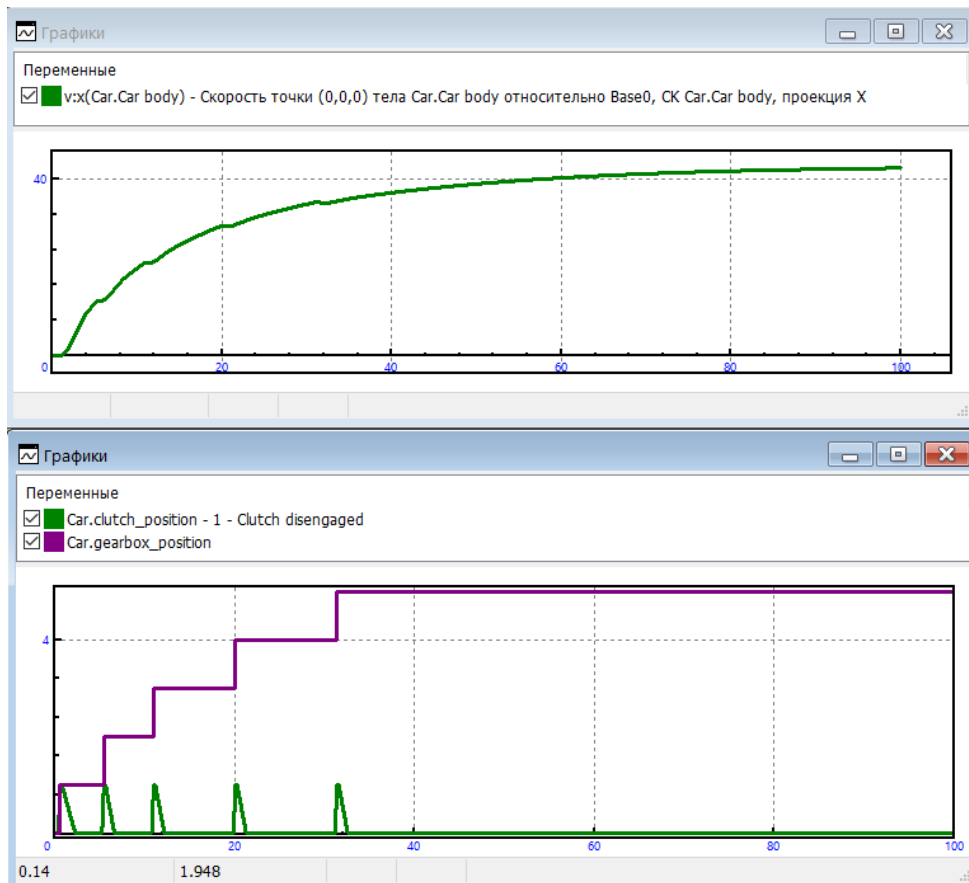


Рис. 1.143. Продольная скорость автомобиля, управлением сцеплением и переключение передачи

1.9.3.3.3. Управление педалью акселератора и тормозом

Данный тип управления используется только в режимах движения “ $v=const$ ”, “По профилю”, то есть в случаях, когда зависимость скорости от времени или положения известна. В этих режимах возможна оценка прогноза ускорения автомобиля a_p , что позволяет определить суммарную силу сопротивления движению, состоящую из аэродинамического сопротивления F_a , сопротивления шин при качении F_r , гравитационной составляющей при движении по наклонному участку дороги F_g и силы инерции $F_i = -ma_p$. Суммарное сопротивление

$$R = F_a + F_r + F_g + F_i$$

Сначала рассмотрим режим тяги, то есть случай, когда для поддержания заданной скорости требуется нажатие педали акселератора на некоторую величину для реализации необходимого момента на валу двигателя. Из баланса мощностей, пренебрегая потерями в трансмиссии, можно оценить прогнозное значение момента на валу двигателя M_{ep}

$$M_{ep}\omega_e = Rv.$$

Здесь ω_e, v – текущие значения угловой скорости вала двигателя (рад/с) и продольная скорость автомобиля (м/с), приближенно связанные соотношением

$$\omega_e \approx \frac{v i_g 3.6}{r_w i_m 30/\pi}$$

Передача трансмиссии i_m множителями 3.6 и $30/\pi$ переводится в размерность м/с / рад/с из исходной размерности км/ч / об/мин, см. [Глава 22](#), раздел “Идентификатор передачи трансмиссии”.

Окончательное выражение для оценочного расчета момента двигателя при текущей скорости автомобиля и установленной ступени передачи:

$$M_{ep} = \frac{R r_w i_m 30/\pi}{i_g 3.6} \text{ Нм.}$$

По рассчитанной величине момента M_{ep} при текущей частоте вращения двигателя рассчитывается прогнозное положение органа управления подачей топлива $\eta_{acc} \in [0,100\%]$ и соответствующее ему положение педали акселератора $\eta_{acc,p}$. Для этого используются заданные частичные характеристики ДВС (см. [Глава 22](#), раздел “Частичные скоростные характеристики”). Результирующее положение педали складывается из прогнозного значения и двух слагаемых пропорционального и интегрального управления по рассогласованию между текущей v и желаемой v_d продольной скоростями

$$\eta_{acc} = \eta_{acc,p} - K_{acc,p}(v - v_d) - K_{acc,i} \int_0^t (v - v_d) dt,$$

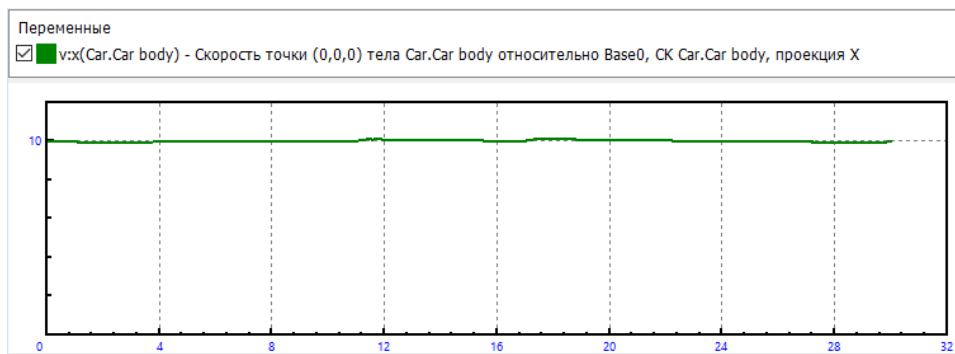
Здесь $K_{acc,p}$, $K_{acc,i}$ – коэффициенты управления скоростью, п. 1.9.3.3.1. “*Параметры автоматического управления трансмиссией*”.

Если полученное значение η_{acc} отрицательно, оно полагается равным нулю и возможен переход к **режиму торможения**. Торможение включается, если сумма прогнозируемого момента M_{ep} и момента холостого хода M_{ei} отрицательна, то есть торможение двигателем не обеспечивает заданное снижение скорости. Положение педали тормоза $\eta_b \in [0,1]$ рассчитывается как сумма величины η_{bp} , обеспечивающей прогнозное значение тормозной силы, и управление по рассогласованию скорости с коэффициентом усиления K_b , п. 1.9.3.3.1. “*Параметры автоматического управления трансмиссией*”,

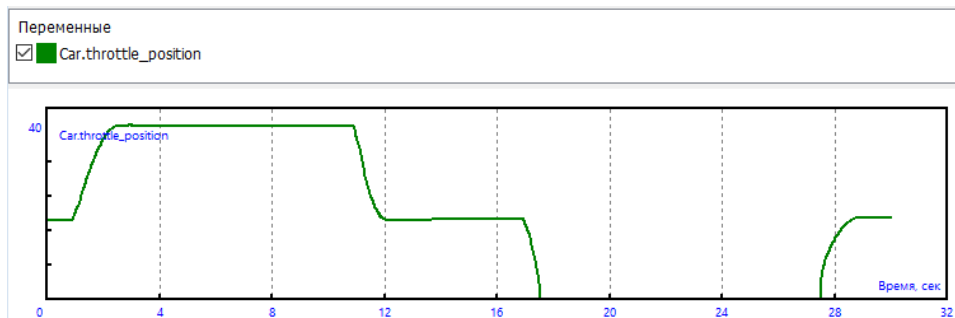
$$\eta_b = \eta_{bp} - K_b(v - v_d).$$

Пример 1. Движение с постоянной скоростью, подъем и спуск.

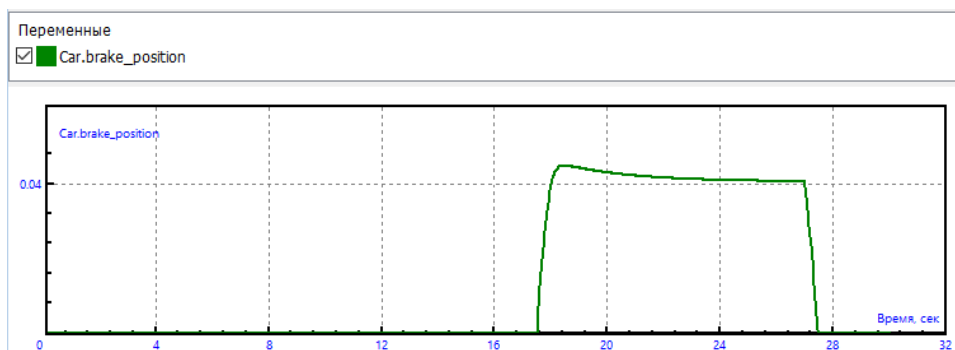
Откройте модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 Т](#) в программе моделирования и загрузите полную конфигурацию модели **v=10**. Выполняется моделирование движения с поддержанием постоянной скорости 10 м/с. Файл макрогеометрии содержит движение по прямой по дороге с участками подъема и спуска 10% с длиной участков 100м каждый. Результаты моделирования представлены на рис. 1.144. Описанная система управления позволяет удерживать практически постоянную скорость.



Скорость



Положение педали акселератора



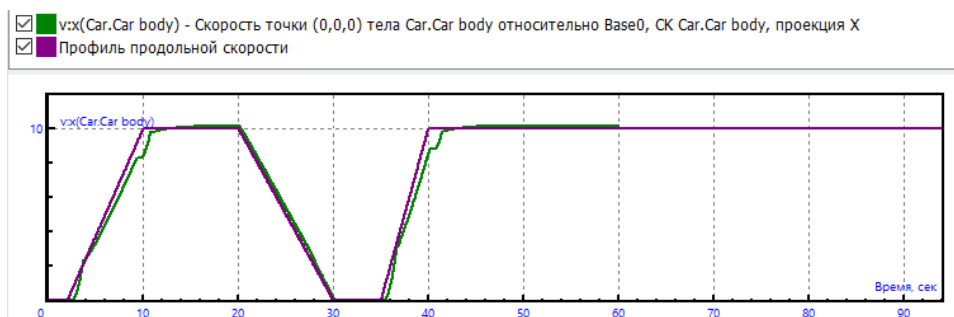
Положение педали тормоза

Рис. 1.144. Результаты моделирования движения с постоянной скоростью по дороге с подъемом и спуском

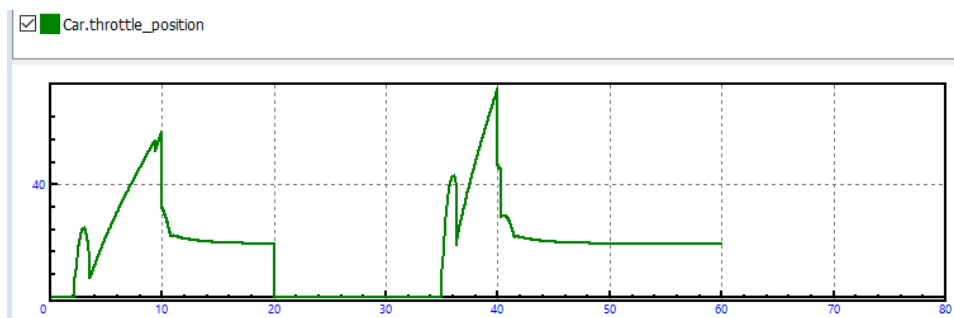
Пример 2. Движение вперед с переменной скоростью

Откройте модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#) в программе моделирования и загрузите полную конфигурацию модели **Test with stop and run** (тест с остановкой и движением). Выполняется моделирование движения по горизонтальному участку дороги с переменной скоростью. Автомобиль разгоняется до 10 м/с, тормозит до полной остановки, затем опять разгоняется. Результаты моделирования представлены на рис. 1.145.

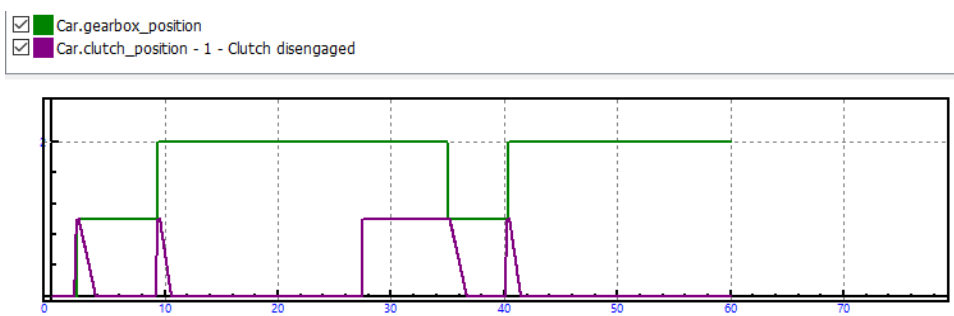
Перед остановкой и во время нее система управления разрывает сцепление, оставляя вторую передачу.



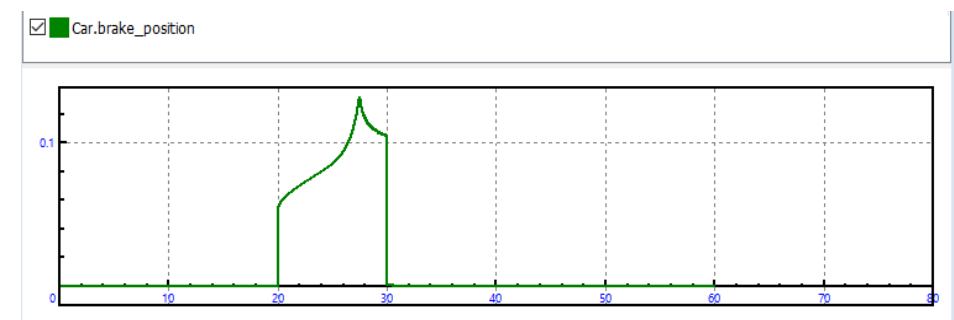
Скорость при моделировании и заданная скорость



Положение педали акселератора



Номер передачи и положение педали сцепления



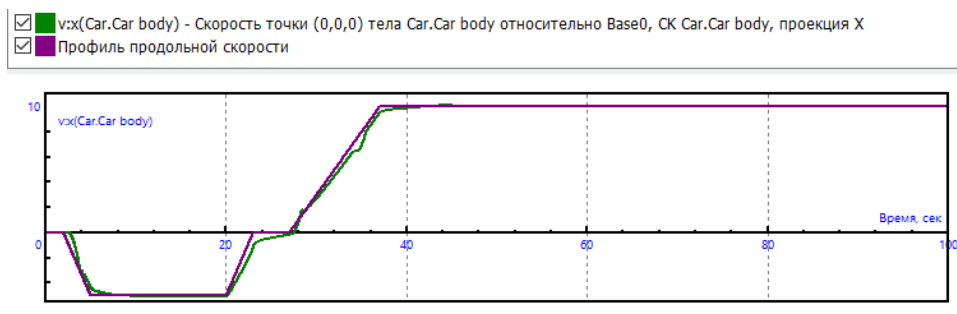
Положение педали тормоза

Рис. 1.145. Результаты моделирования движения с переменной скоростью и промежуточной остановкой

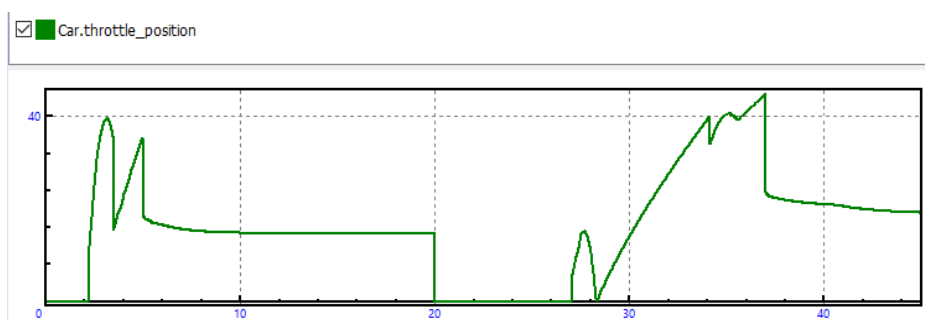
Пример 3. Движение назад и вперед в кривой

Откройте модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#) в программе моделирования и загрузите полную конфигурацию модели **Reverse motion in curve**. (движение

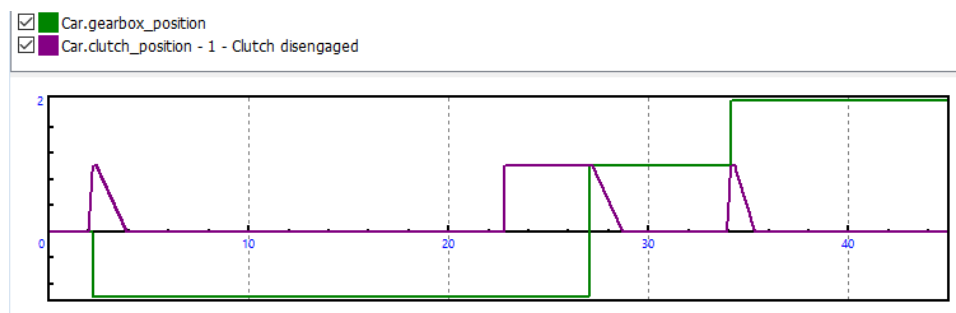
назад в кривой). Выполняется моделирования движения в кривой по горизонтальному участку дороги с переменной скоростью. Автомобиль сначала движется назад, затем вперед. Результаты моделирования представлены на рис. 1.146.



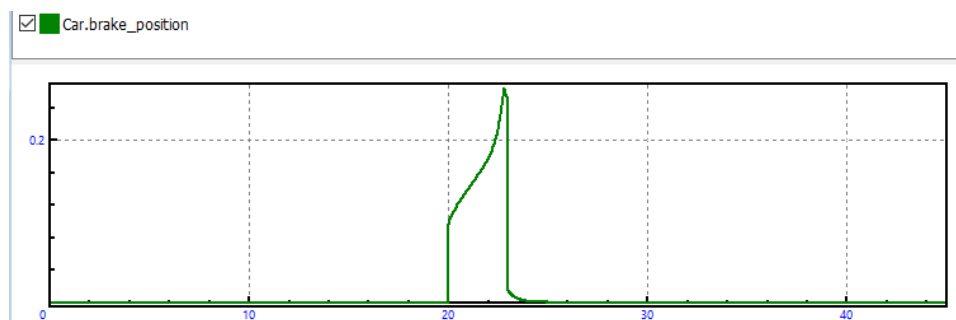
Скорость при моделировании и заданная скорость



Положение педали акселератора



Номер передачи и положение педали сцепления



Положение педали тормоза

Рис. 1.146. Результаты моделирования движения в кривой назад и вперед

1.9.4. Тесты с моделью автомобиля как инструмент исследования динамики

1.9.4.1. Общая информация

Набор заложенных в УМ тестов является основой для исследования свойств модели. В настоящей версии программы реализованы следующие виды тестов.

- Равновесие, п. 1.9.4.4
- Поворот рулевого колеса на месте, п. 1.9.4.5
- Управление без обратной связи, п. 1.9.4.6
- Тест с водителем, п. 1.9.4.7
- Тренажер, п. 1.9.4.8
- Вертикальная прокачка, п. 1.9.4.9
- Горизонтальная прокачка, п. 1.9.4.10

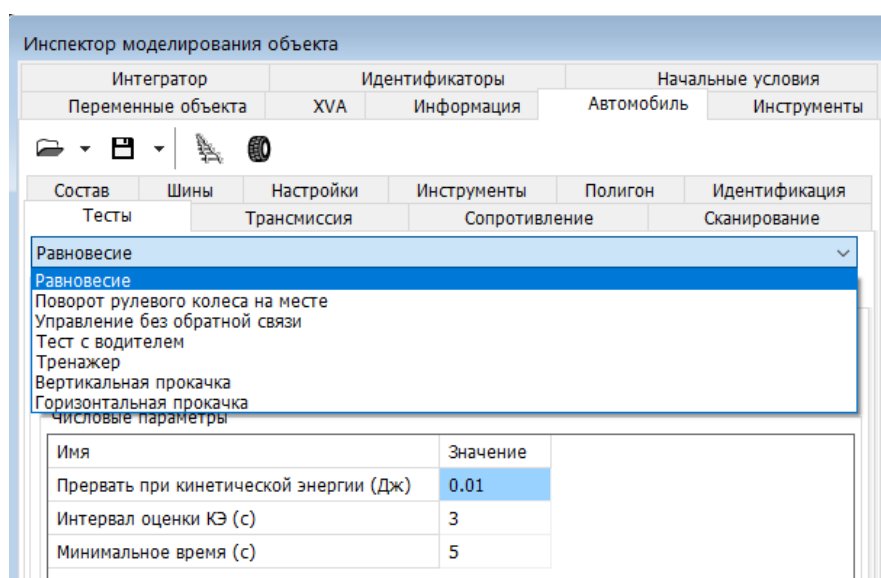


Рис. 1.147. Список тестов

а) Равновесие

Настоятельно рекомендуется выполнять тест равновесие в самом начале исследования новой модели. Тест позволит привести модель автомобиля в положение равновесия, оценить статические силы, определить и запомнить статические прогибы шин. В результате использования этих данных можно избежать переходных процессов на начальной фазе тестов других типов.

В UM10 в тест равновесия добавлен инструмент выполнения различного типа расчетов с неподвижным автомобилем, например, построение амплитудно-частотных характеристик методом скользящей частоты.

б) Поворот рулевого колеса на месте

Тест предназначен для оценки передаточного отношения и зависимость угла поворота колес от угла поворота рулевого колеса.

с) Управление без обратной связи

Тест предназначен для выполнения маневров с открытым контуром управления: рывок руля, ступенчатое изменение положения руля и прочее. Угол поворота рулевого колеса устанавливается как заданная функция времени или пути.

д) Тест с водителем

Тест предназначен для выполнения маневров по заданной траектории: смена полосы движения, обгон, поворот и т.д. Тест включает возможность задание движения по триангулированной поверхности. Для рулевого управления и управления скоростью используются встроенные модели водителя.

е) Тренажер

Тест можно использовать использовать как для моделей с описанием трансмиссии автомобиля, так и без нее. Тест позволяет пользователю интерактивно управлять движением модели автомобиля с помощью специального окна, содержащего элементы управления: рулевое управление, педаль акселератора, сцепление, передача, тормоз.

ф) Вертикальная прокачка

Вспомогательный тест «вертикальная прокачка» представляет собой квазистатическое нагружение кузова вертикальной гармонической силой. Сила прикладывается в центре масс кузова. Позволяет определить суммарную жесткость подвески, в том числе на больших амплитудах.

г) Горизонтальная прокачка

То же, что и вертикальная прокачка, только с поперечным приложением силы.

Тесты можно разделить на две основные группы:

- тесты с блокировкой вращения колес (a, b, f, g);
- тесты с управлением скоростью продольного движения и рулевой системой (c, d, e).

Тесты с блокировкой вращения колес

Тесты из первой группы обладают следующими особенностями.

- Требуют ненулевой жесткости блокировки вращения колес, см. п. 1.7.9. "Блокировка вращения колес", с. 1-88, п. 1.9.1.2.2. "Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес";
- Используется упрощенная модель шин как контактных сил типа окружность-плоскость (подробнее см. [Главу 2](#) руководства пользователя, п. *Силовые элементы/Контактные силы*). Параметры жесткости и диссипации для контактных сил берутся равными тем же величинам из соответствующей модели шины.
- Макрогеометрия не учитывается.

Тесты с управлением скоростью и рулевой системой

Особенности тестов с управлением скоростью и рулевой системой следующие.

- Тесты из этой группы автоматически устанавливают параметры, отвечающие за блокировку вращения колес, в ноль, то есть снимают блокировку вращения колес.
- Опционально включают управление скоростью продольного движения.
- Опционально включают неровности пути.
- Используют заданную пользователем модель шин.

1.9.4.2. Задание параметров для тестов

В общем случае следующие параметры модели/данные могут быть заданы при прохождении тестов.

- Значения идентификаторов модели
- Численные значение параметров, характеризующих конкретный тест
- Функция поворота рулевого колеса
- Зависимость скорости от времени или пути
- Макрогеометрия
- Неровности
- Модель водителя и настройка параметров выбранной модели

1.9.4.3. Переменные

Вместе с типовым способом создания переменных в *Мастере переменных* (подробнее о *Мастере переменных* см. [Главу 4](#) руководства пользователя, п. *Мастер переменных*) для повышения эффективности работы ряд наиболее характерных переменных для каждого теста вынесен на закладку **Автомобиль | Тесты | Переменные**. Для построения графиков переменных просто перетащите нужные переменные мышкой в графическое окно.

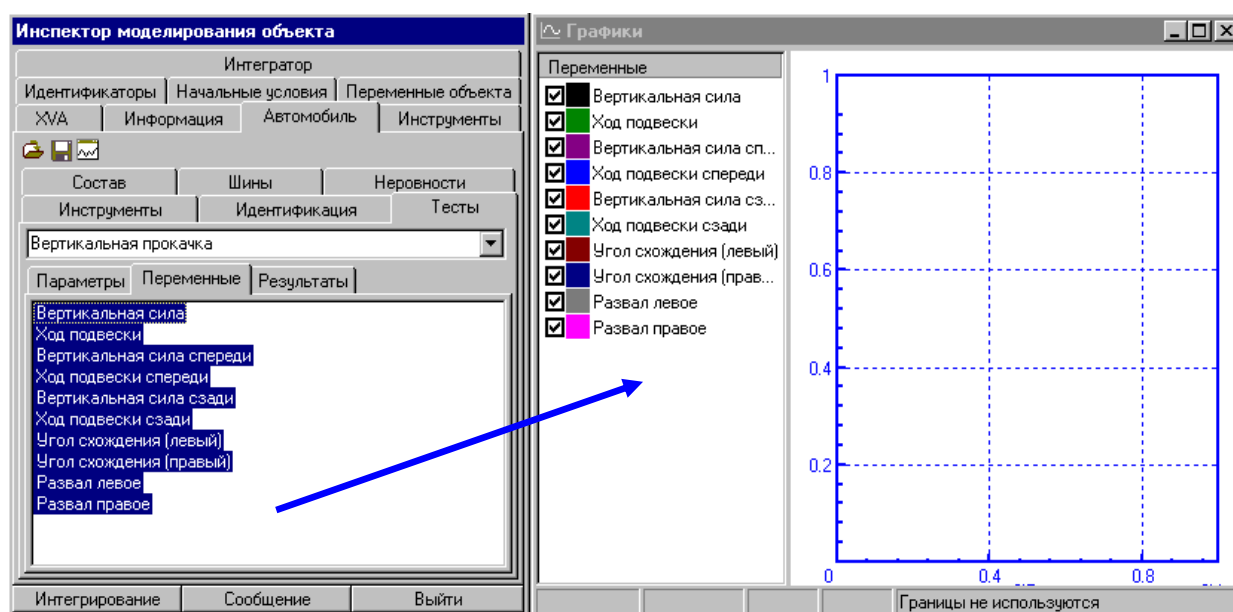


Рис. 1.148. Построение графиков переменных

1.9.4.4. Тест «Равновесие»

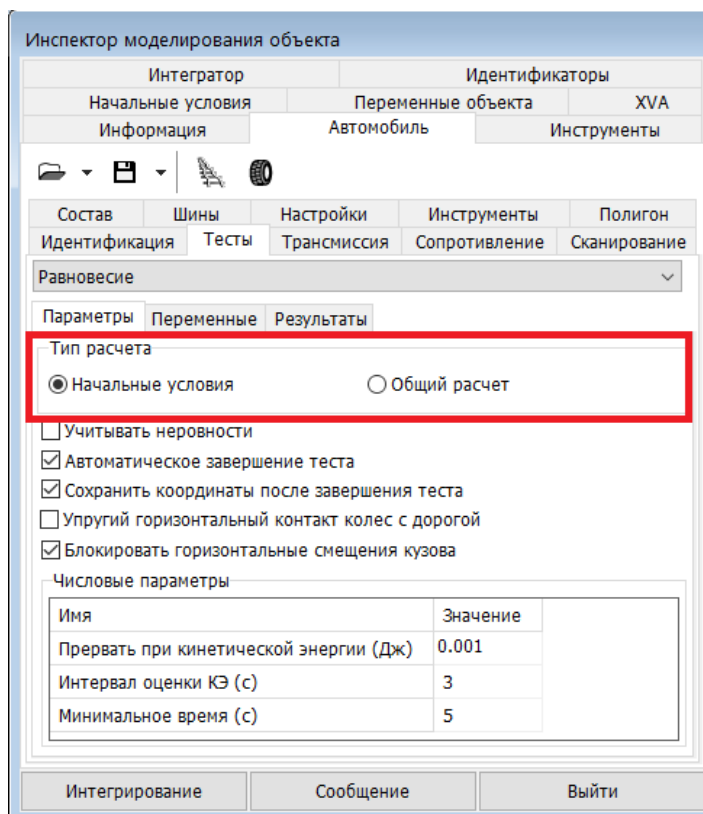


Рис. 1.149. Режимы теста равновесия. Активен тест расчета начальных условий

Данный тест выполняется с неподвижным автомобилем, вращение колес автоматически блокируется, пп. 1.7.9. *Блокировка вращения колес*, 1.9.1.2.2. *Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес*. Для предотвращения горизонтального смещения автомобиля используются два варианта, рис. 1.149:

- Блокировка горизонтального смещения кузова**

При включении данной функции центр масс кузова каждого автомобиля и прицепа блокируется линейной упруго-диссипативной связью в двух горизонтальных направлениях (коэффициент жесткости 1×10^7 Н/м) и при повороте вокруг вертикальной оси (коэффициент жесткости 1×10^6 Нм). Коэффициент диссипации зависит от инерционных параметров кузова и обеспечивает значение доли демпфирования 0.3 по соответствующим степеням свободы. Например, коэффициент диссипации для горизонтальных степеней свободы равен $0.6\sqrt{Kt}$, где t – масса кузова, $K = 1 \times 10^7$ – коэффициент жесткости.
- Упругий горизонтальный контакт колес с дорогой**

При включенном режиме точки контакта колес упруго связываются с опорной поверхностью. Для блокировки используются коэффициенты жесткости в продольном k_x и поперечном k_y направлениях задаваемые в модели шины, см. п. 1.5.2. “*Модель Fiala*”.

Указанные два способа блокировки горизонтального движения являются взаимоисключающими. Рекомендуется задавать только один из них, в зависимости от выбранного режима теста, см. описание режимов ниже.

Тест с неподвижным автомобилем имеет два режима, рис. 1.149:

- [Режим расчета начальных условий автомобиля](#)
- [Расчет общего типа с неподвижным автомобилем](#)

1.9.4.4.1. Режим расчета начальных условий автомобиля

Данный режим, как правило, является первым и необходимым расчетом для каждой модели автомобиля. Перечислим основные цели расчета:

- определить и сохранить начальные значения координат, соответствующие положению равновесия;
- вычислить и сохранить статическую нагрузку и прогибы колес;
- определить значения активных сил и сил реакций в шарнирах в положении равновесия.

Тест выполняется для всех вариантов загрузки автомобиля, а также при изменении параметров подвески, влияющих на расчетные значения в равновесии, см. п. 1.9.4.4.3.

Пример расчета начальных условий легкового автомобиля.

The screenshot shows a software window with several tabs: 'Идентификация', 'Тесты', 'Трансмиссия', 'Сопrotивление', and 'Сканирование'. The 'Тесты' tab is active, and a dropdown menu shows 'Равновесие' selected. Below this, there are sub-tabs: 'Параметры', 'Переменные', and 'Результаты'. The 'Параметры' sub-tab is active. Under 'Тип расчета', there are two radio buttons: 'Начальные условия' (selected) and 'Общий расчет'. Below this, there are several checkboxes: 'Учитывать неровности' (unchecked), 'Автоматическое завершение теста' (checked), 'Сохранить координаты после завершения теста' (checked), 'Упругий горизонтальный контакт колес с дорогой' (unchecked), and 'Блокировать горизонтальные смещения кузова' (checked). At the bottom, there is a table for numerical parameters:

Имя	Значение
Прервать при кинетической энергии (Дж)	0.001
Интервал оценки КЭ (с)	3
Минимальное время (с)	5

Рис. 1.150. Настройки теста расчета начальных условий

Тест считается *успешно завершенным*, если кинетическая энергия автомобиля в течение *интервала оценки* кинетической энергии (КЭ) имеет значение, меньшее, чем заданное пороговое значение, рис. 1.150. По умолчанию пороговое значение КЭ 0.001 Дж, а интервала оценки – 3с.

Тест выполняется для всех вариантов загрузки автомобиля, а также при изменении параметров подвески, влияющих на расчетные значения в равновесии.

Для выполнения теста выполните следующие действия.

1. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Автомобиль/Тесты**, в списке тестов выберите **Равновесие**. Настройте параметры теста.

Учитывать неровности

Обычно этот ключ не используется, поскольку начальное положение автомобиля желательно назначать на ровной горизонтальной поверхности с нулевой вертикальной координатой. Возможна ситуация, когда автомобиль в начальный момент надо установить со смещением вперед в продольном направлении, так что под колесами будут неровности, заданные в файлах (п. 1.9.1.4.1. *Задание файлов неровностей для левой и правой колеи*). В том случае опция включается и равновесие будет найдено с учетом высоты неровностей под каждым колесом. Найденные таким образом начальные условия могут не подходить для других тестов, например, с другими неровностями или с другим начальным положением автомобиля.

Автоматическое завершение теста

При включенной опции тест завершится автоматически в тот момент, когда программа определила, что тест выполнен успешно, то есть КЭ меньше порогового значения на заданном интервале времени. Пользователь может задать ограничение на *минимальное время* выполнения теста, значение по умолчанию 5с, то есть моделирование продолжится до истечения данного интервала.

Сохранить координаты после завершения теста

При включенной опции программа устанавливает рассчитанные значения координат модели в качестве текущих в случае успешного завершения теста. Принятые значения координат доступны на вкладке **Начальные условия** инспектора моделирования. Рекомендуется сохранить эти значения в файл.

Рекомендуется выключить опцию **Упругий горизонтальный контакт колес с дорогой** и включить опцию **Блокировать горизонтальное смещение кузова**.

2. Нажмите кнопку **Интегрирование** для запуска процесса моделирования.

За процессом расчета положения равновесия удобно наблюдать, строя график кинетической энергии. Для этого перед запуском процесса расчета откройте новое графическое окно и перетащите в него мышкой соответствующую переменную, рис. 1.151. Пример графика приведен на рис. 1.152.

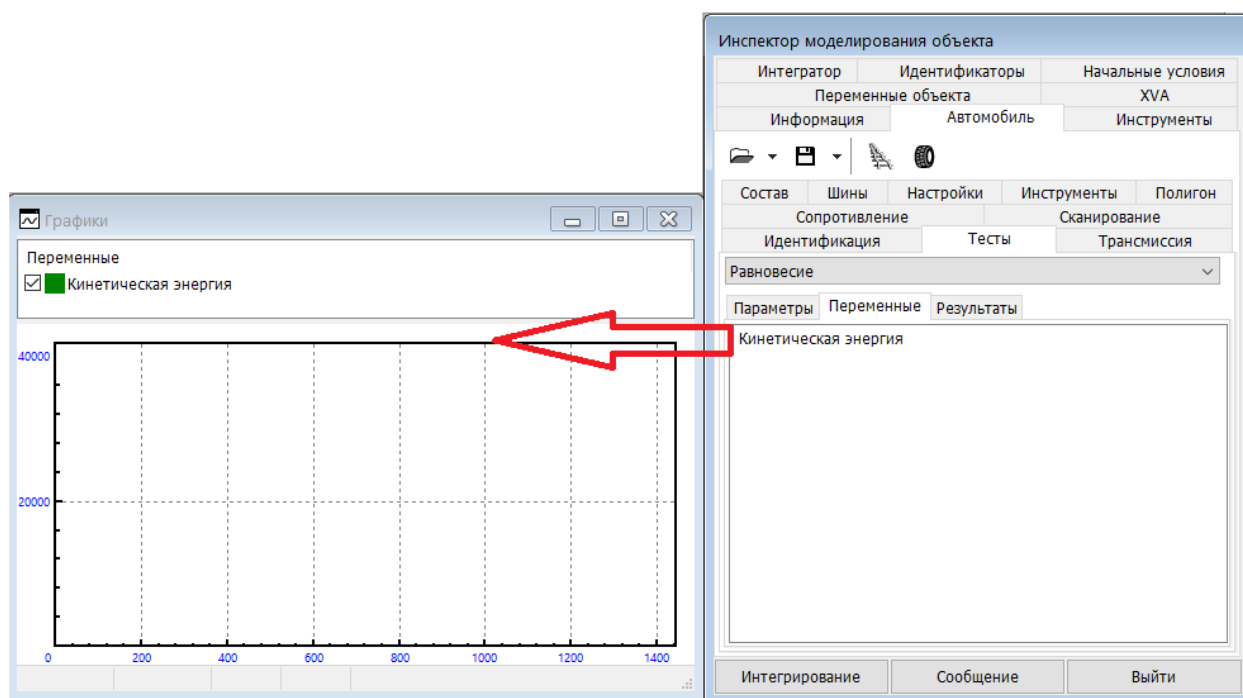



Рис. 1.151. Переменная теста равновесия: кинетическая энергия автомобиля

3. При включенном режиме автоматического завершения теста время моделирования определяется программой, как это описано выше. При успешном выполнении теста появляется сообщение «Процесс интегрирования закончен». В противном случае пользователь может дождаться окончания процесса по истечении заданного интервала моделирования, а также принудительно прервать процесс с помощью клавиши Esc или по кнопке  в окне параметров процесса, рис. 1.153.

После окончания численного моделирования появится окно **Режим паузы процесса моделирования**. В этом режиме текущие значения координат можно записать в файл *.xv для дальнейшего использования, рис. 1.154. В частности, этот файл можно прочитать на вкладке **Начальные условия** и установить нулевые значения скоростей, как это показано в правой части рис. 1.154. Однако, если включен режим **Сохранить координаты после завершения теста**, то при успешном завершении теста начальные условия будут назначены автоматически.

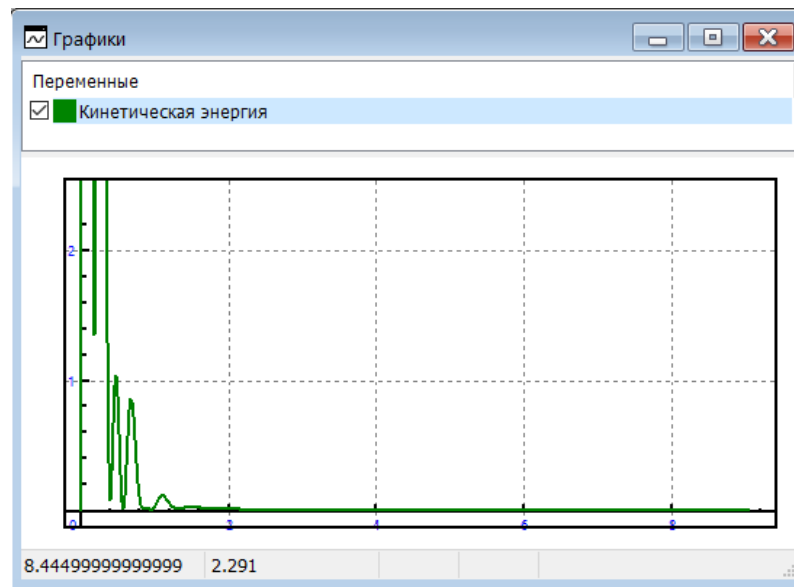


Рис. 1.152. Пример графика кинетической энергии в зависимости от времени при расчете начальных условий

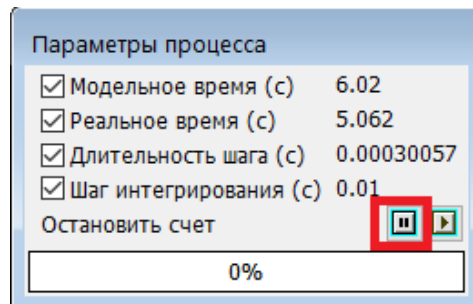


Рис. 1.153. Кнопка режима паузы

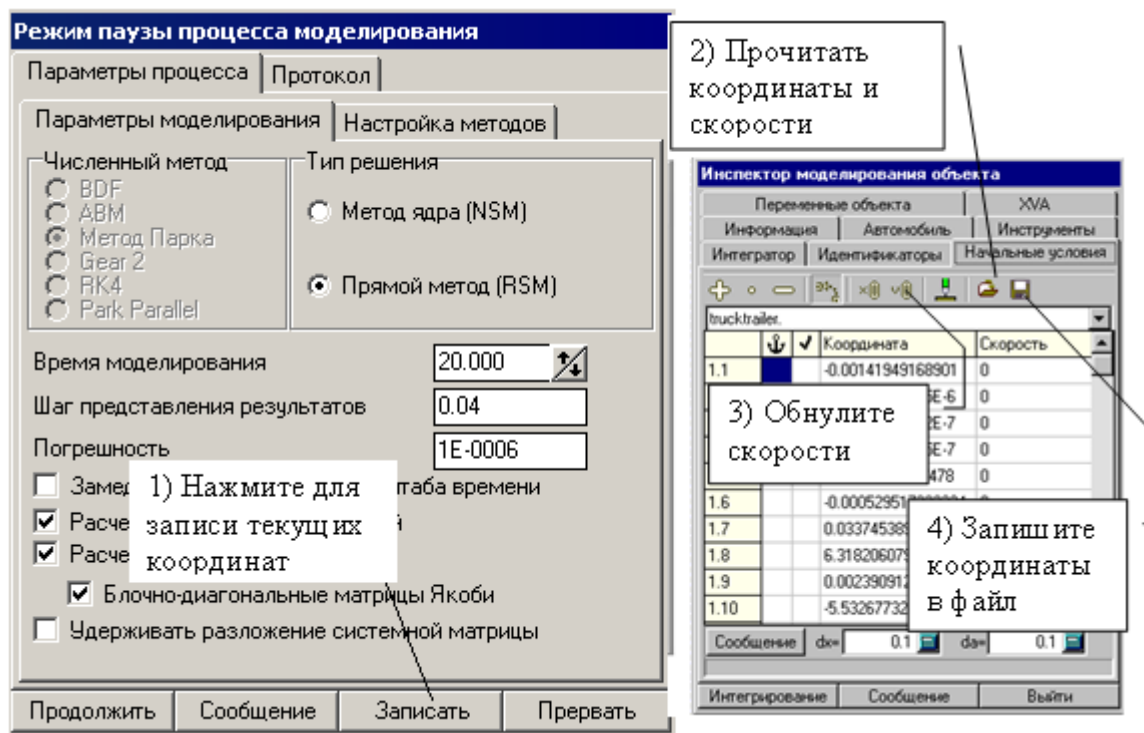


Рис. 1.154. Положение равновесия как начальные условия

4. В **Инспекторе паузы** нажмите кнопку **Прервать**, см. рис. 1.154 слева.

В случае успешного завершения теста вам будет предложено принять результаты в качестве стандарта, рис. 1.155. Речь идет о статическом прогибе каждой шины и о нагрузках на шины в положении равновесия. Эти данные необходимы для выполнения динамических тестов с моделью автомобиля. Рассчитанные и принятые в качестве стандарта значения отображаются на вкладке **Автомобиль | Шины**, рис. 1.156 и сохраняются в файле настроек модели автомобиля *.car.

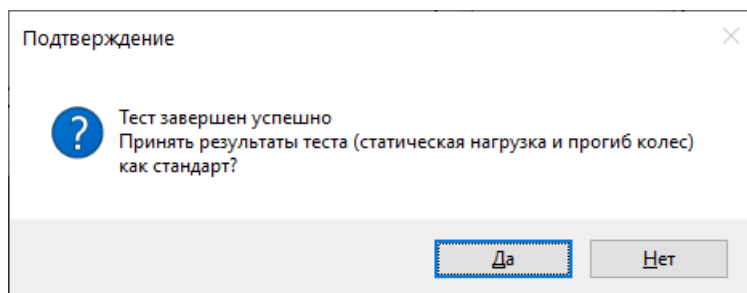


Рис. 1.155. Окно успешного завершения расчета

5. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Начальные условия**. При необходимости прочитайте файл начальных условий, созданный в п. 3, и принудительно установите значения всех скоростей на ноль, см. рис. 1.154 справа. В любом случае рекомендуется создать файл с рассчитанными равновесными значениями координат.

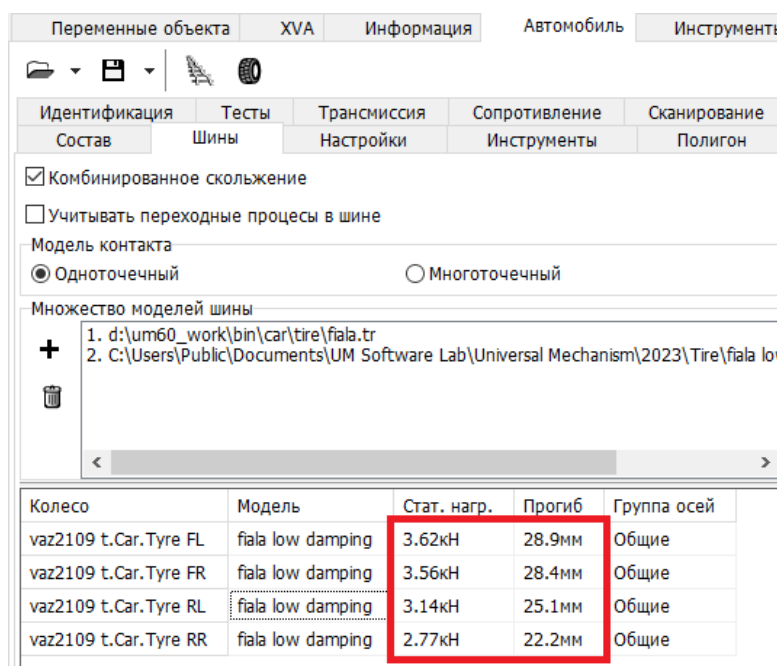


Рис. 1.156. Сохраненные результаты статического расчета взаимодействия шин с дорогой

6. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Автомобиль/Тесты/Результаты**. Результаты нахождения положения равновесия включают только что рассчитанные значения статических усилий и деформаций шин, см. рис. 1.157. Если не принять результаты расчета по запросу на рис. 1.155, то можно получить аналогичный результат, нажав на кнопку **Принять как стандарт**.

Эти данные будут в дальнейшем использоваться программой для определения начальной скорости вращения колес по радиусу нагруженного колеса и статических значений нагрузки на колесо в модели водителя.

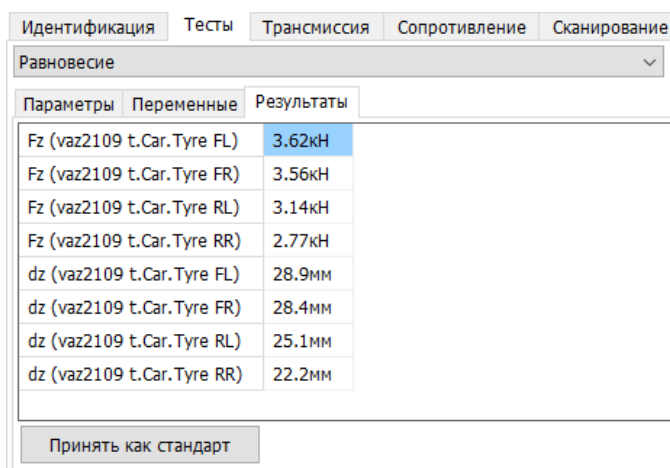


Рис. 1.157. Результаты выполнения теста равновесия

Начальная угловая скорость колес рассчитывается по заданной скорости движения автомобиля v_0 , радиусу колеса в положении равновесия $r_w - dz$:

$$\omega_0 = \frac{v_0}{r_w - dz}$$

1.9.4.4.2. Расчет общего типа с неподвижным автомобилем

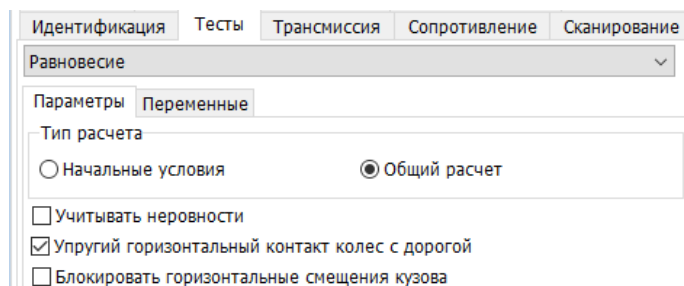


Рис. 1.158. Режим исследования свойств неподвижного автомобиля

В данном режиме можно исследовать динамические свойства неподвижного автомобиля. Перечислим некоторые задачи, относящиеся к данному типу.

- Отклик на силовое воздействие, например, на гармоническое или ступенчатое возмущение.
- Отклик на кинематическое возмущение, например, поворот руля или регулировка схождения и развала.

Перед выполнением теста требуется привести модель в равновесное состояние, как это описано в предыдущем пункте.

В режиме общего расчета с неподвижным автомобилем рекомендуется использовать опцию **Упругий горизонтальный контакт колес с дорогой** и отключить **блокировку горизонтального смещения кузова**.

Для выполнения исследований, как правило, требуется внесение дополнительных элементов в модель автомобиля: силовых элементов для моделирования возмущающих воздействий, кинематических элементов для моделирования кинематических возмущений.

1.9.4.4.3. Пример расчета начальных условий легкового автомобиля

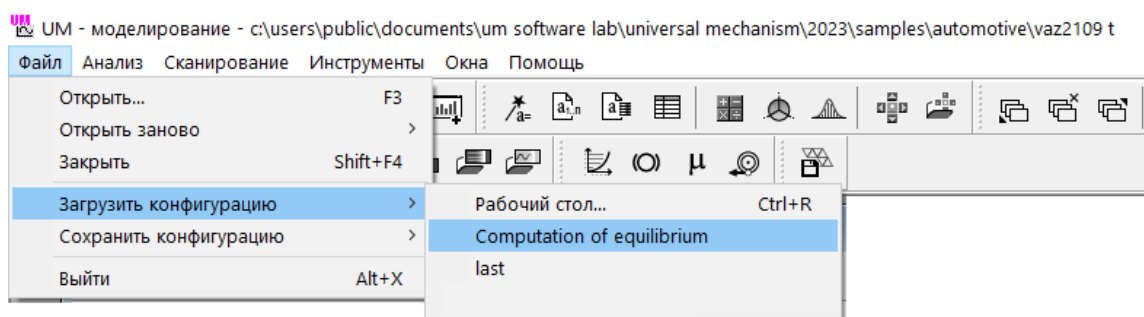


Рис. 1.159. Выбор ранее созданной полной конфигурации модели для расчета начальных условий

Загрузите модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#). Откройте полную конфигурацию модели **Computation of equilibrium** (расчет равновесия), рис. 1.159.

№	Координата	Скорость	Комментарий
1.1	0	0	Car.jCar body 1c
1.2	0	0	Car.jCar body 2c
1.3	0	0	Car.jCar body 3c
1.4	0	0	Car.jCar body 4a
1.5	0	0	Car.jCar body 5a
1.6	0	0	Car.jCar body 6a
1.7	0	0	Car.jStrut rod left-Strut
1.8	0	0	Car.jStrut rod right - St
1.9	0	0	Car.jCar body - Rear-ax
1.10	0	0	Car.jCar body - Rear-ax
1.11	0	0	Car.jCar body - Rear-ax

а)

Колесо	Модель	Стат. нагр.	Прогиб	Группа осей
vaz2109 t.Car.Tyre FL	fiala	0.00кН	0.0мм	Общие
vaz2109 t.Car.Tyre FR	fiala	0.00кН	0.0мм	Общие
vaz2109 t.Car.Tyre RL	fiala	0.00кН	0.0мм	Общие
vaz2109 t.Car.Tyre RR	fiala	0.00кН	0.0мм	Общие

б)

Параметры	Переменные	Результаты
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre FL)		0.00кН
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre FR)		0.00кН
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre RL)		0.01кН
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre RR)		0.00кН
dz (vaz2109 t.Car.Tyre FL)		0.0мм
dz (vaz2109 t.Car.Tyre FR)		0.0мм
dz (vaz2109 t.Car.Tyre RL)		0.0мм
dz (vaz2109 t.Car.Tyre RR)		0.0мм

в)

Рис. 1.160. Значения до выполнения теста: координаты (а), статическая нагрузка и прогибы шин на вкладках параметров шин (б) и результатов теста равновесия (в)

Откройте инспектор моделирования объекта (клавиша F9) и убедитесь, что в этой конфигурации координаты модели, статически нагрузки и прогибы шин принимают нулевые значения, рис. 1.160. Настройки теста равновесия соответствуют рис. 1.150 – стандартные значения.

Запустите процесс моделирования щелчком на кнопке **Интегрирование** инспектора. После сообщения **Процесс интегрирования закончен** программа переходит в режим паузы. Падение кинетической энергии автомобиля в зависимости от времени представлено на рис. 1.161.

Выйдите из режима моделирования щелчком на кнопке **Прервать** окна паузы. Подтвердите принятие результатов как стандарт, рис. 1.155.

Тест успешно завершен. Ознакомьтесь с результатами, рис. 1.162.

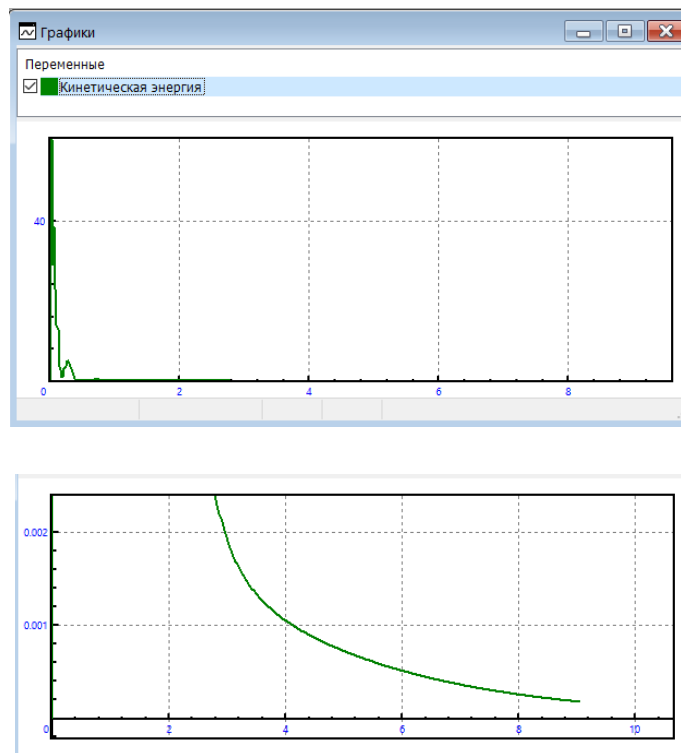


Рис. 1.161. График зависимости от времени кинетической энергии автомобиля

№	Координата	Скорость	Комментарий
1.1	2.60178925628E-5	0	Car.jCar body 1c
1.2	6.08773765632E-6	0	Car.jCar body 2c
1.3	-0.00915359444048	0	Car.jCar body 3c
1.4	-1.35946545781E-5	0	Car.jCar body 4a
1.5	-0.00164504291293	0	Car.jCar body 5a
1.6	-0.00245332641709	0	Car.jCar body 6a
1.7	-0.136299431957	0	Car.jStrut rod left-Strut
1.8	-0.133486498543	0	Car.jStrut rod right - St
1.9	2.05169479792E-6	0	Car.jCar body - Rear-axl
1.10	0.000366911570703	0	Car.jCar body - Rear-axl
1.11	-0.00446279348351	0	Car.jCar body - Rear-axl

а)

Колесо	Модель	Стат. нагр.	Прогиб	Группа осей
vaz2109 t.Car.Tyre FL	fiala	3.59кН	28.7мм	Общие
vaz2109 t.Car.Tyre FR	fiala	3.54кН	28.3мм	Общие
vaz2109 t.Car.Tyre RL	fiala	3.15кН	25.2мм	Общие
vaz2109 t.Car.Tyre RR	fiala	2.82кН	22.5мм	Общие

б)

Параметры	Переменные	Результаты
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre FL)		3.59кН
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre FR)		3.54кН
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre RL)		3.15кН
Fz (vaz2109 t.Car.Tyre RR)		2.82кН
dz (vaz2109 t.Car.Tyre FL)		28.7мм
dz (vaz2109 t.Car.Tyre FR)		28.3мм
dz (vaz2109 t.Car.Tyre RL)		25.2мм
dz (vaz2109 t.Car.Tyre RR)		22.5мм

в)

Рис. 1.162. Результаты выполнения теста: координаты (а), статическая нагрузка и прогибы шин на вкладках параметров шин (б) и результатов теста равновесия (в)

1.9.4.4.4. Пример построения амплитудно-частотной характеристики нелинейных колебаний легкового автомобиля

Рассмотрим пример построения амплитудно-частотной характеристики вынужденных колебаний автомобиля. С использованием теста равновесия рассчитываются колебания с учетом нелинейности сил, то есть колебания являются *нелинейными*. Для построения характеристики будет использован метод скользящей частоты.

Дополнительные элементы в модели автомобиля

Сначала рассмотрим, какие элементы созданы в модели для выполнения данного теста. Загрузите модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#) в программе создания моделей UMInput.exe.

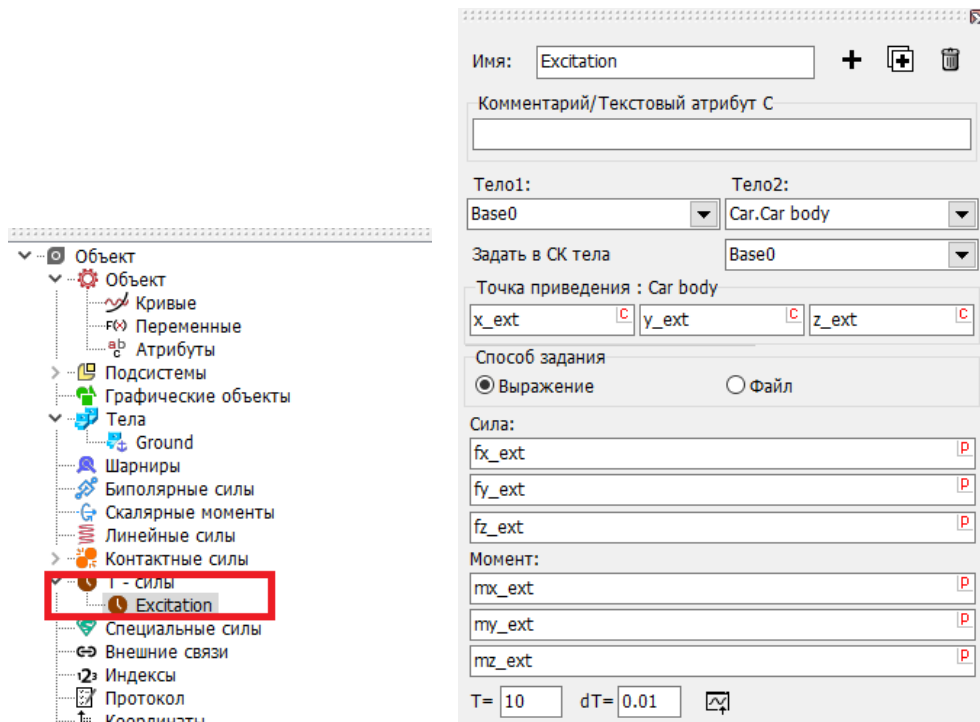


Рис. 1.163. T-сила, задающая возмущающие силы

Введена T-сила *Excitation*, которая будет использована для моделирования возмущающей силы или момента. Сила приложена к кузову. Координаты точки приложения, проекции силы и момента параметризованы идентификаторами. Также в список идентификаторов добавлены:

- ext_ampl – амплитуда возмущения;
- e_ext – темп нарастания частоты в герцах;
- freq0 – стартовое значение частоты в герцах.

Заметим, что в данной модели автомобиля начало отсчета СК, связанной с кузовом, расположено в центре масс кузова. Таким образом, при нулевых координатах точки приложения возмущающая сила приложена к центру масс кузова.

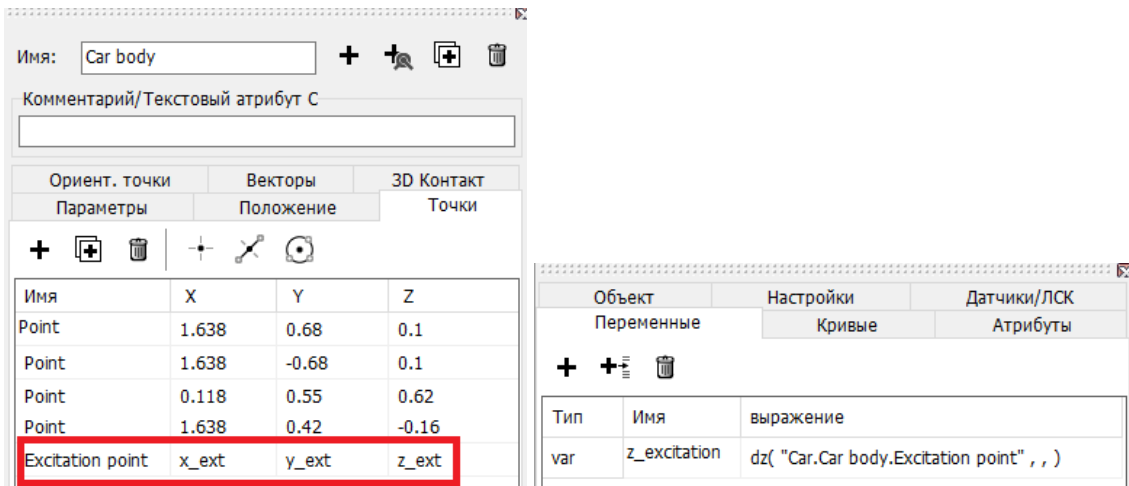


Рис. 1.164. Параметризованная точка связи для кузова и кинематическая переменная, равная ее вертикальной координате

Мы будем строить график вертикального движения точки, к которой приложена возмущающая сила. Для этого к точкам связи кузова добавлена параметризованная точка *Excitation point* (рис. 1.164, слева) и создана кинематическая переменная *z_excitation*, равная вертикальной координате этой точки относительно СК0 (рис. 1.164, справа).

Построение частотных характеристик в программе моделирования

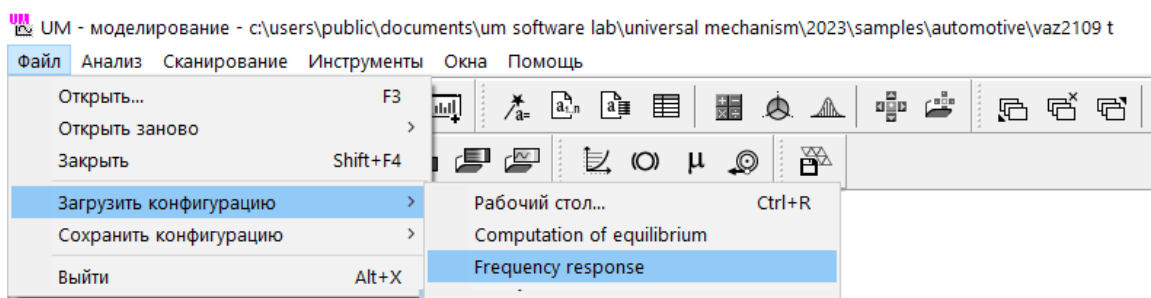


Рис. 1.165. Выбор ранее созданной полной конфигурации модели для расчета частотных характеристик

Загрузите модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#) в программе моделирования динамики UMSimul.exe. Откройте полную конфигурацию модели **Frequency response** (частотная характеристика), рис. 1.165. Модель уже приведена в положение равновесия. В тесте равновесия в данной конфигурации установлен режим общего расчета, рис. 1.158.

1) Назначение идентификатору возмущающей силы функции времени

В прочитанной конфигурации вертикальной силе, заданной идентификатором *fz_ext*, назначено гармоническое возмущение со скользящей частотой

$$f_x_{ext} = ext_ampl * \sin(2 * \pi * (Freq0 + e_ext * t / 2) * t).$$

Для этого назначения использован аппарат управления идентификаторами. Предварительно в мастере переменных создана переменная - функция времени, соответствующая

правой части этого выражения. Покажем, как можно открыть в модели эту переменную, рис. 1.166.

- Откройте вкладку **Идентификаторы | Управление идентификаторами** инспектора моделирования объекта.
- Двойным щелчком левой кнопкой мыши на строке с идентификатором **fz_ext** откройте окно задания управления идентификатором.
- Щелчком правой кнопки мыши на поле именем переменной **Excitation (t)** вызовите всплывающее меню.
- Выполните команду **Открыть ординату в мастере переменных**.

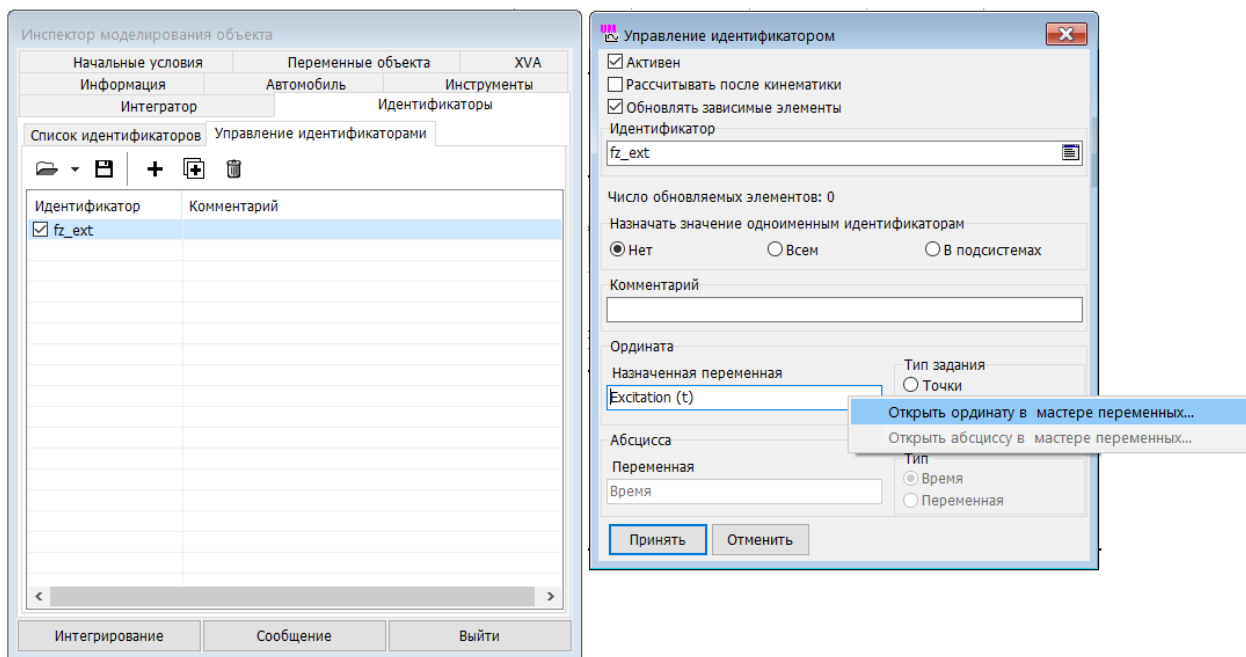



Рис. 1.166. Последовательность действий для открытия переменной в мастере

Поясним, каким образом создавалась эта переменная, рис. 1.167. Сначала на вкладке **Идентификаторы** мастера переменных в контейнер помещены переменные-идентификаторы e_ext, ext_ampl, Freq0 (кстати, сейчас, то есть на этапе разбора переменной, а не ее создания, эти переменные можно послать в контейнер с помощью кнопки  в левой части вкладки **Выражение**, рис. 1.167). Затем построчно запрограммирована нужная функция. Созданную переменную следует перетащить мышкой в соответствующее поле окна **Управление идентификатором**, рис. 1.166.

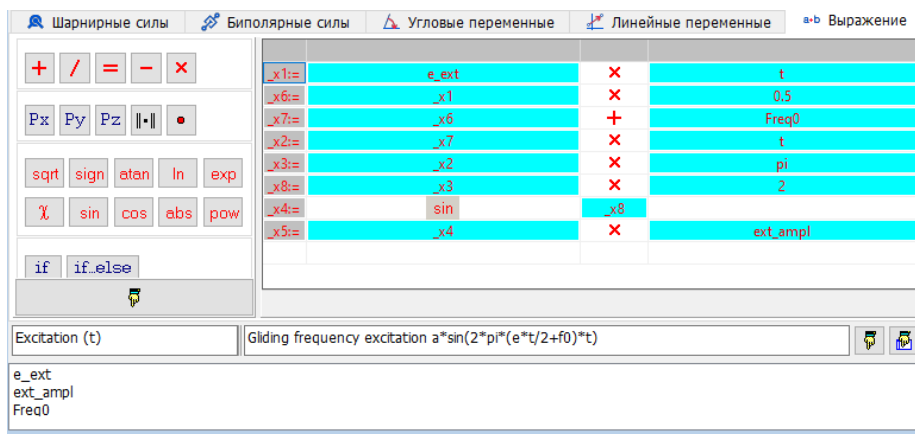


Рис. 1.167. Переменная, открытая в мастере

2) Назначение координат точки приложения силы

Точке приложения возмущающей силы назначены координаты (1, 0,5, 0) в системе координат кузова, рис. 1.168, рис. 1.169.

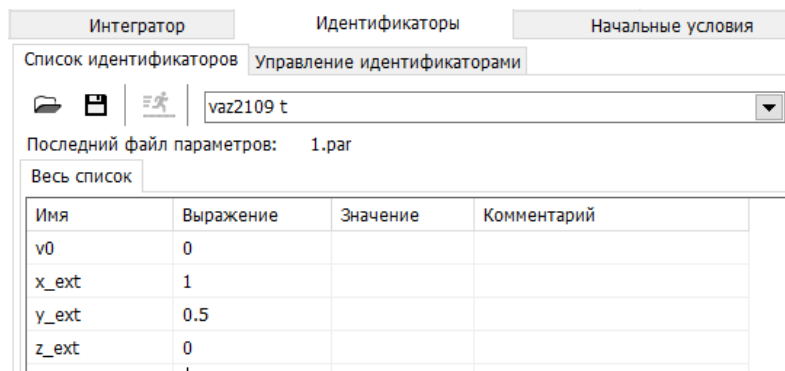


Рис. 1.168. Значения идентификаторов

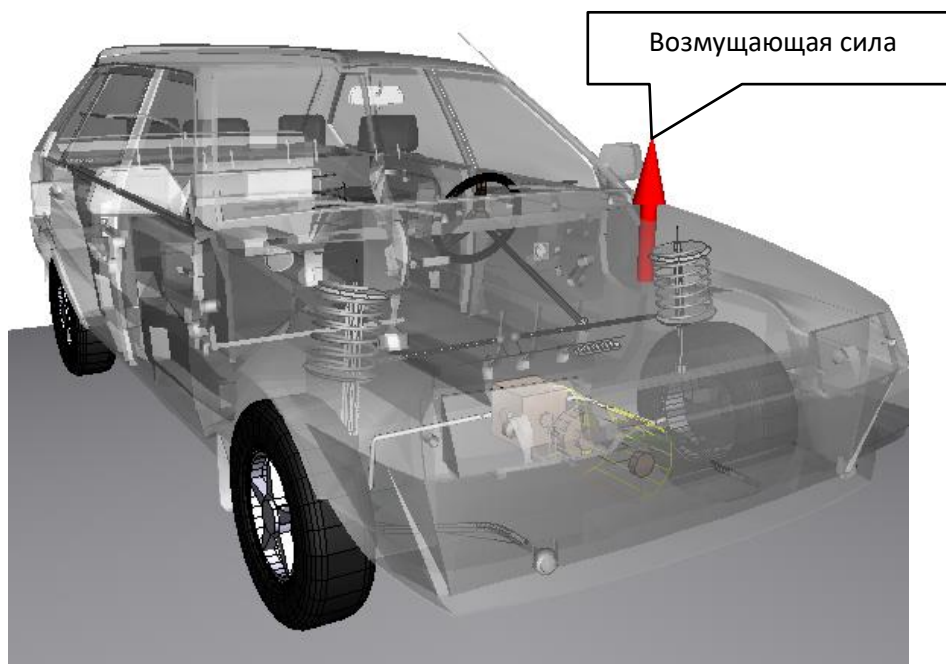


Рис. 1.169. Вынужденные колебания автомобиля

3) Создание переменных для построения графиков

На графиках частотных характеристик в примере строятся следующие переменные:

dz_excitation - перемещение точки приложения возмущающей силы в вертикальном направлении относительно положения равновесия, заданного идентификатором z0, рис. 1.170, сверху;

om:x(Car.Car body) - угловая скорость кузова относительно оси X;

om:y(Car.Car body) - угловая скорость кузова относительно оси Y.

Графики переменных строятся в зависимости от частоты колебаний в герцах, заданной переменной **Frequency (Hz)**, e_ext*t+Freq0, рис. 1.170, снизу.

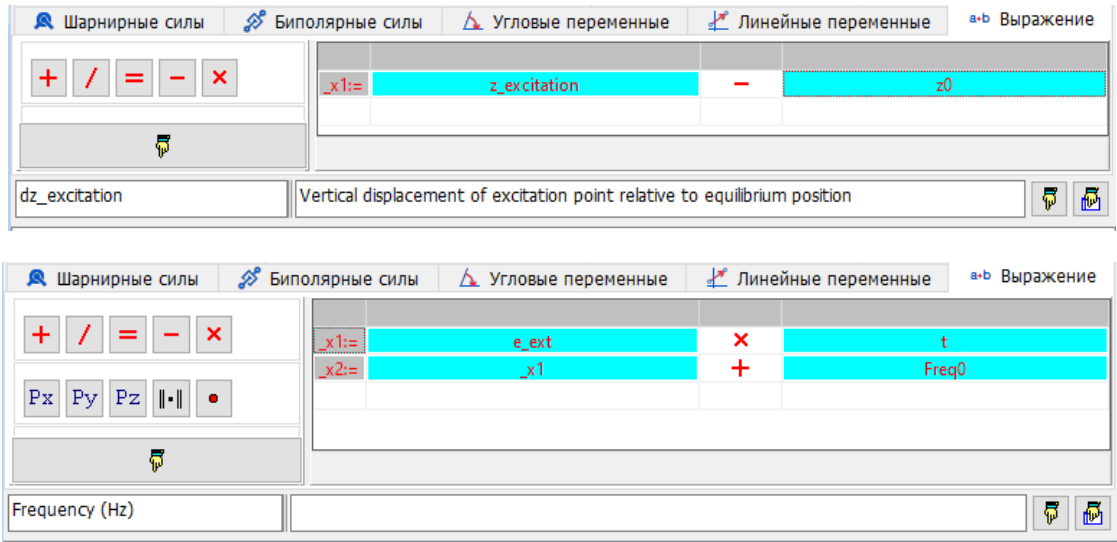


Рис. 1.170. Перемещение точки приложения силы по вертикали и зависимости частоты в герцах от времени

4) Расчет статического значения вертикальной координаты точки приложения силы

Для корректного вычисления переменной dz_excitation требуется назначить идентификатору z0 значение координаты точки приложения силы в положении равновесия. Для этого выполнение вспомогательный расчет при ext_ampl=0, z0=0. Полученное при интегрировании значение переменной на графике dz_excitation = 0.68225 назначено идентификатору z0.

5) Назначение параметров вынужденных колебаний

e_ext	0.02		
ext_ampl	500		
Freq0	0		
z0	0.68225		Static Z coordinate of excitation

В списке идентификаторов назначены значения темпа роста скорость 0.02 Гц/с и амплитуды возмущающей силы ext_ampl =500 Н.

6) Расчет вынужденных колебаний

Запустите процесс интегрирования при заданных значениях идентификаторов. Зависимости переменных от частоты колебаний представлены на рис. 1.171. Обратите внимание, что по оси абсцисс отложена переменная Frequency (Hz), а время моделирования составило 300с.

Амплитудным характеристикам соответствуют огибающие полученных кривых. В режиме паузы скопируйте рассчитанные переменные как статические.

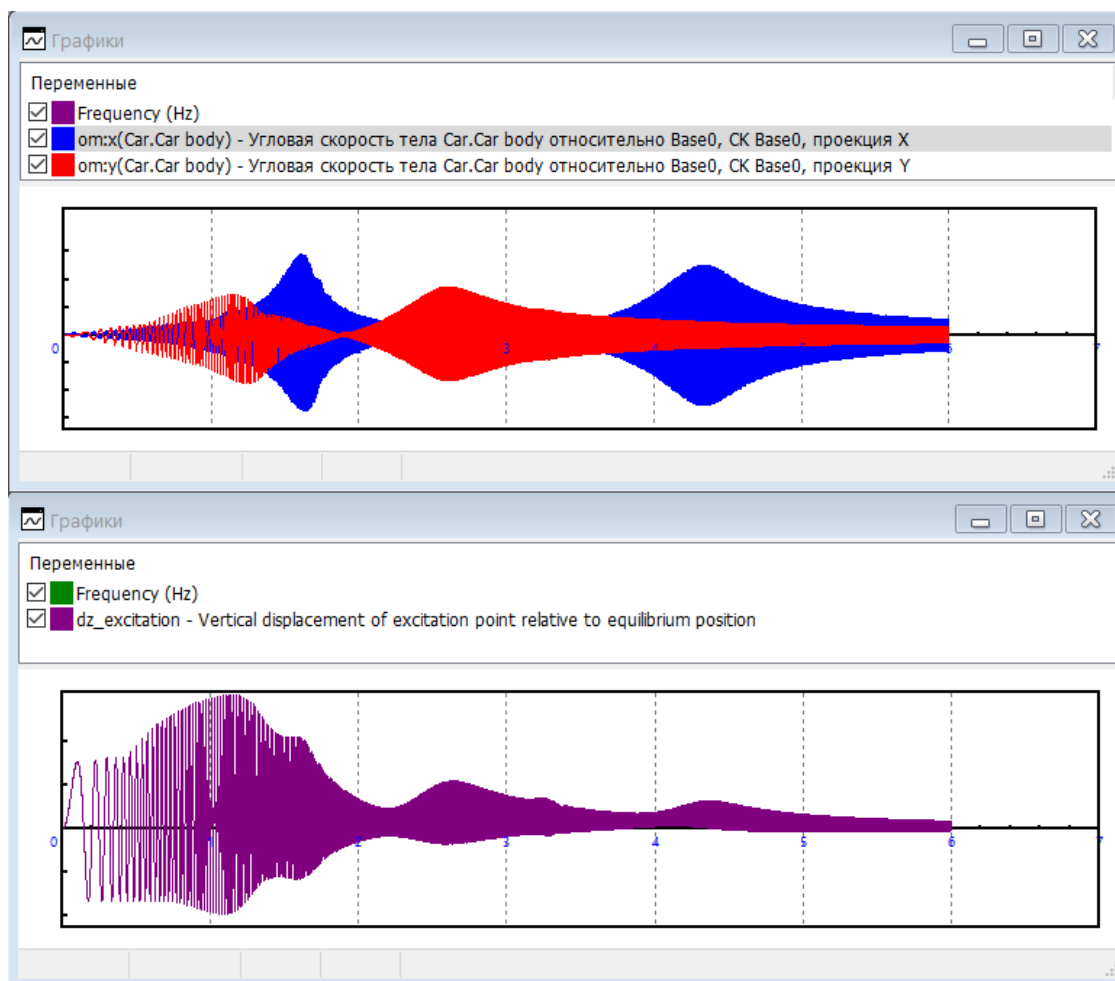



Рис. 1.171. Результаты расчета вынужденных колебаний

7) Сравнение с линейным анализом

Закройте инспектор моделирования и откройте окно линейного и статического анализа с помощью команды основного меню **Анализ | Статический и линейный анализ**. Настройки анализа должны содержать включенные блокировки вращения колес и контакта колес с дорогой, рис. 1.172, слева.

Рассчитайте собственные частоты модели на вкладке **Частоты/Корни**, рис. 1.172, справа. Часть низших частот присутствует на амплитудно-частотной характеристике на рис. 1.171.

Откройте вкладку **Линейные вибрации**. Настройки вибрационного анализа точно соответствуют поставленному выше численному эксперименту. Щелчком на кнопке  выполните расчет и скопируйте рассчитанные переменные в соответствующие графические окна. Сравнение частотных характеристик, полученных путем нелинейного (интегрирование нелинейных уравнений) и линейного анализа приведено на рис. 1.174. Результаты линейного вибрационного анализа указаны маркерами. Значительное отличие, главным об-

разом, связано с сильно нелинейной диссипативной характеристикой амортизаторов, рис. 1.175.

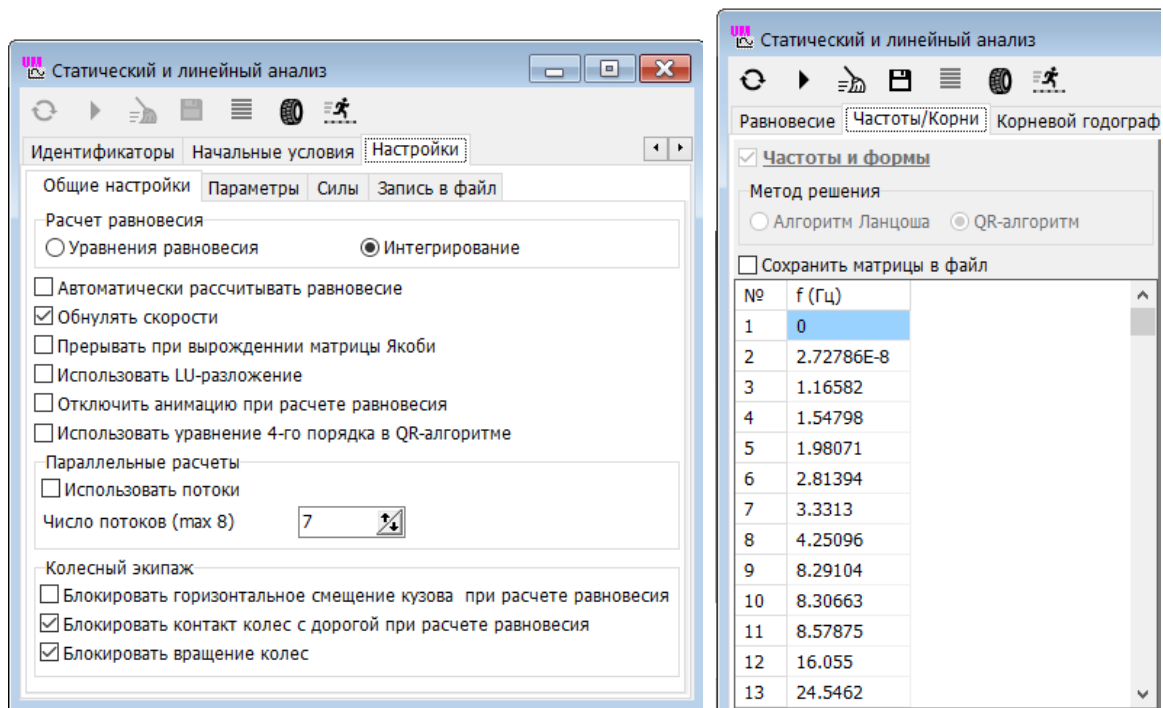


Рис. 1.172. Настройки линейного анализа и собственные частоты модели vaz2109 T

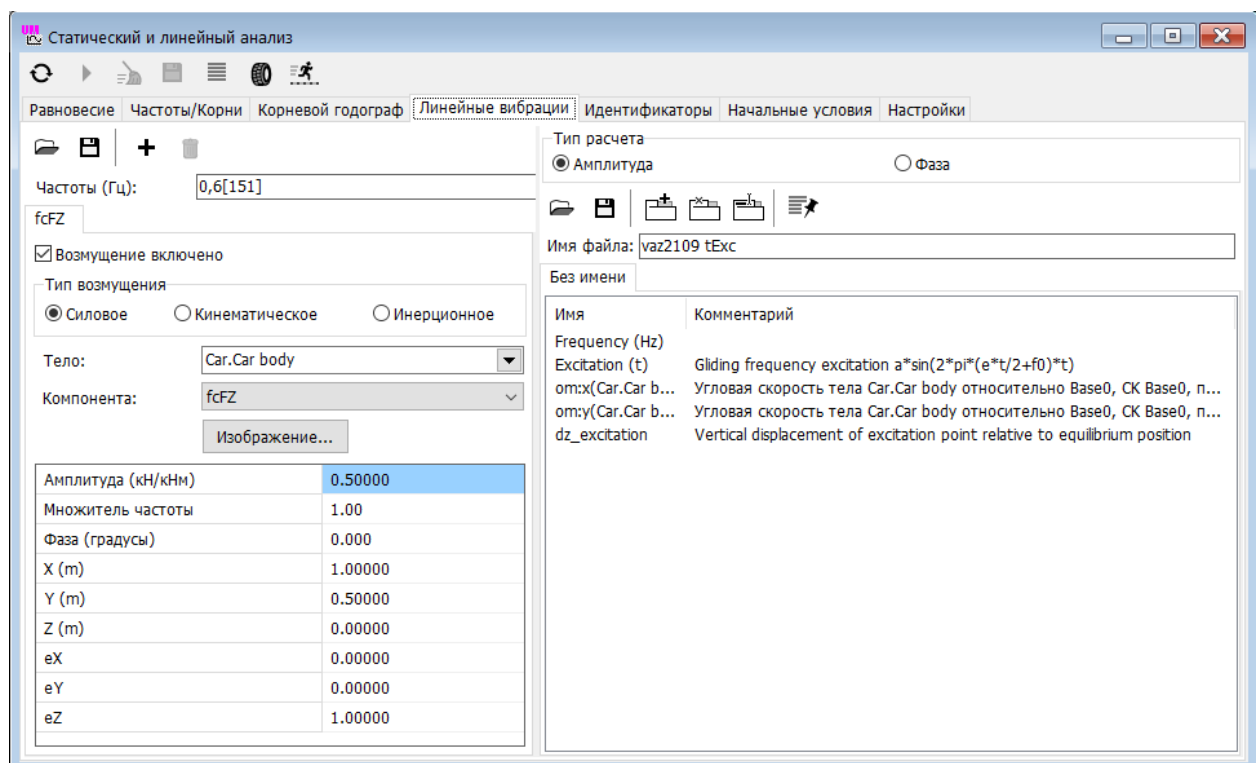
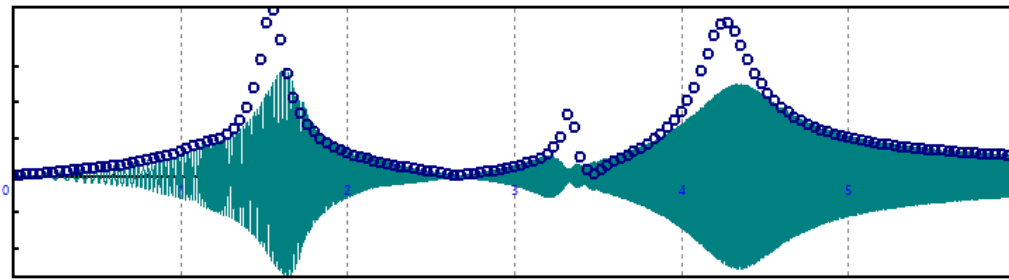
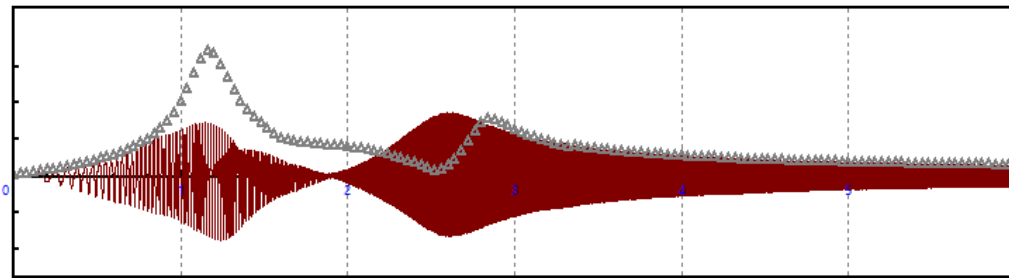


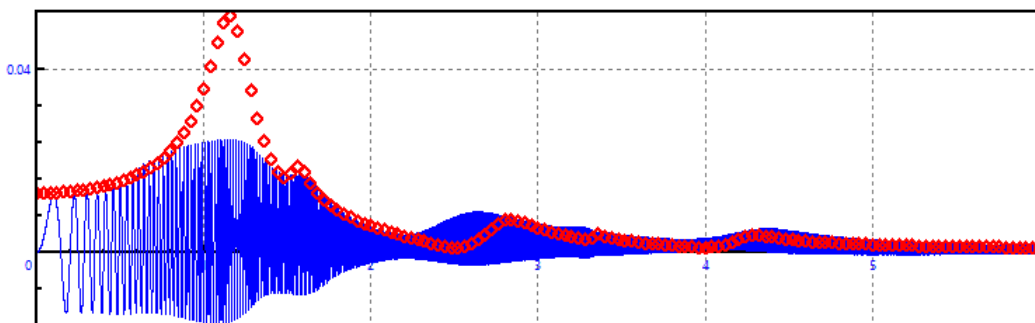
Рис. 1.173. Настройки линейного вибрационного анализа



Переменная от: $x(\text{Car.Car body})$



Переменная от: $y(\text{Car.Car body})$



Переменная $dz_excitation$

Рис. 1.174. Сравнение нелинейных частотных характеристик с линейным анализом

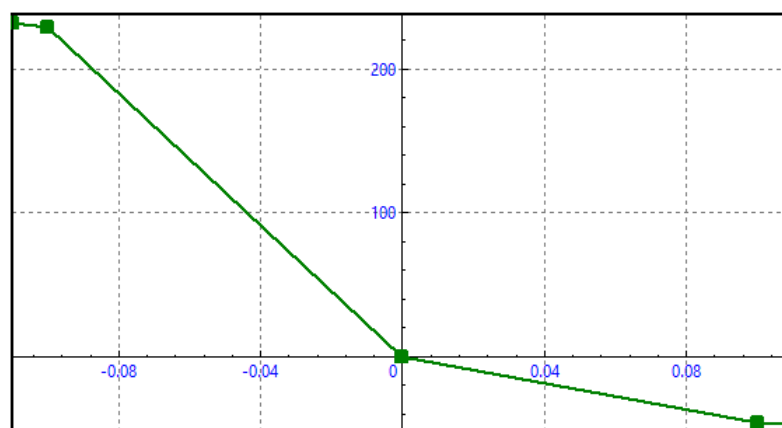


Рис. 1.175. Диссипативная характеристика амортизаторов модели Vaz2109 T

8) **Дополнительные и альтернативные возможности**

- **Гармоническое возмущение с постоянной частотой**

Если задать значение нулевое значение идентификатору темпа роста частоты $e_{ext}=0$, то можно получить обычное гармоническое возмущение с частотой, задаваемой идентификатором $Freq0$. Например, при $Freq0=2$ имеем гармоническое возмущение с частотой 2Гц. Таким образом можно получить те же результаты, что и в тесте «Вертикальная прокатка», задавая нужную точку приложения силы. Аналогичным образом можно сформировать условия теста «Горизонтальная прокатка», назначая возмущение идентификатору поперечной силы f_{y_ext} .

- **Назначение возмущения другой компоненте силы или момента**

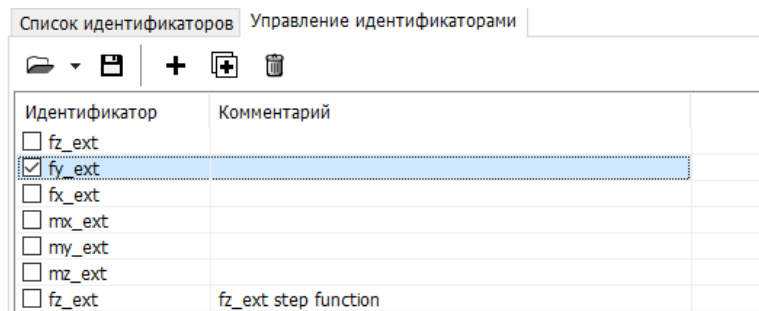


Рис. 1.176. Активно управление идентификатором f_{y_ext}

Если назначить ту же зависимость от времени назначить другим идентификаторам, соответствующим компонентам возмущающей силы и момента, то можно моделировать возмущение от нужной проекции, выключая остальные. Например, на рис. 1.176 показан случаю, когда созданы возмущения для всех шести компонент, но включено только поперечная сила.

- **Другие типы возмущения**

Наряду с гармонически возмущением, можно реализовать другие типы возмущений, например, ступенчатое возмущение, рис. 1.177, рис. 1.178.

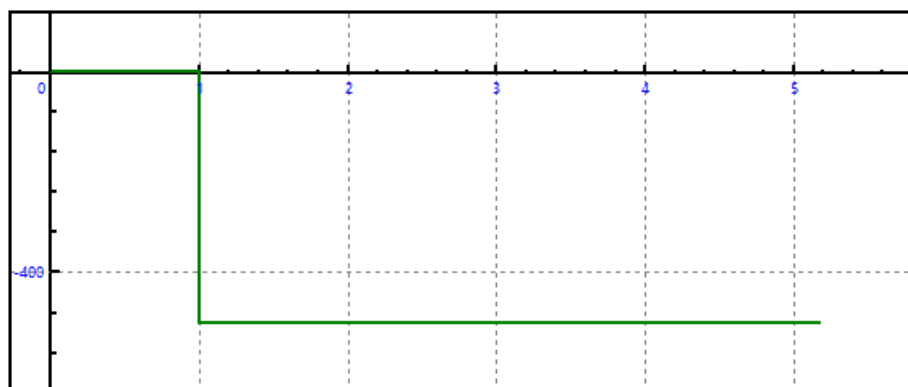


Рис. 1.177. Ступенчатое возмущение

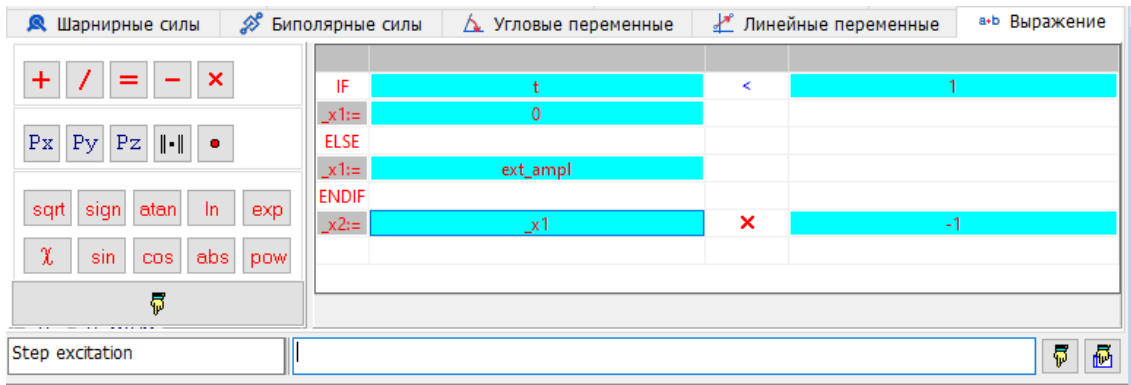


Рис. 1.178. Переменная, реализующая ступенчатое возмущение

• **Альтернативные способы задания функций возмущения**

Выше в данном разделе мы рассмотрели только способ задания функций времени с помощью мастера переменных (рис. 1.167, рис. 1.170, рис. 1.178). Есть два более простых способа описания этих функций в программе ввода.

Первый способ – непосредственное задание компонент силы как функций времени, рис. 1.179.

Второй способ – создание переменных - функций времени в программе ввода, рис. 1.180. Для доступа к эти переменным в программе моделирования используется мастер переменных, рис. 1.181. Переменная назначается идентификатору стандартным образом на вкладке управления идентификаторами.

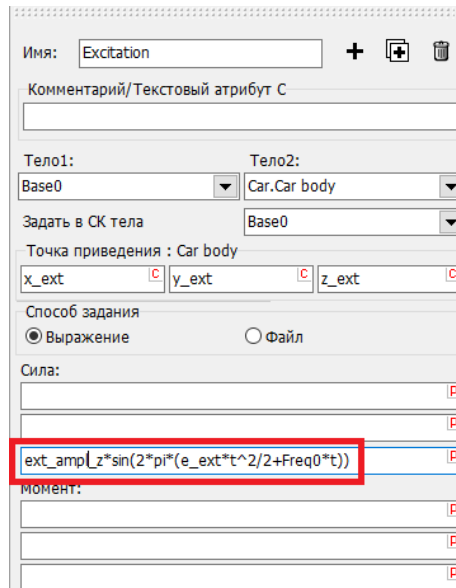


Рис. 1.179. Задание проекции силы как функции времени в программе ввода

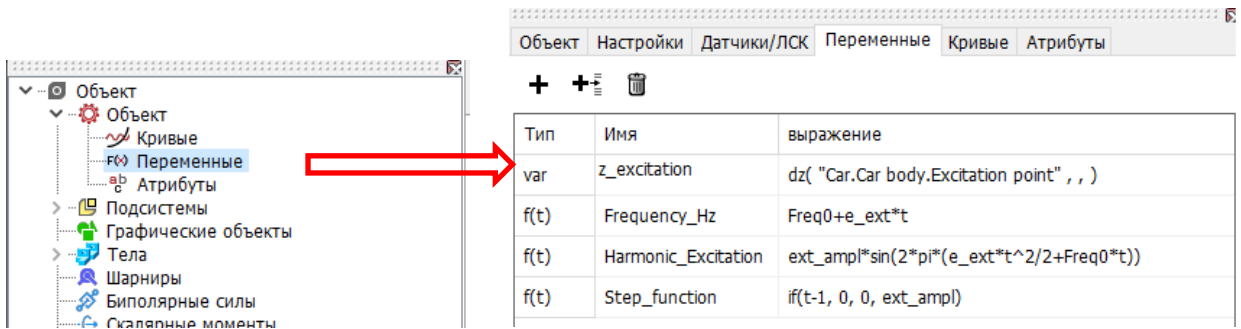


Рис. 1.180. Задание переменных - функции времени в программе ввода

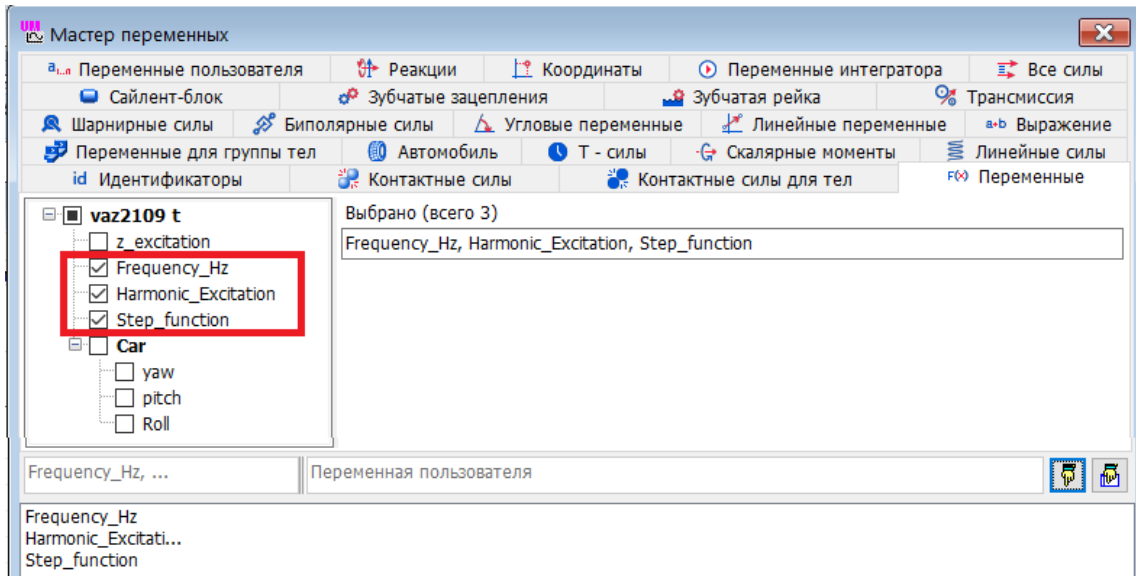


Рис. 1.181. Доступ к переменным, добавленным к модели программе ввода

1.9.4.5. Поворот рулевого колеса на месте

Тест позволяет вычислить зависимость угла поворота колес от угла поворота рулевого колеса, и, в частности, выяснить передаточное число системы рулевого управления.

Тест предполагает:

- идентификацию блокировки вращения колес (п. 1.9.1.2.2. “Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес”);
- значения двух численных параметров.

Тест стартует из положения равновесия автомобиля и заключается в поворачивании рулевого колеса по формуле

$$\alpha_w = a_w \sin 2\pi f_w t,$$

где a_w, f_w – амплитуда в радианах и частота в Герцах. Эти параметры вводятся на закладке **Тесты/Параметры**, рис. 1.182.

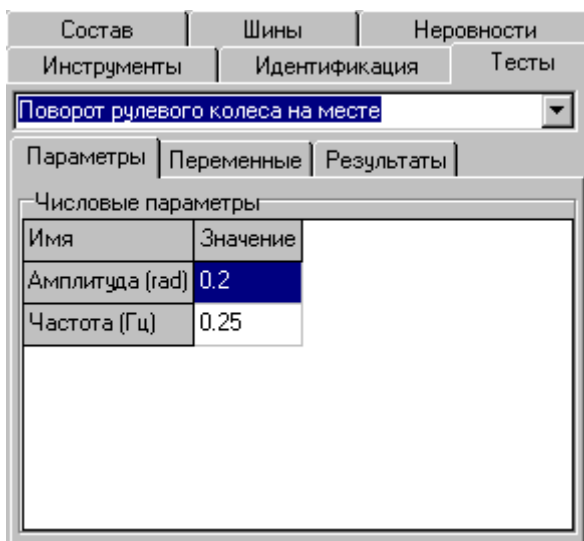


Рис. 1.182. Параметры теста поворота рулевого колеса на месте

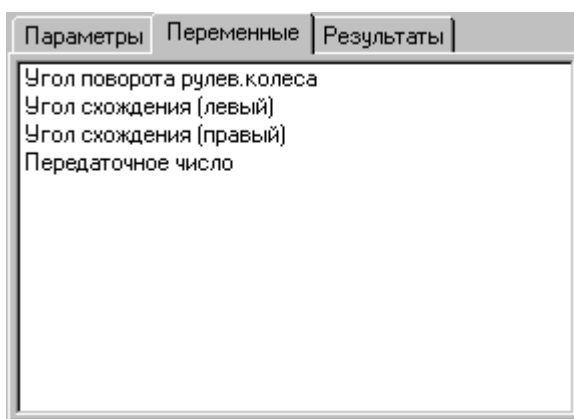


Рис. 1.183. Переменные теста

На закладке «**Переменные**» доступны четыре стандартные переменные для этого теста:

- угол поворота рулевого колеса a_w ;
- угол поворота (схождения) каждого колеса δ_l, δ_r ;
- Переменная, которая может быть использована в качестве оценки передаточного отношения:

$$i_w^e = \begin{cases} \frac{2\alpha_w}{\delta_l - \delta_r}, & |\delta_l - \delta_r| > 0.001 \\ 0, & |\delta_l - \delta_r| \leq 0.001 \end{cases}$$

Рис. 1.183, рис. 1.184 иллюстрируют построение переменных теста.

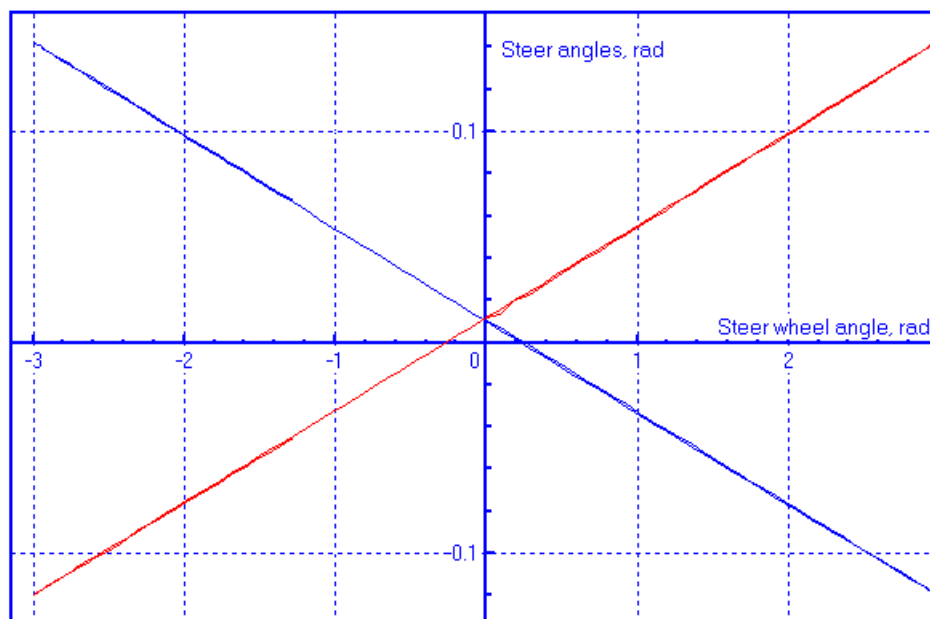


Рис. 1.184. Угол схождения колес в зависимости от угла поворота рулевого колеса

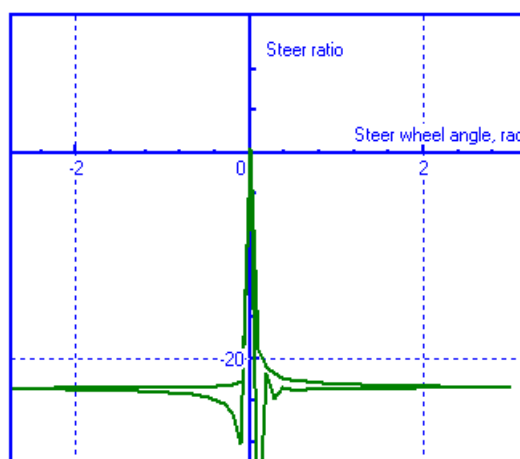


Рис. 1.185. Передаточное отношение i_w^e от угла поворота рулевого колеса

После окончания теста передаточное отношение вычисляется как

$$i_w = \frac{2a_w}{\delta_{l,max} - \delta_{l,min}}$$

где $\delta_{l,max}$, $\delta_{l,min}$ – минимальное и максимальное значения угла поворота левого колеса, a_w – амплитуда вращения рулевого колеса.

Значение передаточного отношения системы рулевого управления – необходимый параметр для модели водителя. Для того, чтобы программа запомнила данное вычисленное значение и использовала его далее в модели водителя нажмите кнопку **Принять как стандарт**, см. рис. 1.186.

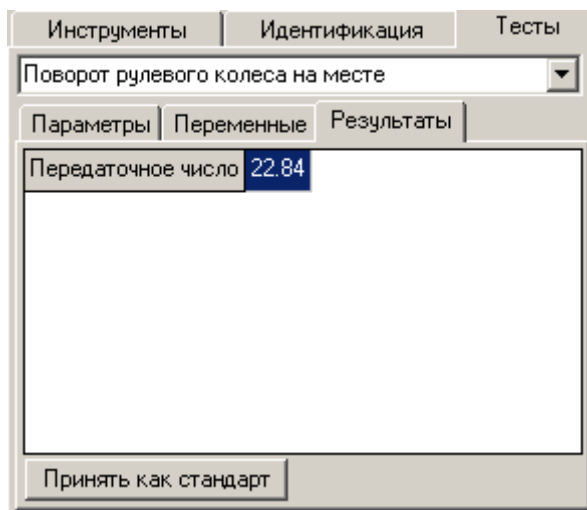


Рис. 1.186. Результаты теста поворота колес: передаточное число

1.9.4.6. Управление без обратной связи

Этот тест используется для прохождения маневров без обратной связи, когда угол поворота рулевого колеса задается как функция времени или пройденного пути. Параметры теста представлены на рис. 1.187.

Для выполнения теста требуется:

- описание моделей шин, см. п. 1.5 «*Контакт шины с дорогой*»;
- идентификация системы рулевого управления, см. п. 1.9.1.2.3. *Идентификация рулевого управления*;
- идентификация системы управления скоростью продольного движения, см. п. 1.9.1.2.1. *Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью*;
- идентификация управления трансмиссией (для моделей с трансмиссией), п. 1.9.1.2.5. «*Идентификаторы управления трансмиссией*»;
- задание поворота рулевого колеса как функции времени или пройденного пути;
- задание режима продольного движения, п. 1.9.3 «*Режимы продольного движения и управление скоростью*»;
- неровности пути, в случае если включен флажок **Учитывать неровности**.

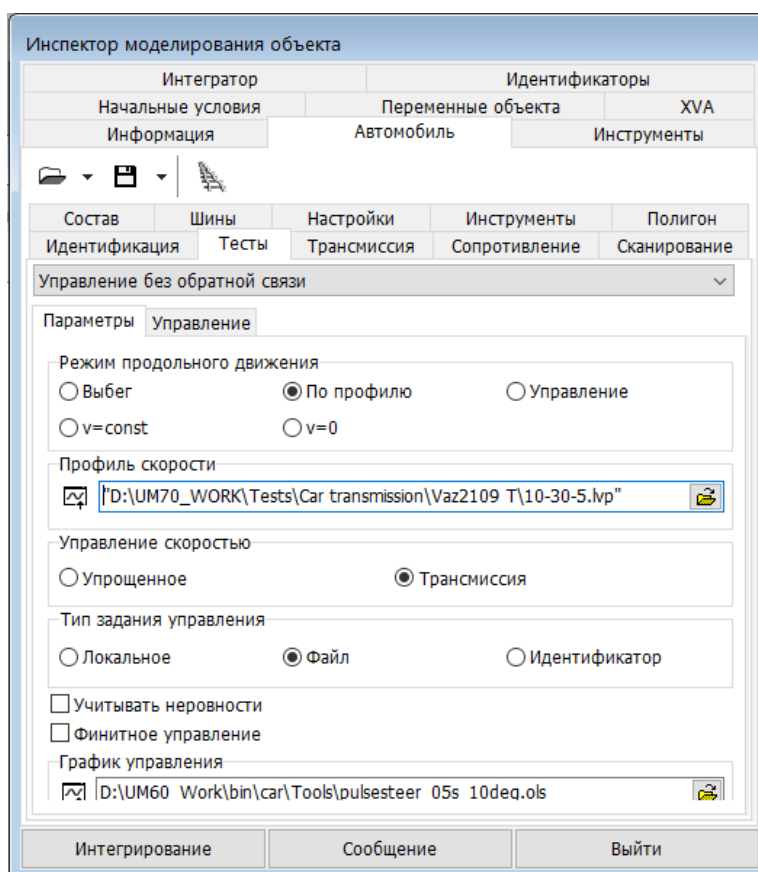



Рис. 1.187. Параметры теста “управление без обратной связи”

- **Учитывать неровности**, если флажок включен, то тест будет проведен с учетом неровностей пути.

- **Финитное управление**, если флажок включен, тогда по достижении конечного момента времени или последнего значения по пути рулевое колесо (фактически заданная шарнирная координата) становится свободным и его положение более не контролируется.

Тип задания управления.

- **Локально заданное управление**: график поворота рулевого колеса задается на закладке **Инструменты**, п. 1.9.1.3.1. «Задание графиков поворота рулевого колеса и скорости движения».
- **Файл**: график поворота руля задается файлом *.ols, рис. 1.187, для загрузки файла используется кнопка  в группе **График управления**, рис. 1.187. Для создания файла используется вкладка **Инструменты**, п. 1.9.1.3.1. «Задание графиков поворота рулевого колеса и скорости движения».

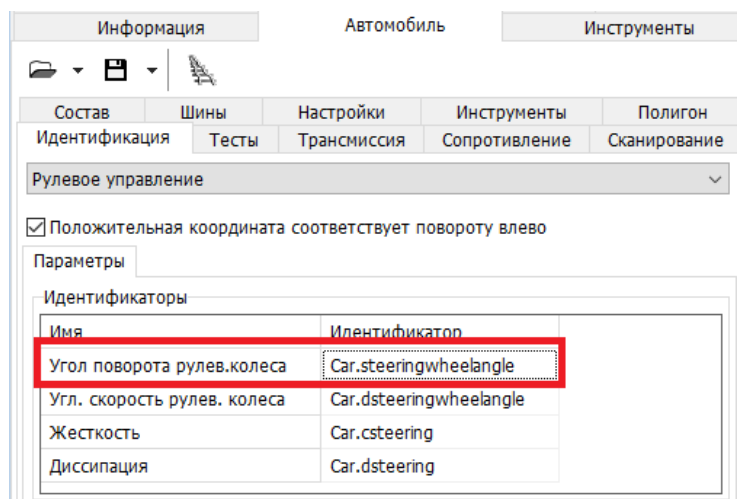


Рис. 1.188. Назначение идентификатора углу поворота руля

- **Идентификатор**: угол поворота руля задается через идентификатор угла, назначаемый при идентификации модели автомобиля, см. п. 1.9.1.2.3. «Идентификация рулевого управления». Значение угла задается идентификатору в радианах. Для изменения значения идентификатора угла в процессе моделирования можно использовать несколько приемов, описанных ниже.
 1. Инструмент **управления идентификаторами**; в этом случае идентификатор может быть функцией времени или других переменных, рис. 1.189. Описание инструмента можно найти в [Главе 4](#), п. "Управление идентификаторами".
 2. Инструмент **Пульт управления** дает возможность пользователю создать окно для интерактивного изменения значения идентификатора, см. [Главу 4](#), п. "Пульт управления".
 3. Использование интерфейсов, например, с Matlab/Simulink, см. [Главу 5](#), п. "Создание и использование внешних библиотек".

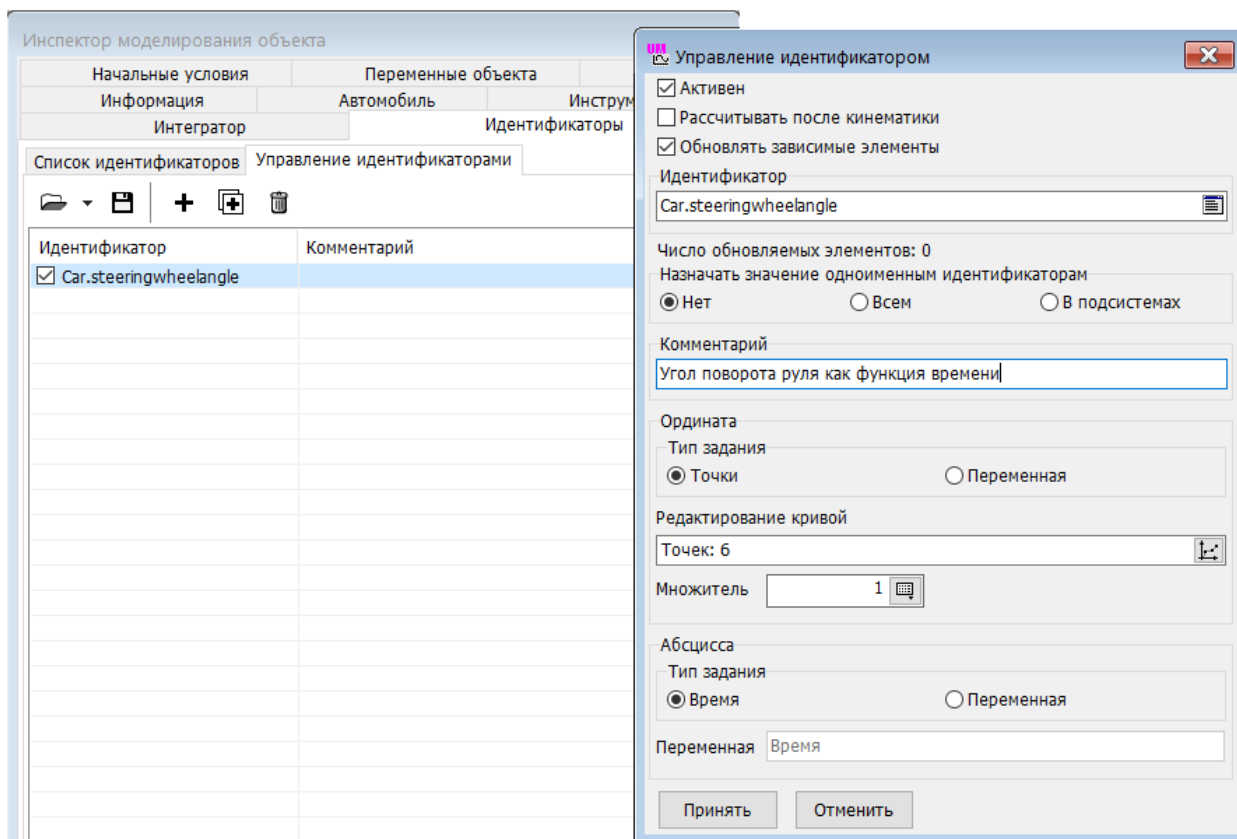


Рис. 1.189. Задание угла поворота руля через инструмент управления идентификаторами

1.9.4.7. Тест с водителем

1.9.4.7.1. Общие параметры теста

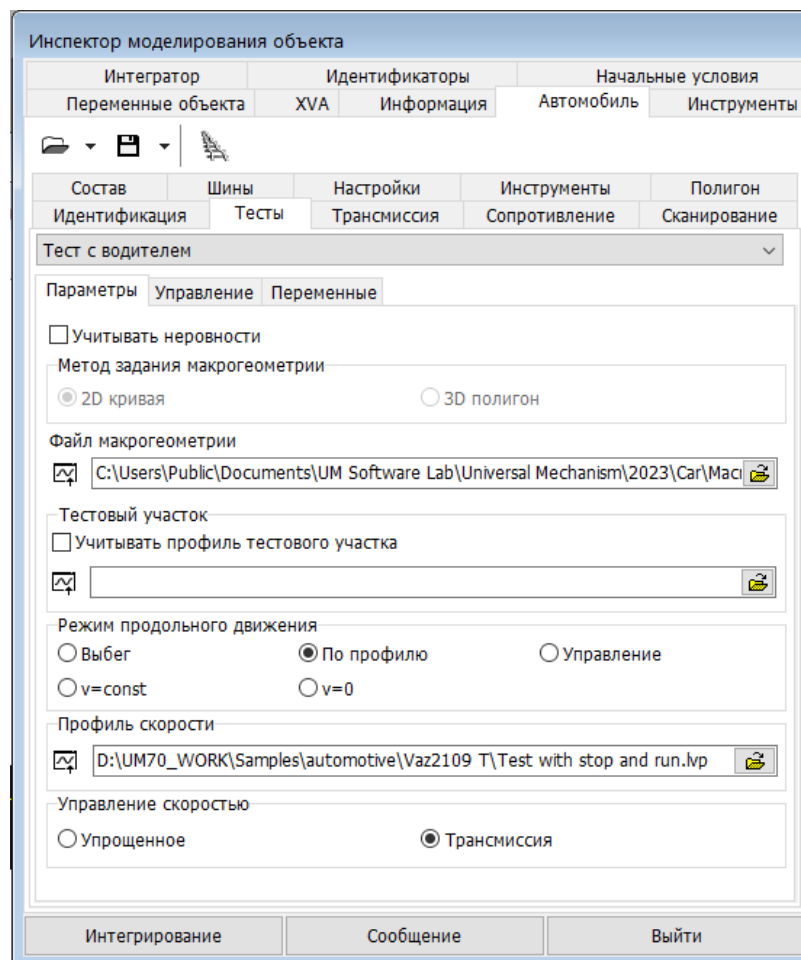


Рис. 1.190. Тест с водителем, модель с трансмиссией

Тест с водителем служит для моделирования маневров с заданной траекторией движения автомобиля, при этом для управления автомобилем используется одна из реализованных моделей водителя.

Для выполнения теста требуется:

- описание моделей шин, см. п. 1.5 «*Контакт шины с дорогой*»;
- идентификация системы рулевого управления, см. п. 1.9.1.2.3. «*Идентификация рулевого управления*»;
- идентификация системы управления скоростью продольного движения, см. п. 1.9.1.2.1. «*Идентификация параметров упрощенного управления продольной скоростью*»;
- идентификация управления трансмиссией (для моделей с трансмиссией), п. 1.9.1.2.5. «*Идентификаторы управления трансмиссией*»;
- задание режима продольного движения, п. 1.9.3 «*Режимы продольного движения и управление скоростью*»;
- неровности пути, в случае если включен флажок **Учитывать неровности**, п. 1.3.3.3. «*Выбор микропрофиля пути*»;

- при необходимости создания файла профиля тестового участка, пп. 1.9.1.3.2. «Создание файлов профилей тестового участка дороги», 1.9.4.7.2.3. «Использование профилей тестового участка»;
- выбор метода задания макрогеометрии: плоская кривая (2D Кривая) или файл триангулированной поверхности (3D полигон), описывающий желаемый путь.

Выполнение теста прерывается в следующих случаях:

- достигнуто заданное время моделирования; в этом случае появляется инспектор паузы процесса моделирования и при увеличении времени моделирования выполнение теста можно продолжить;
- достигнут конец кривой задания траектории движения с учетом расстояния прогноза; в этом случае продолжить выполнение теста нельзя и выполнение автоматически прерывается.

УМ поддерживает две модели водителя, позволяющего автомобилю следовать заданной траектории движения: модель MacAdam'a и модель с предвидением, п. 0». На рис. 1.191 представлены их параметры.

Модель с предвидением позволяет управлять движение автомобиля как вперед, так и назад (ЗХ), при этом значения параметров управления разные, см. рис. 1.191. Первая группа параметров определяет управление при движении автомобиля вперед, а вторая, помеченная аббревиатурой ЗХ – назад.

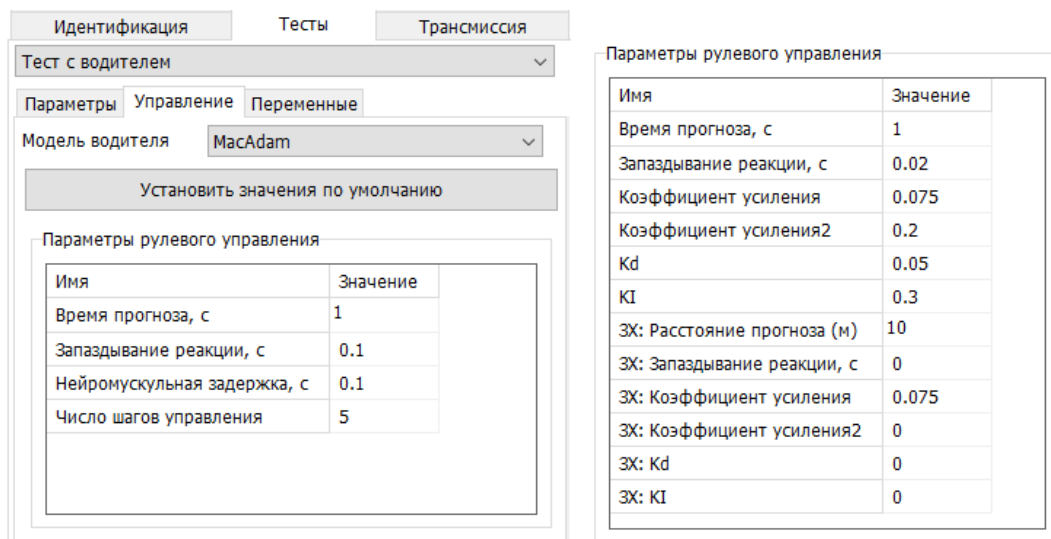


Рис. 1.191. Параметры моделей водителя МакАдама (слева) и с предвидением (справа)

Укажем особенности управляемого движения автомобиля задним ходом.

- Управляемое движение задним ходом в кривой можно использовать только для автомобилей без прицепа или полуприцепа. Для автомобилей с прицепом алгоритм управления не дает устойчивого отслеживания траектории.
- Задний ход соответствует движению с отрицательной скоростью. В частности, идентификатор задания скорости v_0 может принимать отрицательные значения.

- Кривая макрогеометрии должна быть спроектирована с учетом движения назад. Следует помнить, что моделирование возможно только в пределах заданной траектории; моделирование останавливается, если расстояние от автомобиля до границы траектории меньше, чем расстояние прогноза, как при движении вперед, так и назад.

Замечание 1. Модель МакАдама разработана для автомобиля без прицепа или полуприцепа. Для моделирования автомобилей с прицепами или полуприцепами рекомендуется использовать модель с предвидением, при этом часто необходимо корректировать значения параметров управления, чтобы добиться устойчивого движения.

Замечание 2. Модель с предвидением второго порядка использует производную от отклонения от заданной траектории, поэтому при задании кривых макрогеометрии настоятельно рекомендуется соединять точки сплайнами дугами окружностей.

На закладке **Переменные** приведены следующие стандартные переменные для данного теста, см. рис. 1.192:

- **Координата X** – декартова координата X автомобиля;
- **Координата Y** – декартова координата Y автомобиля;
- **Угол поворота рулевого колеса**, рад; для формирования переменной следует задать номер соответствующей координаты, см. п. 1.9.1.2.3. «Идентификация рулевого управления»;
- **Расчетное управление** – рассчитанное значение угла поворота рулевого колеса до прохождения нейромускульного фильтра, рад;
- **Управление водителя** – рассчитанное значение угла поворота рулевого колеса после нейромускульного фильтра;
- **Отклонение от заданной траектории** – отклонение реальной траектории движения автомобиля от желаемой; отклонение рассчитывается для точки кузова между передними управляемыми колесами автомобиля.
- **Сила сопротивления** – сила суммарного сопротивления движению автомобиля, включающая аэродинамическое сопротивление и трение качения шин, приведенное к силе сопротивления.

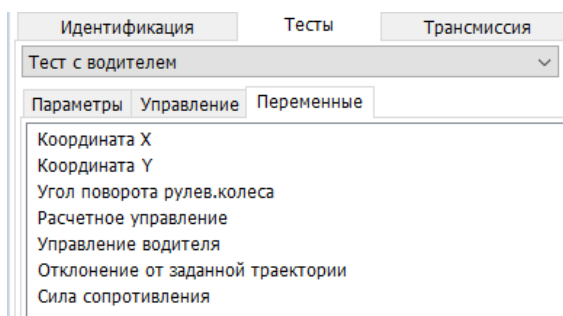


Рис. 1.192. Список стандартных переменных для теста с водителем

1.9.4.7.2. Особенности теста с водителем при задании траектории 2D кривой

Тест с водителем является основным динамическим тестом для модели автомобиля, позволяющим исследовать поведение машины при прохождении криволинейных участков дороги с учетом вертикального профиля местности. При выполнении теста пользователь получает информацию о нагруженности узлов модели и может оценить удовлетворение нормам, выполнить анализ долговечности. Моделирование используется для оценки удовлетворения машины стандартным тестам, таким как смена полосы, движение в кривой малого радиуса, устойчивость к опрокидыванию, преодоление стандартных препятствий (лежачий полицейский, бордюр, повреждение дорожного покрытия) и т.д.

1.9.4.7.2.1. Выбор файла макрогеометрии

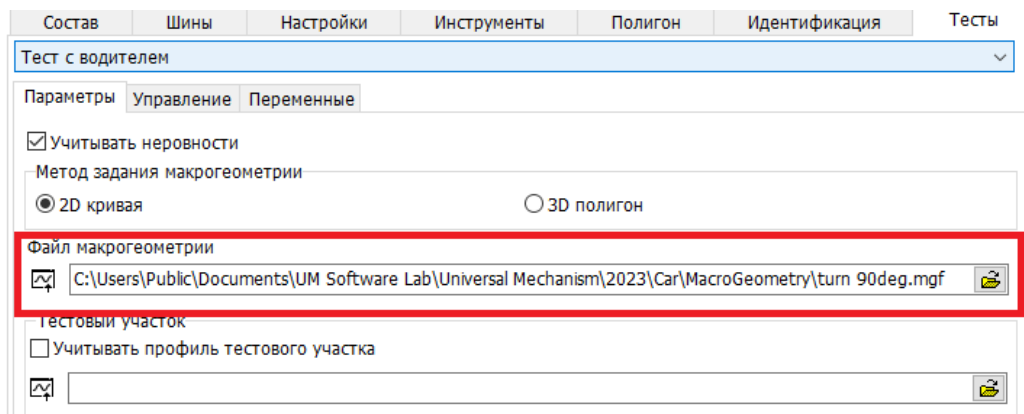



Рис. 1.193. Выбранный файл макрогеометрии

Для выполнения теста следует задать файл макрогеометрии щелчком по кнопке , рис. 1.193. Пользователь может использовать файлы из стандартной поставки или создать самостоятельно, п. 1.3.1. «Задание макропрофиля с помощью кривых».

1.9.4.7.2.2. Учет микропрофиля дороги

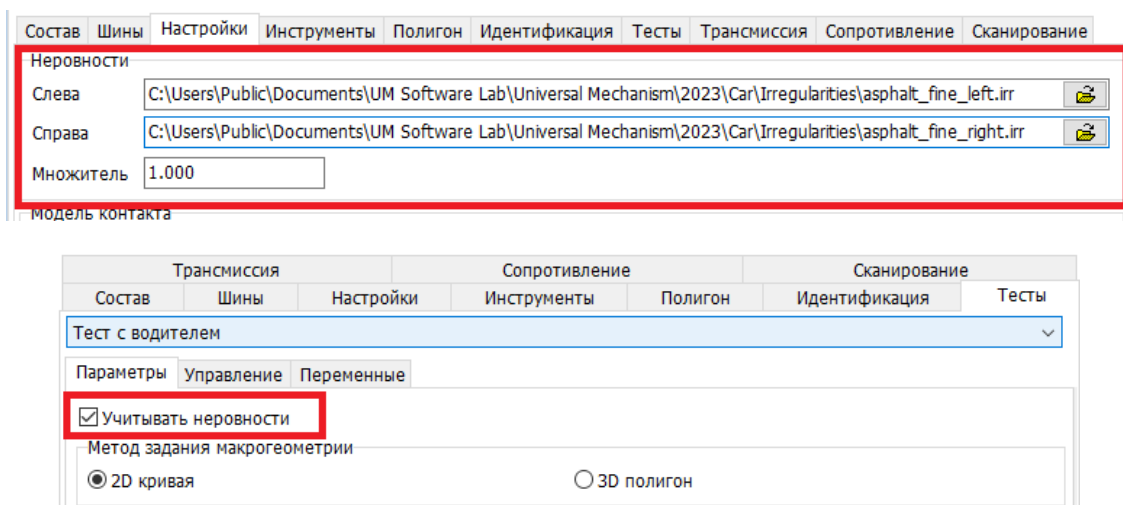


Рис. 1.194. Учет микропрофиля дороги

В отличие от триангулированной поверхности, включающей микронеровности в геометрию поверхности, в данном случае микропрофиль задается с использованием файлов неровностей, п. 1.3.3.3. «Выбор микропрофиля пути». Файлы назначаются на вкладке **Настройки**, рис. 1.194.

1.9.4.7.2.3. Использование профилей тестового участка

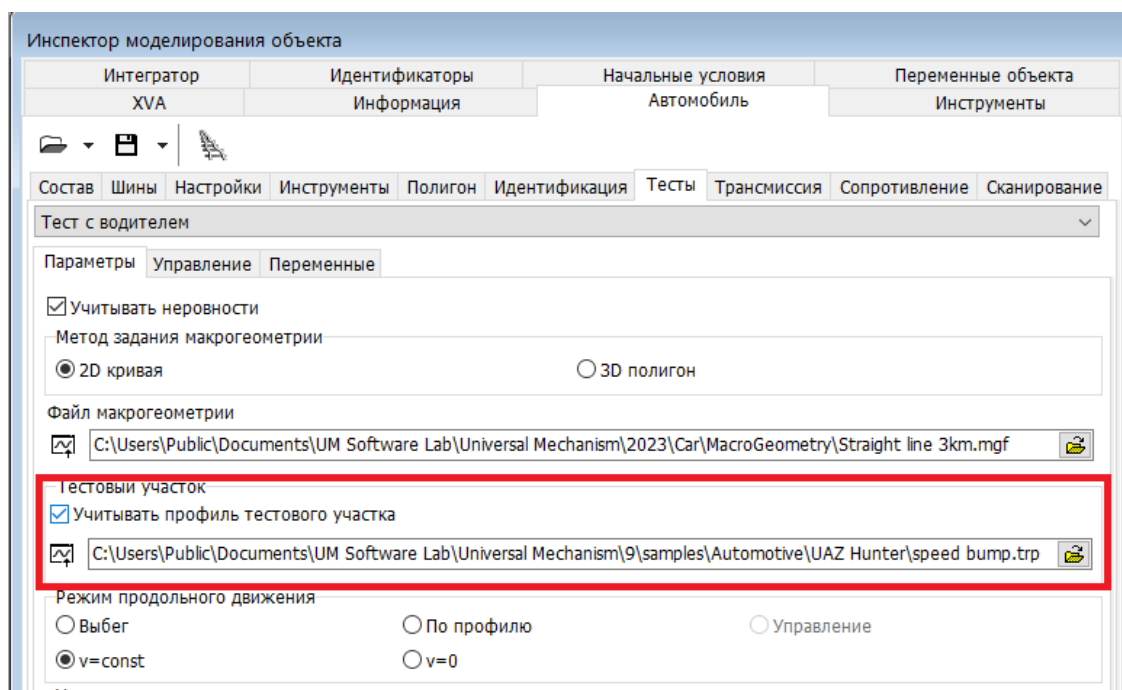



Рис. 1.195. Задание ПТУ

Для моделирования движения по профилю тестового участка (ПТУ) следует выбрать заранее созданный файл *.trp с помощью кнопки  и включить режим **Учитывать профиль тестового участка**, рис. 1.195. Включение и выключение режима позволяет пользователю быстро сравнить результаты с учетом заданных специальных неровностей и без них.

Создание файлов ПТУ описано в разделе 1.9.1.3.2. «Создание файлов профилей тестового участка дороги», общая информация содержится в п. 1.3.4 «Профиль тестового участка дороги».

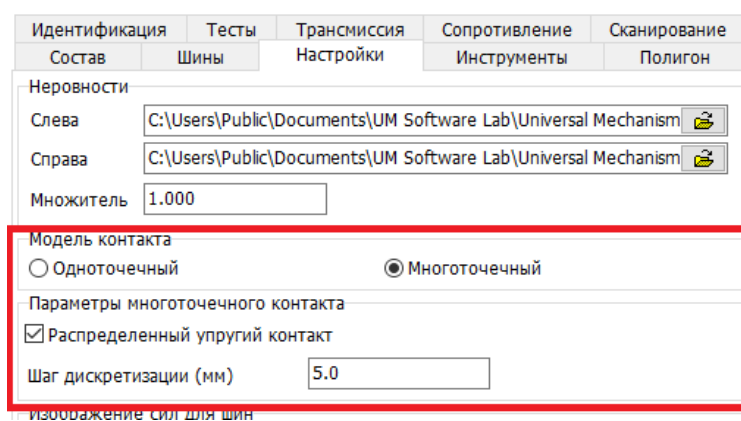


Рис. 1.196. Модель контакта шины с дорогой

Следует настроить модель контакта шины с дорогой в зависимости от выбранного ПТУ. Особенности модели шины при использовании ПТУ обсуждаются в п. 1.5.1. «*Одноточечная и многоточечная модели контакта шины с дорогой*».

Рекомендуется использовать многоточечную модель контакта. Если опция **Распределенный упругий контакт** выключена, то используется *дискретный точечный контакт* шины с дорогой, который обычно применяется при наезде шины на ступеньку или бордюрный камень.

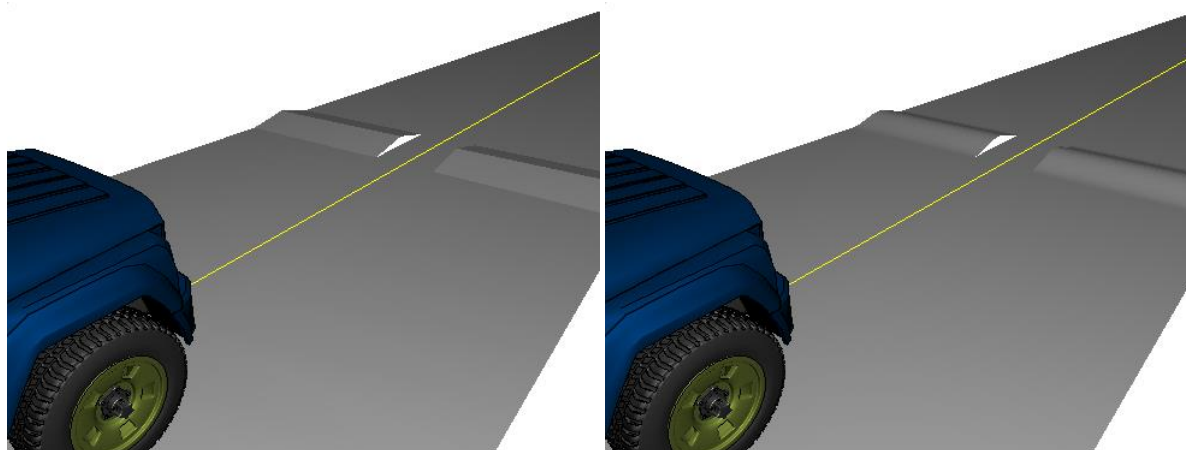


Рис. 1.197. «Лежащий полицейский» при шаге изображения полотна 0.5 м и 0.05м

Замечание. При использовании профилей тестовых участков рекомендуется уменьшать значение шага изображения полотна для более точной отрисовки профиля, рис. 1.198, см. п. 1.9.1.4.4. «*Изображение дороги*».

1.9.4.7.3. Особенности теста с водителем при движении по триангулированной поверхности

1.9.4.7.3.1. Задание полигона и маршрута

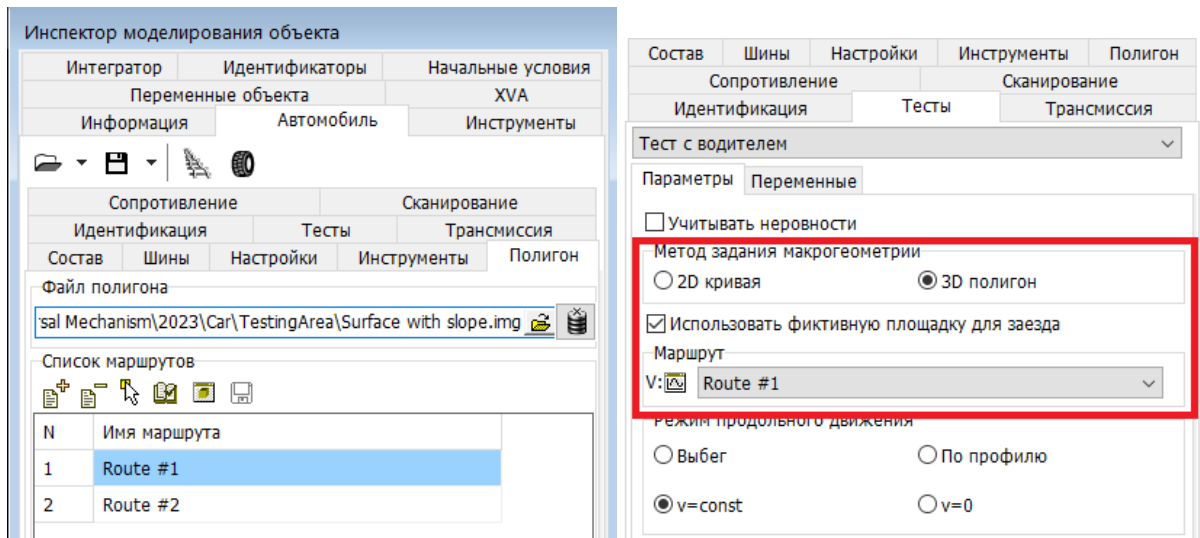


Рис. 1.198. Настройка движения по триангулированной поверхности

При движении по триангулированной поверхности следует сначала выбрать файл полигона на вкладке **Полигон** и при необходимости создать или отредактировать маршруты (см. п. 1.3.2.2. «Задание маршрутов»). При выбранном файле и наличии хотя бы одного маршрута становится доступным назначение 3D полигона для моделирования выполнения теста, рис. 1.198, справа.

1.9.4.7.3.2. Начальные условия для теста с движением по полигону

При движении по триангулированной поверхности полигона важно корректно задать начальные условия, то есть значения координат, при которых отсутствуют интенсивные переходные процессы при старте моделирования.

1. Использование фиктивной площадки для заезда автомобиля на полигон.

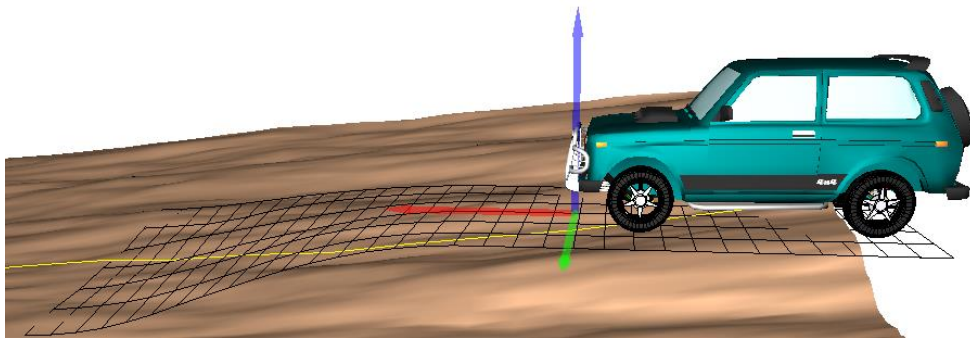


Рис. 1.199. Фиктивная площадка

Фиктивная площадка состоит из двух участков, рис. 1.199:

- прямоугольный горизонтальный участок, имеющий нулевую вертикальную координату; передняя граница первого участка находится на расстоянии 1м в направлении движения от начала отсчета базовой СК на рис. 1.199;

- переходный участок, позволяющий автомобилю плавно заезжать на неровности полигона; длина участка 5м.

Использование фиктивной площадки имеет ряд преимуществ:

- можно использовать стандартные начальные условия, полученные в результате выполнения теста равновесия;
- начальные условия не зависят от выбранного маршрута;
- в начальном положении только часть колес могут находиться вне области задания триангулированной поверхности, как задние колеса автомобиля на рис. 1.199 или большая часть колес грузовика на рис. 1.200.

Несмотря на указанные преимущества, данный способ рекомендуется использовать для полигонов с небольшим перепадом высот в области начального положения автомобиля, как на рис. 1.200. В противном случае лучше использовать альтернативный подход, описанный далее.

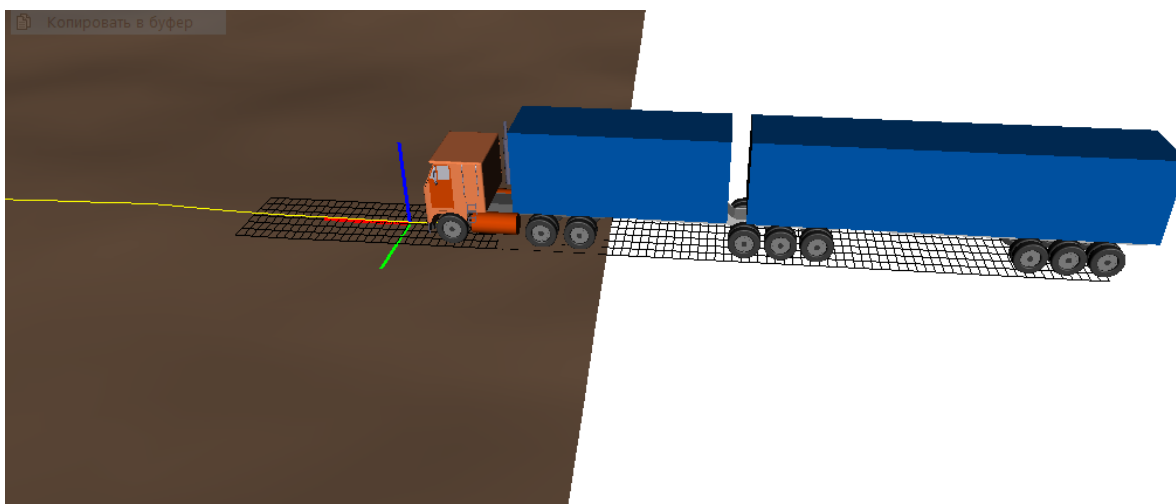


Рис. 1.200. Фиктивная площадка для грузовика





Рис. 1.201. Начальные условия, соответствующие поверхности для различных маршрутов

2. Расчет начальных условий, соответствующих профилю поверхности и маршруту.

Расчет начальных условий следует выполнять для каждого маршрута, сохранять в файлах и загружать при смене маршрута перед началом моделирования, рис. 1.201.

Для расчета начальных условий рекомендуется следующая последовательность действий:

- назначить нужный маршрут из списка, рис. 1.202, справа;
- установить режим нулевой скорости $v=0$;
- установить метод многоточечного распределенного контакта колеса с дорогой, п. 1.9.4.7.3.3;
- на вкладке **Начальные условия** разместить автомобиль таким образом, чтобы все колеса были над поверхностью и не проникали в нее, рис. 1.202, слева; разместить колеса над поверхностью можно редактируя маршрут – перемещая первую точку дальше от границы в редакторе кривых, рис. 1.16;
- запустить процесс моделирования и перейти в режим паузы после того, как автомобиль придет в положение равновесия; в окне режима паузы сохранить координаты в файл *.xv с использованием кнопки **Записать**, рис. 1.203; рекомендуется в имени файла с координатами использовать название маршрута;
- перед началом движения по выбранному маршруту задать начальные условия на вкладке **Начальные условия** с использованием созданного файла; с этой целью используется кнопка ; после первой загрузки файла рекомендуется установить нулевые значения скоростей с помощью кнопки $v=0$ и переписать файл по кнопке .

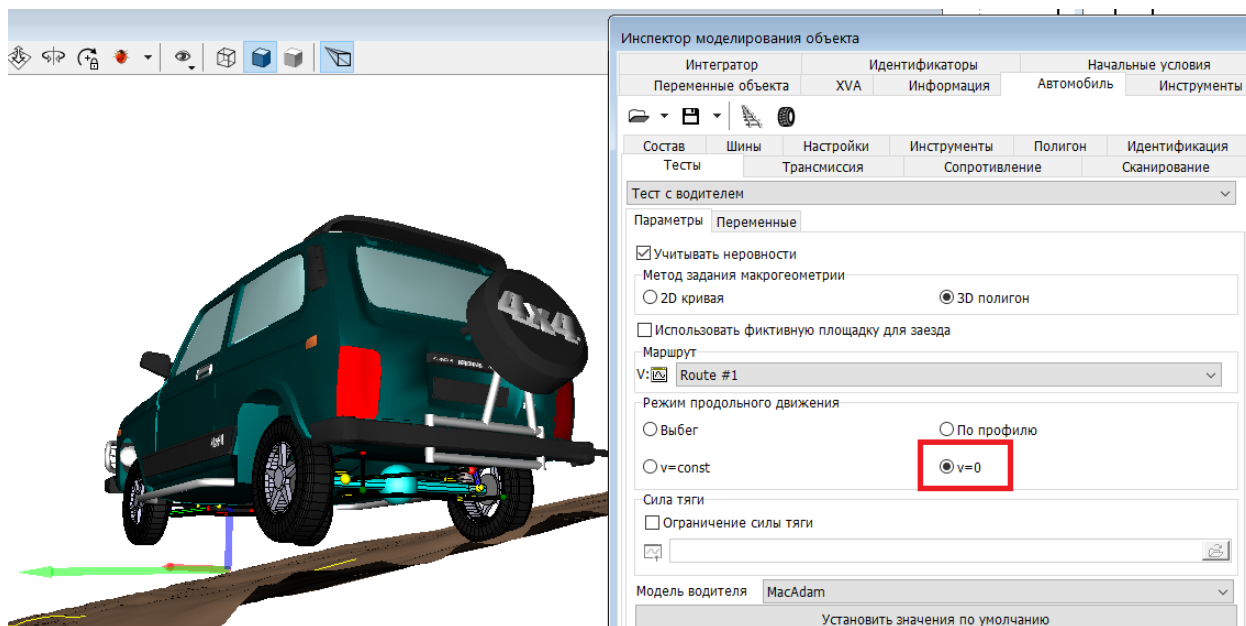


Рис. 1.202. Положение автомобиля перед расчетом начальных условий

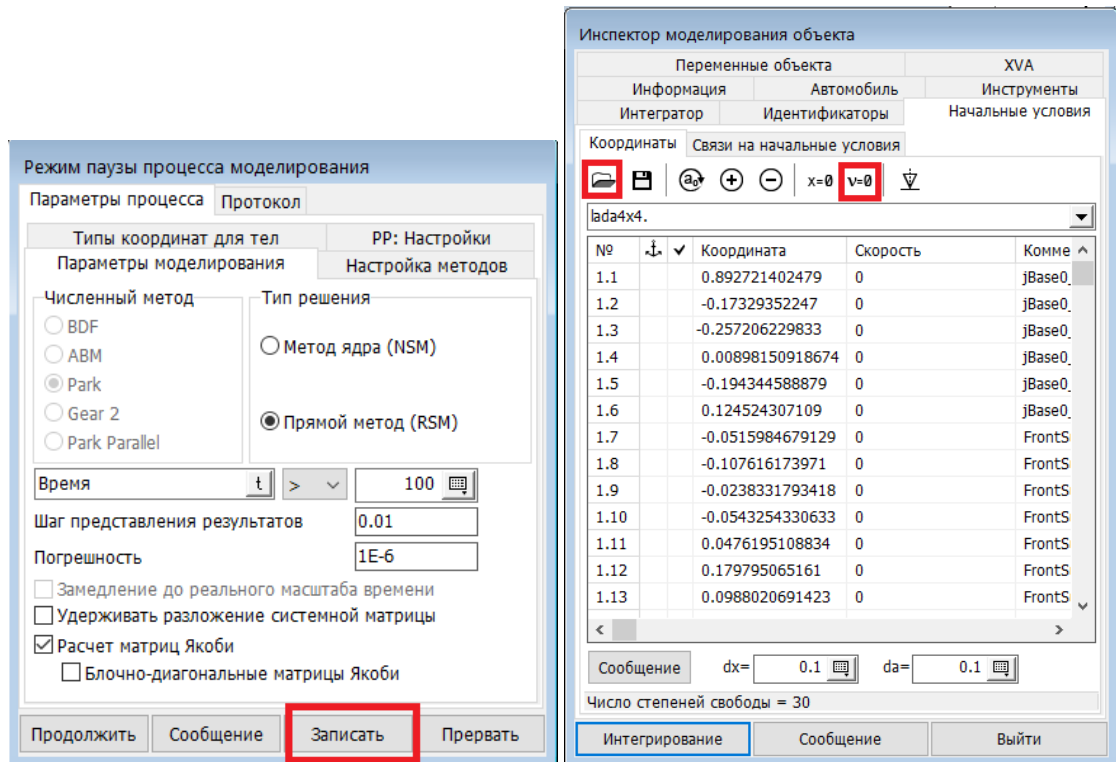


Рис. 1.203. Запись текущих координат в файл в режиме паузы и назначение координат из файла

1.9.4.7.3.3. Модель взаимодействия шины с дорогой

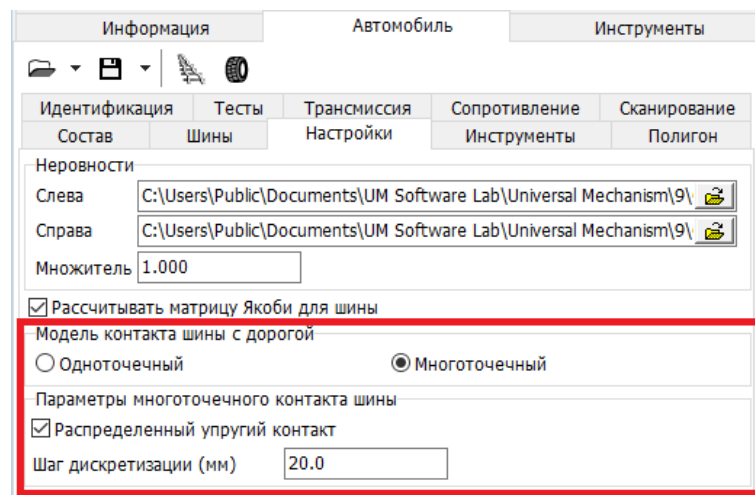


Рис. 1.204. Типичные настройка контакта шины с дорогой при движении по полигону

При моделировании движения по полигону рекомендуется использовать модель многоточечного контакта шины с распределенным упругим контактом. Распределенный упругий контакт позволяет сгладить скачки в направлении нормальной силы, вызванные изменением нормали к триангулированной поверхности при пересечении ребер разбивки. Таковую модель же контакта следует использовать и при расчете начальных условий, соответствующих профилю поверхности, п. 1.9.4.7.3.2.

1.9.4.8. Тренажер

1.9.4.8.1. Общая информация о тесте «тренажер»

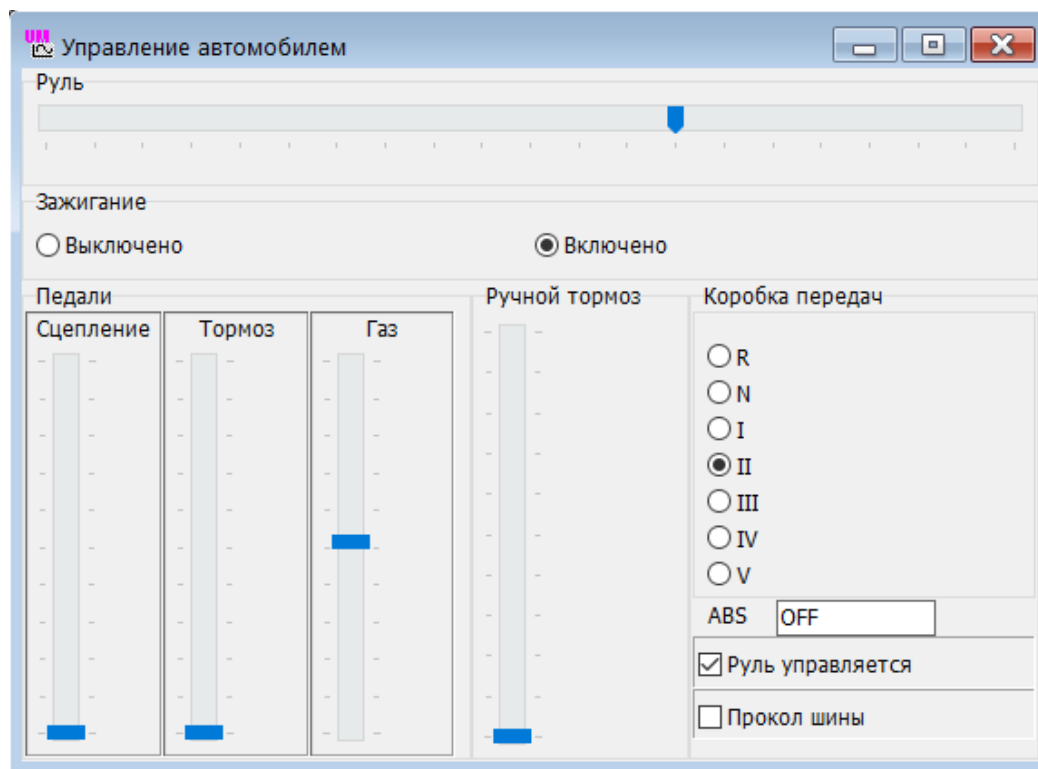


Рис. 1.205. Панель управления при наличии модели трансмиссии

Данный тест позволяет пользователю управлять автомобилем в процессе моделирования движения с помощью пульта управления, рис. 1.205. Тест может использоваться как при наличии модели трансмиссии, так и без нее. В первом случае доступно как рулевое управление, так и управление трансмиссией. Во втором случае используется только рулевое управление.

Для **рулевого управления** используется трекбар **Руль** в верхней части панели, рис. 1.205. Для перемещения ползунка трекбара применяется как мышка, так и клавиши ← → на клавиатуре.

В процессе моделирования рулевое управление можно отключить с помощью опции **Руль управляется**. В этом случае руль становится свободным и моделируется процесс установления движения автомобиля без управления. Управление возвращается с помощью той же опции. В режиме неуправляемого движения трекбар Руль устанавливается в соответствии с текущим значением координаты, соответствующей углу поворота руля, п. 1.9.1.2.3 «Идентификация рулевого управления».

Опция **Прокол шины** позволяет смоделировать процесс движения автомобиля после имитации прокола передней левой шины, рис. 1.206. Имитация прокола состоит в уменьшении радиуса качения шины и увеличении ее жесткости в четыре раза.

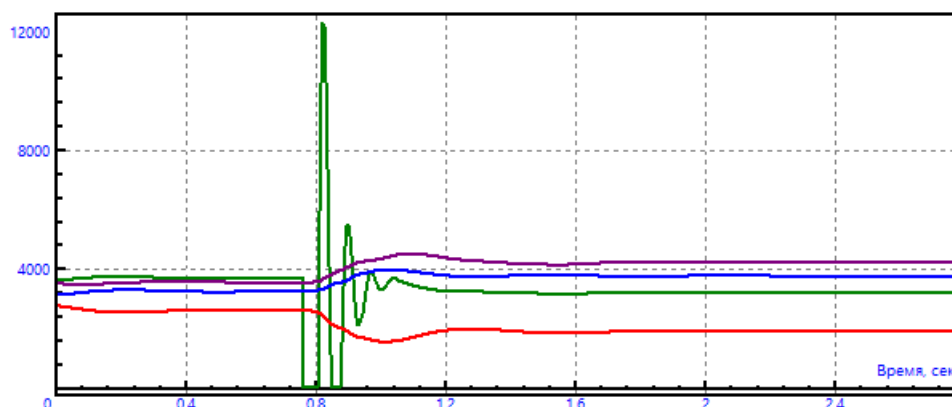


Рис. 1.206. Нормальные реакции колес при имитации прокола шины

1.9.4.8.2. Тренажер для автомобиля с моделью трансмиссии

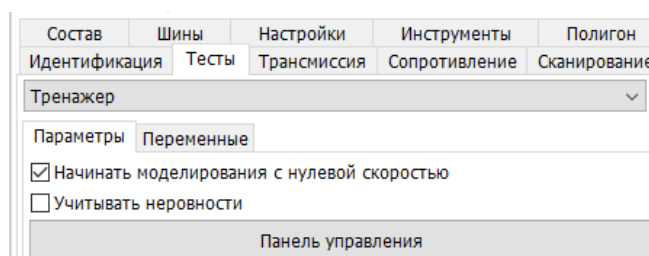


Рис. 1.207. Настройка теста «Тренажер» при наличии модели трансмиссии

При использовании ключа **Начинать моделирование с нулевой скоростью** моделирование стартует из положения равновесия (основной режим), в противном случае начальная скорость устанавливается идентификатором v_0 .

По кнопке **Панель управления** окно на рис. 1.207 можно открыть перед началом моделирования, в противном случае оно открывается автоматически при старте.

Нижние положения трекбаров управления соответствуют следующим состояниям:

Сцепление – педаль сцепления отпущена, то есть сцепление установлено;

Тормоз – педаль тормоза отпущена, торможения нет;

Газ – педаль акселератора отпущена, подача топлива при включенном двигателе соответствует холостому ходу;

Ручной тормоз – торможение отсутствует.

Пример последовательности действий при выполнении теста (при запущенном процессе моделирования)

1. Включить двигатель.
2. Разорвать сцепление, поместив трекбар в максимальное положение, а текбар акселератора – в желаемое положение.
3. Включить передачу в группе **Коробка передач**.
4. Отпустить сцепление.
5. Далее управлять движением с помощью элементов панели.

1.9.4.8.3. Тренажер для автомобиля без модели трансмиссии

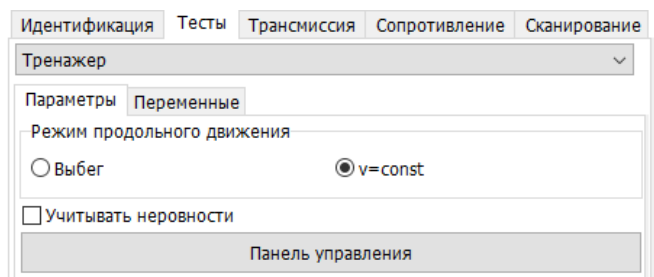


Рис. 1.208. Настройка теста «Тренажер» при отсутствии модели трансмиссии

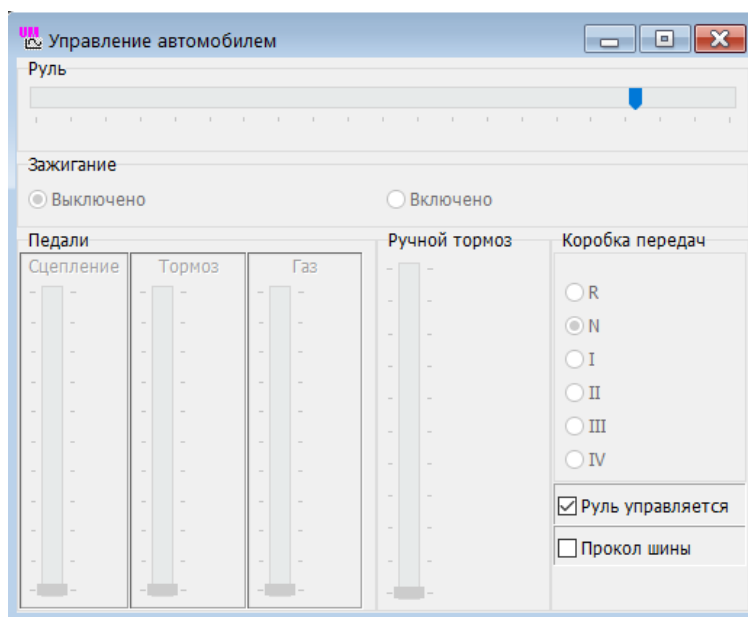


Рис. 1.209. Панель управления при отсутствии модели трансмиссии

При отсутствии модели трансмиссии доступно только рулевое управление автомобиля, рис. 1.209.

Моделирование движение автомобиля в режиме тренажера возможно либо в режиме выбега, либо с постоянной скоростью, рис. 1.208. Скорость задается на вкладке идентификаторов значением $v0$.

1.9.4.9. Вертикальная прокачка

Тест предназначен для определения суммарной жесткости и деформации подвески автомобиля при нагружении его медленно изменяющейся (квазистатической) силой, приложенной в центре масс кузова. Параметры силы приведены на рис. 1.210.

Для выполнения теста требуется:

- задать идентификацию блокировки вращения колес, см. п. 1.9.1.2.2 *Блокировка движения - идентификация блокировки вращения колес*;
- задать амплитуду и частоту гармонической возмущающей силы;
- выполнить расчет положения равновесия, см. п. 1.9.4.4. *"Тест «Равновесие»"*, с. 1-140, или прочитать ранее созданный файл с равновесными значениями координат на вкладке **Начальные условия**.

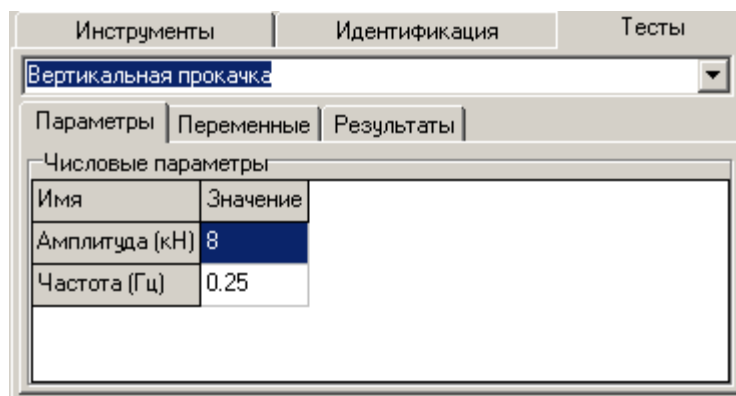


Рис. 1.210. Параметры теста вертикальной прокачки

Тест начинается из положения равновесия экипажа. Гармоническая сила задается по формуле

$$P_z = P_0 \sin 2\pi f_p t$$

где P_0, f_p – амплитуда (в килоньютонах) и частота (в Герцах) возмущающей силы. Параметры силы задаются на закладке параметров, см. рис. 1.210.

На закладке **Переменные** приведены следующие стандартные переменные для данного теста, см. рис. 1.211. **Вертикальная сила спереди** и **сзади** вычисляются как часть вертикальной силы, приходящаяся на передние и задние колеса, соответственно.

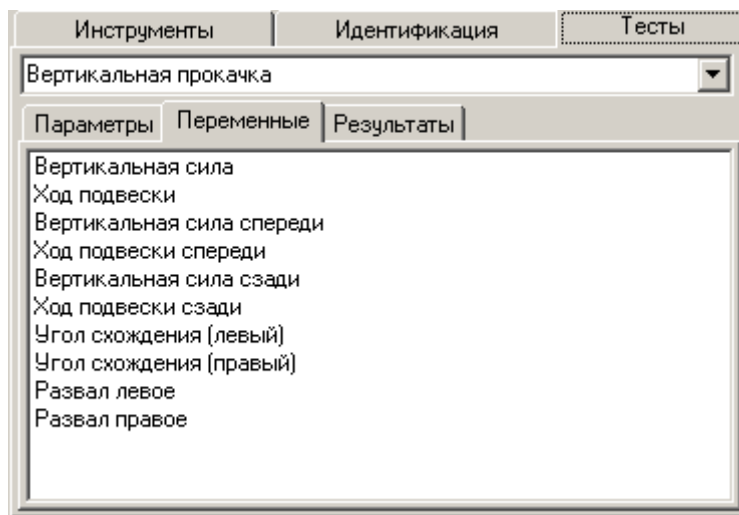


Рис. 1.211. Стандартные переменные для вертикальной прокачки

Закладка Результаты, см. рис. 1.212, включает три значения жесткости подвески: общую жесткость подвески, а также жесткость передней и задней подвески. Линейный коэффициент жесткости вычисляется при помощи регрессионного анализа по полученным, в общем случае нелинейным, характеристикам.

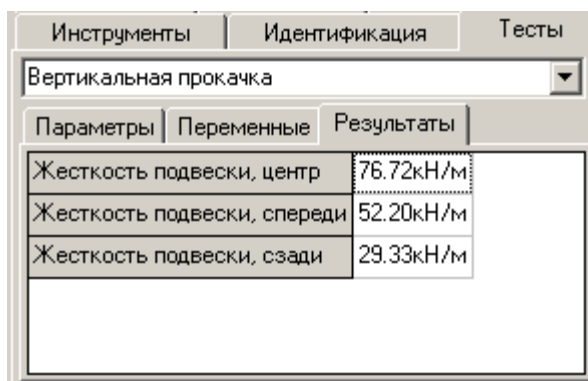


Рис. 1.212. Результаты вертикальной прокачки

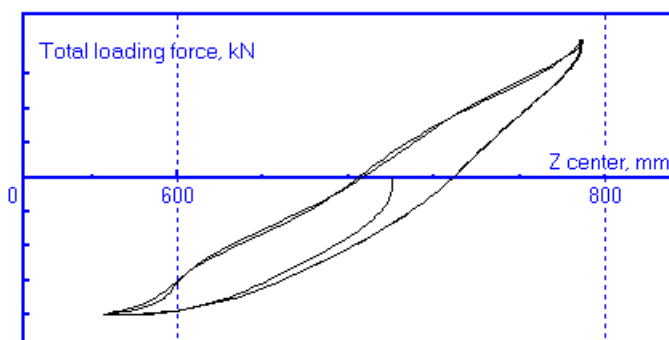


Рис. 1.213. Результаты выполнения теста

1.9.4.10. Горизонтальная прокатка

Параметры, переменные и результаты теста горизонтальной прокатки полностью соответствуют вертикальной прокатке, см. п. 1.9.4.9. «Вертикальная прокатка».

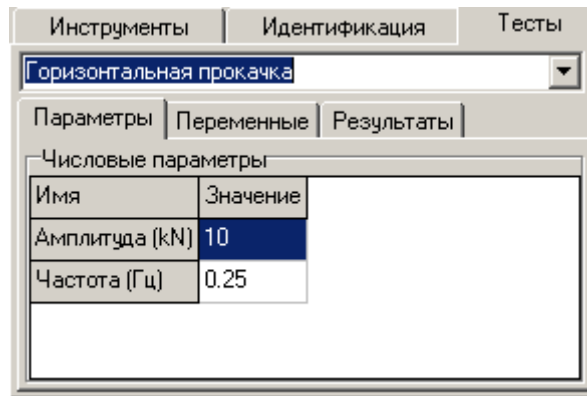


Рис. 1.214. Параметры теста горизонтальной прокатки

1.9.4.11. Создание переменных

Переменные, описывающие взаимодействие пневматика с дорогой, доступны в **Мастере переменных** на закладке **Автомобиль**. Для вызова **Мастера переменных** используйте пункт меню **Инструменты/Мастер переменных**. Для создания других переменных используйте соответствующие закладки **Мастера переменных**.

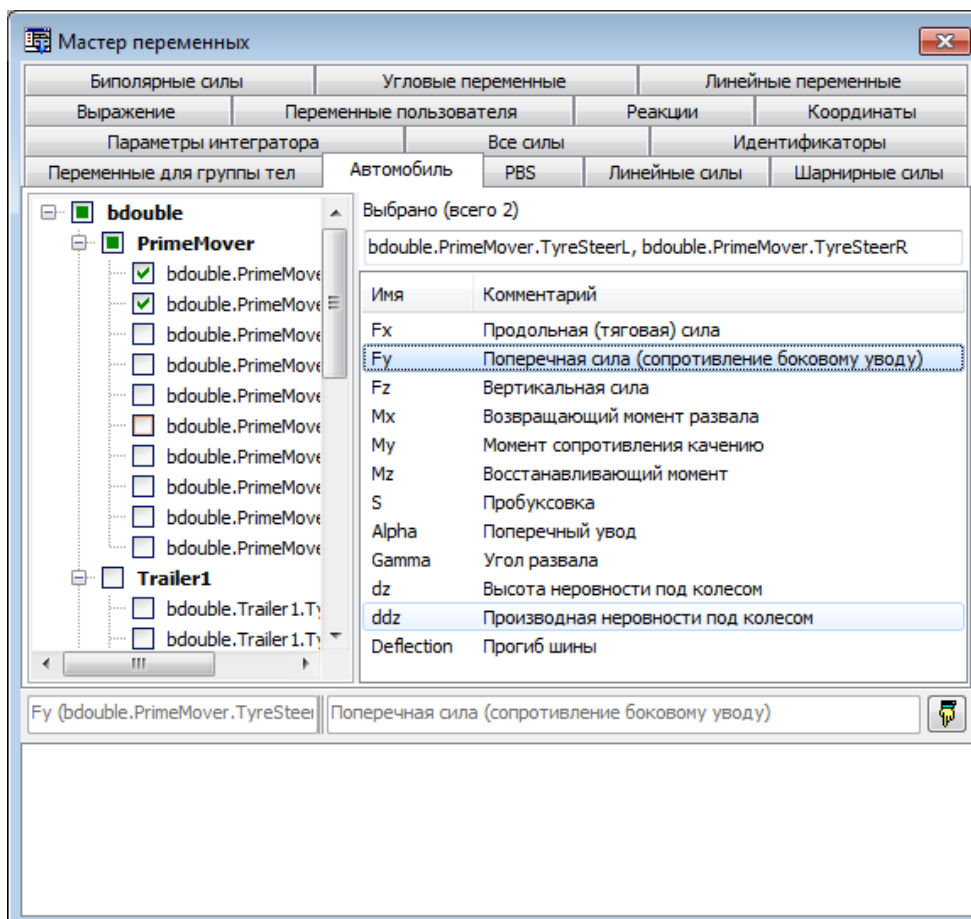


Рис. 1.215. Мастер переменных: автомобиль

Подробнее о **Мастере переменных** см. [Главу 4](#), п. "Мастер переменных".

1.10. Особенности линейного анализа автомобилей

Использование линейного анализа автомобилей, в частности, расчет собственных значений и корневых годографов, имеет ряд особенностей, которые мы рассмотрим в данном разделе. Общие методы статического и линейного анализа обсуждаются в [Главе 4](#), в разделе *Статический и линейный анализ, см. также п. Особенности анализа колесных экипажей*.

1.10.1. Режимы линейного анализа автомобиля

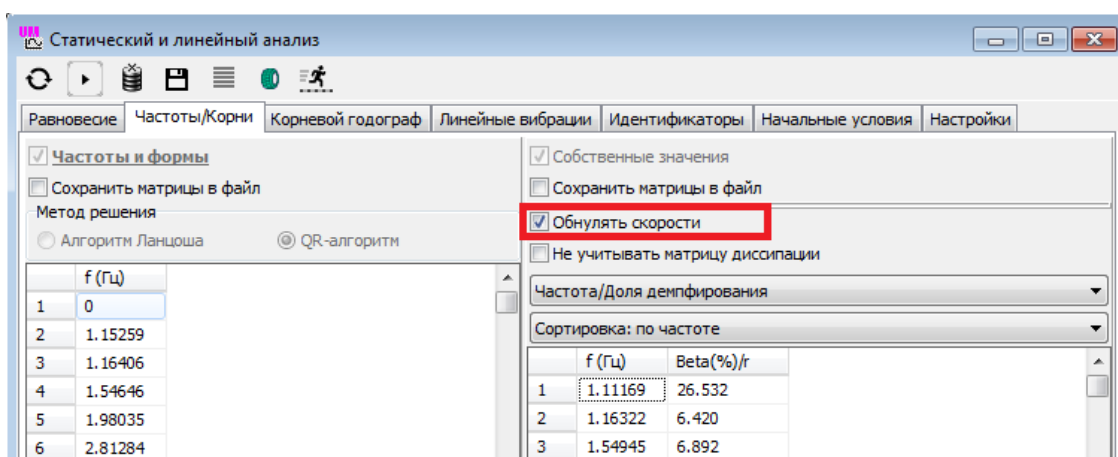
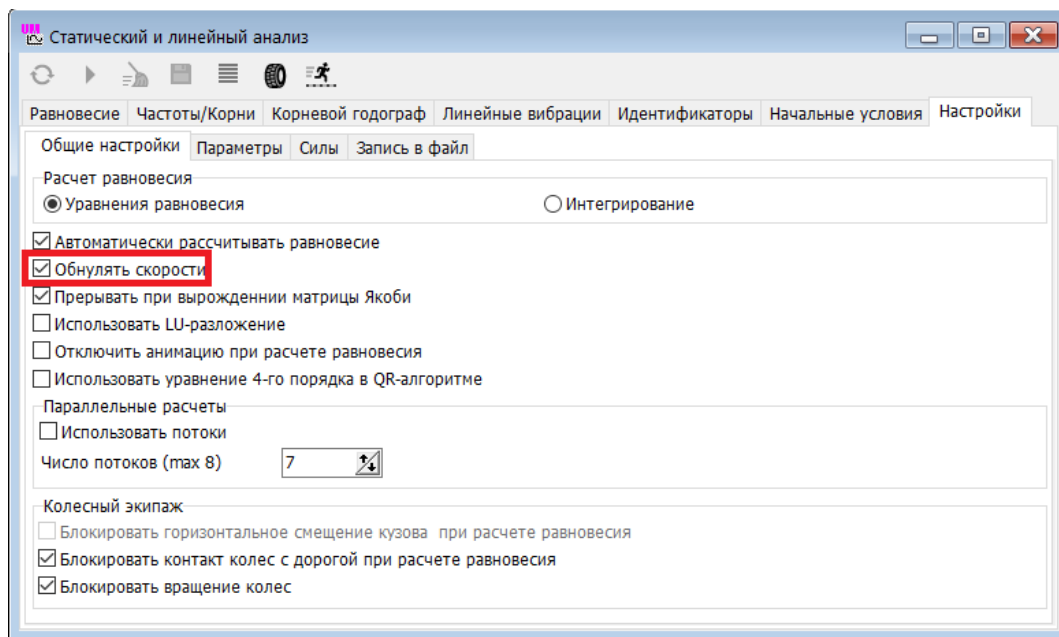


Рис. 1.216. Включение режима равновесия при линейном анализе

Для линейного анализа автомобиля используются два режима, различающиеся моделью взаимодействия шин с дорогой: **режим равновесия** (или режим стоящего автомобиля) и **режим продольного движения**. В режиме равновесия следует сделать активным ключ **Обнуление скорости** либо на вкладке настроек, либо на вкладке расчета частот и корней, рис. 1.216.

В **режиме равновесия** скорость продольного движения равняется нулю, а каждая шина в точке контакта связана с дорогой в продольном и поперечном направлениях пружинами с коэффициентами жесткости K_x , K_y , задаваемыми в модели шины, рис. 1.217. Данный режим является основным при расчете собственных частот модели и степени их демпфирования.

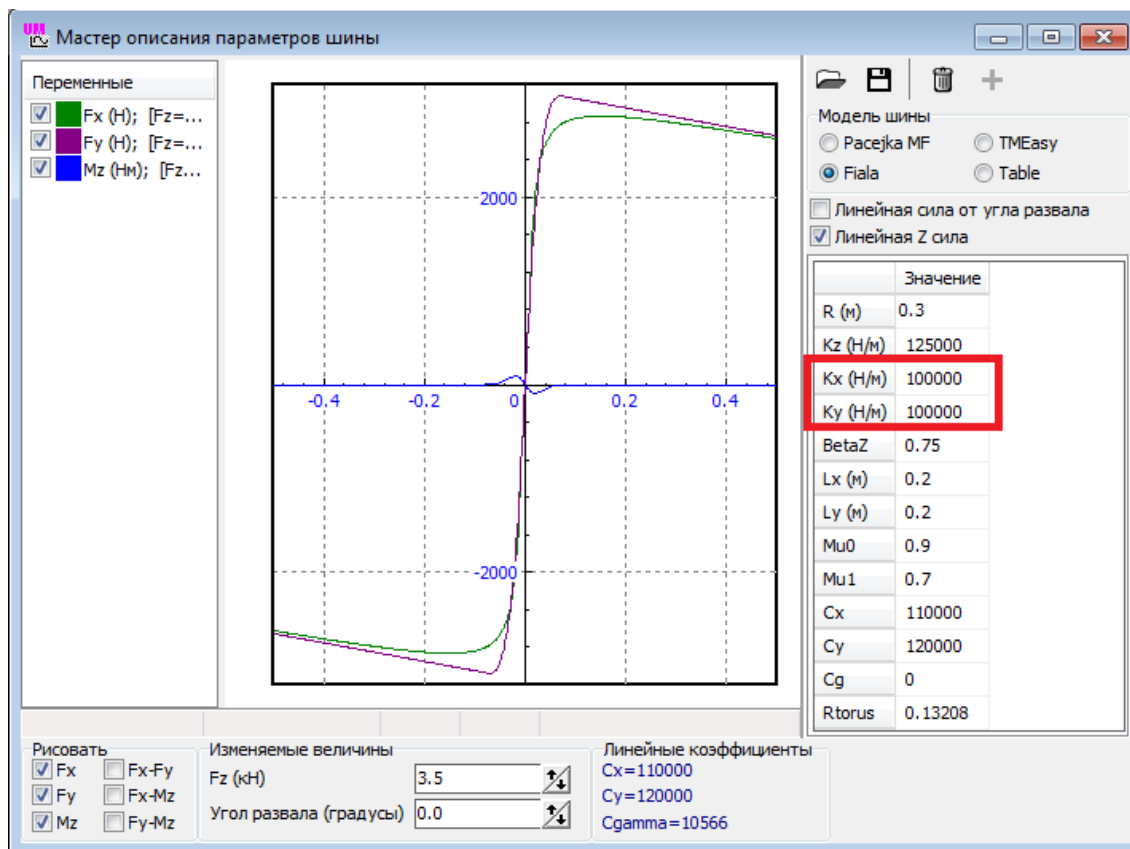


Рис. 1.217. Задание продольной и поперечной жесткостей шины в равновесном состоянии автомобиля

В **режиме движения автомобиля** скорость продольного движения отлична от нуля, колеса вращаются. Учитываются (и линеаризуются) силы взаимодействия шины с дорогой, описанные в п. 1.5 «Контакт шины с дорогой». В этом режиме можно исследовать влияние параметров модели водителя.

1.10.2. Анализ влияния параметров модели водителя

Линейный анализ в **режиме движения автомобиля** (п. 1.10.1) позволяет исследовать влияние на собственные значения линеаризованной модели параметров модели водителя, описанной в пп. 1.4.2. «Модель непрерывного управления с прогнозированием», 1.4.3. «Комбинированная модель», то есть модели с предвидением второго порядка. Наиболее эффективным приемом является построение корневых годографов в зависимости от этих параметров.

Для использования данной возможности программы следует параметризовать коэффициенты управления (1.6)

$$T_p, K, K_2, K_d, K_I, \tag{1.15}$$

см. п. 1.9.1.2.4 «Параметризация модели водителя». Линейный анализ в УМ не учитывает явление запаздывания, поэтому величина запаздывания реакции водителя не указана в этом списке.

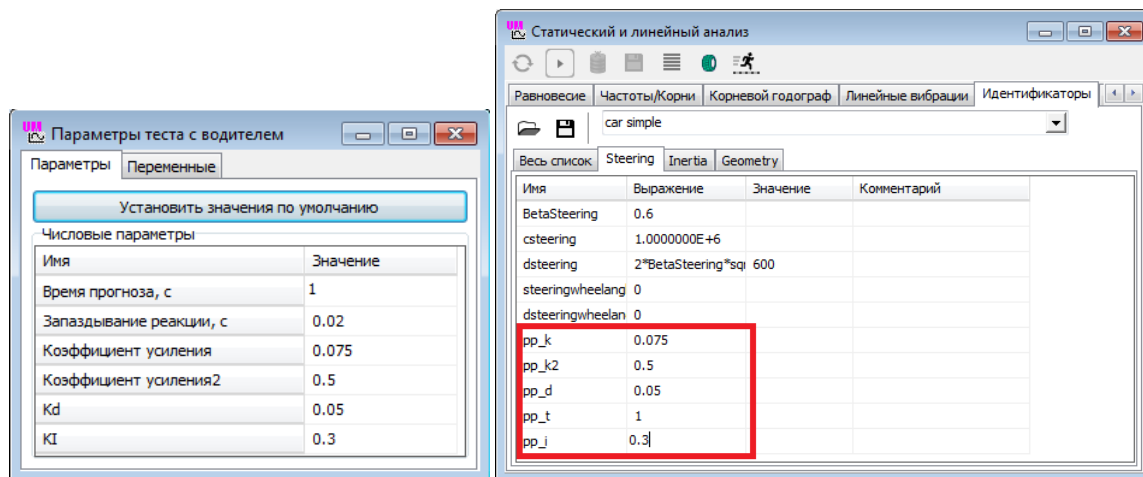



Рис. 1.218. Окно с текущими значениями параметров модели водителя и список идентификаторов

Для изменения текущих значений параметров управления в режиме линейного анализа используется кнопка  в верхней части окна на рис. 1.216, открывающая окно с таблицей параметров (рис. 1.218, слева). Параметры управления назначаются также через значения соответствующих идентификаторов, параметризующих коэффициенты управления (рис. 1.218, справа). Изменение значений параметров двумя описанными способами автоматически синхронизируется, то есть изменение значений в таблице на рис. 1.218 слева автоматически приводит к изменению идентификаторов и наоборот.

При выключенной опции **Обнуление скорости** (рис. 1.216) параметры модели водителя влияют на собственные значения посредством сил взаимодействия шины с дорогой

$$\begin{aligned} F_x &= c_x s_x, \\ F_y &= c_y s_y. \end{aligned} \tag{1.16}$$

Параметры модели водителя влияют на поперечную силу F_y через относительное поперечной проскальзывание s_y . Мы рассмотрим это влияние в следующем разделе на упрощенной модели автомобиля.

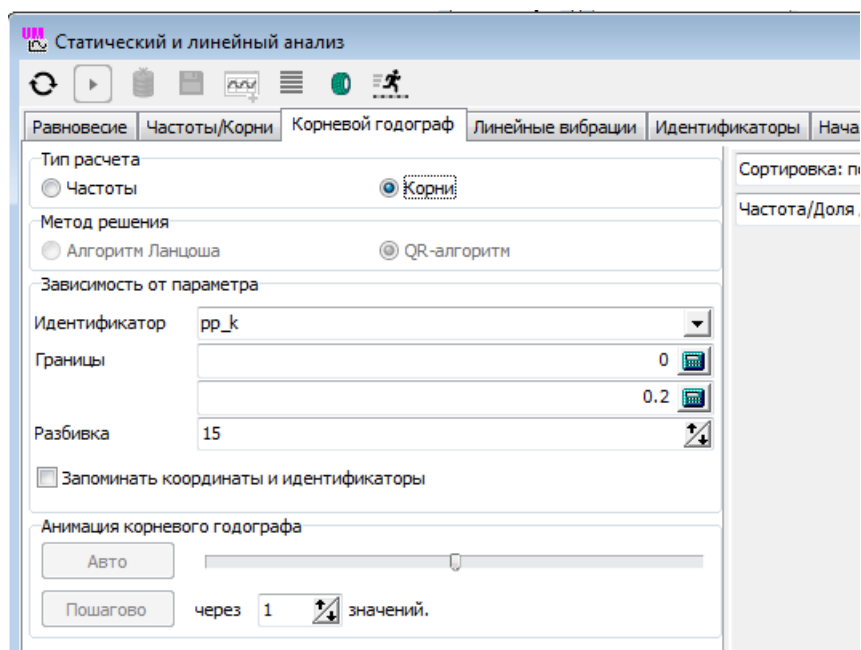




Рис. 1.219. Задание параметров для построения корневого годографа

Наиболее эффективным способом исследование влияния параметров модели управления является построение корневых годографов, то есть зависимостей собственных значений уравнений (другими словами - корней характеристического уравнения) от величины одного из параметров. Зависимости строятся на комплексной плоскости.

Для построения корневых годографов следует (рис. 1.219):

- перейти на соответствующую вкладку окна статического и линейного анализа;
- установить тип расчета **Корни**;
- выбрать идентификатор из списка (в примере на рис. 1.219 выбран идентификатор pp_k , параметризующий коэффициент управления K);
- задать числовые границы изменения идентификатора и параметр разбивки заданного интервала, то есть число расчетов при равномерной разбивке интервала;
- выполнить расчет щелчком на кнопке ;
- построить годограф щелчком на кнопке , рис. 1.220.

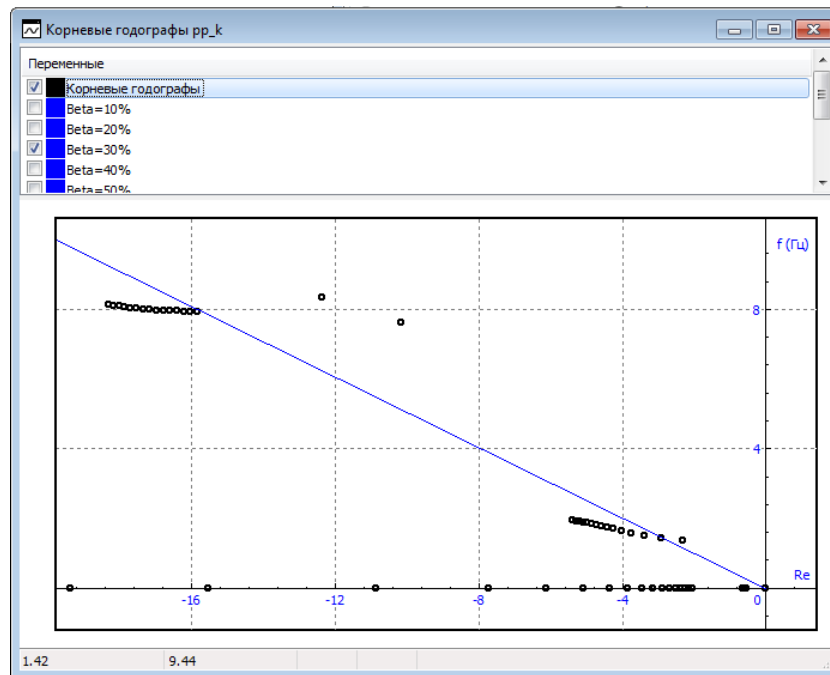


Рис. 1.220. Пример корневого годографа

1.10.3. Пример анализа линеаризованных уравнений упрощенной модели автомобиля

В данном разделе мы рассмотрим линеаризованные уравнения упрощенной модели автомобиля и некоторые результаты по анализу влияния параметров управления.

1.10.3.1. Упрощенная модель автомобиля

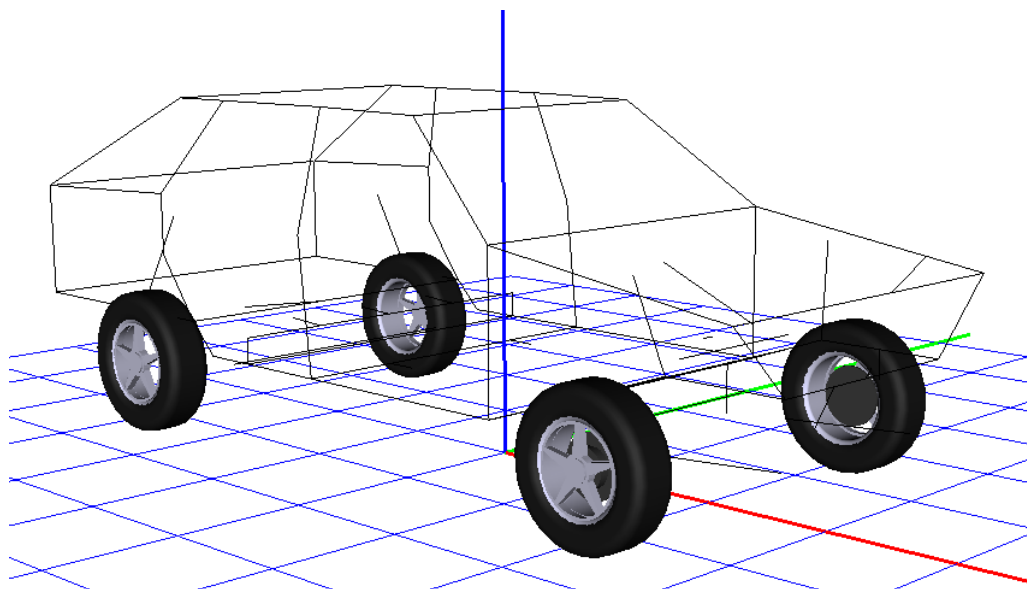


Рис. 1.221. Упрощенная модель автомобиля

Упрощенная модель автомобиля, которую мы описываем здесь, находится в каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Car simple](#). Модель имеет всего лишь 12 степеней

свободы, что позволяет получить явный вид матриц линеаризованных уравнений. В частности, в модели отсутствует подвеска, рулевое колесо и другие элементы. Присутствуют кузов, четыре колеса и два поворотных кулака, позволяющих системе управления поворачивать передние колеса и отслеживать траектории движения с помощью модели управления.

Рассмотрим основные элементы модели. Список тел, параметризация инерционных параметров и их численные значения приведены в табл. 1.9.

Шарниры вводят степени свободы для каждого из семи тел.

jCar body - вводит шесть степеней свободы для кузова. Идентификатор $zc=0.7m$ задает вертикальное положение центра масс.

jCarbody - knuckle left, jCarbody - knuckle right - вращательные шарниры вводят угловые степени свободы поворотных кулаков относительно кузова. В упрощенной постановке поворот кулаков осуществляется вокруг вертикальной оси, рис. 1.222.

Таблица 1.9

Тела и инерционные параметры

Имя	Масса, кг	Моменты инерции, кг·м ²		
Car body	mcarbody 1000	icarx 400	icary 1200	icarz 1200
Steering knuckle left	m_knuckle 10	iknucklex iknuckley iknucklez		
Steering knuckle right		0.15	0.15	0.1
Wheel FL Wheel FR	mwheel 20	iwheelx iwheely iwheelx		
Wheel RL Wheel RR		0.25	0.5	0.25

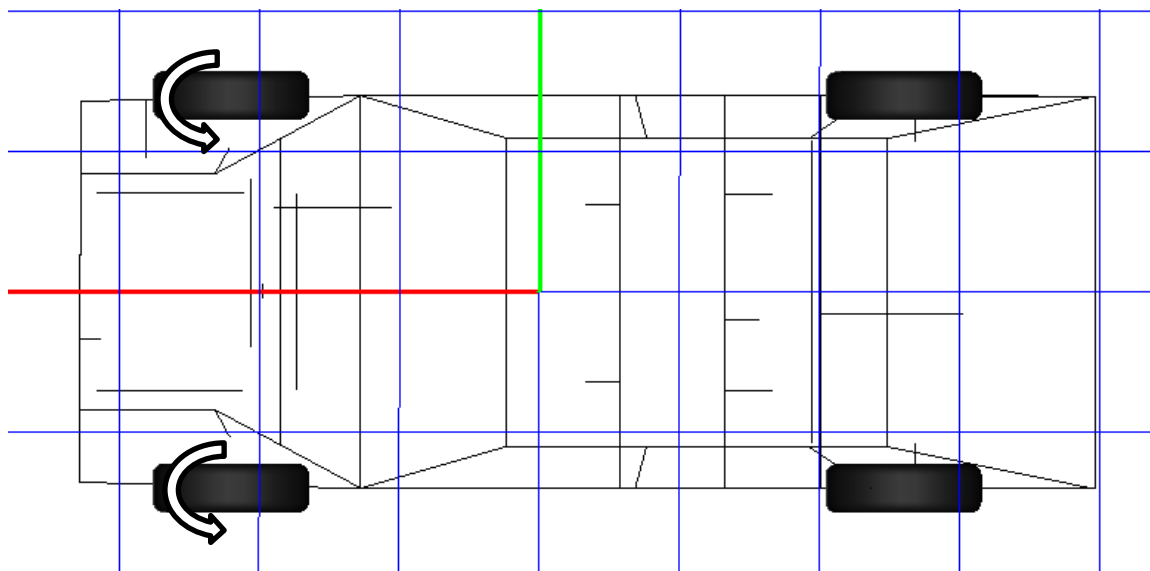


Рис. 1.222. Степени свободы поворотных кулаков

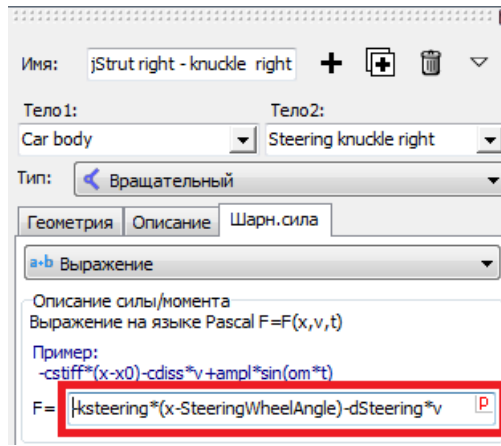


Рис. 1.223. Шарнирный момент, реализующий управляющий поворот кулака

Для поворота кулака при управлении автомобилем используется упруго-диссипативный момент в шарнирах **jCarbody - knuckle left**, **jCarbody - knuckle right**, Рис. 1.223. Момент определяется зависимостью

$$M_s = -k_s(\delta - \delta_s(t)) - d_s\dot{\delta}, \tag{1.17}$$

где k_s, d_s - коэффициенты жесткости и диссипации, δ - угол поворота кулака, $\delta_s(t)$ - задаваемый угол поворота, определяемый моделью водителя. Момент предназначен для отслеживания колесом задающего поворота модели водителя.

В модели шарнирного момента коэффициенты жесткости k_s и демпфирования d_s параметризуются идентификаторами $ksteering, dsteering$, а задаваемый угол поворота - идентификатором $SteeringWheelAngle$. Таким образом, использованы рекомендуемые идентификаторы, п. 1.7.7. «Рулевое управление».

Для параметризации модели водителя введены пять идентификаторов, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, слева. Назначение идентификаторов соответствующим параметрам производится на вкладке **Идентификация** инспектора моделирования **Ошибка! источник ссылки не найден.**, справа.

1.10.3.2. Уравнения движения упрощенной модели

Параметры упрощенной модели автомобиля, для которых производились расчеты, и соответствующие им идентификаторы и численные значения приведены в табл. 1.10

Таблица 1.10

Параметры модели автомобиля

Параметр	Идентификатор (выражение)	Значение	Комментарий
M_c	mcarbody	1100	Масса кузова (в упрощенном примере включает массу колес и поворотных кулаков), кг
I_{cx}, I_{cy}, I_{cz}	iCarx, iCary, iCarz	400, 1200, 1200	Моменты инерции кузова относительно продольной, попе-

			речной и вертикальной оси, кг·м ²
M_k	mknuckle	0	Масса поворотного кулака, кг
I_{kx}, I_{ky}, I_{kz}	iknucklex, iknuckley, iknucklexz	0.15, 0.15, 0.1	Моменты инерции поворотного кулака, кг·м ²
M_w	mwheel	0	Масса колеса, кг
I_{wx}, I_{wy}	iwheelx, iwheely	0.25, 0.5	Моменты инерции колеса относительно продольной и поперечной оси, кг·м ²
z_{c0}	zc	0.7	Вертикальная координата центра тяжести кузова при нулевом прогибе шин, м
M_Σ	$M_c + 2M_k + 4M_w$	1100	Суммарная масса автомобиля, кг
I_x, I_y, I_z	$I_x = I_{cx} + 2I_{kx} + 4I_{wx}$ $I_y = I_{cy} + 2I_{ky} + 4I_{wy}$ $I_z = I_{cz} + 2I_{kz} + 4I_{wz}$	401.3 1202.3 1201.2	Суммарные моменты инерции автомобиля относительно соответствующих осей, кг·м ²
a, b	a, b	1.2	Продольное положение осей передних (a) и задних (b) колес относительно центра масс кузова, м
w	w	0.7	Полубаза колес: половина расстояния между центрами передних и задних колес, а также между осями поворота кулаков, м
Δz	$M_\Sigma g / 4K_z$	0.0117	Статический прогиб шин при a=b, м
z_c	$z_{c0} - \Delta z$	0.69568	Вертикальная координата центра тяжести кузова в положении равновесия, м
r_0		0.28	Радиус колеса в недеформированном состоянии
r	$r_0 - \Delta z$		Радиус качения колеса
k_z	Kz	230 000	Вертикальная жесткость шин, Н/м
β_z	BetaZ	0.5	Доля критического демпфирования для шин
d_z	$2\beta_z \sqrt{M_w k_z}$	2145	Вертикальное демпфирование шин, Нс/м
c_x	Cx	57000	Коэффициент продольной жесткости шины, Н

c_y	C_y	27500	Коэффициент сопротивления боковому уводу шины, Н/рад
c_a	$\left. \frac{\partial M_z}{\partial s_y} \right _{s_y=0}$	1833	Тангенс угла наклона кривой стабилизирующего момента, Нм
k_s d_s	ksteering dsteering	26000 48.4	Коэффициенты жесткости и демпфирования в механизме управления поворотом колеса (1.17), Нм/рад, Нмс/рад
T_p, K, K_2, K_d, K_I	pp_t, pp_k, pp_k2, pp_d, pp_i		Параметры модели водителя (1.15)
v_0	v_0		Продольная скорость автомобиля
ω_0	v_0/r		Угловая скорость колес

Список 13-ти координат включает

- три поступательные степени свободы центра масс автомобиля x, y, z ;
- три угла поворота вокруг осей в последовательности 3,2,1 γ, β, α (то есть в модели первый поворот осуществляется вокруг оси z второй – y , третий – z);
- два угла поворота кулаков вокруг вертикальной оси δ_l, δ_r (индексы l – левый по ходу движения, r – правый);
- четыре угла вращения колес $\varphi_{fl}, \varphi_{fr}, \varphi_{rl}, \varphi_{rr}$; здесь и ниже при обозначении сил, действующих на колеса, первый индекс означает: f – передний (front), r – задний (rear), а второй: l – левый по ходу движения, r – правый;
- дополнительная переменная I_{dy} , используемая для вычисления интегрального члена в модели водителя (1.6) $I_{dy} = \int_0^t y_d(\tau) d\tau$, рассчитываемая как решение дифференциального уравнения $\dot{I}_{dy} = y_d(\tau)$.

Рассмотрим матрицы уравнений движения автомобиля, модель которого описана в п. 1.10.3.1. «Упрощенная модель автомобиля» при выключенной опции **Обнуление скорости**, то есть скорость отлична от нуля, и учитываются линеаризованные силы взаимодействия шин с дорогой (1.16).

Сначала приведем линеаризованные уравнения движения упрощенной модели автомобиля. В этих уравнениях мы пренебрегаем слагаемыми, соответствующими сопротивлению воздуха

$$\begin{aligned}
 M_{\Sigma} \ddot{x} - m_{26} \ddot{\beta} &= F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr}, \\
 M_{\Sigma} \ddot{y} + m_{24} \ddot{\gamma} + m_{26} \ddot{\alpha} &= F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr}, \\
 M_{\Sigma} \ddot{z} - m_{24} \ddot{\beta} &= -M_{\Sigma} g + F_{zfl} + F_{zfr} + F_{zrl} + F_{zrr}, \\
 I_z \ddot{\gamma} + m_{24} \ddot{\gamma} + (I_{kz} + I_{wx})(\ddot{\delta}_l + \ddot{\delta}_r) &= \\
 &= w(-F_{xfl} + F_{xfr} - F_{xrl} + F_{xrr}) + a(F_{yfl} + F_{yfr}) - b(F_{yrl} + F_{yrr}) + M_{aft} \\
 &+ M_{ afr} + M_{ arl} + M_{ arr} - 4I_{wx} \omega_0 \dot{\alpha},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_y \ddot{\beta} - m_{26} \ddot{x} + I_{wy} \ddot{\phi}_{fl} + I_{wy} \ddot{\phi}_{fr} + I_{wy} \ddot{\phi}_{rl} + I_{wy} \ddot{\phi}_{rr} &= \\
 &= M_{\Sigma} g(z_c - r) \beta - a(F_{zfl} + F_{zfr}) + b(F_{zrl} + F_{zrr}) \\
 &\quad - z_c(F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr}) \\
 I_x \ddot{\alpha} &= M_{\Sigma} g z_c \alpha + w(F_{zfl} - F_{zfr} + F_{zrl} - F_{zrr}) + z_c(F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr}) \\
 &\quad + I_{wy} \omega_0(4\dot{\gamma} + \dot{\delta}_l + \dot{\delta}_r), \\
 I_{kz} \ddot{\delta}_l + (I_{kz} + I_{wx}) \ddot{\gamma} &= -k_s(\delta_l - \delta_s(t)) - d_s \dot{\delta}_l + M_{afl} - I_{wy} \omega_0 \dot{\alpha}, \\
 I_{kz} \ddot{\delta}_r + (I_{kz} + I_{wx}) \ddot{\gamma} &= -k_s(\delta_r - \delta_s(t)) - d_s \dot{\delta}_r + M_{afr} - I_{wy} \omega_0 \dot{\alpha}, \\
 I_{wy} \ddot{\phi}_{fl} + I_{wy} \ddot{\beta} &= -r F_{xfl} - M_{fl}^r, \\
 I_{wy} \ddot{\phi}_{fr} + I_{wy} \ddot{\beta} &= -r F_{xfr} - M_{fr}^r, \\
 I_{wy} \ddot{\phi}_{rl} + I_{wy} \ddot{\beta} &= -r F_{xrl} - M_{rl}^r, \\
 I_{wy} \ddot{\phi}_{rr} + I_{wy} \ddot{\beta} &= -r F_{xrr} - M_{rr}^r, \\
 \dot{I}_{dy} &= -y - a\gamma - (z_c - r)\alpha.
 \end{aligned}$$

Здесь введены инерционные коэффициенты

$$\begin{aligned}
 m_{26} &= (z_c - r_w)(2M_k + 4M_w), & m_{24} &= 2aM_k, \\
 I_z &= I_{cz} + 4I_{wz} + 2I_{kz} + 2(a^2 + w^2)(M_w + M_k) + 2(b^2 + w^2)M_w, \\
 I_y &= I_{cy} + 4I_{wy} + 2I_{ky} + 2(a^2 + (z_c - r_w)^2)(M_w + M_k) + 2(b^2 + (z_c - r_w)^2)M_w, \\
 I_x &= I_{cx} + 4I_{wx} + 2I_{kx} + (w^2 + (z_c - r_w)^2)(4M_w + 2M_k).
 \end{aligned}$$

Угол поворота передних колес $\delta_s(t)$, задаваемый моделью водителя, определяется выражением

$$\delta_s(t) = -(K + K_2)(y + a\gamma + (z_c - r)\alpha) - (KT_p + K_d)\dot{y} + K_I I_{dy}.$$

В линейной постановке продольные и поперечные силы взаимодействия колеса с дорогой имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 F_{xfl} &= F_{x0} - c_x((a\beta - z)/r + (\dot{x} - z_c\dot{\beta} - r\dot{\phi}_{fl} - w\dot{\gamma})/v_0), \\
 F_{xfr} &= F_{x0} - c_x((a\beta - z)/r + (\dot{x} - z_c\dot{\beta} - r\dot{\phi}_{fr} + w\dot{\gamma})/v_0), \\
 F_{xrl} &= F_{x0} - c_x((-a\beta - z)/r + (\dot{x} - z_c\dot{\beta} - r\dot{\phi}_{rl} - w\dot{\gamma})/v_0), \\
 F_{xrr} &= F_{x0} - c_x((-a\beta - z)/r + (\dot{x} - z_c\dot{\beta} - r\dot{\phi}_{rr} + w\dot{\gamma})/v_0). \\
 F_{yfl} &= -c_y(-\gamma - \delta_l + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} + a\dot{\gamma})/v_0), \\
 F_{yfr} &= -c_y(-\gamma - \delta_r + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} + a\dot{\gamma})/v_0), \\
 F_{yrl} &= -c_y(-\gamma + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} - b\dot{\gamma})/v_0), \\
 F_{yrr} &= -c_y(-\gamma + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} - b\dot{\gamma})/v_0),
 \end{aligned}$$

Стационарное значение продольной силы F_{x0} зависит от силы сопротивления воздуха и моментов трения качения колес M_{fl}^r, \dots

Линеаризованные восстанавливающие моменты для колес:

$$\begin{aligned}
 M_{afl} &= c_a(-\gamma - \delta_l + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} + a\dot{\gamma})/v_0), \\
 M_{afr} &= c_a(-\gamma - \delta_r + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} + a\dot{\gamma})/v_0), \\
 M_{arl} &= c_a(-\gamma + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} - b\dot{\gamma})/v_0), \\
 M_{arr} &= c_a(-\gamma + (\dot{y} + z_c\dot{\alpha} - b\dot{\gamma})/v_0).
 \end{aligned}$$

Вертикальные силы, действующие на колеса:

$$\begin{aligned}
 F_{zfl} &= M_{\Sigma} g/4 - k_z(z + w\alpha - a\beta) - d_z(\dot{z} + w\dot{\alpha} - a\dot{\beta}), \\
 F_{zfr} &= M_{\Sigma} g/4 - k_z(z - w\alpha - a\beta) - d_z(\dot{z} - w\dot{\alpha} - a\dot{\beta}),
 \end{aligned}$$

$$F_{zrl} = M_{\Sigma}g/4 - k_z(z + w\alpha + b\beta) - d_z(\dot{z} + w\dot{\alpha} + b\dot{\beta}),$$

$$F_{zrr} = M_{\Sigma}g/4 - k_z(z - w\alpha + a\beta) - d_z(\dot{z} - w\dot{\alpha} + a\dot{\beta}),$$

Запишем уравнения движения в матричном виде.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Q_0$$

Матрицы масс M , коэффициентов при скоростях C и позиционных сил K приведены на рис. 1.225 - рис. 1.227 как в аналитическом, так и численном формах при значениях параметров модели, приведенных в табл. 1.10 для скорости $v_0 = 10\text{м/с}$. Значения коэффициентов управления:

$$T_p = 1, K = 0.075, K_2 = 0, K_d = 0, K_l = 0.1$$

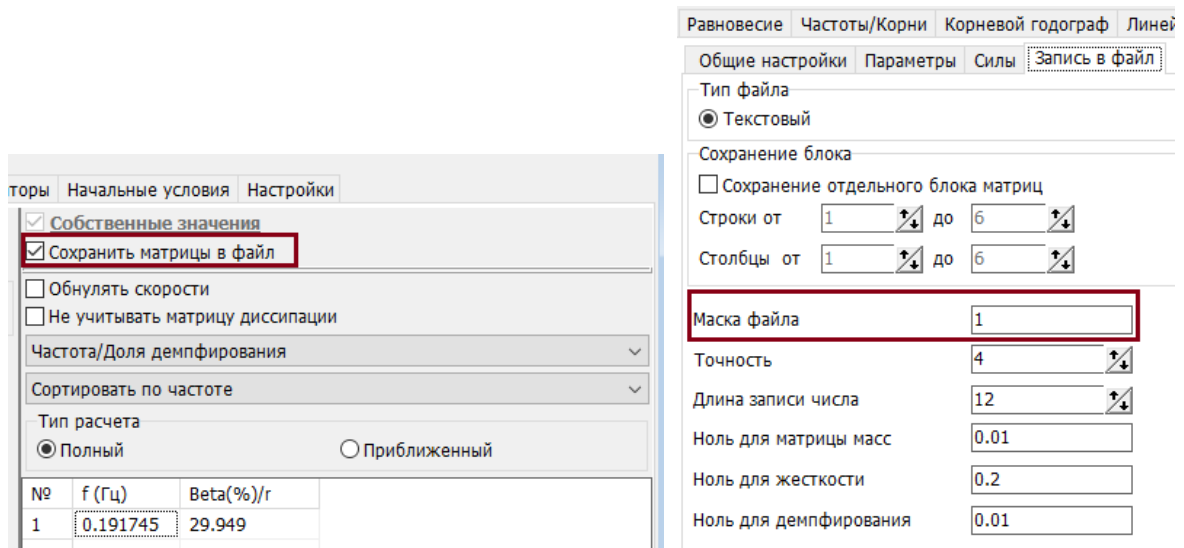


Рис. 1.224. Запись в файл матриц линеаризованных уравнения при расчете собственных значений

Численные значения матриц получены в программе моделирования в режиме линейного анализа. Для этого при расчете собственных значений надо включить режим сохранения матриц и указать шаблон имени матриц в настройках линейного анализа, рис. 1.224.

$$M = \begin{pmatrix} M_{\Sigma} & 0 & 0 & 0 & -m_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{\Sigma} & 0 & m_{24} & 0 & m_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\Sigma} & 0 & -m_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{24} & 0 & I_z & 0 & 0 & I_{wz} + I_{kz} & I_{wz} + I_{kz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m_{26} & 0 & -m_{24} & 0 & I_y & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & I_{wy} & I_{wy} & I_{wy} & 0 \\ 0 & m_{26} & 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{wz} + I_{kz} & 0 & 0 & I_{kz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{wz} + I_{kz} & 0 & 0 & 0 & I_{kz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1201	0	0	0.35	0.35	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1202	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0
6	0	0	0	0	0	401.3	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0.35	0	0	0.35	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0.35	0	0	0	0.35	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0	0
11	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0
12	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Рис. 1.225. Аналитическая и численная формы матрицы масс

$$C = \begin{pmatrix} 4C_x & 0 & 0 & 0 & -4C_x z_c & 0 & 0 & 0 & -rC_x & -rC_x & -rC_x & -rC_x & 0 \\ 0 & 4C_y & 0 & 2C_y(a-b) & 0 & 4C_y z_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4d_z & 0 & 2(b-a)d_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{42} & 0 & c_{44} & 0 & c_{46} & 0 & 0 & rwC_x & -rwC_x & rwC_x & -rwC_x & 0 \\ -4C_x z_c & 0 & 2(b-a)d_z & 0 & c_{55} & 0 & 0 & 0 & I_{wy} & rz_c C_x & rz_c C_x & rz_c C_x & 0 \\ 0 & 4C_y z_c & 0 & c_{64} & 0 & 4C_z w^2 + 4C_y z_c^2 & -I_{wy}\omega_0 & -I_{wy}\omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{72} & 0 & -aC_a & 0 & -z_c C_a + I_{wy}\omega_0 & d_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_I k_s \\ 0 & c_{72} & 0 & -aC_a & 0 & -z_c C_a + I_{wy}\omega_0 & 0 & d_s & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_I k_s \\ -rC_x & 0 & 0 & rwC_x & rz_c C_x & 0 & 0 & 0 & r^2 C_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -rC_x & 0 & 0 & -rwC_x & rz_c C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & r^2 C_x & 0 & 0 & 0 \\ -rC_x & 0 & 0 & rwC_x & rz_c C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r^2 C_x & 0 & 0 \\ -rC_x & 0 & 0 & -rwC_x & rz_c C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r^2 C_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C_x = c_x/v_0, C_y = c_y/v_0, C_a = c_a/v_0$$

$$c_{44} = 2C_y(a^2 + b^2) + 4C_x - 2(a-b)C_a, \quad c_{42} = 2C_y(a-b) - 4C_a, \quad c_{55} = 2d_z(a^2 + b^2) + 4C_x z_c^2$$

$$c_{46} = 2C_y z_c(a-b) - 4C_a z_c + 4I_{wy}\omega_0, \quad c_{64} = 2C_y z_c(a-b) - 4I_{wy}\omega_0, \quad c_{72} = -C_a + (KT_p + K_d)k_s$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2.28E4	0	0	-0.01117	-1.569E4	0	0	0	-1529	-1529	-1529	-1529	0
2	0	1.1E4	0	0	0	7571	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	8579	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	-733.3	0	2.701E4	0	-430.2	0	0	1070	-1070	1070	-1070	0
5	-1.569E4	0	0	0	2.315E4	0	0	0	1052	1052	1052	1052	0
6	0	7571	0	-74.54	0	9415	-18.64	-18.64	0	0	0	0	0
7	0	1767	0	-220	0	-107.5	48.37	0	0	0	0	0	-2600
8	0	1767	0	-220	0	-107.5	0	48.37	0	0	0	0	-2600
9	-1529	0	0	1070	1052	0	0	0	410.2	0	0	0	0
10	-1529	0	0	-1070	1052	0	0	0	0	410.2	0	0	0
11	-1529	0	0	1070	1052	0	0	0	0	0	410.2	0	0
12	-1529	0	0	-1070	1052	0	0	0	0	0	0	410.2	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 1.226. Аналитическая и численная формы матрицы коэффициентов при скоростях

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -4c_x/r & 0 & 2(a-b)c_x/r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4C_y & 0 & 0 & -c_y & -c_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4k_z & 0 & 2(b-a)k_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(b-a)c_y + 4c_a & 0 & 4w^2c_x/r & -ac_y + c_a & -ac_y + c_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2(b-a)k_z + 4c_xz_c/r & 0 & 2(a^2 + b^2)k_z - M_{\Sigma}g(z_c - r) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4z_c c_y & 0 & 4w^2k_z - M_{\Sigma}gz_c & -z_c c_y & -z_c c_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (K + K_2)k_s & 0 & c_a + a(K + K_2)k_s & 0 & (z_c - r)(K + K_2)k_s & k_s + c_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (K + K_2)k_s & 0 & c_a + a(K + K_2)k_s & 0 & (z_c - r)(K + K_2)k_s & 0 & k_s + c_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_x & 0 & -ac_x & wc_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_x & 0 & -ac_x & -wc_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_x & 0 & bc_x & wc_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_x & 0 & bc_x & -wc_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a & 0 & z_c - r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	-8.498E5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-1.1E5	0	0	-2.749E4	-2.749E4	0	0	0	0	0
3	0	0	9.2E5	0	1.932	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	7332	0	4.164E5	-3.116E4	-3.116E4	0	0	0	0	0
5	0	0	5.849E5	0.7845	1.32E6	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	-7.571E4	0	4.434E5	-1.892E4	-1.892E4	0	0	0	0	0
7	0	1950	0	4173	0	819	2.783E4	0	0	0	0	0	0
8	0	1950	0	4173	0	819	0	2.783E4	0	0	0	0	0
9	0	0	5.699E4	0	-6.838E4	3.989E4	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	5.699E4	0	-6.838E4	-3.989E4	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	5.699E4	0	6.839E4	3.989E4	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	5.699E4	0	6.839E4	-3.989E4	0	0	0	0	0	0	0
13	0	1	0	1.2	0	0.42	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 1.227. Аналитическая и численная формы матрицы позиционных сил

1.10.3.3. Корневые годографы: зависимость собственных значений от параметров управления

В данном разделе мы рассмотрим, каким образом можно использовать метод построения корневых годографов для анализа влияния параметров модели водителя на устойчивость и колебания движения автомобиля при движении по прямолинейному участку дороги.

Уравнения движения, выведенные в предыдущем разделе, показывают, что управляемое движение автомобиля по прямой зависит от трех параметров:

$$K + K_2, K T_p + K_d, K_I$$

Фактически это означает, что можно ограничиться исследованием влияния только параметров K , K_d , K_I .

1.10.3.3.1. Влияние параметра K

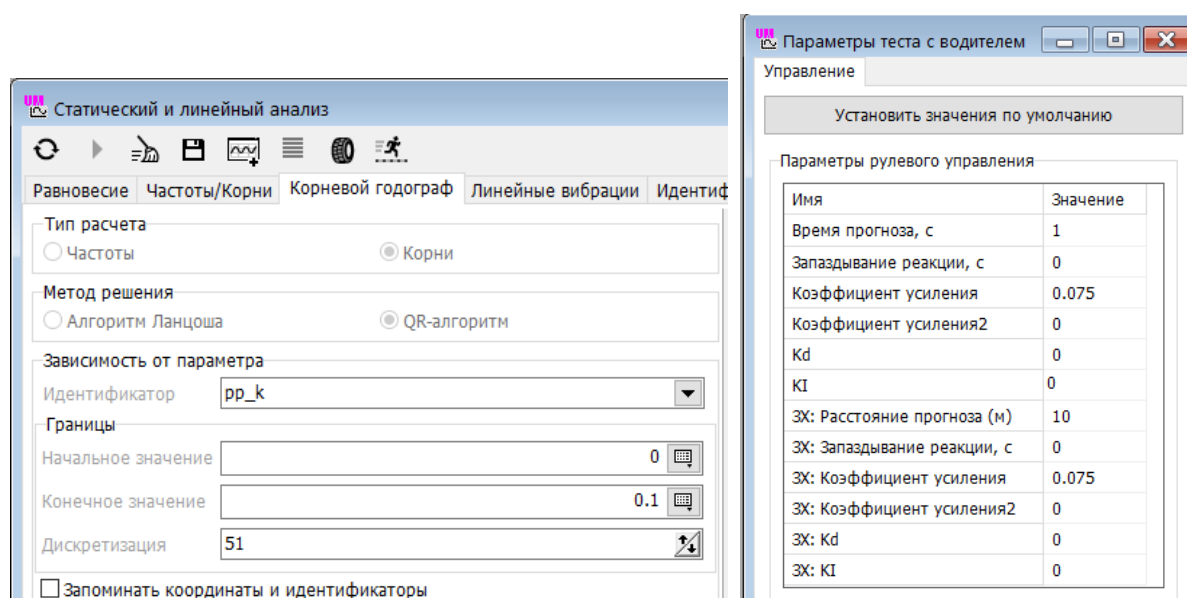





Рис. 1.228. Настройка расчета зависимости корней от параметра K

Для построения коревого годографа для параметра управления K следует перейти на вкладку **Корневой годограф**, установить тип расчета **Корни**, выбрать идентификатор pp_k , соответствующий параметру управления K , задать интервал изменения и дискретизацию этого идентификатора, рис. 1.228, слева. Установить значения других параметров управления в окне, которое появляется щелчком на кнопке  на панели инструментов окна статического анализа, рис. 1.228, справа. Расчет запускается щелчком на кнопке . После окончания расчета корневые годографы, то есть зависимость корней характеристического уравнения линеаризованных уравнений от параметра, можно построить щелчком на кнопке . Пример расчета при скорости 10 м/с приведен на рис. 1.229. По оси абсцисс откладывается действительная часть корней, по оси ординат – мнимая часть, деленная на 2π , то есть частота в герцах.

На рисунке показан фрагмент полного годографа в окрестности начала отсчета. При этом выделена ветвь для пары собственных значений, которые соответствуют влиянию

автомобиля вследствие влияния управления. При значении $K = 0$, то есть при отсутствии управления, собственные значения нулевые, то есть движение неустойчиво. При малых ненулевых значениях K появляется пара комплексно-сопряженных корней с отрицательной вещественной частью, то есть движение асимптотически устойчиво и носит характер затухающих колебаний. При дальнейшем росте коэффициента управления действительная часть корня движется в отрицательном направлении, а частота сначала растет, а затем убывает. Максимальное значение частоты колебаний примерно соответствует 1 рад/с. При значении $K \approx 0.73$ комплексные корни сливаются (значение примерно -2) и появляется пара действительных отрицательных корней, один из которых смещается в отрицательную область, а другой при росте K стремится к предельному значению, равному примерно -1. Движение при этом устойчиво, и носит не колебательный (апериодический) характер.

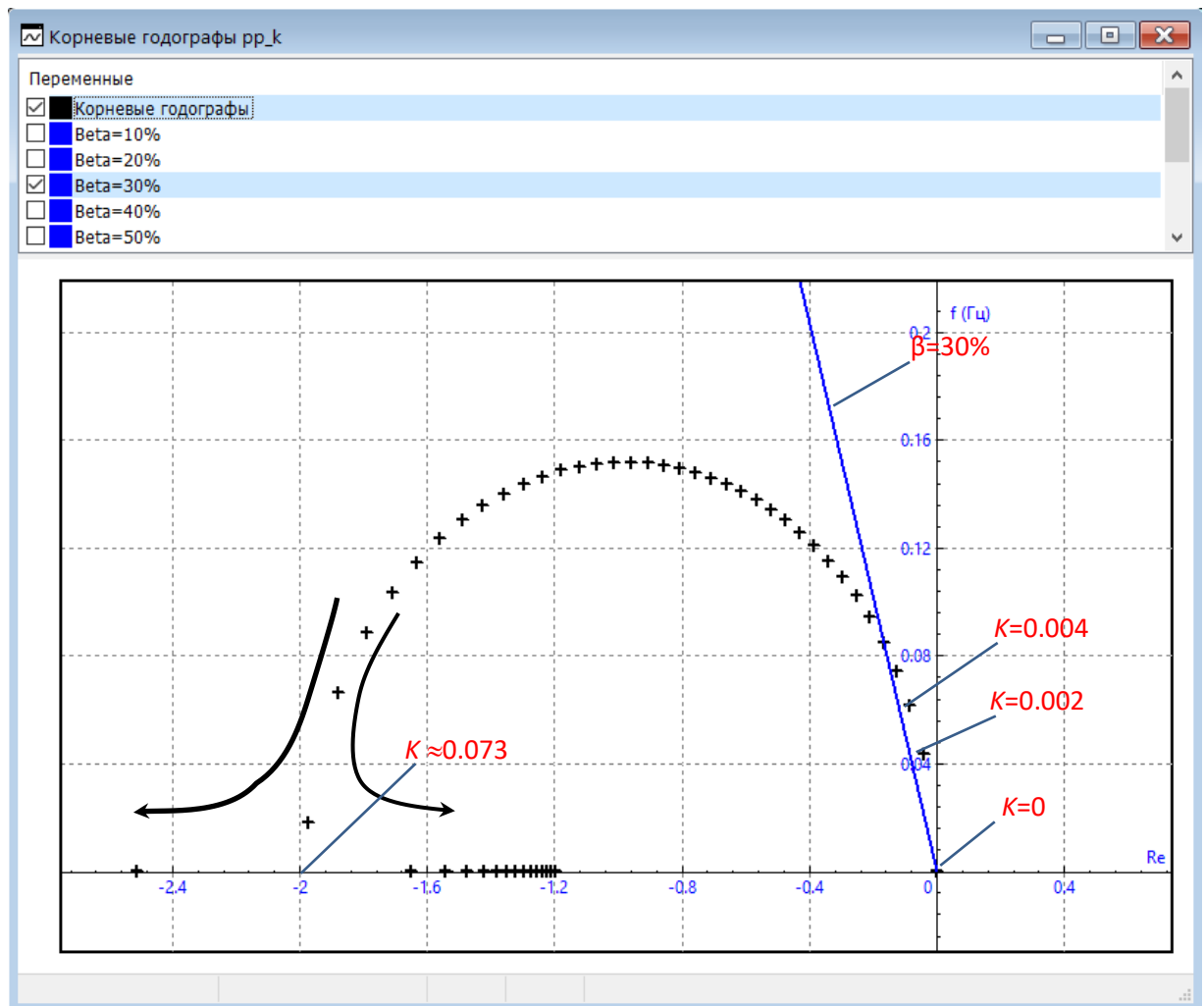


Рис. 1.229. Фрагмент корневого годографа для параметра K

Сравним данный результат линейного анализа с моделированием управляемого движения автомобиля по прямой. Рассмотрим процесс отработки управлением начального отклонения автомобиля от идеального положения вдоль прямой: модели задан начальный поворот вокруг вертикальной оси на 0.01 радиан. Скорость равна 10м/с. В качестве результата моделирования рассмотрим зависимость от времени отклонения центральной точки между передними колесами от заданной прямолинейной траектории. На рис. 1.230

приведены графики данной переменной для трех вариантов управления. Укажем значения коэффициента управления и соответствующие ему корни на годографе, приведенном на рис. 1.229:

$K = 0.008$: частота 0.0852 Гц (период 11.7с), доля демпфирования 30%;

$K = 0.02$: частота 0.126 Гц (период 7.9с), доля демпфирования 47.7%;

$K = 0.074$: апериодическое движение, минимальный по абсолютной величине отрицательный корень -1.65.

Из рисунка видно, что период и декремент при затухающих колебаниях при $K = 0.008, 0.02$ соответствуют корням. При $K = 0.074$ имеем не колебательный, то есть апериодический характер затухания.

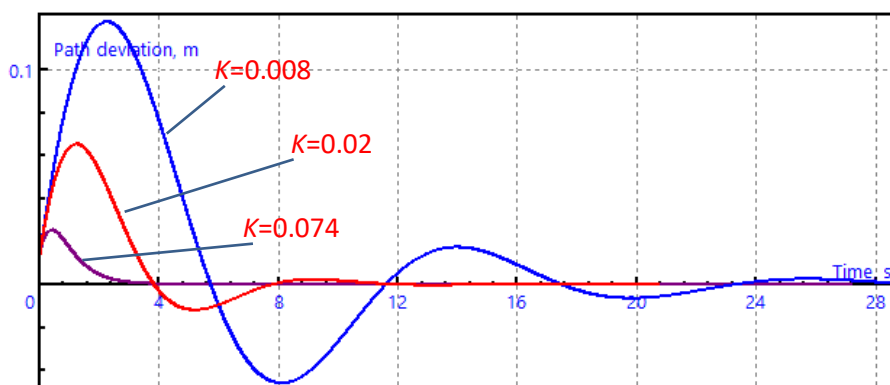


Рис. 1.230. Затухание колебаний автомобиля при различных значениях параметра K

Для повторения данных результатов моделирования следует загрузить модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Car simple](#) в программу моделирования и прочитать полную конфигурацию с помощью команды основного меню **Файл | Загрузить конфигурацию | Control compare**. При чтении конфигурации устанавливается значение $K = 0.008$.

Корневые годографы для автомобиля для скорости 10 м/с **при различных значениях времени предвидения T_p** показаны на рис. 1.231. Обратите внимание, что на рис. 1.229 и рис. 1.231 ординаты имеют разную размерность: в первом случае это частота в Гц, а во втором – мнимая часть корня в рад/с, то есть величина в 2π раз большая.

Имеется аналогия полученного результата с корневым годографом линейного осциллографа с демпфированием, пропорциональным жесткости, см. п. 1.10.3.3.5. Результаты близки при значениях времени предвидения порядка 1с и больше, а при меньших значениях T_p различия наблюдаются при значениях коэффициента управления $K > 0.1$, которые на практике не используются.

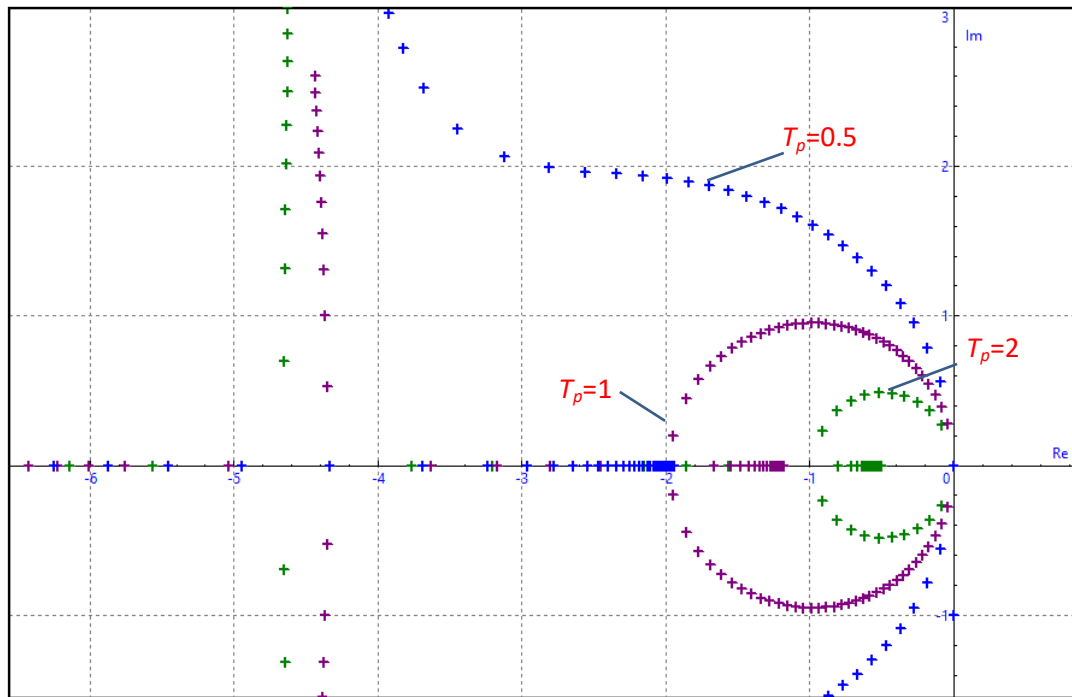


Рис. 1.231. Фрагменты корневого годографа автомобиля для различных значений времени предвидения T_p

Рассмотрим влияние скорости на устойчивость модели системы управления.

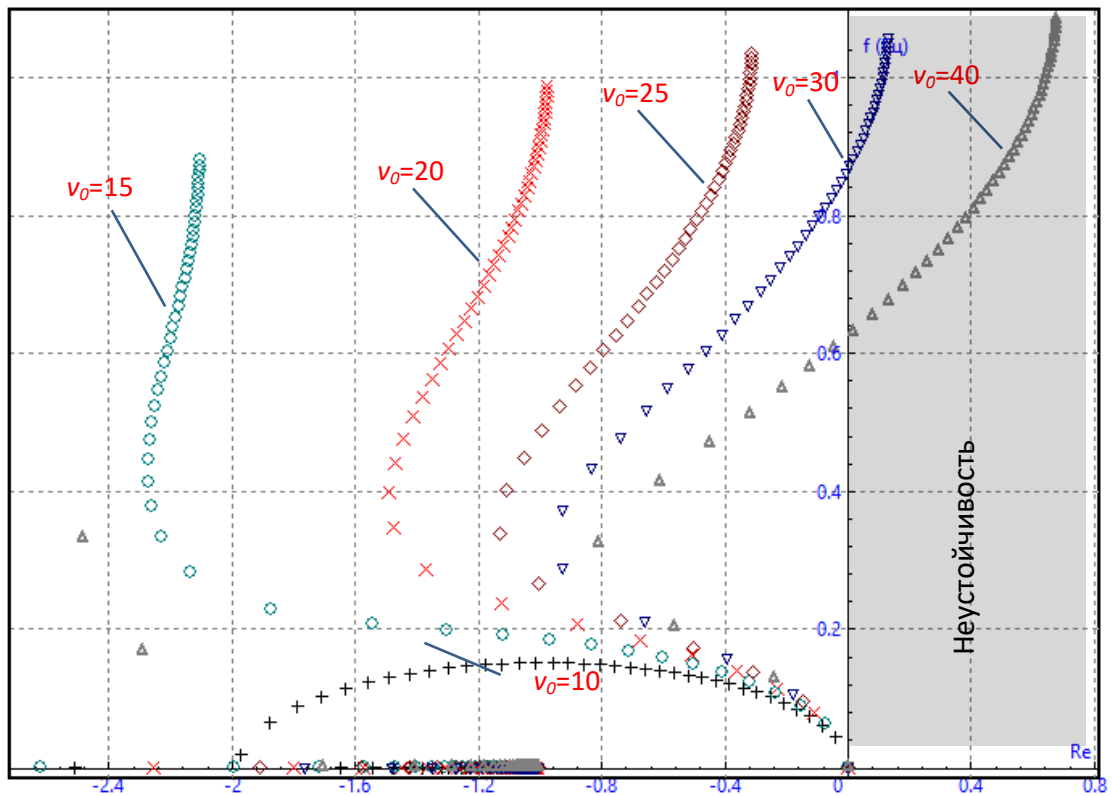


Рис. 1.232. Корневые годографы для параметра K при различных значениях скорости автомобиля

На рис. 1.232 представлены корневые годографы $K \in [0, 0.1]$ при различных скоростях автомобиля. Из этого рисунка следует важный вывод о том, что **при увеличении скорости возможна потеря устойчивости автомобиля**, которая характеризуется появлением корней с положительной вещественной частью. Для данной модели автомобиля неустойчивость появляется при скоростях больше некоторого критического значения скорости (около 30 м/с) при увеличении коэффициента управления. При скорости 30 м/с неустойчивость возникает при $K > 0.054$, а при скорости 40 м/с – при $K > 0.019$.

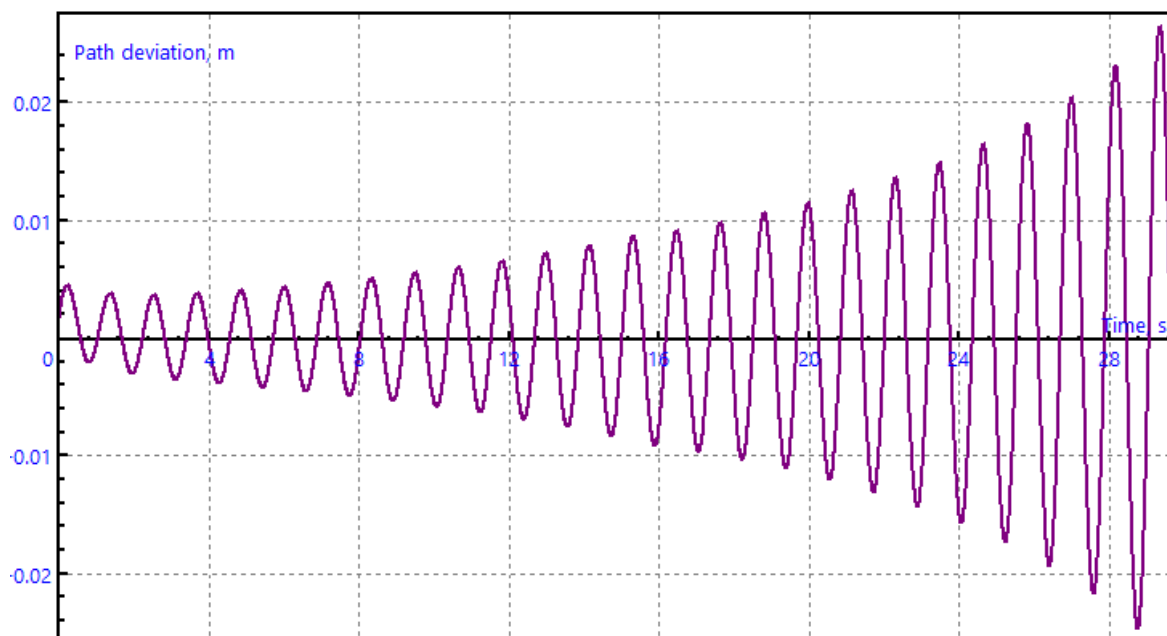


Рис. 1.233. Неустойчивость модели управления при скорости 30 м/с, $K = 0.058$

Таким образом, при больших скоростях автомобиля следует уменьшать значение коэффициента управления K , проведя предварительное исследование с помощью построения корневых годографов.

Заметим, что в малой окрестности границы неустойчивости точность численного метода интегрирования может влиять на развитие неустойчивости, поэтому для получения результатов, аналогичных графику на рис. 1.233, рекомендуется повысить точность численного метода. Рекомендуется также в настройках численного метода поставить значение минимального числа итераций, большее единицы.

1.10.3.3.2. Влияние параметра K_d

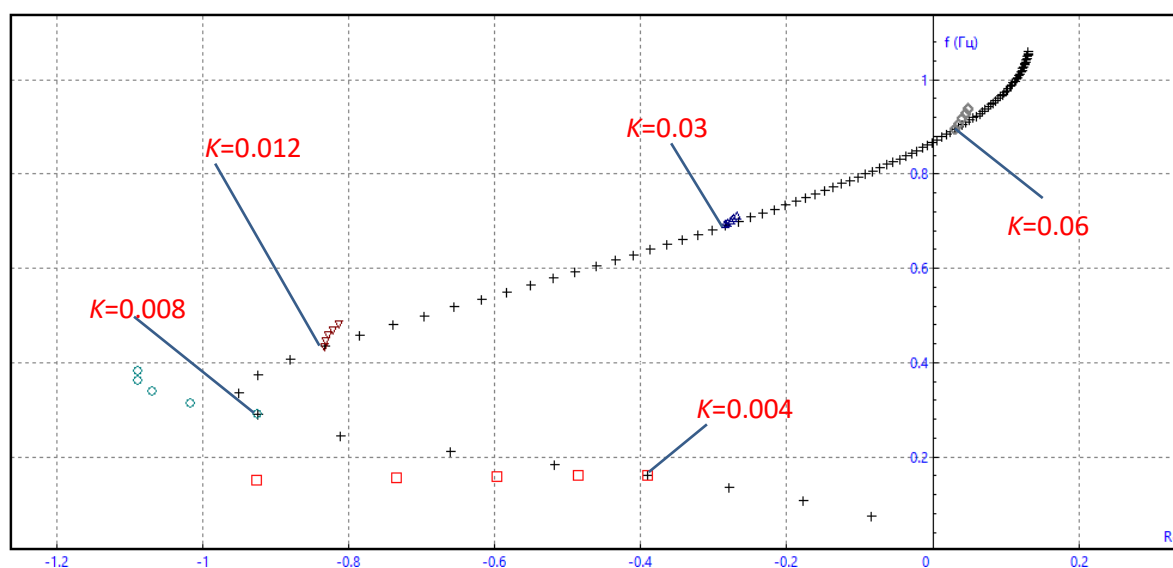


Рис. 1.234. Влияние параметра K_d на корневой годограф

Для оценки влияния параметра управления K_d рассмотрим корневой годограф для K при скорости 30 м/с (см. рис. 1.232) и наложим на него зависимости корней от K_d при некоторых K , Рис. 1.234. Для всех значений K , кроме $K=0.06$, задан интервал изменения $K_d \in [0, 0.001]$, для последнего значения $K_d \in [0, 0.01]$.

Анализ данного графика показывает, что при малых значениях K параметр K_d увеличивает диссипацию и смещает корни влево. При увеличении K влияние ослабевает. В частности, параметр K_d **не может стабилизировать управление**, то есть сдвинуть корни из области неустойчивости в область устойчивости.

1.10.3.3.3. Влияние параметра K_i

Интегральный член управления обычно используется в системах управления для удаления стационарных погрешностей в работе управления при наличии постоянных возмущений. Например, если при движении автомобиля постоянно действует поперечная сила (например, сопротивление от бокового ветра), то при отсутствии интегрального члена управляемое движение стремится к ненулевому значению поперечной координаты, то есть имеем стационарную ошибку. Добавление интегрального члена обеспечивает стремление координаты к нулевому значению.

На рис. 1.235 приведены результаты управления автомобилем при действии постоянной поперечной силы 300Н, приложенной к центру масс при отсутствии и наличии интегрального члена. В начальный момент времени автомобиль повернут вокруг вертикальной оси на 0.1 рад. Для повторения данных результатов моделирования следует загрузить модель [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Car simple](#) в программу моделирования и прочитать полную конфигурацию с помощью команды основного меню **Файл | Загрузить конфигурацию | Integrasl control**.

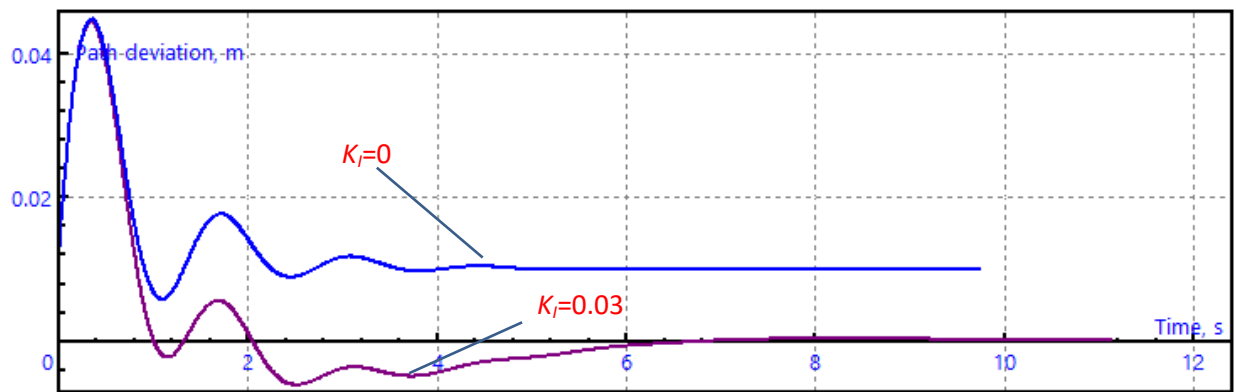


Рис. 1.235. Влияние интегрального члена на стабилизацию движения при наличии постоянной поперечной силы

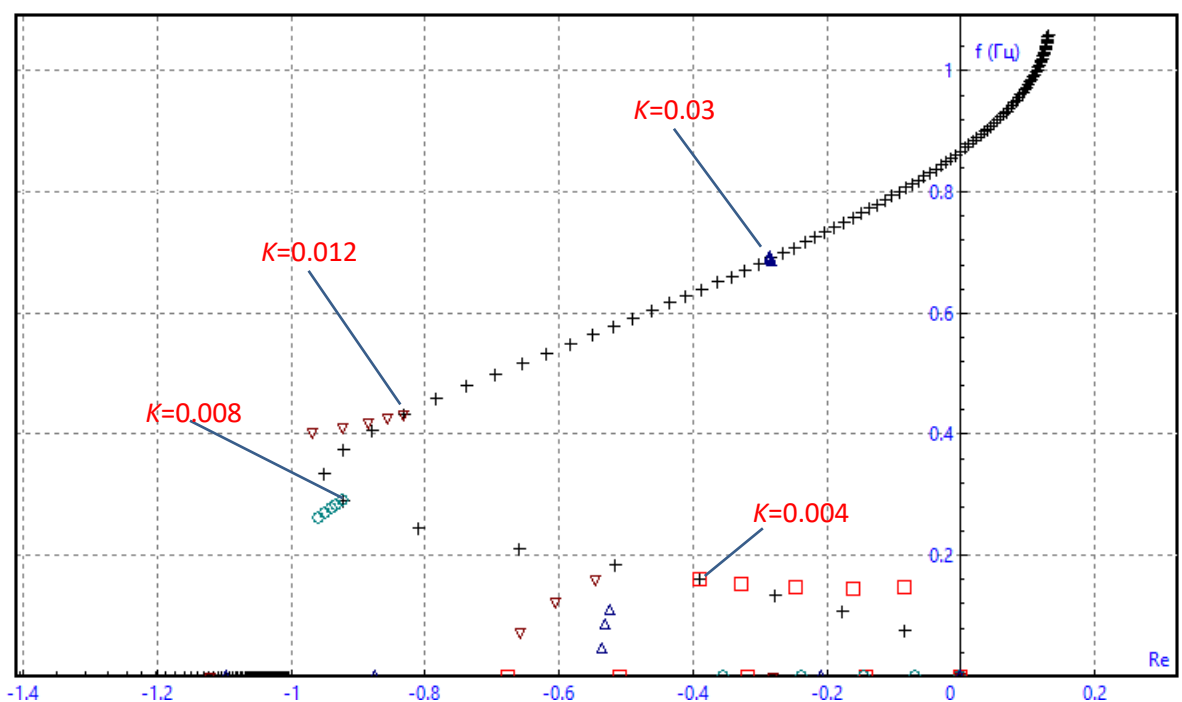


Рис. 1.236. Влияние параметра K_I на корневой годограф

Для оценки влияния параметра управления K_I рассмотрим корневой годограф для K при скорости 30 м/с (см. рис. 1.232) и наложим на него зависимости корней от K_I при некоторых K , Рис. 1.234. Для значений $K=0.004, 0.008$ задан интервал изменения $K_I \in [0, 0.002]$, для $K=0.012, 0.03$ значения $K_I \in [0, 0.02]$.

Анализ данного графика показывает, что при малых значениях K параметр K_I уменьшает демпфирование. При увеличении K влияние становится незначительным. Также можно сделать вывод о том, что параметр K_I не может стабилизировать неустойчивое управление.

1.10.3.3.4. Корневые годографы для полной модели легкового автомобиля

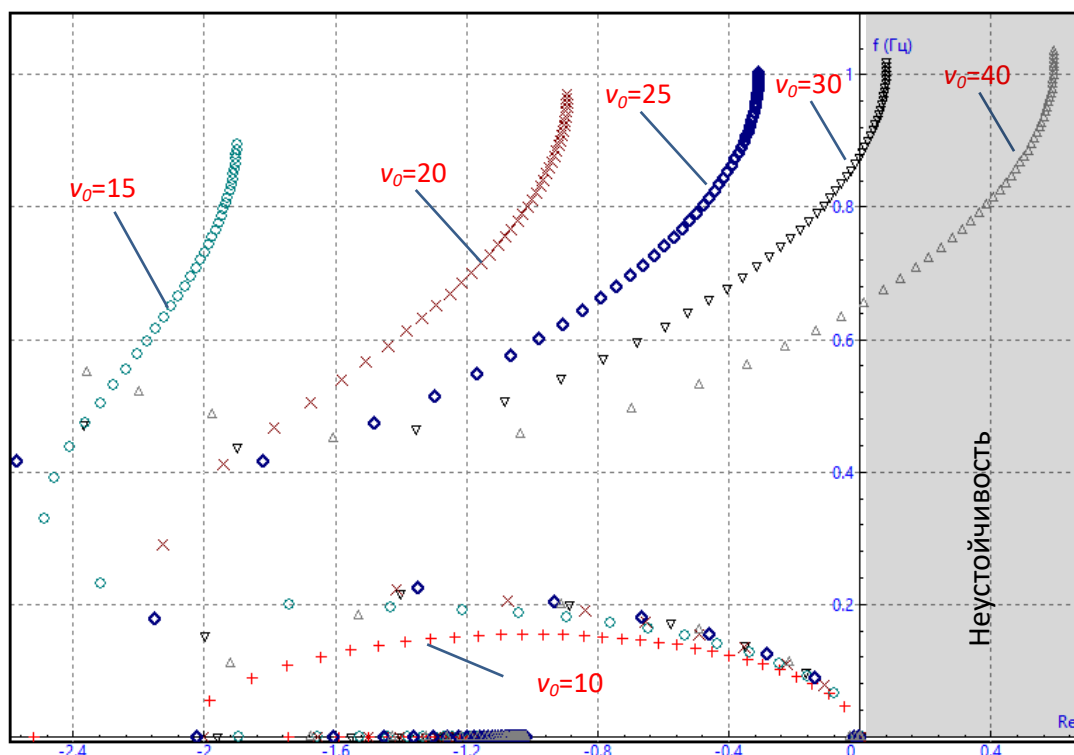


Рис. 1.237. Корневые годографы для параметра $K \in [0, 0.1]$ при различных значениях скорости модели автомобиля ВАЗ 2109

Предыдущий анализ касался сильно упрощенной модели легкового автомобиля с 12 степенями свободы, поэтому важно сравнить результаты с полнофункциональной моделью. Рассмотрим полнофункциональную модель легкового автомобиля ВАЗ 2109 ([{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Vaz2109 T](#)), имеющую 36 степеней свободы. На рис. 1.237 приведены корневые годографы для параметра K при различных значениях скоростей автомобиля. Сравнение с аналогичным рисунком для упрощенной модели (рис. 1.232) показывает хорошее качественное и количественное совпадение результатов, в том числе по потере устойчивости. Таким образом, **упрощенную модель автомобиля можно использовать для оценки влияния параметров управления на прямолинейное движение.**

1.10.3.3.5. Корневой годограф линейного осциллятора с демпфированием, пропорциональным коэффициенту жесткости

Данный раздел является вспомогательным и помогает на простейшем примере проанализировать корневой годограф, качественно близкий тому, который получен при исследовании влияния параметра управления K , рис. 1.229, рис. 1.231.

Линейный осциллятор – это материальная точка массы m , движущаяся по прямой, прикрепленная к линейной пружине с коэффициентом жесткости k при наличии линейного демпфирования. Рассмотрим случай, когда коэффициент демпфирования Tk пропорци-

онален жесткости, коэффициент пропорциональности T имеет размерность времени. Свободные колебания осциллятора в этом случае описываются уравнением

$$m\ddot{x} + Tk\dot{x} + kx = 0.$$

Характеристическое уравнение

$$m\lambda^2 + Tk\lambda + k = 0$$

имеет корни

$$\lambda_{1,2} = \frac{-Tk \pm \sqrt{T^2k^2 - 4mk}}{2m}$$

При жесткости $k < 4m/T^2$ имеем пару комплексно сопряженных корней

$$\lambda_{1,2} = A(k) \pm iB(k), \quad A(k) = \frac{-Tk}{2m}, B(k) = \frac{\sqrt{4mk - T^2k^2}}{2m}$$

При критическом демпфировании $k^* = 4m/T^2$ получим кратный действительный корень

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -\frac{2}{T},$$

а при $k > 4m/T^2$ - два действительных отрицательных корня

$$\lambda_1 = \frac{-Tk + \sqrt{T^2k^2 - 4mk}}{2m} = \frac{-4mk}{2m(Tk + \sqrt{T^2k^2 - 4mk})} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} -\frac{1}{T},$$

$$\lambda_2 = \frac{-Tk - \sqrt{T^2k^2 - 4mk}}{2m} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} -\infty.$$

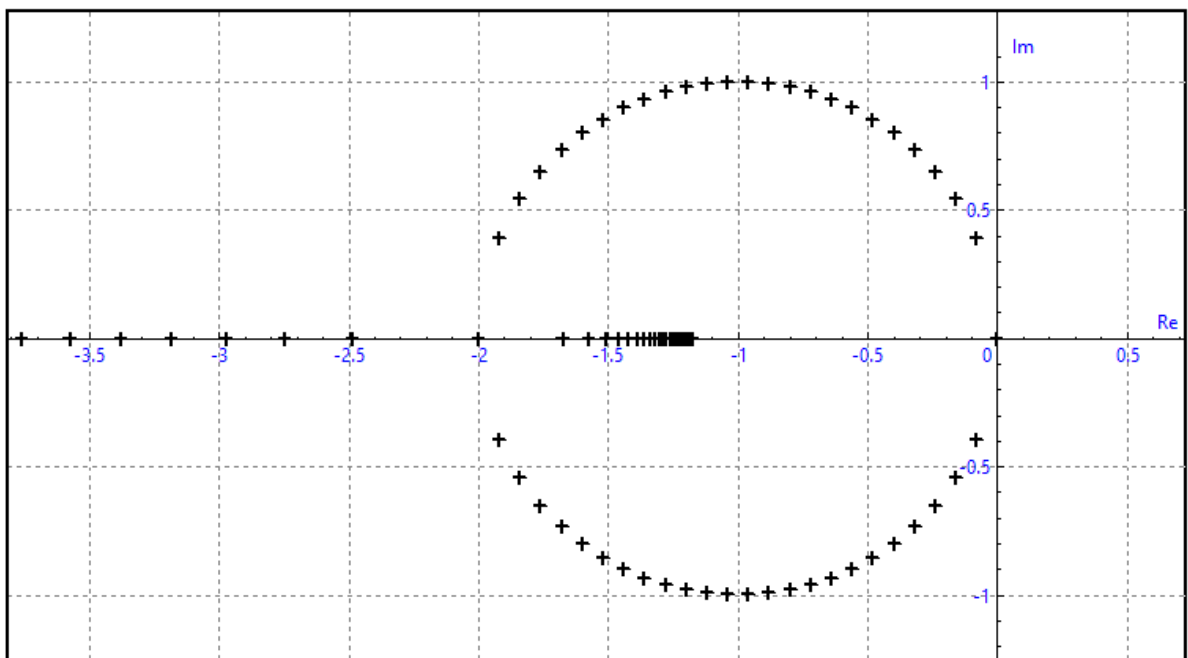


Рис. 1.238. Корневой годограф для осциллятора

Зависимость корней характеристического уравнения осциллятора от параметра k на комплексной плоскости, то есть корневой годограф, приведена на рис. 1.238. Корневой годограф построен для значения $T = 1$. Обратим внимание, что пара комплексно сопряженных корней лежит на окружности радиуса $1/T$ с центром в точке $(-1/T, 0)$, поскольку действительная и мнимая часть корня удовлетворяет соотношению

$$(A(k) + 1/T)^2 + (B(k))^2 = 1/T^2.$$

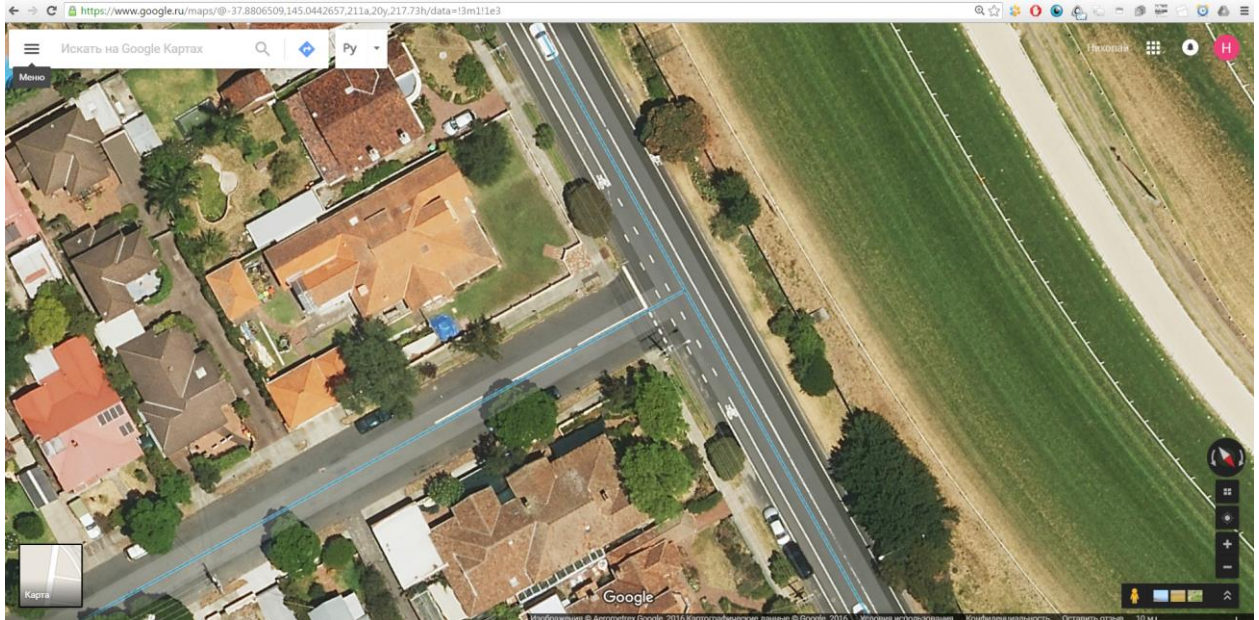
После слияния комплексных корней один корень движется влево вдоль действительной оси, а второй – вправо к предельному значению, совпадающему с центром окружности.

Сравнивая корневые годографы для упрощенной модели автомобиля при $T_p = 1$ и осциллографа можно сделать вывод об их очевидном качественном и количественном совпадении. Аналогом массы осциллографа является масса автомобиля, коэффициента жесткости k – жесткость $2c_y K$, зависящая от коэффициента управления K и коэффициента сопротивления боковому уводу шины c_y , а аналогом коэффициента пропорциональности T является время предвидения T_p .

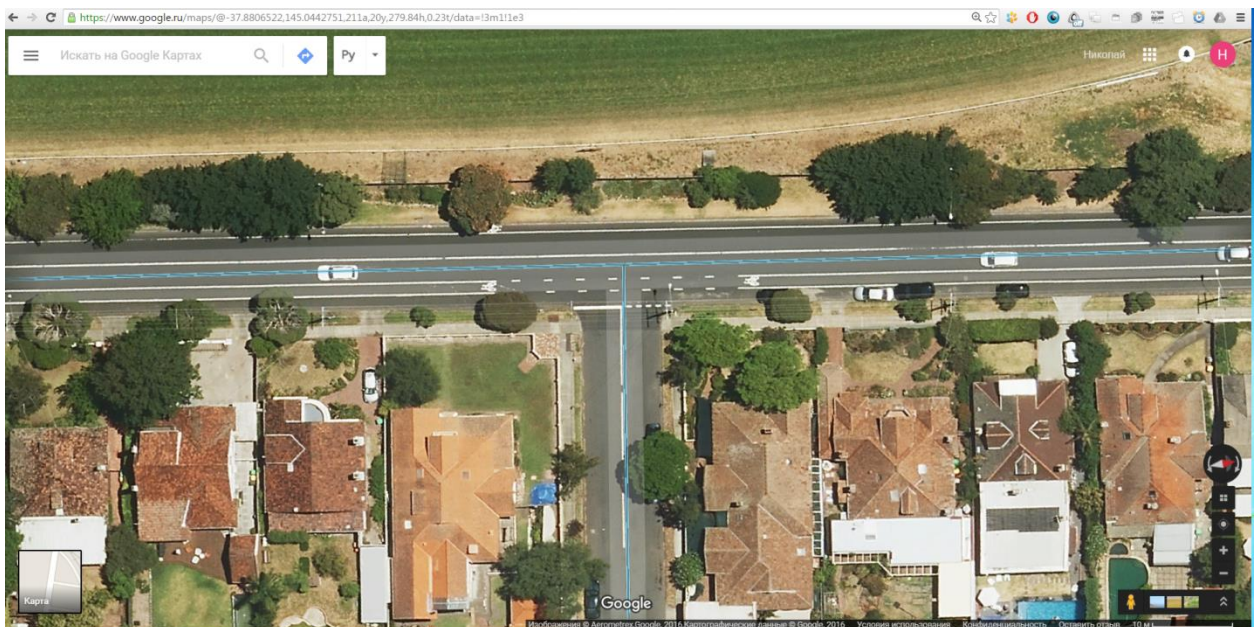
1.11. Вставка текстур в модель УМ (фото со спутника)

1.11.1. Создание и получение размеров участка карты

- Сперва необходимо выбрать нужное место на карте (Google maps)

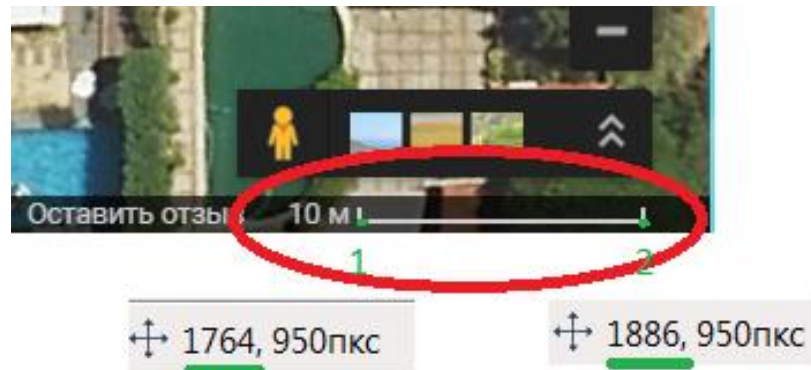


- Повернуть вид (Ctrl + Mouse move)

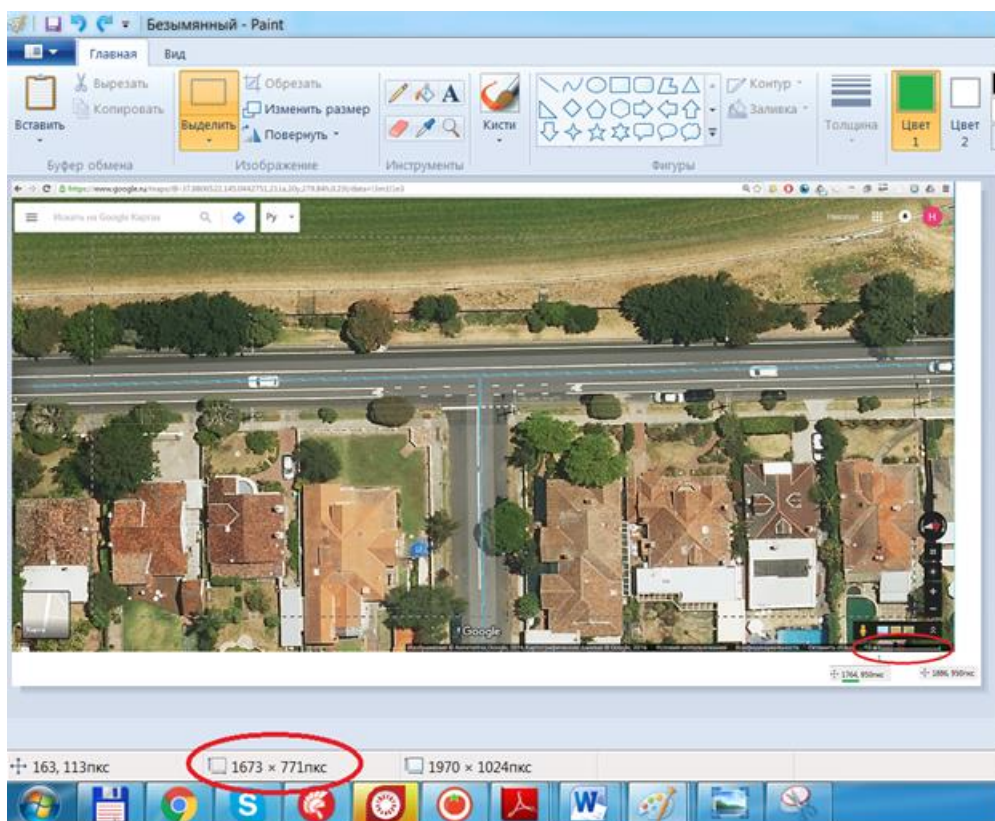


- Сделать скриншот вида и вставить его в программу paint
- В правом нижнем углу вы можете увидеть масштаб
- Определите пиксельное соотношение (число пикселей на единицу длины)
 - Получите пиксельные координаты углов характеристического размера (они отображаются в левом нижнем углу программы)

- Разность координат
 $\text{pixelLength} = X2 - X1 = 1886 - 1764 = 122 \text{ [pix]}$
- Рассчитайте пиксельное соотношение:
 $\text{pixelRatio} = \text{pixelLength}/\text{realLength} = 122 \text{ [pix]} / 10 \text{ [m]} = 12.2 \text{ [pix/m]}$



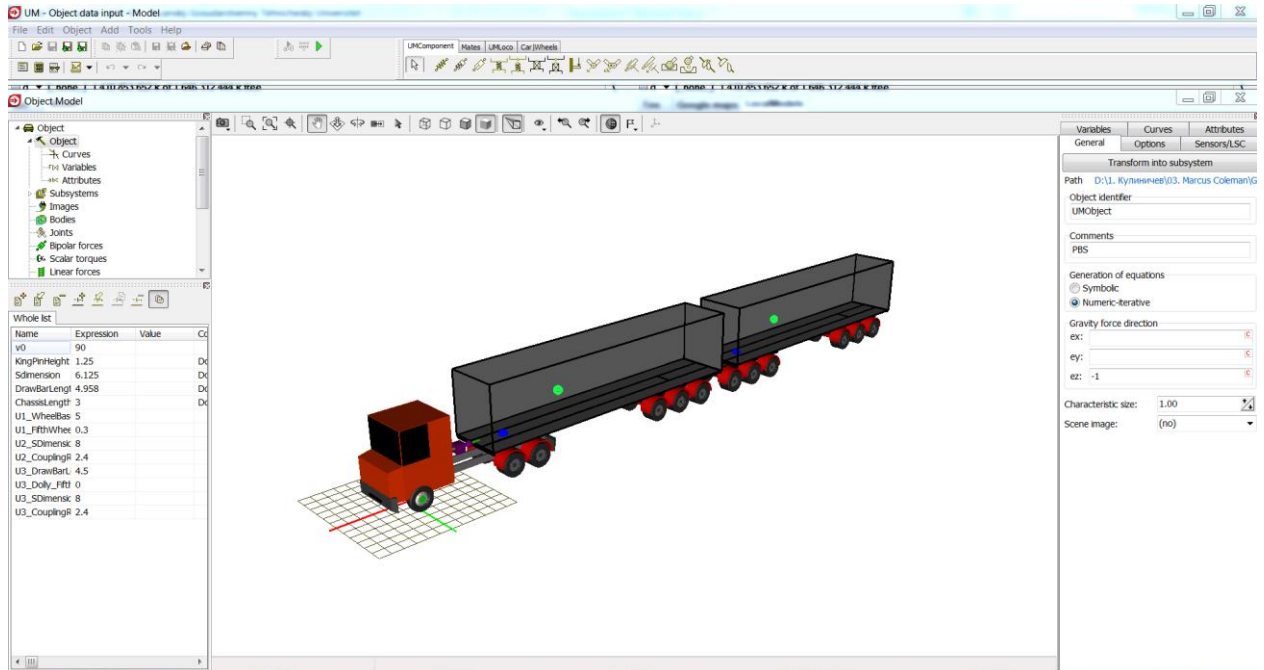
- Выделите необходимую часть рисунка прямоугольником. В левом нижнем углу вы можете увидеть пиксельную длину и высоту прямоугольника ($\text{pixelWidth} = 1673 \text{ [pix]}$; $\text{pixelHeight} = 771 \text{ [pix]}$). Скопируйте и сохраните выделенную часть рисунка как отдельный файл.



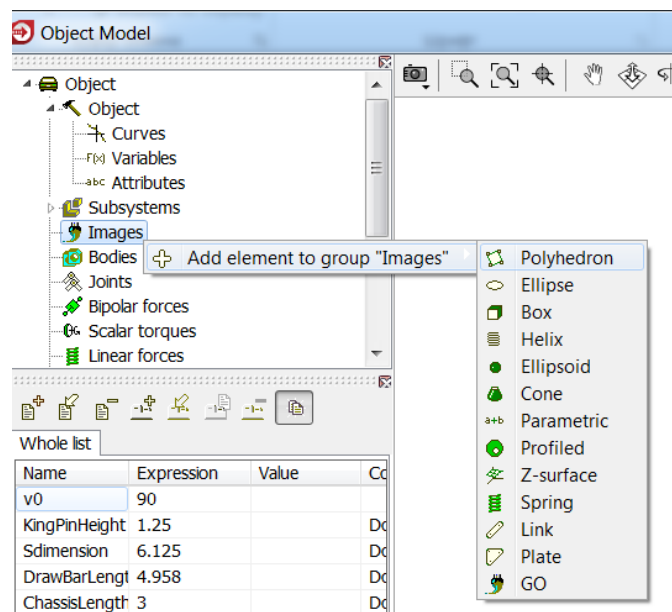
- Рассчитайте реальные размеры картинки (в метрах)
 $\text{realWidth} = \text{pixelWidth}/\text{pixelRatio} = 1673 \text{ [pix]} / 12.2 \text{ [pix/m]} = 137.1 \text{ [m]}$
 $\text{realHeight} = \text{pixelHeight}/\text{pixelRatio} = 771 \text{ [pix]} / 12.2 \text{ [pix/m]} = 63.2 \text{ [m]}$

1.11.2. Добавление текстур в модель UM

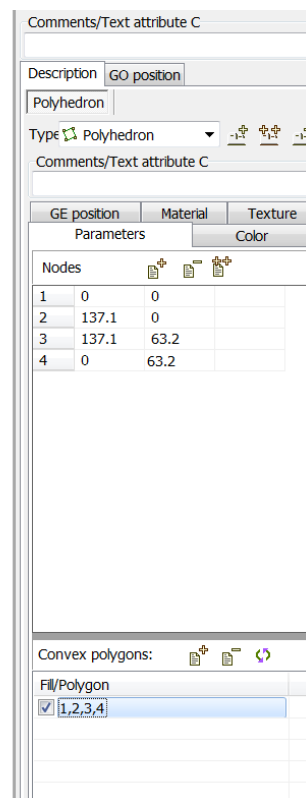
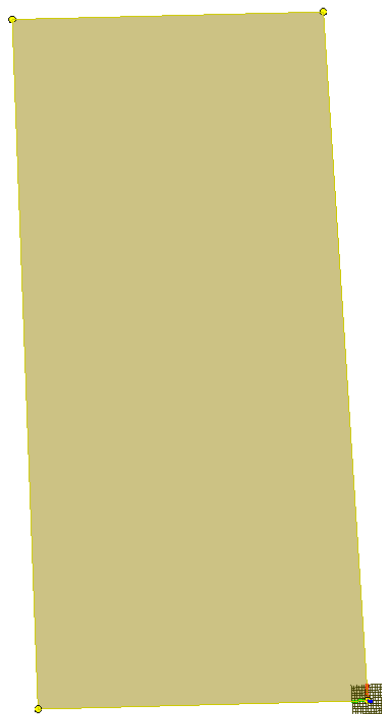
- Откройте модель в программе **UM Input**



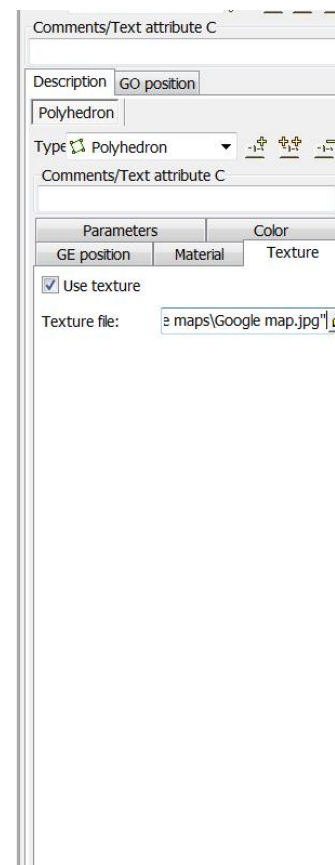
- Создайте новый графический объект "Полиэдр" и назовите его "Map"



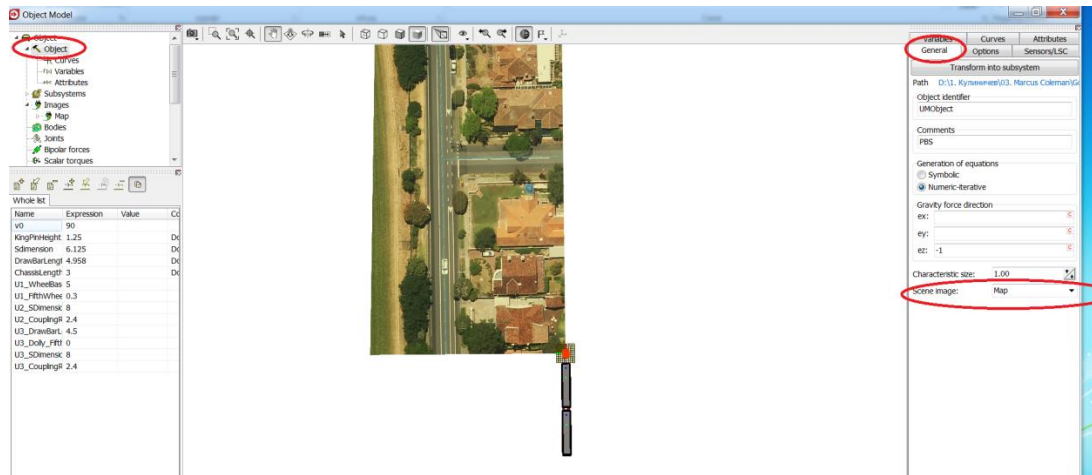
- Создайте узлы и полигон, как показано на рисунке.



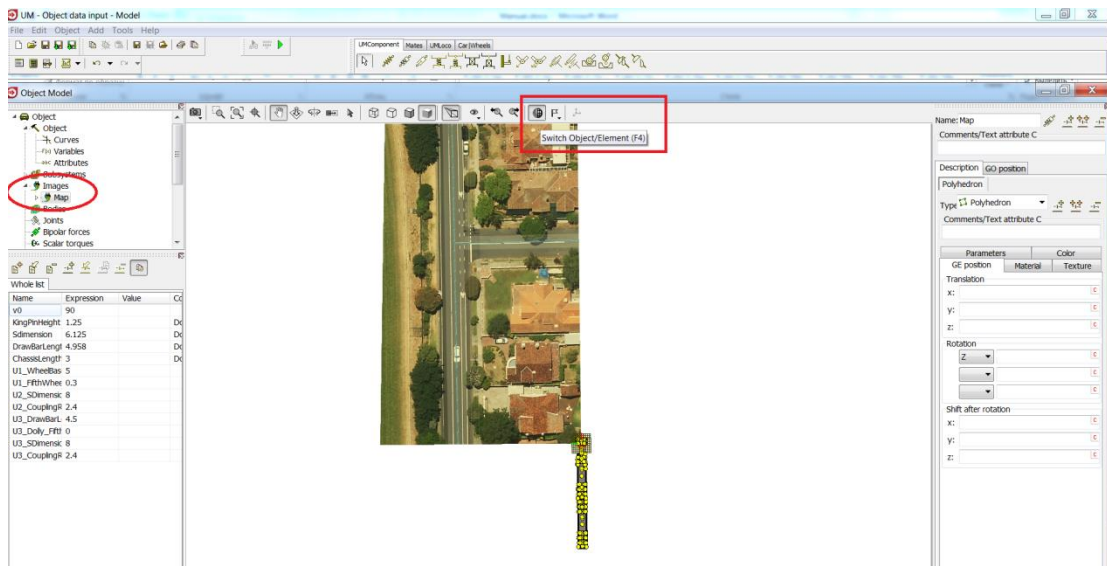
- Примените текстуры к графическому объекту



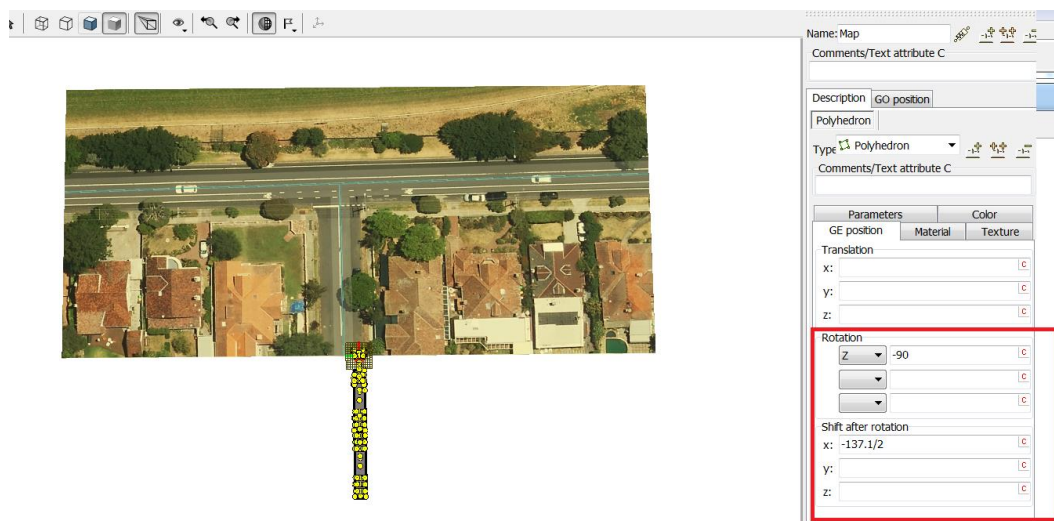
- Установите графический объект "Мар" как образ сцены



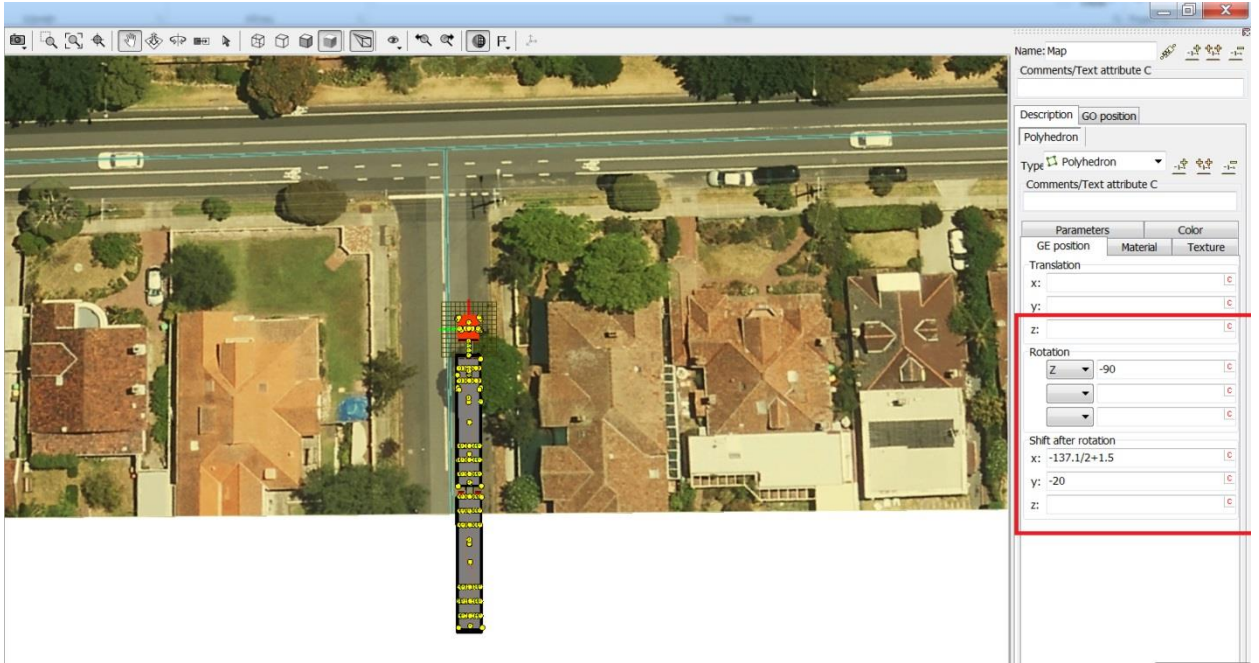
- Снова выберите графический объект "Map" и включите кнопку "Switch Object/Element (F4)"



- Поверните графический объект "Map" так, чтобы его вертикальное направление совпадало с осью X модели



- Move graphical object "Map" relative vehicle so vehicle will be on it's initial position.
- Сдвиньте графический объект "Map" относительно модели транспортного средства на необходимую величину.

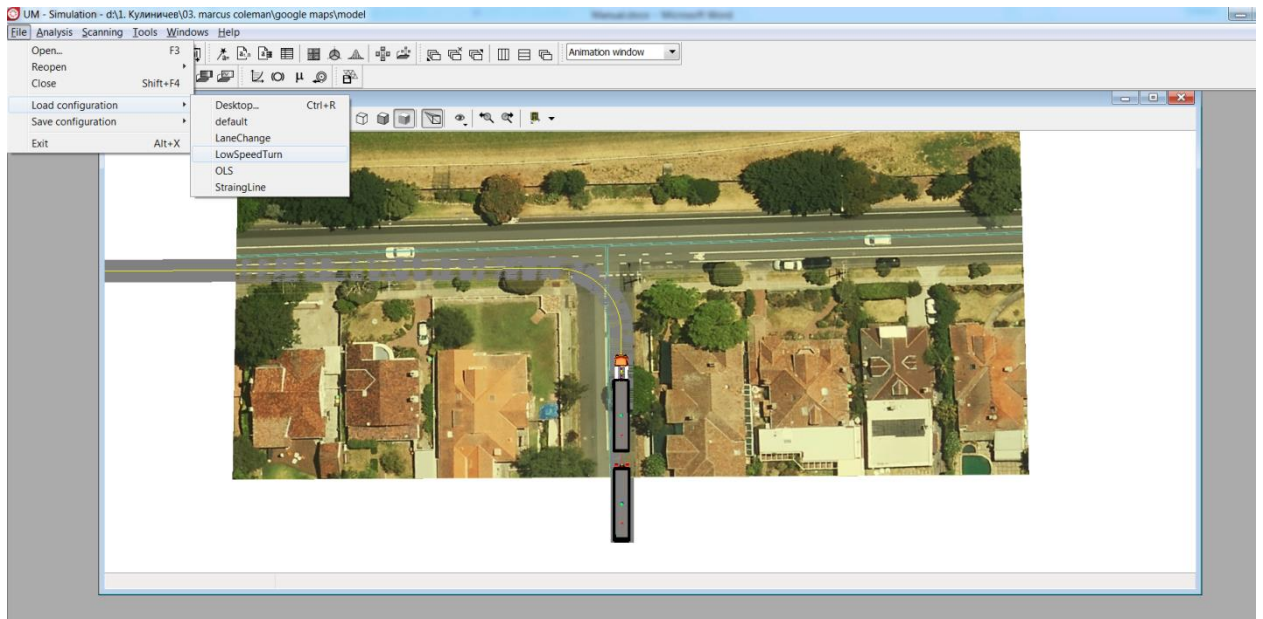


Замечание: Как вы можете видеть, картинка слишком мала для модели. Чтобы избежать этого, выбирайте больший регион на карте

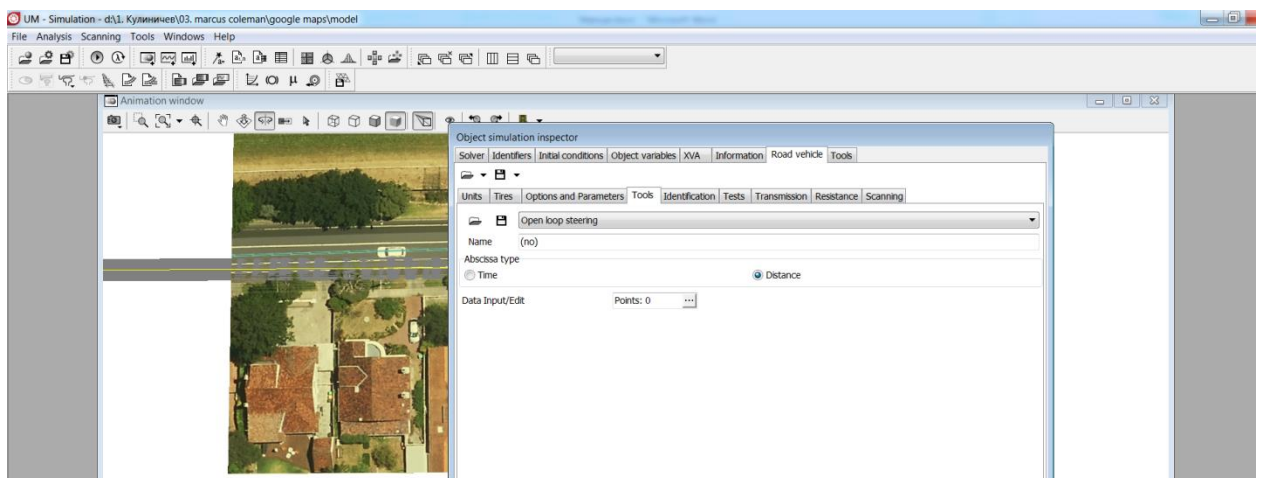
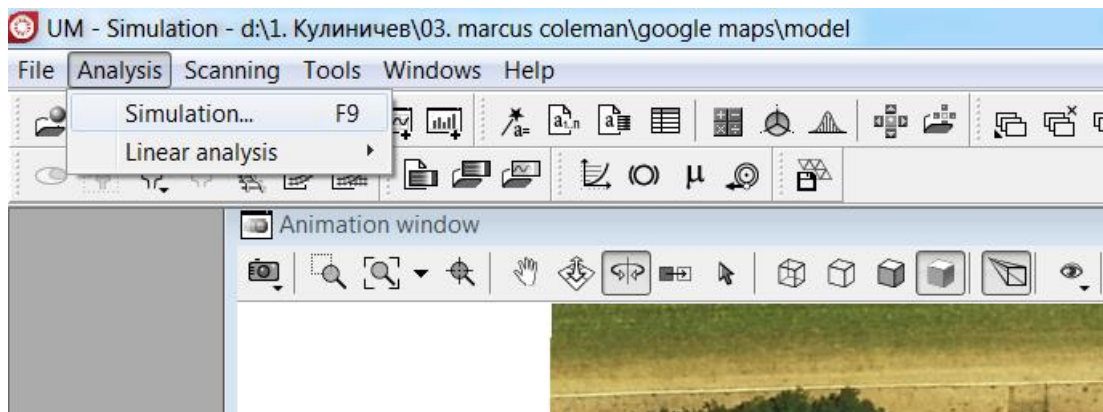
- Сохраните и закройте модель

1.11.3. Запуск моделирование

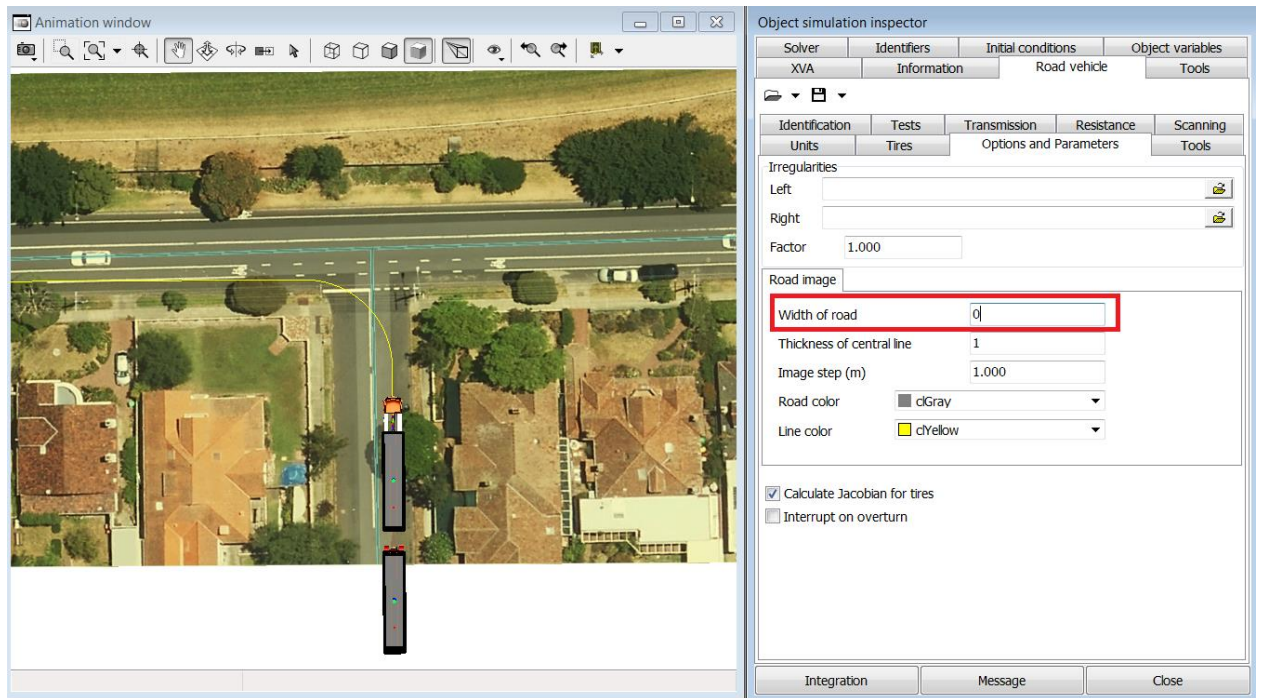
- Откройте модель в программе UM Simul и загрузите необходимую конфигурацию



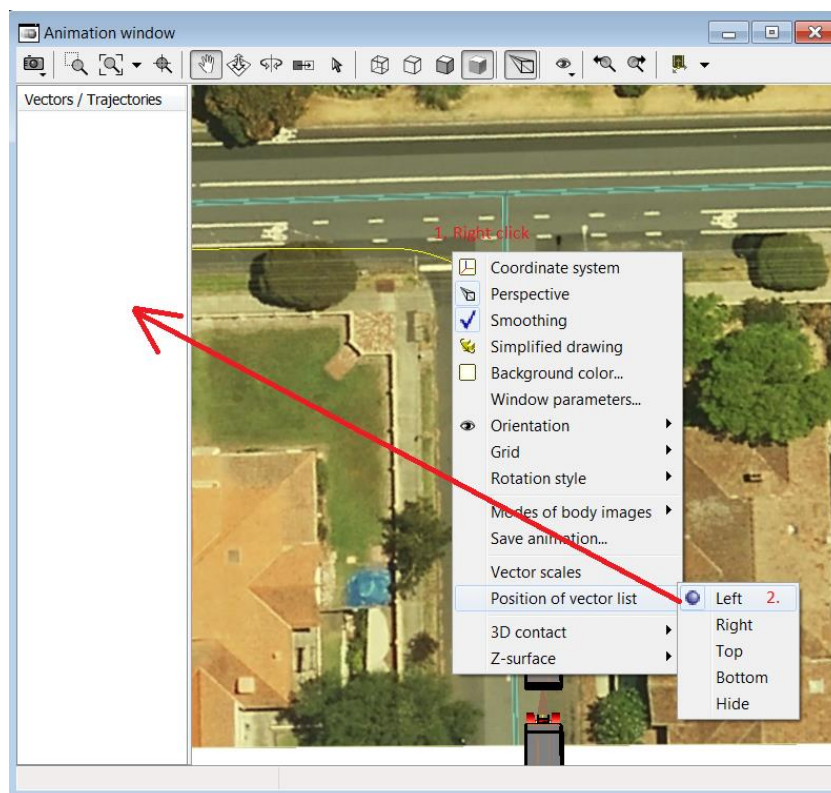
- Вызовите "Инспектор моделирования объекта"

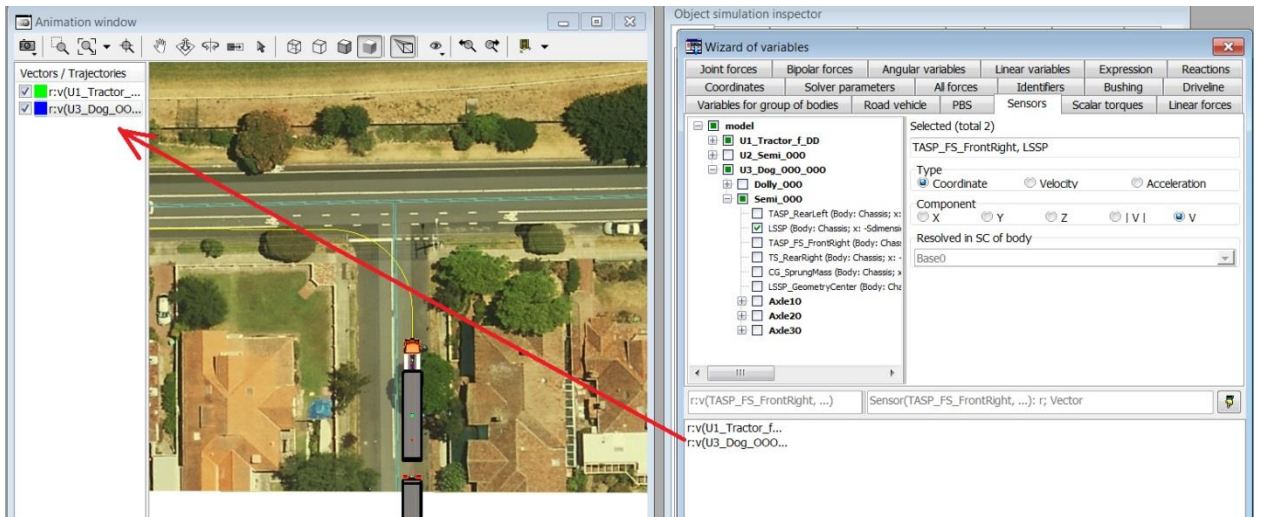


- Удалите стандартное изображение дороги (сделайте ширину дороги равной нулю)

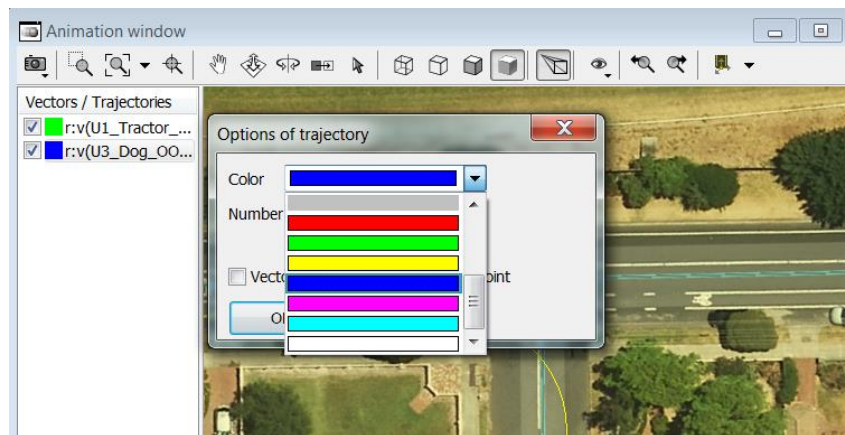


- Создайте и добавьте на анимационное окно траектории движения необходимых точек модели (например, LSSP сенсор)

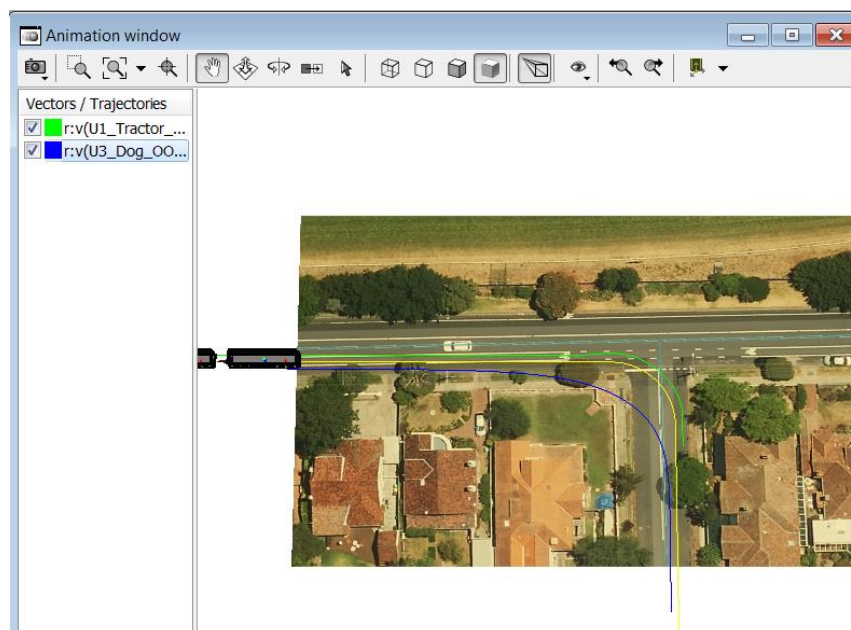




- Если нужно, измените цвета траекторий



- Запустите моделирование



1.12. Библиотека автомобильных подвесок

1.12.1. Введение

В данном руководстве пользователя описываются модели некоторых типовых автомобильных подвесок, распространяемых в составе программного комплекса "Универсальный механизм" (ПК УМ). Модели подвесок объединены в библиотеку, которая после установки "Универсального механизма" находится в каталоге {Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions.

Библиотека подвесок содержит наиболее распространенные типы подвесок для легковых и грузовых автомобилей. В текущей версии доступны следующие модели подвесок:

- зависимая подвеска с направляющими рычагами, см. п. 1.12.2.1, стр. 1-218;
- на двойных поперечных рычагах, см. п. 1.12.2.2, стр. 1-219;
- на косых рычагах, см. п. 1.12.2.3, стр. 1-220;
- Макферсона, см. п. 1.12.2.4, стр. 1-221;
- торсионно-рычажная, см. п. 1.12.2.5, стр. 1-222;
- многорычажная, см. п. 1.12.2.6, стр. 1-223.

Замечание Обратите внимание, что данный набор подвесок и кузовов является прототипом реальных и не повторяет всех геометрических и динамических свойств конструктивных элементов. Модели носят исключительно иллюстративный и образовательный характер.

1.12.2. Краткое описание моделей

1.12.2.1. Зависимая подвеска с направляющими рычагами

Это задняя зависимая подвеска, включающая жесткую балку, которая связывает между собой колеса, четыре направляющих рычага и один поперечный – тягу Панара. Рычаги крепятся с одной стороны к балке, с другой – к кузову автомобиля. В качестве упругих и демпфирующих элементов используются пружины и демпферы. В настоящее время данный тип подвески широко используется на внедорожниках ВАЗ 2121, ВАЗ 2123, Dodge Ram. Схему и устройство подвески можно найти в работе Й. Раймпеля [32].

Каталог модели: [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions\Axle Suspension](#).

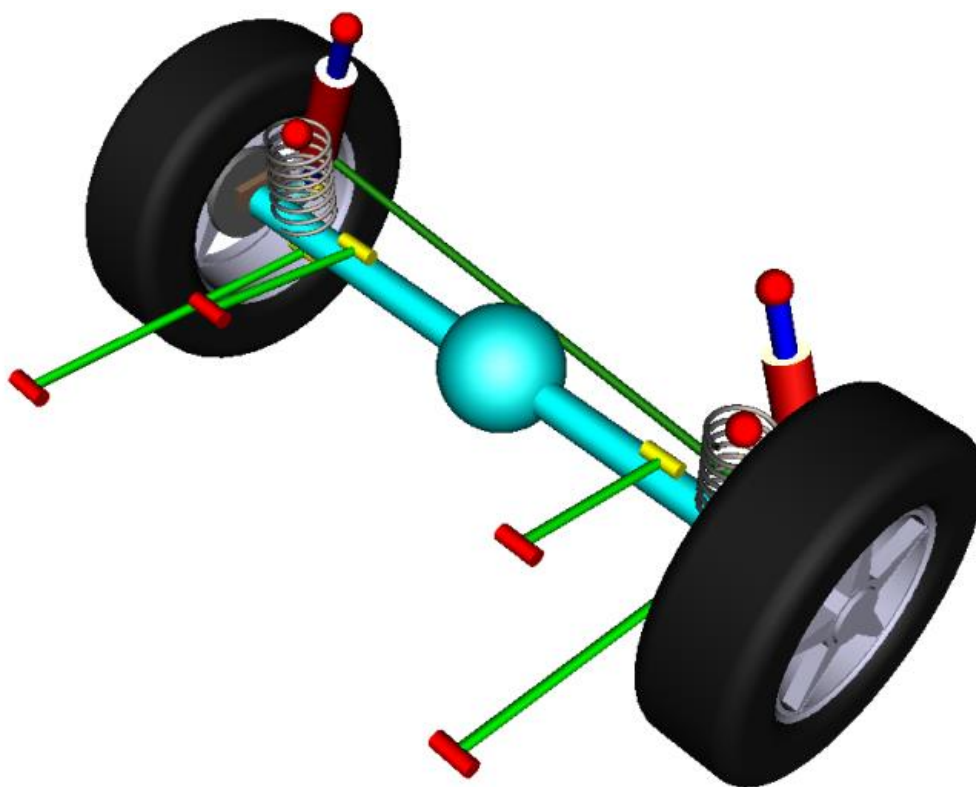


Рис. 1.239. Зависимая подвеска с направляющими рычагами

1.12.2.2. Подвеска на двойных поперечных рычагах

Данный тип подвески является одним из распространенных вариантов передней независимой подвески. С каждой стороны расположены по два поперечных рычага U-образной формы, внутренние концы которых крепятся к кузову, а внешние – к поворотной стойке. В модели также имеется стабилизатор поперечной устойчивости. Рулевое управление моделируется рулевой рейкой и присоединенными к ней рулевыми тягами. Пружины с амортизаторами выполнены соосно.

Подвеска используется на многих спортивных автомобилях, например, на Ferrari, TVR, Lotus, а также на седанах Mercedes-Benz, BMW, Honda, Alfa Romeo. Более подробное описание схемы и работы подвески можно прочитать в источнике [32].

Каталог модели: [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions\Double Wishbone Suspension.](#)

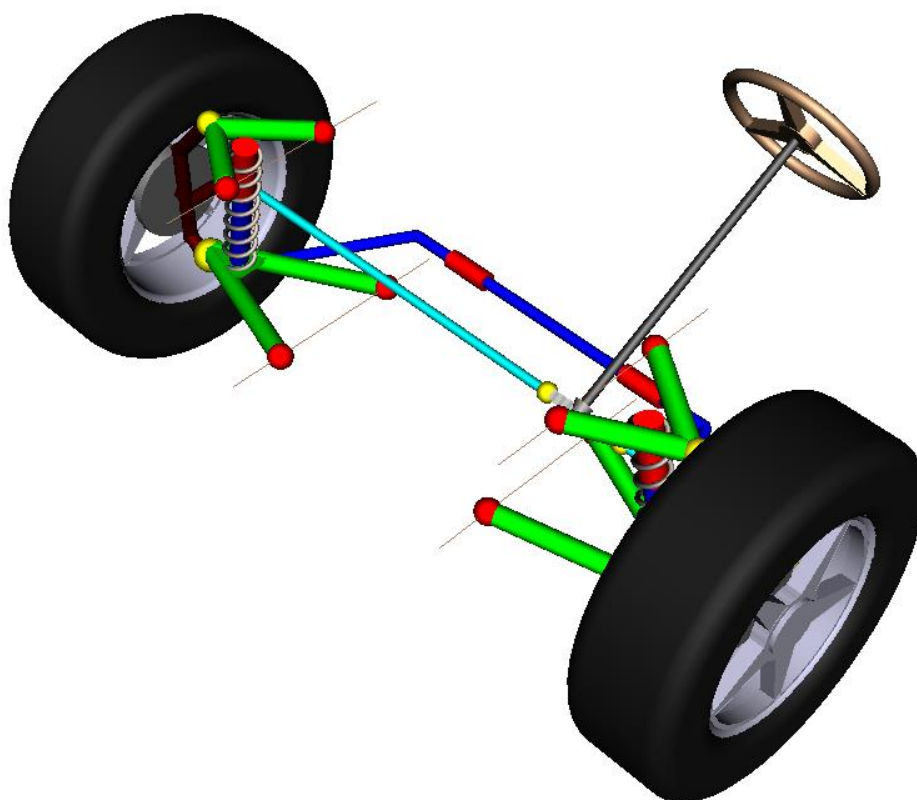


Рис. 1.240. Подвеска на двойных поперечных рычагах

1.12.2.3. На косых рычагах

Независимая подвеска задних колёс, с каждой стороны которой располагается по рычагу, у которых ось вращения наклонена в продольном и поперечном направлении. Нижние точки пружин крепятся к рычагам.

Такую конструкцию подвески можно встретить в ранних автомобилях BMW третьей серии, Opel, Fiat. Более подробную информацию можно найти в источнике [32].

Каталог модели: [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions\Semi-trailing Arm Suspension.](#)

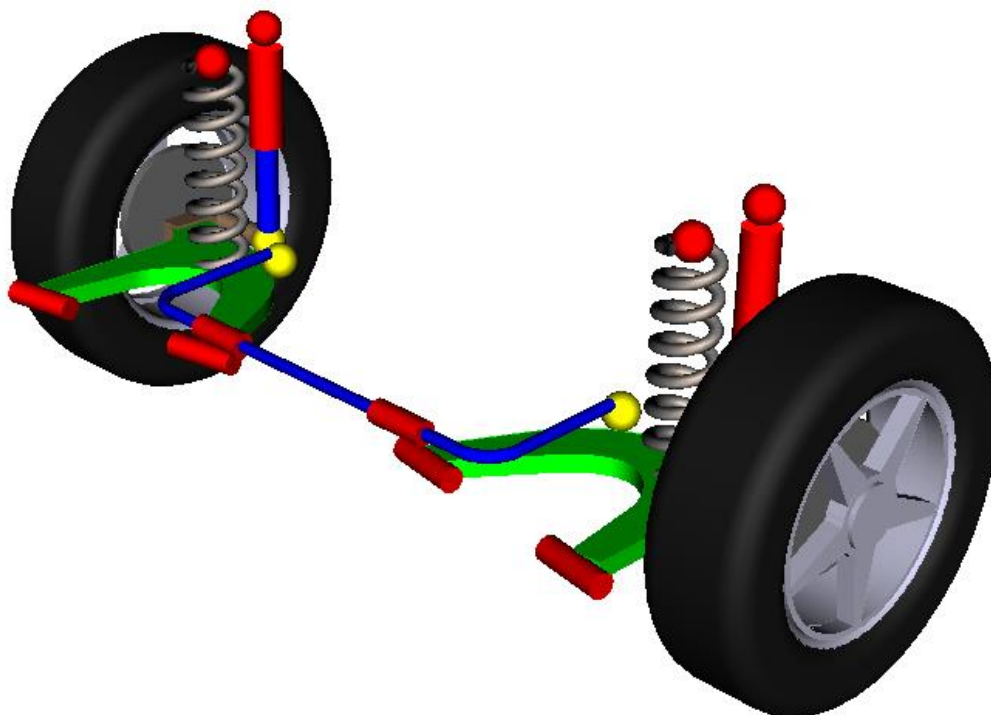


Рис. 1.241. Подвеска на косых рычагах

1.12.2.4. Подвеска Макферсона

Независимая передняя подвеска, основным элементом которой является амортизаторная стойка, называемая "качающейся свечой". Стойка объединяет пружину и демпфер. С каждой стороны подвески имеется поперечному рычагу. Кроме того, в модели имеется стабилизатор поперечной устойчивости, центральная часть которого связана с кузовом, а его концы соединены с амортизаторными стойками. В настоящее время подвеска Макферсона является одной из самых широко используемых конструкций передней подвески легковых автомобилей массового сегмента.

Популярные автомобили, на которых ее можно встретить: Hyundai Creta, Mitsubishi Lancer, Audi 80, Chevrolet Aveo, Ford Focus, Skoda Octavia, Toyota Camry и др. Более подробное описание подвески в книге [32].

Каталог модели: [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions\McPherson.](#)

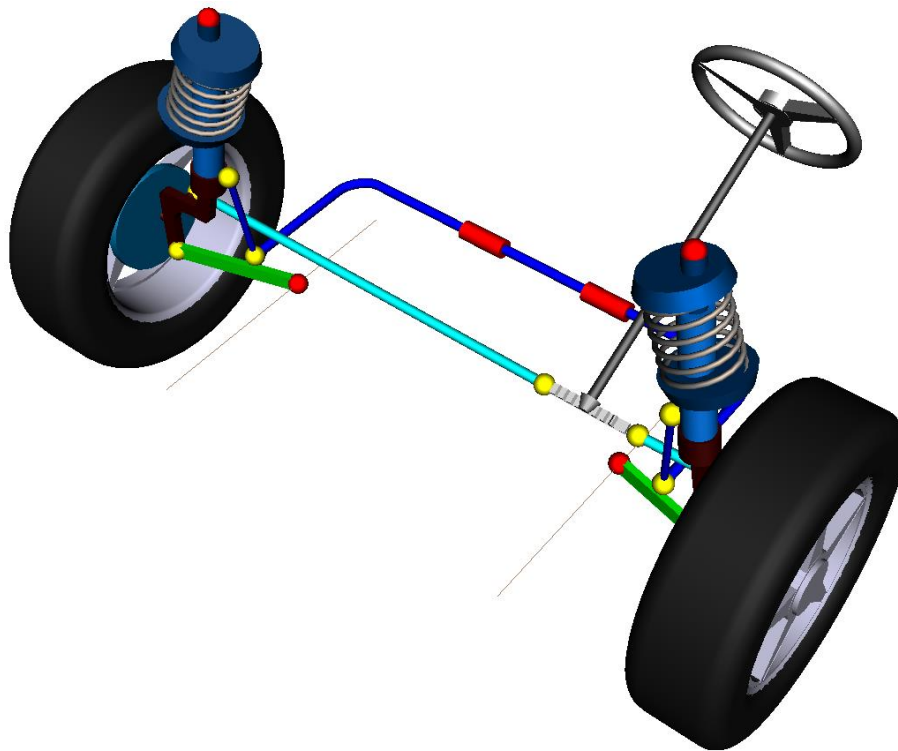


Рис. 1.242. Подвеска Макферсона

1.12.2.5. Торсионно-рычажная подвеска

Еще один тип задней подвески легковых автомобилей. Отличительной особенностью данного типа подвески является жесткое соединение продольных рычагов с торсионной балкой. Балка податлива на кручение, что позволяет колесам двигаться вверх и вниз независимо друг от друга. Такой тип подвески занимает промежуточное положение между зависимым и независимым. В качестве упругих элементов и демпфирующих устройств используются пружины и амортизаторы.

Такой тип подвески используется на автомобилях Renault, некоторых моделях Honda, на Opel Mokka, Toyota Corolla. Более подробную информацию можно найти в источнике [32].

Каталог модели: [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions\Torsion Suspension.](#)

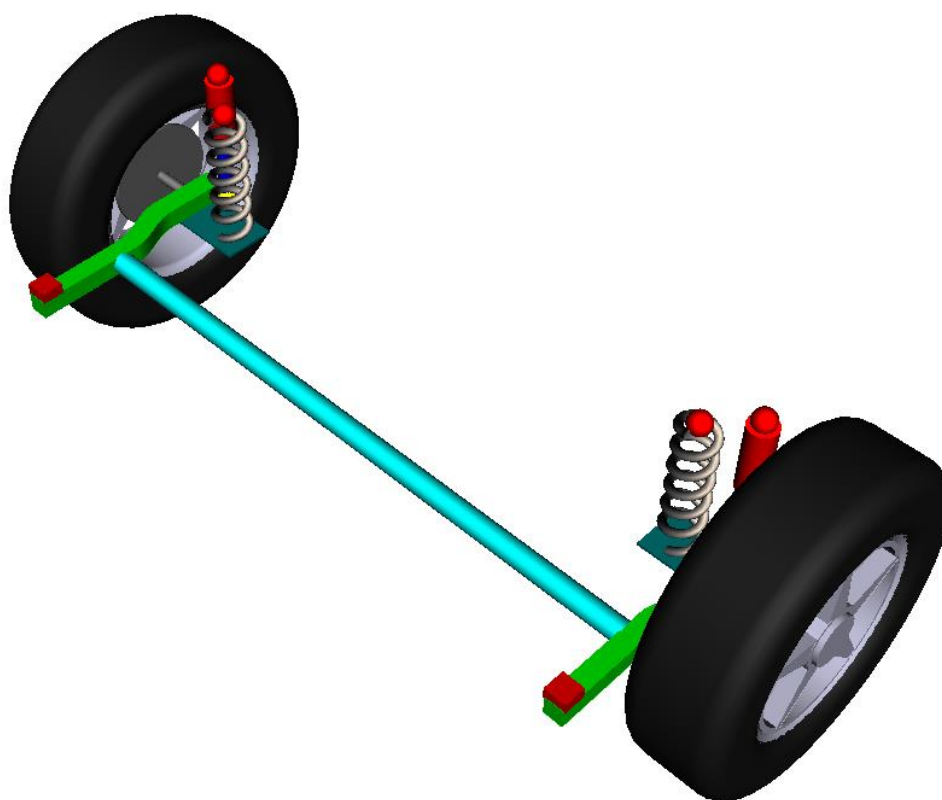


Рис. 1.243. Торсионно-рычажная подвеска

1.12.2.6. Многорычажная подвеска

В настоящее время многорычажная подвеска является самым распространенным видом подвески, применяемым на задней оси легкового автомобиля. В конструкцию входят рычаги, амортизаторы, пружины, ступичные опоры. Рычаги с одной стороны крепятся к кузову автомобиля, а с другой соединяются со ступицей колеса, обеспечивая устойчивое положение в поперечной плоскости. Демпфирующие и упругие элементы крепятся между одним из нижних рычагов и кузовом автомобиля.

Этот тип подвески используется, в том числе, в следующих моделях автомобилей: Lexus RC 2015, Honda Civic, Honda Accord и др. Номинальная геометрия подвески из этой модели взята из статьи [19].

Каталог модели: [{Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions\Multilink suspension.](#)

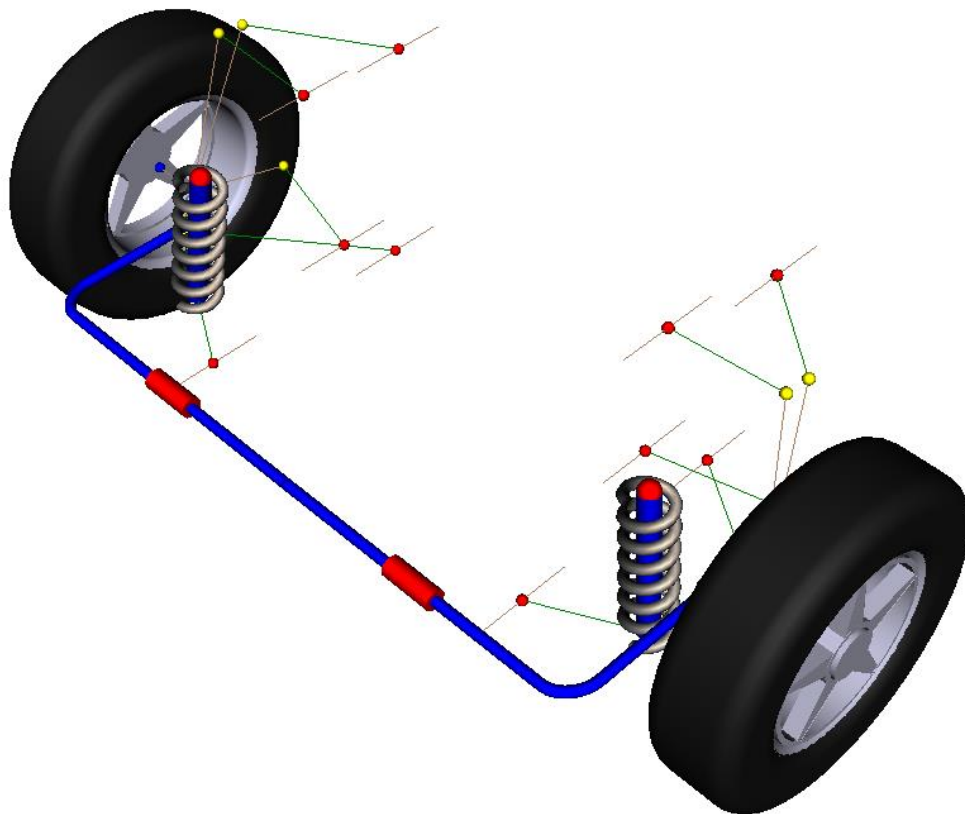


Рис. 1.244. Многорычажная подвеска

1.12.3. Структура моделей и параметризация

Модели подвесок, входящие в библиотеку, единообразно параметризованы и разработаны таким образом, чтобы пользователю было максимально просто создать с их помощью модель автомобиля. Параметризованы базовые геометрические размеры, а также характеристики силовых элементов подвесок.

В каждую подвеску включено тело **Local Car Body**, которое играет роль кузова в контексте подвески. В дальнейшем при создании модели автомобиля на основе подвесок из библиотеки это промежуточное тело жестко крепится к кузову. Такая техника описания подвесок, как подсистем с промежуточным кузовом, позволяет максимально просто создавать модели автомобилей на их базе.

Для наглядности основным элементам подвески назначены определенные цвета: балке, оси, рулевым рычагам – голубой, рычагам подвески – зеленый, стабилизатору поперечной устойчивости – синий, амортизаторам – красно-синий, пружинам – серый. Места крепления деталей к кузову обозначены красным цветом, а некоторые места соединения нескольких деталей – желтым.

1.12.3.1. Параметризация размеров и точек крепления подвески

Для регулировки ширины колеи введён параметр **Gauge** – поперечное расстояние между центрами колес, м.

Рассмотрим введённую параметризацию на примере торсионно-рычажной подвески, см. рис. 1.245. Координаты точек прикрепления силовых элементов к элементам подвески и кузову автомобиля вводятся с помощью именованных точек A, B, C и т.д., координаты которых параметризованы следующим образом:

$A_{\{X, Y, Z\}pos}$ – проекции точки A на оси X, Y, Z – точка прикрепления пружины к балке, м;

$A_{\{dX, dY, dZ\}pos}$ – сдвиг второй точки крепления пружины к кузову автомобиля, относительно первой, при нулевых координатах, м;

$B_{\{X, Y, Z\}pos}$ – проекции точки B (крепления демпфера к подвеске), м;

$B_{\{dX, dY, dZ\}pos}$ – сдвиг осей X, Y, Z для второй точки крепления демпфера к кузову, м.

Замечание Обратите внимание на назначение одноименных идентификаторов для разных подсистем. При создании модели автомобиля одноимённые точки, например, A, B и др., могут встретиться как в передней, так и в задней подвеске и, соответственно, одноименные идентификаторы, описанные выше. При изменении таких идентификаторов будьте внимательны и изменяйте их только для нужной подсистемы.

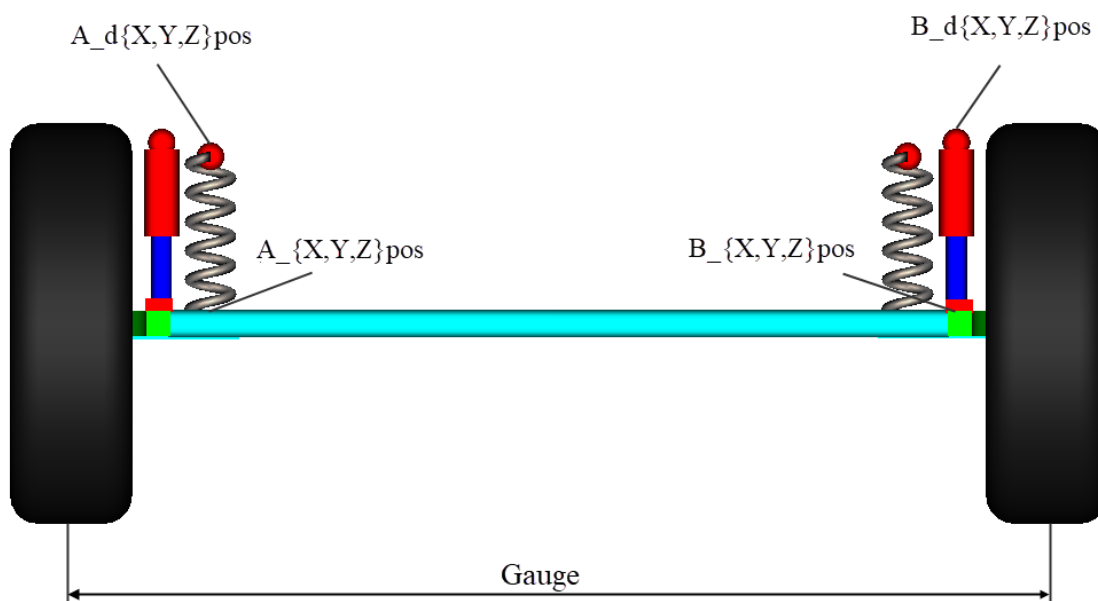


Рис. 1.245. Параметризация ширины колеи и точек прикрепления силовых элементов

1.12.3.2. Параметризация колес

Ниже приведены основные параметры, через которые выражаются размеры колес, а также углы схода-развала, см. рис. 1.246– 1.248.

Wheel_TireHeight – высота шины как часть общего радиуса колеса, м.

Wheel_Radius – радиус ненагруженного колеса, м.

Wheel_TireWidth – ширина шины, м.

Camber – угол развала колеса (при нулевых координатах!), градусы.

Toe – угол схода колеса (при нулевых координатах!), градусы.

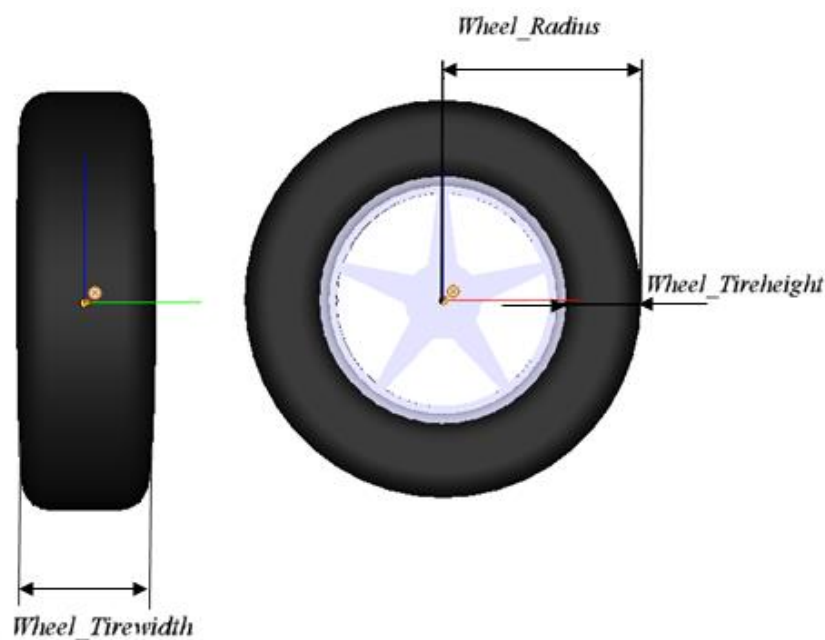


Рис. 1.246. Основные геометрические параметры колёс

Схождение считается положительным, если передний край колес направлен внутрь и отрицательным, если наружу, см. рис. 1.247.



Рис. 1.247. Угол схода

Развал считается положительным, если верхняя часть колеса наклонена наружу, и отрицательным – если внутрь, см. рис. 1.248.

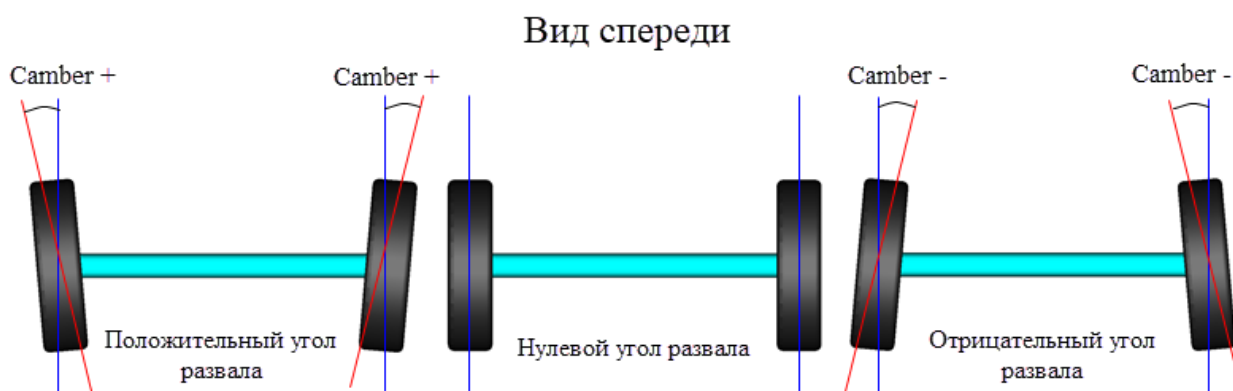


Рис. 1.248. Угол развала

1.12.3.3. Моделирование рулевого управления

В модели передних подвесок введен рулевой механизм реечного типа. Чтобы приблизиться к модели реального автомобиля введены параметры, позволяющие задавать пользователю свои значения. Эти параметры изображены на рис. 1.249, где:

- **SteeringColumnLength** – длина рулевой колонки, м;
- **SteeringColumnAngle** – угол вылета, рад.

Угол вылета параметризован и назначается в шарнире обобщенного типа между локальным кузовом и рулевой колонкой **jSteering Column** в элементарном преобразовании типа **RTy**. По умолчанию установлен угол 30°. На рис. 1.250 показаны настройки угла вылета для подвески на двойных поперечных рычагах. Идентификатор **SteeringColumnAngleRad**, приведенный на рис. 1.250, выражен в радианах и является зависимым от идентификатора **SteeringColumnAngle**, выраженного в градусах для удобства параметризации.

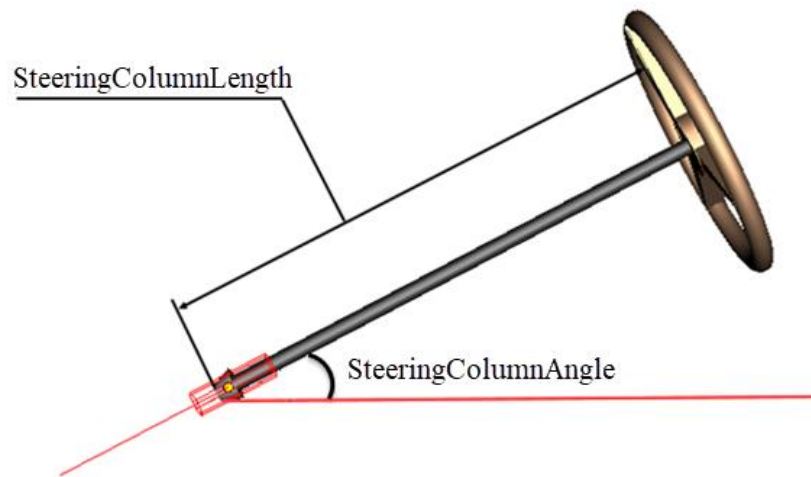


Рис. 1.249. Геометрические параметры рулевой колонки

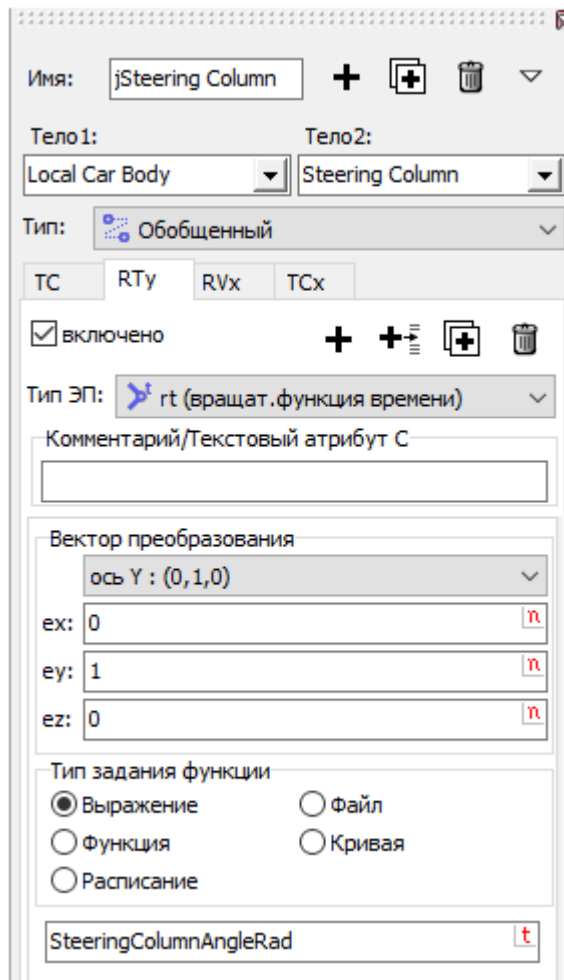


Рис. 1.250. Установление угла вылета рулевого управления

1.12.3.4. Моделирование ведущих колес

Для моделирования ведущих колес в подвесках библиотеки введен управляющий момент, который описывается выражением $M_{LongitudinalControl} * TractionFactor$. При установке значения $TractionFactor=1$ тяговый момент передается на колёса, и ось подвески становится ведущей. При $TractionFactor=0$ передача момента не осуществляется. Таким образом, управляя идентификатором $TractionFactor$ можно одну и ту же модель подвески сделать с ведущими или ведомыми колёсами.

Замечание Подробное описание рулевого управления дано в п. 1.7.7 "Рулевое управление", стр. 1-86.

1.12.3.5. Описание инерционных параметров

В библиотеке подвесок приняты следующие обозначения для инерционных параметров тел:

$m[Body]$ – масса тела $Body$, кг;

$I_{xx}[Body]$, $I_{yy}[Body]$, $I_{zz}[Body]$, $I_{xy}[Body]$, $I_{xz}[Body]$, $I_{yz}[Body]$ – моменты инерции тела $Body$, кг·м²;

$X_COG_[Body]$, $Y_COG_[Body]$, $Z_COG_[Body]$ – X,Y,Z-положение центра тяжести тела "Body", м.

Замечание Center of Gravity (COG) – центр тяжести тела.

1.12.4. Пример сборки автомобиля и анализа его динамики

1.12.4.1. Создание модели

Рассмотрим создание полноприводного автомобиля на примере внедорожника Lada 4×4, в котором установлены передняя независимая подвеска на двойных поперечных рычагах и задняя зависимая подвеска на продольных рычагах, см. рис. 1.251. Колея передней подвески составляет 1440 мм, задней – 1420 мм. Будем использовать следующие заводские установки. Угол развала – 0.5 °, схождение – 3 мм или 0.125 °. В модели будем использовать рекомендуемые шины типоразмера "175/80 R16".



Рис. 1.251 Автомобиль Lada 4×4 и его модель в **UM Input**

1.12.4.1.1. Добавление кузова

1. Откройте программу **UM Input** и создайте новую модель. Сохраните её под именем **Lada 4x4**.
2. Загрузите изображение кузова. Для этого нажмите на кнопку **Прочитать элемент из файла** и перейдите в папку {Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Car bodies. Из списка доступных файлов выберите **Lada 4x4.img**. В анимационном окне появится кузов автомобиля.
3. Создайте новое тело **CarBody** и в графическом образе из доступных графических объектов выберите **CarBody**.
4. Назначьте инерционные параметры кузова следующим образом (рис. 1.252):
 - **mCarBody=1000,**
 - **IxxCarBody=486,**
 - **IxyCarBody=355,**
 - **IxzCarBody=-158,**
 - **IyyCarBody=950,**
 - **IyzCarBody=-72,**
 - **IzzCarBody=889.**
5. В поле **Координаты центра масс** в СК тела задайте значения **X_COG_CarBody=-1.94,** **Y_COG_CarBody=0,** **Z_COG_CarBody=0.75,** см. рис. 1.252.

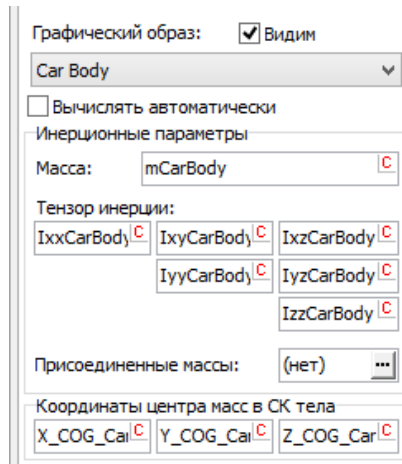


Рис. 1.252 Инерционные параметры кузова

6. Для тела **CarBody** создайте шарнир **6 ст.свободы**. В качестве первого тела выберите **Base0** и включите все степени свободы в этом шарнире. Назовите шарнир **jBase0_CarBody** (рис. 1.253).

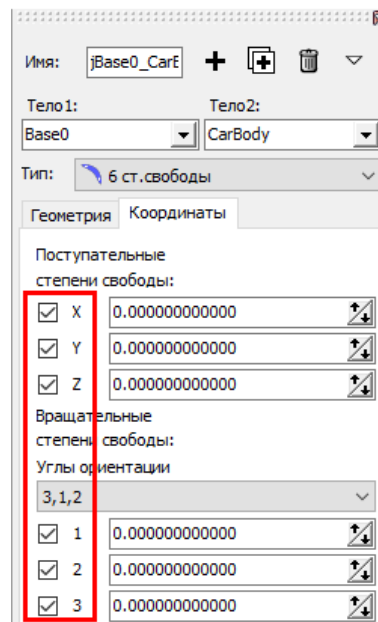


Рис. 1.253. Введение шарнира для кузова

1.12.4.1.2. Включение подвесок с помощью метода подсистем

1. Перейдем к добавлению передней подвески. Для этого в дереве элементов выберите **Подсистемы** и нажмите кнопку **Добавить новый элемент**. В поле **Имя** введите **FrontSuspension**, а поле **Тип** выберите значение **Включенная**. После этого появится окно выбора модели для добавления как подсистемы. Перейдите в папку, в которой находятся подвески и выберите **Double Wishbone Suspension** (см. п. 1.12.2.2, стр. 1-219), после чего нажмите кнопку **Принять**. В анимационном окне появится подвеска, расположенная в центре системы координат, см. рис. 1.240, стр. 1-219.

Замечание Модели из библиотеки подвесок находятся в каталоге {Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\Suspensions.

2. Перейдем к настройкам положения подвески. Выберите вкладку **Общие** и в поле **Идентификатор** введите **Front**, см. рис. 1.254 слева.
3. Этот шаг является опциональным. Он позволит вам сразу увидеть расположение колёс и элементов подвески относительно кузова автомобиля. Перейдите на вкладку **Положение**. В полях **Сдвиг | x** и **Сдвиг | z** введите **X_Pos_FrontSuspension=-0.721** (м), **Z_Pos_FrontSuspension=0.343** (м), см. рис. 1.254 справа.

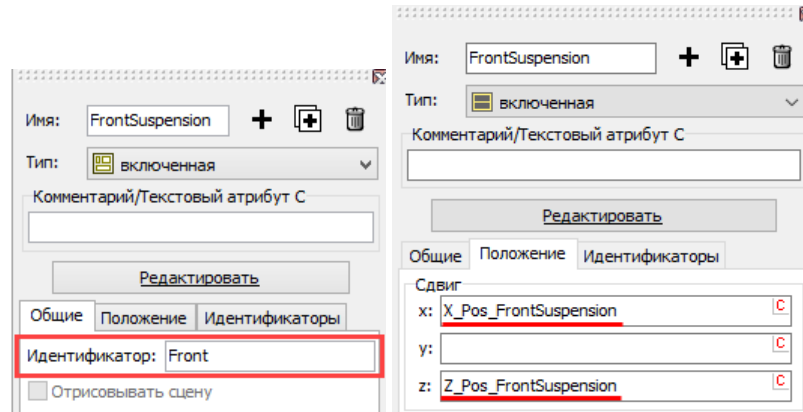


Рис. 1.254. Обозначение идентификатора и положения передней подвески

4. Перейдите на вкладку **Идентификаторы | Весь список**. В списке идентификаторов подвески найдите **Gauge** и установите его значение в **1.44** (рис. 1.255).

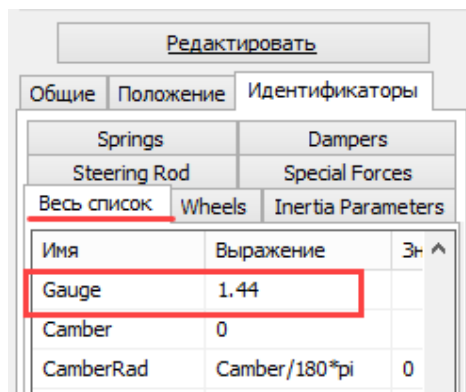


Рис. 1.255. Введение значения колеи для передних колес

5. Так как Lada 4×4 является полноприводным автомобилем, то крутящий момент должен передаваться как на передние, так и на задние колеса. Для этого на этой же вкладке из списка идентификаторов найдите **TractionFactor** и присвойте ему значение, равное единице (рис. 1.256).

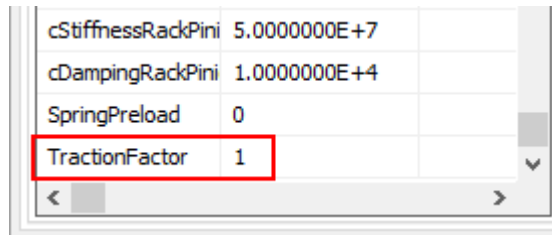


Рис. 1.256 Введение тягового момента **TractionFactor**

6. Таким же образом добавьте заднюю зависимую подвеску с направляющими рычагами из каталога **Axle Suspension**, см. п. 1.12.2.1, стр. 1-218 . Задайте ей имя **Rear**. На вкладке **Общие | Идентификатор** введите **Rear** (рис. 1.257 слева), а на вкладке **Положение** в полях **Сдвиг | x** и **Сдвиг | z** введите **X_Pos_RearSuspension=-3.16**, **Z_Pos_RearSuspension=0.343** (рис. 1.257 справа).

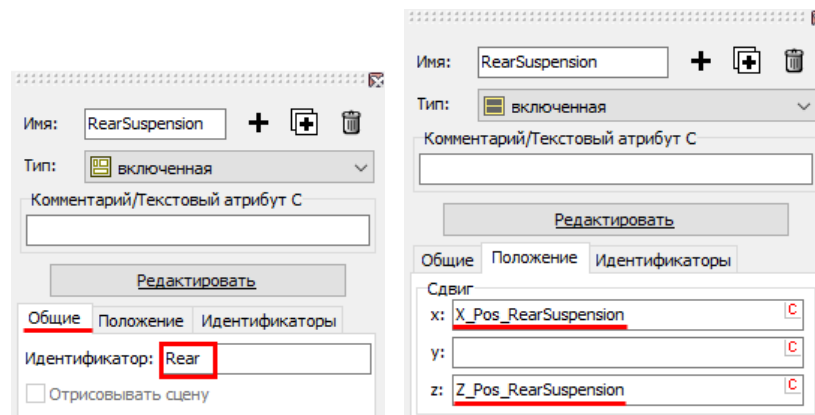


Рис. 1.257. Обозначение идентификатора и положения задней подвески

7. Идентификатору **Gauge** присвойте значение **1.42**, а идентификатору **TractionFactor** присвойте **1**. Обратите внимание на назначение одноименных идентификаторов для разных подсистем. При изменении идентификатора **Gauge** для задней подвески появится окно для управления одноименными идентификаторами в разных подсистемах модели, см. рис. 1.259. Поскольку ширина колеи для передней и задней подвесок разная (1,44 м для передней и 1,42 м для задней), то в окне **Одноименные идентификаторы** нужно снять флажок у идентификатора **FrontSuspension.Gauge** – и он останется без изменений. Таким образом вы измените только значение идентификатора **RearSuspension.Gauge**.

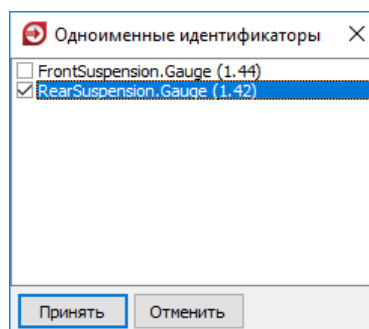


Рис. 1.258. Задание одноименных идентификаторов для разных подсистем

8. Далее мы настроим параметры графических элементов колес таким образом, чтобы они соответствовали типоразмеру шин "175/80 R16", где 175 – ширина шины в миллиметрах; 80 – высота профиля в процентах от ширины; 16 - посадочный диаметр в дюймах. Задайте идентификаторам ниже следующие значения, одинаковые для передней и задней оси:

- **wheel_tirewidth = 0.175** (m),
- **wheel_tireheight = 0.14** (m),
- **wheel_radius = 0.3432** (m).

Кроме того задайте значения идентификаторов, описывающих сход и развал колёс передней подвески:

- **Camber = 0.5;**
- **Toe = 0.125.**

1.12.4.1.3. Соединение подвесок с кузовом

1. Создайте новый шарнир. В поле **Тело1** выберите **CarBody**, а в поле **Тело2** выберите тело **FrontSuspension.Local Car Body**, см. рис. 1.259. Назовите шарнир **jCarBody_FrontSuspension**.

2. Выберите тип шарнира **6 ст. свободы** и на вкладке **Координаты** уберите все галочки (рис. 1.259). Таким образом промежуточное тело **FrontSuspension.Local Car Body** жестко связывается с кузовом.

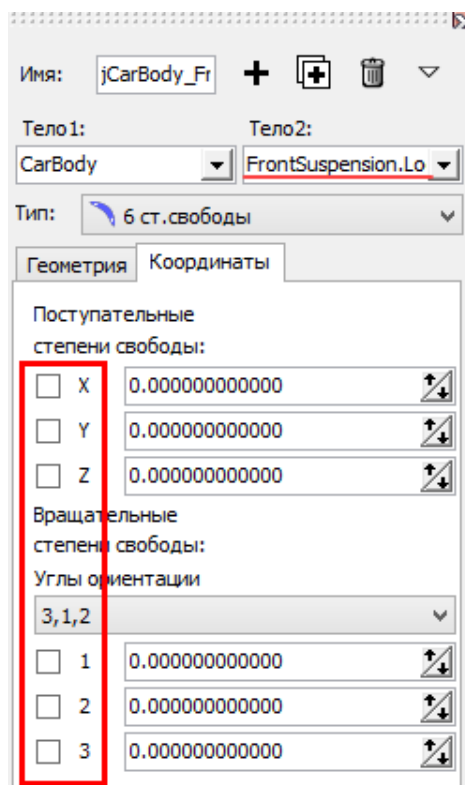


Рис. 1.259. Создание шарнира для передней подвески

3. Перейдите на вкладку **Геометрия | Тело 1**. В поля **Сдвиг | x** и **Сдвиг | z** введите **X_Pos_FrontSuspension** и **Z_Pos_FrontSuspension** соответственно, см. рис. 1.260, слева.

4. Таким же образом создайте шарнир для задней подвески. В поле **Тело1** выберите **CarBody**, а в поле **Тело2** выберите **RearSuspension.Local Car Body**. На вкладке **Геометрия** | **Тело 1** в полях **Сдвиг | x** и **Сдвиг | z** введите **X_Pos_RearSuspension** и **Z_Pos_RearSuspension** соответственно, см. рис. 1.260, справа. Выберите тип шарнира **6 ст.свободы** и уберите все галочки. Дайте название шарниру **jCarBody_RearSuspension**.

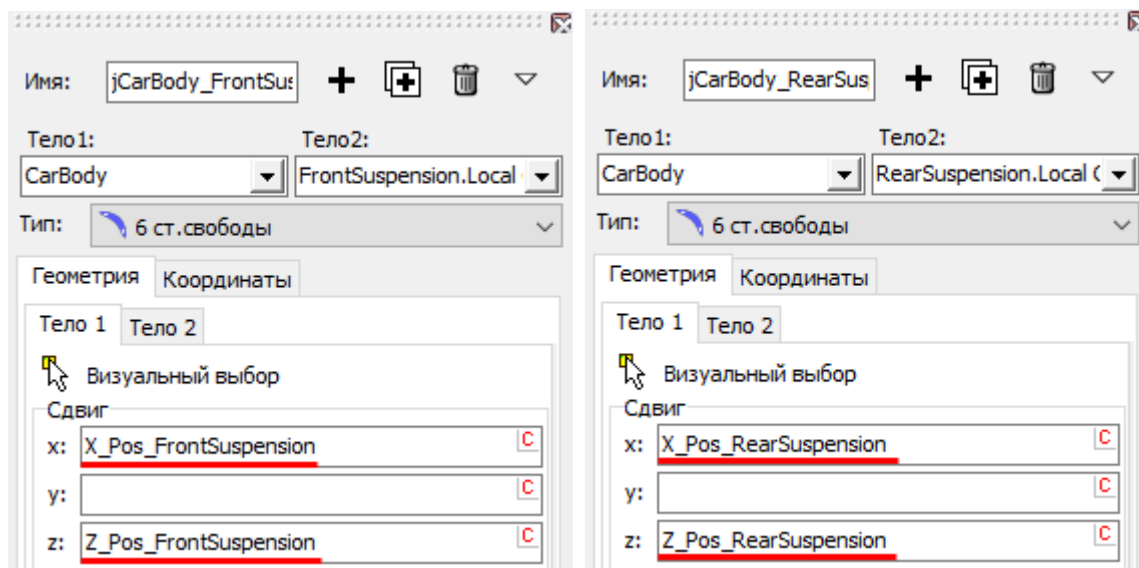


Рис. 1.260. Описание шарнира передней (слева) и задней (справа) подвески

Модель автомобиля готова. В итоге у вас должна получиться модель, показанная ниже на рис. 1.261. Перейдите на вкладку **Протокол** и убедитесь в отсутствии ошибок.



Рис. 1.261. Готовая модель автомобиля в программе UM Input

1.12.4.2. Подготовка к моделированию

Чтобы перейти к выполнению тестов, необходимо настроить некоторые параметры автомобиля в программе моделирования. Подробное описание настроек находится в п. 1.9.1. "Подготовка к моделированию", стр. 1-96.

1.12.4.2.1. Настройка шин

Запустите программу **UM Simulation**.

Назначьте модель шины. Для этого выберите пункт меню **Анализ | Моделирование** и в **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на вкладку **Автомобиль | Шины**. При помощи кнопки **Добавить шины к списку** выберите файл **Lada4x4.tr**. После этого выделите нужную модель в списке моделей шин, вызовите для нее контекстное меню и выберите пункт **Назначить всем**, как показано на рис. 1.262.

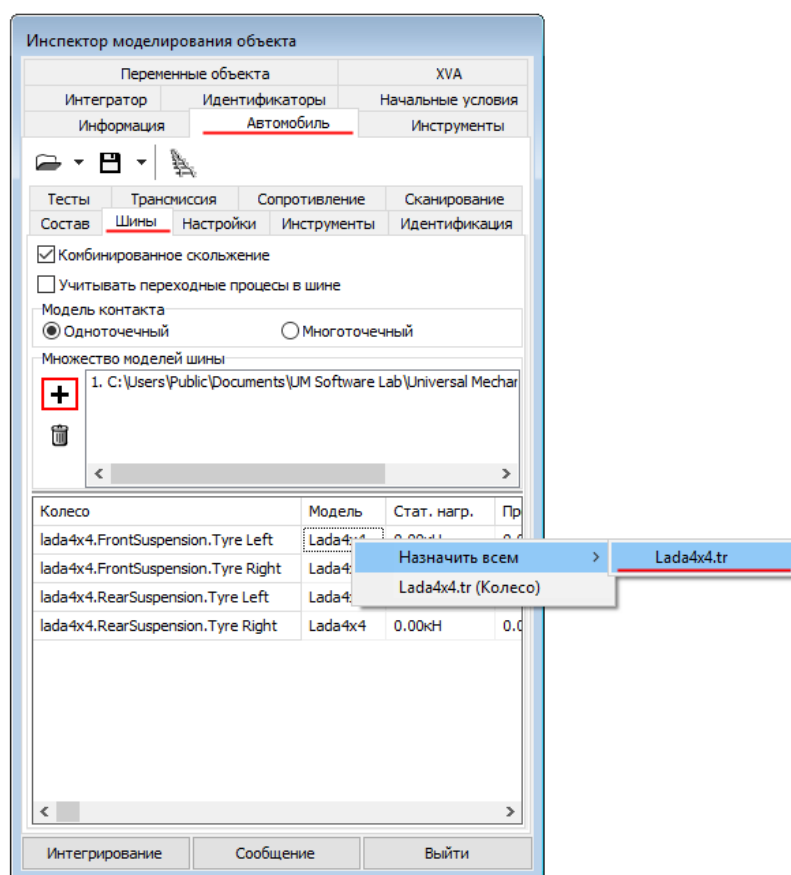


Рис. 1.262. Назначение шин для колес автомобиля

1.12.4.2.2. Идентификация модели

Далее выполним идентификацию модели. Для этого в **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на вкладку **Автомобиль | Идентификация**. В выпадающем списке поочередно выберите **Управление продольной скоростью**, **Блокировка движения**, **Рулевое управление** и убедитесь, что все идентификаторы установлены так, как показано на рис. 1.263-1.265. Если параметры не были установлены автоматически, то установите их вручную.

При идентификации рулевого управления в поле **Номер подсистемы рулевого колеса** установите **1**, а в поле **Номер угла рулевого колеса** установите **20**, см. рис. 1.266. **Номер подсистемы рулевого колеса** устанавливаются по индексу координаты шарнира управления поворотом колес "jLocal Car Body_Steering Column", который можно определить на вкладке начальных условий. Подробное описание см. в п. 1.9.1.2. "Идентификация подсистем автомобиля", стр. 1-100.

Замечание При идентификации рулевого управления поле **Передаточное число** устанавливается автоматически по результатам теста поворота рулевого колеса на месте, см. п. 1.12.4.2.5.

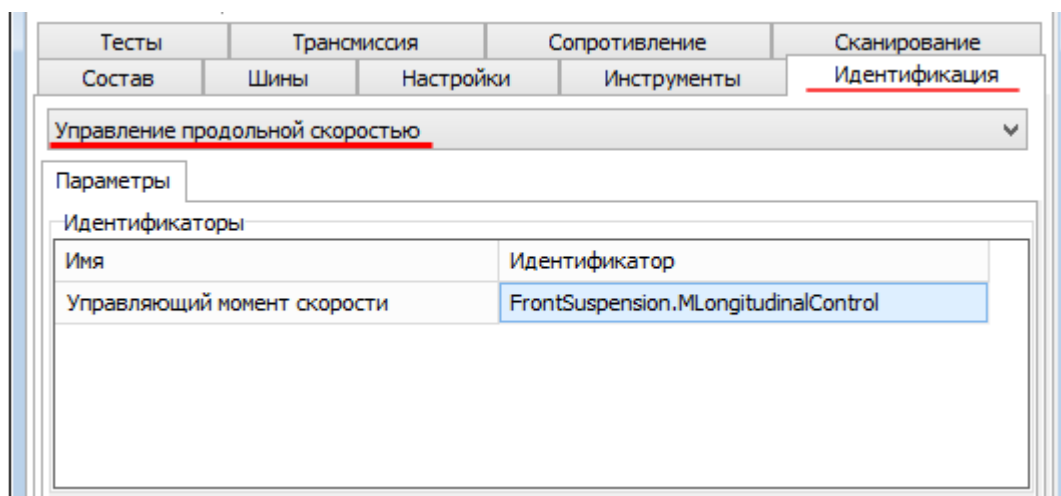


Рис. 1.263. Настройка управления продольной скоростью

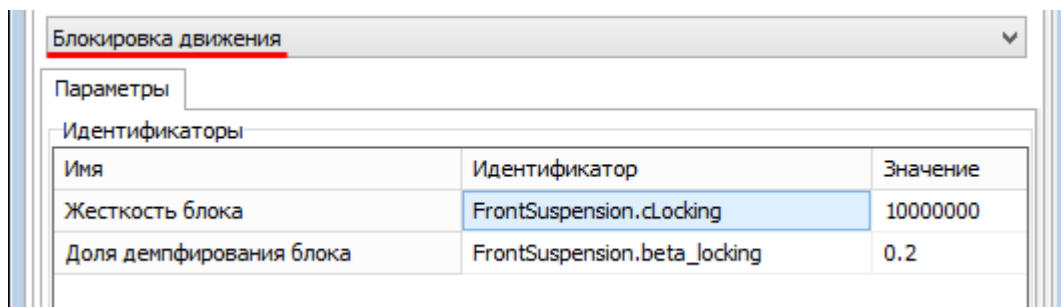


Рис. 1.264. Настройка блокировки движения

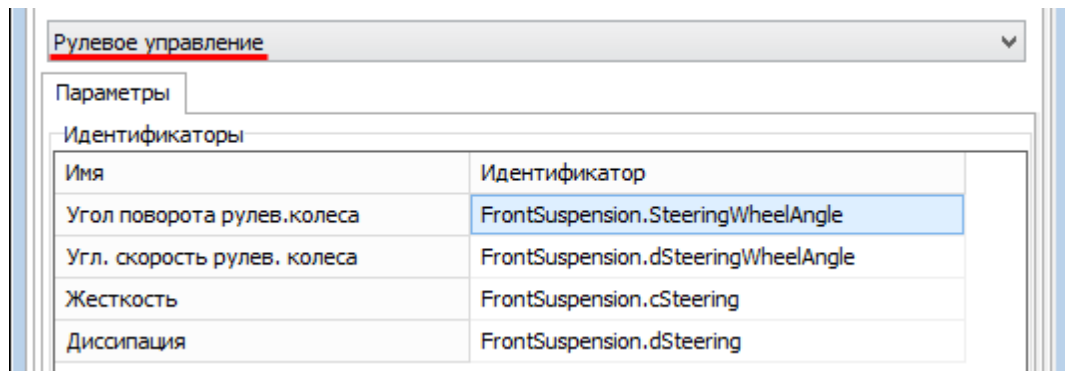


Рис. 1.265. Настройка рулевого управления

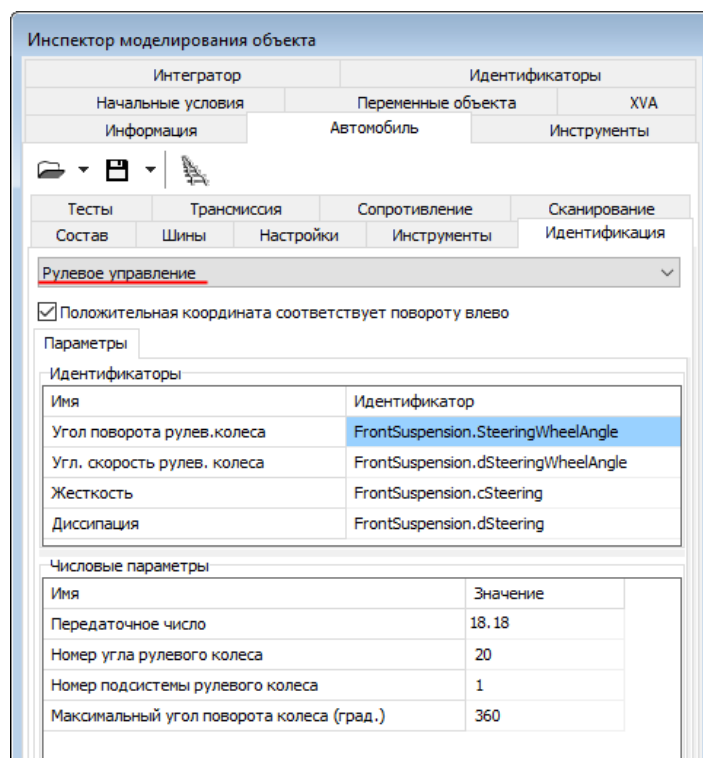


Рис. 1.266. Идентификация параметров рулевого управления

1.12.4.2.3. Настройка неровностей

Перейдите на вкладку **Автомобиль | Настройки** и в полях **Слева** и **Справа** откройте файлы неровности пути **asphalt_fine_left.irr** и **asphalt_fine_right.irr** соответственно (рис. 1.267). Остальные настройки оставьте по умолчанию.

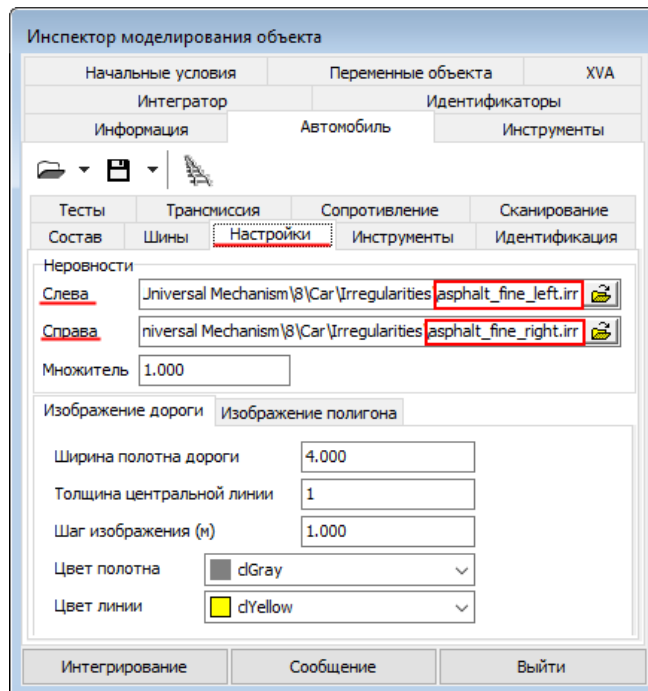


Рис. 1.267. Настройка неровностей пути

1.12.4.2.4. Определение предварительной нагрузки в пружинах подвески

Чтобы перейти к выполнению тестов, необходимо настроить некоторые параметры подвески автомобиля, а именно задать предварительную нагрузку в пружинах подвески. Изначально подвески описаны с нулевой предварительной нагрузкой, поэтому при установке кузова пружины деформируются, соответственно меняется геометрия подвесок, что приводит к изменению реальных углов схода и развала подвески после вставки подвески как подсистемы в модель автомобиля. Предварительная нагрузка пружин подвески описывается идентификатором **SpringPreload**, см. рис. 1.268. Рассчитаем предварительную нагрузку пружин подвески таким образом, чтобы конфигурация подвесок под нагрузкой в виде веса кузова была близка к исходной конфигурации (конфигурации при нулевых координатах).

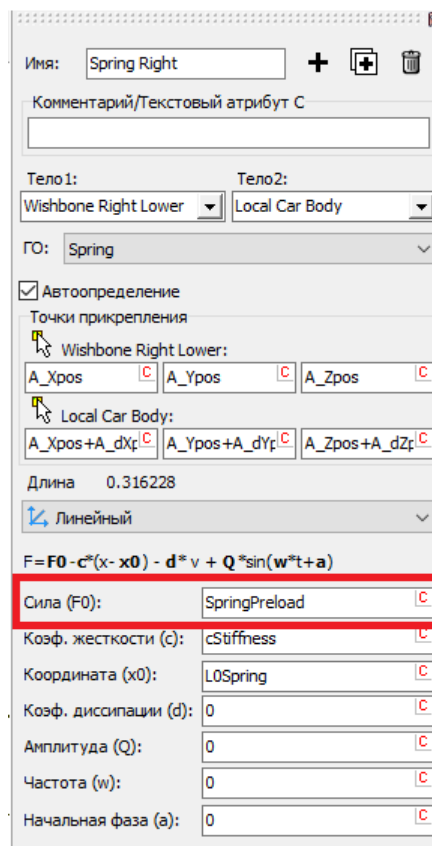


Рис. 1.268. Задание предварительной нагрузки пружин подвески на примере правой пружины передней подвески

1. Найдем положение равновесия автомобиля при нулевой предварительной нагрузке и определим усилия в пружинах подвески в положении равновесия. Откройте **Инспектор моделирования объекта**, перейдите на вкладку **Автомобиль | Тесты** и из выпадающего списка выберите тест **Равновесие**.
2. На вкладке **Параметры** установите в поле **Минимальное время (с)** значение **10**.
3. Откройте **Мастер переменных**. Перейдите на вкладку **Биполярные силы**. Выделите элементы **Spring Right** и **Spring Left** для передней и задней подвески и в поле **Компонента** выберите **Модуль силы**, как это показано на рис. 1.269. Перетащите вновь созданные переменные в графическое окно.

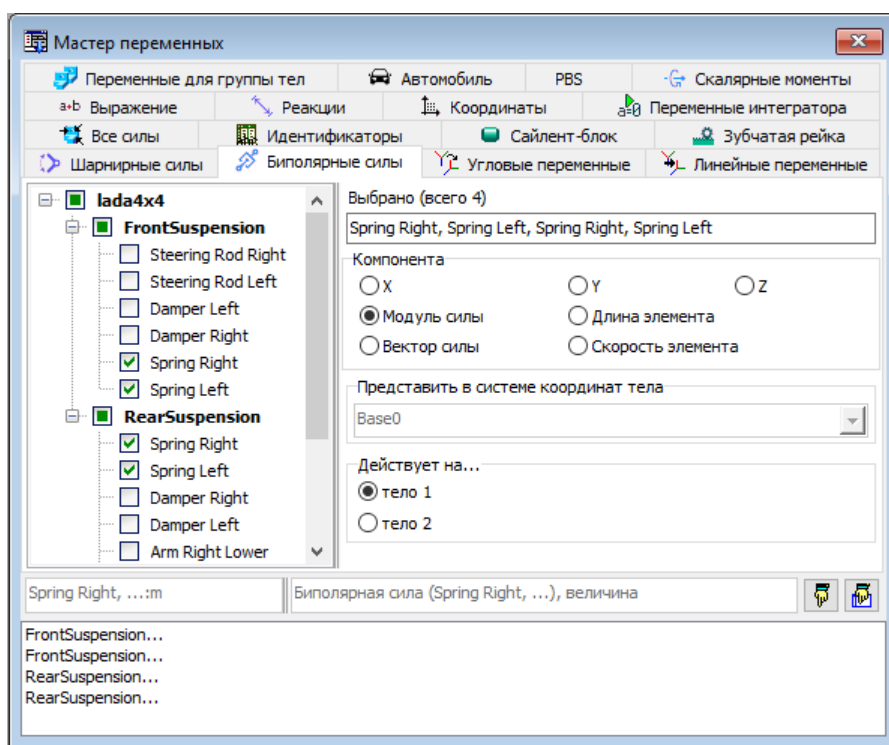


Рис. 1.269. Модуль силы в пружинах подвески

4. Нажмите кнопку **Интегрирование**. В графическом окне включите кнопку **"Показывать значение ординаты"** и мышкой определите значения сил в положении равновесия, как показано на рис. 1.272. Округлим и усредним полученные значения и получим следующие значения: 3970 Н для пружин передней подвески и 2535 Н для задней.

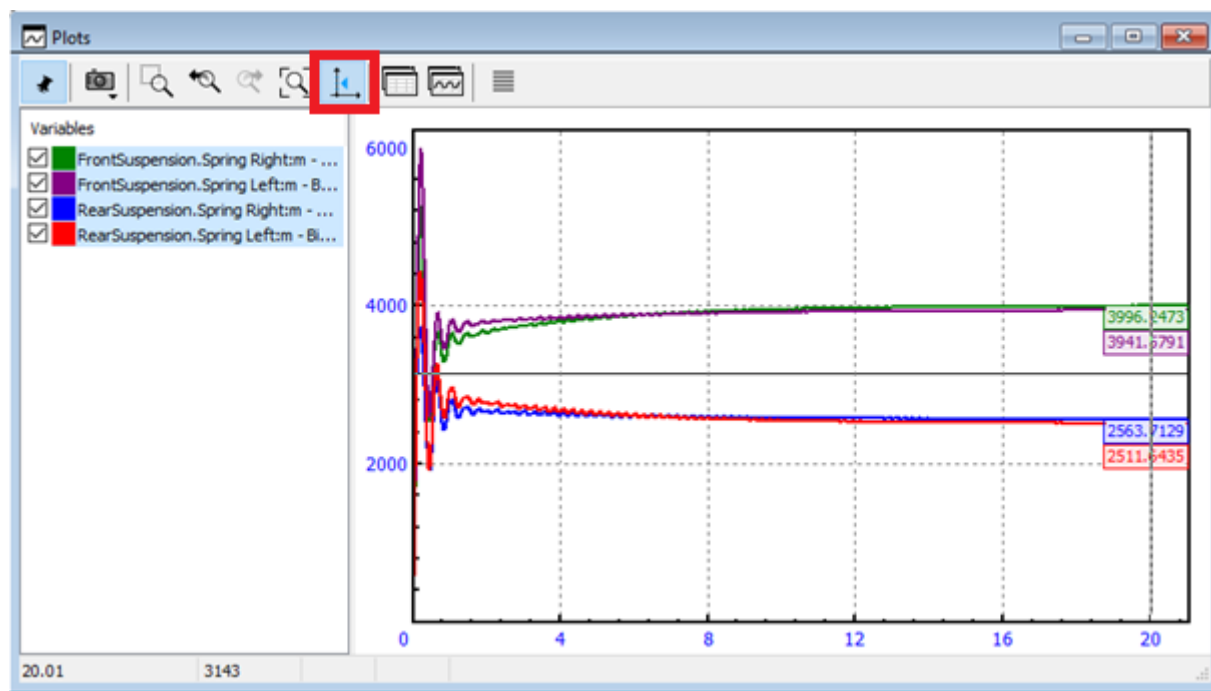


Рис. 1.270. Значения сил в пружинах подвески в положении равновесия

5. В окне **Инспектора паузы** процесса моделирования нажмите кнопку **Прервать**.

6. В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Идентификаторы**. В выпадающем списке подсистем выберите **lada4x4.FrontSuspension**, см. рис. 1.271. Установите идентификатору **SpringPreload** передней подвески значение **3970 Н**. Затем для задней подвески установите **SpringPreload = 2535 Н**.

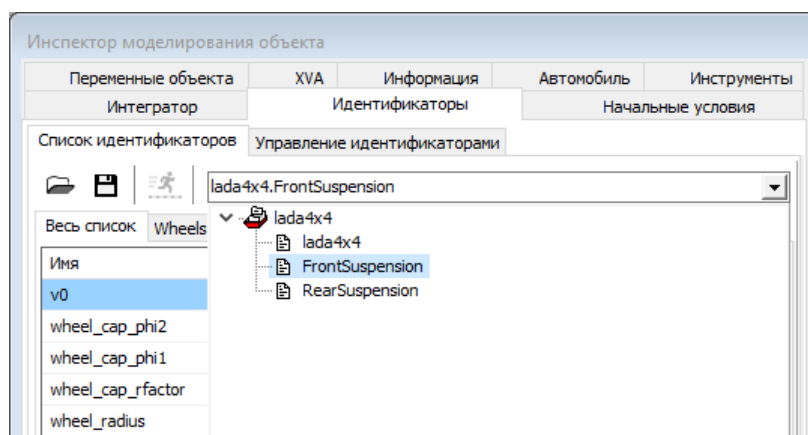


Рис. 1.271. Выбор подсистемы для назначения значений идентификаторов

7. Перейдите на вкладку **Автомобиль | Тесты**. Включите флажок **Сохранить координаты после завершения теста**. Запустите моделирование.

8. По окончании моделирования в окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Начальные условия | Координаты**. Сейчас на этой вкладке приведены координаты автомобиля в положении равновесия, см. рис. 1.272.

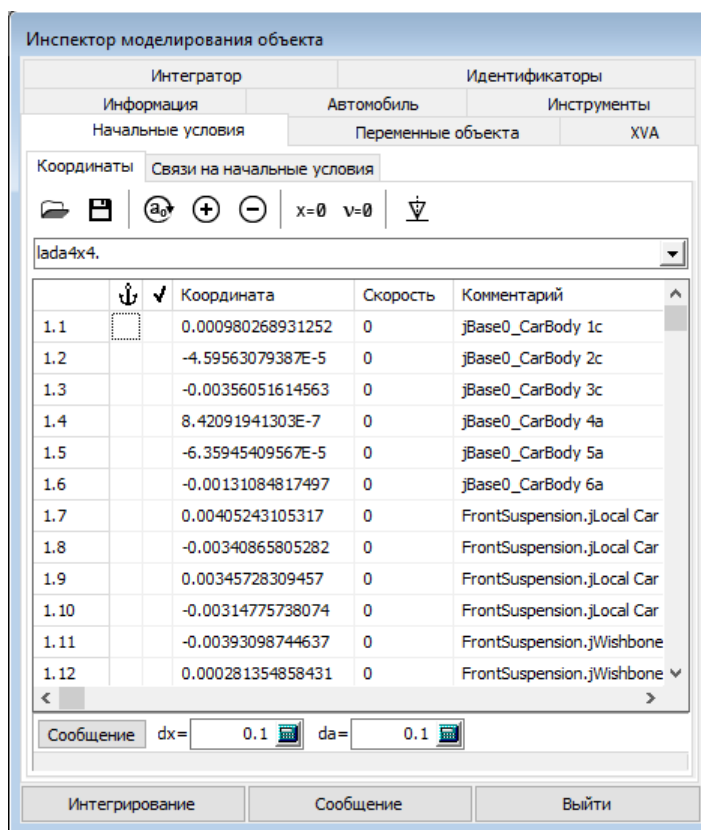


Рис. 1.272. Координаты положения равновесия автомобиля

1.12.4.2.5. Поворот рулевого колеса на месте

Тест поворота рулевого колеса на месте необходимо выполнять для автоматического определения передаточного числа системы рулевого управления, подробнее см. п. 1.9.4.5. "Поворот рулевого колеса на месте", стр. 1-160.

Для наблюдения за анимацией движения рулевого управления и колес можно скрыть кузов. Для этого в контекстном меню анимационного окна выберите **Режимы изображения | Настройка режимов изображения** и выберите для тела **Car Body** режим **Невидимый** (рис. 1.273) и закройте окно. После этого изображение кузова автомобиля будет скрыто.

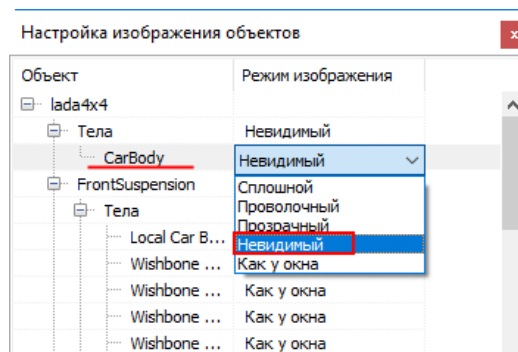


Рис. 1.273. Смена режима изображения тела Car Body

С помощью пункта меню **Анализ | Моделирование** откройте **Инспектор моделирования объекта** и перейдите на вкладку **Автомобиль | Тесты**. Из выпадающего списка выберите тест **Поворот рулевого колеса на месте**. Числовые параметры установите как показано на рис. 1.274.

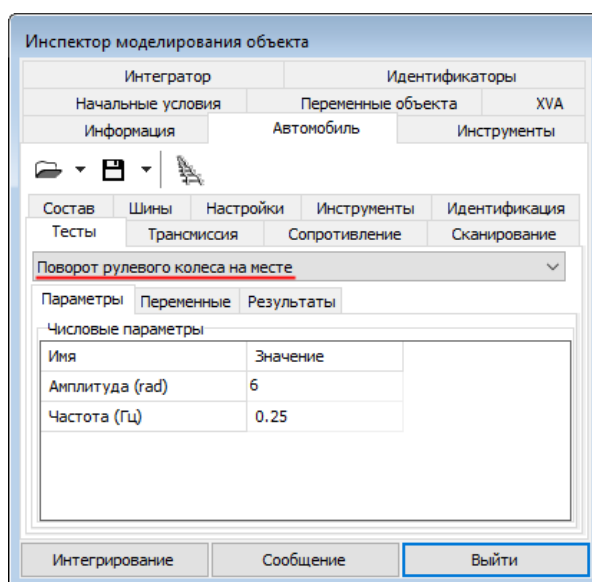


Рис. 1.274. Настройки параметров для теста поворота рулевого колеса на месте

Нажмите кнопку **Интегрирование**. Наблюдайте за процессом движения поворота колес в анимационном окне. По окончании интегрирования нажмите кнопку **Прервать**.

В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Результаты**. Для сохранения полученного передаточного числа нажмите кнопку **Принять как стандарт**, см. рис. 1.275.

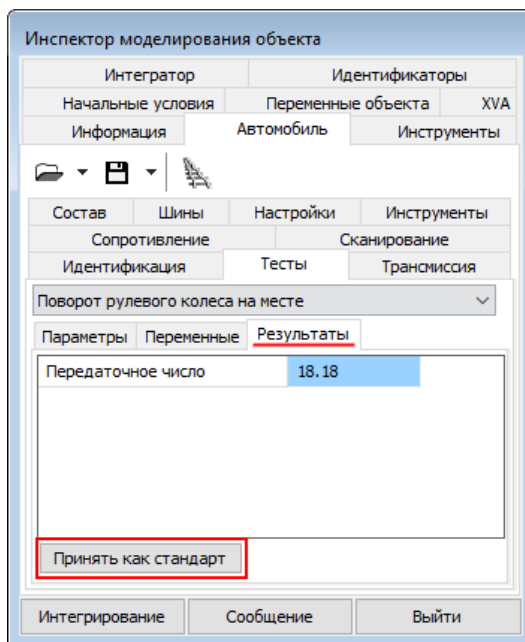


Рис. 1.275. Результаты расчета передаточного числа после выполнения теста поворота рулевого колеса на месте

1.12.4.3. Тесты с водителем

1.12.4.3.1. Поворот на 90 °

1. Перед выполнением тестов откройте окно настроек через пункт меню **Инструменты | Настройки**, перейдите на вкладку **Общие** и в поле **Единица скорости** выберите км/ч, см. рис. 1.276. Нажмите кнопку **Принять**.

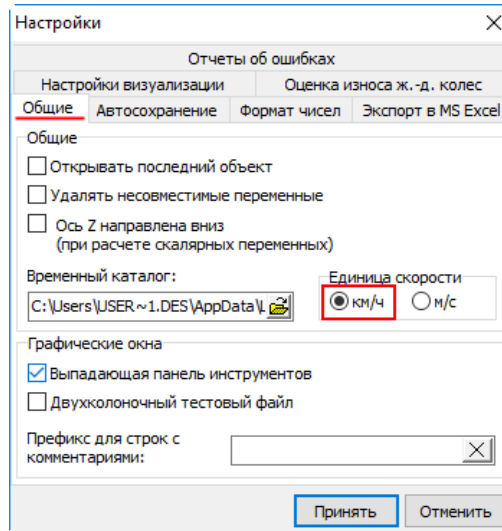


Рис. 1.276. Настройка единиц скорости

2. В окне инспектора моделирования перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов**. Присвойте идентификатору **v0** значение, равное 5 км/ч, см. рис. 1.277.

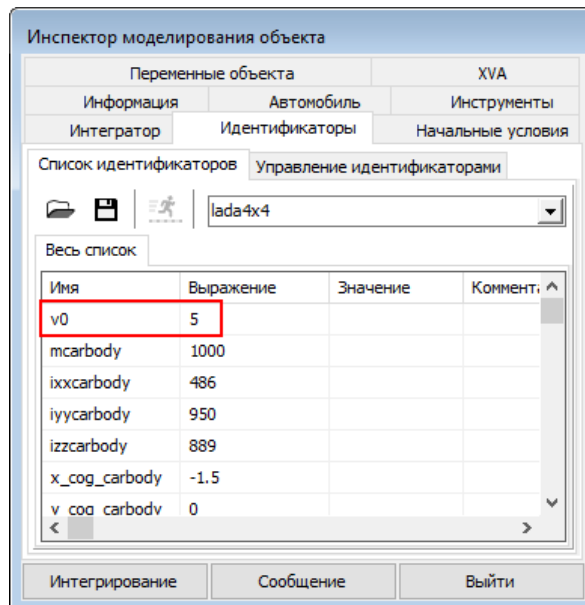


Рис. 1.277. Настройка скорости движения автомобиля

3. Перейдите на вкладку **Интегратор** и установите время моделирования **25 с**.

4. Далее перейдите на вкладку **Автомобиль | Тесты** и из выпадающего списка выберите **Тест с водителем**. Откройте файл макрогеометрии пути **turn 90deg.mgf**. В поле **Модель**

водителя выберите **MacAdam**. Остальные настройки установите так, как показано на рис. 1.278.

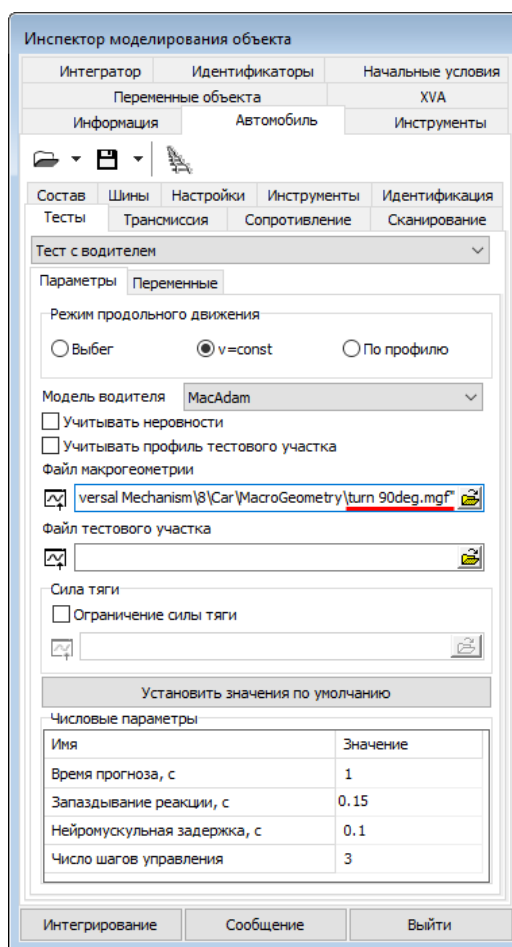


Рис. 1.278. Настройка параметров теста с водителем

5. Перейдите на вкладку **Переменные**. Откройте новое графическое окно и перетащите в него переменную **Отклонение от заданной траектории**, см. рис. 1.279.

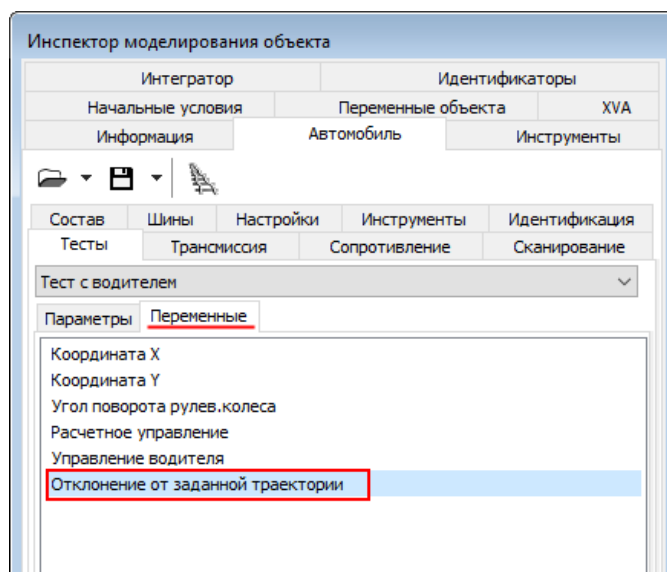


Рис. 1.279. Переменные для теста с водителем

6. Перед тем, как перейти к моделированию, откройте анимационное окно, если уже не открыто и настройте удобный ракурс для наблюдения за поведением модели.
7. В окне инспектора моделирования нажмите кнопку **Интегрирование**. По окончании моделирования оцените отклонение автомобиля от заданной траектории.

1.12.4.3.2. Смена полосы движения

1. В окне режима паузы процесса моделирования нажмите кнопку **Прервать**.
2. Перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов** и назначьте значение $v0=88$ км/ч, см. рис. 1.280.

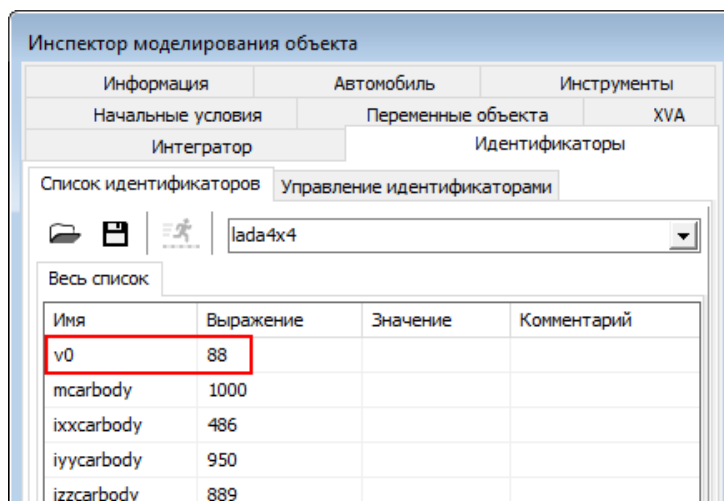


Рис. 1.280. Назначение скорости автомобиля 88 км/ч

3. Вернитесь на вкладку **Автомобиль | Тесты**. Для теста с водителем откройте файл макрогеометрии "**SAE j2179 single lane change**". Выберите модель водителя **С предвидением второго порядка**. Настройте параметры так, как показано на рис. 1.281.
4. Нажмите кнопку **Интегрирование**. Наблюдайте за процессом движения автомобиля в анимационном окне. По окончании интегрирования нажмите кнопку **Прервать**.

Замечание Для прохождения автомобильных тестов не обязательно каждый раз настраивать параметры вручную, можно загрузить готовую конфигурацию теста через пункт меню **Файл | Загрузить конфигурацию**.

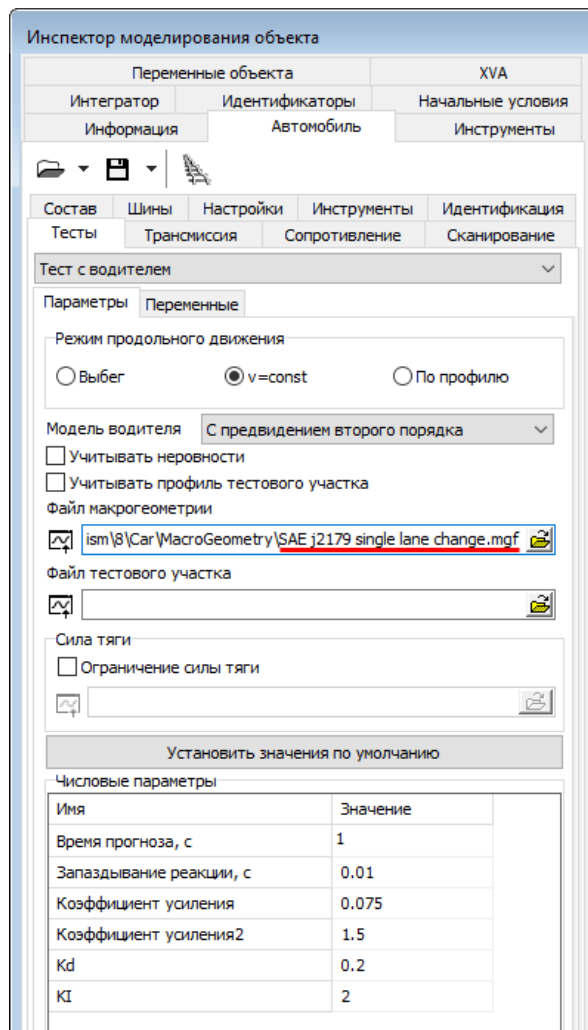


Рис. 1.281. Настройки для теста смены полосы

1.12.5. Доступные модели автомобилей и конфигурации

В модуль **UM Automotive** включены готовые модели легковых автомобилей Lada 4x4, Audi Q7, GAZ-66, Opel Astra, Red American, BMW 3 series и другие с готовыми конфигурациями для прохождения динамических тестов. Данные модели находятся в каталоге {Данные УМ}\SAMPLES\Automotive.

Для этих моделей подготовлены следующие конфигурации тестов:

- lowspeed90turn;
- SAE lane change.

1.12.5.1. BMW 3-й серии

В библиотеку готовых моделей автомобилей входит модель заднеприводного BMW 3-й серии. Подробнее о реальном прототипе можно прочитать тут: https://ru.wikipedia.org/wiki/BMW_E36. Для передней оси используется подвеска Макферсона (см. п. 1.12.2.4, стр. 1-221), а для задней – подвеска на косых рычагах (см. п. 1.12.2.3, стр. 1-220). Ширина колеи передних и задних колес составляет 1418 мм и 1423 мм соответственно. Заводские установки: угол развала – 0.67° , схождение – 0.3° . В модели использован следующий типоразмер шин: 195/65 R15.

Каталог модели {Данные УМ}\SAMPLES\Automotive\BMWе36

Файл шин **BMW.tr** находится в каталоге модели и в каталоге {Данные УМ}\Tire.



Рис. 1.282. Готовая модель BMW 3 серии в **UM Input**

Список литературы

- [1] Раймпель Й., Шасси автомобиля: Конструкции подвесок/Пер. с нем. В. П. Агапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
- [2] Раймпель Й., Шасси автомобиля. Рулевое управление. М.: Машиностроение, 1987.
- [3] Хачатуров А.А., Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель. М., «Машиностроение». 1976.
- [4] ISO 3888-1:1999 Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double line-change.
- [5] ISO 14512:1999 Passenger cars - Straight ahead braking on surface with split coefficient of friction – Open loop test procedure.
- [6] Wong J.Y., Theory of Ground Vehicles. 4th Edition. Wiley. 2008.
- [7] Robson J.D., (1979) Road Surface Description and Vehicle Response, International Journal of Vehicle Design, 1(1), 25–35.
- [8] Dixon, John, Suspension Analysis and Computational Geometry. John Wiley and Sons, 14.12.2009.
- [9] E. Fiala, «Seitenkräfte am rollenden Luftreifen,» *VDI Zeitschrift*, т. 96, 1954.
- [10] Bakker, E., Pacejka, H.B. and Lidner, L., A New Tyre Model with Application in Vehicle Dynamics Studies. Proc. 4th Int. Conf. Automotive Technologies, Monte Carlo, 1989, SAE paper 890087, 1989.
- [11] Pacejka, H.B. and Bakker, E., The Magic Formula Tyre Model. Proc. 1st International Tyre Colloquium, Delft, 1991. *Vehicle System Dynamics* 21 (Suppl.) (1991), pp. 1–18.
- [12] Ervin, R.D. and Guy, Y., (1986). Vehicle Weights and Dimensions Study: Volume 1 – The Influence of Weights and Dimensions on the Stability and Control of Heavy Trucks in Canada Part 1. Roads and Transportation Association of Canada: Ottawa, Canada.
- [13] Pacejka, Hans B., Tyre and vehicle dynamics. Second edition. Elsevier, 2006.
- [14] Georg Rill, Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling. CRC Press, 2012.
- [15] Mohhamadi Foad, Tire Characteristics Sensitivity Study. Chalmers University Of Technology. Gothenburg, Sweden 2012..
- [16] C. S. Nybakken G.H., «Vertical and lateral stiffness characteristics of aircraft tires. NASA contractor report NAS CR-1488,» University of Michigan, 1969.
- [17] Гухо В.Г., Аэродинамика автомобиля. М. «Машиностроение». 1987.
- [18] Wade Allen R., Theodore J. Rosenthal et al., A LOW COST PC BASED DRIVING SIMULATOR FOR PROTOTYPING AND HARDWARE-IN-THE-LOOP APPLICATIONS. SAE Paper No. 98-0222. 1997.
- [19] Prof. Dr.-Ing. habil M. Hiller & Dipl.-Ing. S. Frik (1993) Road Vehicle Benchmark 2 Five-Link Suspension, *Vehicle System Dynamics*, 22:S1, 254-262, DOI: 10.1080/00423119308969497.

- [20] ISO 3888-2:2002 Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance..
- [21] ISO 4138:2004 Passenger cars - Steady-state circular driving behaviour – Open-loop test methods.
- [22] ISO 7975:1996 Passenger cars - Braking in a turn – Open-loop test procedure.
- [23] ISO 9816:1993 Passenger cars - Power-off reactions of a vehicle in a turn – Open loop test method.
- [24] ISO 12021-1:1996 Road vehicles - Sensitivity to lateral wind – Part 1: Open loop test method using wind generator input..
- [25] ISO 7401:2003 Road vehicles - Lateral transient response test methods – Open-loop test methods.
- [26] ISO/TR 8725:1988 Road vehicles - Transient open-loop response test method with one period of sinusoidal input.
- [27] ISO/TR 8726:1988 Road vehicles - Transient open-loop response test method with pseudo-random steering input.
- [28] John C. Dixon. Tires, Suspension and Handling. Cambridge University Press, 1996. Second Edition.
- [29] Nybakken G.H., Clark S.K., Vertical and lateral stiffness characteristics of aircraft tires. NASA contractor report NAS CR-1488, University of Michigan, 1969.
- [30] Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 4th Edition. Wiley. 2008.
- [31] Szostak H.T., Allen W.R., Rosenthal T.J., Analytical Modeling of Driver Response in Crash Avoidance Maneuvering Volume II: An Interactive Model for Driver/Vehicle Simulation, U.S Department of Transportation Report NHTSA DOT HS-807-271, April 1988.