



# Конечно-элементная модель шины UM FETire

## Оглавление

<b>33. МОДУЛЬ UM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ УПРУГИХ ШИН.....</b>	<b>33-4</b>
<b>33.1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О МОДУЛЕ UM FETIRE.....</b>	<b>33-4</b>
<b>33.2. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГОЙ ШИНЫ В МОДУЛЕ UM FETIRE.....</b>	<b>33-5</b>
33.2.1. Модель отдельного конечного элемента пластины .....	33-5
33.2.2. Использование относительных координат узлов .....	33-7
33.2.3. Многослойный конечный элемент .....	33-8
33.2.4. Модель колеса с упругой шиной .....	33-8
33.2.5. Контактное взаимодействие шины с дорогой .....	33-9
33.2.6. Учет давления в шине .....	33-11
33.2.7. Редуцированные модели шины.....	33-11
33.2.8. Оценка влияния демпфирования, пропорционального матрице жесткости, на частоты шины ..	33-14
<b>33.3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРУГОЙ ШИНЫ .....</b>	<b>33-17</b>
33.3.1. Шаблон шины в программе ввода.....	33-18
33.3.1.1. Стандартная подсистема – колесо с упругой шиной .....	33-18
33.3.1.2. Тела и шарниры .....	33-20
33.3.1.2.1. Ступица (Hub).....	33-20
33.3.1.2.2. Вспомогательное тело Ground.....	33-25
33.3.1.3. Соединение колеса со ступицей .....	33-26
33.3.1.4. Нагрузка на колесо .....	33-27
33.3.1.5. Список идентификаторов.....	33-27
33.3.1.6. Список переменных .....	33-28
33.3.1.7. Создание файла модели колеса для базы данных .....	33-29
33.3.2. Структура инструмента задания параметров и исследования свойств шины в программе моделирования .....	33-31
33.3.3. Задание геометрии шины и многослойного материала.....	33-35
33.3.3.1. Профиль шины и материал .....	33-35
33.3.3.2. Задание геометрии протектора .....	33-36
33.3.4. Задание параметров конечных элементов .....	33-39
33.3.5. Настройки контакта шины с дорогой.....	33-41
33.3.6. Задание численного значения давления в шине .....	33-42
33.3.7. Задание фактора ослабления жесткости модели шины с редуцированной боковой частью .....	33-42
33.3.8. Настройки численных методов при моделировании колес с упругой шиной .....	33-43
33.3.9. Анимация сил контактного взаимодействия шины с дорогой.....	33-45
33.3.10. Мастер переменных: узловые переменные шины.....	33-48
33.3.11. Мастер переменных: переменные контакта шины с дорогой .....	33-49
33.3.12. Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины .....	33-50
33.3.13. Основные тесты для исследования свойств шины.....	33-53
33.3.13.1. Вспомогательные инструменты .....	33-53
33.3.13.1.1. Макросы идентификаторов .....	33-53
33.3.13.1.2. Список переменных для тестов .....	33-54
33.3.13.1.3. Инструмент управления идентификаторами .....	33-56
33.3.13.1.4. Использование заранее созданных конфигураций .....	33-59
33.3.13.2. Расчет частот и собственных значений .....	33-60
33.3.13.2.1. Расчет равновесия для частотного анализа .....	33-60
33.3.13.2.2. Расчет собственных частот .....	33-61
33.3.13.2.3. Расчет частот с учетом демпфирования .....	33-63
33.3.13.3. Оценка внутреннего демпфирования по коэффициенту восстановления при отскоке .....	33-64
33.3.13.4. Статические тесты .....	33-65
33.3.13.4.1. Равновесие при заданной нагрузке на шину .....	33-66
33.3.13.4.2. Зависимость прогиба шины от нагрузки .....	33-67
33.3.13.4.3. Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиги колеса и поворот вокруг вертикальной оси .....	33-69
33.3.13.4.4. Статический тест для оценки параметров модифицированной модели шины с редуцированной боковой частью .....	33-71
33.3.13.5. Качение колеса вперед под действием постоянного момента .....	33-75

33.3.13.6. Определение эффективного радиуса свободно катящегося колеса .....	33-75
33.3.13.7. Зависимость продольной силы от проскальзывания .....	33-77
33.3.13.8. Зависимость поперечной силы и восстанавливающего момента от бокового увода .....	33-79
33.3.14. Режим испытательного стенда: автоматическое исследование свойств шины .....	33-81
33.3.14.1. Перечень тестов .....	33-81
33.3.14.2. Настройки стенда .....	33-83
33.3.14.3. Выполнение серии тестов .....	33-85
33.3.14.4. Результаты расчетов .....	33-87
33.3.15. Создание упрощенных безынерционных моделей шины на основе результатов тестов .....	33-91
33.3.15.1. Общая информация .....	33-91
33.3.15.2. Процесс создания моделей .....	33-92
33.3.15.3. Пример табличной модели .....	33-93
33.3.15.4. Пример модели TMEasy .....	33-93
33.3.16. Верификация модели упругой шины .....	33-95
33.3.16.1. Сравнение статических испытаний с экспериментом .....	33-95
33.3.16.2. Сравнение расчетов со стендовыми испытаниями шины .....	33-95

### 33.4. СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ МАШИН С УПРУГИМИ ШИНАМИ

#### 33-97

33.4.1. Общая информация о моделировании колесных машин с упругими шинами .....	33-97
33.4.2. База данных упругих шин .....	33-99
33.4.3. Добавление колес с упругими шинами к моделям колесных машин .....	33-99
33.4.4. Подготовка модели колесной машины с упругими шинами к моделированию .....	33-102
33.4.4.1. Назначение колесам моделей упругих шин .....	33-102
33.4.4.2. Активизация упругих шин .....	33-103
33.4.4.3. Задание типа редуцирования модели шины .....	33-104
33.4.4.4. Модификация параметров модели шины .....	33-106
33.4.4.5. Согласованные модели безынерционных и упругих шин .....	33-107
33.4.4.6. Начальные условия при наличии упругих шин .....	33-109
33.4.4.6.1. Корректировка положений УШ при изменении положения КМ .....	33-109
33.4.4.6.2. Расчет начальных условий для УШ в рамках выполнения теста равновесия .....	33-110
33.4.5. Динамическое управление включением/выключением упругих шин .....	33-112
33.4.6. Переменные для упругой шины .....	33-117
33.4.6.1. Переменные, характеризующие взаимодействие шины с дорогой .....	33-117
33.4.6.2. Кинематика узлов шины относительно колесного диска .....	33-118
33.4.7. Процесс моделирования динамики машин с упругими шинами .....	33-121
33.4.8. Моделирование износа протектора шины .....	33-122
33.4.8.1. Математическая модель износа .....	33-122
33.4.8.2. Переменные, связанные с износом протектора шины .....	33-124
33.4.8.3. Методика оценки интенсивности износа шины в различных режимах движения .....	33-125
33.4.8.4. Методика оценки накопленного износа шины в процессе эксплуатации .....	33-128
33.4.8.4.1. Параметры моделирования накопления износа в отдельном численном эксперименте ...	33-128
33.4.8.4.2. Пример расчета накопленного износа .....	33-131
33.4.9. Примеры моделирования динамики колесных машин с упругими шинами .....	33-134
33.4.9.1. Примеры моделирования автомобиля .....	33-134
33.4.9.1.1. Переезд через искусственную неровность .....	33-134
33.4.9.1.2. Переезд через повреждение дороги .....	33-135
33.4.9.1.3. Переезд через бордюр .....	33-135
33.4.9.2. Примеры моделирования монорельсового экипажа .....	33-136
33.4.9.2.1. Проезд по неровностям в виде ступенек .....	33-136
33.4.9.2.2. Переезд через узкую щель в путевой структуре .....	33-142

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>33-144</b>
--------------------------------	---------------

## 33. Модуль UM для моделирования динамики упругих шин

### 33.1. Общая информация о модуле UM FETire

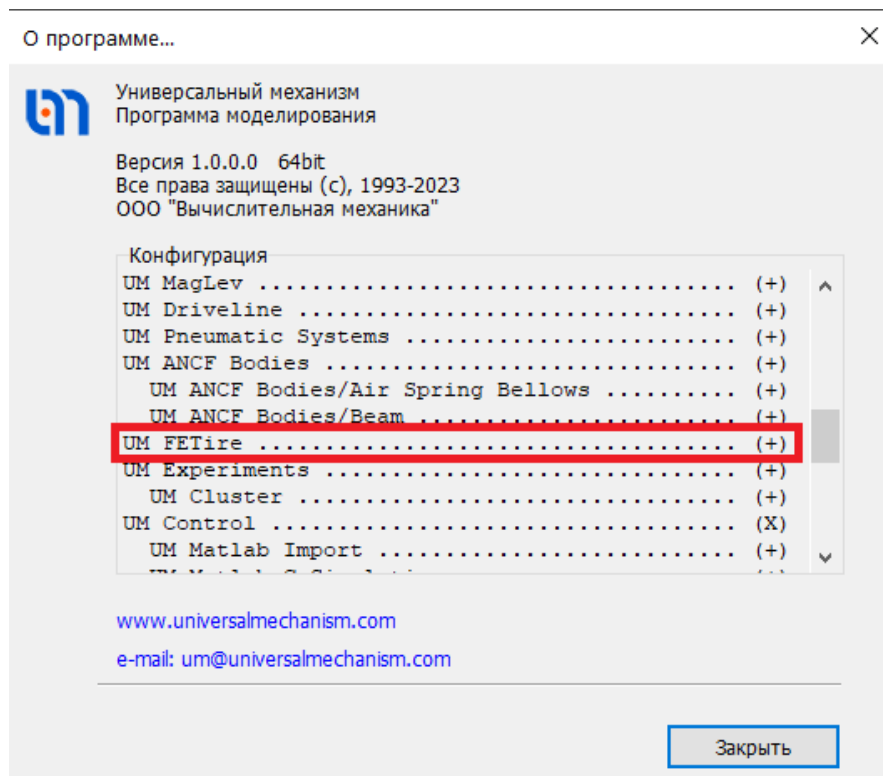


Рис. 33.1. Окно «О программе». Список модулей

Модуль **UM FETire** содержит инструменты для создания и использования конечно-элементных моделей упругой шины. Упругая шина может применяться при моделировании динамики автомобилей, монорельсовых поездов и шасси самолетов.

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

Разработка модели упругой шины предполагает доступность параметров многослойного материала шины.

Текущая версия UM предлагает использование упругой шины по следующим основным направлениям:

- Расчет кривых безынерционной модели шины, применяемой при стандартном моделировании динамики колесного транспортного средства (табличная модель и TMEasy);
- Использование для моделирования динамики автомобиля в нестандартных ситуациях: наезд на бордюр, на камень, проезд через поврежденную часть дороги и т.п.;
- Движение внедорожника по грунту с просадкой.
- Моделирование износа шины.

## 33.2. Основы математического моделирования упругой шины в модуле UM FETire

### 33.2.1. Модель отдельного конечного элемента пластины

В программе UM упругая шина моделируется оболочкой с применением трапециевидального конечного элемента. Математическая модель элемента разработана авторами модуля и подробно описана в статьях [1] [2]. Статьи находятся в открытом доступе и могут быть получены по ссылкам [статья1](#), [статья2](#). Модель конечного элемента учитывает многослойный характер материала шины [3].

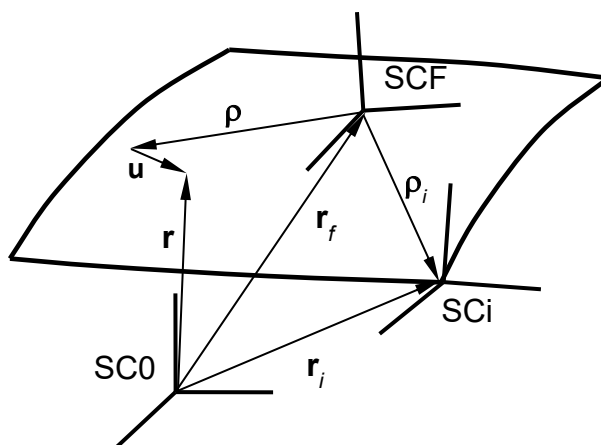


Рис. 33.2. Отдельный конечный элемент

Оболочка моделируется плоскими конечными элементами (КЭ), в нашем случае – трапециевидальной формы. Рассмотрим отдельный КЭ, рис. 33.2. Четыре узла размещаются в вершинах трапеции. С каждым узлом связана система координат ( $SC_i$  на рисунке), имеющая шесть степеней свободы относительно инерциальной системы координат ( $SC_0$ ): три координаты начала отсчета (вектор  $r_i$ ) и три угла ориентации  $SC_i$  относительно  $SC_0$  (вектор углов  $\pi_i$ ). Для задания ориентации используется последовательность поворотов 3,1,2. Это так называемые *абсолютные координаты* узлов. Таким образом, свободный КЭ имеет  $6 \times 4 = 24$  степеней свободы.

Наряду с абсолютными координатами вводятся координаты Крэйга-Бэмптона [4]. Для этого произвольное пространственное движение КЭ разделяется на движение как твердого тела вместе с сопутствующей системой координат ( $SCF$ , рис. 33.2) и малые упругие перемещения относительно  $SCF$ , задаваемые упругими формами КЭ.  $SCF$  имеет 6 степеней свободы: три координаты начала отсчета (вектор  $r_f$ ) и три угла ориентации (вектор углов  $\pi_f$ ). Таким образом, имеется  $24 - 6 = 18$  упругих форм, которые являются собственными формами свободных колебаний КЭ и рассчитываются с использованием матриц масс и жесткости, построенных с использованием классического метода конечных элементов. Координаты, соответствующие упругим формам элемента, обозначим  $\Delta q$ . Примеры изгибных форм свободных колебаний трапециевидального КЭ приведены на рис. 33.3.

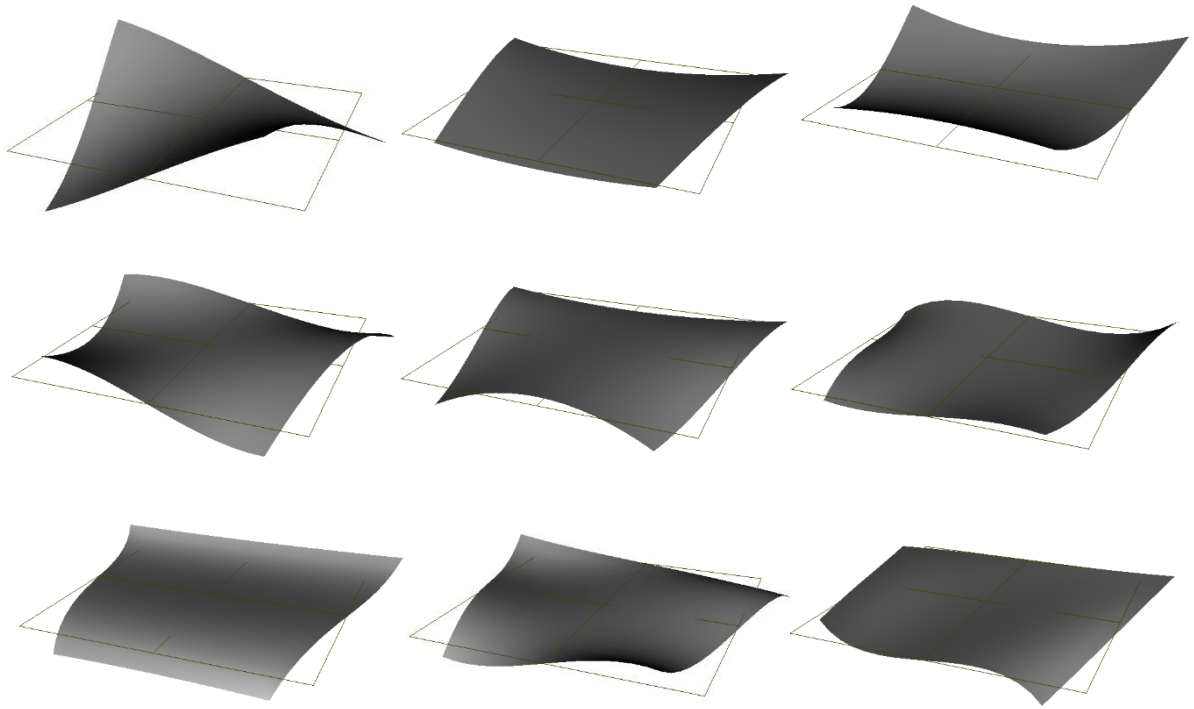


Рис. 33.3. Пример изгибных форм КЭ, соответствующих собственным формам свободных колебаний

Для каждого конечного элемента уравнения движения строятся в соответствии с методом Крейга-Бэмптона [4] в координатах Крейга-Бэмптона.

$$\begin{aligned}
 m a_f - t \tilde{\rho}_c \varepsilon_f + M_{rq} H \Delta \dot{q} &= -\tilde{\omega}_f \tilde{\omega}_f \rho_c \\
 t \tilde{\rho}_c a_f + J \varepsilon_f + M_{\pi q} H \Delta \dot{q} &= -\tilde{\omega}_f J \omega_f \\
 H^T M_{rq}^T a_f + H^T M_{\pi q}^T \varepsilon_f + \Delta \dot{q} &= -\Omega^2 \Delta q - (\delta \Omega + \beta \Omega^2) \Delta \dot{q} - H^T V(\omega_f) \\
 H^T &= (H_{ri}^T \quad H_{\pi i}^T)
 \end{aligned}
 \tag{33.1}$$

Здесь  $a_f, \varepsilon_f, \omega_f$  - ускорение начала отсчета, угловое ускорение и угловая скорость SCF,  $\Delta q$  – упругие модальные координаты пластины относительно SCF,  $m, J, \rho_c$  – масса, матрица тензора инерции и радиус-вектор центра масс пластины относительно SCF,  $H$  – матрица коэффициентов упругих собственных форм КЭ,  $\Omega, \Omega^2$  – диагональные матрицы собственных частот КЭ и их квадратов.

Уравнение (33.1) использует матричную форму записи уравнений и соотношений кинематики. Ознакомиться с особенностями такого стиля можно в книге [5]. Книгу можно скачать по [ссылке](#).

В третьем уравнении системы (33.1) член  $\Omega^2 \Delta q$  соответствует упругим силам, возникающим при деформации элемента, а слагаемое  $(\delta \Omega + \beta \Omega^2) \Delta \dot{q}$  вносит в элемент внутреннюю диссипацию. Учитывается внутренняя диссипация двух типов, причем параметр  $\beta$  задает диссипацию, пропорциональную матрице жесткости, а  $\delta$  задает долю демпфирования от критического по упругим степеням свободы конечного элемента. Задание значений этим параметра обсуждается позже. Здесь мы отметим только, что  $\delta \sim 1, \beta \ll 1$ с. Наконец, матрица-столбец  $V(\omega_f)$  включает силы инерции от угловой скорости вращения колеса.

После этого осуществляется переход от переменных Крейга-Бэмптона к абсолютным узловым координатам. Число координат Крейга-Бэмптона и абсолютных узловых координат одинаковое. Они связаны системой нелинейных алгебраических уравнений, которые следует решать относительно переменных Крейга-Бэмптона при заданных абсолютных координатах узлов на каждом шаге интегрирования уравнений движения:

$$\begin{aligned} r_i &= r_f + A_{0f}(\pi_f)(\rho_i + u_i), \quad u_i = H_{ri}\Delta q \\ A_{0i}(\pi_i) &= A_{0f}(\pi_f)A_{fi}(H_{\pi i}\Delta q) \\ i &= 1..4 \end{aligned} \quad (33.2)$$

Здесь  $r_i, A_{0i}$  – радиус-вектор начала отсчета и матрица направляющих косинусов SCi относительно SC0.

Первые и вторые производные этих уравнений по времени дают уравнения для связи абсолютных скоростей  $v_i, \omega_i$  и ускорений  $a_i, \varepsilon_i$  узлов со скоростями и ускорениями переменных Крейга-Бэмптона.

$$\begin{aligned} v_i &= v_f - (\tilde{\rho}_i + \tilde{u}_i)\omega_f + A_{0f}H_{ri}\Delta\dot{q} \\ \omega_i &= \omega_f + A_{0f}B_{fi}H_{\pi i}\Delta\dot{q} \\ a_i &= a_f - (\tilde{\rho}_i + \tilde{u}_i)\varepsilon_f + A_{0f}H_{ri}\Delta\ddot{q} + \tilde{\omega}_f\tilde{\omega}_fA_{0f}(\rho_i + u_i) + 2\tilde{\omega}_fA_{0f}H_{ri}\Delta\dot{q} \\ \varepsilon_i &= \varepsilon_f + A_{0f}B_{fi}H_{\pi i}\Delta\ddot{q} + \tilde{\omega}_fA_{0f}\omega_{fi} + A_{0f}\dot{B}_{fi}H_{\pi i}\Delta\dot{q} \\ i &= 1..n \end{aligned}$$

Исключая из уравнений (33.1) ускорения  $a_f, \varepsilon_f, \Delta\ddot{q}$  с помощью этих соотношений, получим уравнения движения отдельного КЭ в абсолютных узловых координатах

$$M_k\ddot{q}_k + k_k(q_k, \dot{q}_k) = Q_k, \quad (33.3)$$

где  $k$  – номер элемента,  $q_k$  – вектор абсолютных координат узлов размером 24,  $k_k, Q_k$  – столбцы сил инерции и обобщенных сил,  $M_k$  – матрица масс КЭ размером 24×24 относительно инерциальной системы координат.

### 33.2.2. Использование относительных координат узлов

Уравнения движения отдельного конечного элемента (33.3) записаны в абсолютных координатах узлов, то есть в координатах, определяющих положение СК узлов относительно инерциальной СК0. При моделировании динамики шины, то есть в процессе интегрирования уравнений движения, более эффективным является использование координат узла относительно абсолютно твердого колесного диска.

Пусть  $\Delta r_i^r, \Delta\pi_i^r$  – векторы перемещения узла и углов поворота СК узла при деформации шины относительно СК колесного диска, то есть эти величины равны нулю в недеформированном состоянии шины. Тогда положение SCi узла относительно инерциальной SC0 определяется уравнениями

$$\begin{aligned} r_i &= r_w + A_{0w}(r_{i0}^r + \Delta r_i^r), \\ A_{0i} &= A_{0w}A_{wi}(\Delta\pi_i^r), \end{aligned}$$

где  $r_w, A_{0w}$  радиус-вектор и матрица направляющих косинусов системы координат, связанной с абсолютно твердым колесным диском;  $r_{i0}^r$  – радиус-вектор узла относительно СК центра колеса в недеформированном состоянии. Приведем также выражения для скоростей:

$$v_i = v_w + \tilde{\omega}_wA_{0w}(r_{i0}^r + \Delta r_i^r) + A_{0w}\Delta\dot{r}_i^r,$$

$$\omega_i = \omega_w + A_{0w}\omega_{iw}^r.$$

Здесь  $v_w, \omega_w$  – скорость центра колеса и его угловая скорость,  $\omega_{iw}^r$  – угловая скорость SCi относительно колесного диска.

### 33.2.3. Многослойный конечный элемент

### 33.2.4. Модель колеса с упругой шиной

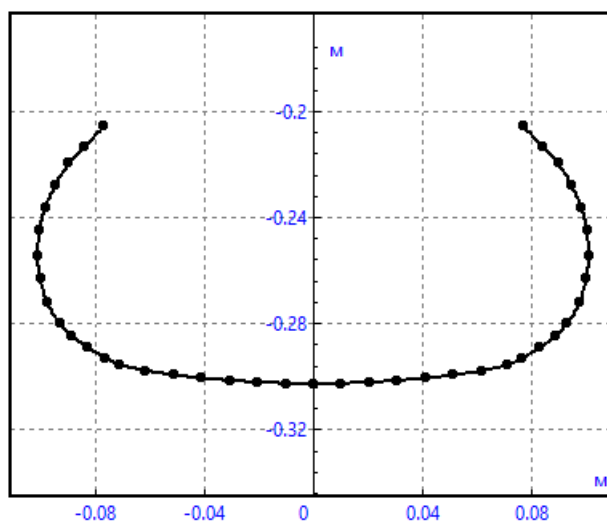


Рис. 33.4. Пример кривой плоского сечения оболочки, моделирующей шину

Колесо моделируется абсолютно твердым колесным диском с шестью степенями свободы, с которым связана конечно-элементная модель упругой оболочки. Поскольку оболочка в недеформированном состоянии является поверхностью вращения, то разбивка на КЭ производится вращением плоского сечения вокруг горизонтальной оси симметрии. На кривой сечения вводится  $n_s$  отрезков (вообще говоря, переменной длины) и, соответственно,  $n_s + 1$  узлов, рис. 33.4. Сечение поворачивается  $n_\alpha$  раз вокруг оси симметрии на постоянный угол  $\Delta\alpha = 2\pi/n_\alpha$ , образуя равномерную разбивку на  $n_s + n_\alpha$  равнобочных трапеций – КЭ, рис. 33.5. Число узлов разбивки равно  $(n_s + 1)n_\alpha$ . Граничные узлы оболочки с двух сторон жестко связываются с ободом колеса. Остальные  $(n_s - 1)n_\alpha$  узлов имеют по шесть степеней свободы каждый, как это описано в предыдущем разделе. В каждом из  $n_\alpha$  сечений узлы нумеруются последовательно вдоль кривой

$$1 + (n_s + 1)(i - 1) \dots 1 + (n_s + 1)i,$$

где  $i$  – номер сечения  $i = 1 \dots n_\alpha$ .

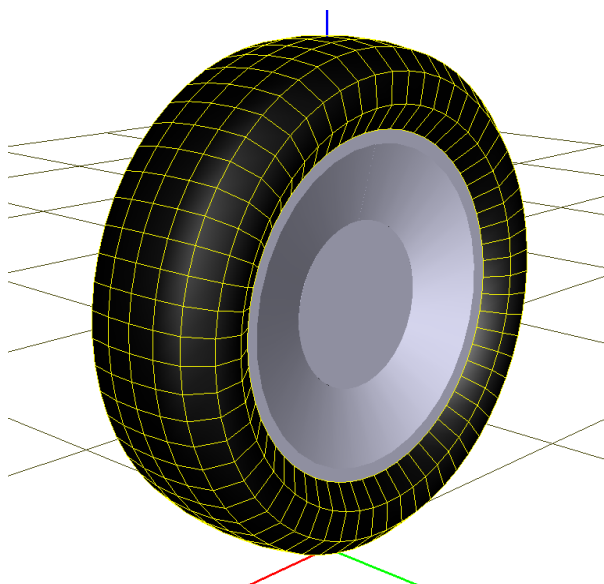


Рис. 33.5. Автомобильное колесо с упругой шиной в программе ввода. Выделены трапециевидальные конечные элементы

Уравнения движения упругой оболочки формируются с использованием уравнений для отдельных элементов (33.3) стандартным для МКЭ образом.

Полные уравнения движения колеса с упругой шиной включают связанные уравнения для абсолютно твердого колеса и оболочки:

$$M\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q, \tag{33.4}$$

где  $q$  – столбец координат размером  $6(n_s - 1)n_\alpha + 6$ ,  $M$  – матрица масс модели колеса,  $k$ ,  $Q$  – столбцы обобщенный сил инерции и активных сил.

Для улучшения профиля матриц модели номера шести координат, соответствующих абсолютно твердому колесному диску, располагаются в конце списка координат.

### 33.2.5. Контактное взаимодействие шины с дорогой

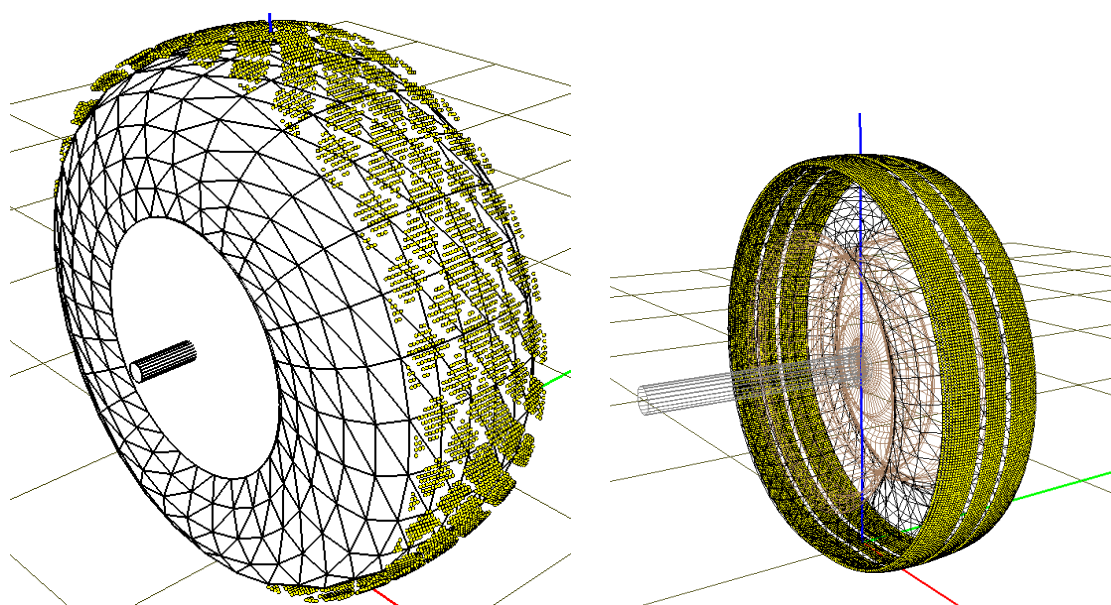


Рис. 33.6. Примеры щёточной модели контакта колеса с дорогой

Для контакта шины с дорожным полотном реализуется щеточная модель взаимодействия, при которой контактная поверхность шины представляется набором упругих безынерционных щетинок, один конец которых связан с конечным элементом, а другой может вступать в контакт с опорной поверхностью, реализуя упруго-диссипативное взаимодействие в радиальном направлении и фрикционное – в касательном. Примеры щеточной модели для колеса большегрузного и легкового автомобилей приведены на рис. 33.6. Желтые точки соответствуют концам щетинок, вступающим в контакт. Как видно из рисунка, щетинки позволяют учитывать рисунок протектора шины.

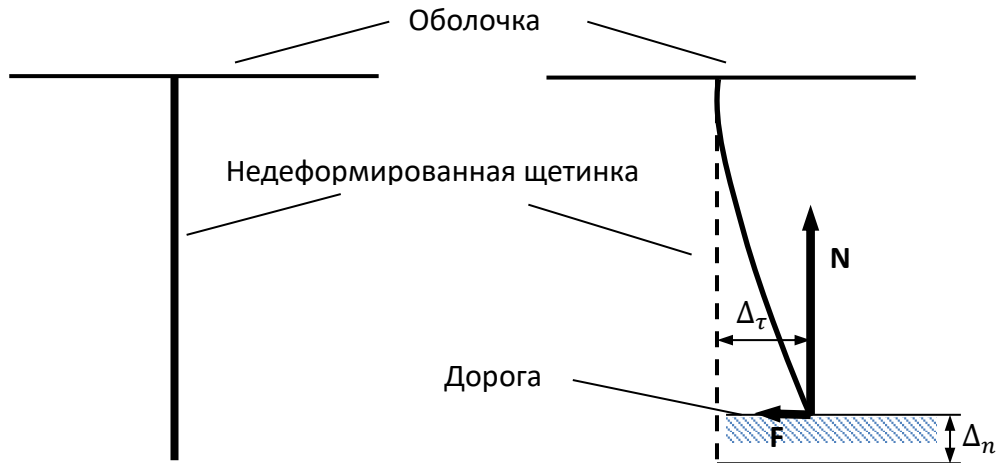


Рис. 33.7. Щеточная модель

Рассмотрим математическую модель сил взаимодействия отдельной щетинки с дорогой, рис. 33.7. Нормальная сила  $N$  зависит от величины сжатия в нормальном направлении  $\Delta_n$  и от ее производной по времени  $\dot{\Delta}_n$ :

$$N = k_n \Delta_n + d_n \dot{\Delta}_n, \tag{33.5}$$

где  $k_n, d_n$  – жесткость щетинки на сжатие и коэффициент линейного демпфирования.

Сила трения  $F$  имеет два режима: скольжения и сцепления,

$$F = \begin{cases} fN, & \text{скольжение} \\ k_\tau \Delta_\tau + d_\tau \dot{\Delta}_\tau \leq f_0 N, & \text{сцепление} \end{cases} \tag{33.6}$$

Здесь  $f, f_0$  – коэффициенты трения скольжения и покоя,  $\Delta_\tau$  – отклонение конца щетинки от недеформированного состояния в касательном направлении,  $k_\tau, d_\tau$  – жесткость щетинки на сдвиг и коэффициент линейного демпфирования.

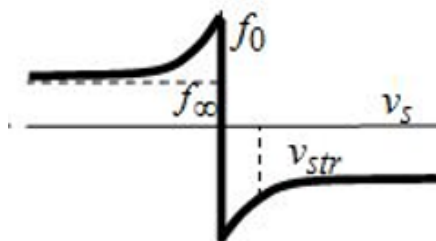


Рис. 33.8. Зависимость коэффициента трения от скорости проскальзывания

Коэффициент трения скольжения зависит от скорости проскальзывания  $v_s$  в соответствии с формулой Штрибека (рис. 33.8):

$$f(v_s) = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-(v_s/v_{str})^\delta} \quad (33.7)$$

где

$f_0, f_\infty$  - коэффициенты трения при нулевой скорости (покоя) и при бесконечной скорости проскальзывания;

$v_{str}$  - скорость Штрибека, определяющая величину интервала скорости проскальзывания, на которой имеет место эффект Штрибека экспоненциального падения коэффициента трения;

$\delta \in [0.5, 1]$  - эмпирический показатель степени, зависящий от материала.

### 33.2.6. Учет давления в шине

Давление воздуха в шине учитывается для каждого КЭ в виде распределенной нагрузки, перпендикулярной элементу. К колесному диску прикладываются компенсирующая сила и момент, таким образом, что суммарная сила и момент от давления для колеса в целом равнялись нулю.

### 33.2.7. Редуцированные модели шины

Поскольку описанная выше модель имеет весьма большое число степеней свободы (обычно несколько тысяч), актуальной является задача снижения этого числа с целью повышения быстродействия моделирования.

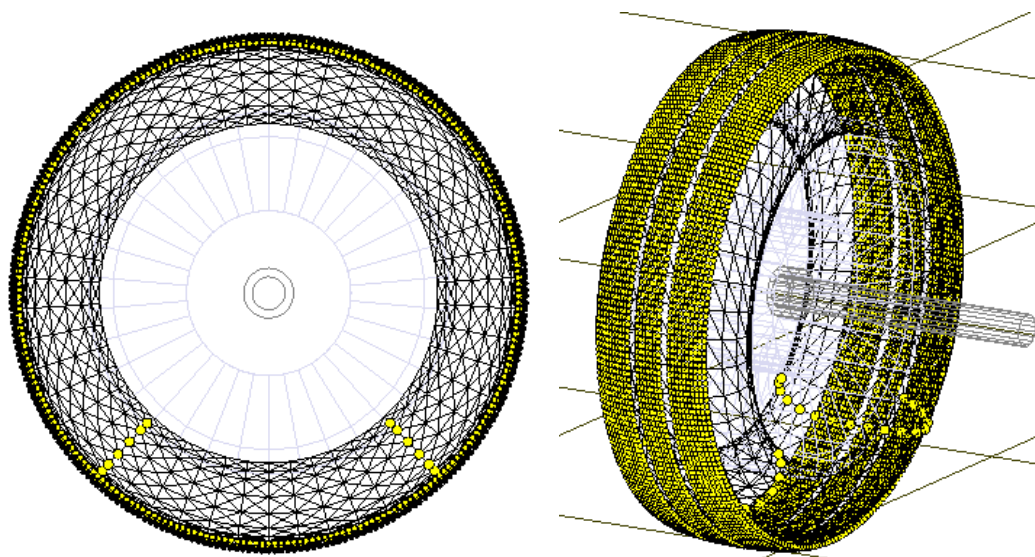


Рис. 33.9. Интерфейсные узлы для редуцирования верхней части шины

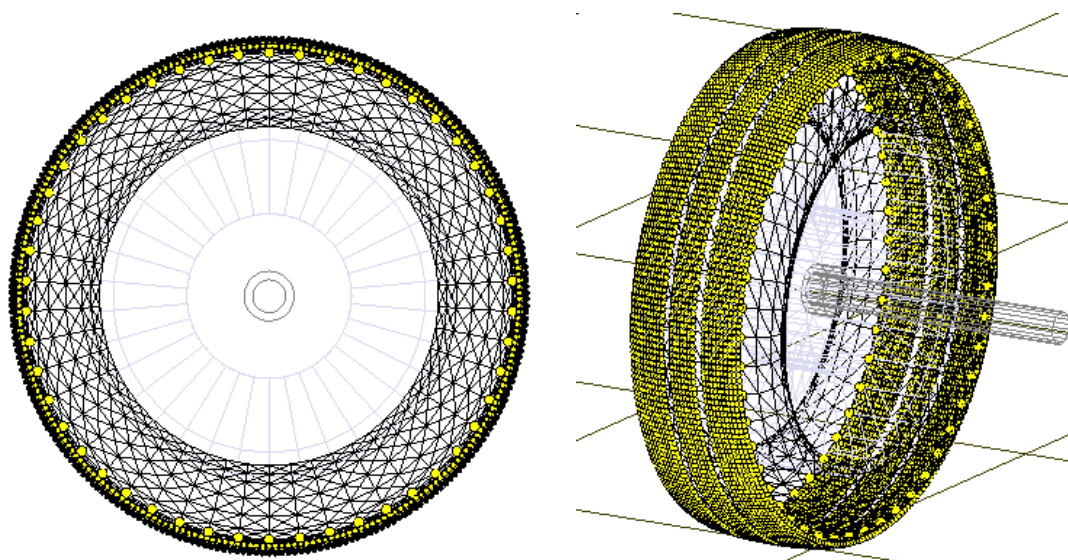


Рис. 33.10. Интерфейсные узлы для редуцирования боковых частей шины

В UM реализованы две **редуцированные** модели шины, имеющие значительно меньшее число степеней свободы, чем **полная** модель, описанная выше: модель с редуцированной **верхней** частью (рис. 33.9) и **боковыми** частями (рис. 33.10). Оба подхода используют одну и ту же идею: выразить линейные и угловые перемещения, скорости и ускорения узлов, входящих в редуцированные области, через перемещения, скорости ускорения **интерфейсных узлов**. Тем самым степени свободы редуцированных узлов можно исключить из уравнений движения (33.7). На рисунках выше интерфейсные узлы помечены жирными желтыми точками. В первом случае редуцированная область задается двумя углами левого и правого сечений относительно вертикали ( $\alpha_{\text{start}}$ ,  $\alpha_{\text{end}}$ ), содержащих интерфейсные узлы; значения углов  $\alpha_{\text{start}}$ ,  $\alpha_{\text{end}}$  могут быть различны, например  $\alpha_{\text{start}} = 60^\circ$ ,  $\alpha_{\text{end}} = 45^\circ$ . В случае редуцирования боковой части интерфейсные узлы идут по границе боковин.

Для практической реализации снижения числа степеней свободы используется метод Крейга-Бэмптона, примененный к редуцированным областям шины, то есть уравнения движения редуцируемых областей выражаются через координаты интерфейсных узлов и колесного диска. Это возможно, поскольку интерфейсные узлы и колесный диск образуют непрерывную границу редуцируемых областей. В методе Крейга-Бэмптона будем использовать только статические формы интерфейсных узлов.

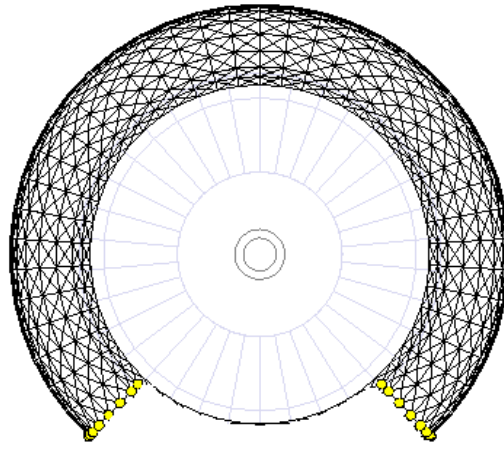


Рис. 33.11. Редуцируемая верхняя часть шины

Рассмотрим реализацию идеи в сильно упрощенном виде.

В качестве примера на рис. 33.11 представлена редуцируемая верхняя область шины. Зафиксируем колесный диск колеса. Линеаризуем уравнения движения шины относительно положения равновесия и, используя матрицу жесткости, рассчитаем статические приращения координат редуцируемых узлов при единичном приращении каждой координаты интерфейсных узлов по отдельности. В матричной форме эти зависимости можно записать следующим образом:

$$\Delta q^r = G \Delta q^{in}, \tag{33.8}$$

то есть перемещения редуцируемых узлов  $\Delta q^r$  линейно зависят от перемещений интерфейсных узлов  $\Delta q^{in}$ .

Обратите внимание, что это соотношение получено для перемещений относительно колесного диска как абсолютно твердого тела. Далее принимаем аналогичные соотношения для относительных скоростей и ускорений

$$\Delta \dot{q}^r = G \Delta \dot{q}^{in}, \Delta \ddot{q}^r = G \Delta \ddot{q}^{in} \tag{33.9}$$

Используя теорию сложений движений, абсолютные координаты, скорости и ускорения редуцируемых узлов можно выразить через координаты, скорости и ускорения интерфейсных узлов и колесного диска. После этого можно построить уравнения движения редуцируемой области в координатах интерфейсных узлов и исключить степени свободы редуцируемых узлов из уравнений движения (33.4).

**Замечание 1.** Описанный подход является приближенным, как и в любом случае использования процедуры Крейга-Бэмптона. Пользователь, имея возможность использовать полную модель шины наряду с редуцированными, может оценить разницу в результатах моделирования вследствие введенных упрощений.

**Замечание 2.** Редуцирование верхней части шины позволяет в несколько раз уменьшить число степеней свободы, однако имеет существенные недостатки: при вращении шины происходит перестройка уравнений после поворота на угол  $\Delta\alpha = 2\pi/n_\alpha$  (угол между соседними сечениями), что приводит к дополнительной потере точности и дроблению шага интегрирования. При наезде на высокую ступеньку контакт может выйти за пределы области сохраненных

узлов, что приведет к неверным результатам моделирования. По этой причине данный тип редуцирования рекомендуется использовать в статических задачах, когда колесо не вращается, в случаях движения с небольшой скоростью или в случаях, когда точность моделирования не играет особой роли (например, при расчете износа шины).

**Замечание 3.** Модель шины с редуцированной боковой частью имеет **повышенную жесткость** в тестах зависимости прогиба от нагрузки при номинальной и повышенной нагрузке. Реализована модифицированная модель, устраняющая данную проблему, п. 33.3.13.4.4 *Статический тест для оценки параметров модифицированной модели шины с редуцированной боковой частью*, 33.3.7 *Задание фактора ослабления жесткости модели шины с редуцированной боковой частью*.

**Замечание 4.** Для идентификации типа модели в именах каталогов и файлов часто используются аббревиатуры: f (full – полная модель), ru (reduction upper – редуцированная сверху), rs (reduction side – редуцированная сбоку).

### 33.2.8. Оценка влияния демпфирования, пропорционального матрице жесткости, на частоты шины

Рассмотрим линеаризованные уравнения колеса с упругой шиной в окрестности положения равновесия. Закрепим колесный диск, чтобы исключить нулевые частоты.

На первом этапе исследования положим давление равным нулю. В этом случае матрица жесткости  $K_0$  модели симметричная и линеаризованные уравнения при отключенных внешних силах имеют вид

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + K_0q = 0,$$

где  $D$  – матрица демпфирования.

Введем демпфирование, пропорциональное матрице жесткости шины

$$D = \beta K_0.$$

Коэффициент демпфирования  $\beta$  входит в уравнения отдельного КЭ оболочки (33.1) и имеет размерность времени.

Рассмотрим проблему собственных значений линеаризованных уравнений

$$(M\lambda^2 + \beta K_0\lambda + K_0)v = 0. \quad (33.10)$$

Здесь  $\lambda, e$  – собственное значение и собственный вектор, подлежащие определению. Наряду с этой проблемой рассмотрим задачу расчета собственных частот модели, которая записывается следующим образом:

$$(K_0 - M\omega^2)e = 0,$$

где  $\omega, e$  – собственная частота и соответствующая ей собственная форма колебаний.

Пусть задача расчета частот решена,  $\omega_j, e_j, j = 1, 2, \dots$  – набор рассчитанных частот, упорядоченных в порядке возрастания, то есть  $\omega_1$  – низшая собственная частота шины. Поскольку колесный диск закреплен, то нулевые частоты, соответствующие перемещению как твердого тела, отсутствуют.

$$(K_0 - M\omega_j^2)e_j = 0.$$

Приведем важное свойство собственных форм, заключающееся в их ортогональности в нормах матриц масс и жесткости:

$$e_k^T M e_j = \begin{cases} m_j > 0, k = j \\ 0, k \neq j \end{cases}, \quad e_k^T K_0 e_j = \begin{cases} k_{0j} > 0, k = j \\ 0, k \neq j \end{cases}$$

$$\omega_j^2 = \frac{k_{0j}}{m_j}$$

Будем искать собственные векторы задачи (33.10) в виде разложения по собственным формам

$$v = \sum c_j e_j$$

с комплексными коэффициентами  $c_j$ ,

$$\sum c_j (M\lambda^2 + \beta K_0 \lambda + K_0) e_j = 0.$$

Умножим это уравнение слева на  $e_j^T$ . С учетом свойств ортогональности собственных форм, получим скалярные квадратные уравнения

$$m_j \lambda_j^2 + \beta k_{0j} \lambda_j + k_{0j} = 0,$$

или

$$\lambda_j^2 + \beta \omega_j^2 \lambda_j + \omega_j^2 = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\lambda_{j1,2} = -\frac{\beta \omega_j^2}{2} \pm \sqrt{\frac{\beta^2 \omega_j^4}{4} - \omega_j^2}. \quad (33.11)$$

Введем критическую частоту  $\omega^*$ , при которой подкоренное выражение обращается в ноль:

$$\omega^* = \frac{2}{\beta}. \quad (33.12)$$

Для всех собственных частот, больших критической, собственные значения являются действительными отрицательными числами (33.11), то есть частоты, которые выше критической частоты, полностью демпфированы и не проявляются при моделировании динамики.

Для частот ниже критической имеем два комплексно-сопряженных корня

$$\lambda_{j1,2} = -\frac{\beta \omega_j^2}{2} \pm i \omega_j \sqrt{1 - \frac{\beta^2 \omega_j^2}{4}}$$

Здесь  $i$  – мнимая единица.

Введем показатель степени демпфирования частоты: доля демпфирования от критического

$$\delta_j = \frac{\omega_j}{\omega^*}. \quad (33.13)$$

Тогда комплексные собственные значения определяются формулой

$$\lambda_{j1,2} = -\delta \omega_j \pm i \omega_j \sqrt{1 - \delta^2}.$$

В этом выражении мнимая часть определяет частоту затухающих колебаний

$$\omega'_j = \omega_j \sqrt{1 - \delta^2} < \omega_j. \quad (33.14)$$

Теперь обсудим влияние давления. Вместо матрицы жесткости теперь правильнее говорить о матрице позиционных сил  $K$ , поскольку силы давления неконсервативные (непотенциальные) и матрица  $K$  линеаризованных сил, не зависящих от скоростей, несимметрична,

$$K = K_0 + \Delta K(p).$$

Здесь  $\Delta K(p)$  – несимметричная добавка к матрице от давления  $p$ . Кроме того, демпфирование в модели шины строится по матрице  $K_0$  без учета влияния давления. По этим причинам предыдущий анализ может рассматриваться только как приближенный. Однако исследования, проведенные ниже, показывают важность этих оценок для понимания степени демпфирования модели упругой шины при использовании демпфирования, пропорционального матрице жесткости.

По результатам исследований можно сделать следующий вывод. Демпфирование, пропорциональное матрице жесткости, имеет важный положительный эффект: оно исключает влияние высоких частот. Например, при  $\beta = 0.001\text{с}$  подавляются частоты выше критической  $\omega^* = 2000\text{рад/с} \approx 318\text{Гц}$ . Степень задемпфированности легко оценивается по величине частоты по формуле (33.13). **Эти свойства позволяют использовать данный тип демпфирования в качестве основного при моделировании динамики колеса с упругой шиной.**

### 33.3. Разработка и исследование модели упругой шины

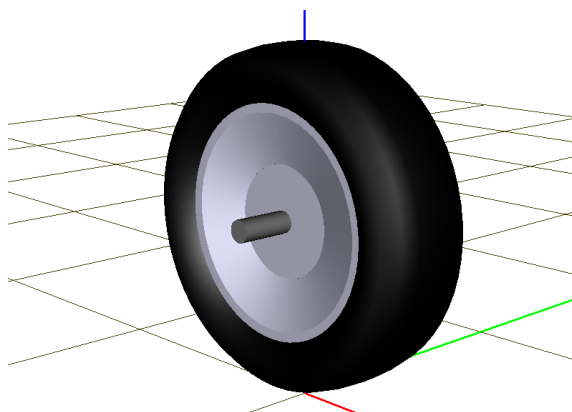


Рис. 33.12. Шаблон колеса с упругой шиной в программе ввода

Для создания упругой шины и исследования ее свойств используется стандартный шаблон, содержащийся в модели *TireTestRig template*. По сути, шаблон является виртуальной моделью испытательного стенда.

Модель находится по пути [{Данные УМ}\Samples\FETire\TireTestRig template](#)

Для создания новой модели шины следует создать копию шаблона (т.е. скопировать этот каталог), переименовать его в соответствии с именем шины и выполнить необходимую корректировку модели, сначала в программе ввода, а затем – в программе моделирования.

Шаблон шины представляет собой модель виртуального стенда для испытания шин и используется

- для создания конкретной упругой шины путем задания геометрических данных, параметров многослойного материала, описания протектора,
- для исследования некоторых свойств модели (собственные частоты, степень демпфирования, прогиб в вертикальном, продольном и поперечном направлении в зависимости от соответствующей нагрузки и т.д.),
- для расчета кривых безынерционной модели шины, применяемой при стандартном моделировании динамики колесного транспортного средства (табличная модель и TMEasy),
- для создания редуцированных моделей шины;
- для создания конечно-элементной модели, включаемой в модель колесного экипажа (автомобиля, монорельсового экипажа, мотоцикла и т.д.).

Основная проблема при создании моделей заключается в том, что параметры материала шин, как правило, не находятся в открытом доступе и зачастую могут быть получены только от производителя шин.

Шаблон содержит стандартную подсистему колеса с упругой шиной, ступицу и вспомогательное тело **Ground**, задающее движение опорной поверхности под колесом. Соединение колесного диска со ступицей моделируется силовым элементом типа сайлент-блок. Шарнир, задающий положение ступицы относительно СК0, позволяет выполнять основные тесты с моделью шины, в том числе устанавливать значения углов схода и развала, задавать вращения по нужному закону и так далее.

### 33.3.1. Шаблон шины в программе ввода

Рассмотрим в программе ввода элементы, входящие в шаблон шины.

#### 33.3.1.1. Стандартная подсистема – колесо с упругой шиной

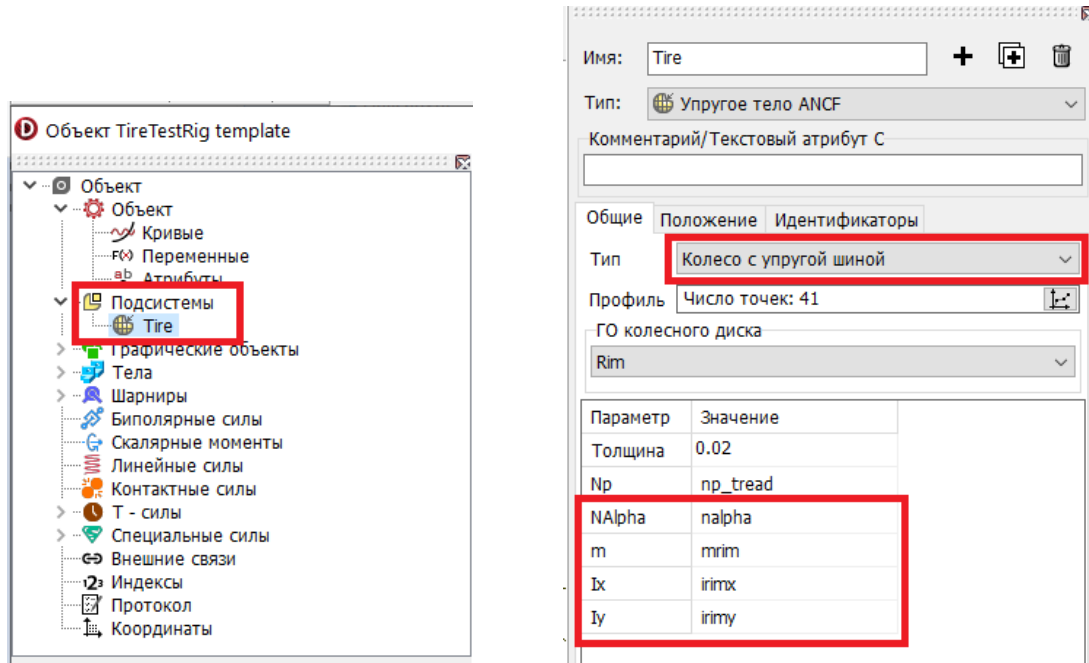



Рис. 33.13. Стандартная подсистема колеса с упругой шиной

Для создания колеса с упругой конечно-элементной шиной следует добавить подсистему **Упругое тело ANCF** и задать ее тип **Колесо с упругой шиной**, рис. 33.13. К модели добавляется **внешняя** подсистема, включающая одно абсолютно твердое тело – колесный диск. Упругая шина добавляется программой к колесу в программе моделирования, а в программе ввода представлена лишь рисунком. Рисунок шины как поверхности вращения задается сечением (профилем) по кнопке , рис. 33.14.

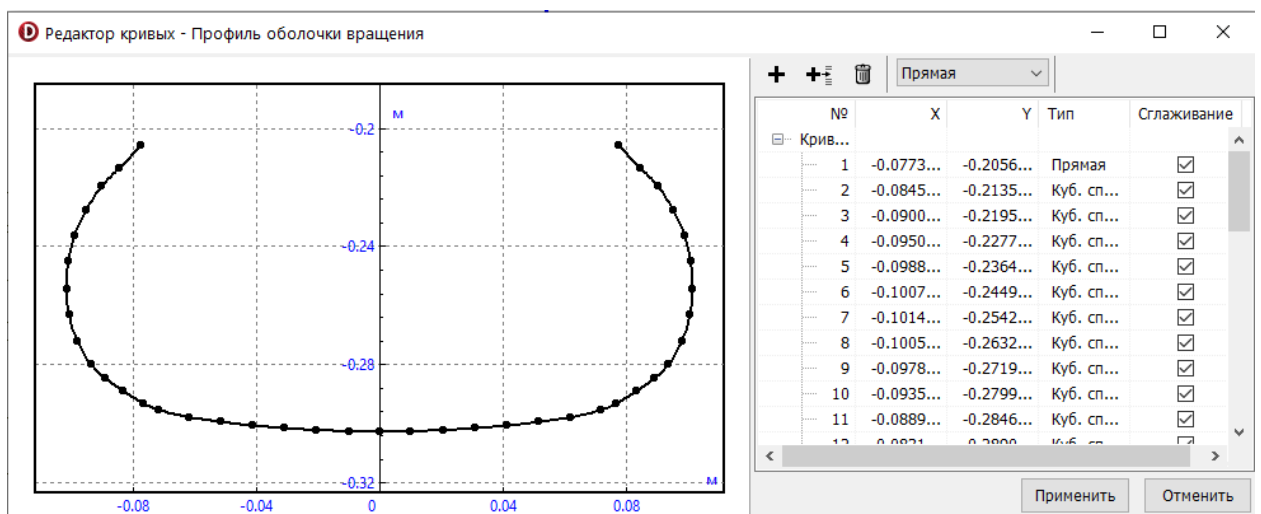


Рис. 33.14. Кривая сечения (профиля) шины

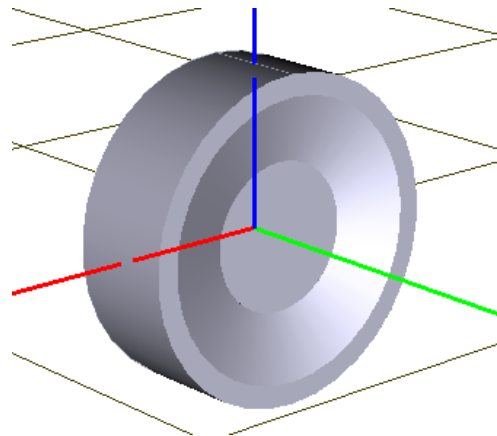
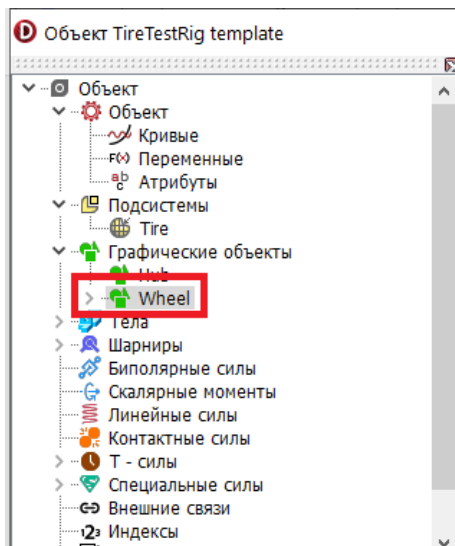


Рис. 33.15. Графический объект для колесного диска

Подсистеме назначается графический образ колесного диска (рис. 33.15) путем выбора предварительной созданного ГО в разделе **ГО колесного диска**, рис. 33.13. При создании конкретной шины пользователь может использовать собственный ГО, созданный в одной из САПР. В шаблоне мы предлагаем упрощенный параметризованный ГО, который может быть использован с шиной любого размера, рис. 33.16. Для параметризации ГО используются идентификаторы

- $r_{rim\_out}$  – внешний радиус обода,
- $r_{rim\_in}$  – внутренний радиус обода,
- $w_{rim\_out}$  – максимальная ширина обода,
- $w_{rim\_in}$  – минимальная ширина обода.

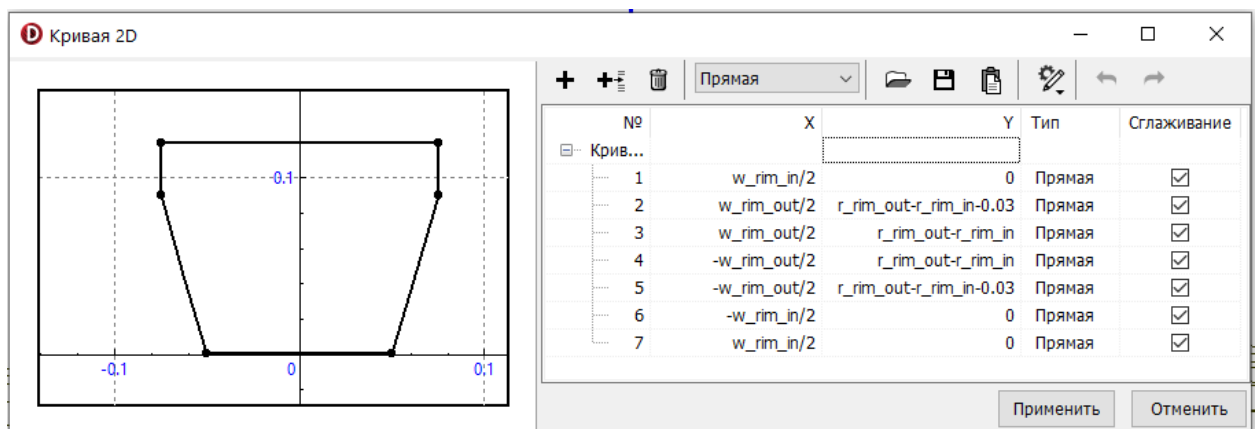


Рис. 33.16. Параметризация упрощенного ГО колеса

Параметры упругой шины, задаваемые в программе ввода, рис. 33.13:

$N_p$  – число конечных элементов в сечении шины. Используется только в программе ввода для создания ГО шины. В программе моделирования игнорируется.

$N_{Alpha}$  – основной параметр, задающий число конечных элементов по окружности шины. Должен быть параметризован идентификатором с целью возможного изменения.

$m$ ,  $I_x$ ,  $I_y$  – инерционные параметры колесного диска – масса, моменты инерции относительно продольной ( $I_x$ ) и поперечной оси симметрии ( $I_y$ ). В стандартном шаблоне эти параметры заданы идентификаторами  $mrim$ ,  $irimx$ ,  $irimy$ .

### 33.3.1.2. Тела и шарниры

Модель дополнительно включает два тела: ступицу (**Hub**) и вспомогательное тело **Ground**, имитирующее вращающийся каток (ролик) испытательного стенда, моделирующего движение колеса по дороге.

#### 33.3.1.2.1. Ступица (Hub)

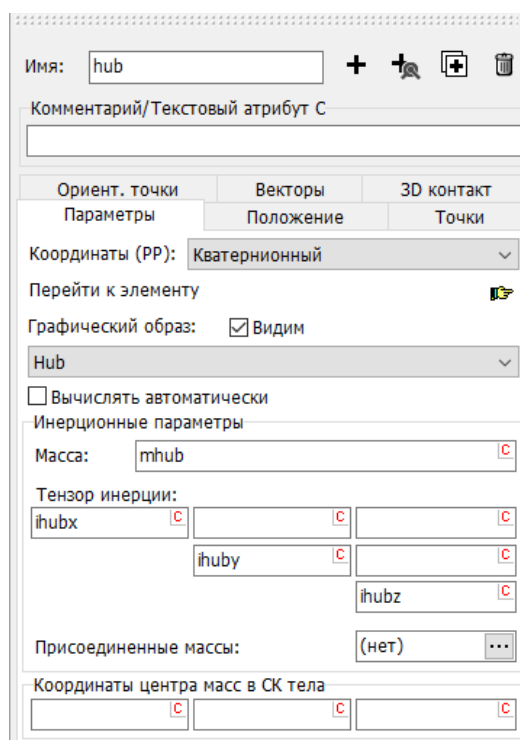


Рис. 33.17. Тело Hub и его инерционные параметры

Инерционные параметры ступицы заданы идентификаторами, рис. 33.17. Положение и движение ступицы определяется шарниром обобщенного типа **jHub**. В частности, шарнир вводит три степени свободы: движение в продольном направлении и по вертикали, а также вращение вокруг оси колеса.

Остановимся подробно на семи элементарных преобразованиях (ЭП), входящих в описание шарнира, рис. 33.18.

#### 1) TCz – постоянный сдвиг по вертикали

Сдвиг задает положение центра ступицы и колесного диска над поверхностью дороги с помощью идентификатора радиуса колеса  $rwheel$  и вспомогательного идентификатора дополнительного смещения  $h0$ . Дополнительное смещение, позволяет получить начальное положение колеса выше дороги.

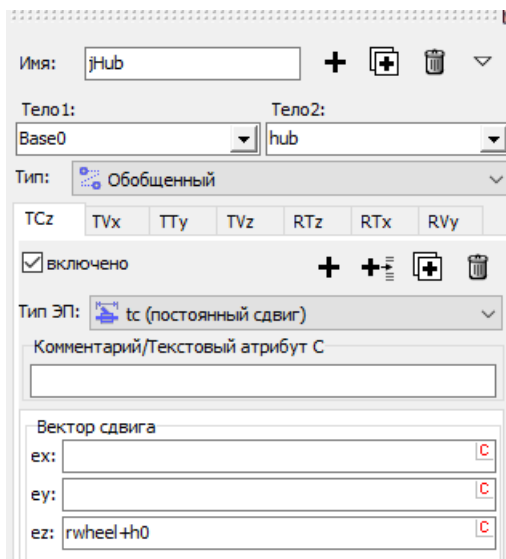


Рис. 33.18. Список элементарных преобразований. Первое ЭП: TCz – постоянный сдвиг по вертикали

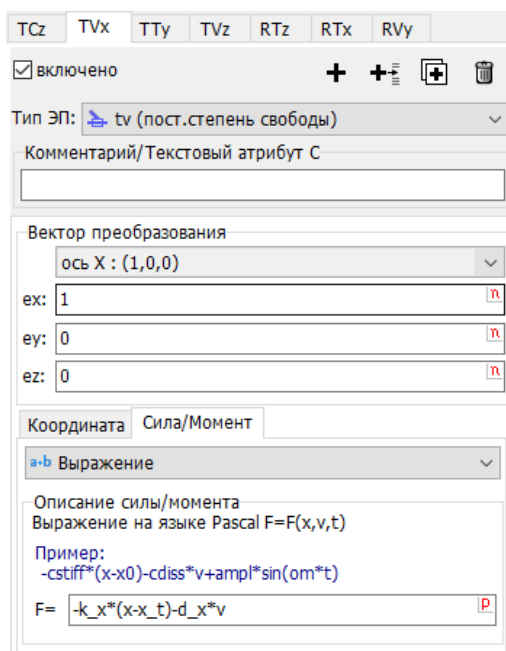


Рис. 33.19. Второе ЭП: TVx – степень свободы в продольном направлении.

## 2) TVx – степень свободы в направлении оси X

Данное ЭП реализует смещение ступицы в продольном направлении в соответствии с законом, заданным идентификатором  $x_t$ . Для реализации смещения введена линейная упруго-диссипативная шарнирная сила, заданная выражением  $-k_x(x-x_t)-d_x*v$ , рис. 33.19. В этом выражении  $k_x$ ,  $d_x$  – коэффициенты жесткости и диссипации,  $x$  – продольная координата ступицы. При нулевом значении идентификатора  $x_t$  сила блокирует продольное смещение колеса. При нулевых значениях идентификаторов  $k_x$ ,  $d_x$  колесо может свободно двигаться в продольном направлении.

В стандартных тестах с колесом изменение идентификатора  $x_t$  используется для определения жесткости шины в продольном направлении.

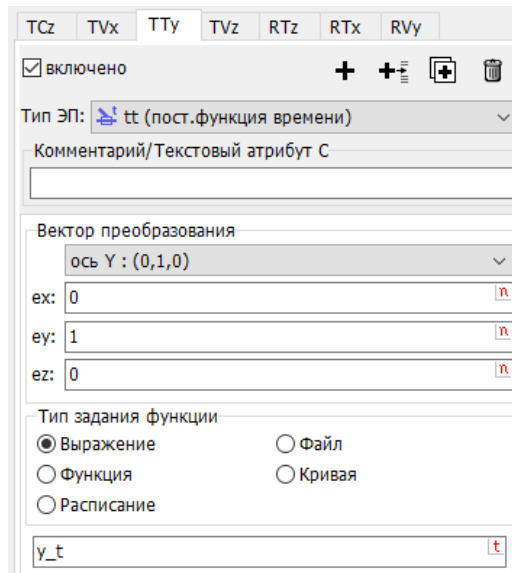


Рис. 33.20. Третье ЭП: TTy – смещение в поперечном направлении как функция времени

### 3) TTy – смещение вдоль оси Y как функция времени

Данное ЭП реализует смещение ступицы в поперечном направлении в соответствии с законом, заданным идентификатором  $y_t$ . В *стандартных тестах* с колесом изменение идентификатора  $y_t$  используется для определения жесткости шины в поперечном направлении.

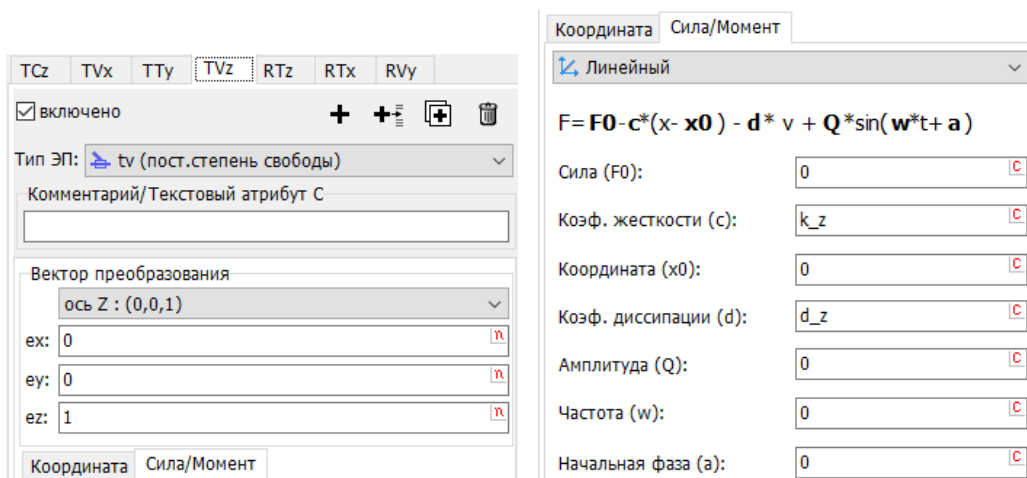


Рис. 33.21. Четвертое ЭП: TVz – степень свободы в вертикальном направлении

### 4) TVz – степень свободы в направлении оси Z

Вертикальная степень свободы используется для реализации заданной нагрузки на шину, параметризованной идентификатором *tireload*. Линейная шарнирная сила вводит упруго-диссипативную силу с коэффициентами жесткости и демпфирования, заданными идентификаторами  $k_z$ ,  $d_z$ , рис. 33.21. Ненулевое значение коэффициента жесткости используется исключительно для блокировки вертикальной степени свободы, необходимой при расчете частот и при построении редуцированных моделей. В остальных случаях следует задать нулевое значение этому идентификатору. Коэффициент диссипации обычно имеет ненулевое значение, кроме теста со свободным падением и отскоком колеса при

анализе степени демпфирования модели шины, п. 33.3.13.3 *Оценка внутреннего демпфирования по коэффициенту восстановления при отскоке.*

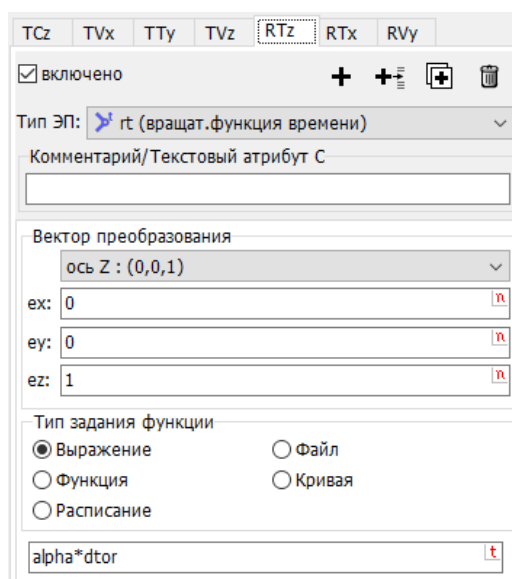


Рис. 33.22. Пятое ЭП: RTz – поворот вокруг вертикальной оси как функция времени

**5) RTz – поворот колеса вокруг оси Z**

Угол поворота вокруг вертикальной оси задан идентификатором *alpha* в градусах, рис. 33.22. Стандартный идентификатор dtor= $\pi/180$  переводит градусы в радианы. Поворот используется в тестах, главным образом, для задания бокового увода шины.

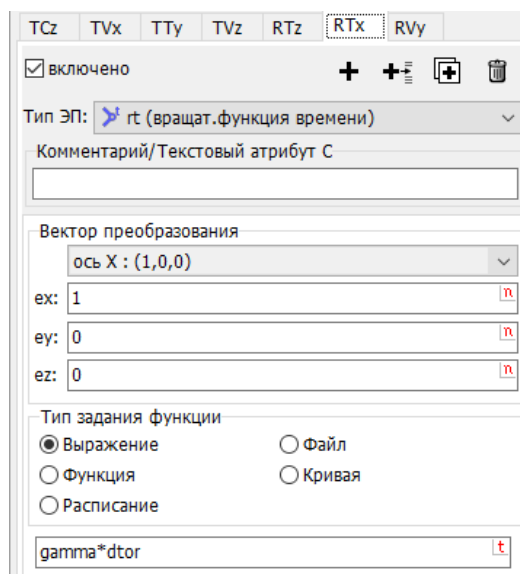


Рис. 33.23. Шестое ЭП: RTx – поворот вокруг продольной оси как функция времени

**6) RTx – поворот колеса вокруг оси X**

Угол поворота вокруг продольной оси задан углом развала идентификатором *gamma* в градусах, рис. 33.23. Стандартный идентификатор dtor= $\pi/180$  переводит градусы в радианы.

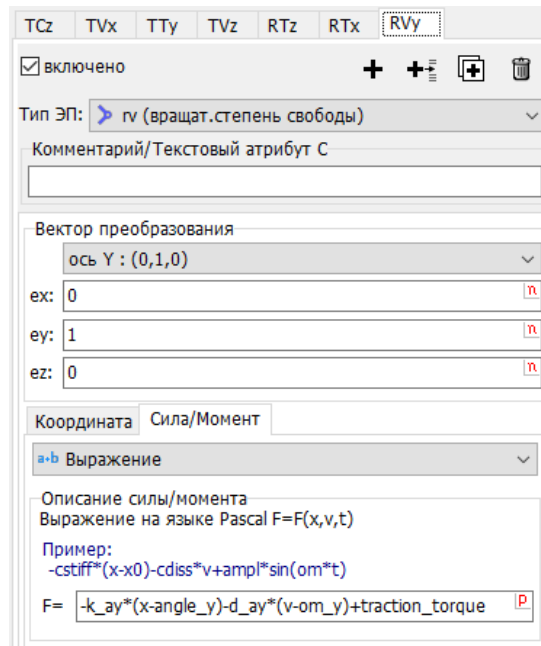


Рис. 33.24. Седьмое ЭП: TRy – степень свободы, соответствующая вращению колеса

**7) RVy – степень свободы – вращение вокруг оси колеса**

Особенности использования данной степени свободы определяются шарнирным моментом (рис. 33.24)

$$-k_{ay}*(x-angle_y)-d_{ay}*(v-om_y)+traction\_torque$$

Данное выражение определяет линейный упруго-диссипативный момент с коэффициентами жесткости  $k_{ay}$  и демпфирования  $d_{ay}$ , а также тяговый момент, заданный идентификатором  $traction\_torque$ .

Шарнирный момент позволяет реализовать следующие режимы вращения колеса:

- Свободное вращение, в том числе под действием тягового момента  $traction\_torque$ . В этом режиме идентификатору жесткости  $k_{ay}$  следует задать нулевое значение, а идентификатор  $d_{ay}$  (при нулевом  $om_y$ ) приблизительно определяет установившуюся угловую скорость  $traction\_torque/d_{ay}$ .
- Блокировка вращения колеса, идентификаторы  $angle_y$ ,  $om_y$ ,  $traction\_torque$  нулевые, коэффициенты жесткости и диссипации – ненулевые. Такой режим применяется при расчете частот и построении редуцированных моделей шины.
- Режим вращения колеса, заданного зависимостью угловой скорости от времени. Угловая скорость задана идентификатором  $om_y$ , а угол поворота – идентификатором  $angle_y$ . Поскольку угол поворота равен интегралу по времени от угловой скорости, то к списку переменных модели добавлена переменная  $angle\_y\_t$ , равная интегралу от идентификатора  $om_y$ , рис. 33.25. В некоторых тестах, описанных ниже, эта переменная в программе моделирования назначается идентификатору  $angle_y$  с помощью инструмента управления идентификаторами.

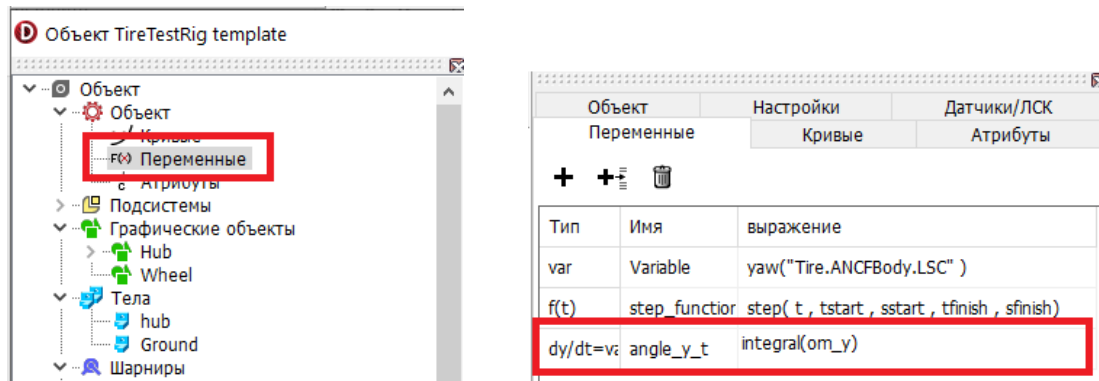


Рис. 33.25. Список переменных модели колеса

### 33.3.1.2.2. Вспомогательное тело Ground

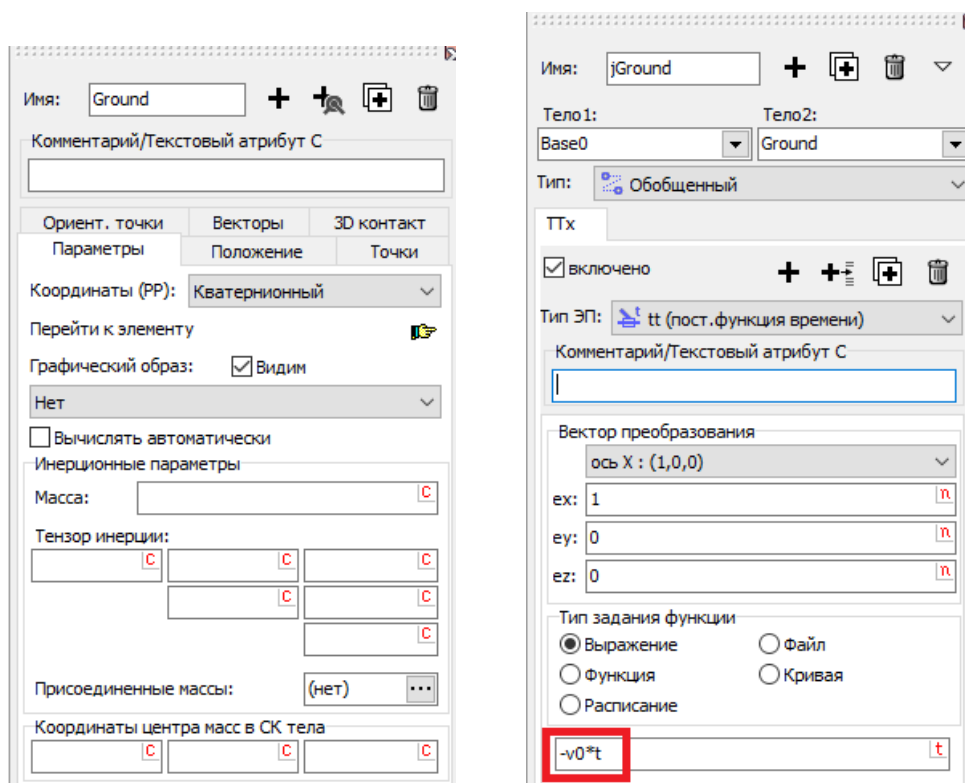


Рис. 33.26. Вспомогательное тело Ground

Вспомогательное тело **Ground** обязательно должно присутствовать в модели шаблона (испытательного стенда). Это тело имитирует вращающийся каток (ролик) испытательного стенда. Для этого тела не задаются инерционные параметры и графический образ, рис. 33.26. слева. Шарнир на рис. 33.26 справа вводит движение тела вдоль оси X при ненулевой скорости, заданной идентификатором  $v0$ . При положительном задании скорости движение направлено против оси X. Контактное взаимодействие шины в модели шаблона осуществляется с телом **Ground**. При движении этого тела колесо начинает вращаться, хотя ось колеса не движется в продольном направлении, как и в случае испытательного стенда.

### 33.3.1.3. Соединение колеса со ступицей

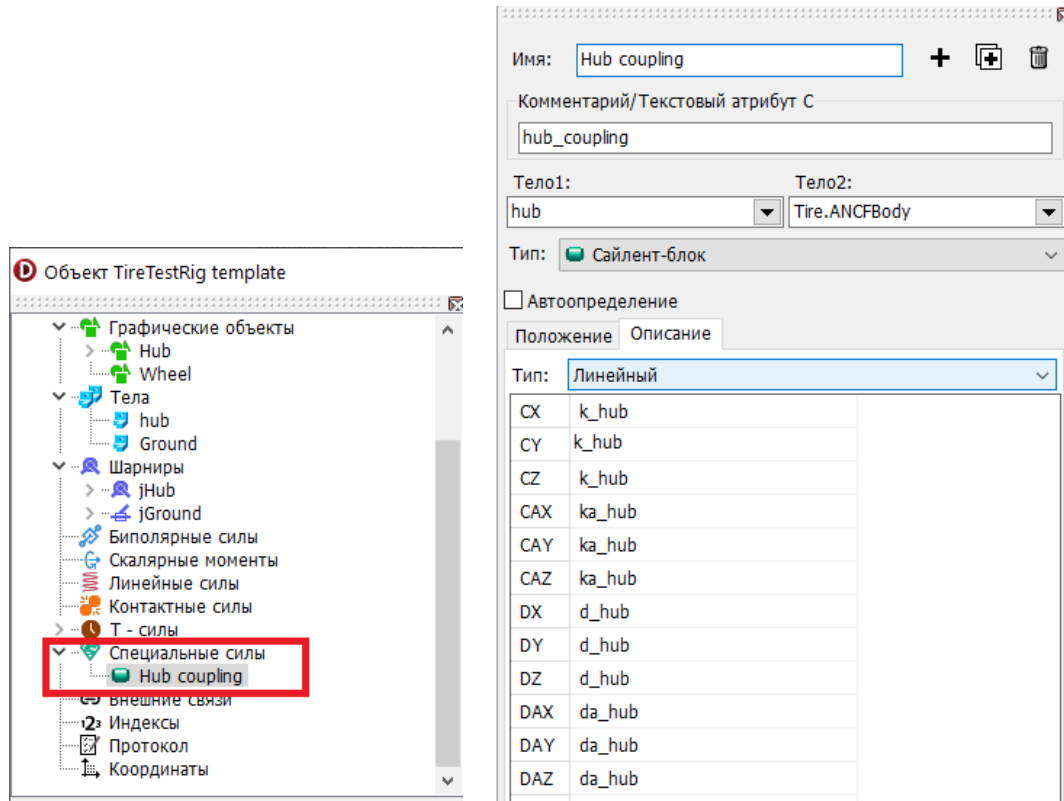


Рис. 33.27. Соединение колеса со ступицей

Для прикрепления колеса к ступице используется специальный силовой элемент **Hub coupling**, имеющий тип сайлент-блок, рис. 33.27. Коэффициенты жесткости и диссипации заданы идентификаторами.

### 33.3.1.4. Нагрузка на колесо

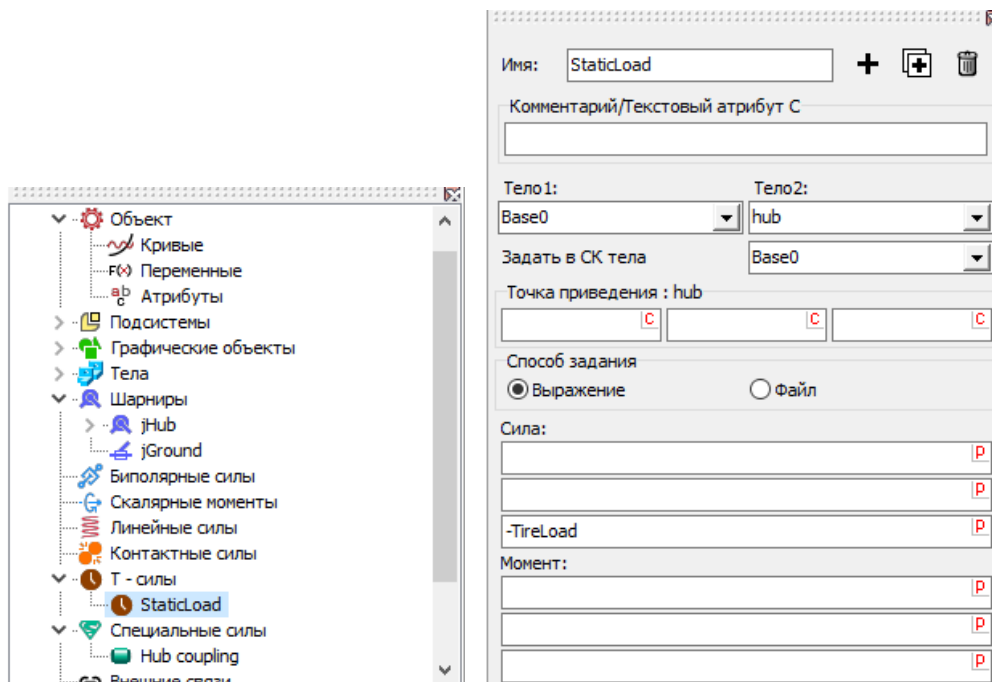


Рис. 33.28. Задание нагрузки на колесо

Вертикальная нагрузка на колес задается Т-силой **StaticLoad** и параметризована идентификатором *tireload*. Данная вертикальная сила приложена к ступице.

### 33.3.1.5. Список идентификаторов

Список содержит все идентификаторы, перечисленные выше, а также некоторые вспомогательные идентификаторы, которые используются в программе моделирования, в том числе для параметризации материала шины. Вспомогательные идентификаторы будут рассмотрены ниже, см. п. 33.3.13 *Основные тесты для исследования свойств шины*.

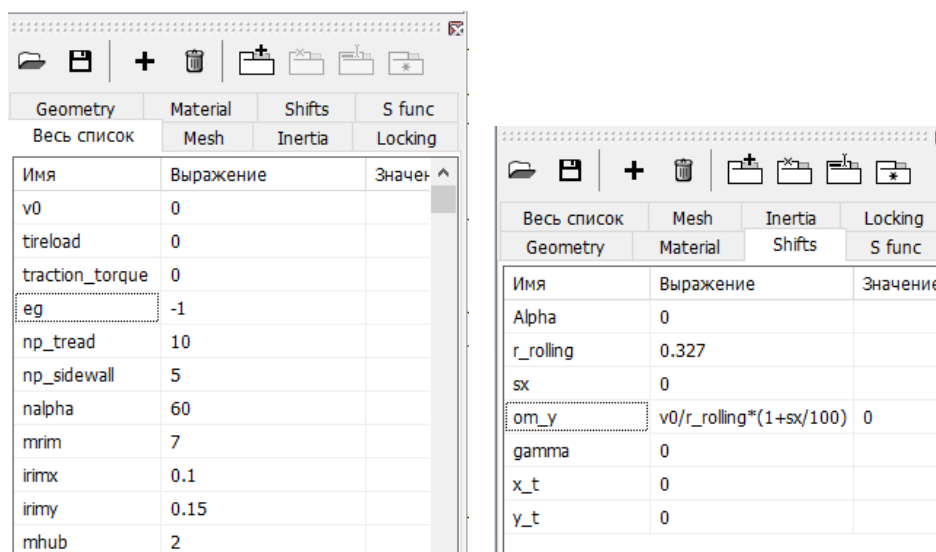


Рис. 33.29. Список идентификаторов

Для удобства использования отдельные идентификаторы включены в группы по типу использования. Например, на рис. 33.29 справа показана группа идентификаторов, отвечающих за положение и вращение ступицы, боковой увод (*alpha*) и продольное скольжение шины (*sx*).

**Замечание.** При создании модели шины рекомендуется переименовать идентификаторы, имеющие отношение к геометрическим размерам и инерционным параметрам шины (например, *rwheel*, *mrin* и другие) и конечно-элементной разбивке (*nalpha*). Это упростит использование сохраненных конфигураций тестов (п.33.3.13.1.4 *Использование заранее созданных конфигураций*), поскольку при чтении файла параметров данные идентификаторы будут изменены на значения для другой шины, а это приведет к необходимости дополнительной корректировки.

### 33.3.1.6. Список переменных

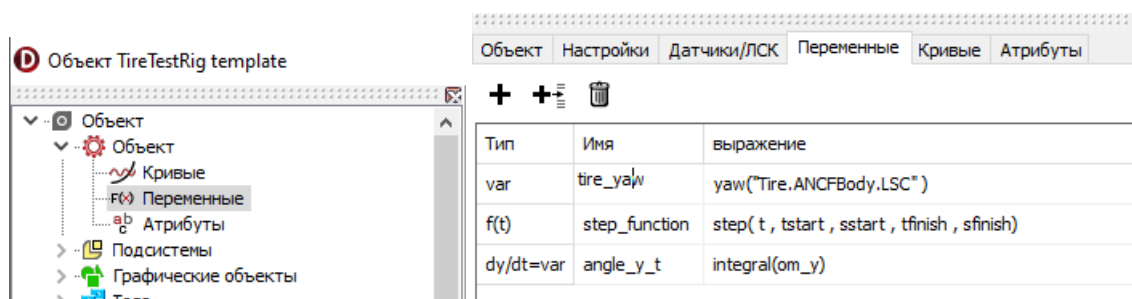


Рис. 33.30. Список переменных

Список включает следующие переменные.

**tire\_yaw** – кинематическая функция, принимающая при моделировании значение угла поворота шину вокруг вертикальной оси – угол бокового увода в радианах.

**step\_function** – функция времени для плавного перехода от одного численного значения к другому  $step(x, x_0, h_0, x_1, h_1)$ , рис. 33.31; функция параметризована четырьмя идентификаторами, вынесенными на отдельную вкладку; функция используется в тестах для управления идентификаторами, см. п. 33.3.13 *Основные тесты для исследования свойств шины*.

**angle\_y\_t** – интеграл по времени от идентификатора *om\_y*; используется для автоматического расчета угла вращения шины при задании ее угловой скорости, см. п. 33.3.13.7 *Зависимость продольной силы от проскальзывания*.

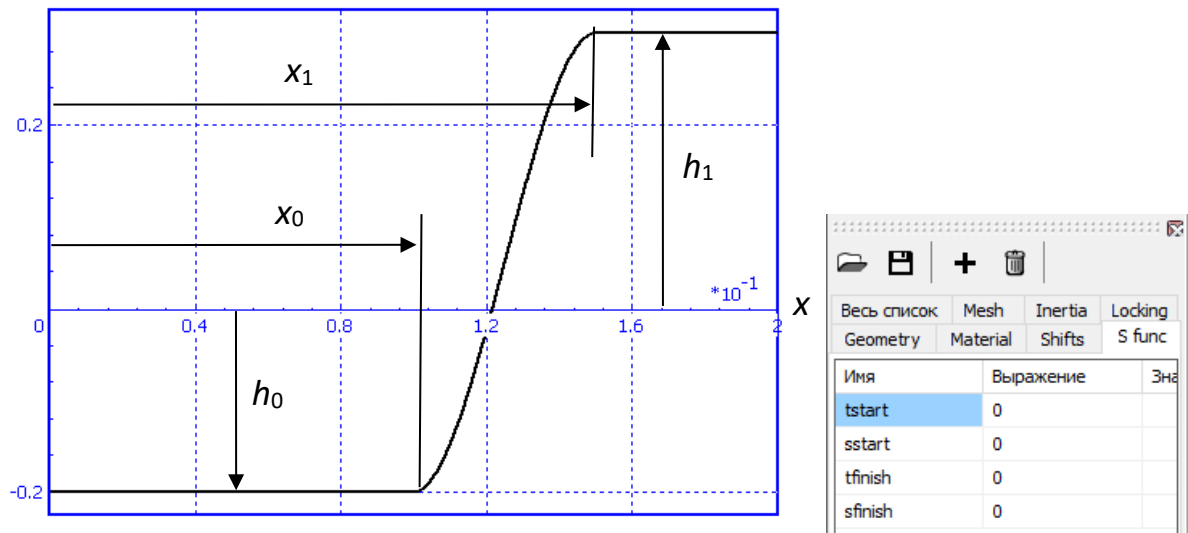


Рис. 33.31. Функция Step и вкладка идентификаторов

### 33.3.1.7. Создание файла модели колеса для базы данных

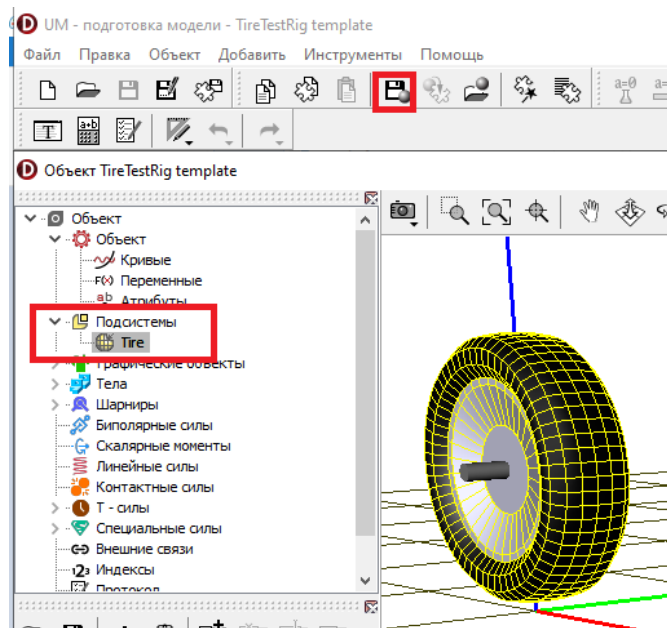



Рис. 33.32. Создание файла с основными элементами упругого колеса

Для разработанной модели шины рекомендуется создать файл, содержащий основные элементы шины. Этот файл включается в базу данных, позволяет упростить и ускорить процесс добавления упругих шин в модель колесной машины, п. 33.4.3 *Добавление колес с упругими шинами к моделям колесных машин*. Выполните следующие действия.

- Откройте шаблон упругого колеса в программе ввода.
- Перейдите на вкладку подсистемы упругого колеса, рис. 33.32.
- С использованием кнопки  на панели инструментов или команды меню **Правка | Копировать в файл** сохраните подсистему в файл [Имя подсистемы].sbs в каталог шаблона. Этот файл содержит следующие элементы:  
- подсистему упругой колесной пары;

- графический образ колесного диска;
- силовой элемент, который будет использован для соединения ступицы с соответствующим колесом модели колесной машины, п. 33.4.3 *Добавление колес с упругими шинами к моделям колесных машин.*
- идентификаторы, параметризующие перечисленные элементы.

### 33.3.2. Структура инструмента задания параметров и исследования свойств шины в программе моделирования

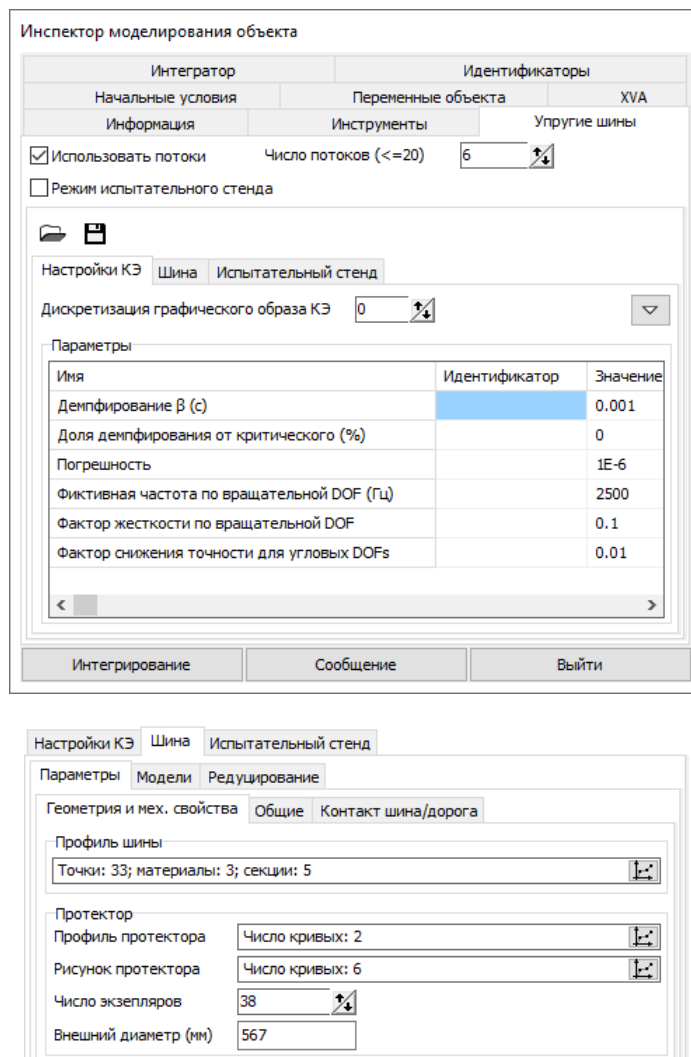


Рис. 33.33. Вкладки инструментов создания и анализа модели шины

После того, как создан шаблон модели конкретной шины, следует открыть его в программе моделирования. Основные инструменты задания параметров и исследования свойств шины находятся на вкладке **Упругая шина** Инспектора моделирования объекта, Рис. 33.33. Рассмотрим функции вкладок.

**Настройки КЭ.** Задаются давления, демпфирования шины, некоторые параметры конечно-элементной модели и численных методов.

**Шина | Параметры | Геометрия и мех. свойства** – геометрические и механические свойства. Основной инструмент задания геометрических параметров шины, в том числе протектора, и свойств материала.

**Шина | Параметры | Общие** – задание давления, некоторых инерционных и других параметров.

**Шина | Параметры | Контакт шина/дорога** – параметры контактного взаимодействия протектора с дорогой.

**Шина | Модели.** При наличии редуцированных моделей задается тип: полная или редуцированная. Описывается геометрия протектора и параметры контакта с дорогой.

**Шина | Редуцирование.** Инструмент создания редуцированных моделей шины (п. 33.3.12 *Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины*).

**Испытательный стенд.** Задаются параметры виртуального испытательного стенда и отображение результатов стандартных виртуальных испытаний шины: зависимости поперечной, продольной силы и восстанавливающего момента от соответствующих скольжений и т.д.

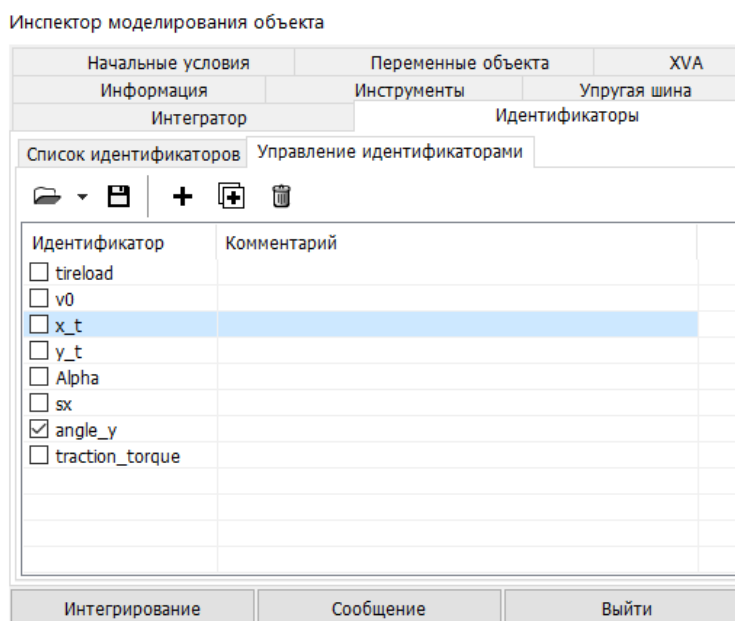


Рис. 33.34. Инструмент управления идентификаторами

Вкладка **Идентификаторы | Управление идентификаторами** является важным инструментом включения различных режимов тестирования шины: зависимости от времени бокового, продольного сдвига, бокового увода, нагрузки, скорости и т.д.

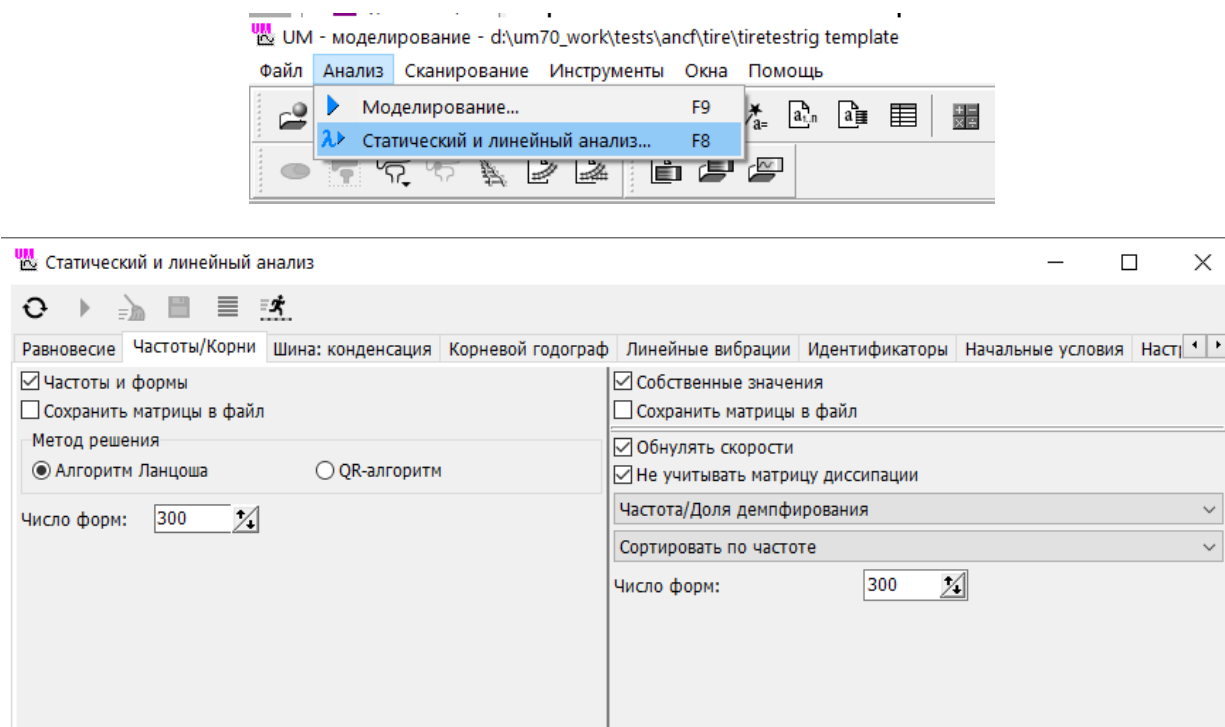


Рис. 33.35. Расчет частот и собственных значений шины

Расчет частот шины и собственных значений (для оценки демпфирования) производится в инструменте статического и линейного анализа, доступного по команде основного меню **Анализ | Статический и линейный анализ**, рис. 33.35.

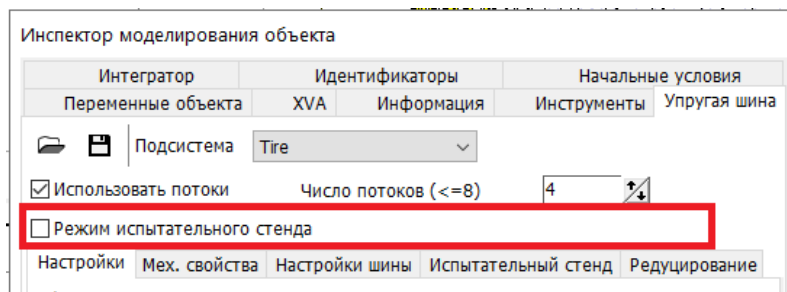


Рис. 33.36. Включение режима испытательного стенда

Моделирование шины производится в двух режимах:

- режим стандартного интегрирования уравнений движения при заданных значениях идентификаторов и остальных параметров;
- режим испытательного стенда, в котором рассчитываются кривые зависимости сил взаимодействия шины с дорогой от проскальзывания, статические жесткости по направлениям и другие показатели. Для включения этого режима используется соответствующий ключ на вкладке **Упругая шина**, рис. 33.36. Основные параметры режима устанавливаются на вкладке **Испытательный стенд**.

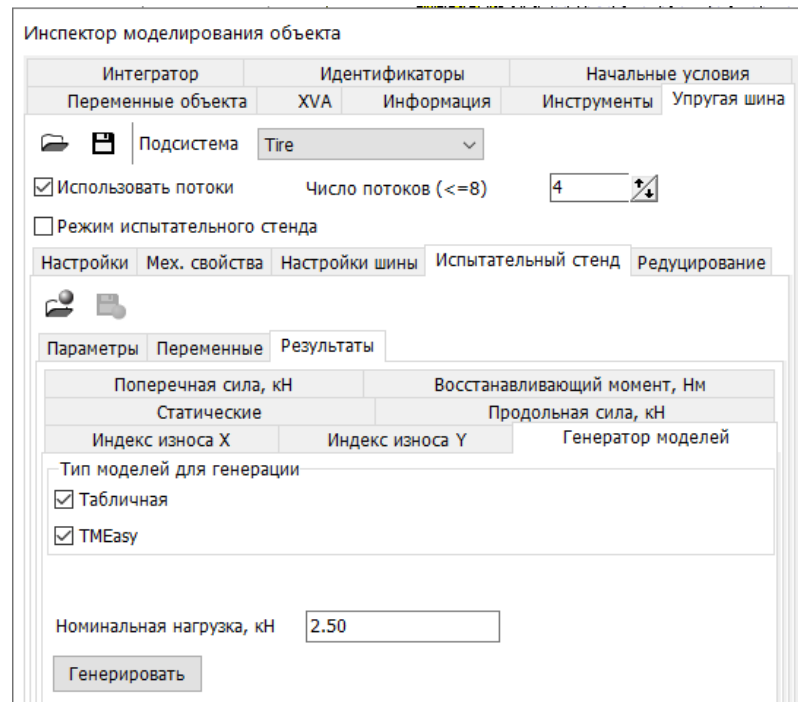


Рис. 33.37. Генератор упрощенных моделей шины

После выполнения расчетов в режиме испытательного стенда становится доступным генератор упрощенных моделей шины (табличной и TMEasy).

### 33.3.3. Задание геометрии шины и многослойного материала

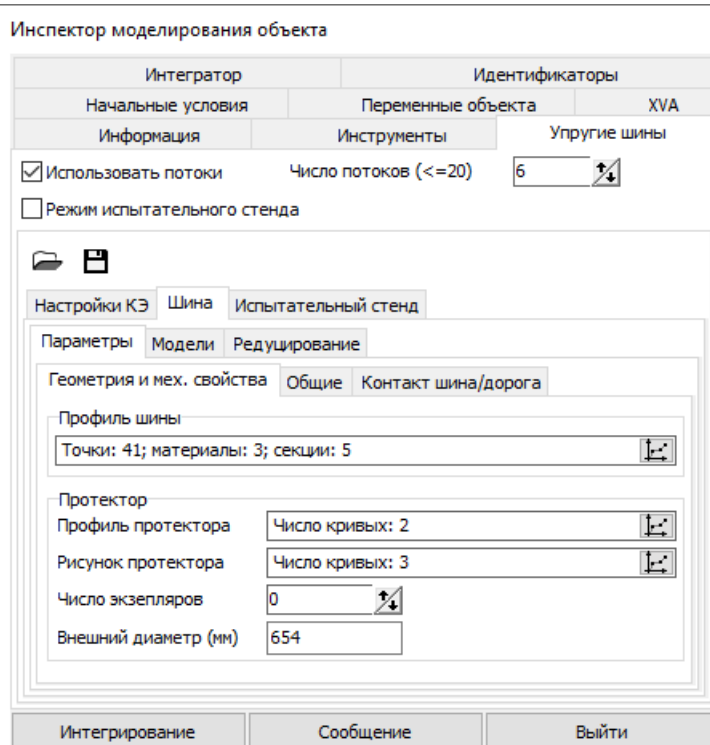


Рис. 33.38. Вкладка задания геометрии и материала

Для задания геометрии шины и материала используется вкладка **Шина | Параметры | Геометрия и мех. свойства**, рис. 33.38.

#### 33.3.3.1. Профиль шины и материал

### 33.3.3.2. Задание геометрии протектора

Протектор	
Профиль протектора	Число кривых: 2
Рисунок протектора	Число кривых: 3
Число экземпляров	0
Внешний диаметр (мм)	654

Рис. 33.39. Геометрия протектора

В группе **Протектор** на рис. 33.38, рис. 33.39 задается геометрия протектора: кривые границ и рисунка протектора.

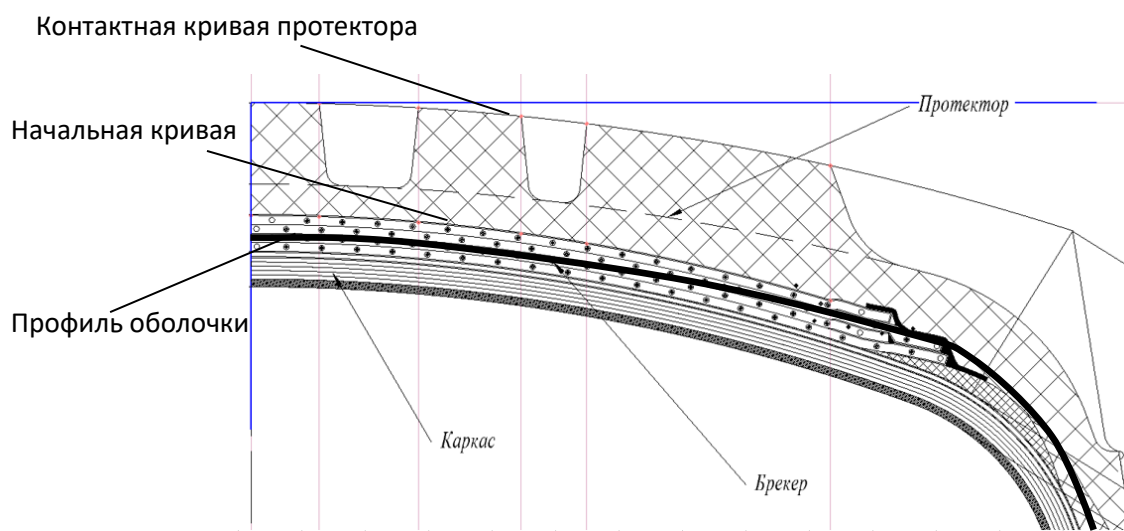



Рис. 33.40. Границы материала протектора

**Профиль протектора.** Задаются две границы материала протектора, рис. 33.40:

- контактная кривая, являющаяся внешней кривой протектора и определяющая контактную поверхность;
- начальная кривая, являющаяся границей брекера.

Кривые задаются с помощью редактора кривых при щелчке на кнопке , рис. 33.41. Координаты точек задаются в метрах. В отличие от рис. 33.40, ось ординат направлена вверх от контактной кривой, так что начальная кривой находится выше контактной. Начало отсчета при задании кривых находится в центре контактной кривой.

Положение контактной кривой относительно оси шины при нулевом внутреннем давлении задается параметром Внешний диаметр: расстояние от центра контактной кривой до центра шины равно половине диаметра.

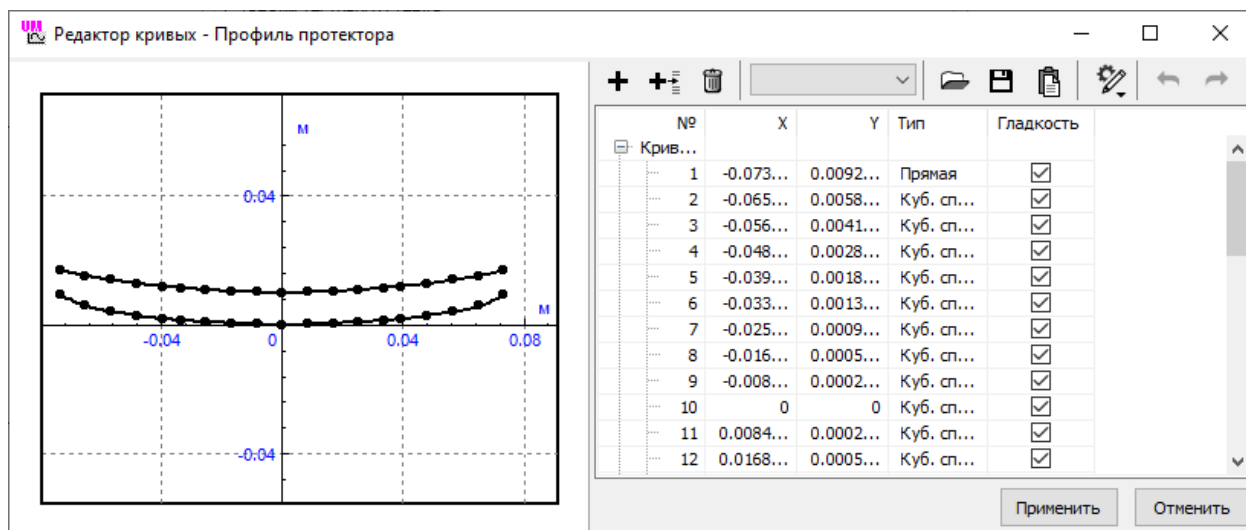


Рис. 33.41. Кривые границы материала протектора

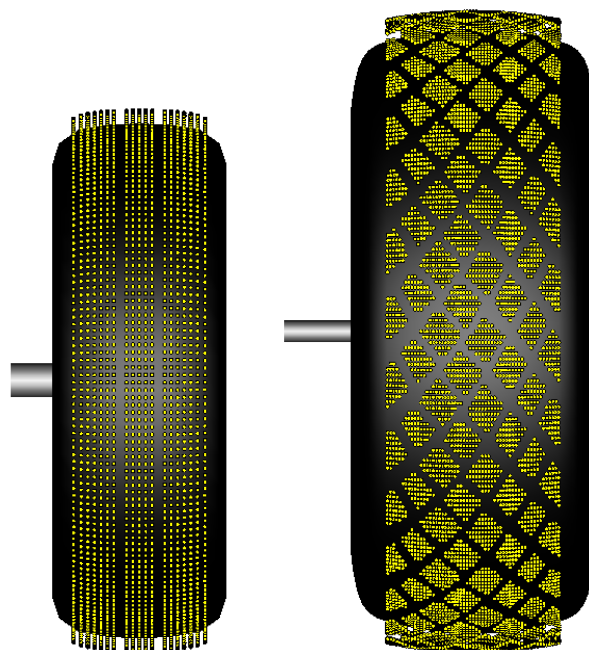


Рис. 33.42. Примеры двух стилей задания рисунка протектора

**Рисунок протектора.**

Для задания рисунка протектора разработаны два стиля, характерные примеры которых приведены на рис. 33.42.

**Первый стиль** имеет структуру поверхности вращения с пазами, идущими вдоль всей контактной поверхности шины, рис. 33.42, слева. Для задания такого протектора следует указать набор отрезков на оси абсцисс с разрывами, соответствующими пазам, рис. 33.43. Значение параметра **Число повторов** в этом случае должно быть нулевым, как на рис. 33.47.

Второй стиль предполагает периодическую структуру рисунка протектора вдоль поверхности шины, рис. 33.42, справа. Период задается параметром **Число повторов**, в примере на шины на рис. 33.43 это число равно 29. Один период рисунков создается с помощью редактора кривых, рис. 33.44. Для помощи в создании рисунка такого типа в окне

автоматически рисуется прямоугольник, высота которого равна периоду с учетом радиуса оболочки шины.

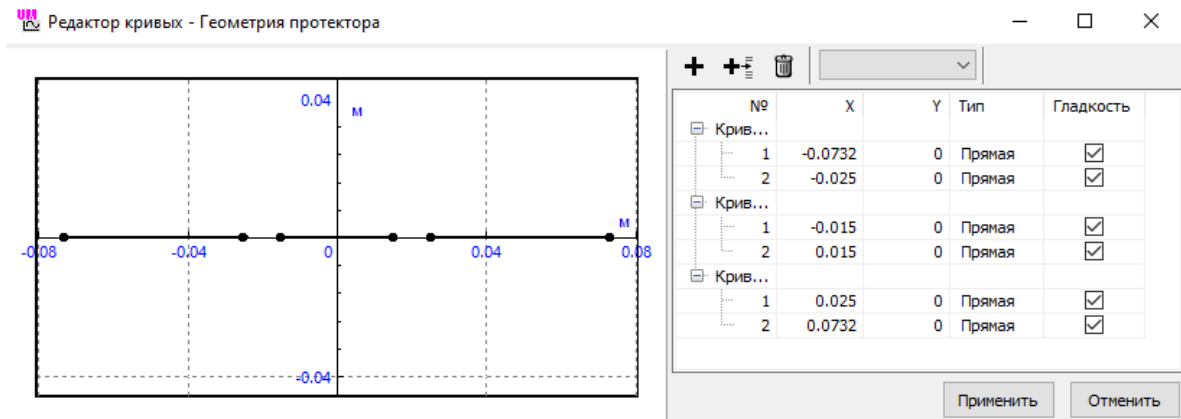


Рис. 33.43. Задание геометрии протектора первого типа

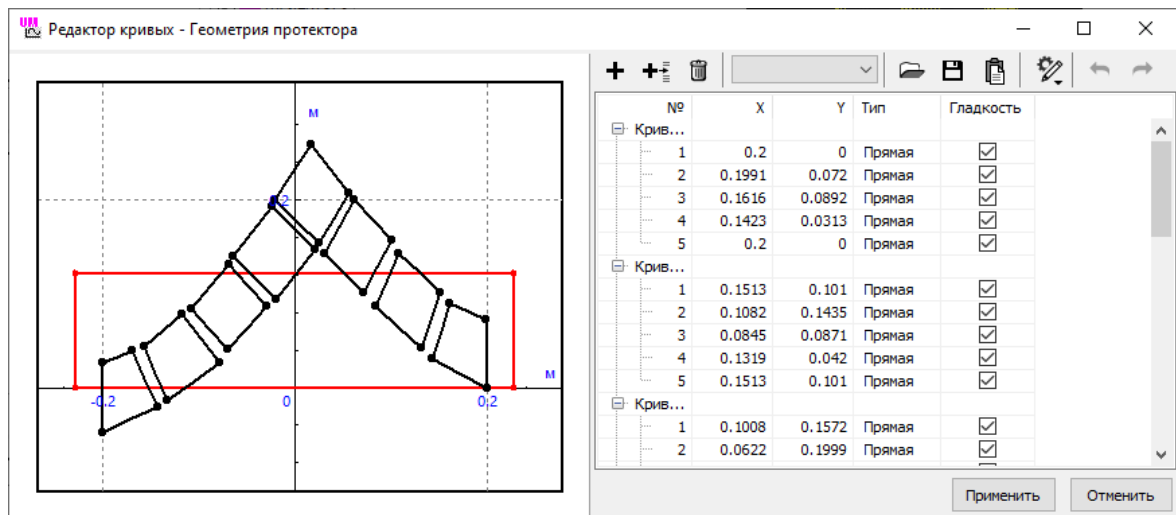


Рис. 33.44. Задание геометрии протектора второго типа

### 33.3.4. Задание параметров конечных элементов

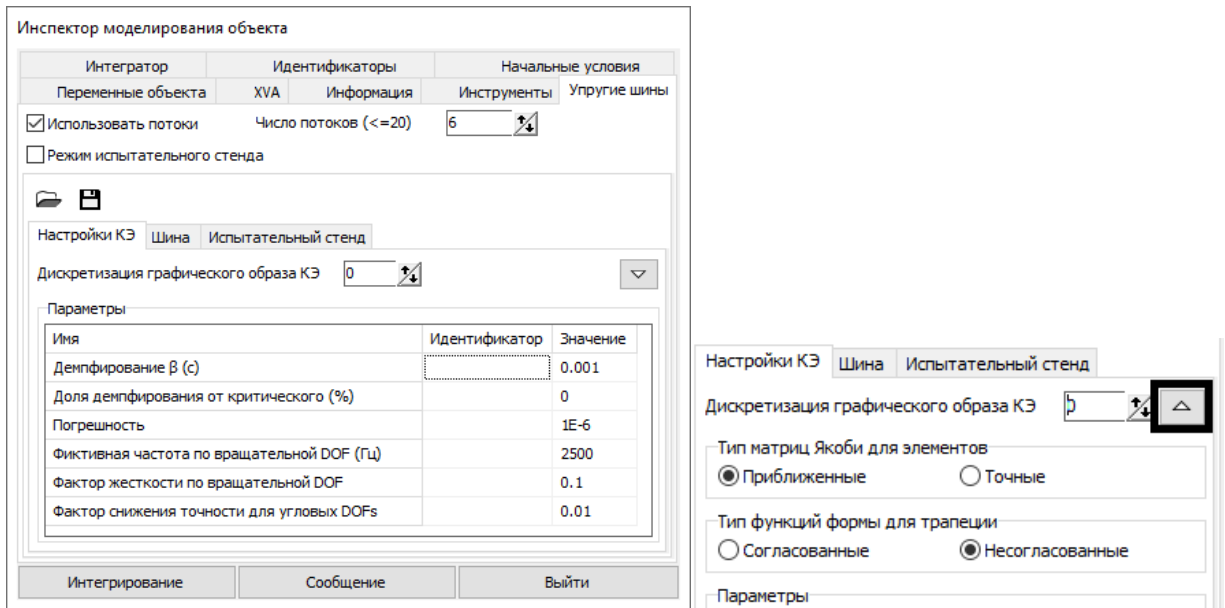



Рис. 33.45. Параметры КЭ шины

Параметры КЭ шины устанавливаются на вкладке Упругая шина | Настройки КЭ, рис. 33.45. Вспомогательные параметры скрыты и доступны по щелчку на кнопке .

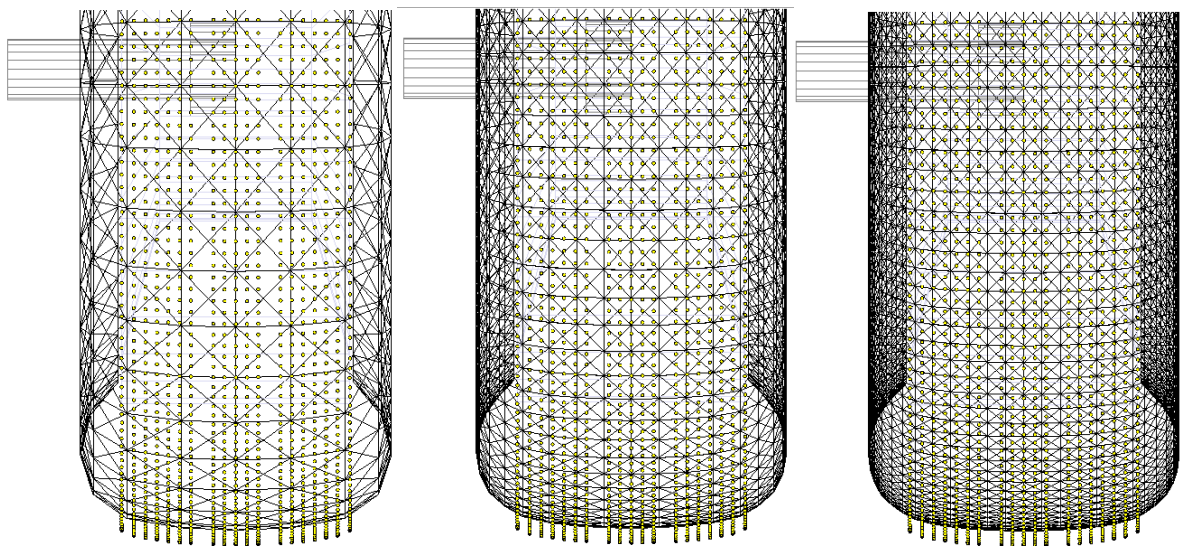


Рис. 33.46. Дискретизация изображение КЭ

Параметр **Дискретизация графического образа КЭ** влияет только на изображение шины в анимационном окне. При нулевом значении параметра трапецидальный КЭ рисуется двумя треугольниками, при значении 1 – восьмью, 2 – восемнадцатью и т.д. Параметр не влияет на механические свойства модели.

В группе **Параметры** представлены параметры модели КЭ, которым могут быть при необходимости назначены идентификаторы.

**Демпфирование  $\beta$ ,  $c$**  – основной параметр внутреннего демпфирования шины, пропорциональный матрице жесткости, см. 33.2.8 *Оценка влияния демпфирования, пропорционального матрице жесткости, на частоты шины.*

**Доля демпфирования от критического (%)** – вспомогательное демпфирование в уравнениях (33.1). Параметр  $\delta$  позволяет установить долю демпфирования от критического в рамках отдельного элемента. Недостатком такого задания демпфирования является его зависимость от разбивки, слабое влияние на высокие частоты. По этой причине не рекомендуется использовать этот параметр без специального исследования для конкретной модели и разбивки шины. Заметное влияние на свойства шины этот параметр оказывает при значениях порядка 100% и выше.

**Погрешность** – задает точность решения уравнений (33.2) при переходе от абсолютных координат узлов к координатам Крейга-Бэмптона в рамках конечного элемента при построении уравнений движения (33.1). Уравнения решаются для каждого КЭ на каждом шаге интегрирования. Увеличение точности влечет за собой замедление процесса моделирования.

**Фиктивная частота (Гц), Фактор жесткости по вращательной DOF** – вспомогательные параметры для формирования невырожденной матрицы жесткости КЭ. Не рекомендуется изменять значения, назначаемые по умолчанию.

**Фактор снижения точности для углов** – понижает влияние угловых степеней свободы на автоматический выбор шага интегрирования. При значении, меньше 1 позволяет ускорить процесс моделирования за счет приемлемой потери точности. Рекомендуемые значения лежат в интервале [0.01, 1]. При задании пониженной точности требуется сравнение результатов моделирования со значением 1.

Два дополнительных параметра (по умолчанию - скрытых):

**Тип матриц Якоби для элементов** – определяет метод решения уравнений (33.2).

**Тип функций формы для трапеции** – задает выбор функций форм для КЭ.

Рекомендуется использовать заданные значения этих параметров.

### 33.3.5. Настройки контакта шины с дорогой

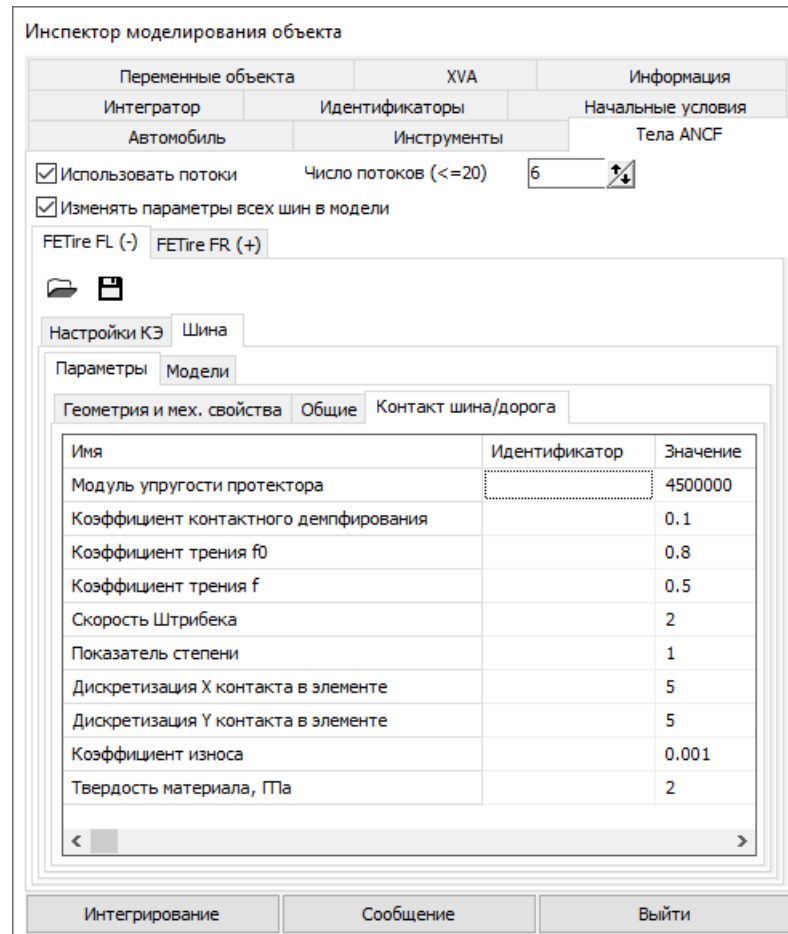


Рис. 33.47. Настройки контакта шины с дорогой

#### Список параметров контакта

Задаются параметры щеточной модели контакта шины с дорогой, см. п. 33.2.5 *Контактное взаимодействие шины с дорогой*.

**Модуль упругости протектора** – параметр материала, из которого изготовлен протектор, Па;

**Коэффициент Пуассона протектора** – безразмерный параметр материала, из которого изготовлен протектор;

**Сдвиг начальной кривой протектора (мм)** – значение параметра  $\Delta$  на рис. 33.40, определяющего положение начальной кривой протектора;

**Коэффициент контактного демпфирования** – коэффициент линейного демпфирования для каждой щетинки  $d_n = d_\tau$ , входящие в модели контактных сил (33.5), (33.6), Нс/м;

Следующие четыре параметра задают модель Штрибека для зависимости коэффициента трения от скорости (33.7)

$$f(v_s) = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-(v_s/v_{str})^\delta}$$

**Коэффициент трения  $f_0$**  – коэффициент трения покоя  $f_0$ ;

**Коэффициент трения  $f$**  – коэффициент трения при большой скорости проскальзывания  $f_\infty$ ;

**Скорость Штрибека  $v_{str}$ ;**

**Показатель степени  $\delta$ .**

Два параметра определяют число рядов щетинок в продольном и поперечном направлениях для одного КЭ, потенциально контактирующего с дорогой,

**Дискретизация X контакта в элементе ( $n_x$ )**

**Дискретизация Y контакта в элементе ( $n_y$ )**

Таким образом, максимальное число щетинок для КЭ  $(n_x + 1)(n_y + 1)$  однако фактическое число может быть меньше из-за пазов и каналов в геометрии протектора.

Следующие два параметра используются при расчете износа шины, п. 33.4.8.1 *Математическая модель износа*:

**Коэффициент износа:** безразмерный коэффициент износа  $k$ ;

**Твердость материала:**  $H$ ;

### 33.3.6. Задание численного значения давления в шине

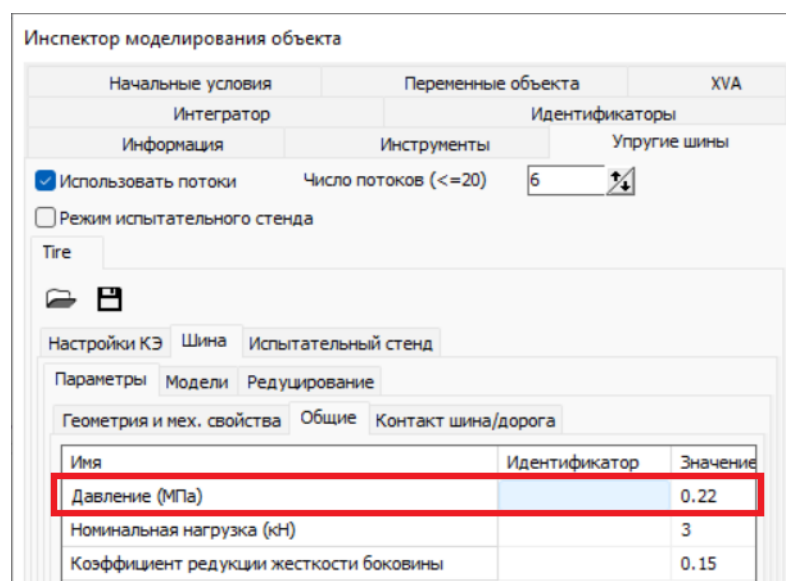


Рис. 33.48. Задание давления в шине

Внутреннее давление в шине надается на вкладке **Шина | Параметры | Общие**. Численное значение давления задается в мегапаскалях, рис. 33.48.

### 33.3.7. Задание фактора ослабления жесткости модели шины с редуцированной боковой частью

На вкладке на рис. 33.48 можно также задать параметры ослабления жесткости шины с редуцированной боковой частью: номинальную нагрузку и фактор ослабления жесткости, см. п. 33.2.7 *Редуцированные модели шины*. Расчет фактора описан в п. 33.3.13.4.4 *Статический тест для оценки параметров модифицированной модели шины с редуцированной*

боковой частью. При нулевом значении фактора используется не модифицированная модель.

### 33.3.8. Настройки численных методов при моделировании колес с упругой шиной

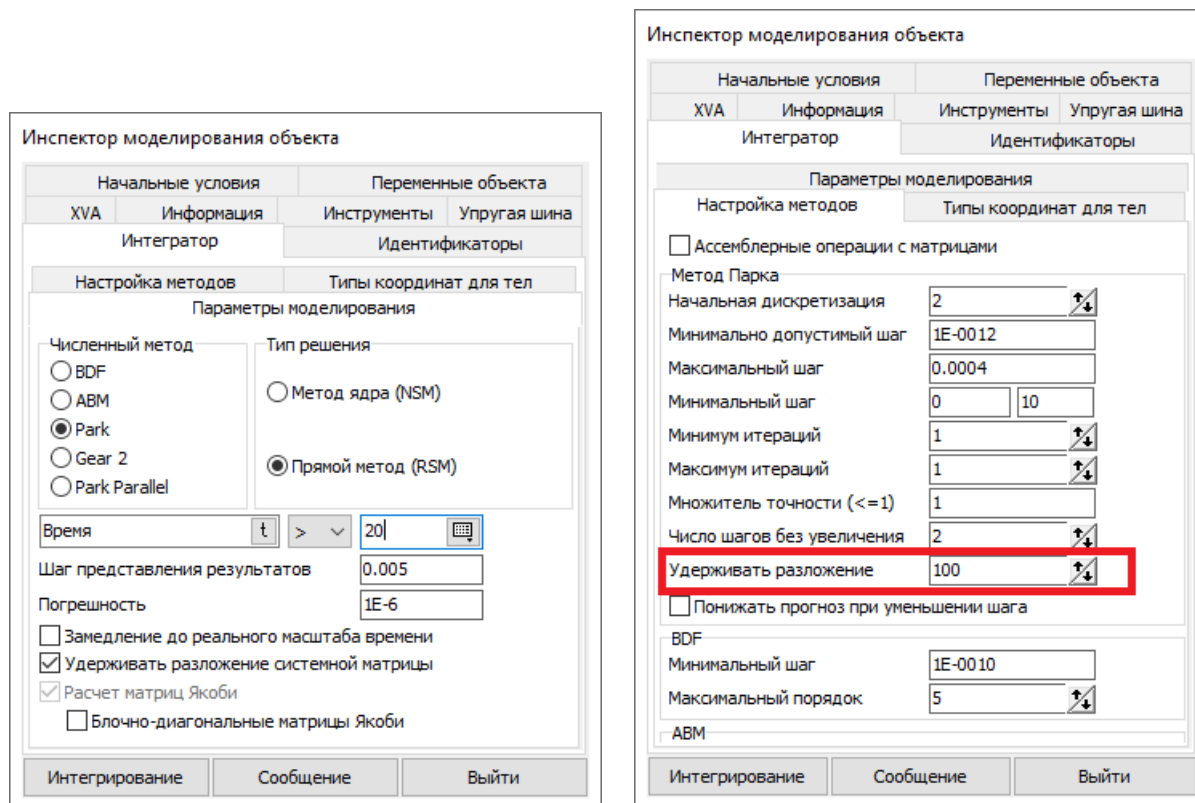


Рис. 33.49. Настройки численных методов

Типичные настройки численных методов представлены на рис. 33.49, слева. Важными является **включенная** настройка

**Удержание разложения системной матрицы** – значительно (до десяти раз) ускоряет процесс моделирования путем использования системной матрицы и ее разложения на нескольких шагах интегрирования. Связанный параметр **Удерживать разложение** (рис. 33.49, справа) задает максимально число шагов интегрирования уравнений движения, на которых удерживается разложение матрицы. Большое значение (порядка 100) рекомендуется использовать для задач с неподвижной шиной. При качании матрицы следует пересчитывать чаще, удерживая 10-20 шагов.

Примерно двукратное ускорения процесса моделирования удается достичь путем **распараллеливания расчетов на многоядерных процессорах**. Включение режима параллельных расчетов и изменение числа задействованных ядер производится на вкладке **Упругая шина**, рис. 33.50 сверху: ключ **Использовать потоки** и поле ввода **числа потоков**. Практика показывает, что наиболее эффективно использовать 4-6 потоков, в зависимости от типа процессора.

Также примерно полутора- двукратное ускорение дает снижение параметра **Фактор снижения точности для углов** от 1 до 0.1. Предельное значение этого параметра 0.01. В

любом случае следует тестировать влияние уменьшения этого параметра на результаты моделирования в силу снижения точности численных методов.

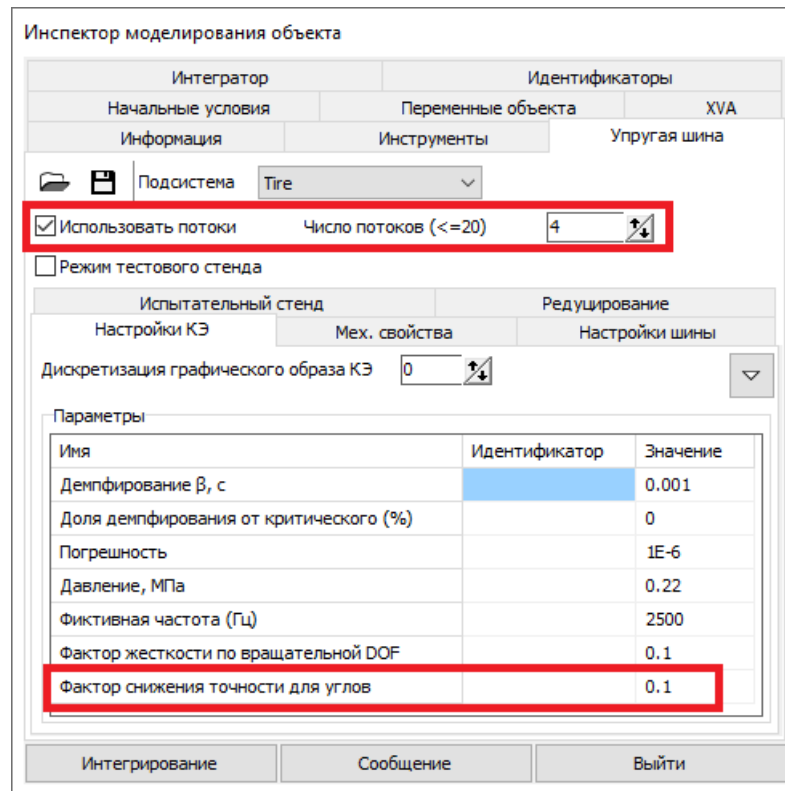


Рис. 33.50. Настройки, влияющие на ускорение процесса моделирования

**Замечание.** В текущей версии недоступно использование метода Park parallel. В последующем это ограничение будет снято.

### 33.3.9. Анимация сил контактного взаимодействия шины с дорожкой

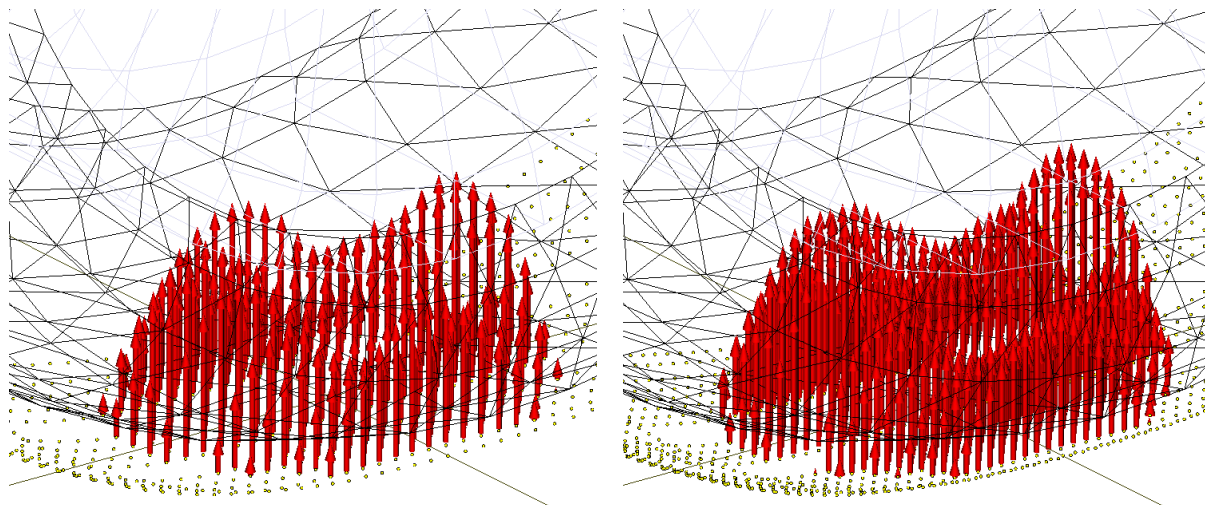


Рис. 33.51. Векторы нормальных сил (фактически – давлений) при различном числе щетинок в пределах элемента

При моделировании динамики упругой шины в анимационном окне могут указываться векторы нормальных сил и сил трения. Для того, чтобы высота векторов сил не менялась при изменении числа щетинок в пределах одного конечного элемента (рис. 33.51), фактически рисуются векторы давлений, т.е. силы делятся на площадь, отнесенную к одной щетинке: площадь КЭ делится на теоретическое число щетинок в пределах КЭ (включая исключенные из контакта из-за пазов, канавок и границ контакта).

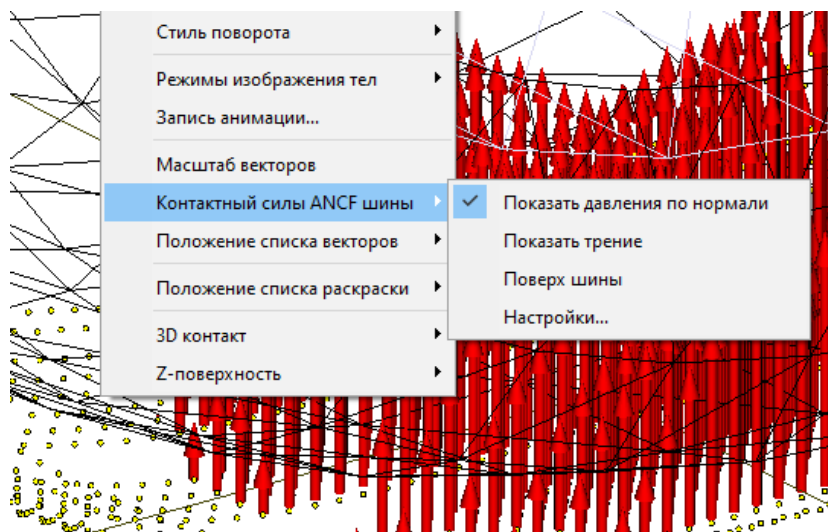


Рис. 33.52. Фрагмент анимационного окна с контекстным меню

Рассмотрим настройки анимации контактных сил, доступные через контекстное меню анимационного окна, рис. 33.52. Перечислим команды меню.

**Показать давления по нормали** – включает/выключает анимацию нормальных сил в контакте.

**Показать трение** – включает/выключает анимацию сил трения в контакте.

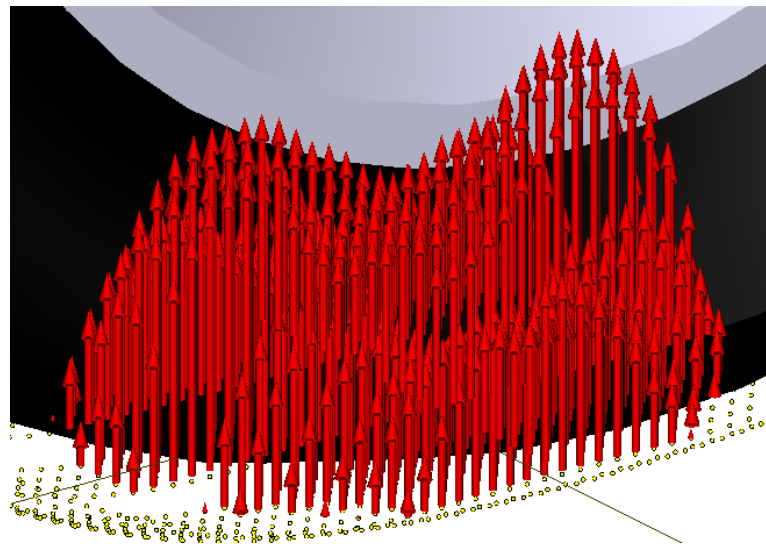


Рис. 33.53. Включенный режим «поверх шины» в режиме полупрозрачной графики

**Поверх шины** – режим, при котором векторы сил показываются поверх графического образа шины. Этот режим рекомендуется в случае, когда шина рисуется в режиме полупрозрачной графики, рис. 33.53, в противном случае векторы будут скрыты оболочкой и придется переводить графический образ шины в каркасную графику, как на рис. 33.52.

**Настройки** – команда окно настроек, рис. 33.54.

На вкладке **Масштаб** указывается величина давления, при которой вектор будет иметь длину, равную характерному размеру (как правило, 1м). На вкладке **Размер** можно изменить радиусы образа вектора и длину стрелки в мм. **Видимость, цвета** – включение и выключение анимации, изменение стиля и цветов векторов. Введенные параметры записываются в файл конфигурации и применяются при повторном чтении модели во всех анимационных окнах.

На рис. 33.56 показаны три варианта настроек анимации:

- показаны нормальные силы и трения,
- только нормальные силы
- только трение.

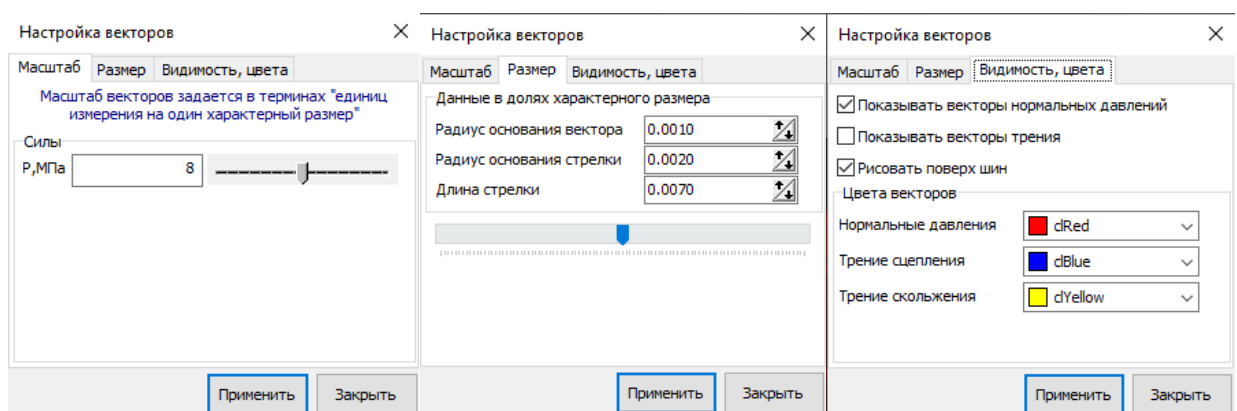


Рис. 33.54. Настройки анимации сил

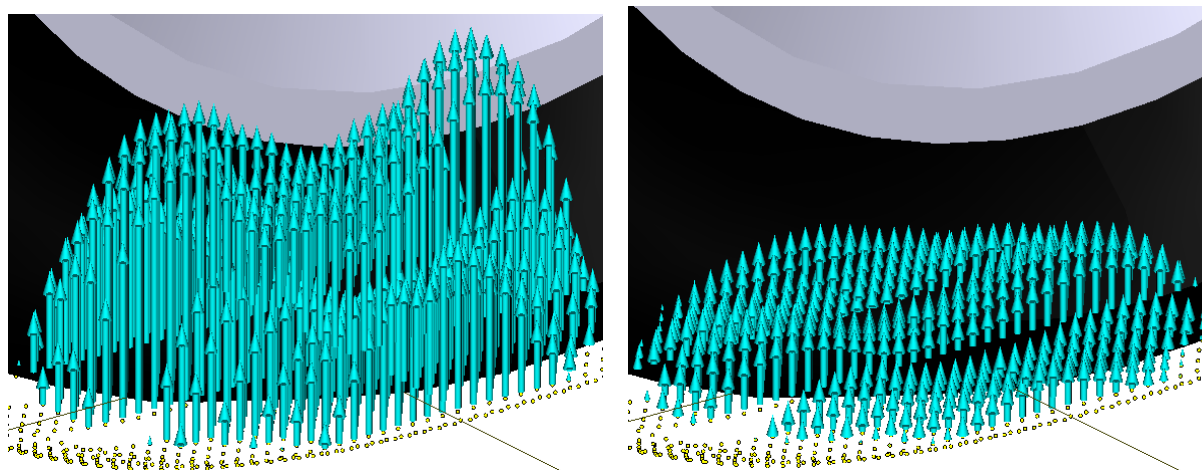


Рис. 33.55. Изменение цвета и масштаба

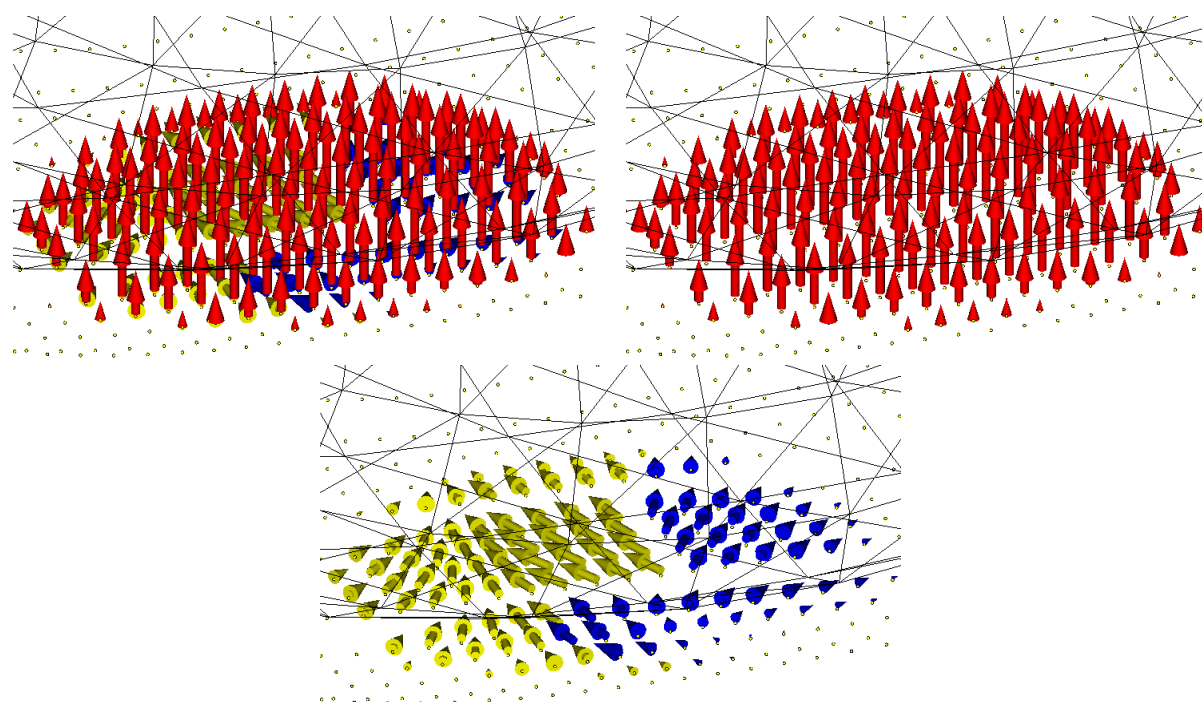


Рис. 33.56. Варианты анимации сил

### 33.3.10. Мастер переменных: узловые переменные шины

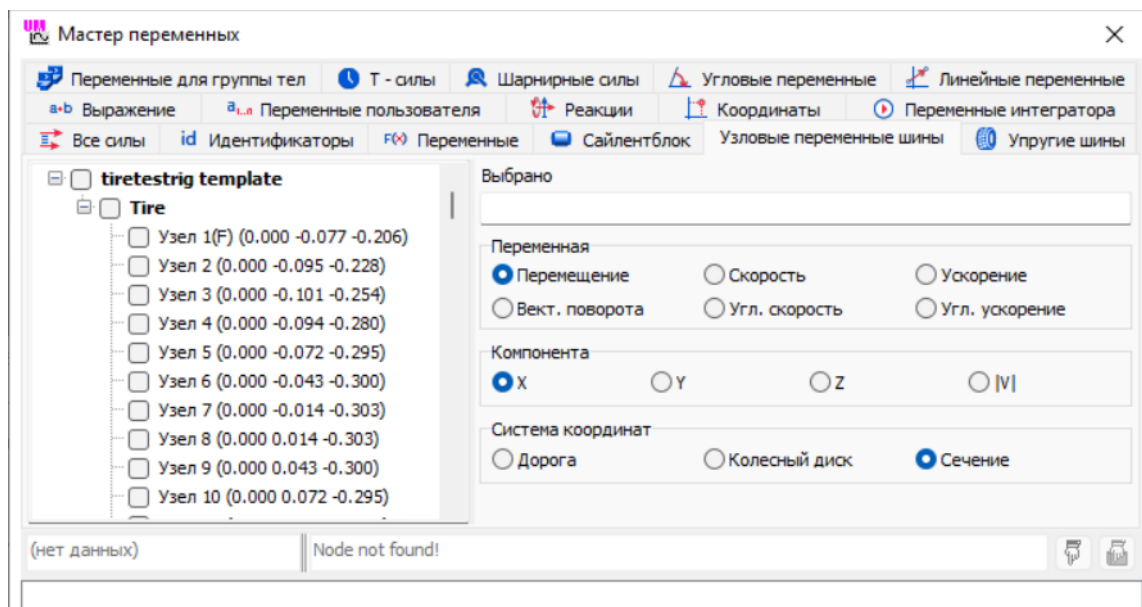


Рис. 33.57. Кинематические узловые переменные

Кинематические переменные узлов шины создаются на вкладке **Узловые переменные** шины мастера переменных, рис. 33.57.

Переменные относятся к **упругим смещениям узлов относительно колесного диска**. Рассчитываются вектор упругого перемещения, скорость и ускорение узла относительно диска, а также вектор поворота, угловая скорость и угловое ускорение СК узла относительно колесного диска (группа **Переменная**). Переменная равна проекции вектора на ось одной из трех систем координат (группа **Система координат**) или модулю вектора. Проекция или модуль вектора задаются в группе **Компонента**.

Используются следующие системы координат:

**Дорога** – инерциальная система координат СК0;

**Колесный диск** – СК колесного диска;

**Сечение** – СК сечения, которому принадлежит узел. СК данного типа вращаются вместе с колесным диском и образуют с ним постоянный угол поворота вокруг поперечной оси Y. В частности, для первого сечения СК сечения совпадает с СК колесного диска. Ось Z сечения проходит через центр колеса.

**Замечание.** Узлы, жестко связанные с колесным диском, помечены в списке на рис. 33.57 буквой F. Эти узлы неподвижны относительно колесного диска, и все переменные для них равны нулю.

### 33.3.11. Мастер переменных: переменные контакта шины с дорогой

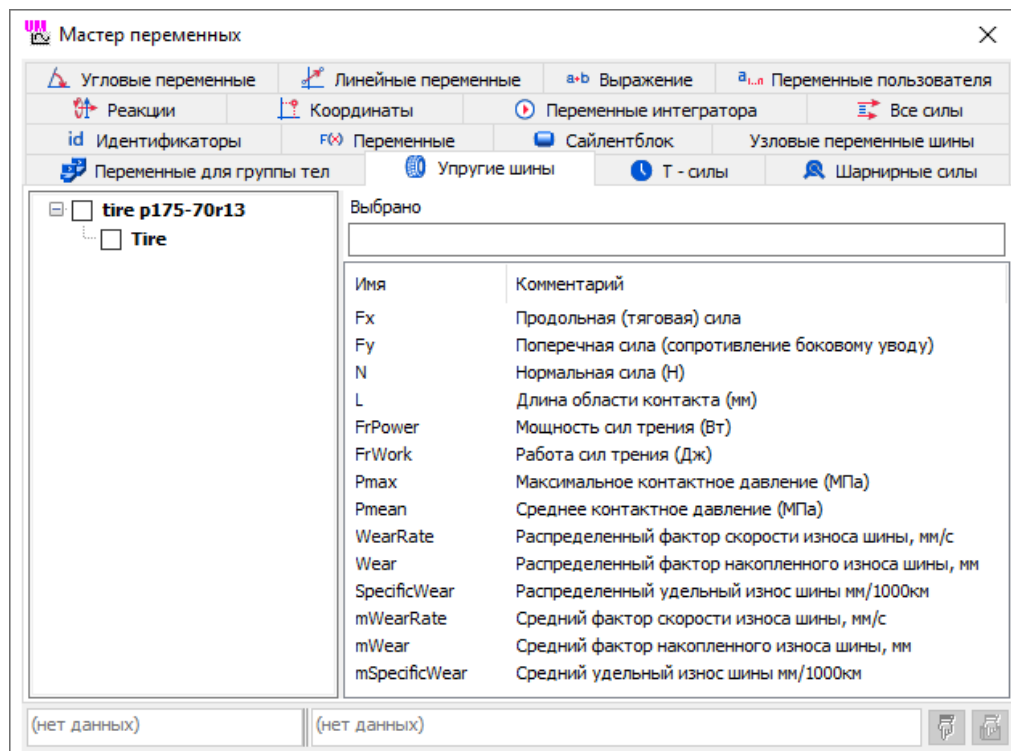


Рис. 33.58. Переменные контакта с дорогой для упругой шины

Переменные, связанные с упругой шиной вынесены на отдельную вкладку **Мастера переменных**, рис. 33.58.

**F<sub>x</sub>** – суммарная поперечная сила, действующая со стороны дороги на шину (Н).

**F<sub>y</sub>** – суммарная продольная сила, действующая со стороны дороги на шину (Н).

**N** – суммарная нормальная сила, действующая со стороны дороги на шину (Н).

**L** – длина пятна контакта в продольном направлении, мм.

**FrPower** – суммарная мощность сил трения (ватты), учитываются только щетинки, в которых происходит проскальзывание в контакте с дорогой. В режиме сцепления трение не совершает работы.

**FrWork** – суммарная работа сил трения с момента начала моделирования (джоули); рассчитывается как интеграл по времени от мощности FrPower.

**P<sub>max</sub>**, **P<sub>mean</sub>** – максимальное и среднее нормальное давление шины на дорогу, рассчитывается по всем щетинкам, находящимся в контакте в текущий момент времени. Давление равно силе, отнесенной к площади, приходящей на данную щетинку.

**Wear rate** – кривая скорости износа материала шины, распределенная по окружности катания шины, мм/с.

**Wear** – кривая накопленного износа шины, мм.

**SpecificWear** – кривая распределенного удельного износа шины, мм/1000км.

### 33.3.12. Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины

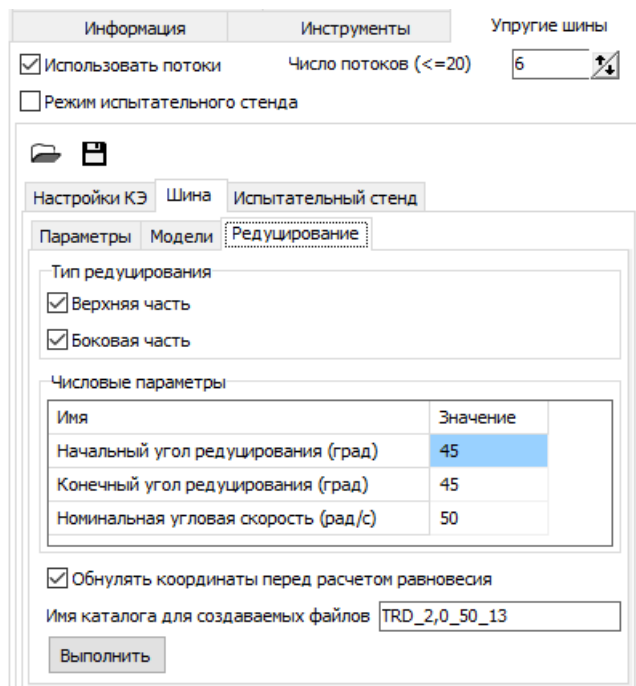


Рис. 33.59. Вкладка создания файлов моделей упругой шины

Для использования моделей упругой шины в исследовании динамики автомобилей и монорельсовых поездов следует создать файл полного описания модели шины \*.tire и опционально – файлы редуцированных моделей \*.tsr, \*.tur. п. 33.2.7 Редуцированные модели шины. Для этой цели служит вкладка **Редуцирование** инспектора моделирования, рис. 33.59.

Расширения файлов редуцированных моделей расшифровываются следующим образом:

- \*.tsr – *t*ire *s*ide *r*eduction – шина с редуцированными боковыми частями;
- \*.tur – *t*ire *u*pper *r*eduction – шина с редуцированной верхней частью.

Рассмотрим процесс создания файлов.

1) Уточните значения параметров, от которых зависит модель:

- давление в шине, п. 33.3.6 *Задание численного значения давления в шине*
- задание материала, п. 33.3.3 *Задание геометрии шины и многослойного материала*
- параметры конечно-элементной разбивки.

Обратите внимания, что параметры демпфирования материала не учитываются при построении редуцированных моделей шины и доступны для изменения при исследовании динамики экипажей.

2) При необходимости измените имя каталога, в который записываются файлы. По умолчанию имя каталога включает (рис. 33.59):

- аббревиатуру TRD – *tire reduction data* – данные редуцированной шины;
- давление в барах (2,2 на рис. 33.59);
- число конечных элементов по окружности шины (50 на рис. 33.59);
- число конечных элементов поперек шины (13 на рис. 33.59).

Созданные файлы размещаются в данном каталоге и имеют такое же имя, например, для каталога TRD\_2,2\_50\_13 имена файлов:

TRD\_2,2\_50\_13.tire, TRD\_2,2\_50\_13.tsr, TRD\_2,2\_50\_13.tur.

3) Настройте параметры редуцирования:

- **Метод редуцирования** – указываются создаваемые редуцированные модели; если не задан ни один тип редуцирования, то создается только файл полного писания модели шины \*.tire;
- **Обнулять координаты перед расчетом равновесия**

При расчете редуцированных моделей шина должна находиться в состоянии равновесия при заданном давлении при отсутствии контактного взаимодействия с дорогой. Если включена опция обнуления координат, то программа определяет равновесное состояние автоматически путем решения нелинейных уравнений равновесия. Если программа не может решить уравнений, то пользователю следует выключить данный режим и рассчитать равновесное состояние шины методом интегрирования уравнений движения: см. п. 33.3.13.2.1 *Расчет равновесия для частотного анализа*, подраздел **Расчет равновесия методом интегрирования**.

- **Числовые параметры**

При необходимости измените числовые параметры:

- начальный и конечный углы редуцирования  $\alpha_{start}$ ,  $\alpha_{end}$ , используемые при редуцировании верхней части шины, п. 33.2.7 *Редуцированные модели шины*;
- номинальная угловая скорость – угловая скорость шины при номинальное скорости движения колесной машины; параметр используется в редуцированных моделях для построения зависимости моделей от сил инерции, связанных с вращением шины.

4) Запустите процесс расчета и после его успешного окончания проверьте наличие созданных файлов. Каталог с заданным именем создается в каталоге текущего объекта. При старте расчета существующий каталог с таким же именем модели автоматически удаляется программой.

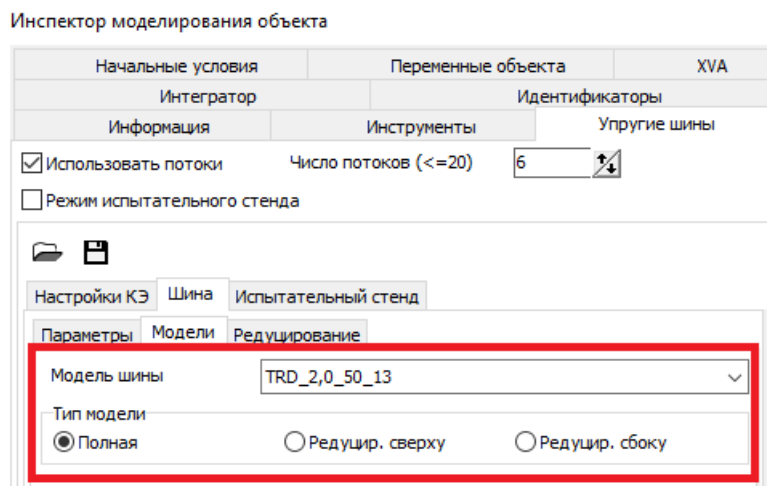


Рис. 33.60. Задание модели шины

Созданные модели шины могут быть назначены для выполнения тестов на вкладке **Модели**, рис. 33.60. Файл описания шины \*.tire загружается с помощью списка **Модель шины**, содержащего все обнаруженные модели в каталоге текущего объекта. После загрузки модели пользователь может задать тип редуцирования при наличии соответствующих созданных ранее файлов.

### 33.3.13. Основные тесты для исследования свойств шины

#### 33.3.13.1. Вспомогательные инструменты

##### 33.3.13.1.1. Макросы идентификаторов

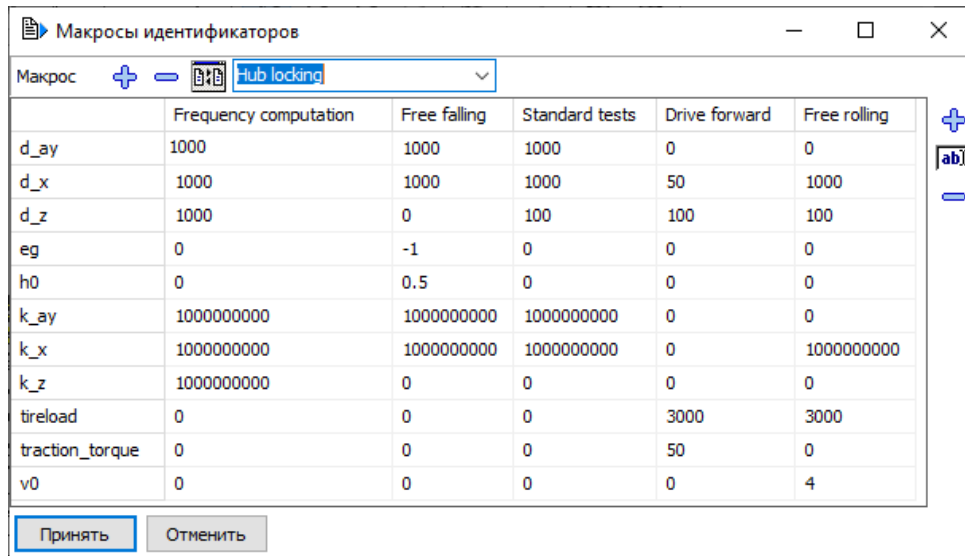



Рис. 33.61. Инструмент создания макросов идентификаторов

Для быстрого изменения значений группы идентификаторов применяется инструмент **Макросы идентификаторов**, рис. 33.61. Инструмент доступен по команде меню **Инструменты | Макросы идентификаторов**. Назначение идентификаторов с помощью макроса происходит на вкладке **Список идентификаторов** щелчком на кнопке , рис. 33.62. После выбора макроса появляется окно подтверждения, в котором можно исключить назначение некоторым идентификатором или отменить полностью. Например, на рис. 33.62 отменено назначение идентификатора *tireload*, которому будет оставлено текущее значение 3000.

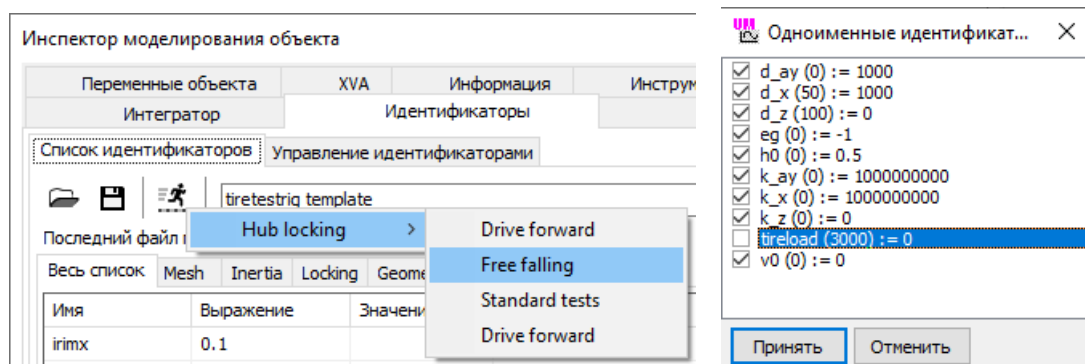


Рис. 33.62. Пример назначение идентификаторов с помощью макроса

Макросы на рис. 33.61 реализуют различные способы закрепления ступицы. Перечислим макросу с пояснениями.

**Frequency computation** – все степени свободы ступицы блокируются силами. Используется в частотном анализе, п. 33.3.13.2 *Расчет частот и собственных значений*.

**Free falling** (свободное падение) – разблокирована только вертикальная степень свободы. Используется в тесте п. 33.3.13.3 *Оценка внутреннего демпфирования по коэффициенту восстановления при отскоке*.

**Standard test** (стандартный тест) – как и в предыдущем макросе, разблокирована вертикальная степень свободы, но оставлено демпфирование по вертикали. Используется в большинстве статических и тестов, описанных ниже.

**Drive forward** (движение вперед) – освобождены три степени свободы ступицы: вертикальная, продольная и вращение вокруг поперечной оси. Используется в тесте, описанном в п. 33.3.13.5 *Качение колеса вперед под действием постоянного момента*. Оставлено демпфирование в продольном направлении для ограничения скорости продольного движения.

**Free rolling** (свободное вращение) – освобождены две степени свободы ступицы: вертикальная и вращение вокруг поперечной оси. Задана ненулевая нагрузка и скорость тела Ground. Используется в тесте п. 33.3.13.6 *Определение эффективного радиуса свободно катящегося колеса*.

### 33.3.13.1.2. Список переменных для тестов

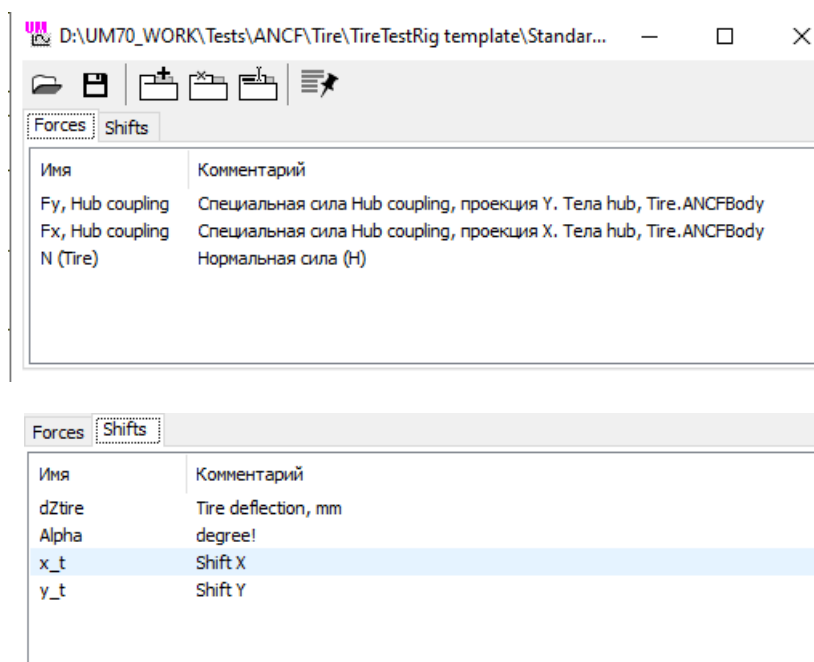



Рис. 33.63. Список стандартных переменных

Файл **Standard variables.var** открывается с помощью команды меню **Инструменты | Список переменных** или по кнопке . Список содержит несколько переменных, полезных при построении графиков в тестах с моделью колеса, рис. 33.63.

Перечислим тесты, в которых использоваться эти переменные.

**N (Tire)**, **dZTire** – давление шины на дорогу и прогиб шины

Переменные используются для построения зависимости статического прогиба шины от нагрузки, рис. 33.82, п. 33.3.13.4.2 *Зависимость прогиба шины от нагрузки*. Остановимся на переменной **dZTire**, равной прогибу шины. Откроем эту переменную в мастере с помощью соответствующей команды всплывающего меню по щелчку правой кнопки мыши на переменной, рис. 33.64. Переменная имеет тип **Выражение** и формируется двумя операторами. Первый умножает шарнирную координату X1.2 ступицы на -1000, меняя знак и переводя в мм. Второй оператор определяет собственно прогиб шишу, вычитая абсолютное значение координаты в момент касания дороги, переведенное в мм 4.13. Это последнее число (4.13мм) было получено нами в тесте падения колеса, где мы одновременно строили графики координаты X1.2 и нормальной силы N. В момент, когда сила появилась, значение координаты было равно -0.00413м. Если пользователь анализирует свою модель колеса, то он должен модифицировать это выражение, заменив величину 4.13 на значение, соответствующее исследуемому случаю.

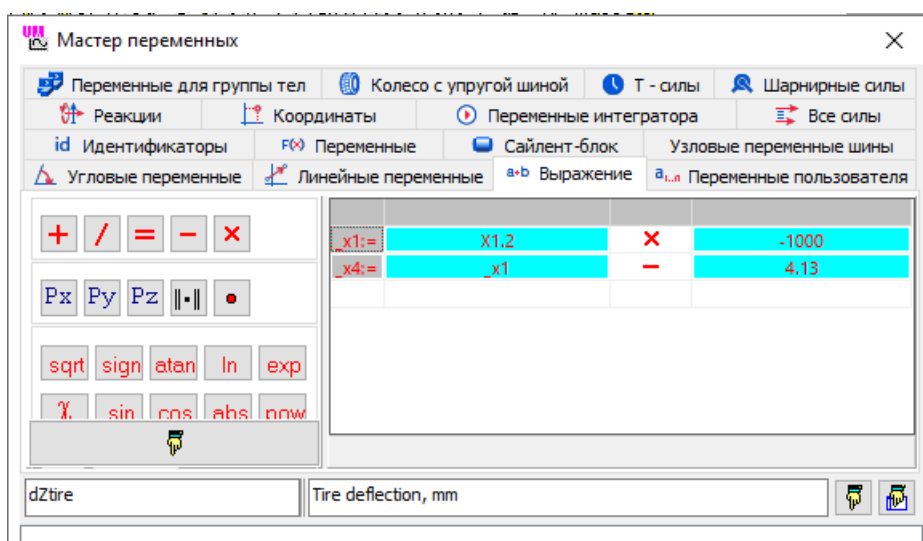


Рис. 33.64. Переменная, определяющая прогиб шины

**33.3.13.1.3. Инструмент управления идентификаторами**

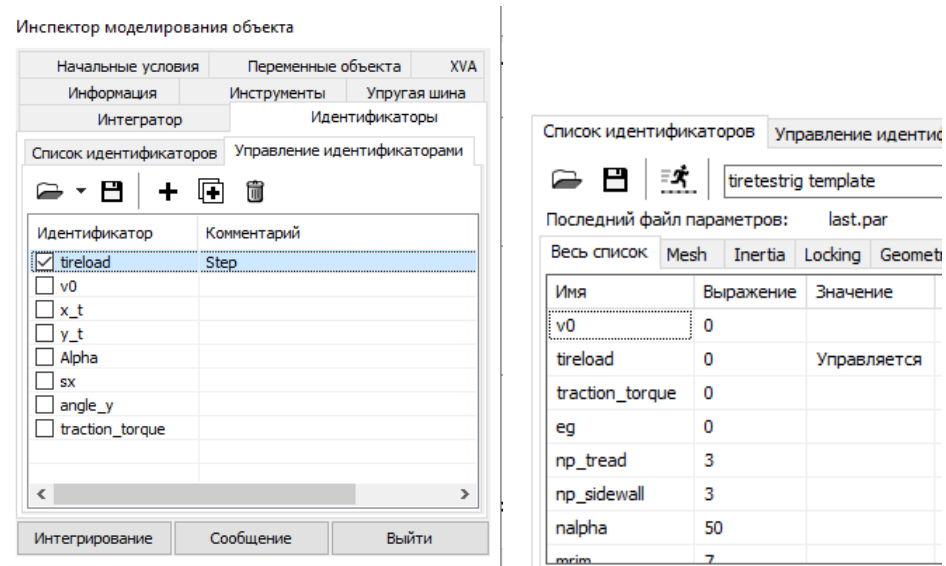


Рис. 33.65. Управление идентификаторами

Управление идентификаторами предоставляет основной инструмент выполнения тестов различных типов с колесом, рис. 33.65. Инструмент позволяет задать в процессе моделирование зависимость для одного или нескольких идентификаторов. Зависимость может быть заданной функцией времени или переменной, сформированной с помощью мастера переменных. Когда отдельное управление активно, как для идентификатора *tireload* на рис. 33.65 слева, то значение, заданное на вкладке **Список идентификаторов**, игнорируется, и идентификатор помечен комментарием **Управляется** (рис. 33.65 справа). Идентификаторы, не выделенные в списке галочками, не активны и текущем моделировании используются их значения из списка.

Рассмотрим управления. Описание управления открывается двойным щелчком мыши на строке списка. Подробное описание инструмента находится в [Главе 4](#), п. *Управление идентификаторами*.

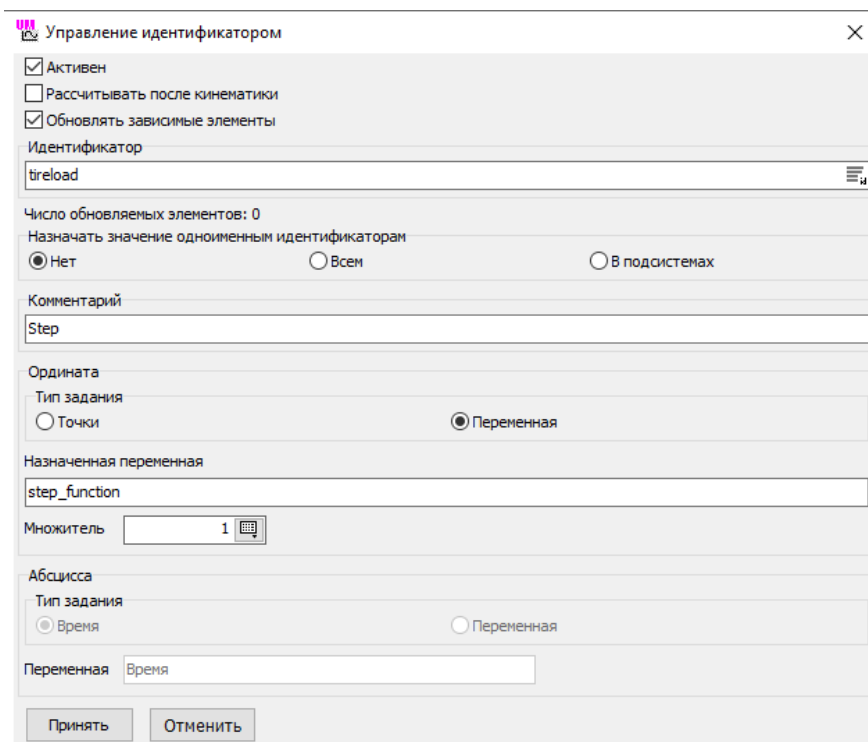


Рис. 33.66. Управление идентификатором *tireload*

**Tireload** – задается зависимость нагрузки на колесо в зависимости от времени с помощью переменной *step\_function* (рис. 33.66), введенной в программе ввода, п. 33.3.1.6 *Список переменных*. Переменная доступна в **Мастере переменных** (рис. 33.67) и перетаскивается в соответствующее поле на рис. 33.66 с помощью мышки.

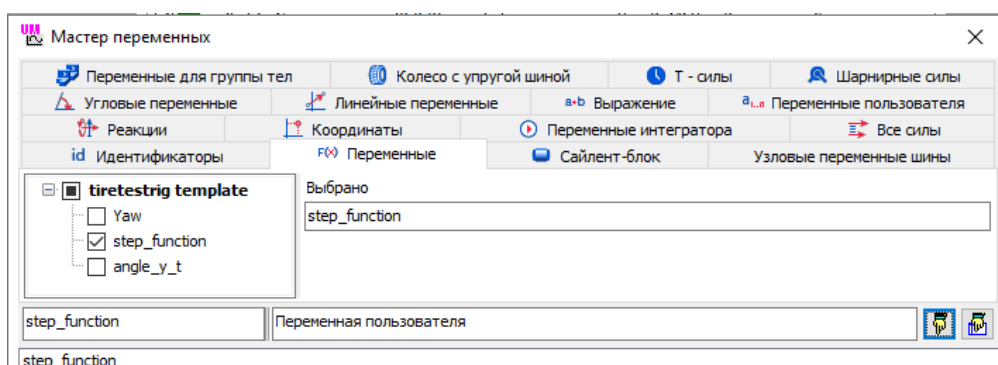


Рис. 33.67. Переменная *step\_function* в мастере

Данное управление используется в тесте п. 33.3.13.4.2 *Зависимость прогиба шины от нагрузки*.

**x<sub>t</sub>** – зависимость от времени продольного положения ступицы, заданная переменной *step\_function*; используется для оценки продольной статической жесткости шины в тесте 33.3.13.4.3 *Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиг колеса и поворот вокруг вертикальной оси*.

**y<sub>t</sub>** – зависимость от времени поперечного положения ступицы, заданная переменной *step\_function*; используется для оценки поперечной статической жесткости шины в тесте

33.3.13.4.3 *Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиги колеса и поворот вокруг вертикальной оси.*

**Alpha** – зависимость от времени угла поворота ступицы вокруг вертикальной оси, заданная переменной *step\_function*; используется для оценки угловой статической жесткости шины в тесте 33.3.13.4.3 *Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиги колеса и поворот вокруг вертикальной оси.*

### 33.3.13.1.4. Использование заранее созданных конфигураций

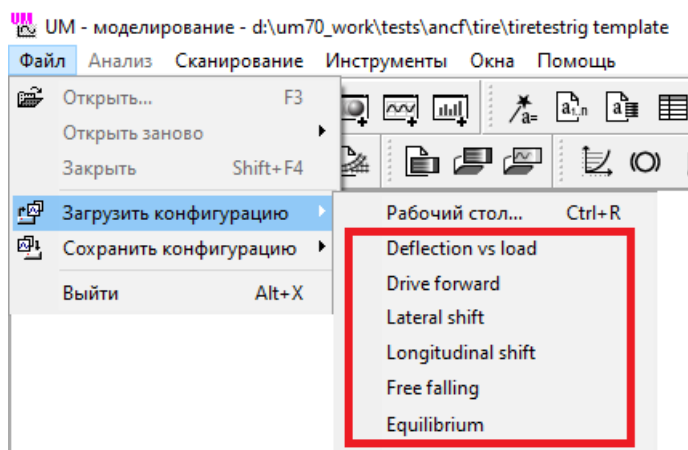


Рис. 33.68. Пример полных конфигураций

Для всех тестов, описанных ниже, подготовлены полные конфигурации (рис. 33.68), включающие файлы идентификаторов \*.par, настроек рабочего стола и численных методов \*.icf, начальных условий \*.xv и параметров модели шины \*.ancf. Эти файлы могут быть использованы с новой моделью, разрабатываемой пользователем с выполнением ряда условий.

- 1) Файл начальных условий \*.xv, как правило, несовместим с новой моделью шины и будет автоматически проигнорирован программой, если число координат в этом файле не совпадает с текущим числом. По этой причине желательно создать файлы равновесного состояния шины при нужных значениях нагрузки и использовать их в тестах.
- 2) Некоторые идентификаторы в файле \*.par могут быть несовместимы с новой моделью, например, радиус колеса *rwheel* или идентификаторы, параметризующие графический образ колесного диска и разбивку. Необходимо переименовать такие идентификаторы в программе ввода, п. 33.3.1.5 *Список идентификаторов*.

### 33.3.13.2. Расчет частот и собственных значений

Для расчета частот и собственных значений линеаризованных уравнений движения колеса используется инструмент, доступный по команде основного меню **Анализ | Статический и линейный анализ**, рис. 33.35.

Для выполнения данного расчета ступица должна быть закреплена, а координаты узлов шины соответствовать равновесию без учета контактного взаимодействия шины с дорогой. **Важно отметить, что в данном режиме контактное взаимодействие с дорогой отключается программой автоматически.**

**Замечание.** Расчет частот и собственных значений в неравновесном положении шины приводит к неверным результатам.

#### 33.3.13.2.1. Расчет равновесия для частотного анализа

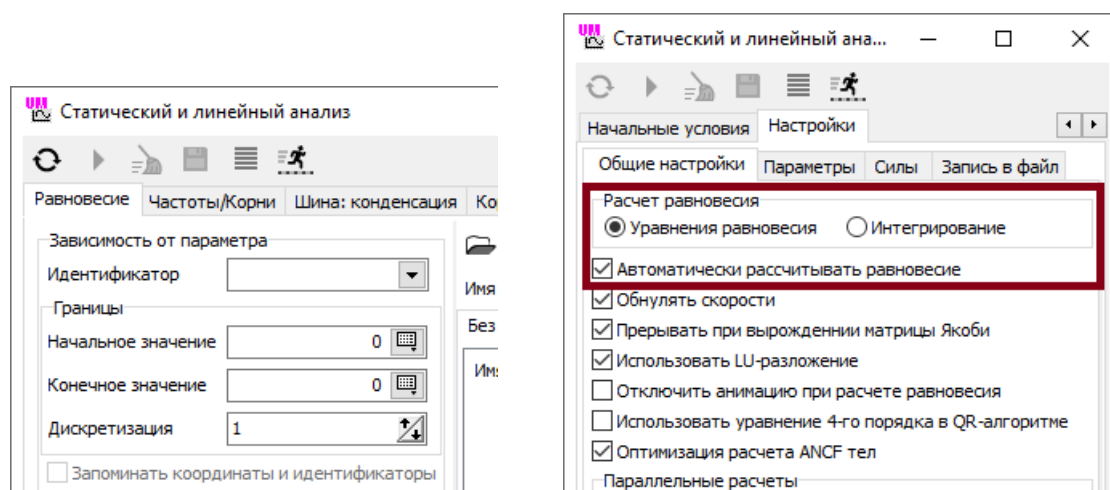



Рис. 33.69. Вкладки расчета равновесия (слева) и настроек

В случае, когда давление в шине равно нулю, равновесию соответствуют нулевые значения координат узлов, поэтому просто следует установить нулевые значения координат на вкладке начальных условий. Если давление ненулевое, то для расчета равновесия можно использовать два подхода, причем второй подход используется, если первый метод не дает положительный результат, то есть прямое решение уравнений равновесия расходится.

#### Автоматический расчет равновесия.

- Установите нулевые значения координат на вкладке **Начальные условия**.
- Перейдите на вкладку **Равновесие** и выполните расчет по кнопке , рис. 33.69, слева. Если расчет завершается успешно, вкладке **Настройки** можно установить тип автоматического расчета в качестве основного, рис. 33.69, справа.
- Если итерации расчета не сходятся, то для расчета равновесия следует использовать второй подход.

#### Расчет равновесия методом интегрирования.

- Закрепляется ступица по всем степеням свободы.
- Устанавливаются нулевые значения всех координаты.

- Если при нулевых координатах возможен контакт с дорогой, то отключается контактное взаимодействие: число контактов в пределах элемента устанавливается равным нулю.
- Запускается стандартный процесс моделирования из инспектора моделирования. Для оценки состояния можно использовать график кинетической энергии системы.

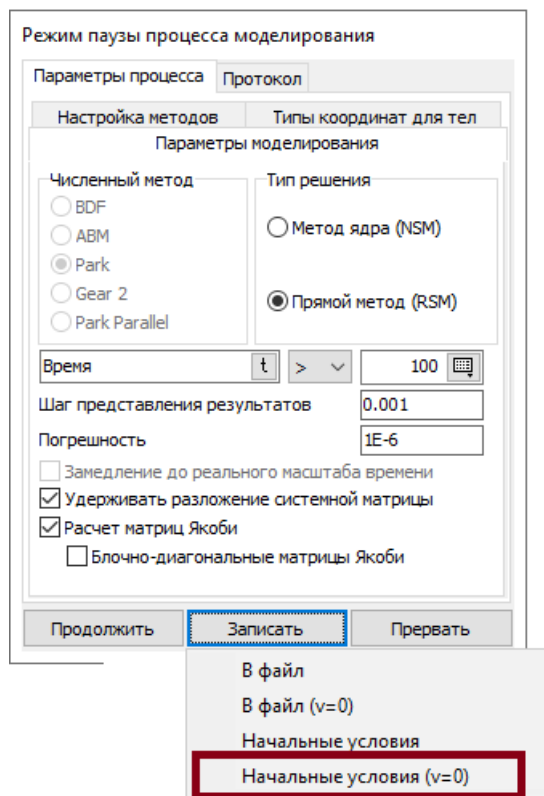


Рис. 33.70. Назначение текущих координат и нулевых скоростей в качестве начальных условий

- После того, как система придет в положение, близкое равновесию, в режиме паузы следует использовать кнопку **Записать**, чтобы по команде **Начальные условия (v=0)** появившегося меню принять текущие значения координат и нулевые скорости в качестве начальных условий, рис. 33.70.

### 33.3.13.2.2. Расчет собственных частот

Поскольку шина имеет большое число степеней свободы, то для расчета частот используется метод Ланцоша, который позволяет рассчитать заданное число низших частот и форм колебаний. Число частот указывается в левой верхней части окна, рис. 33.71. По этой же причине применяется приближенный расчет собственных значений, основанный на редуцировании матриц линеаризованных уравнений с помощью рассчитанных собственных форм колебаний, число собственных частот и соответствующих форм колебаний указывается в правой части окна и не может превосходить рассчитываемой число собственных частот. В примере на рис. 33.71 оба числа равны 300.

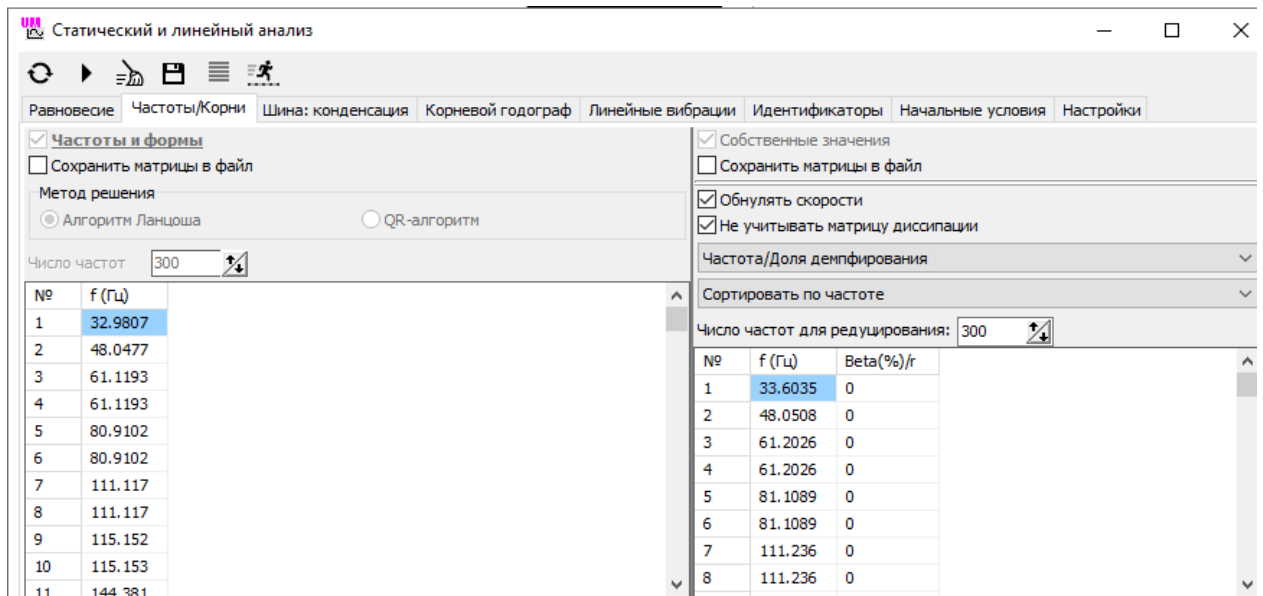


Рис. 33.71. Расчет частот шины при ненулевом давлении

Для расчета собственных частот шины в положении равновесия перейдите на вкладку **Частоты/Корни**. Поскольку матрица жесткости при ненулевом давлении в шине является несимметричной, то собственные частоты рассчитываются приближенно в силу принудительной симметризации матрицы, см. п. 33.2.6 *Учет давления в шине*. Уточненные значения частот можно получить в результате расчета собственных значений уравнений шины при выключенной матрице диссипации (рис. 33.71, справа). Расчет запускается щелчком на кнопке

Как видно из результатов расчета на рис. 33.71, приближенные собственные частоты в левой части близки к их уточненным значениям в правой. При отсутствии давления частоты почти совпадают, рис. 33.72.

Частоты на рис. 33.71 и рис. 33.72 рассчитаны для одной и той же шины, различается только давление. В первом случае  $p=2,2$  бар, во втором  $p=0$ . Сравнение демонстрирует, насколько сильно частоты зависят от давления.

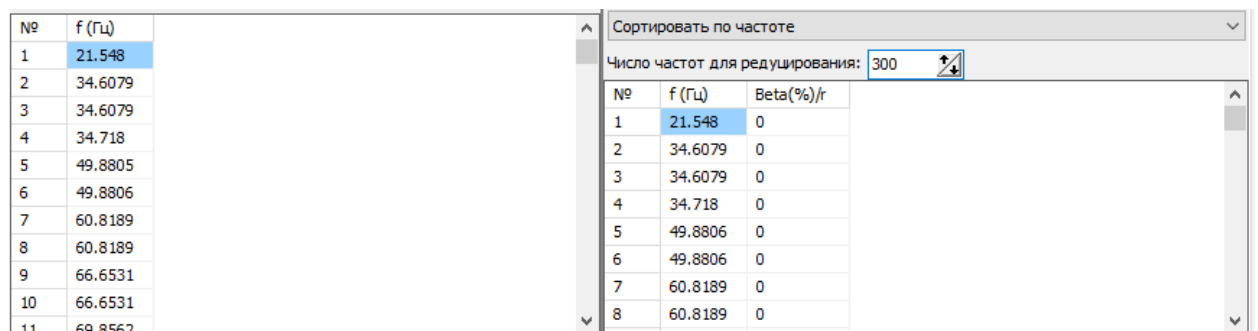


Рис. 33.72. Расчет частот шины при нулевом давлении

**33.3.13.2.3. Расчет частот с учетом демпфирования**

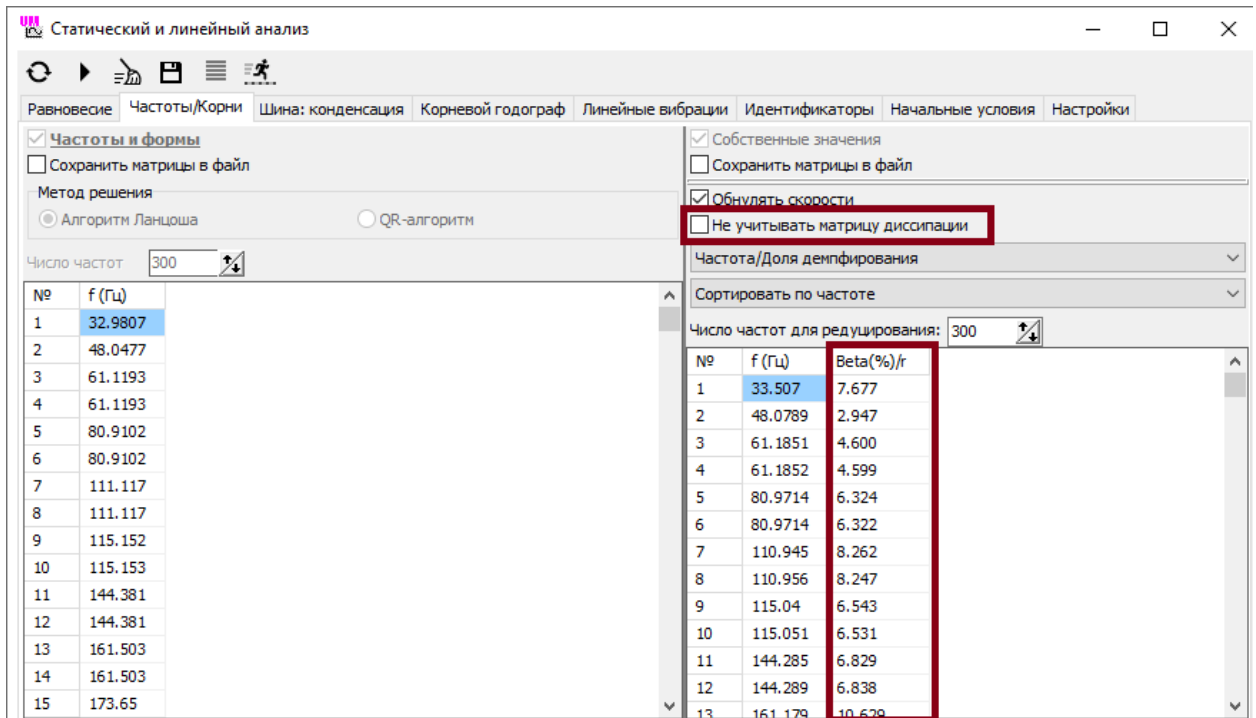


Рис. 33.73. Расчет собственных значений с учетом демпфирования при ненулевом давлении

Для оценки степени демпфирования рассчитываются собственные значения уравнений шины с учетом демпфирующих сил. Для этого следует включить учет матрицы демпфирования, при необходимости очистить результаты предыдущего расчета с помощью кнопки и выполнить расчет щелчком на кнопке , рис. 33.73. Второй столбец Beta в результатах соответствует доле демпфирования для соответствующей частоты.

Расчет выполняется приближенно редуцированием матриц с использованием собственных форм колебаний. Заметим, что результаты теоретического исследования, приведенные в п. 33.2.8 *Оценка влияния демпфирования, пропорционального матрице жесткости, на частоты шины*, при учете давления в шине являются оценочными. При отсутствии давления теоретические результаты точны.

Результаты на рис. 33.74 получены для той же шины, что и на рис. 33.73, но при нулевом давлении. Значение параметра демпфирования в расчетах  $\beta = 0.0005\text{с}$ , что дает критическую частоту (33.12)  $\omega^* = 4000\text{рад/с} = 636.62\text{Гц}$ . Для первой собственной частоты 21.548Гц это дает теоретическую долю демпфирования (33.13) 0.03384 или 3.384%, для второй частоты 34.6079Гц теоретическая доля демпфирования 0.05436 или 5.436%. Оба результата практически совпадают с расчетными значения на рис. 33.74.

Доля демпфирования частот на рис. 33.73 для большинства частот ниже, чем на рис. 33.74, что является следствием того, что внутреннее демпфирование в шине строится без учета давления (см. уравнение (33.1)).

**Таким образом, теоретический анализ влияния демпфирование на частоты шины в п. 33.2.8 дает точные значения при отсутствии внутреннего давления и позволяет качественно и количественно оценить это влияние при наличии давления.**

№	f (Гц)	Beta(%) / r
1	21.548	
2	34.6079	
3	34.6079	
4	34.718	
5	49.8805	
6	49.8806	
7	60.8189	
8	60.8189	
9	66.6531	
10	66.6531	
11	69.8562	
12	69.8562	
13	80.2679	
14	80.2679	
15	92.506	

№	f (Гц)	Beta(%) / r
1	21.5356	3.384
2	34.5568	5.432
3	34.5568	5.432
4	34.6665	5.445
5	49.7275	7.829
6	49.7275	7.829
7	60.5407	9.553
8	60.5408	9.553
9	66.2867	10.470
10	66.2868	10.470
11	69.4344	10.973
12	69.4344	10.973
13	79.6273	12.608

Рис. 33.74. Расчет собственных значений с учетом демпфирования при нулевом давлении

### 33.3.13.3. Оценка внутреннего демпфирования по коэффициенту восстановления при отскоке

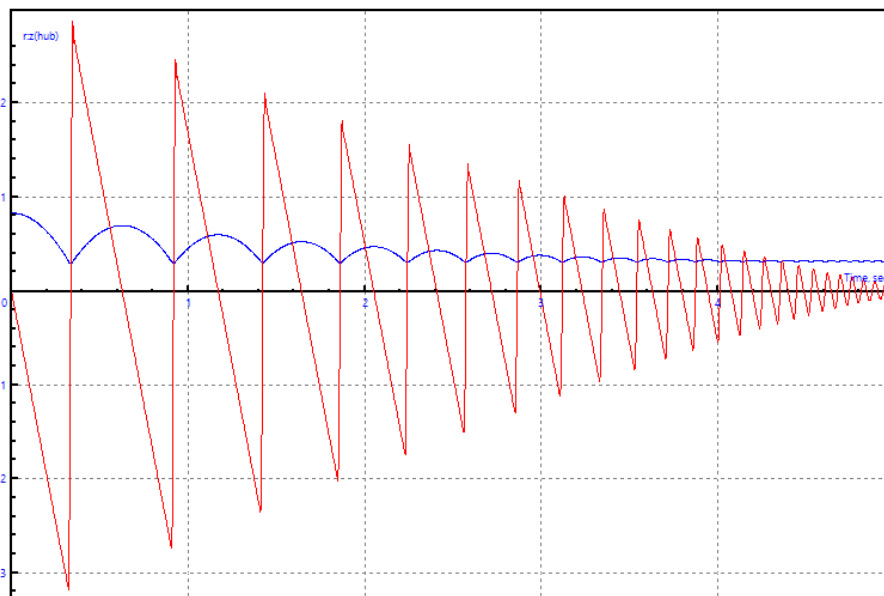


Рис. 33.75. Вертикальная координата колеса и скорость центра при  $\beta = 0.002c$

Рассмотрим тест, который можно использовать для оценки величины внутреннего демпфирования по экспериментальным данным. В начальном положении колесо поднято так, что расстояние от нижней поверхности шины до опорной поверхности составляет примерно 0.5м. Для этого идентификатору  $h0$  задается значение 0.5. Из данного положения колесо падает под действием силы тяжести и совершает ряд отскоков. Строятся графики вертикальной координаты центра колеса и его скорости при различных значениях параметра демпфирования  $\beta$ , рис. 33.75, 33.76. Время моделирования 5с.

В качестве основных результатов теста принимается коэффициент восстановления  $v_{i+1}/v_i$  и отношение высот  $h_{i+1}/h_i$  при отскоке. Здесь  $v_i$  – скорости в момент удара шины о дорогу, то есть минимальные отрицательные значения, а  $h_i$  – максимальный подъем центра шины над положением, соответствующим шине, касающейся дороги. Теоретически эти

показатель связаны друг с другом соотношением, следующим из закона сохранения энергии:  $h_{i+1}/h_i = (v_{i+1}/v_i)^2$

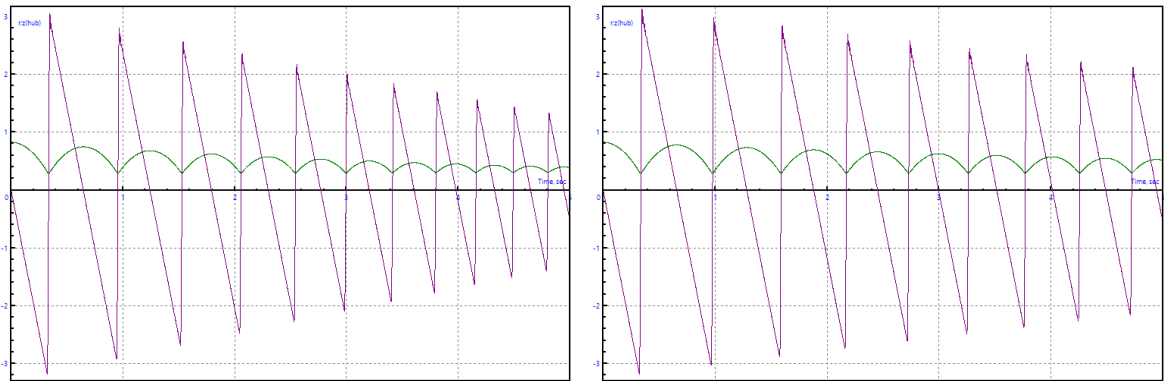


Рис. 33.76. Tire bounce for  $\beta = 0.001s$  and  $\beta = 0.0005s$

Коэффициенты для трех значений демпфирования приведены в табл. 33.1. На протяжении пяти ударов коэффициент восстановления практически постоянный, и связь между коэффициентами весьма точно соответствует теории, например,  $0.906 \approx 0.952^2$ .

Table 33.1

$\beta, c$	$v_2/v_1$	$v_3/v_2$	$v_4/v_3$	$v_5/v_4$	$v_6/v_5$	$h_2/h_1$	$h_3/h_2$	$h_4/h_3$	$h_5/h_4$	$h_6/h_5$
0.002	0.862	0.858	0.860	0.862	0.862	0.740	0.739	0.740	0.740	0.740
0.001	0.918	0.918	0.921	0.919	0.920	0.844	0.845	0.847	0.845	0.847
0.0005	0.950	0.954	0.951	0.952	0.954	0.904	0.907	0.907	0.906	0.907

### 33.3.13.4. Статические тесты

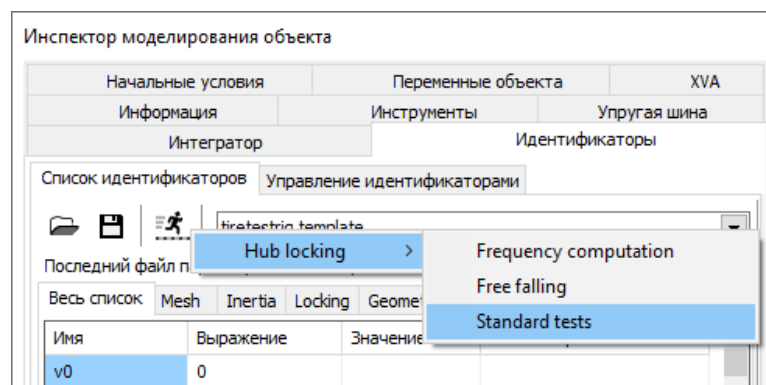


Рис. 33.77. Макрос стандартных тестов

Данные тесты выполняются при блокировке вращения и продольного движения шины. Для установки нужных значений идентификаторов блокировки используется макрос Standard test (стандартные тесты), рис. 33.77.

### 33.3.13.4.1. Равновесие при заданной нагрузке на шину

Тест обычно используется для расчета начальных условий в равновесном состоянии шины при заданной нагрузке. Перед выполнением теста следует

- настроить идентификаторы с помощью макроса стандартных тестов (рис. 33.77) и задать нужную нагрузку идентификатору *tireload* (H);
- проверить, что все управления идентификаторами выключены;
- задать нулевые значения коэффициенту трения покоя и скольжения (не обязательная операция);
- при необходимости задать нулевые значения всем координатам.

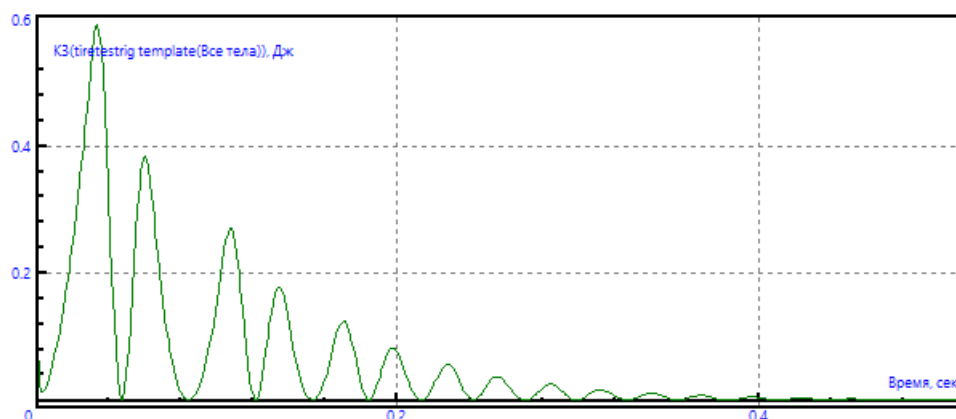


Рис. 33.78. Падение кинетической энергии

Запустить процесс моделирования. При достижении шиной положения, близкого равновесному (рис. 33.78), сохранить рассчитанные значения координат в файл (рис. 33.79) с именем, отражающим состояние модели при тесте, например, Equilibrium3kN50x11.xv — здесь из имени файла ясно, что разбивка шины 50 на 11 КЭ, а нагрузка 3кН. **Важно помнить, что при изменении разбивки файлы начальных условий становятся несовместимыми и не могут быть прочитаны.**

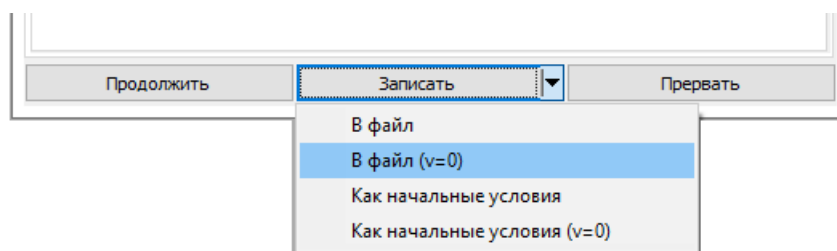


Рис. 33.79. Запись координат в файл начальных условий в режиме паузы

### 33.3.13.4.2. Зависимость прогиба шины от нагрузки

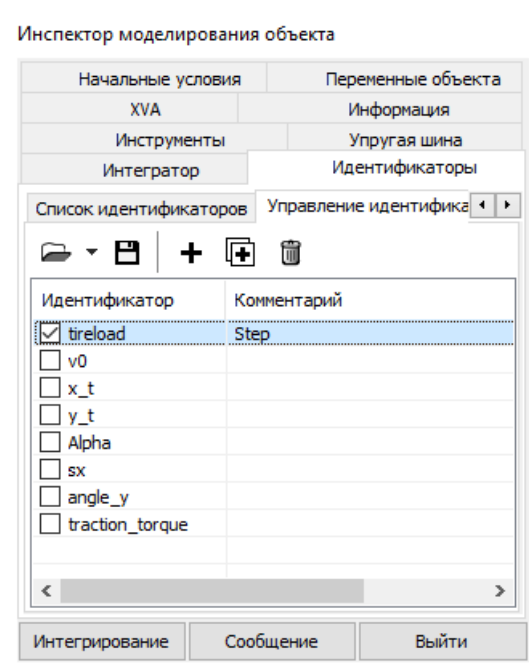


Рис. 33.80. Управление идентификатором нагрузки

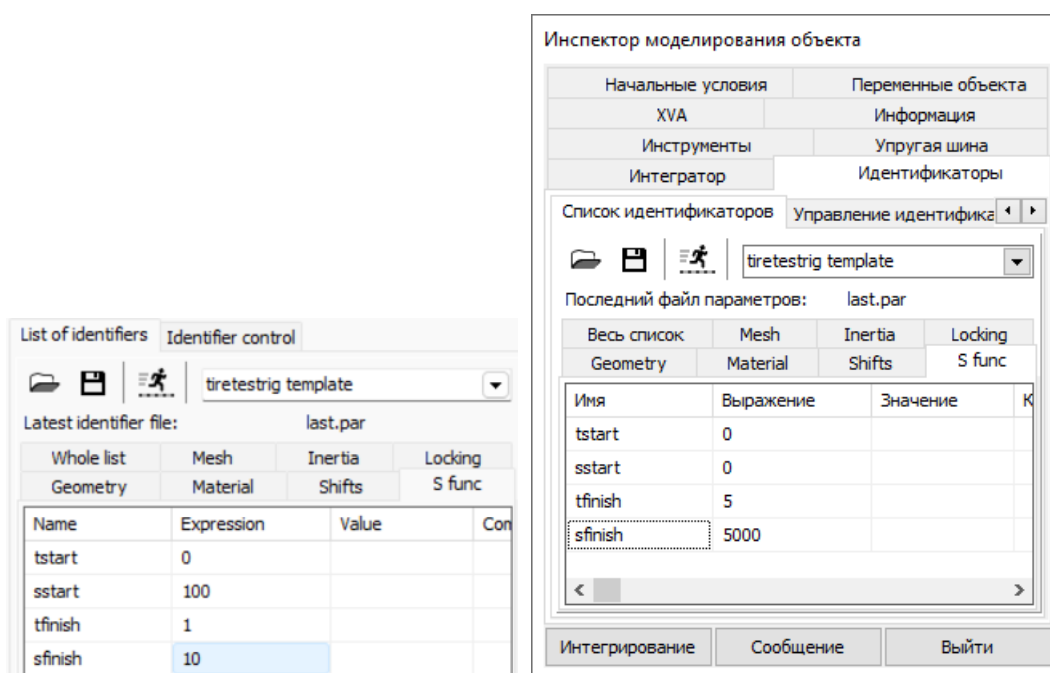


Рис. 33.81. Параметры управления нагрузкой в случае расчета равновесия при минимальной нагрузке (слева) и при выполнении теста (справа)

Стандартный тест для оценки статического прогиба шины в зависимости от нагрузки и сравнения компьютерной модели с результатами статических стендовых испытаний.

Перед выполнением теста следует загрузить конфигурацию **Deflection vs load** и внести необходимые уточнения, связанные с особенностями исследуемой шины, или выполнить предварительную подготовку теста, состоящую в следующих шагах.

- 1) настроить идентификаторы с помощью макроса стандартных тестов (рис. 33.77);

- 2) включить и настроить управление идентификатором *tireload* (рис. 33.80, слева) с помощью переменной *step\_function* (п. 33.3.1.6 *Список переменных*);
- 3) привести шину в равновесие при минимальной нагрузке, выполнив моделирование при значениях параметров функции *step*, аналогичных приведенным на рис. 33.81 слева; в примере на рисунке сила уменьшается от 100Н до 10Н; параметры функции *step* описаны в п. 33.3.1.6 *Список переменных*;
- 4) настроить параметры функции *step* для выполнения основного теста (рис. 33.80, справа); в примере на рисунке нагрузка возрастает от минимального значения, для которого рассчитано равновесие, до максимального.
- 5) задать нулевые значения коэффициенту трения покоя и скольжения (не обязательная операция);
- 6) прочесть или рассчитать начальные координаты, соответствующие равновесию шины при нагрузке, равной весу шины (т.е. при нулевом значении идентификатора *tireload*);
- 7) сформировать переменные, соответствующие прогибу шины и нагрузке.

Если использована загрузка конфигурации **Deflection vs load**, то, как правило, требуется корректировка значения идентификатора *sfinish*, который в данном тесте соответствует максимальному значению нагрузки, а также выполнение шага 4.

Запустите процесс моделирования. Пример результата представлен на рис. 33.82.

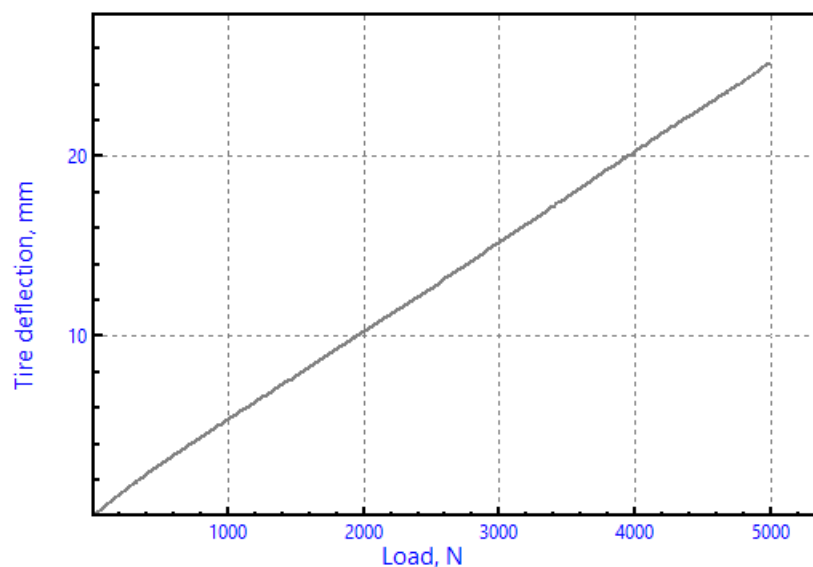


Рис. 33.82. Зависимость статического прогиба шины от нагрузки

### 33.3.13.4.3. Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиги колеса и поворот вокруг вертикальной оси

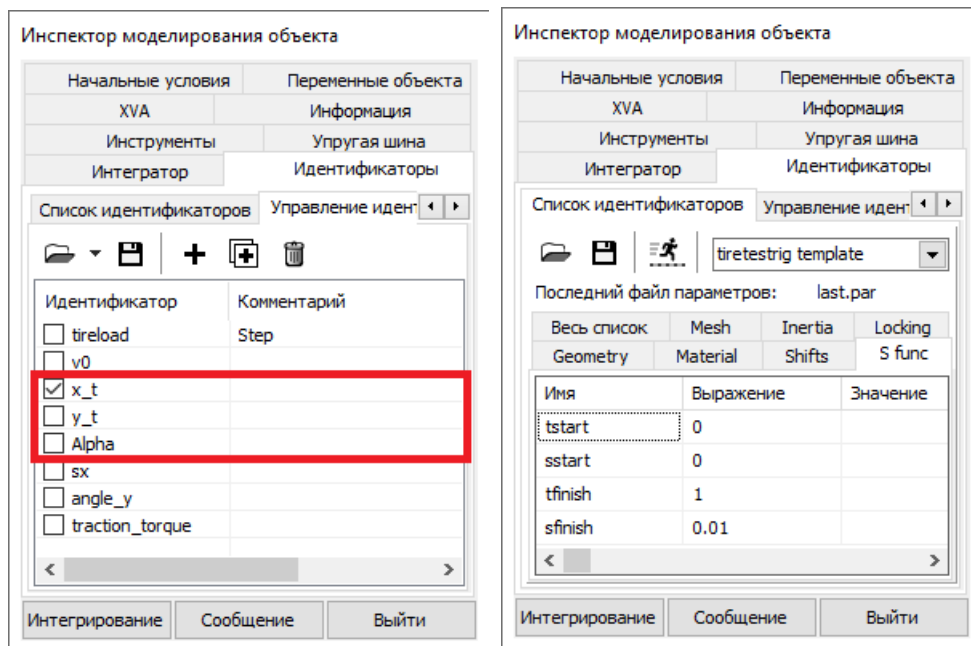


Рис. 33.83. Настройки управлением идентификаторов сдвигов и поворота

Стандартные тесты для оценки статических коэффициентов поперечной, продольной и угловой жесткостей шины и сравнения компьютерной модели с результатами стендовых испытаний.

Перед выполнением теста следует загрузить одну из конфигураций **Longitudinal shift**, **Lateral shift**, **Static rotation Z** и внести необходимые уточнения, связанные с особенностями исследуемой шины, или выполнить предварительную подготовку теста, состоящую в следующих шагах:

- 1) настроить идентификаторы с помощью макроса стандартных тестов (рис. 33.77);
- 2) задать нужное значение идентификатору нагрузки, для которой выполняется тест с помощью идентификатора *tireload*, значение задается в Н);
- 3) включить и настроить управление идентификатором *x\_t*, *y\_t*, *Alpha* – в зависимости от типа теста (рис. 33.83, слева); настроить параметры функций *step* (рис. 33.83, справа); сдвиги задаются в метрах, поэтому значение *sfinish* должно быть порядка 0.01, угол задается в градусах, поэтому значение должно быть порядка 0.5;
- 4) задать **ненулевые значения** коэффициенту трения покоя и скольжения (обязательная операция);
- 5) прочитать или рассчитать начальные координаты, соответствующие заданной нагрузке;
- 6) создать графическое окно, в которое поместить их списка **Standard variables** переменные, соответствующие нужному сдвигу (повороту) и силе (моменту) и принять перемещение как абсциссу.

Если использована загрузка конфигурации, то, как правило, требуется выполнения шага 5.

Запустите процесс моделирования. Пример результата представлен на рис. 33.84.

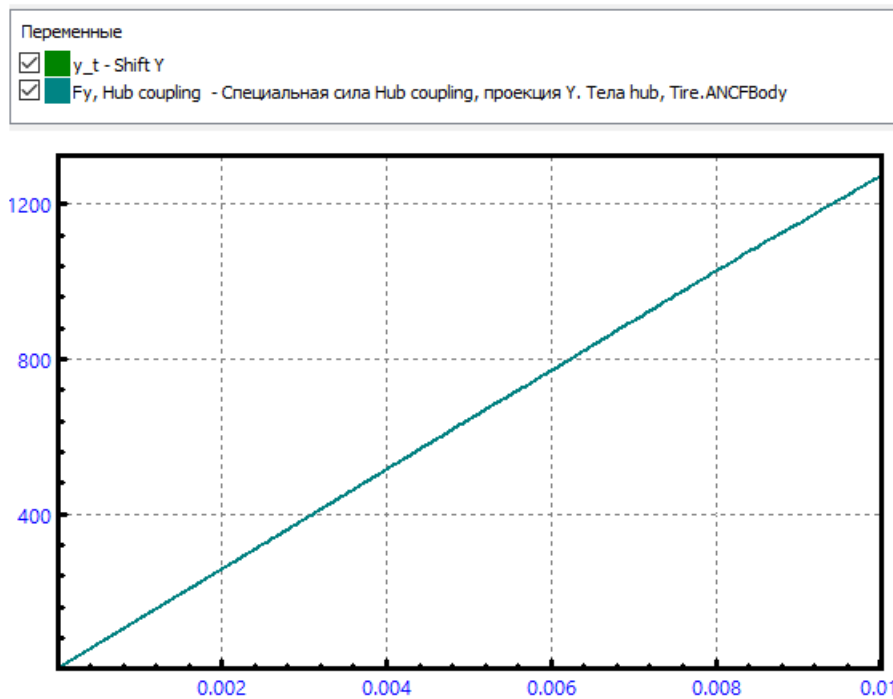


Рис. 33.84. Зависимость поперечной силы от смещения

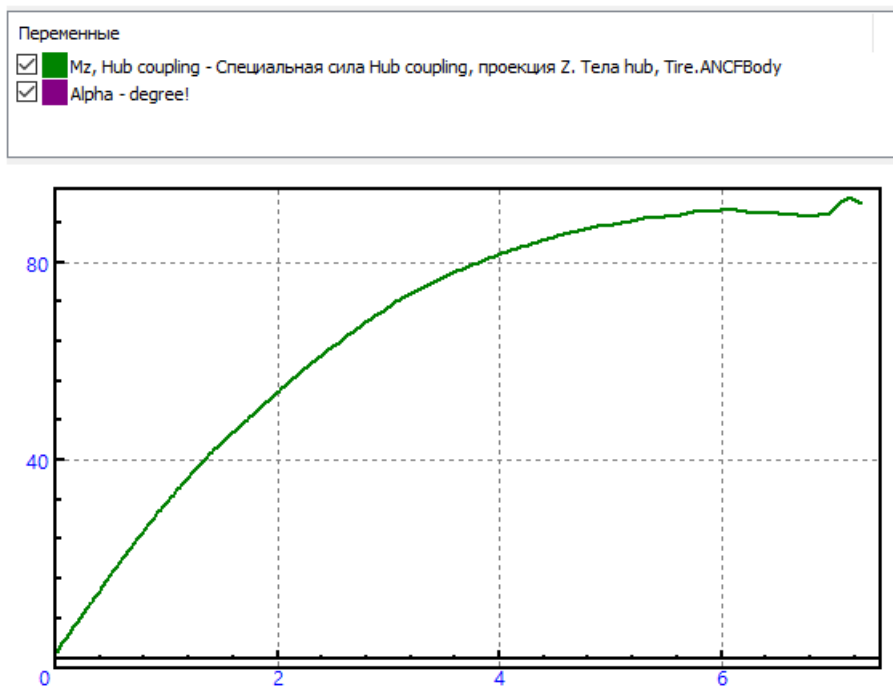


Рис. 33.85. Оценка предельного момента при повороте вокруг вертикальной оси

Тест с поворотом вокруг вертикальной оси может также использоваться для оценки максимального момента при повороте, и угла, при котором начинается скольжение. Для этого следует задать малое время поворота и увеличить угол поворота, например,  $t_{finish}=0.5c$ ,  $s_{finish} = 10^\circ$ , рис. 33.84. на этом рисунке максимальный момент около 90Нм достигается примерно при повороте на 6 градусов.

### 33.3.13.4.4. Статический тест для оценки параметров модифицированной модели шины с редуцированной боковой частью

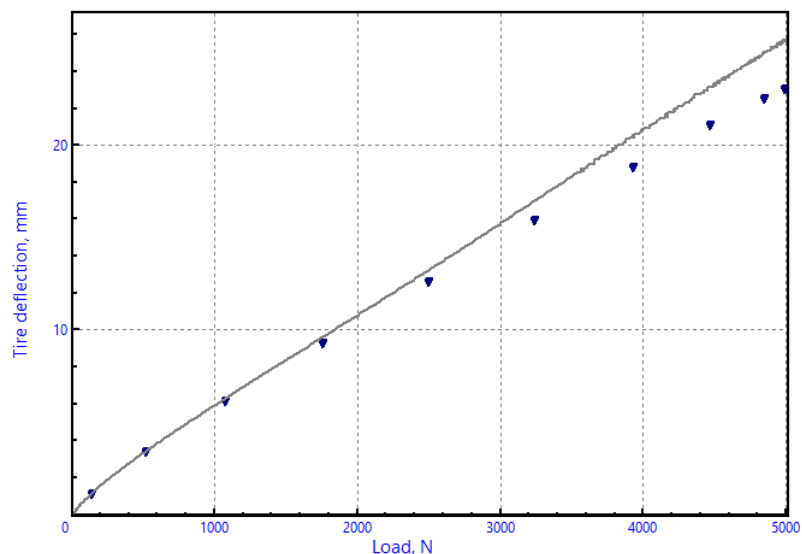


Рис. 33.86. Сравнение зависимости прогиба шины от нагрузки для полной модели (сплошная линия) и модели с редуцированной боковой частью (маркер)

Как отмечено выше, модель шины с редуцированной боковой частью имеет повышенную жесткость в тестах зависимости прогиба от нагрузки при номинальной и повышенной нагрузке, п. 33.2.7 *Редуцированные модели шины*. На рис. 33.86 представлен соответствующий тест для шины DunlopP195-70R15. При нагрузке 2.5 кН, близкой к номинальной, прогиб редуцированной модели примерно на 5% меньше, чем полной модели, а при большой нагрузке 5 кН разница более 10%.

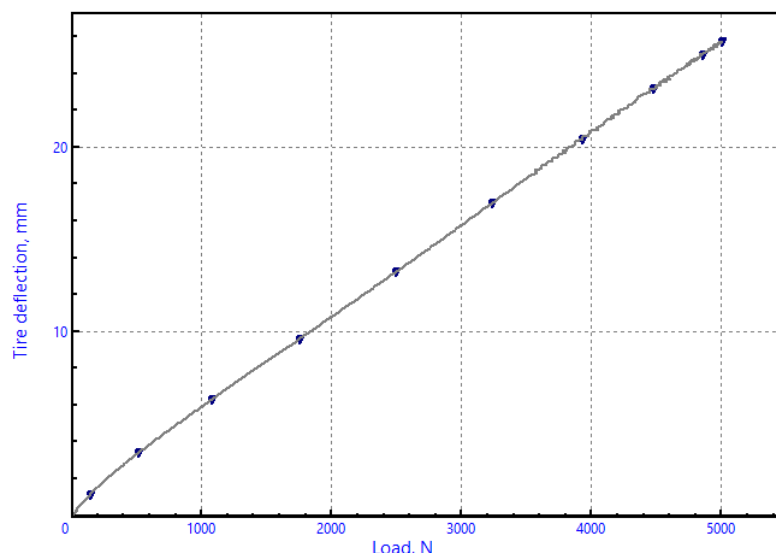


Рис. 33.87. Сравнение зависимости прогиба шины от нагрузки для полной модели (сплошная линия) и модифицированной модели с редуцированной боковой частью (маркер)

Для устранения этой погрешности в УМ реализована модификация модели с редуцированной боковой частью, рис. 33.87. В модифицированной модели матрица жесткости

редуцированной части умножается на понижающий коэффициент, зависящий от величин текущей и номинальной нагрузки, а также от фактора ослабления жесткости, который следует рассчитать для каждой модели шины. Параметры модифицированной модели задаются на вкладке **Настройки шины**, рис. 33.88. п. 33.3.7 *Задание фактора ослабления жесткости модели шины с редуцированной боковой частью.*



Рис. 33.88. Параметры модифицированной модели упругой шины с редуцированной боковой частью

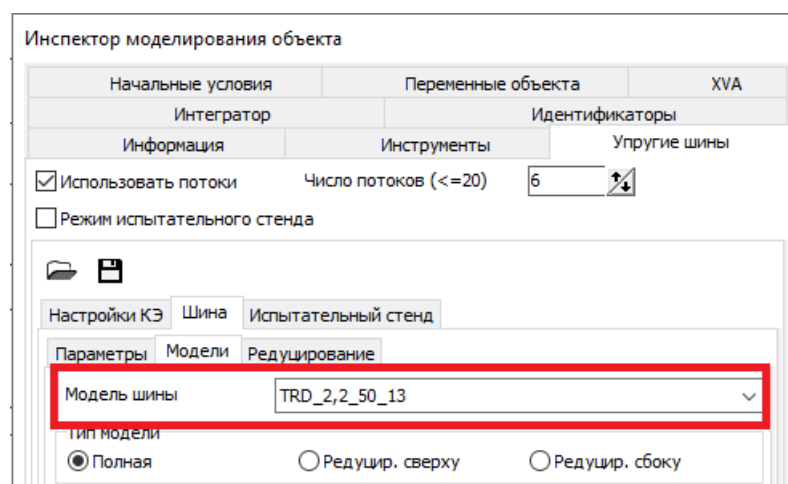


Рис. 33.89. Загрузка модели

Загрузите полную конфигурацию **RS stiffness reduction**. Параметры теста соответствуют тесту расчета зависимости прогиба от нагрузки, то есть разблокировано только движение шины по вертикали. На вкладке **Шина | Модели** загрузите нужную предварительно созданную модель шины с редуцированием, рис. 33.89.

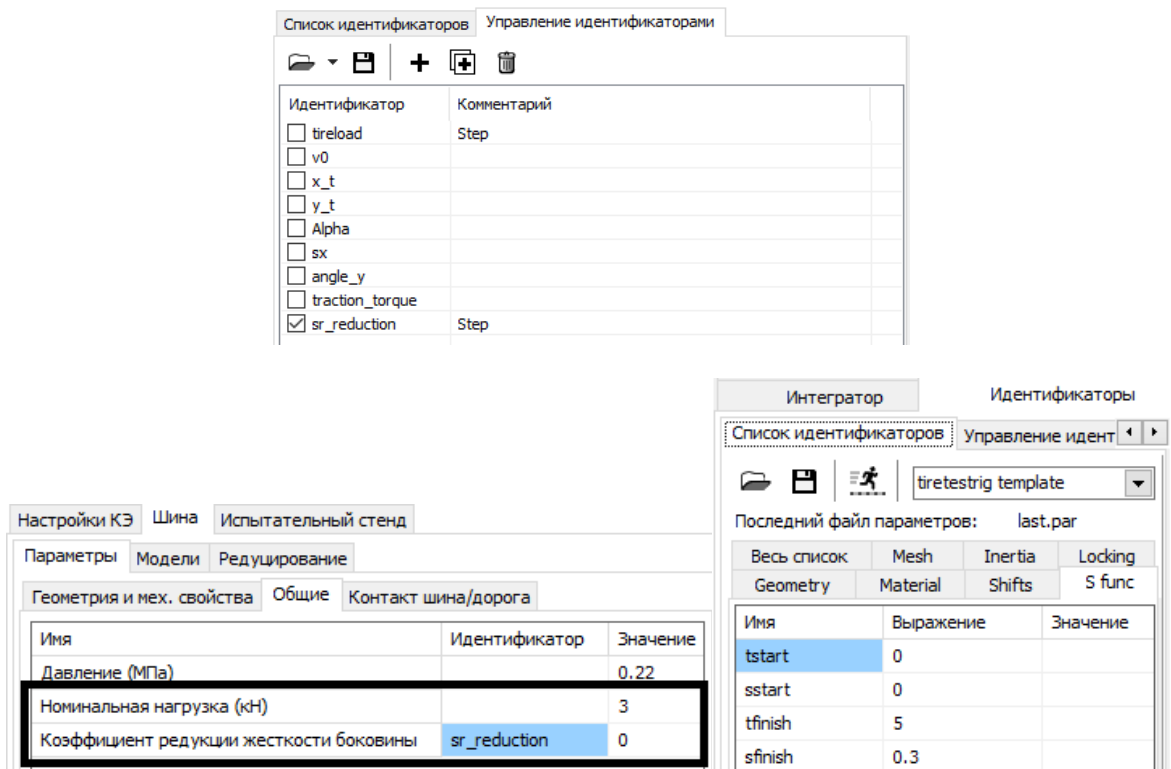


Рис. 33.90. Управление идентификатором фактора ослабления жесткости

Тест состоит из двух этапов: расчет статического прогиба при большой нагрузке на шину и определение значения фактора ослабления жесткости. В тесте используется параметризация фактора с помощью идентификатора *sr\_reduction* и управление этим идентификатором, рис. 33.90

- 1) задайте тип модели: **полная**;
- 2) задайте нагрузку на шину, близкую к максимальной (примерно удвоенную номинальную) с помощью идентификатора *tireload*;

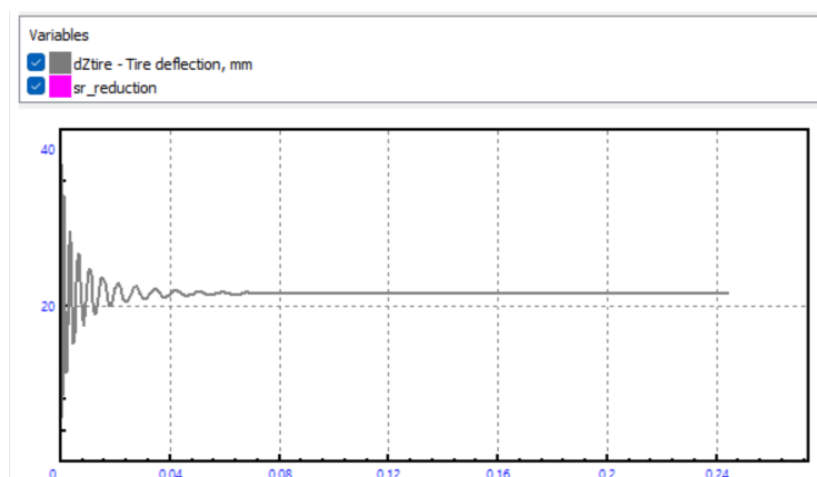


Рис. 33.91. Зависимость прогиба шины от времени для полной модели

- 3) включите управление идентификатором, запустите моделирование, основным результатом которого должна быть зависимость прогиба шины от времени, рис. 33.91; идентификатор *sr\_reduction* отложен в данном окне вдоль оси X;

- 4) скопируйте график прогиба как статическую переменную в режиме паузы; обратите внимание, что фактор редуцирования игнорируется программой при использовании полной модели шины: он влияет только на модель с редуцированными боковинами;

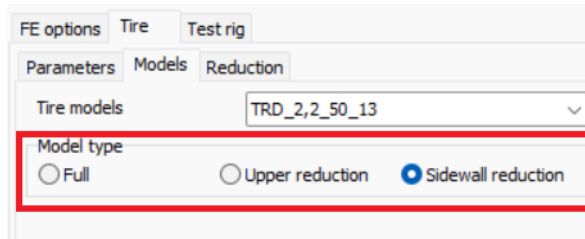



Рис. 33.92. Включение модели с редуцированными боковыми частями

- 5) прервите моделирование;
- 6) установите модель шины с редуцированными боковинами рис. 33.92;
- 7) запустите моделирование и остановите его, когда кривые прогибы пересекутся, рис. 33.93.
- 8) значение абсциссы X, соответствующей пересечению графиков, соответствует искомому значению фактора снижения жесткости: примерно 0.15 на рис. 33.93;
- 9) установите рассчитанное значение фактора 0.15 на вкладке параметров на рис. 33.90;
- 10) с помощью кнопки  обновите файл параметров шины \*tire в каталоге, содержащем редуцированную модель шины (в нашем случае TRD\_2,2\_50\_13, файл TRD\_2,2\_50\_13.tire), рис. 33.94.

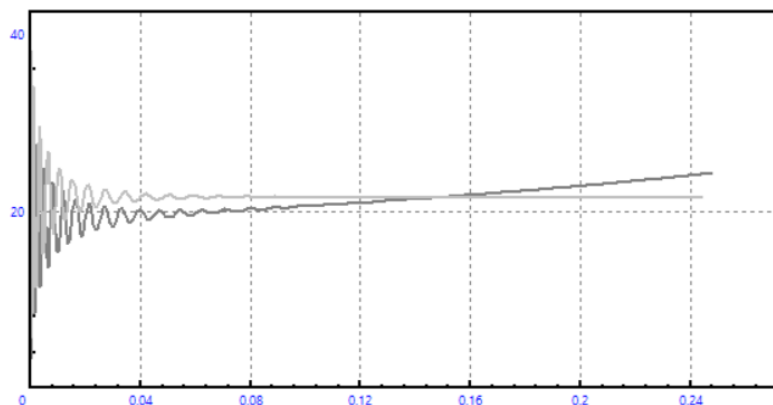


Рис. 33.93. Сравнение прогибов для полной и редуцированной модели шины

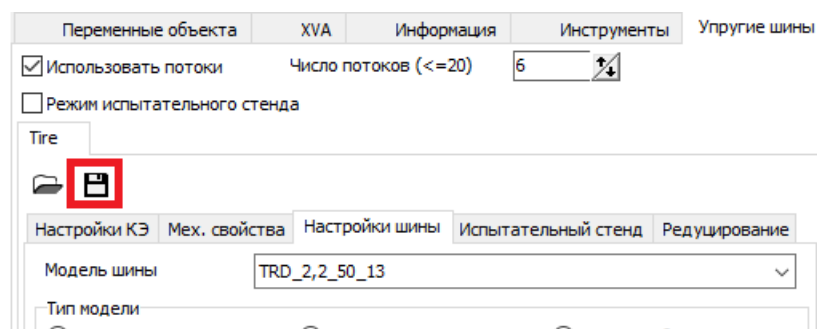


Рис. 33.94. Запись параметров шины в файл

### 33.3.13.5. Качение колеса вперед под действием постоянного момента

В данном тесте колесо катится вперед под действием постоянного момента, приложенного к ступице. Момент задается идентификатором *traction\_torque*. Для ограничения величины скорости используется линейное продольное демпфирование, заданное идентификатором *d\_x*. Идентификатор скорости тела Ground равен нулю  $v_0=0$ .

Перед выполнением теста следует загрузить полную конфигурацию **Drive forward** (движение вперед) и внести необходимые уточнения, связанные с особенностями исследуемой шины, или выполнить предварительную подготовку теста, состоящую в следующих шагах:

- 1) отключить все управления идентификаторами, рис. 33.65;
- 2) настроить идентификаторы с помощью макроса **Drive forward**;
- 3) задать нужное значение идентификаторам нагрузки *tireload* и момента *traction\_torque*;
- 4) создать переменные: угловая скорость вращения ступицы относительно поперечной оси и скорость продольного движения ступицы и поместить их в графическое окно;
- 5) прочесть или рассчитать начальные координаты, соответствующие заданной нагрузке.

При запуске моделирования колесо начинает катиться, скорости стремятся к предельным значениям, рис. 33.95.

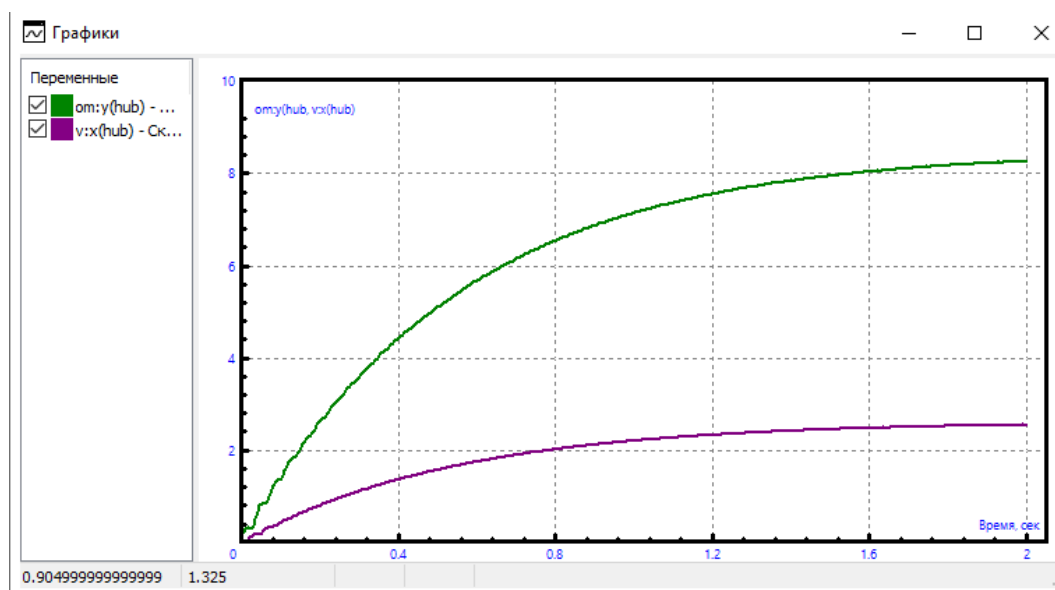


Рис. 33.95. Зависимость от времени скорости продольного движения и угловой скорости ступицы

### 33.3.13.6. Определение эффективного радиуса свободно катящегося колеса

Рассмотрим выражение для продольного проскальзывания шины [6]:

$$s_x = \left(1 - \frac{v}{r_{e0}\omega}\right) \times 100\%.$$

Здесь  $v$ ,  $\omega$  – скорость продольного движения и угловая скорость колеса,  $r_{e0}$  – эффективный радиус свободного качения колеса. Радиус определяется по значению угловой скорости  $\omega_0$

при отсутствии сопротивления движению, при этом продольное проскальзывание отсутствует ( $s_x = 0$ ). Таким образом,

$$r_{e0} = \frac{v}{\omega_0}$$

Данный тест предназначен определения эффективного радиуса свободного качения.

Перед выполнением теста следует загрузить полную конфигурацию **Free rolling** и внести необходимые уточнения, связанные с особенностями исследуемой шины, или выполнить предварительную подготовку теста, состоящую в следующих шагах:

- 1) отключить все управления идентификаторами, рис. 33.65;
- 2) настроить идентификаторы с помощью макроса **Free rolling** (свободное качение, рис. 33.62);
- 3) задать нужное значение идентификаторам нагрузки *tireload* и скорости  $v0$ ;  $v0$  задает скорость продольного движения тела **Ground**, которое «протягивается» под колесом и имитирует каток испытательного стенда, п. 33.3.1.2.2 *Вспомогательное тело Ground*;
- 4) создать переменную, равную угловой скорости вращения ступицы относительно поперечной оси и поместить ее в графическое окно;
- 5) прочесть или рассчитать начальные координаты, соответствующие заданной нагрузке.

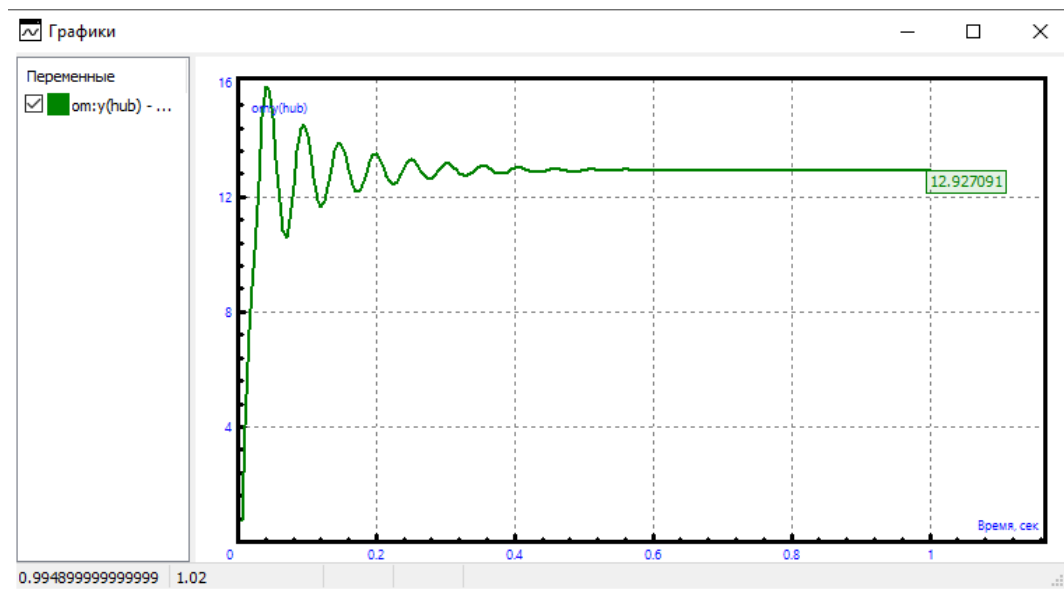


Рис. 33.96. Зависимость угловой скорости ступицы от времени

Запустите моделирование. Через некоторой время угловая скорость колеса становится практически постоянной, рис. 33.96. Для оценки значения эффективного радиуса сколите установившееся значение угловой скорости и разделите скорость продольного движения  $v0$  на это значение. В примере, который мы имеем на рис. 33.96

$$r_{e0} = \frac{4}{12.93} = 0.3094\text{м.}$$

В соответствии с общей теорией качения колеса, этот радиус немного больше, чем расстояние от центра колеса до дороги под заданной нагрузкой 3кН, которое в нашем примере равно 0.3078м.

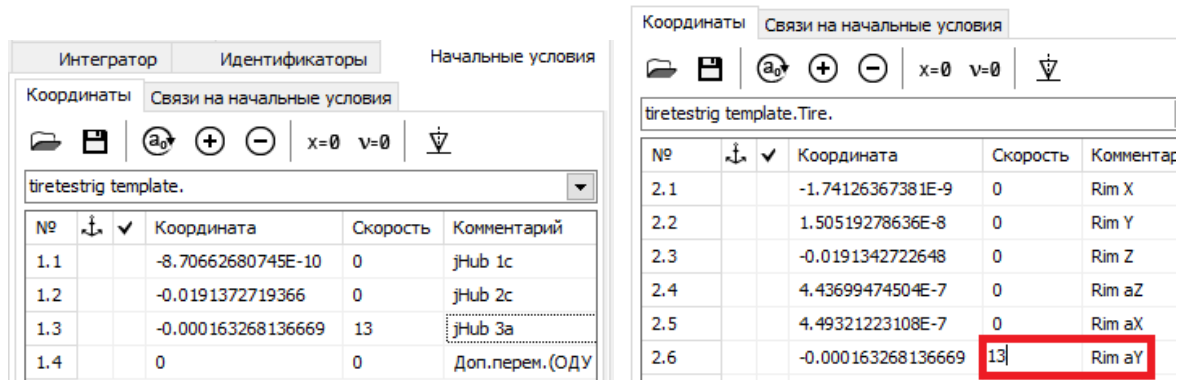


Рис. 33.97. Задание начальной угловой скорости ступице и колесу

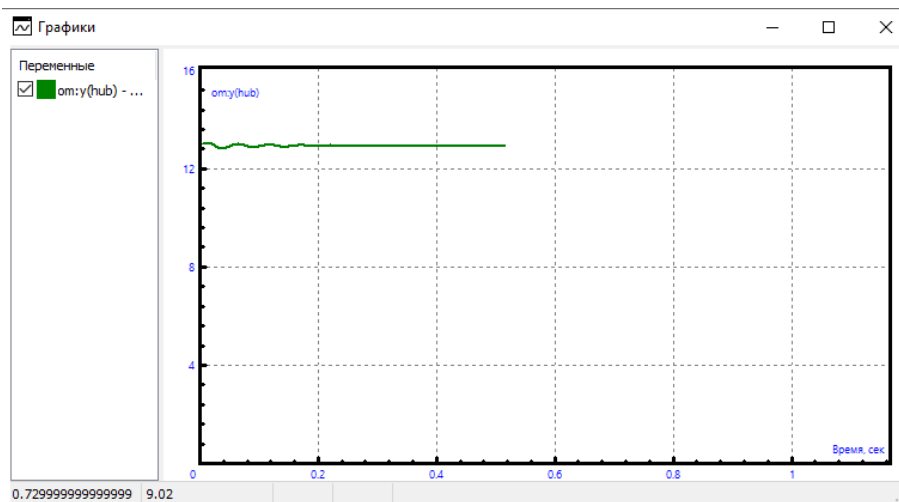


Рис. 33.98. Зависимость угловой скорости ступицы от времени при ненулевой начальной угловой скорости

Заметим, что переходный процесс на рис. 33.96 можно значительно сократить, если задать ступице и колесу начальную угловую скорость, близкую к установившейся. Например, при начальной скорости 13рад/с (рис. 33.97), график угловой скорости представлен на рис. 33.98.

### 33.3.13.7. Зависимость продольной силы от проскальзывания

В тесте определяется зависимость продольной силы  $F_x$  от продольного проскальзывания  $s_x$ . Перед выполнением теста следует загрузить полную конфигурацию **Fx vs Sx** и внести необходимые уточнения, связанные с особенностями исследуемой шины, или выполнить предварительную подготовку теста, состоящую в следующих шагах.

- 1) Включить управление идентификаторами  $s_x$ ,  $angle_y$ , рис. 33.99, слева; первый из них соответствует продольному скольжению, а второй – углу вращения ступицы. Идентификатор  $s_x$  входит в выражение для зависимости угловой скорости от

скорости продольного движения, рис. 33.99, справа. Идентификатору *angle\_y* назначается переменная *angle\_y\_t*, равная интегралу от угловой скорости *om\_y*, п. 33.3.1.6 *Список переменных*.

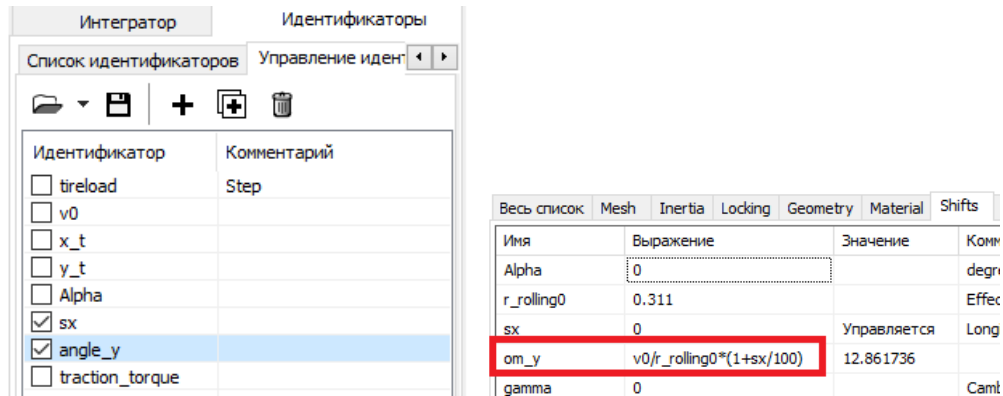


Рис. 33.99. Настройки теста Fx vs Sx

2) Настроить идентификаторы с помощью макроса **Standard tests**.

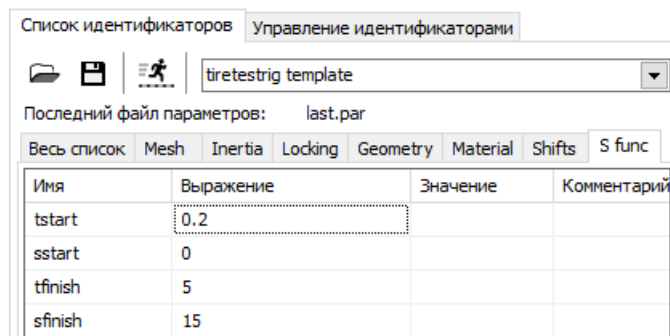


Рис. 33.100. Пример задания параметров управления идентификатором проскальзывания *sx*

- 3) Для управления идентификатором проскальзывания *sx* используется переменная *step\_function*. Следует задать идентификаторы – аргументы этой функции, рис. 33.100.
- 4) Задать нужное значение идентификаторам нагрузки *tireload*, скорости *v0* и идентификатору эффективного радиуса качения свободного колеса. Задать нужное значение идентификаторам нагрузки *tireload*, скорости *v0* и идентификатору эффективного радиуса качения свободного колеса *r\_rolling0*, п. 33.3.13.6 *Определение эффективного радиуса качения свободно катящегося колеса*.
- 5) Открыть новое графическое окно и скопировать в него из списка переменные, соответствующие продольной силе и проскальзыванию (п. 33.3.13.1.2 *Список переменных для тестов*). Отложить переменную *sx* по абсциссе с помощью всплывающего контекстного меню.
- 6) Прочитать или рассчитать начальные координаты, соответствующие заданной нагрузке.

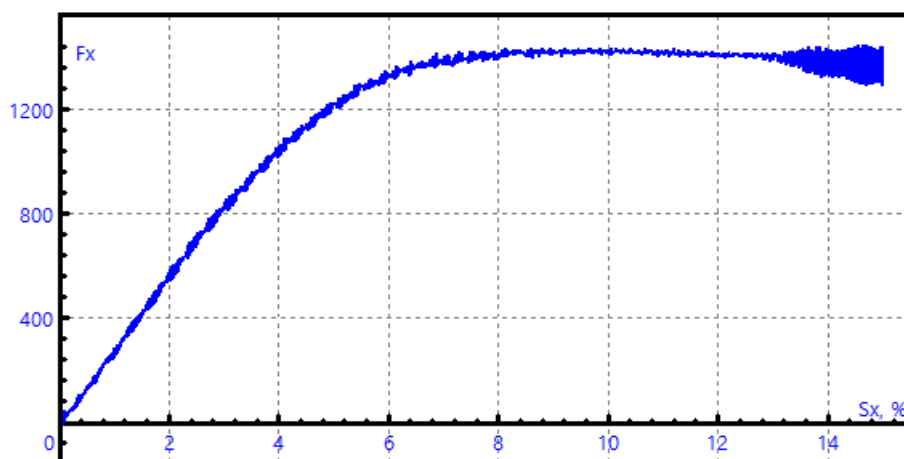


Рис. 33.101. Пример зависимости продольной силы от прокальзывания

Запустите моделирование. Типичная рассчитанная зависимость продольной силы от скольжения представлена на рис. 33.101. Колебание при больших значениях  $s_x$  соответствуют развитию классических автоколебаний при наличии падающей характеристики трения, п. 33.2.5 *Контактное взаимодействие шины с дорогой*.

### 33.3.13.8. Зависимость поперечной силы и восстанавливающего момента от бокового увода

В тесте определяется зависимость поперечной силы  $F_y$  и восстанавливающего момента  $M_z$  от угла бокового увода (поперечного проскальзывания)  $s_y = \alpha$ , измеряемого в градусах. Перед выполнением теста следует загрузить полную конфигурацию **Fy, Mz vs Sx** и внести необходимые уточнения, связанные с особенностями исследуемой шины, или выполнить предварительную подготовку теста, состоящую в следующих шагах.

- 1) Включить управление идентификаторами *Alpha, angle\_y*; первый из них соответствует углу бокового увода, в нашем случае равному повороту плоскости колеса вокруг вертикальной оси, а второй – углу вращения ступицы.
- 2) Настроить идентификаторы с помощью макроса **Standard tests**.
- 3) Для управления идентификатором бокового увода *Alpha* используется переменная *step\_function*. Следует задать идентификаторы – аргументы этой функции, рис. 33.100.
- 4) Задать нужное значение идентификаторам нагрузки *tireload*, скорости  $v_0$  и идентификатору эффективного радиуса качения свободного колеса *r\_rolling0*, п. 33.3.13.6 *Определение эффективного радиуса свободно катящегося колеса*.
- 5) Открыть два графических окна и скопировать в первое окно переменную  $F_y$  (поперечная сила, действующая на шину) и угол *Alpha* из списка переменных, а во второе – момент  $M_z$  (восстанавливающий) и угол *Alpha*. Отложите переменную *Alpha* по абсциссе в обоих окнах с помощью всплывающего контекстного меню.
- 6) Прочитать или рассчитать начальные координаты, соответствующие заданной нагрузке.

Запустите моделирования. Типичные рассчитанные зависимости силы сопротивления боковому уводу (поперечной силы) и восстанавливающего момента от угла приведены на рис. 33.102, рис. 33.103. Колебания при больших значениях Alpha соответствуют развитию автоколебаний при наличии падающей характеристики трения.

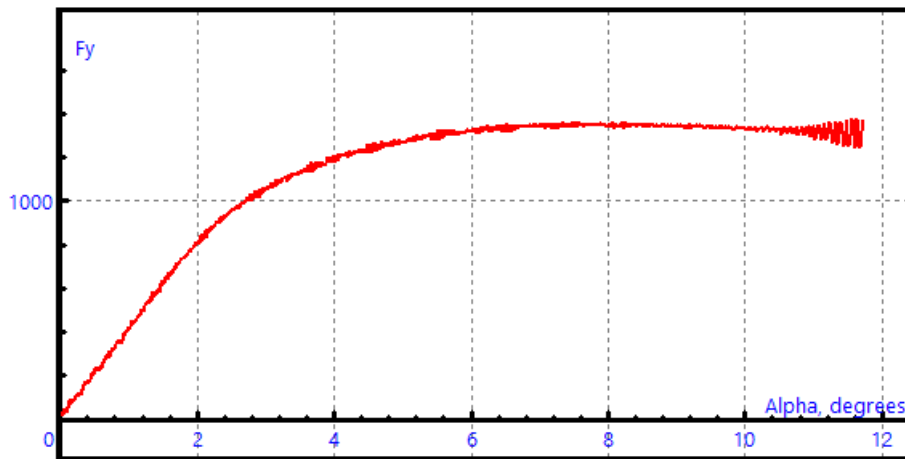


Рис. 33.102. Пример зависимости поперечной силы от угла бокового увода

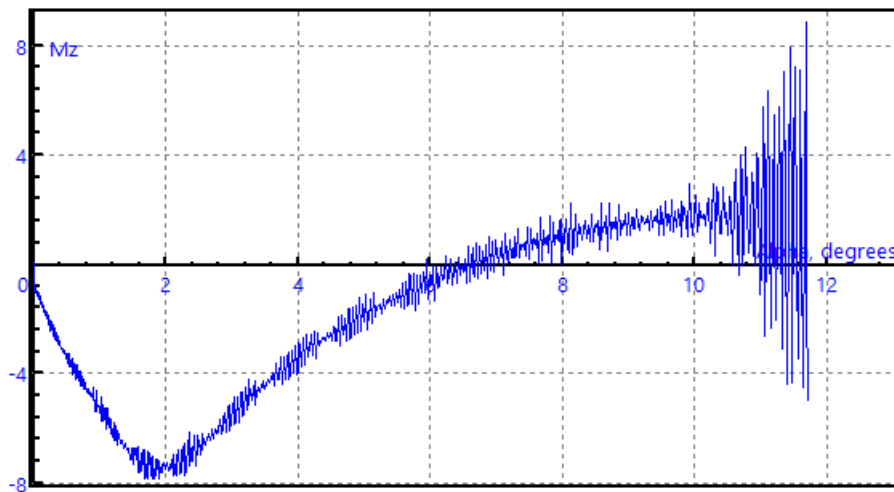


Рис. 33.103. Пример зависимости восстанавливающего момента от угла бокового увода

### 33.3.14. Режим испытательного стенда: автоматическое исследование свойств шины

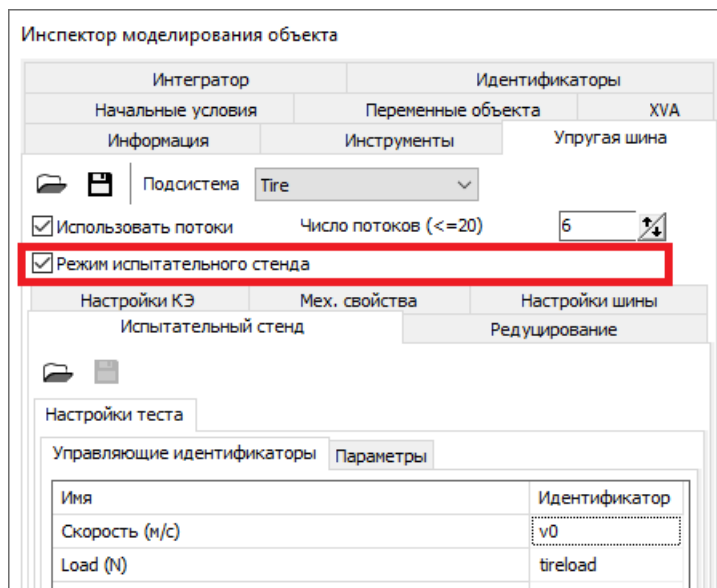


Рис. 33.104. Режим испытательного стенда

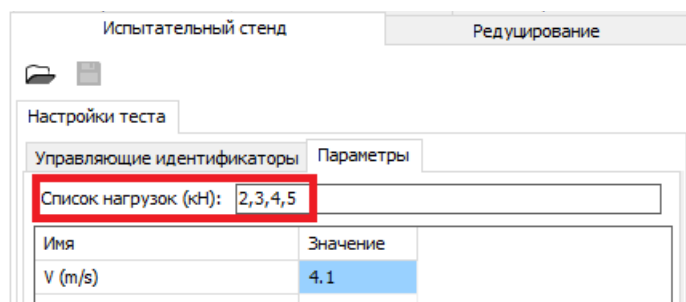


Рис. 33.105. Список нагрузок

Режим виртуального испытательного стенда является основным инструментом исследования свойств шины, рис. 33.104. Данный режим автоматически выполняет серию статических и динамических тестов, описанных выше, для получения зависимостей установившихся значений различных показателей в зависимости от нагрузки, рис. 33.105. Параметры и результаты выполнения теста отображаются на вкладке **Испытательный стенд** инспектора моделирования объекта. *Режим стенда доступен при условии использования шаблона отдельной шины.*

#### 33.3.14.1. Перечень тестов

##### Расчет равновесия при минимальной нагрузке

Это первый тест, выполняемый в начале процесса, предназначенный для оценки радиуса шины без нагрузки. Шина приводится в равновесие нагрузкой, равной весу шины, см. п. 33.3.13.4.1 *Равновесие при заданной нагрузке на шину.*

Далее выполняется серия тестов для каждой нагрузки из списка, заданного пользователем, рис. 33.105. Серия состоит из пяти статических и трех динамических тестов.

##### 1) Расчет равновесия при заданной нагрузке

Шина приводится в равновесие заданной нагрузкой, см. п. 33.3.13.4.1 *Равновесие при заданной нагрузке на шину*. Результаты теста включают величину статического прогиба шины и значения координат в положении равновесия. Координаты используются в качестве начальных условий для остальных тестов серии.

Следующие четыре теста выполняются для оценки статических жесткостей шины, см. п. 33.3.13.4.3 *Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиги колеса и поворот вокруг вертикальной оси*.

- 2) **Расчет продольной статической жесткости шины**
- 3) **Расчет поперечной статической жесткости шины**
- 4) **Расчет вертикальной статической жесткости шины**
- 5) **Расчет статической жесткости шины при повороте вокруг вертикальной оси**

Теперь рассмотрим динамические тесты серии.

- 6) **Свободное качение шины**

Тест используется для расчета эффективного радиуса шины при свободной качении, п. 33.3.13.6 *Определение эффективного радиуса свободно катящегося колеса*.

- 7) **Расчет зависимости поперечной силы и восстанавливающего момента от угла бокового увода**

См. п. 33.3.13.8 *Зависимость поперечной силы и восстанавливающего момента от бокового увода*.

- 8) **Расчет зависимости продольной силы от продольного проскальзывания**

См. п. 33.3.13.7 *Зависимость продольной силы от проскальзывания*.

При выполнении двух последних тестов определяются установившиеся значения сил и момента с пошаговым увеличением угла бокового увода  $\alpha$  и продольного проскальзывания  $s_x$ . Каждый шаг имеет два этапа: на первом величина  $\alpha$  или  $s_x$  выводится на нужное значение с использованием s-функции; время выполнения этого этапа называется **Transition time** (переходное время). На втором этапе успокаиваются переходные процессы, и в конце этапа рассчитывается среднее установившееся значение переменных, время усреднения **TWindow** = 0.1с. Усреднение необходимо в силу возможных автоколебательных процессов, рис. 33.101, рис. 33.102.

**Замечание.** Рекомендуется выключать силу тяжести при выполнении тестов, в которых задана ненулевая нагрузка на колесо. Для выключения следует задать нулевое значение идентификатору  $eg=0$ . В этом случае установившееся значение суммарной нормальной силы взаимодействия шины с дорогой точно равно заданной нагрузке. Включенной силе тяжести соответствует  $eg=-1$ .

## 33.3.14.2. Настройки стенда

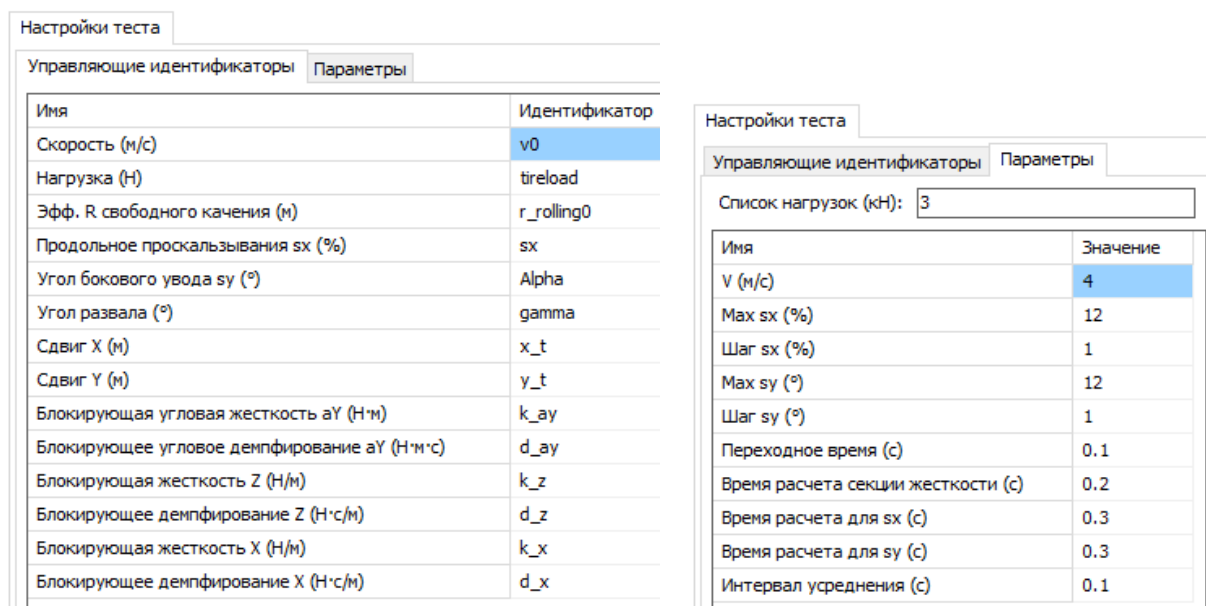


Рис. 33.106. Вкладки настроек стенда

Настройки виртуального испытательного стенда расположены на двух вкладках, рис. 33.106.

#### Управляющие идентификаторы

Вкладка содержит идентификаторы модели, которые используются программой для автоматического управления серией тестов, рис. 33.106, слева. Если использовать шаблон шины, то идентификаторы уже назначены.

#### Числовые параметры

Вкладка (рис. 33.106, справа) содержит численные значения параметров настройки тестов, задаваемые пользователем.

- **Список нагрузок** – нагрузки в кН, для которых производятся расчеты, указываются через запятую в порядке возрастания.
- **V (м/с)** – значение скорости при выполнении тестов с вращающейся шиной, т.е. тесты 6)-8) в п. 33.3.14.1 *Перечень тестов*.
- **Max sx (%)** – максимальное значение продольного проскальзывания  $s_{x,max}$ .
- **Шаг sx (%)** – шаг, с которым рассчитываются результаты зависимости от продольного проскальзывания. Например, при значении шага 1%, продольная сила  $F_x$  будет рассчитана для значений  $s_x = 1\%, 2\%, 3\% \dots s_{x,max}$ .
- **Max sy (°)** – максимальное значение угла бокового увода  $\alpha_{max} = s_{y,max}$ .
- **Шаг sy (°)** – шаг, с которым рассчитываются результаты зависимости от бокового увода. Например, при значении шага 1°, сила сопротивления боковому уводу (поперечная сила)  $F_y$  будет рассчитана для значений  $s_y = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ \dots s_{y,max}$ .
- **Переходное время (с)** – интервал времени  $T_t$ , в течение которого значение проскальзывания  $s_x$  или  $s_y$  увеличивается на величину шага, рис. 33.107.

- **Время секции жесткости (с)** – интервал времени, в течение которого выполняется расчет статической жесткости шины по одному из направлений, т.е. каждый из тестов 2)-5) в п. 33.3.14.1 *Перечень тестов*.
- **Время расчета для  $s_x$  (с)** – интервал времени  $T_{cx}$ , в течение которого значение проскальзывания  $s_x$  удерживается постоянным в тесте 7), п. 33.3.14.1 *Перечень тестов*, рис. 33.107.
- **Время расчета для  $s_y$  (с)** – интервал времени  $T_{cy}$ , в течение которого значение проскальзывания  $s_y$  удерживается постоянным в тесте 8), п. 33.3.14.1 *Перечень тестов*, рис. 33.107.
- **Интервал усреднения (с)** – интервал времени  $T_a$ , в течение которого рассчитывается средние значения переменных, рис. 33.107.

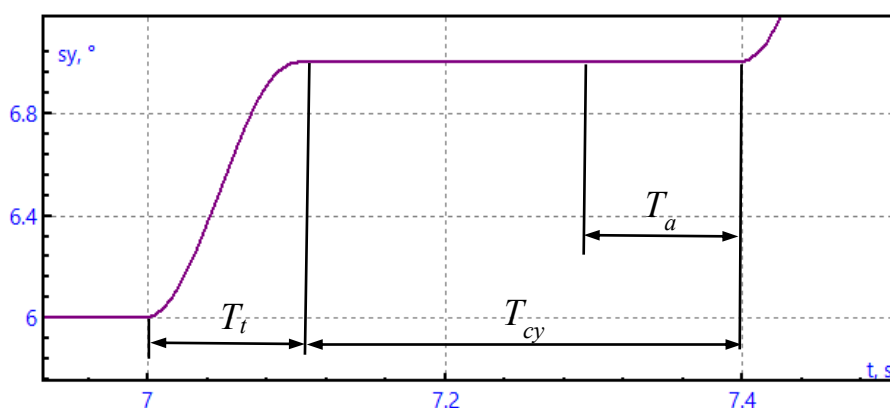


Рис. 33.107. Фрагмент управляемого изменения  $s_y$

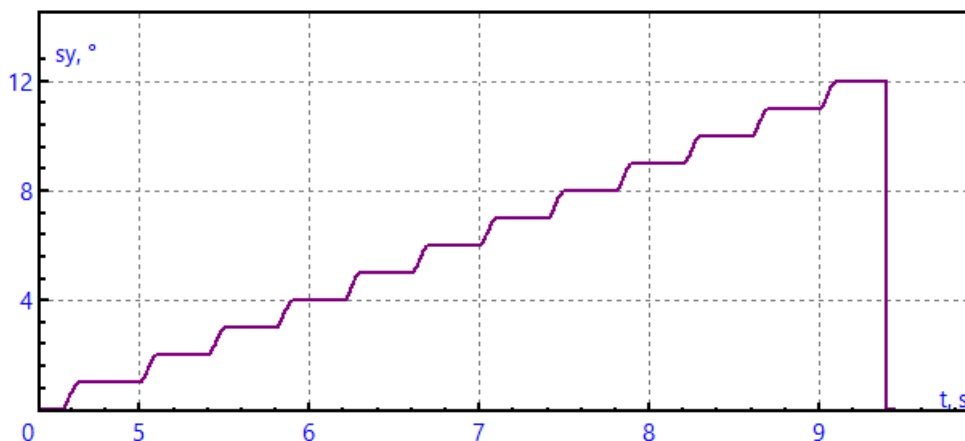


Рис. 33.108. Пример управляемого изменения зависимости угла бокового увода  $s_y$  от времени

На рис. 33.108 приведен пример изменения угла бокового увода при выполнении теста 8). Максимальное значение угла равно  $12^\circ$ , шаг равен  $1^\circ$ . Постоянные времена:  $T_i=0.1с$ ,  $T_{cy}=0.3с$ , интервал времени, на котором происходит усреднение рассчитываемых величин  $T_a=0.1с$ .

### 33.3.14.3. Выполнение серии тестов

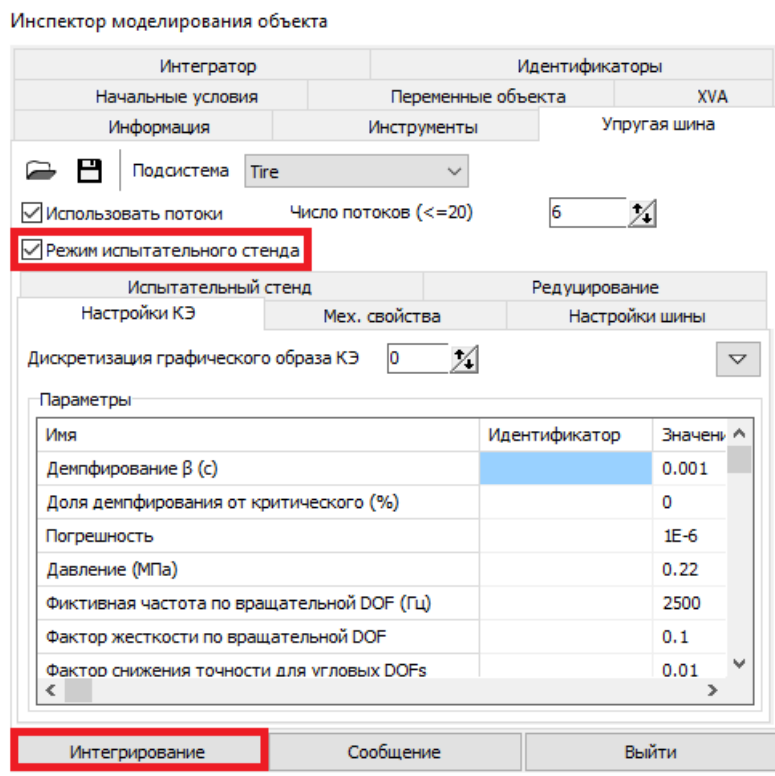


Рис. 33.109. Включение режима испытательного стенда

#### Старт моделирования

- Установите достаточное время моделирования на вкладке **Интегратор**, например, 30с.
- Настройте параметры, п. 33.3.14.2 *Настройки стенда*.
- Включите режим испытательного стенда, рис. 33.109.
- Запустите процесс моделирования по кнопке **Интегрирование**.

При старте моделирования программа автоматически выполняет некоторые необходимые действия:

- выключает все управления идентификаторами;
- устанавливает нулевые значения скоростям.



Рис. 33.110. Окно процесса

#### Процесс выполнения серии тестов

При моделировании программа автоматически выполняет серию тестов, описанную в п. 33.3.14.1 *Перечень тестов*. Процесс отображается в специальном окне с указанием текущей нагрузки на колесо и комментария к текущему тесту, рис. 33.110. В процессе можно использовать графические окна с отображением рассчитываемых величин. Например, на

рис. 33.111 приведен пример построения графика поперечной силы в процессе выполнения соответствующего теста; график соответствует изменению бокового увода в соответствии с рис. 33.108.

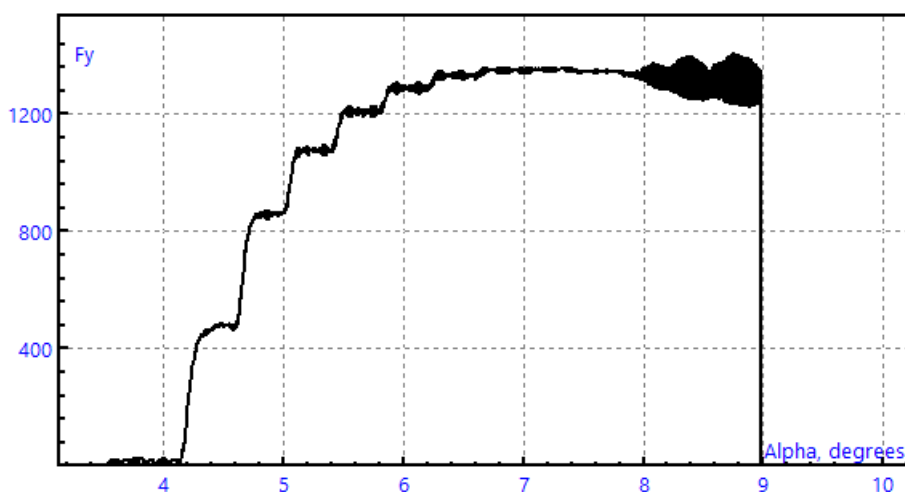


Рис. 33.111. График поперечной силы в зависимости от угла бокового увода

### Завершение моделирования

Расчет может быть прерван пользователем в любой момент с переходом в режим паузы. После прерывания и выхода из режима паузы, после чего можно либо продолжить расчет, либо *прервать с потерей нерассчитанных данных*. При успешном выполнении расчет завершается автоматически после выполнения всей серии тестов. Если задано слишком малое время моделирования, программа переходит в режим паузы, время можно увеличить и продолжить процесс.

После завершения расчета результаты следует сохранить в файл \*.trr (test rig results) рис. 33.112.

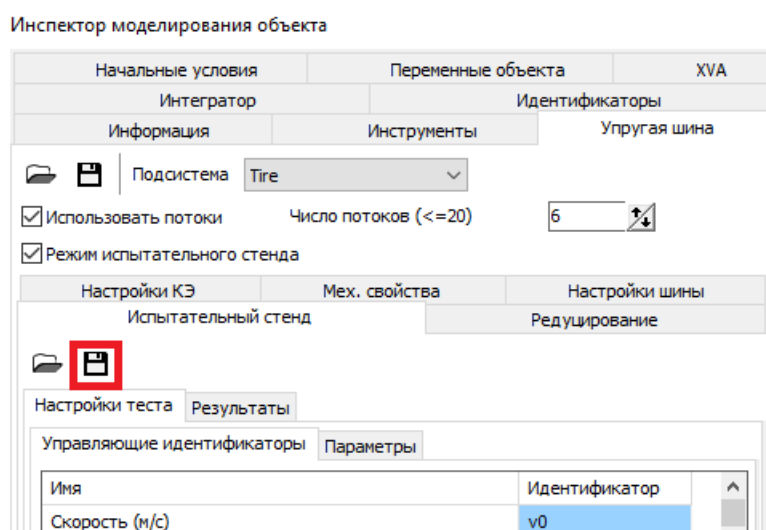


Рис. 33.112. Сохранение результатов файл \*.trr

### 33.3.14.4. Результаты расчетов

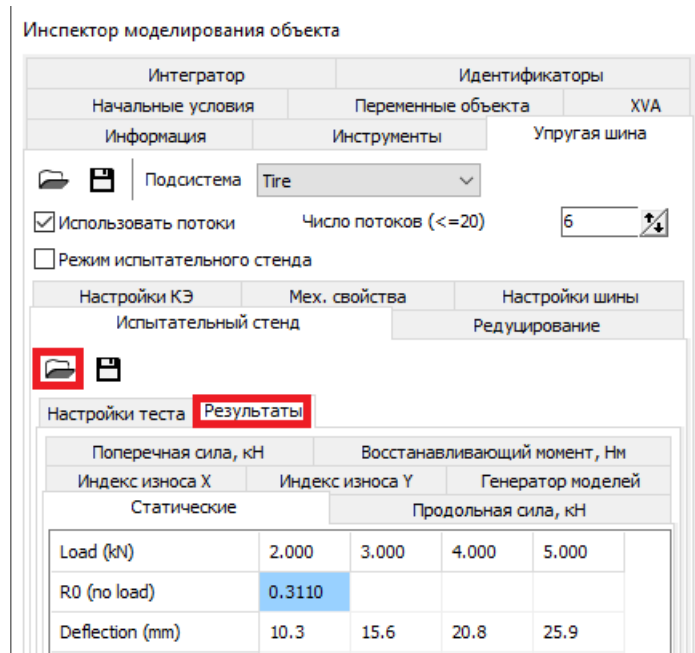



Рис. 33.113. Кнопка чтения файлов результатов \*.trg и вкладка, содержащая результаты

Результаты моделирования виртуального испытательного стенда доступны в двух случаях: либо непосредственно после завершения расчета, либо после прочтения файла результатов по кнопке , рис. 33.113. Появляется вкладка **Результаты**, которая содержит таблицы численных значений рассчитанных переменных.

Наряду с таблицами, результаты можно получить в графической форме через всплывающее меню по правой кнопке мыши, рис. 33.114.

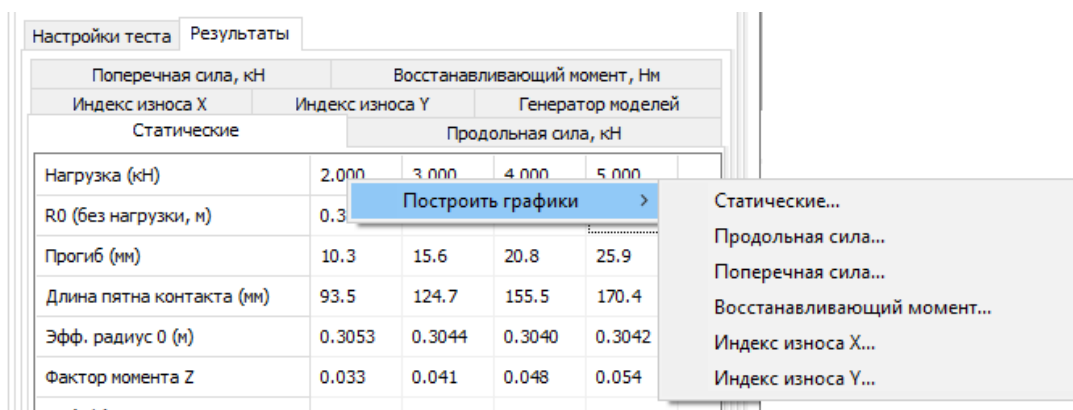


Рис. 33.114. Всплывающее меню построения графиков результатов

#### Статические результаты

Таблица содержит, в основном, результаты выполнения статических тестов, рис. 33.115.

**R0 (без нагрузки, м)** – радиус колеса без нагрузки, результат выполнения стартового теста на равновесие колеса при малой нагрузке, см. п. 33.3.14.1 *Перечень тестов*.

**Прогиб (мм)** – статический прогиб шины под заданной нагрузкой, рис. 33.116.

**Длина пятна контакта (мм)** – размер пятка контакта шины с дорогой в продольном направлении.

**Эфф. радиус 0 (м)** – эффективный радиус шины при свободном качении, п. 33.3.13.6  
*Определение эффективного радиуса свободно катящегося колеса.*

Статические	Продольная сила, кН			
	2.000	3.000	4.000	5.000
Нагрузка (кН)	2.000	3.000	4.000	5.000
R0 (без нагрузки, м)	0.3110			
Прогиб (мм)	10.3	15.6	20.8	25.9
Длина пятна контакта (мм)	93.5	124.7	155.5	170.4
Эфф. радиус 0 (м)	0.3053	0.3044	0.3040	0.3042
Фактор момента Z	0.033	0.041	0.048	0.054
Kx (Н/м)	100372	118279	122199	124868
Ky (Н/м)	110506	115213	117480	116930
Kz (Н/м)	195043	191598	196685	200392
Kaz (Н*м)	1104	2072	3141	4001

Рис. 33.115. Пример таблицы статических результатов

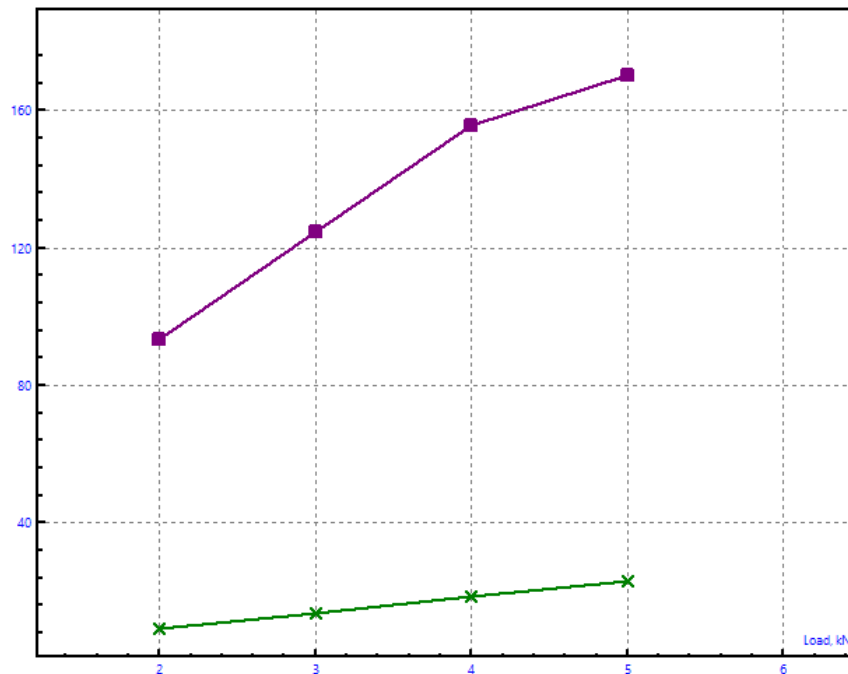


Рис. 33.116. Пример зависимости длины пятна контакта (верхний график) и статического прогиба шины в зависимости от нагрузки

**Фактор момента Z** – переменная  $k_{mz}$ , имеющая размерность длины, которая используется для оценки сверху максимальное значение момента  $M_{z,max}$  сопротивления повороту стоящего колеса вокруг вертикальной оси. Оценка этой величины рассчитывается по формуле

$$M_{z,max} \approx k_{mz} f_0 N,$$

где  $f_0$  – коэффициент трения покоя,  $N$  – нагрузка на колесо. В примере на рис. 33.115 имеем  $k_{mz} = 0.041$ м при нагрузке  $N=3000$ Н. При значении  $f_0 = 0.8$  получим  $M_{z,max} \approx 98$ Нм. На рис. 33.117 приведен пример графика зависимости момента  $M_z$  от времени при моделировании поворота стоящего колеса вокруг вертикальной оси, см. также п. 33.3.13.4.3 *Статические тесты для оценки жесткости шины на поперечный, продольный сдвиги колеса и*

поворот вокруг вертикальной оси. На графике максимальное значение момента  $M_{z,max} \approx 96\text{Нм}$ , что хорошо согласуется с полученной оценкой.

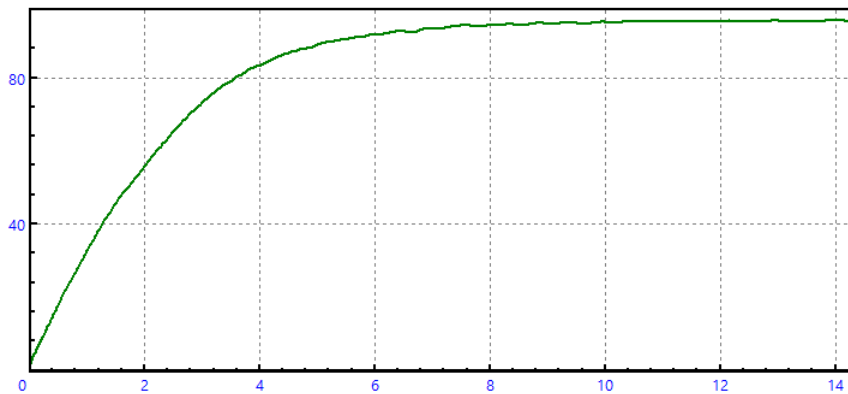


Рис. 33.117. Пример зависимости от времени момента сопротивления повороту

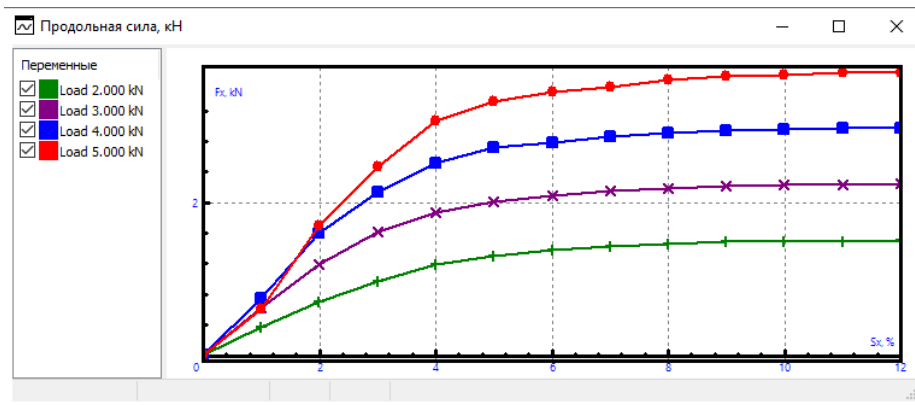


Рис. 33.118. Пример зависимости продольной силы от проскальзывания

**Продольная сила, кН** – зависимость силы взаимодействия шины с дорогой  $F_x$  (кН) от продольного проскальзывания  $s_x$  (%), рис. 33.118.

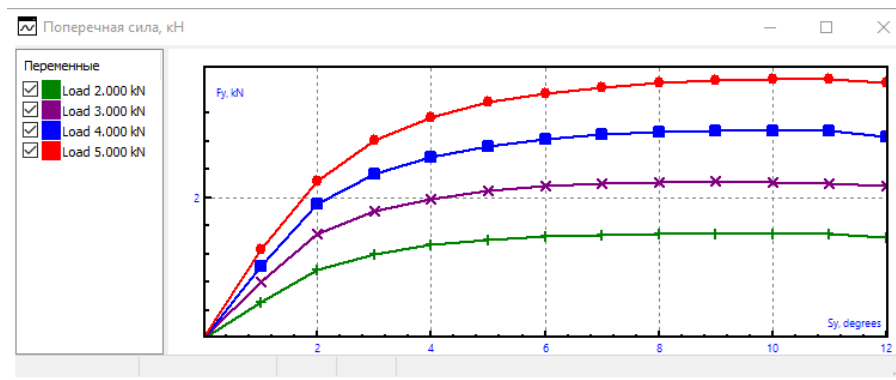


Рис. 33.119. Пример зависимости поперечной силы от бокового увода

**Поперечная сила, кН** – зависимость силы взаимодействия шины с дорогой  $F_y$  (кН) от угла бокового увода (поперечного проскальзывания)  $s_y$  ( $^\circ$ ), рис. 33.119.

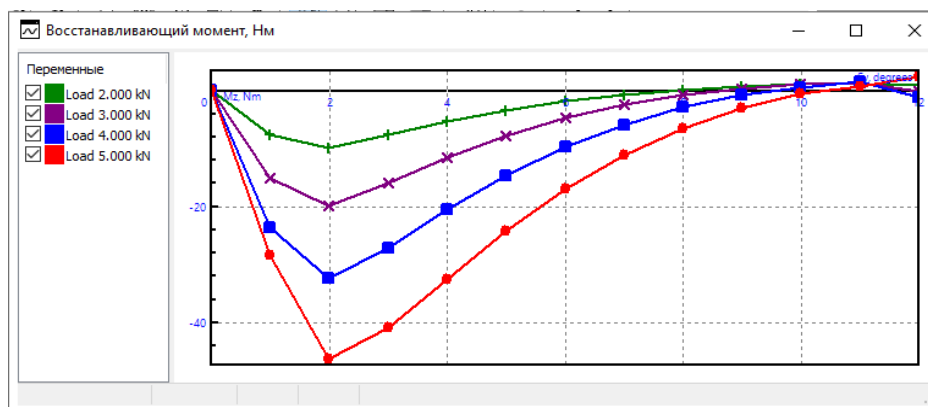


Рис. 33.120. Пример зависимости восстанавливающего момента от бокового увода

**Восстанавливающий момент, Нм** – зависимость восстанавливающего момента  $M_z$  от угла бокового увода  $s_y$  ( $^\circ$ ), рис. 33.120.

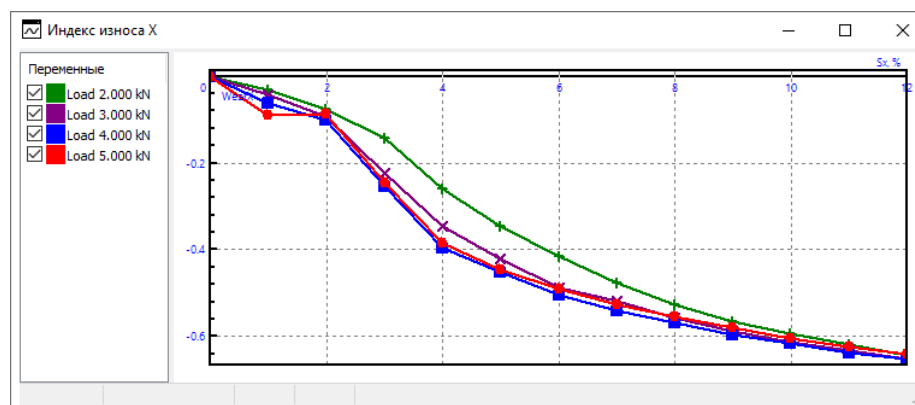


Рис. 33.121. Пример зависимости показателя износа  $w_x$  от продольного проскальзывания

**Индекс износа X** – зависимость показателя износа  $w_x$  от продольного проскальзывания  $s_x$ , рис. 33.119.

Безразмерный индекс износа рассчитывается по формуле

$$w_x = \frac{N_{fr}}{Nv(s_x/100)},$$

где  $N_{fr}$  – мощность сил трения в контакте шины с дорогой (т.е. учитываются только силы трения скольжения, силы трения сцепления работу не совершают),  $N$  – нагрузка на колесо,  $v$  – скорость продольного движения.

**Индекс износа Y** – зависимость показателя износа  $w_y$  бокового увода  $s_y$ , рис. 33.122.

Безразмерный индекс износа рассчитывается по формуле

$$w_y = \frac{N_{fr}}{Nv(s_y 2\pi/180)}.$$

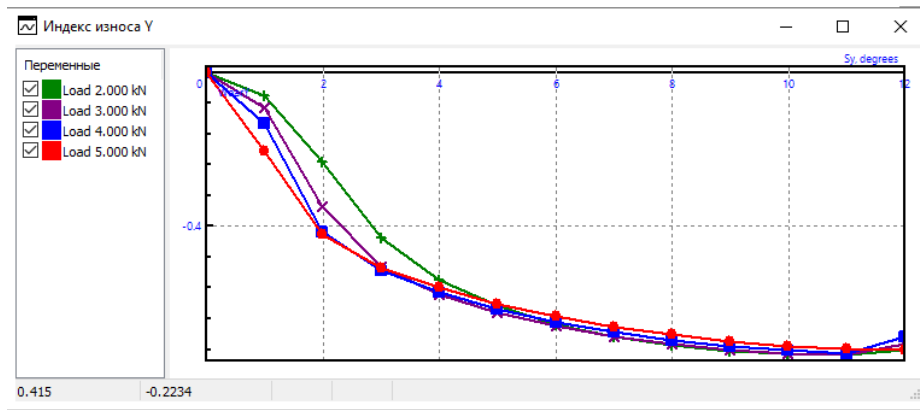


Рис. 33.122. Пример зависимости показателя износа  $w_y$  от бокового увода

### 33.3.15. Создание упрощенных безынерционных моделей шины на основе результатов тестов

#### 33.3.15.1. Общая информация

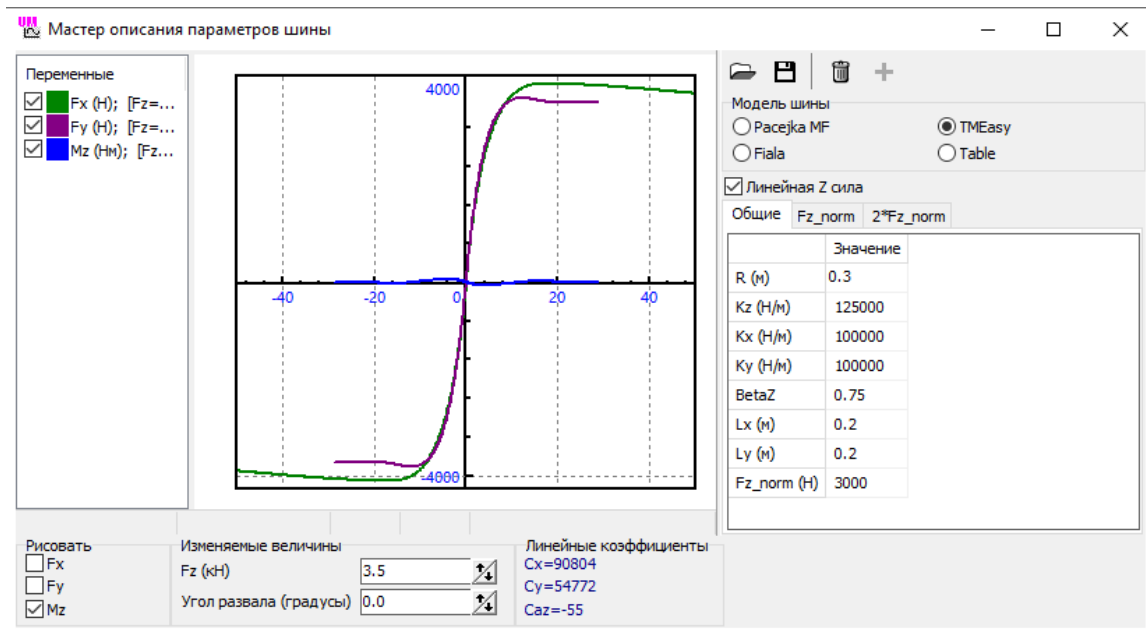


Рис. 33.123. Инструмент задания параметров бкзынерционных моделей шины

Создание упрощенных моделей шины является одним из важных результатов выполнения серии тестов, описанных в п. 33.3.14. *Режим испытательного стенда: автоматическое исследование свойств шины.* В UM реализованы несколько моделей такого типа: Расежка MF, FIALA, TMEasy, Табличная, рис. 33.123, Глава 12. Упрощенная модель шины является очень быстрой, поэтому используется почти всегда при анализе динамики автомобилей, требующем выполнении большого числа компьютерных экспериментов. Недостатком упрощенной модели является сложность получения их параметров, для чего, с основным, используются испытательные стенды. На практике, например, часто невозможно быстро получить такие параметры при изменении давления в шине.

Упрощенная модель, построенная в соответствии с результатами выполнения тестов, является *согласованной* с соответствующей упругой шиной и рекомендуется к

использованию совместно с конечно-элементной моделью при исследовании динамики колесной машины, п. 33.4.4.5 *Согласованные модели безынерционных и упругих шин*.

Рассматриваемый здесь инструмент позволяет рассчитать параметры упрощенных моделей двух типов: табличной и TMEasy, рис. 33.124. Основой является табличная модель, а модель TMEasy [7] носит вспомогательный характер и позволяет, в частности, использовать разработанную модель в других программах моделирования динамики автомобиля, таких как Simpack.

### 33.3.15.2. Процесс создания моделей

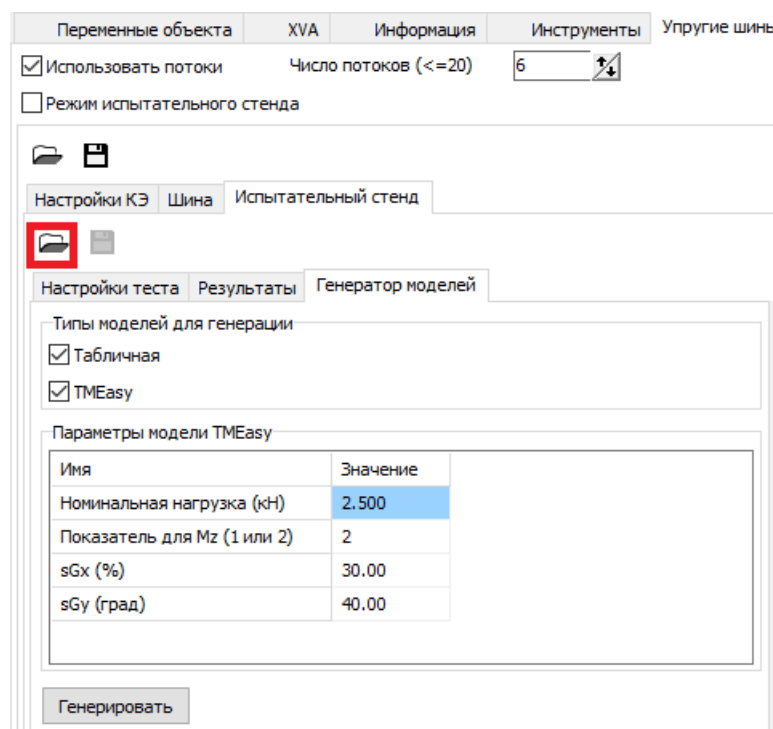



Рис. 33.124. Вкладка генератора безынерционной модели шины. Кнопка чтения результатов тестов

Генератор моделей шины на рис. 33.124 доступен после завершения расчетов в режиме испытательного стенда или после чтения результатов такого расчета по кнопке , п. 33.3.14 *Режим испытательного стенда: автоматическое исследование свойств шины*.

Для создания модели следует

- указать тип генерируемых моделей;
- задать параметры модели TMEasy:
  - номинальная нагрузка, которая используется также при генерировании табличной модели шины;
  - показатель степени  $nMz$  в модели восстанавливающего момента  $Mz$  (1 или 2); исходной формулировке модели соответствует  $nMz=1$ , а модификации  $nMz=2$ ;
  - параметры  $sGx$ ,  $sGy$  – значения проскальзывания, при которых модели продольной и поперечной силы соответствуют чистому скольжению;
- щелкнуть на кнопке **Генерировать**, выбрать или задать имя файла модели для файлов \*.tr; для табличной модели будет создан файл '[Имя].tr', а для модели TMEasy создается файл 'TMEasy [Имя].tr', где [Имя] – заданное пользователем

имя; например, при задании имени Test будут созданы файлы Test.tr и TMEasy Test.tr.

### 33.3.15.3. Пример табличной модели

Рассмотрим табличную модель, созданную на основе примеров результатов тестов, представленных в п. 33.3.14.4 *Результаты расчетов*. Табличная модель использует интерполяционные полиномы, построенные на основе поточечного задания кривых, поэтому следует ожидать хорошего совпадения результатов тестов с табличной моделью, рис. 33.125. Плавные кривые на рисунке построены по табличной модели с использованием инструмента, представленного на рис. 33.123. Маркеры соответствуют результатам тестов с шиной, п. 33.3.14.4.

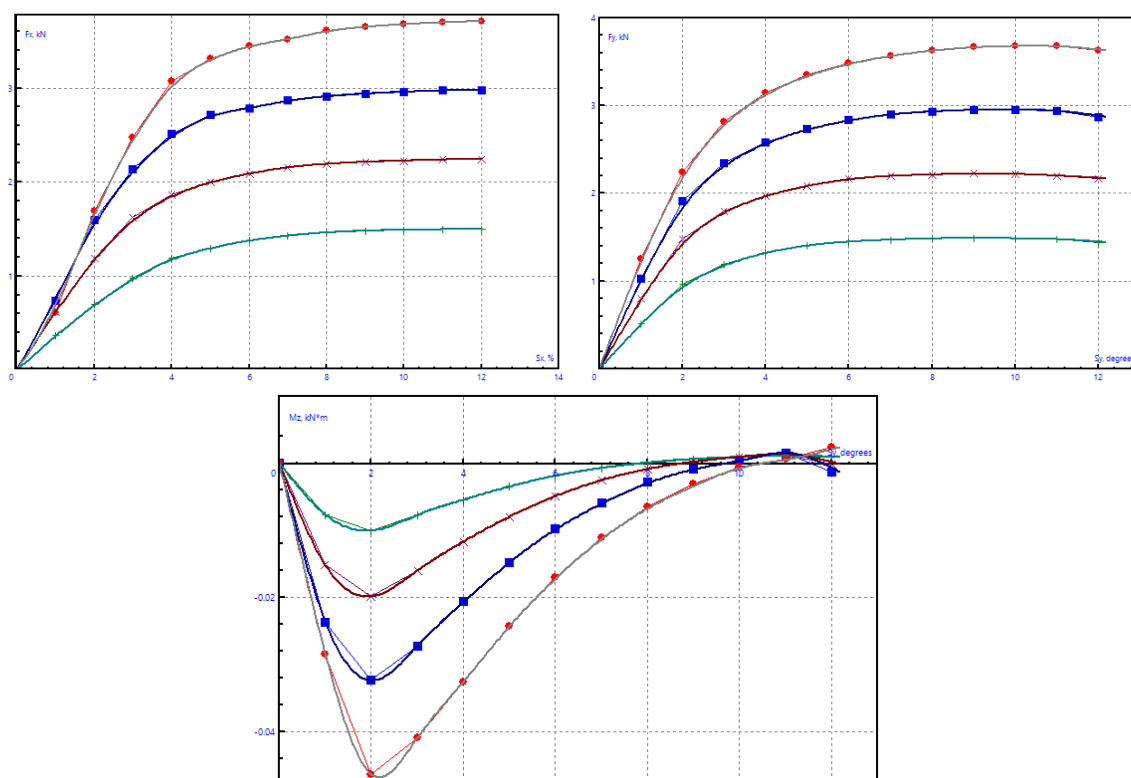


Рис. 33.125. Пример сравнения табличной модели с результатами тестов

### 33.3.15.4. Пример модели TMEasy

Для построения модели TMEasy по результатам тестов используется метод наименьших квадратов для определения параметров модели. Поскольку модель TMEasy очень проста и зависит от малого числа параметров, то расхождение с порождающими результатами тестом гораздо больше, чем на рис. 33.125. Особенно значительные расхождения наблюдаются в восстанавливающем моменте, поэтому мы предлагаем простую модификацию TMEasy, которую опишем ниже.

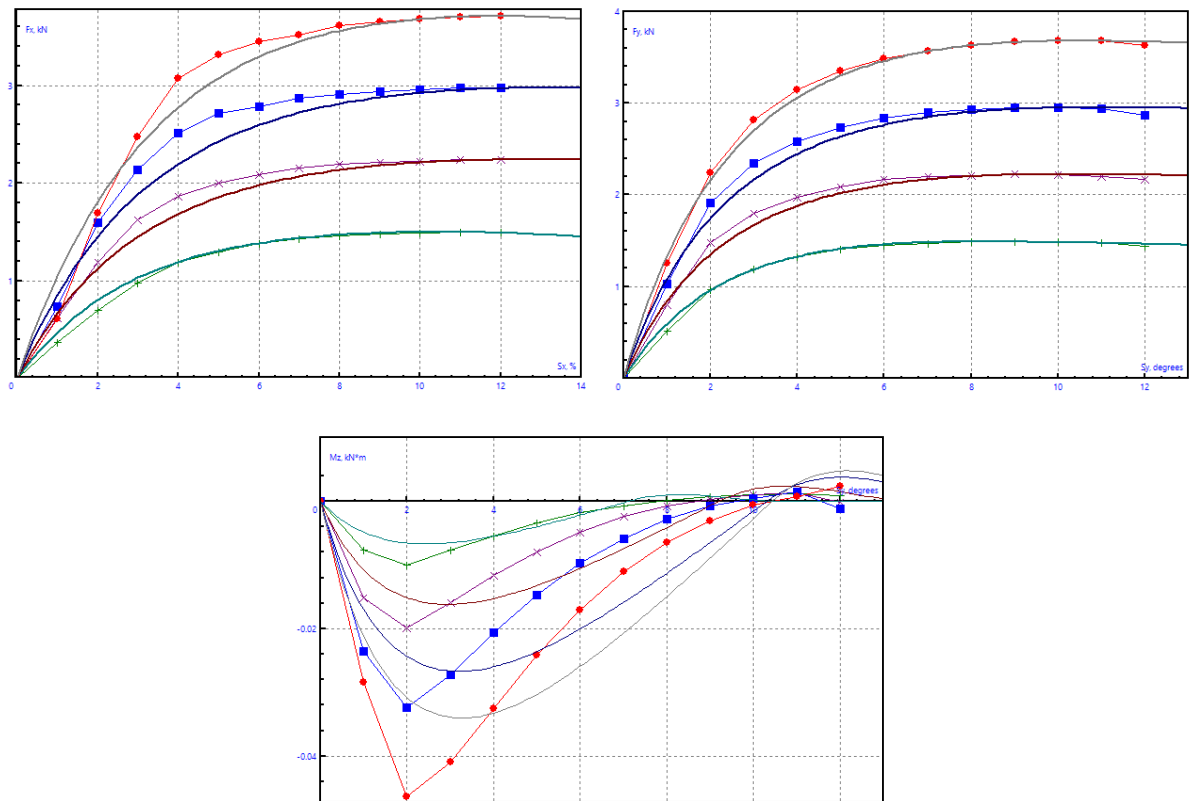


Рис. 33.126. Сравнения TMEasy с результатами тестов при  $nMz=1$

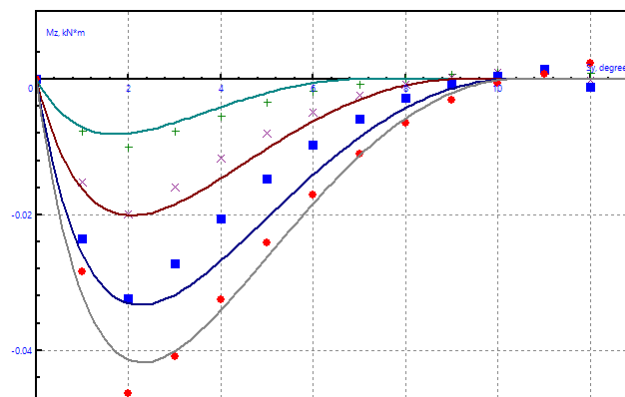


Рис. 33.127. Сравнения TMEasy с результатами тестов при  $nMz=2$

Сравнение не модифицированной модели TMEasy ( $nMz=1$ ) с результатами тестов приведены на рис. 33.126. Лучшее приближением имеет модель поперечной силы, которая является наиболее важной при моделировании динамики автомобиля. Продольная сила также может использоваться, хотя и имеет меньшую точность. При использовании модифицированной модели результаты по моменту гораздо лучше, рис. 33.127.

В качестве модификации мы введем изменение в параметр  $n/L$  [7]. При  $nMz=2$  он рассчитывается следующим образом:

$$\frac{n}{L} = \begin{cases} (n/L)_0 (1 - s_y/s_Q^0)^2, & s_y \leq s_Q^0, \\ 0, & s_y > s_Q^0. \end{cases}$$

### 33.3.16. Верификация модели упругой шины

Для верификации разработанной модели УШ используются материалы, опубликованные другими авторами, а также результаты стендовых испытаний.

#### 33.3.16.1. Сравнение статических испытаний с экспериментом

В диссертации [8] автор приводит результаты статических испытаний шины Dunlop P195-65R15: зависимость прогиба от нагрузки. Нами была разработана модель шины с учетом послойного писаний материала, приведенного в диссертации. Сравнение численного расчета прогиба шины от нагрузки с экспериментом приведено на рис. 33.128. Маркер соответствует эксперименту, сплошные линии – расчет для различных вариантов моделирования многослойного материала.

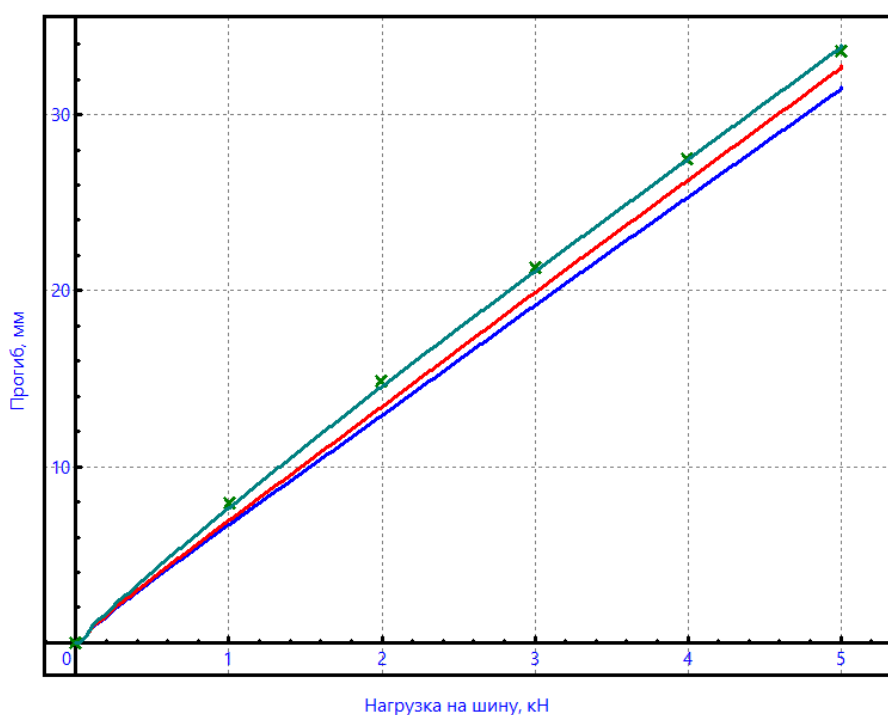


Рис. 33.128. Сравнение статического эксперимента для шины Dunlop P195-65R15 с результатами расчета

#### 33.3.16.2. Сравнение расчетов со стендовыми испытаниями шины

На испытательном стенде [9] (рис. 33.129) получена зависимость поперечной силы от угла бокового увода для шины Dunlop P195-70R15 при различных нагрузках и скоростях движения. Результаты стендовых испытаний шины любезно представлены руководителем разработчиков стенда профессором А.И. Федотовым, рис. 33.130: выражаем искреннюю благодарность профессору Федотову и всем разработчикам стенда.

Сравнение результатов расчета по модели УШ с испытаниями приведено на рис. 33.131 и показывает хорошее совпадение. Экспериментальные данные для различных скоростей помечены маркером, расчету для скорости 3,6 м/с соответствуют сплошные линии.



Рис. 33.129. Стенд для испытаний шины

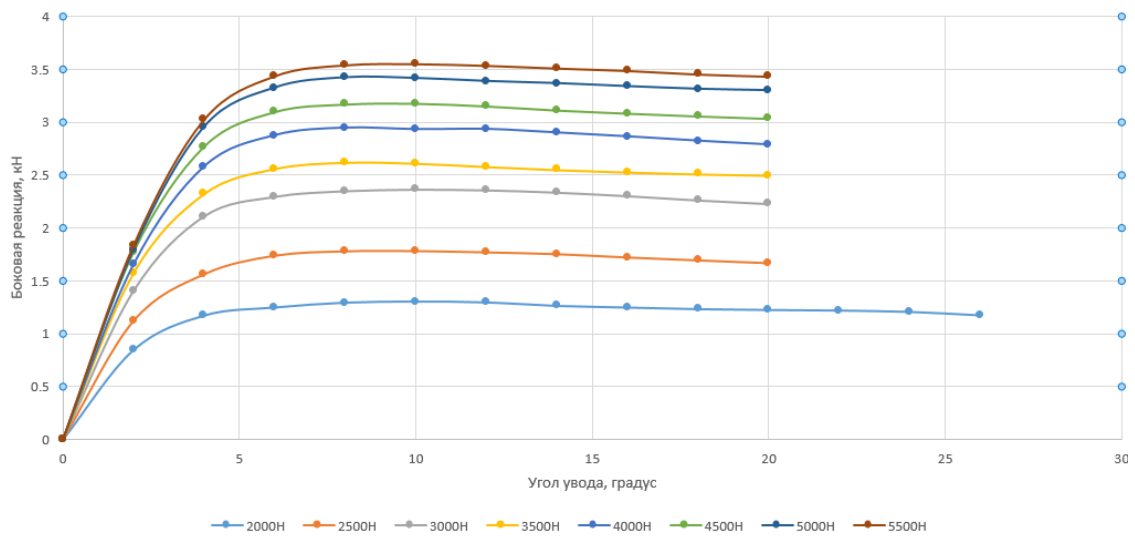


Рис. 33.130. Результаты стендовых испытаний для скорости 3.6 м/с

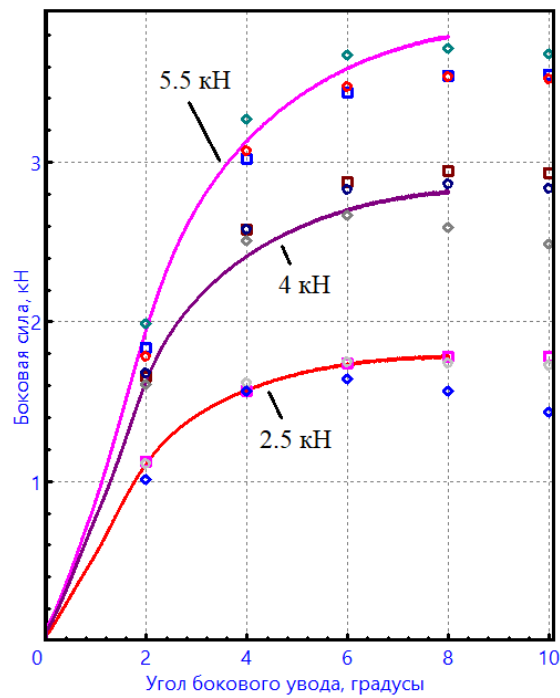


Рис. 33.131. Сравнение боковой силы от бокового увода для шины Dunlop P195-70R15 с результатами расчета

## 33.4. Создание и исследование моделей колесных машин с упругими шинами

### 33.4.1. Общая информация о моделировании колесных машин с упругими шинами

Упругие шины (УШ) добавляются в программе ввода к **существующим моделям колесных машин (КМ)**, динамика которых может моделироваться без использования УШ. Например, УШ могут быть добавлены к любой существующей модели автомобиля или монорельсового экипажа, п. 33.4.3 *Добавление колес с упругими шинами к моделям колесных машин*, рис. 33.132, рис. 33.133, рис. 33.134.

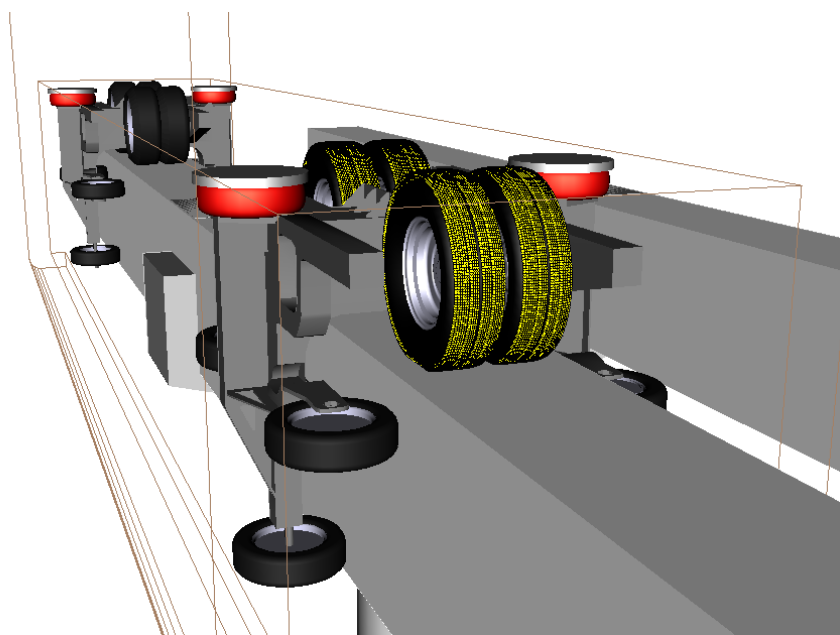


Рис. 33.132. Модель монорельсового экипажа с четырьмя упругими шинами



Рис. 33.133. Модель легкового автомобиля с двумя упругими шинами

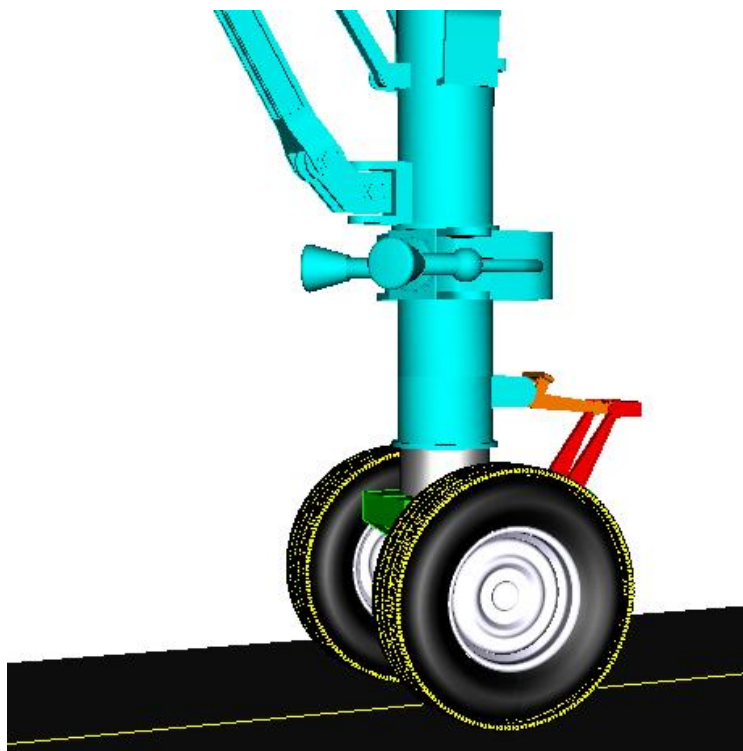


Рис. 33.134. Модель шасси самолета

**В случае монорельсовых экипажей УШ можно назначать только тяговым колесам.**

Модель КМ может включать **любое число УШ**: от одной до общего числа колес в модели. Поскольку конечно-элементная модель УШ имеет большое число степеней свободы, то моделирование динамики КМ с их использованием происходит гораздо медленнее, чем моделирование КМ без УШ. Поэтому следует **минимизировать число УШ**, включенных в модель. Для этого в UM разработаны специальные средства.

- УШ может назначаться колесу динамически, то есть в **программе моделирования любая УШ может быть назначена любому колесу**. Например, если модель легкового автомобиля включает две УШ, то возможно переключение между следующими вариантами моделирования динамики автомобиля без закрытия и модификации модели:
  - без УШ, то есть все колеса используют упрощенную безынерционную модель шины;
  - с одной УШ, назначенной любому из четырех колес;
  - с двумя УШ, назначенными любой паре колес (передних, задних, два варианта, с левой или правой сторон, по диагонали).
- В процессе моделирования УШ могут **динамически («на лету»)** заменять **безынерционные шины**. Например, УШ могут активироваться на участке преодоления препятствия, выключаться после проезда препятствия и затем включаться снова перед новым препятствием.

Для добавления УШ к моделям КМ пользователь должен создать **базу данных моделей УШ** или воспользоваться существующей, п. 33.4.2 *База данных упругих шин*.

**Замечание.** Для **монорельсовых экипажей** в текущей версии UM допускается назначение УШ только ведущим колесам и не предусмотрено назначение УШ направляющим и стабилизирующим колесам, рис. 33.132.

### 33.4.2. База данных упругих шин

Для создания моделей КМ с УШ следует создать базу данных моделей УШ, разработанных в соответствии с п. 33.3.12 *Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины*. База данных располагается в том же каталоге, в котором находятся модели безынерционных шин \*.tr, поставляемых вместе с программой UM: {Данные UM}\Tire\}. Например, в UM10 это может быть каталог

c:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\10\Tire\

База данных создается следующим образом.

- В соответствии с п. 33.3.12 *Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины* для шаблона шины создаются необходимые модели шин, включающие файлы \*.tire, \*.tst, \*.tur, размещенные в соответствующих подкаталогах шаблона.
- Каталог шаблона вместе со всеми подкаталогами копируется по пути {Данные UM}\Tire\}.
- Из скопированного в базу данных каталога шаблона удаляются все файлы, кроме файлов \*.sbs, \*.tire, \*.tst, \*.tur в соответствующих подкаталогах, п. 33.3.1.7 *Создание файла модели колеса для базы данных*.

### 33.4.3. Добавление колес с упругими шинами к моделям колесных машин

В случае монорельсовых экипажей УШ можно назначать только тяговым колесам.

Рассмотрим последовательность действий при добавлении УШ к модели КМ.

- 1) Загрузите модель КМ в программе ввода.
- 2) Добавьте к КМ модель УШ, прочитав из файла \*.sbs с использованием кнопки



или команды меню **Правка | Прочитать из файла**.

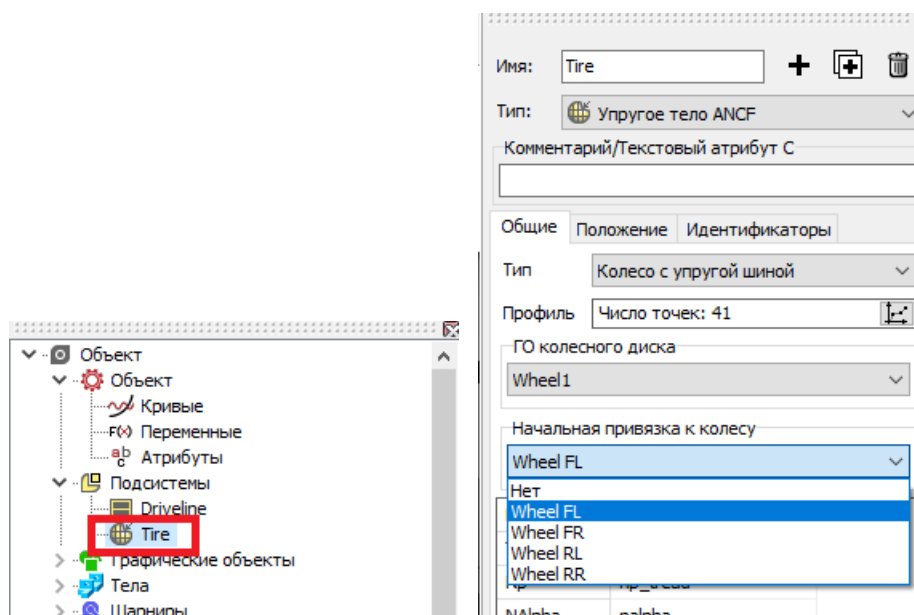


Рис. 33.135. Привязка упругой шины к колесу

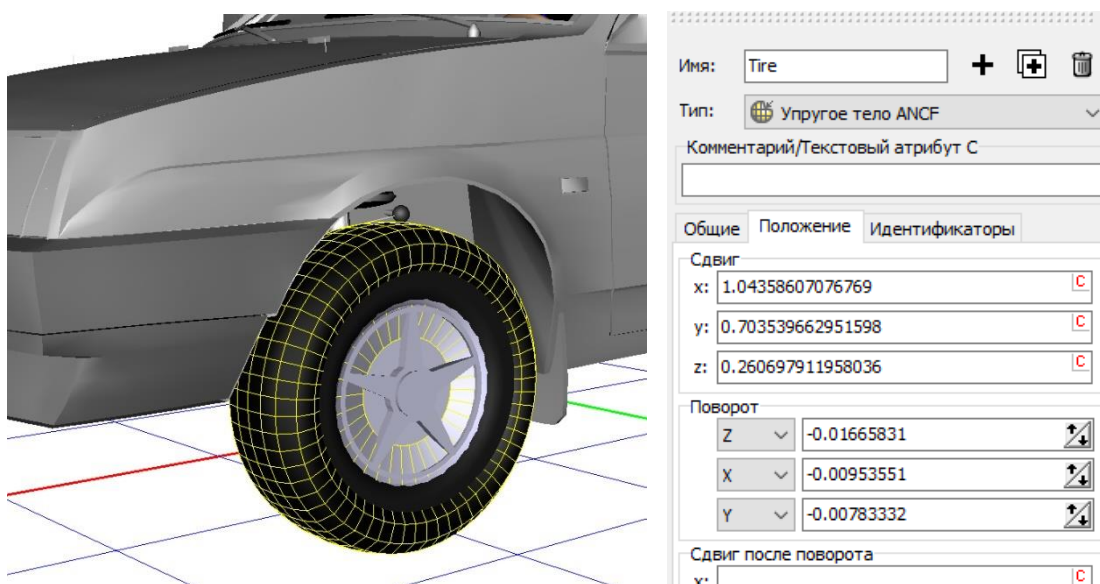


Рис. 33.136. Упругая шина, привязанная к переднему левому колесу модели автомобиля

- 3) На вкладке инспектора, соответствующей описанию подсистемы УШ, установите начальную привязку УШ к абсолютно твердому телу, моделирующему колесо. Для этого используется выпадающий список колес, рис. 33.135. После установления привязки добавленное колесо автоматически позиционируется в нужном положении, а упругой подсистеме назначаются соответствующие сдвиги и повороты, рис. 33.136. Редактирование координат привязки (положения подсистемы) блокируется.

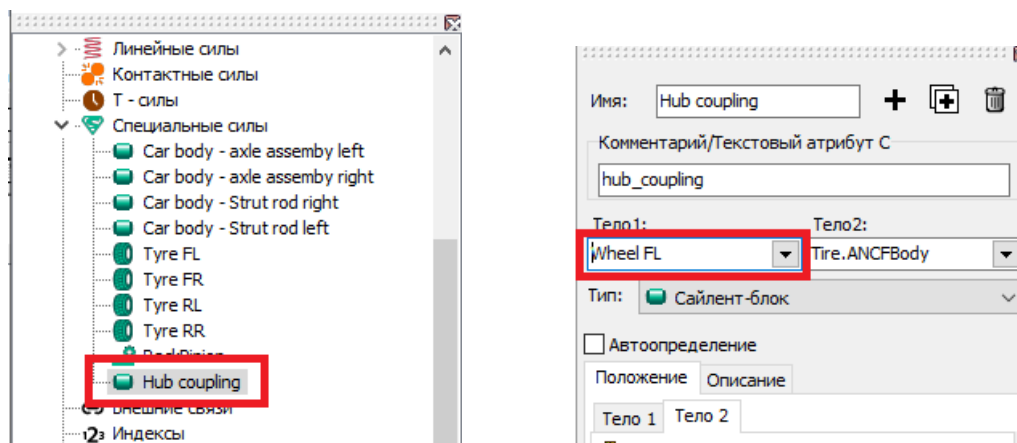


Рис. 33.137. Связь упругой шины с колесом с помощью сайлентблока

- 4) Перейдите к модели добавленного сайлентблока и назначьте колесо привязки в качестве первого тела, рис. 33.137.
- 5) Если остальные УШ такие же, как и первая, скопируйте нужное число раз подсистему УШ и сайлентблока, меняя каждый раз привязку к колесам.

Как указано выше (п. 33.4.1 *Общая информация о моделировании колесных машин с упругими шинами*), привязка может быть произвольным образом изменена в программе моделирования.

- 6) Если нужно добавить УШ другого типа (например, в случае трактора), то выполняются повторно действия 2) - 4). При добавлении УШ разных типов следует в их исходном описании использовать разные идентификаторы для описания параметров. Идентификаторы также можно переименовать в модели КМ, например, массу и моменты инерции колесного диска *mrims*, *irimx*, *irimy*.
- 7) Удалите из списка идентификаторы, параметризующие разбивку КШ, например, *nalpha*, *np\_tread*. Изменение разбивки в модели КМ не предусмотрено.
- 8) Сохраните модель, при необходимости – под другим именем.

## 33.4.4. Подготовка модели колесной машины с упругими шинами к моделированию

### 33.4.4.1. Назначение колесам моделей упругих шин

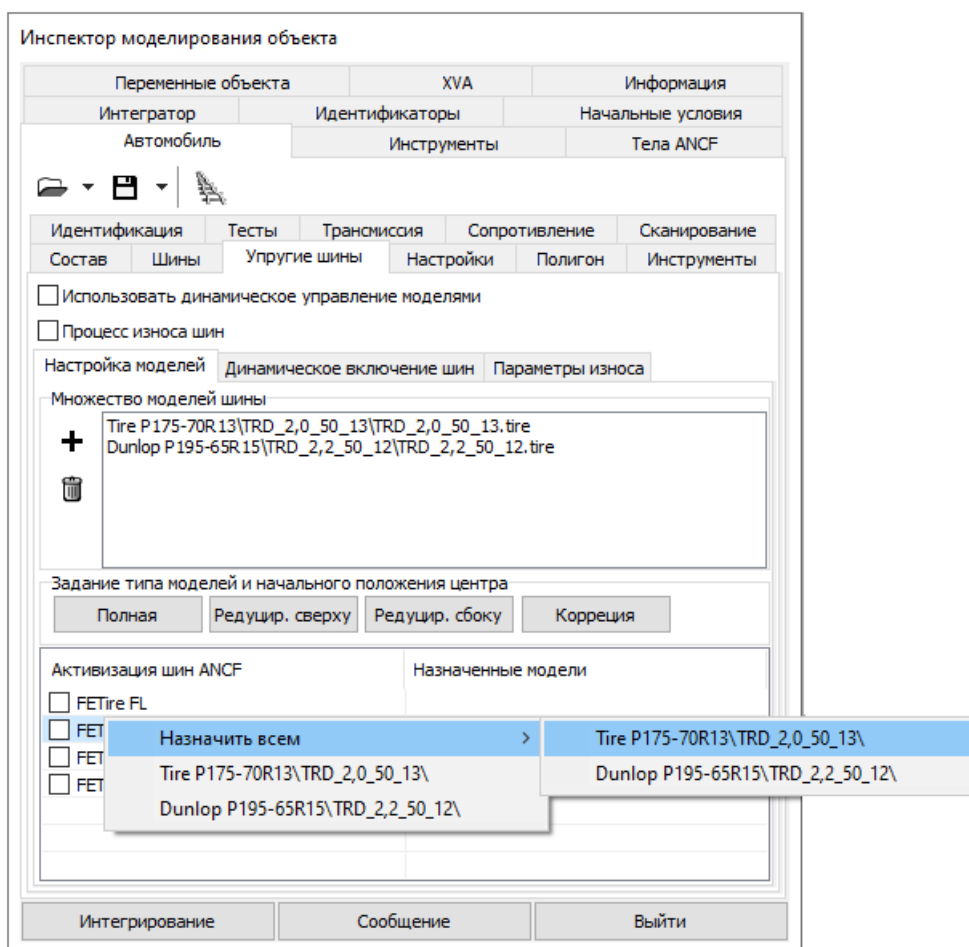


Рис. 33.138. Создание и назначение списка моделей УШ

В программе моделирования для работы с УШ следует назначить им модели из базы данных. Для это используется вкладка **Автомобиль | Упругие шины** инспектора моделирования, рис. 33.138.

#### Создание множества моделей УШ

Множество должно содержать одну или несколько моделей \*.tire. Для добавления следует использовать кнопку **+** на рис. 33.138, и в появившемся окне выбрать файл \*.tire из базы данных, п. 33.4.2 *База данных упругих шин*. В список следует включить шины, которые будут использоваться при моделировании динамики КМ.

#### Назначение моделей упругим шинам

Для назначения УШ моделей из созданного множества щелкните правой кнопкой мыши на УШ и назначьте ей модель с помощью появившегося всплывающего меню, рис. 33.138. Можно одним действие назначить модели всем УШ с помощью команды **Назначить всем**.

### 33.4.4.2. Активизация упругих шин

УШ с назначенными моделями можно активировать, в этом случае упрощенная модель шины выключается и включается конечно-элементная. Активные модели в списке выделены галочками, рис. 33.139- рис. 33.141.

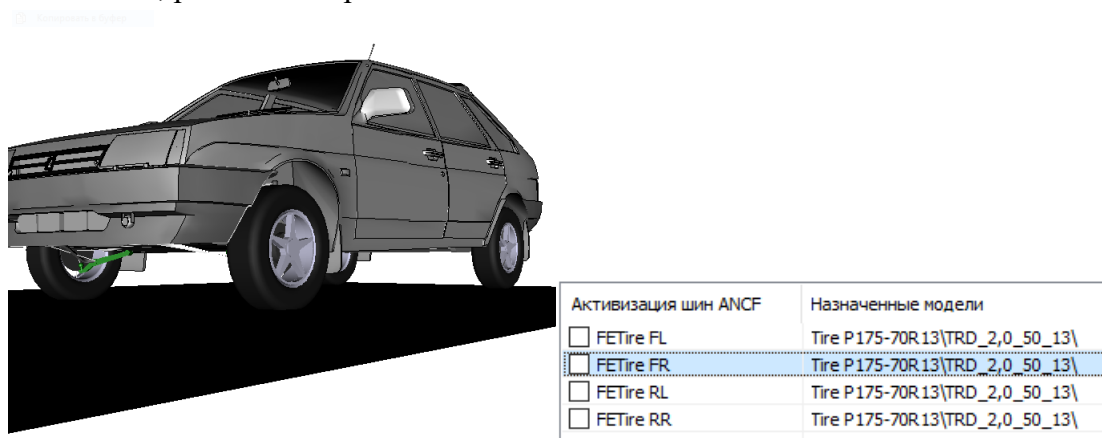


Рис. 33.139. Все упругие шины выключены

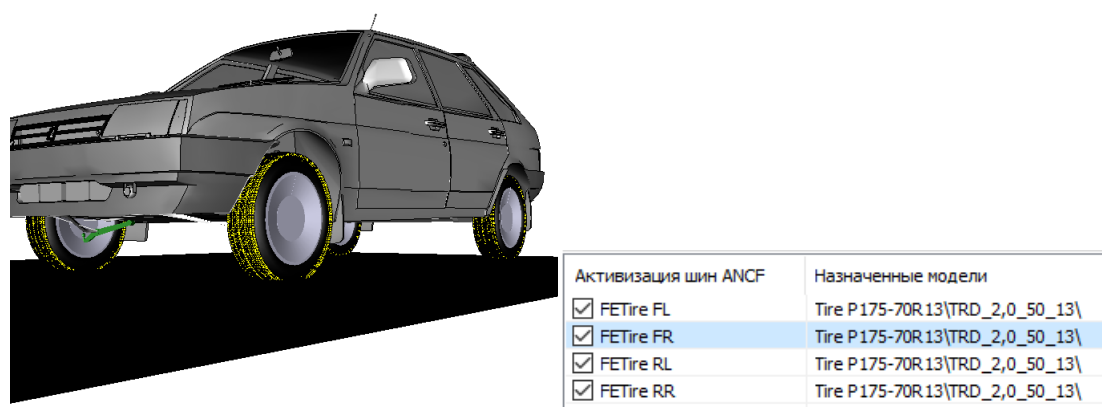


Рис. 33.140. Все упругие шины активны

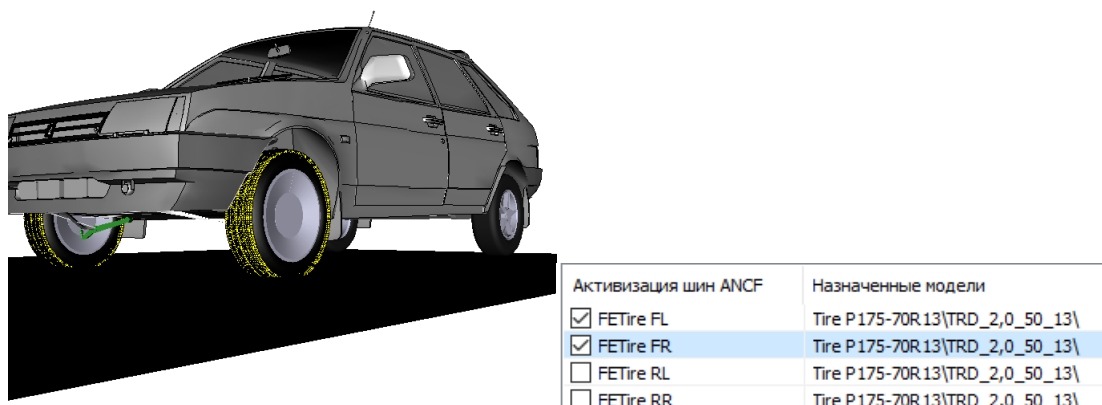


Рис. 33.141. Активные упругие шины для передних колес

Выключение УШ ускоряет процесс моделирования, поскольку из модели КМ исключаются соответствующие степени свободы. Это свойство используется для динамического включения/выключения УШ, например, перед препятствием УШ включается, а после

проезда – выключается, п. 33.4.5 *Динамическое управление включением/выключением упругих шин.*

### 33.4.4.3. Задание типа редуцирования модели шины

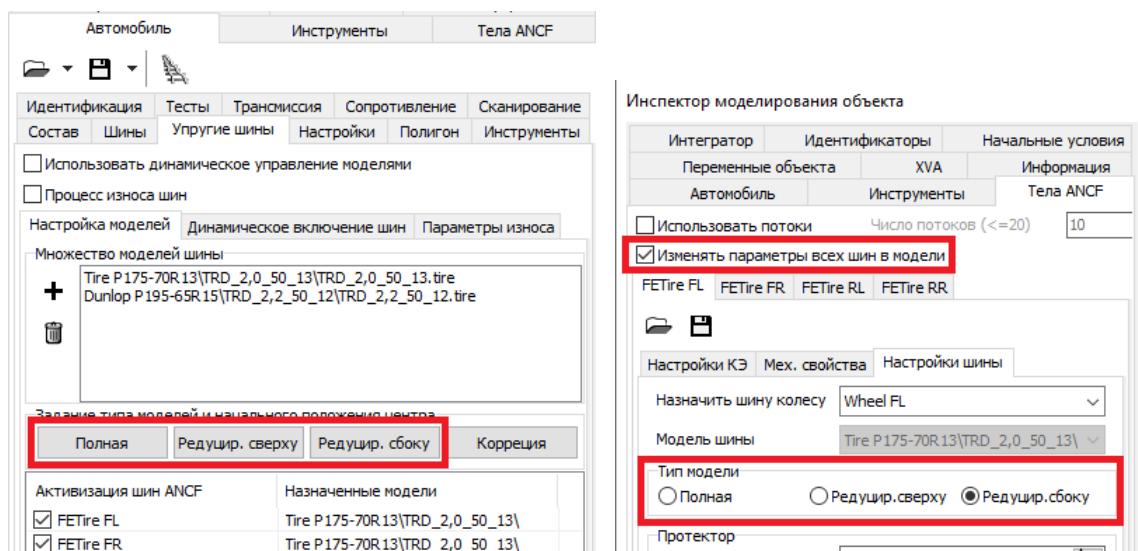


Рис. 33.142. Задание типа модели УШ всем колесам

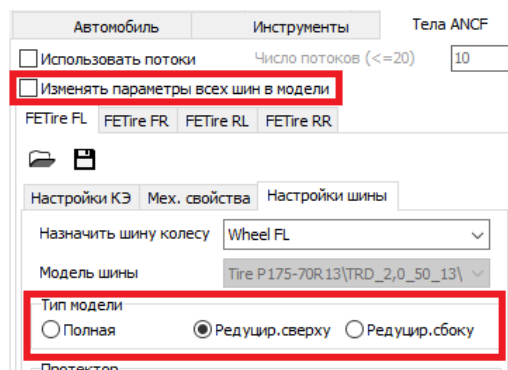
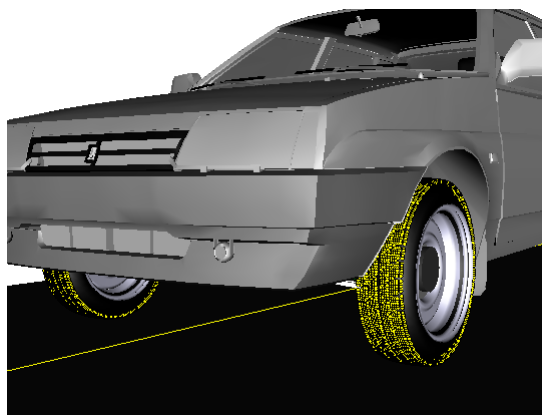


Рис. 33.143. Задание типа модели УШ отдельному колесу

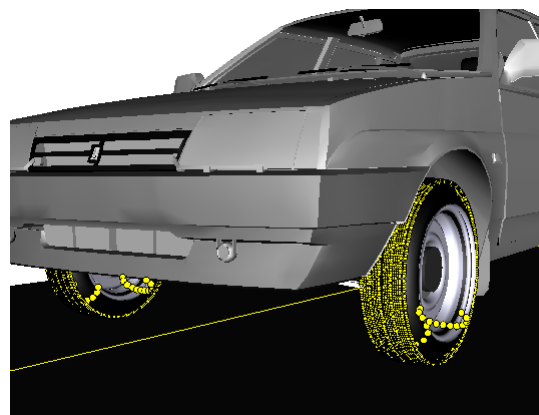
Если назначенная модель УШ включает один или два варианта редуцирования (см. п. 33.2.7 *Редуцированные модели шины*, 33.3.12 *Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины*), можно назначить выбранный вариант как всем, так и отдельным колесам:

- для задания типа УШ всем колесам следует использовать либо кнопки на вкладке **Автомобиль | Упругие шины | Настройка модели** (рис. 33.142, слева), либо группу **Тип модели** на вкладке **Тела ANCF | Настройки шины** при условии включенной опции **Изменять параметры всех шин в модели** (рис. 33.142, справа);
- для задания типа УШ отдельному колесу следует использовать группу **Тип модели** на вкладке **Тела ANCF | Настройки шины** при условии *отключенной* опции **Изменять параметры всех шин в модели** (рис. 33.143).

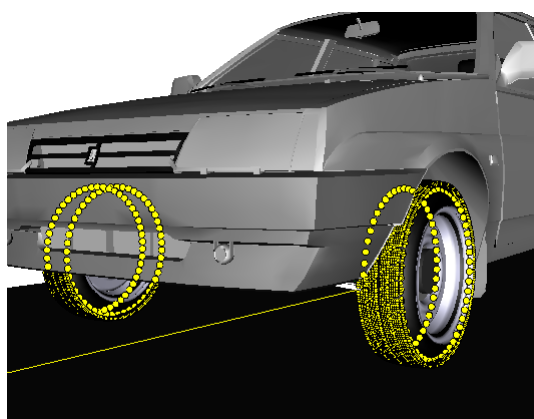
Вне процесса численного моделирования движения автомобиля тип назначенных моделей можно видеть в анимационном окне: интерфейсные узлы отмечаются жирными желтыми точками, рис. 33.144.



Полная



Редуцированная сверху



Редуцированная сбоку

Рис. 33.144. Различные варианты моделей УШ

**Замечание.** При включении прежде неактивной УШ ее типа устанавливается на *полный*. При необходимости пользователю следует изменить тип на нужный.

### 33.4.4.4. Модификация параметров модели шины

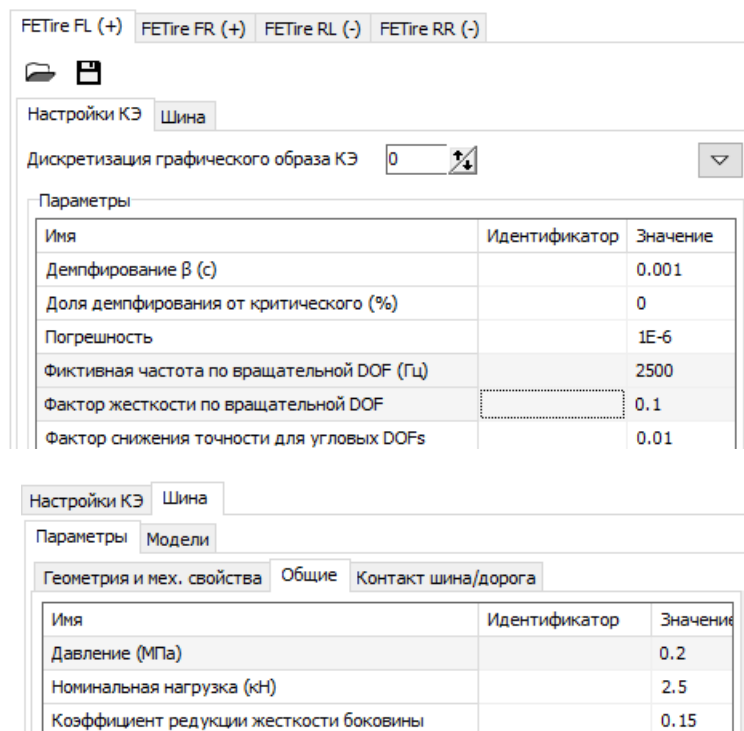


Рис. 33.145. Недоступные для изменения параметры выделены в таблицах серым цветом

Параметры модели УШ модифицируются на вкладке **Тела ANCF**, рис. 33.146. По сравнению с шаблоном шины, часть параметров недоступна для изменения. В таблицах такие параметры выделены светло-серым цветом, рис. 33.145. Недоступно также описание профиля и материала шины, п. 33.3.3.1 *Профиль шины и материал*. Таким образом, пользователю следует заранее сгенерировать набор моделей УШ с необходимым набором значений параметров, например, давления, п. 33.3.12 *Создание и назначение файлов полной и редуцированных моделей шины*.

Полностью доступны для модификации значения параметров контакта шины с дорогой (п. 33.3.5 *Настройки контакта шины с дорогой*) и геометрия протектора (п. 33.3.3.2 *Задавание геометрии протектора*).

Параметры могут назначаться как индивидуальной каждой шине, так и для всех шин одновременно. В первом случае ключ **Изменять параметры всех шин в модели** выключен, во втором – включен, рис. 33.146.

На вкладке **Шина | Модели** пользователь может изменить назначение шин колесам, а также задать тип редуцированной модели как отдельной шине, так и всем шинам сразу, рис. 33.146. См. также 33.4.4.3 *Задание типа редуцирования модели шины*.

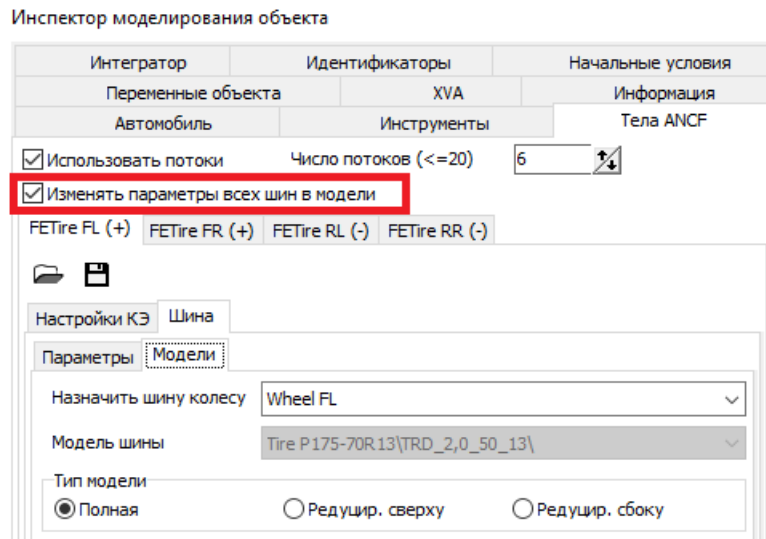


Рис. 33.146. Задание модели шины и назначение шины колесу

### 33.4.4.5. Согласованные модели безынерционных и упругих шин

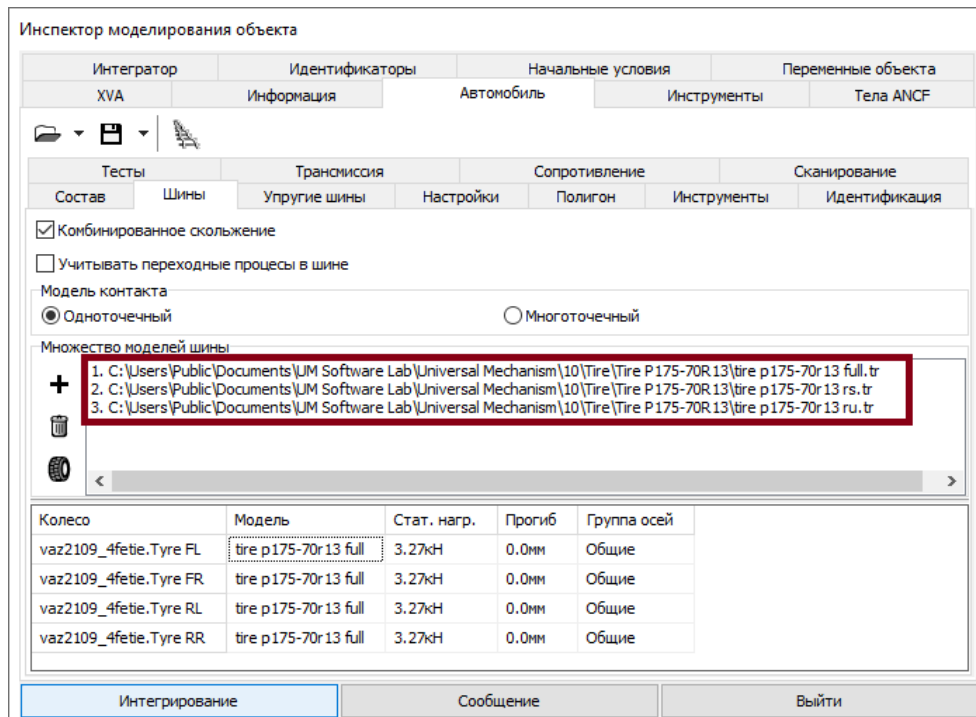


Рис. 33.147. Согласованные упрощенные модели для полной и редуцированных УШ

Рекомендуется использовать *согласованные* с УШ упрощенные модели шин (рис. 33.147), то есть модели, построенные по результатам виртуальных тестов упругой шины, п. 33.3.15 *Создание упрощенных безынерционных моделей шины на основе результатов тестов*. Статическое и динамическое поведение согласованной шины близко к УШ и позволяет корректно моделировать динамику КМ в случаях, когда части колес назначены УШ, а остальным – упрощенные. Особенно важно использовать согласованные модели при динамическом управлении включения и выключения УШ, когда УШ включается только на небольших участках движения КМ, п. 0

*Динамическое управление включением/выключением упругих шин.* Такой подход позволяет избежать значительных переходных процессов при включении и выключении УШ. Если редуцированные модели УШ показывают статические и силовые характеристики, отличающиеся от полной модели, то рекомендуется подготовить и использовать согласованные упрощенные модели и для этих типов УШ, рис. 33.147.

**Замечание.** Поскольку упрощенная модель зависит от параметров трения в контакте (например, коэффициентов трения), то следует создать табличные модели для тех значений, которые предполагается использовать при моделировании.

### 33.4.4.6. Начальные условия при наличии упругих шин

Расчет начальных условий является важной и необходимой частью работы с КМ при наличии УШ. Рекомендуется заранее подготовить файлы начальных условий для каждой возможной конфигурации УШ в КМ и модели шины (полная/редуцированная), что позволит избежать переходные процессы на начальной стадии моделирования. Ниже мы рассматриваем основные инструменты работы с начальными значениями координат.

#### 33.4.4.6.1. Корректировка положений УШ при изменении положения КМ

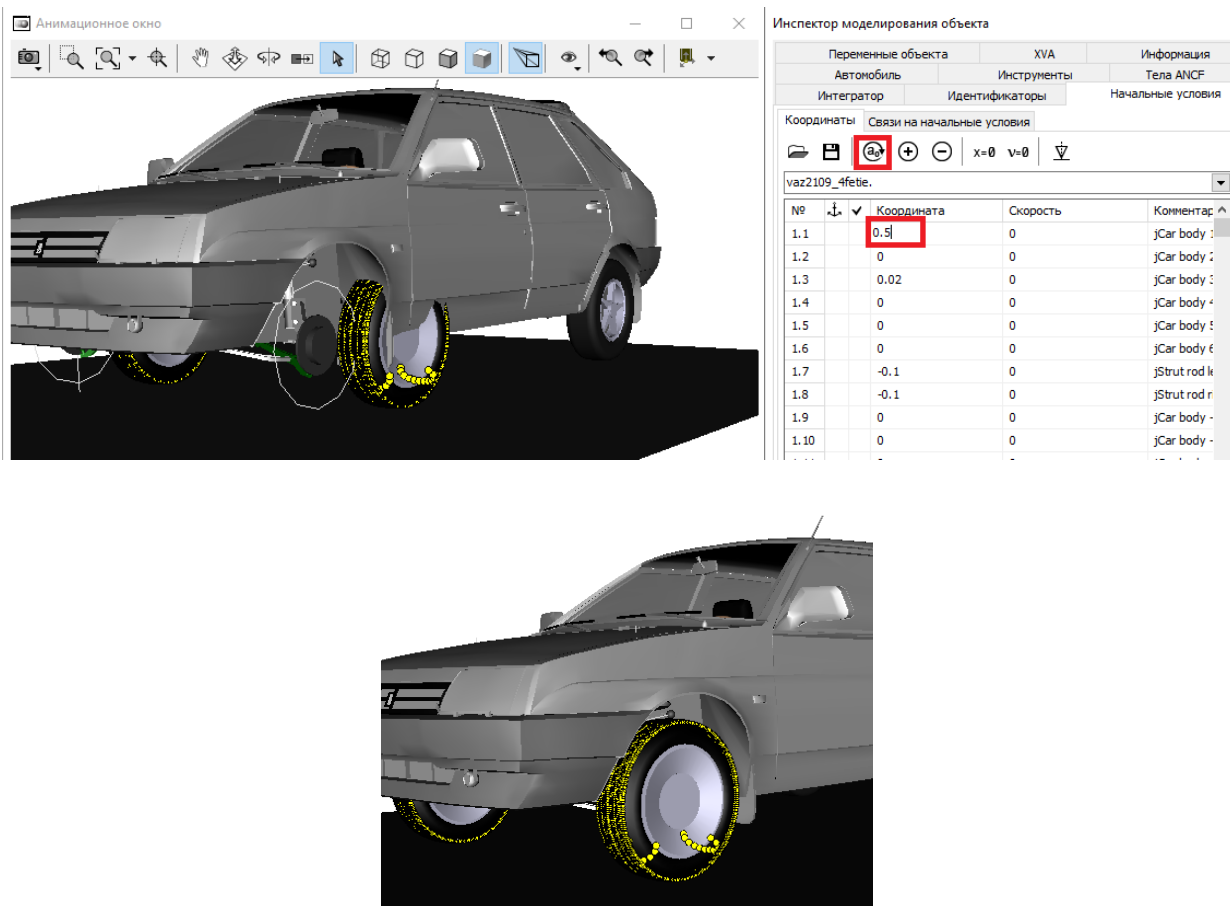


Рис. 33.148. Изменение координат КМ и корректировка положений УШ

Если на вкладке координат изменить значения координат, определяющих начальное положение КМ, то положения шин не изменятся автоматически, рис. 33.151, сверху слева. Для корректировки положения УШ используется кнопка . Важно отметить, что корректировка автоматически выполняется при старте моделирования, поэтому начало моделирования со сдвинутыми УШ не приведет к ошибке.

### 33.4.4.6.2. Расчет начальных условий для УШ в рамках выполнения теста равновесия

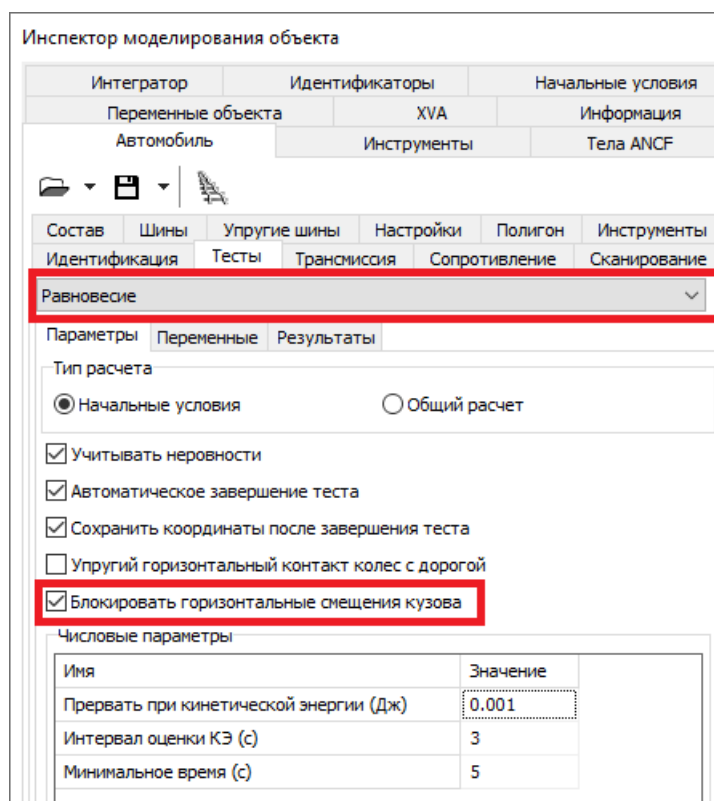


Рис. 33.149. Параметры теста равновесия для автомобиля

Для расчета координат упругой шины следует использовать тест равновесия КМ. Предварительно следует удостовериться, что контактная поверхность шины не проникает глубоко в поверхность дороги и при необходимости поднять автомобиль в вертикальном направлении на вкладке координат, п. 33.4.4.6.1 *Корректировка положений УШ при изменении положения КМ.*

Для модели автомобиля следует выполнить следующие действия:

- на вкладке **Автомобиль | Тесты** установить тип теста – **равновесие**, рис. 33.149;
- задать тип расчета – **Начальные условия**;
- включить режим **Блокировать горизонтальные смещения кузова**;
- запустить моделирование;
- дождаться автоматического завершения теста или после достижения состояния, близкого равновесному, перейти в режим паузы и сохранить текущие значения координат в файл, а также принять их как начальные условия при нулевой скорости, рис. 33.150; имя файла должно идентифицировать конфигурацию УШ в данный момент времени.

Рассчитанные начальные условия будут совместны только с текущей конфигурацией УШ в модели. При изменении числа активных УШ, а также при изменении типа модели УШ (полная/редуцированная) число координат изменяется, и файл не может быть прочитан в качестве начальных условий.

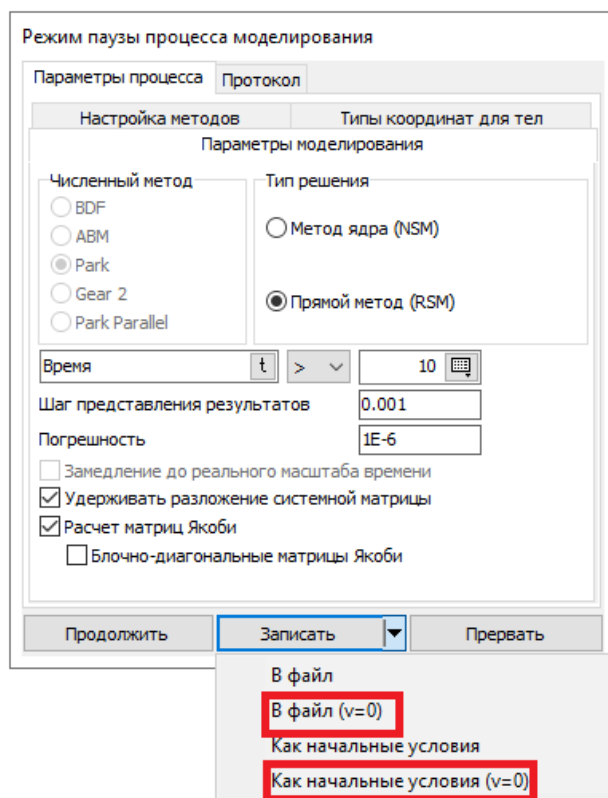


Рис. 33.150. Сохранение текущих координат в файл и в качестве начальных условий

**Замечание1.** При изменении типа модели УШ полная/редуцированная, а также при изменении типа редуцирования число координат УШ меняется, однако программа автоматически переформатирует список координат, так что равновесное состояние шины сохраняется. Это означает, что если равновесие рассчитано, например, для полной модели УШ, то при переключении модели на редуцированную состояние, близкое равновесному, сохраняется, и можно на вкладке координат сохранить координаты в файл для нового состояния модели и использовать его в дальнейшем.

**Замечание2.** При выполнении теста равновесия и включенной опции **Блокировать горизонтальные смещения кузова** трение между протектором шины и дорогой автоматически выключается.

### 33.4.5. Динамическое управление включением/выключением упругих шин

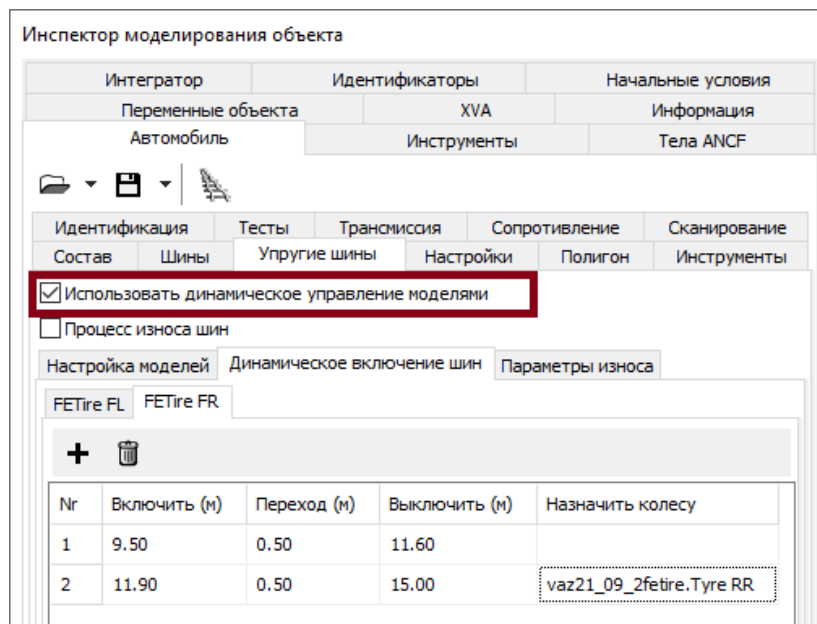


Рис. 33.151. Режим динамического управления включением/выключением УШ

Динамическое управление моделями УШ позволяет пользователю включать конечно-элементные модели шин только на определенных участках движения автомобиля (секциях активизации УШ), что значительно ускоряет процесс моделирования автомобиля. Если модель КМ содержит меньше УШ, чем колес, то одна УШ может в процессе моделирования динамически переназначаться другой шине: например, сначала шина назначается переднему колесу, а затем – заднему (столбец **Назначить колесу** в таблице задания секций активизации).

Таким образом, каждой УШ может назначаться одна или несколько активных секций, рис. 33.151. **Каждая секция начинается переходным участком**, на котором движение колесного диска модели УШ определяется движением колеса, к которому она присоединена, и рассчитываются силы взаимодействия УШ с дорогой. Однако силы, действующие на УШ, не передаются на этом участке на колесо, то есть УШ не влияет на движение автомобиля. Переходный участок используется для подавления динамических переходных процессов, возникающих непосредственно после активизации УШ.

Поскольку в процессе моделирования в конце переходного участка происходит переключение модели шины от безынерционной к УШ, важно использовать согласованные модели, п. 33.4.4.5 *Согласованные модели безынерционных и упругих шин*.

Рассмотрим основные этапы использования данного инструмента.

#### 1) Подготовка макрогеометрии

Использование УШ в тесте с водителем возможно как для движения автомобиля по макрогеометрии, заданной 2D кривой, так и по триангулированной поверхности.

В случае задания макрогеометрии **2D кривой**, специальные неровности (бордюр, «лежащий полицейский», повреждение дорожного полотна и т.д.) следует задать с помощью

файла \*.tpr, определяющего профиль тестового участка, [Глава 12](#), п. *Профиль тестового участка дороги*, рис. 33.152, рис. 33.153. При движении можно учитывать мелкие неровности дорожного покрытия, заданные файлами \*.itr, включив соответствующий флажок.

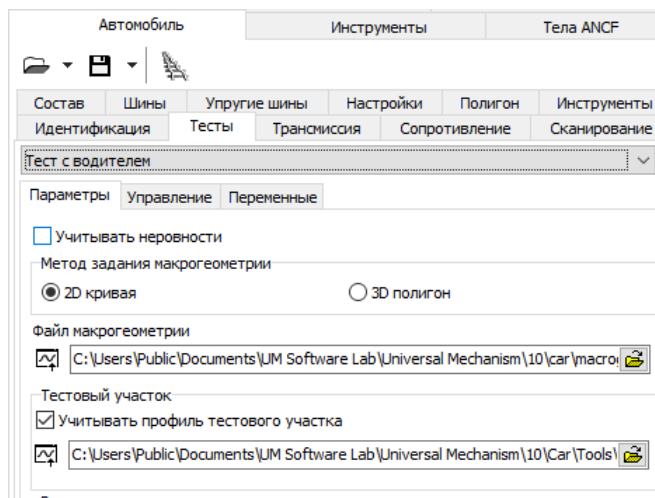


Рис. 33.152. Настройки макрогеометрии при задании 2D кривой

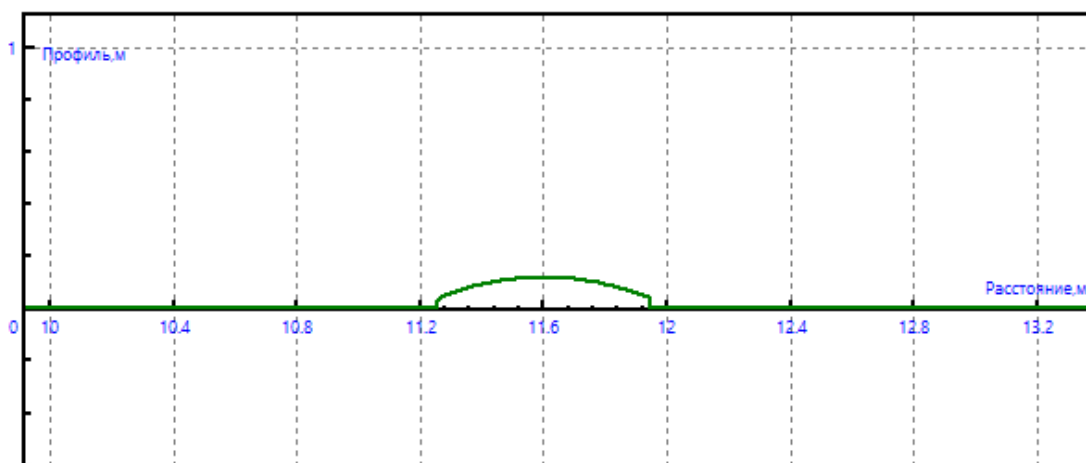


Рис. 33.153. Пример искусственной неровности «лежачий полицейский»

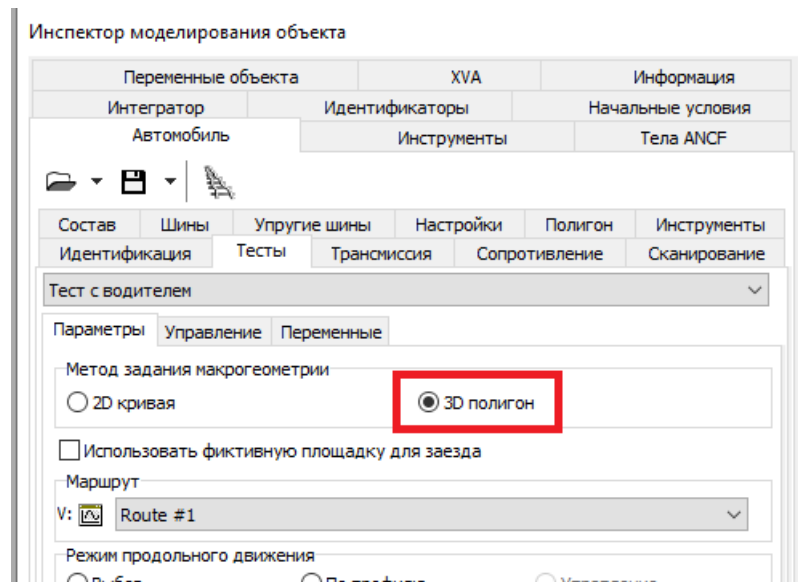


Рис. 33.154. Настройки макрогеометрии при использовании триангулированной поверхности

При моделировании динамики автомобиля поверхность, по которой движется автомобиль, может быть задана **триангулированной поверхностью (полигоном)**. Для этого следует загрузить нужную поверхность на вкладке **Полигон**, установить соответствующий метод задания макрогеометрии и выбрать маршрут, рис. 33.154, [Глава 12](#), п. *Движение автомобиля по триангулированной поверхности (полигон)*.

## 2) Тестовый проезд с упрощенными колесами для выбора положений секций активизации УШ

Для того, чтобы сформировать секции, на которых активизируются УШ, рекомендуется выполнить тестовый проезд автомобиля по заданной макрогеометрии. В качестве примера рассмотрим проезд легкового автомобиля по искусственной неровности «лежащий полицейский». Построим графики вертикальной силы для правых колес автомобиля в зависимости от пройденного пути. Наезд на неровность явно виден на графиках. Сначала наезжает переднее колесо (пройденный путь 10.2м), а потом – заднее (путь 12.6м), рис. 33.155.

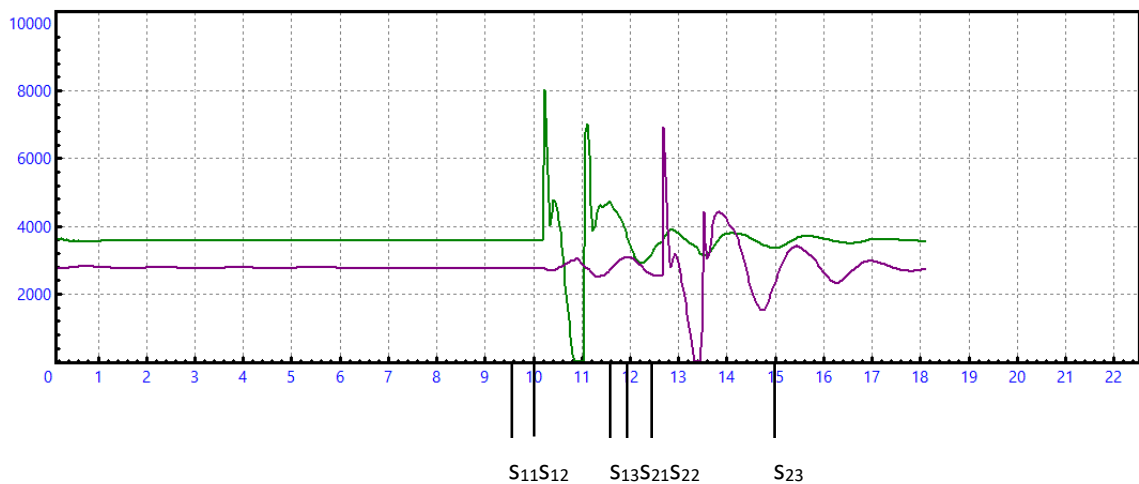


Рис. 33.155. Выбор положений для задания секций активизации УШ

На основании этого графика выбраны следующие положения для секций активизации упругой шины.

Секция 1 (переднее правое колесо):  $s_{11} = 9.5\text{м}$  (включение),  $s_{12} = 10.5\text{м}$  (конец переходного участка),  $s_{13} = 11.5\text{м}$  (выключение).

Секция 2 (заднее правое колесо):  $s_{21} = 11.9\text{м}$  (включение),  $s_{22} = 12.4\text{м}$  (конец переходного участка),  $s_{23} = 15\text{м}$  (выключение).

### 3) Задание секций активизации УШ

После выбора положений для секций активизации шин следует заполнить таблицу секций для каждой шины.

Если УШ не должна включаться в данном моделировании, то для нее задается одна секция с положением включения, выходящим за интервал моделирования, рис. 33.156.

Пример задания двух секций для УШ, переезжающей через искусственную неровность приведен на рис. 33.151, рис. 33.157. На момент начала движения УШ назначена переднему правому колесу, поэтому первую секцию активизации она проходит как это колесо. Однако на второй секции УШ переназначается заднему правому колесу, рис. 33.157): для назначения следует щелкнуть правой кнопкой мыши на крайне правой ячейке соответствующей строки и выбрать колесо из всплывающего меню.

Nr	Включить (м)	Переход (м)	Выключить (м)	Назначить колесу
1	1000.00	0.50	1020.00	

Рис. 33.156. Пример задания секции для выключения УШ на всем интервале моделирования

Nr	Включить (м)	Переход (м)	Выключить (м)	Назначить колесу
1	9.50	0.50	11.60	
2	11.90	0.50	15.00	vaz21_09_2fetire.Tyre RR

Рис. 33.157. Динамическое переназначение УШ другому колесу на второй секции активизации

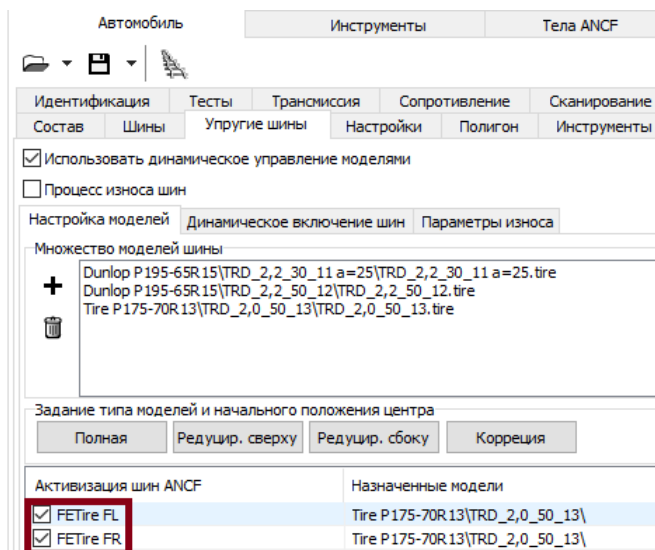


Рис. 33.158. Активны обе модели шины

**Замечание.** Если УШ активируется в процессе моделирования, то следует активировать ее на момент старта моделирования, рис. 33.158, и установить начальные условия, соответствующие равновесному состоянию всех шин, п. 33.4.4.6.2 *Расчет начальных условий для УШ в рамках выполнения теста равновесия.* Это позволит уменьшить динамические переходные процессы при включении шины в начале переходного участка.

### 33.4.6. Переменные для упругой шины

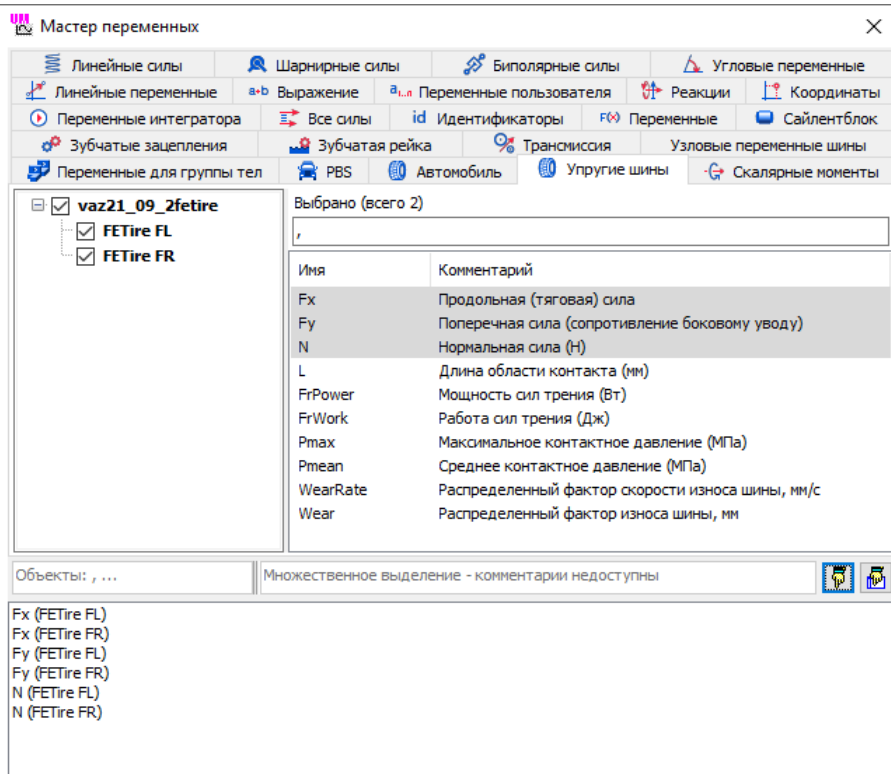



Рис. 33.159. Вкладка переменных взаимодействия УШ с дорогой

Для создания переменных используется мастер переменных (рис. 33.159), доступный при открытой модели по команде меню **Инструменты | Мастер переменных** или по кнопке  на панели инструментов. Общие рекомендации по работе с мастером переменных можно найти в [Главе 3](#), п. *Мастер переменных*.

#### 33.4.6.1. Переменные, характеризующие взаимодействие шины с дорогой

Для формирования списка переменных, характеризующих взаимодействие упругой шины с дорогой в процессе численного моделирования, используется вкладка **Упругие шины** мастера переменных, рис. 33.159. Вкладка позволяет для каждой из УШ создать следующие переменные:

$F_x$ ,  $F_y$ ,  $N$  – суммарные силы взаимодействия шины с дорогой по направлениям;

$L$  – размер пятна контакта в продольном направлении;

$FrPower$ ,  $FrWork$  – суммарная мощность и работа сил трения, учитываются только трение скольжения, трение сцепления работу не совершает;

$P_{max}$ ,  $P_{min}$  – максимальное и среднее давление шины на опорную поверхность;

$WearRate$ ,  $Wear$ ,  $SpecificWear$  – факторы износа шины, рассчитываемые по областям проскальзывания шина в контакте с дорогой; вторая переменная характеризует глубину износа и является интегралом по времени от первой переменной, определяющей скорость износа.

### 33.4.6.2. Кинематика узлов шины относительно колесного диска

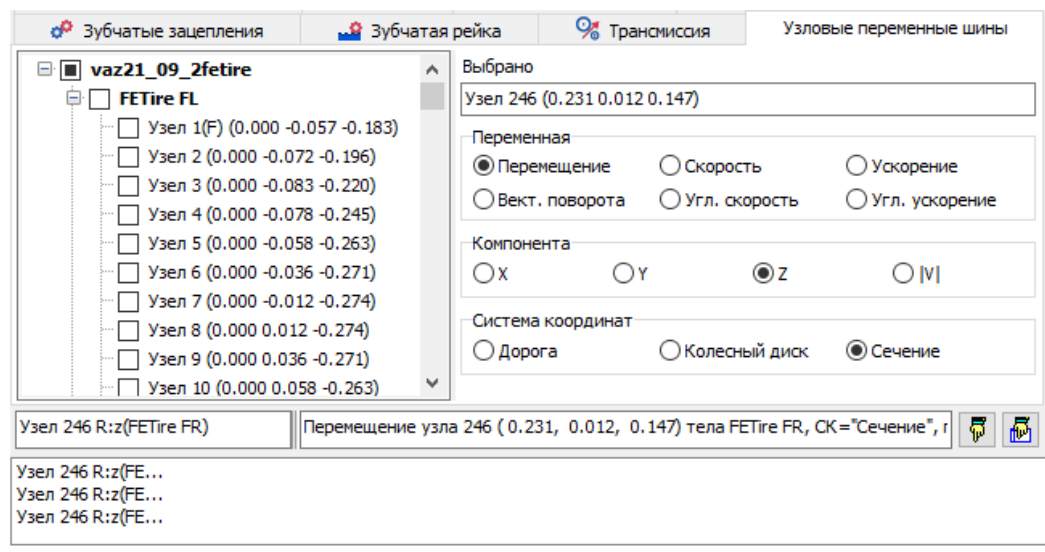


Рис. 33.160. Вкладка кинематики узлов УШ

На вкладке Узловые переменные шины формируются кинематические скалярные величины, характеризующие движение узлов относительно колесного диска за счет упругих деформаций шины, рис. 33.160. В левой части вкладки расположен список узлов конечно-элементной разбивки УШ с указанием координат узлов в недеформированном состоянии в СК колесного диска. Буквой F(Fixed) помечены узлы, жестко связанные с ободом колесного диска.

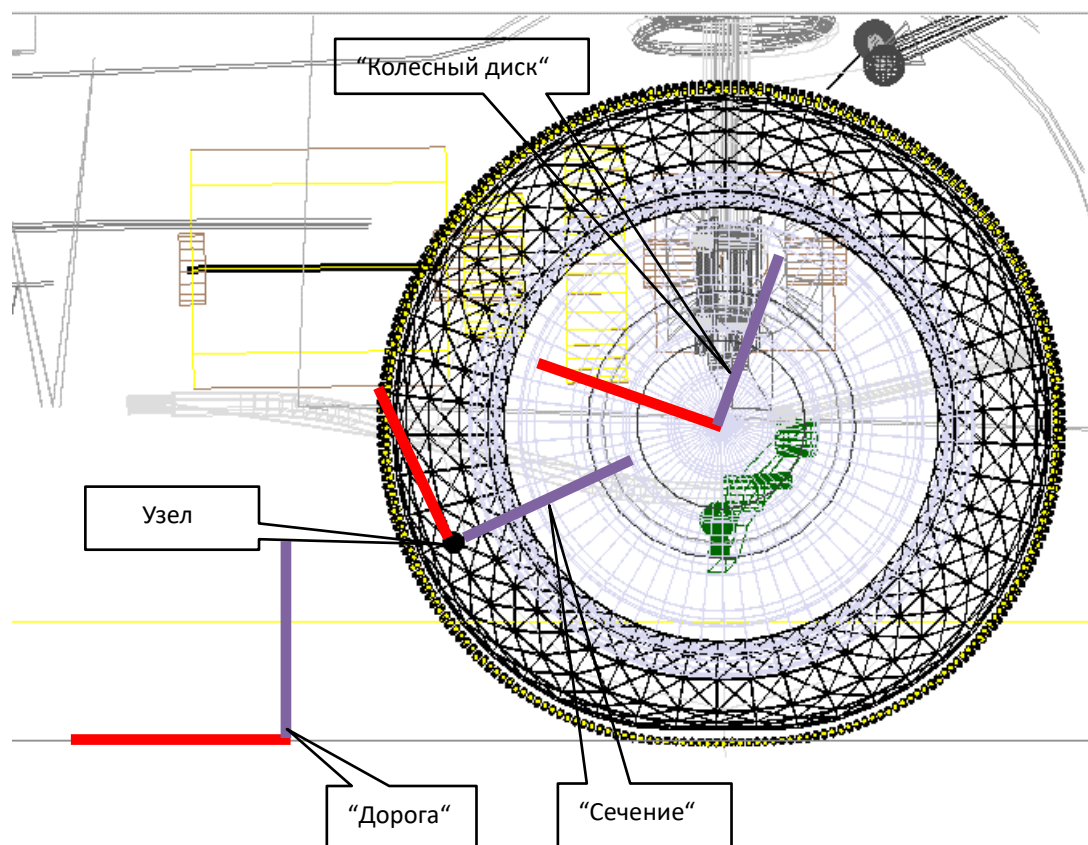


Рис. 33.161. Системы координат, используемые для расчета узловых переменных

Каждая скалярная переменная для узла является проекцией вектора определенного типа на одну из трех систем координат (СК), рис. 33.161:

- **Дорога** – инерциальная неподвижная СК модели (СК0);
- **Колесный диск** – подвижная СК, жестко связанная с колесным диском с началом в центре колеса;
- **Сечение** – подвижная СК, проходящая через данный узел в его недеформированном состоянии и ось колеса, как и предыдущая СК, она жестко связана с колесным диском.

Обратите внимание, что ориентации двух последних СК совпадают для первых узлов разбивки, находящихся при нулевых координатах строго внизу в вертикальном сечении шины, поэтому совпадают переменные в этих СК для соответствующих узлов, рис. 33.162.

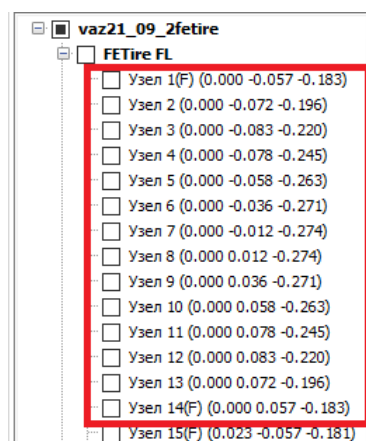


Рис. 33.162. Пример узлов, для которых СК колесного диска и сечения совпадают

Рассмотрим типы переменных.

- **Перемещение** – вектор упругого перемещения узла относительно положения при недеформированной шине.
- **Вектор поворота** – вектор поворота СК узла относительно недеформированного положения. При малых отклонениях ориентации СК узла проекция вектора поворота равна углу поворота вокруг соответствующей оси.
- **Скорость, угловая скорость, ускорение, угловое ускорение** – стандартные кинематические векторы, определяющие движение узла относительно колесного диска за счет упругих деформаций шины.

Компоненты:

**X, Y, Z** – проекции векторов на соответствующую ось заданной СК;

**|V|** - модуль вектора; не зависит от СК.

На Рис. 33.163 приведен пример графиков зависимости от времени проекций на ось Z всех трех СК вектора перемещения узла номер 246, находящегося приблизительно на середине протектора. Одинаковые максимальные значение переменной при проектировании на СК дороги и сечения соответствуют проходу узла через контакт с дорогой.

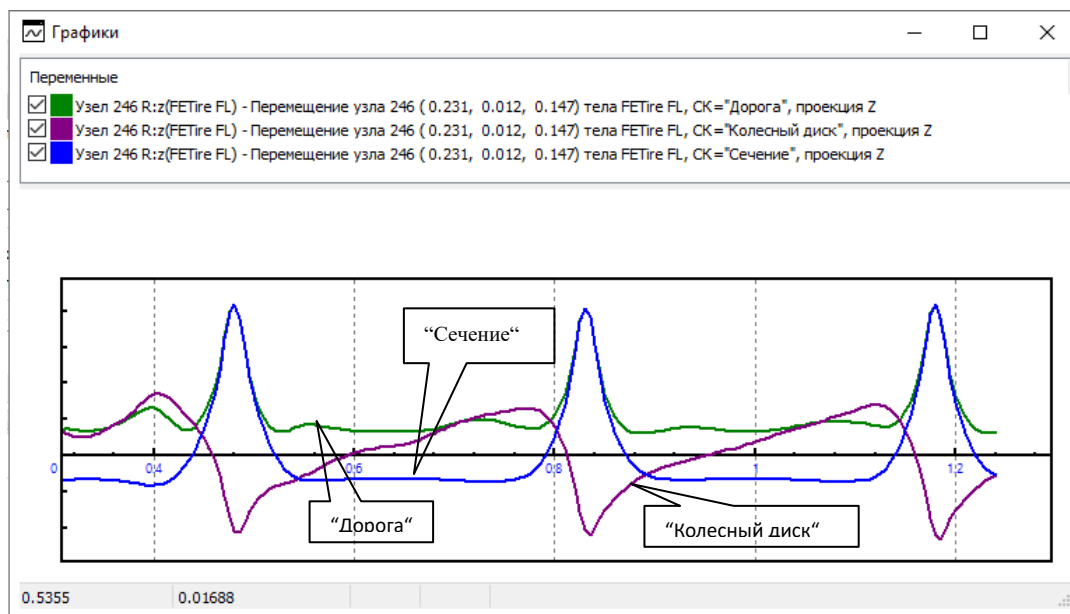


Рис. 33.163. Сравнение графиков проекции вектора перемещения отдельного узла на ось Z разных систем координат

**Замечание 1.** Обычно наиболее информативной являются проекции векторов на СК сечения, которая и предлагается по умолчанию.

**Замечание 2.** В случае использования редуцированных моделей, переменные рассчитываются также для редуцированных узлов (за исключением линейных и угловых ускорений) с использованием формул (33.8), (33.9), п. 0

*Редуцированные модели шины, 33.4.4.3 Задание типа редуцирования модели шины.*

### 33.4.7. Процесс моделирования динамики машин с упругими шинами

Рассмотрим основные этапы моделирования КМ с УШ.

- 1) Активируйте нужные УШ, п. 33.4.4.2 *Активизация упругих шин*.
- 2) При необходимости рассчитайте начальные условия или загрузите их из файла, п. 33.4.4.6 *Начальные условия при наличии упругих шин*.
- 3) Установите тест с водителем и сформируйте нужную макрогеометрию.
- 4) При использовании динамического включения УШ проверьте согласованность моделей шин, 33.4.4.5 *Согласованные модели безынерционных и упругих шин*.
- 5) Создайте список переменных, при необходимости откройте графические окна, поместив в них переменные для визуального контроля.
- 6) Запустите процесс моделирования.

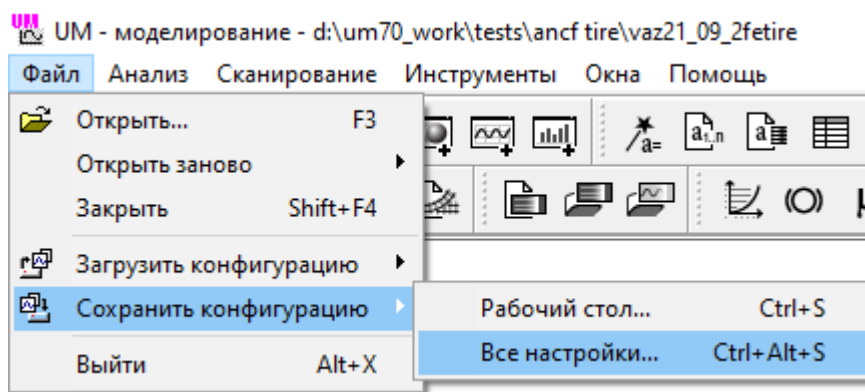


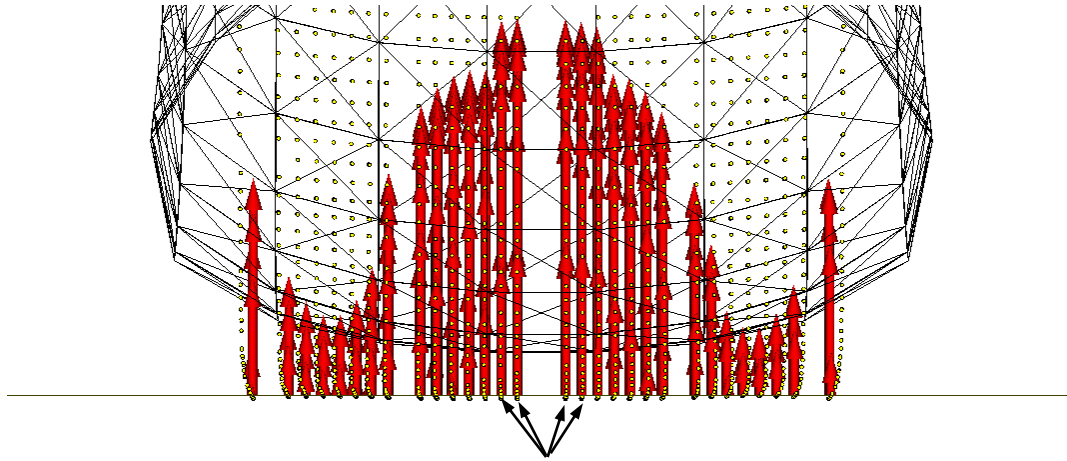
Рис. 33.164. Сохранение полной конфигурации модели

- 7) После окончания процесса моделирования при необходимости сохраните полную конфигурацию модели для дальнейшего использования, рис. 33.164.

### 33.4.8. Моделирование износа протектора шины

Прогноз износа шин является одна из задач, для решения которых может быть использованы модели УШ.

#### 33.4.8.1. Математическая модель износа



Отдельные полосы для расчета износа

Рис. 33.165. Пример полос для расчета износа

Используется модель Арчарда износа протектора шины [10], в соответствии с которой скорость износа пропорциональна мощности сил трения скольжения. Контактная поверхность протектора разбивается на полосы. При недеформированной шине каждая полоса – это узкий цилиндр, диаметр которого совпадает с диаметром колеса, осью является ось вращения колеса. На срединной окружности отдельной полосы лежат точки контакта протектора с дорогой, рис. 33.165. В примере на рис. 33.165 имеем 36 полос, шесть из которых не содержат контактных точек из-за каналов в протекторе. Число полос и контактных точек в полосе зависит от конечно-элементной разбивки, параметров  $n_x, n_y$ , определяющих число контактных щетинок в конечном элементе, и от рисунка протектора, п. 33.3.5 *Настройки контакта шины с дорогой*.

Износ в пределах одной полосы усредняется, то есть считается одинаковым по окружности и ширине полосы.

**Распределенный фактор скорости износа** для полосы с номером  $i$  рассчитывается в мм/с по формуле

$$\dot{h}_i = 10^3 \frac{k}{HA_{ci}} \sum_{j=1}^{n_i} F_{ij}^T v_{\tau,ij}, \tag{33.15}$$

где суммирование производится по всем щетинкам в полосе,  $j$  – номер щетинки;

$F_{\tau,ij}$  – сила трения для щетинки  $j$  (Н), причем  $F_{\tau,ij} = 0$ , если щетинка не находится в контакте;

$v_{\tau,ij}$  – скорость проскальзывания для щетинки  $j$  (м/с), причем  $v_{\tau,ij} = 0$ , если щетинка находится в режиме сцепления; произведение  $F_{ij}^T v_{\tau,ij}$  равно мощности силы трения скольжения в отдельной контактной точке;

$k$  – безразмерный коэффициент износа, значение по умолчанию  $10^{-3}$ , рис. 33.166;  
 $N$  – твердость материала (Па), значение по умолчанию  $2 \times 10^9 \text{ Па} = 2 \text{ ГПа}$ ,  
 рис. 33.166;  
 $A_{ci}$  – контактная площадь полоски в протекторе за вычетом пазов и каналов;  
 $10^3$  – множитель, переводящий скорость в мм/с.

**Распределенный фактор накопленного износа** определяет глубину износа в мм в пределах отдельной полоски

$$h_i = \int \dot{h}_i dt \tag{33.16}$$

**Удельный износ шины мм/1000км**

$$I_h = \frac{10^6 h_i}{L} \tag{33.17}$$

где  $L$  – расстояние с момента начала моделирования в метрах.

Имя	Идентификатор	Значение
Модуль упругости протектора		4500000
Кэффициент контактного демпфирования		0.1
Кэффициент трения f0		0.8
Кэффициент трения f		0.5
Скорость Штрибека		2
Показатель степени		1
Дискретизация X контакта в элементе		5
Дискретизация Y контакта в элементе		5
Кэффициент износа		0.001
Твердость материала, ГПа		2

Рис. 33.166. Параметры модели износа шины

33.4.8.2. Переменные, связанные с износом протектора шины

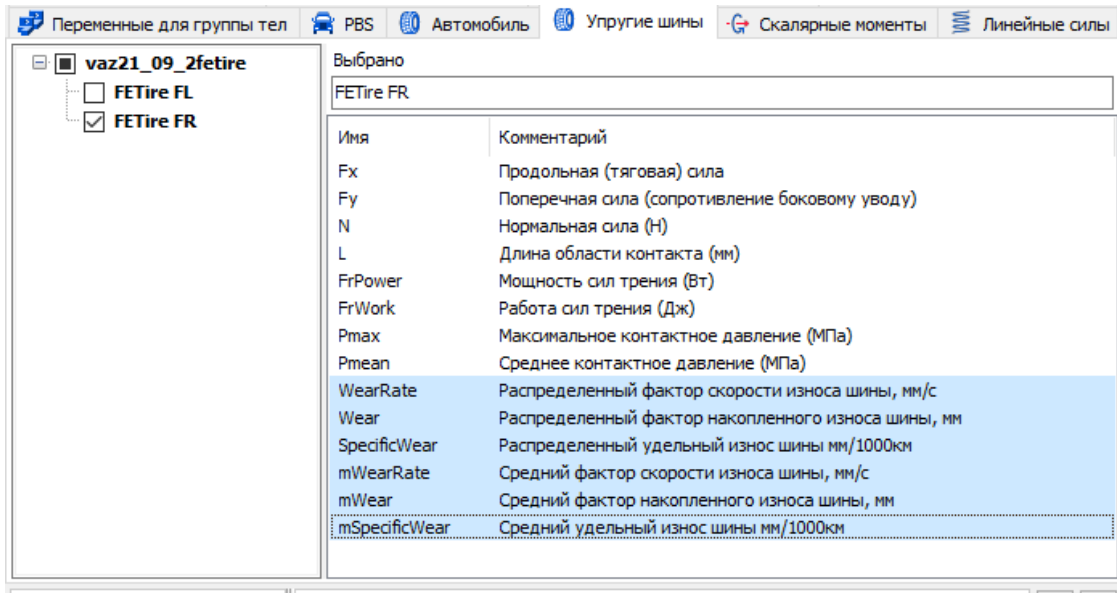


Рис. 33.167. Распределенные и средние факторы износа протектора в мастере переменных

Переменные, рассчитывающие распределенные факторы износа (33.15), (33.16), (33.17) формируются в мастере переменных, рис. 33.167, п. 33.4.6.1 *Переменные, характеризующие взаимодействие шины с дорогой*. Отличительной особенностью *распределенных* переменных является то, что в каждый момент времени они представляют собой зависимость факторов от поперечной координаты протектора в СК шины, т.е. эпюры, рис. 33.168. Средние показатели износа соответствуют усреднению по всей поверхности протектора, например, средний фактор накопленного износа определяется формулой

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

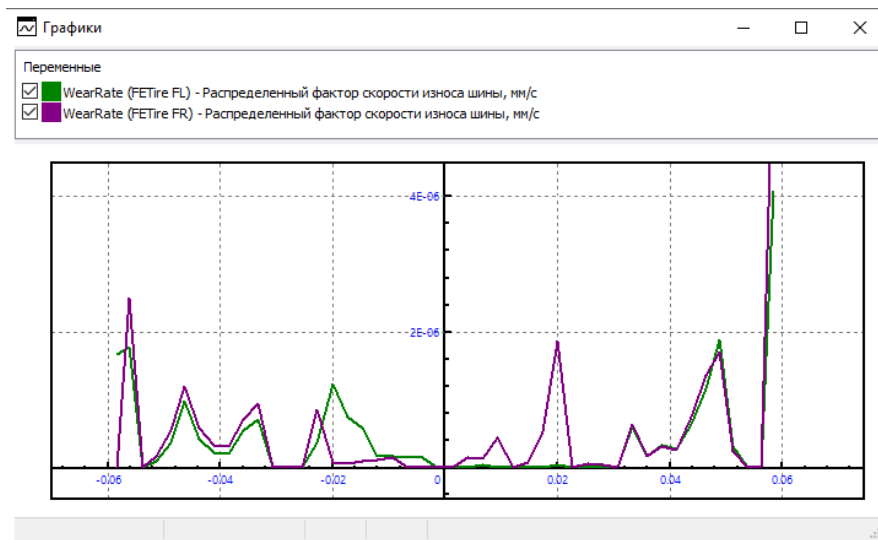


Рис. 33.168. Примеры графиков распределенного фактора скорости износа при движении по прямому участку дороги

Фактор скорости износа является вспомогательным и позволяет визуально оценить интенсивность износа на разных участках движения. Распределенный фактор накопленного износа является основной переменной, характеризующей степень износа шины. Удельный износ шины также является основным показателем, позволяющим оценить значимость того или иного режима движения для износа.

### 33.4.8.3. Методика оценки интенсивности износа шины в различных режимах движения

К режимам движения, влияющим на интенсивность износа, можно отнести:

- скоростной режим: величина скорости, участки ускорения и замедления;
- участки подъема и спуска;
- повороты, обгоны и смены полосы;
- состояние контакта шины дорогой, выражающееся в различных значениях коэффициента трения.

Перечисленные факторы, как правило, являются совместными, например, поворот КМ может происходить с разной скоростью, на уклонах и при различном состоянии дороги, поэтому существует большое количество вариантов для оценки. Кратко рассмотрим, каким образом задаются режимы, подробнее для автомобиля см. [Главу 12](#).

#### Задание скоростного режима

Для автомобиля скоростной режим задается на вкладке параметров теста с водителем, рис. 33.169. Обычно при анализе износа шины используются режимы движения с постоянной скоростью (**v=const**) и график скорости, заданный в зависимости от расстояния (**По профилю**). Постоянная скорость задается на вкладке идентификаторов (идентификатор v0) в м/с или км/ч, рис. 33.170.

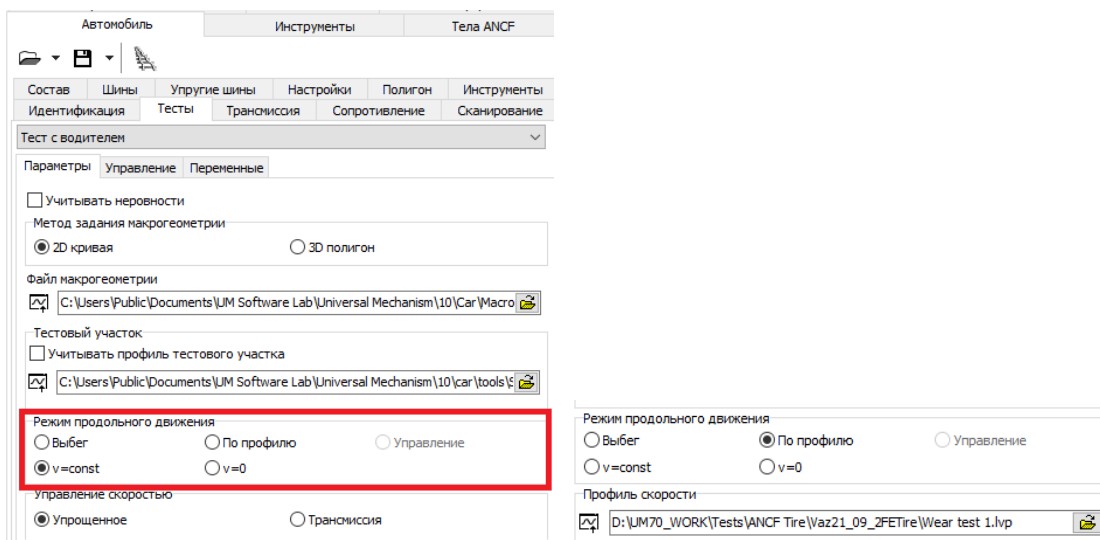


Рис. 33.169. Задание скоростного режима автомобиля

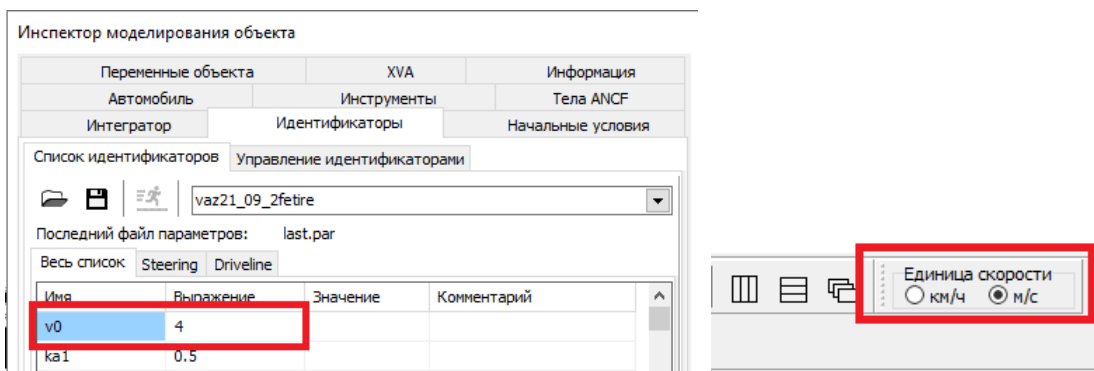


Рис. 33.170. Задание идентификатора скорости и единицы измерения

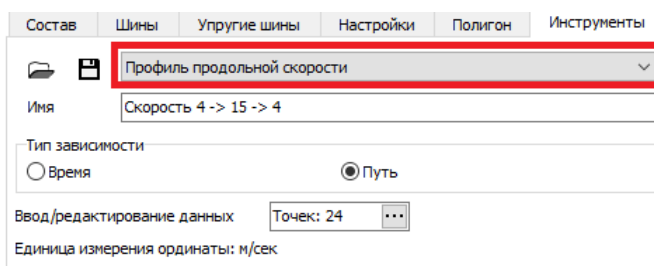


Рис. 33.171. Вкладка задания графика переменной скорости

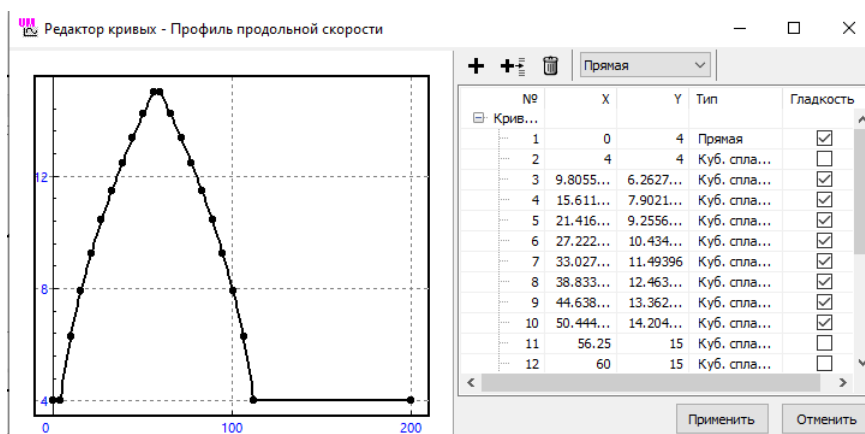


Рис. 33.172. Задание графика скорости в редакторе кривых

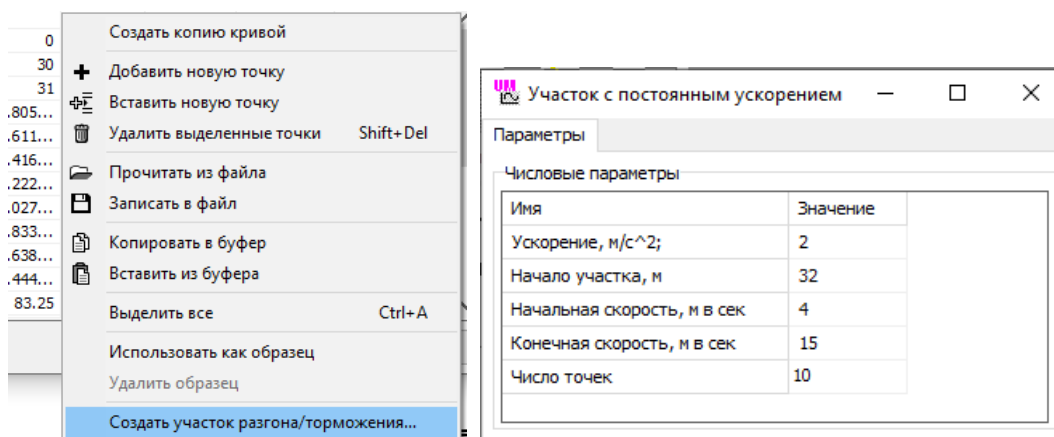



Рис. 33.173. Создание участка зависимости скорости от пути с постоянным ускорение

Для задания файла с графиком скорости в зависимости от пути используется вкладка **Инструменты**, раздел **Профиль продольной скорости**. По кнопке  открывается редактор кривых, в котором поточечно задается зависимость скорости от пройденного пути, рис. 33.172.

В примере на рис. 33.172 график скорости имеет участок разгона скорости от 4 до 15 м/с и участок торможения от 15 до 4 м/с. На обоих участках величина ускорения постоянна и равна  $2 \text{ м/с}^2$ . Для автоматического построения таких участков щелкните правой кнопкой мыши на таблице с координатами, выберите команду **Создать участок разгона/торможения**, заполните параметры участка в появившемся окне и примите результаты ввода после его закрытия, рис. 33.173. Рекомендуется сглаживать сплайнами участки переменной скорости.

**Замечание.** Для получения плавных графиков ускорения рекомендуется сглаживать сплайнами участки переменной скорости при задании в зависимости от пройденного пути, рис. 33.174.

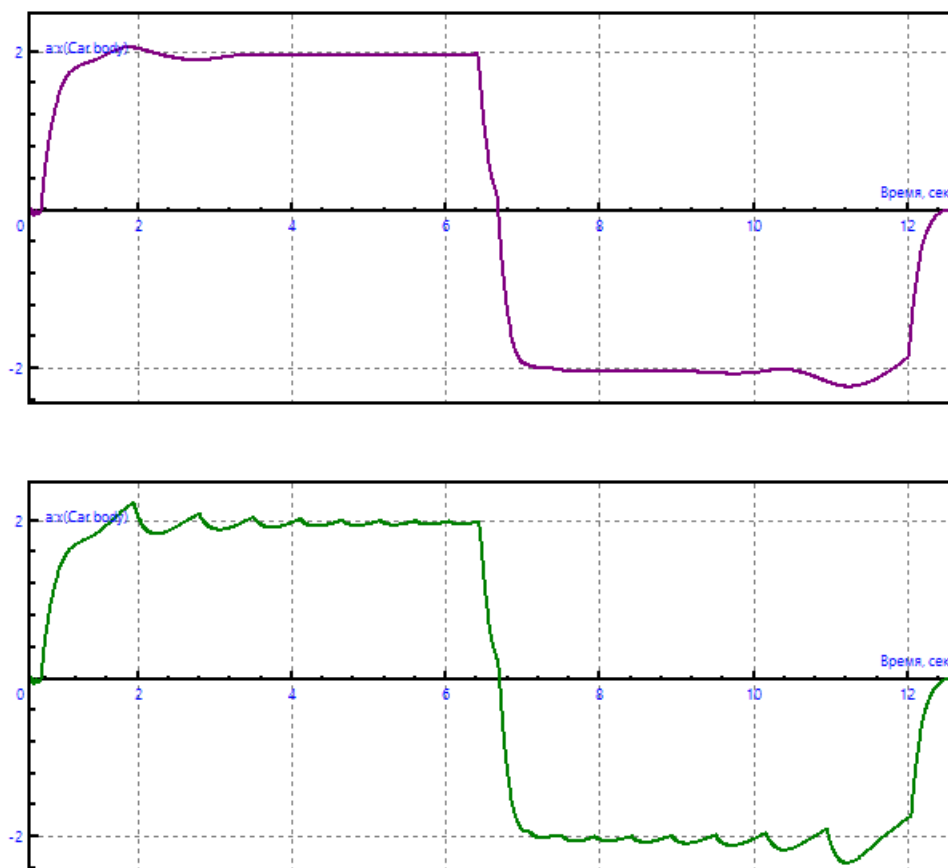


Рис. 33.174. График ускорения автомобиля при задании зависимости скорости от пройденного пути скорости сплайнами (сверху) и отрезками прямых

### 33.4.8.4. Методика оценки накопленного износа шины в процессе эксплуатации

Прогноз износа шины в процессе эксплуатации с использованием модели УШ, состоит в выполнении серии расчетов фактора накопленного износа при движении КМ в различных условиях. Мы предлагаем использовать подход, основанный на создании репрезентативного набора тестов, отражающих основные условия движения КМ. При этом фактор износа накапливается от эксперимента к эксперименту.

В процессе расчетов длина щетинок модели контакта уменьшается в соответствии с накопленным износом, что приводит к **влиянию износа на контактное взаимодействие шины с дорогой**.

#### 33.4.8.4.1. Параметры моделирования накопления износа в отдельном численном эксперименте

Идентификация    Тесты    Трансмиссия    Сопротивление    Сканирование  
 Состав    Шины    Упругие шины    Настройки    Полигон    Инструменты

Использовать динамическое управление моделями  
 Процесс износа шин

Настройка моделей    Динамическое включение шин    **Параметры износа**

Продолжить расчет  
 Имя файла расчета: TireWearTest1

+    +    🗑️    📁    💾

№	Расстояние, м	Вес
1	4.0	1.00
2	56.0	1.50
3	60.0	1.00
4	112.0	2.00
5	120.0	1.00

Параметры износа шины

Имя	Идентификатор	Значение
Пробег, км		2000
Начало износа, м		2
Рассчитанный пробег, км		0

Рис. 33.175. Параметры моделирования процесса накопления износа шин

**Процесс износа шин** – ключ включает режим процесса накопления износа шин в результате серии расчетов.

Настройки отдельного расчета включают:

- файл макрогеометрии;
- режим задания скорости, п. 33.4.8.3 *Методика оценки интенсивности износа шины в различных режимах движения*;
- настройки и параметры вкладки **Параметры износа**, рис. 33.175.

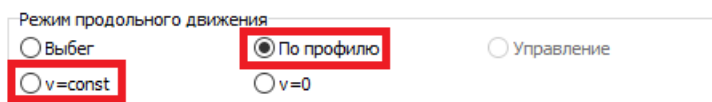




Рис. 33.176. Допустимые скоростные режимы при моделировании процесса накопления износа шин

Допускаются **два скоростных режима**: движение с постоянной скоростью ( $v=\text{const}$ ) и со скоростью, заданной зависимостью от расстояния (**По профилю**), рис. 33.176.

Указанные настройки сохраняются в текстовый файл \*.twc (tire wear configuration). Для записи и чтения файлов используются кнопки  , рис. 33.175. Примеры файлов:

```
wear_nodes=4.0,1.00,56.0,1.50,60.0,1.00,112.0,2.00,120.0,1.00;
wear_mileage=,2000;
wear_start=,2;
mgfile="C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\10\Car\MacroGeometry\Straight line 3km.mgf";
lvmode=profile;
lvprofile=D:\UM70_WORK\Tests\ANCF Tire\Vaz21_09_2FETire\Acceleration&deceleration.lvp;
```

```
wear_nodes=2.0,0.00,5.0,2.00,22.7,1.00,25.7,2.00;
wear_mileage=,500;
wear_start=,2;
mgfile="C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\2023\Car\MacroGeometry\turn 90deg.mgf";
lvmode=constant;
v0=5;
```

Результатом расчета является переменная **Распределенный фактор накопленного износа**. Переменная сохраняется в конце каждого расчета в текстовый файл \*.twr (tire wear results) для каждого колеса с УШ.

При первом расчете создается файл \*.twr с именем, указанным в поле **Имя файла расчета**. Если перед следующим расчетом включен режим **Продолжить расчет**, при старте моделирования программа анализирует файл \*.twr с указанным именем и устанавливает распределенному фактору износа значения, соответствующие последней записи в этом файле, а после окончания текущего расчета дописывает финальные значения переменной в этот же файл. Перед каждым новым расчетом серии можно изменить файл макрогеометрии и режим скорости. Тем самым происходит накопление износа при движении по различным участкам пути и при различных скоростных режимах.

Таблица **Параметры износа шины** включает некоторые вспомогательные параметры.

**Пробег**: значение пробега, который назначается текущему расчету при включенной опции **Процесс износа шин**;

**Начало износа**: вспомогательный параметр, исключающий из расчета износа начальный участок заданной данным параметром длины, чтобы возможные переходные процессы на старте моделирования не исказили результат;

**Рассчитанный пробег**: вспомогательный параметр, указывающий рассчитанный ранее пробег перед стартом текущего расчета. Данный параметр автоматически устанавливается

программой при включении опции **Продолжить расчет** на основе анализа файла \*.twr. При выключении опции продолжения расчета устанавливается нулевое значение параметра.

**Таблица весовых коэффициентов участков макрогеометрии** (рис. 33.177) используется только при включенной опции **Процесс износа шин** (рис. 33.175). Таблица формируется для каждой заданной макрогеометрии расчета. Траектория движения расчета с номером  $j$ , заданная файлом макрогеометрии, разбивается на участки заданием расстояния от начала отсчета СК пути  $s_{ij}$  (первый столбец таблицы). Для каждого участка задается его вес  $w_{ij}$  (второй столбец). Накопленный износ  $H_j$  в конце текущего расчета для отдельной полосы определяется по формуле

$$H_j = H_{j-1} + \sum_{i=1}^{n_j} h_{ij} \frac{w_{ij}}{w_j} \frac{S_j}{s_{ij} - s_{ij-1}}, \quad w_j = \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} \quad h_{ij} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{h} dt$$

где  $S_j$  – пробег в метрах, назначенный данной секции,  $n_j$  – число участков в расчете  $j$ ,  $s_{0j}$  – параметр начала износа.

Обычно границы участков расчета совпадают с точками задания кривой в файле макрогеометрии, поэтому для создания таблицы удобно пользоваться командой всплывающего меню **Назначить из текущей макрогеометрии**, рис. 33.175.

Nr	Расстояние, м	Вес
1	2.0	0.00
2	5.0	2.00
3	22.7	1.00
4	25.7	2.00

Рис. 33.177. Таблица весовых коэффициентов участков макрогеометрии

В режиме износа успешное завершение отдельного расчета происходит в тот момент времени, когда пройденный экипажем путь совпадает со значением конца последнего участка (120м на рис. 33.175). По этой причине файл макрогеометрии должен содержать описание пути больше этого параметра. При необходимости программа автоматически добавляет к траектории прямолинейный участок, чтобы выполнить это условие.

### 33.4.8.4.2. Пример расчета накопленного износа

Рассмотрим пример расчета накопленного износа с целью пояснения методики.

Рассмотрим модель vaz21\_09\_2FETire и выполним тестовый расчет износа передней левой шины. В каталоге модели находится три файла конфигурации износа.

Acc\_Dec.twc: автомобиль движется по горизонтальной прямой с переменной скоростью. График зависимости скорости от пройденного расстояния представлен на рис. 33.182, то есть моделируются процесс ускоренного и замедленного движения автомобиля.

Up\_Down.twc: автомобиль движется с постоянной скоростью 20 м/с по участку с подъемом и спуском, рис. 33.179.

R10left\_right.twc: автомобиль движется с постоянной скоростью 5 м/с по горизонтальному участку с двумя поворотами на 90 градусов с радиусом 10м, рис. 33.180.

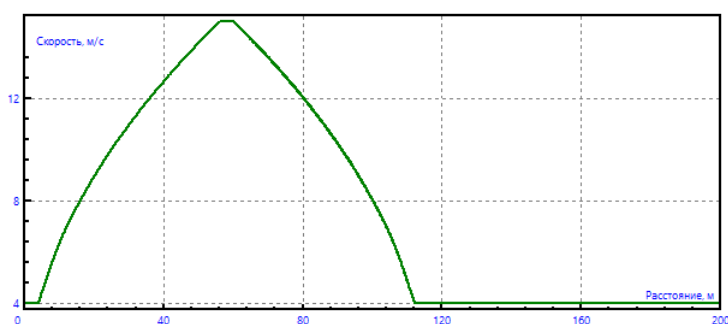


Рис. 33.178. Зависимость скорости от расстояния

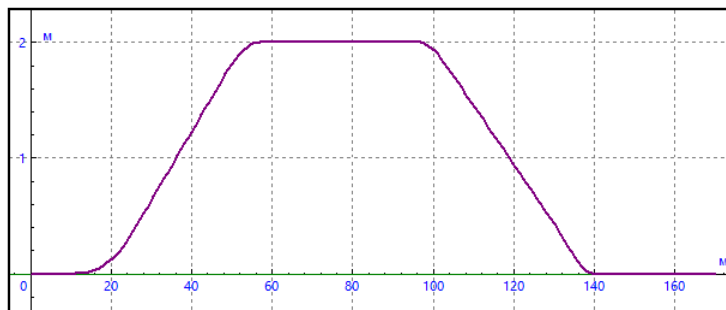


Рис. 33.179. Вертикальный профиль дороги

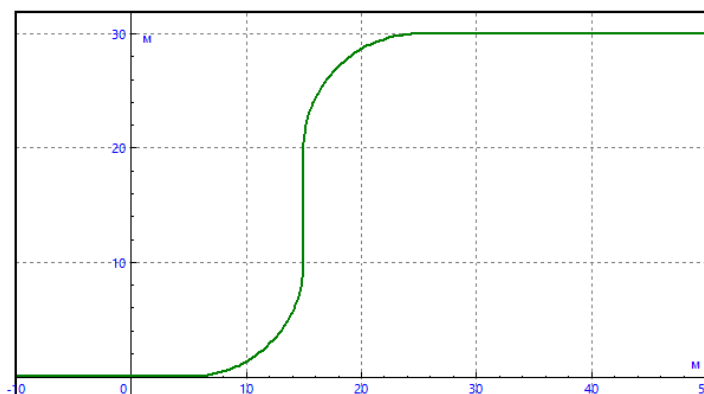
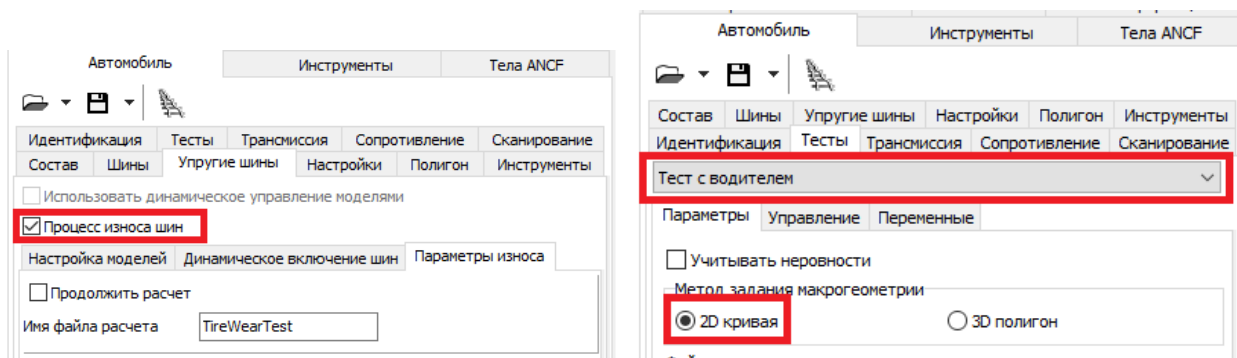
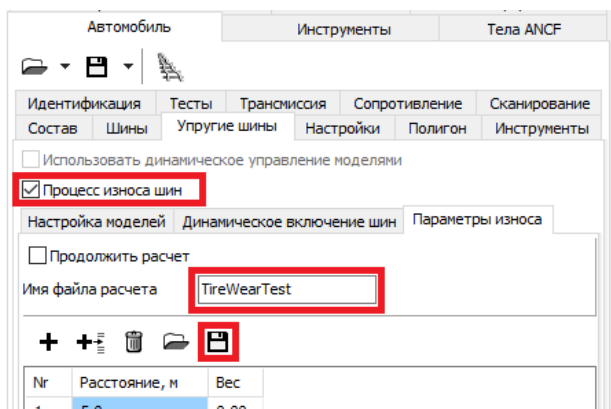


Рис. 33.180. Профиль дороги в плане

Рассмотрим организацию расчета с использованием данных трех конфигураций.



- Включите опцию **Процесс износа шин**. В случае моделирования автомобиля установится типа расчета **Тест с водителем** и метод задания макрогеометрии **2D кривая**.



- Назначьте имя файла расчета и прочитайте файл \*.twc, соответствующий первой секции серии. В нашем случае это будет файл Acc\_Dec.twc.
- Запустите процесс моделирования.
- После автоматического окончания расчета включите опцию **Продолжить расчет** и прочитайте следующий файл \*.twc, в нашем случае Up\_Down.twc. Запустите моделирование. После окончания расчета запустите третий файл R10left\_right.twc. Расчет для всех файлов из серии назовем итерацией.
- Продолжите итерации для получения необходимого пробега.
- Результаты каждого расчета сохраняются в файле \*.twr с заданным именем. В любой момент этот файл может быть отображен в графическом окне. Последовательность действий для чтения файла результатов:
  - откройте новое графическое окно;
  - щелчком правой кнопки мыши в области окна **Переменные** вызовите всплывающее меню и выполните команду **Загрузить из файла**, рис. 33.181;
  - в стандартном окне открытия файла задайте или выберите тип \*.twr и откройте нужный файл, рис. 33.181.

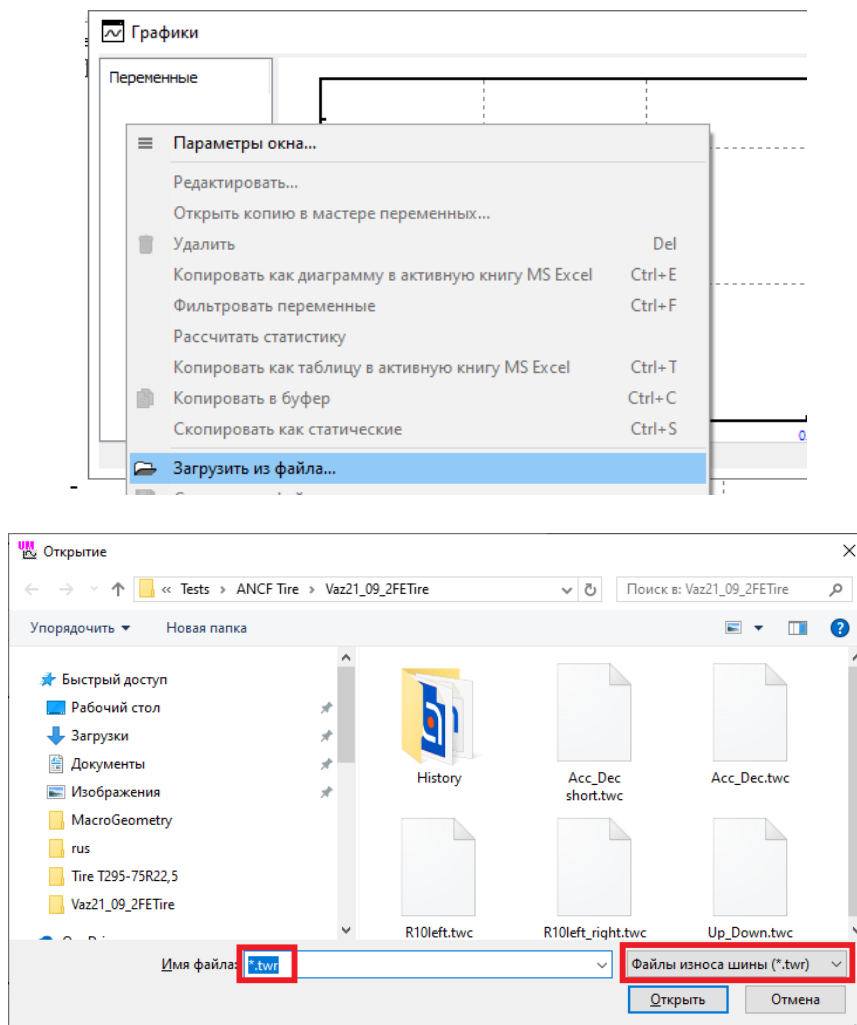


Рис. 33.181. Открытие файла результатов расчета износа

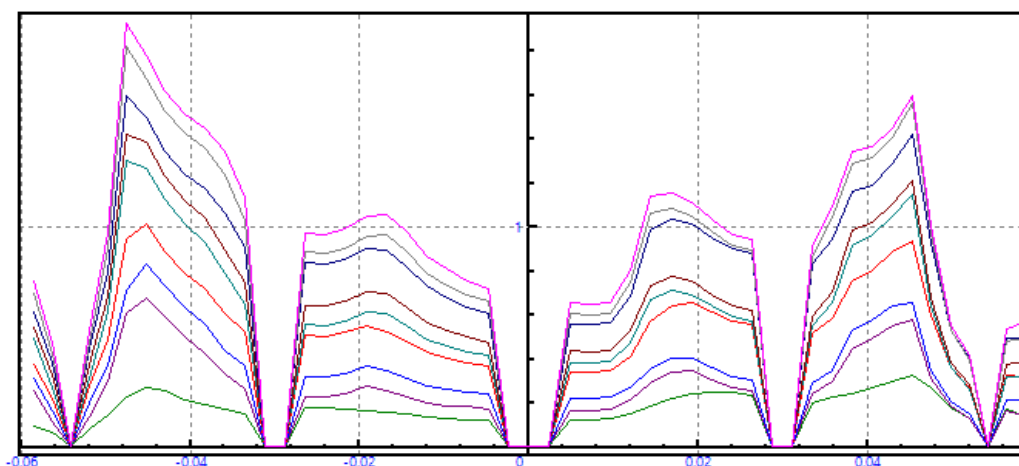


Рис. 33.182. Пример накопления износа вдоль профиля с увеличением пробега

На рис. 33.182 приведен пример выполнения трех итераций по три расчета износа в каждой.

### 33.4.9. Примеры моделирования динамики колесных машин с упругими шинами

#### 33.4.9.1. Примеры моделирования автомобиля

Рассмотрим примеры моделирования динамики легкового автомобиля с УШ с использованием модели `vaz21_09_2fetire`. Поскольку число УШ меньше числа колес, при моделировании используется динамическое включение и выключение УШ и переназначение УШ колесам, п. 33.4.5 *Динамическое управление включением/выключением упругих шин*.

Перед моделированием загрузите модель автомобиля в программе UMSimul. Модель автомобиля находится по пути

[{Данные УМ}\Samples\FETire\vaz21\\_09\\_2fetire](#)

##### 33.4.9.1.1. Переезд через искусственную неровность

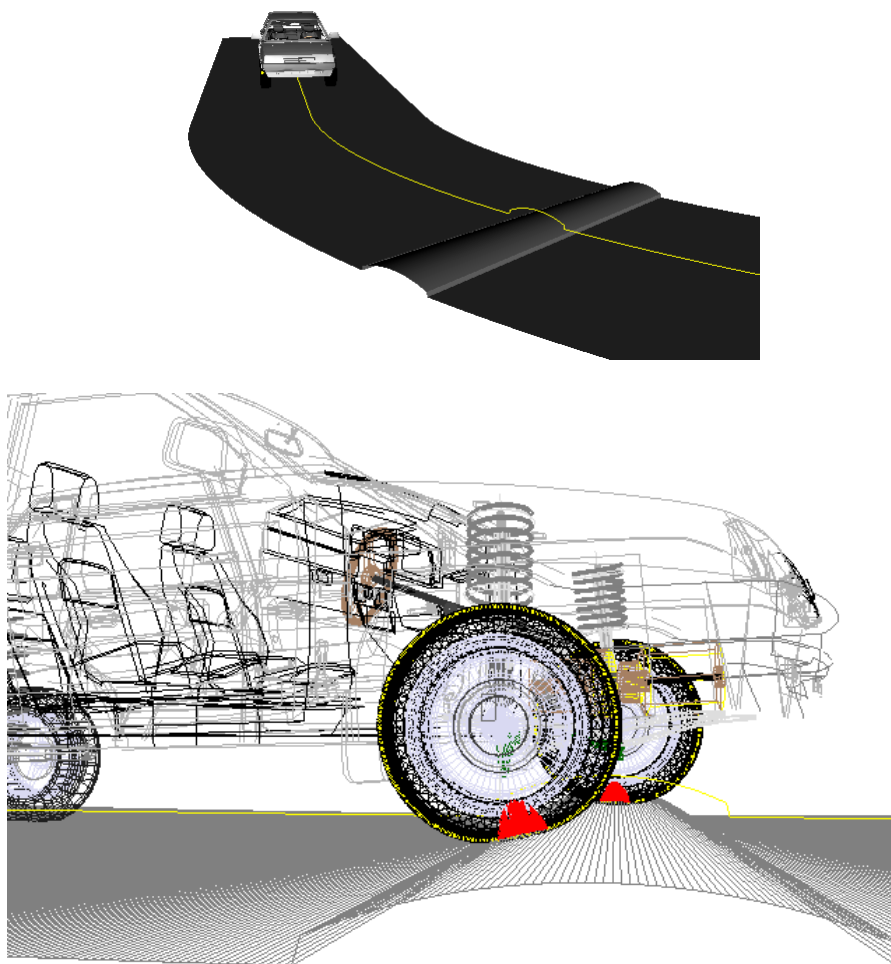


Рис. 33.183. Переезд через искусственную неровность

Загрузите полную конфигурацию **Speed bump in curve**. В данном тесте автомобиль движется с постоянной скоростью 1.5м/с в кривой радиуса 11м. Искусственная неровность

расположена на расстоянии около 11 м от начала движения. Управление включением УШ близко к описанному в п. 33.4.5 *Динамическое управление включением/выключением упругих шин*.

### 33.4.9.1.2. Переезд через повреждение дороги

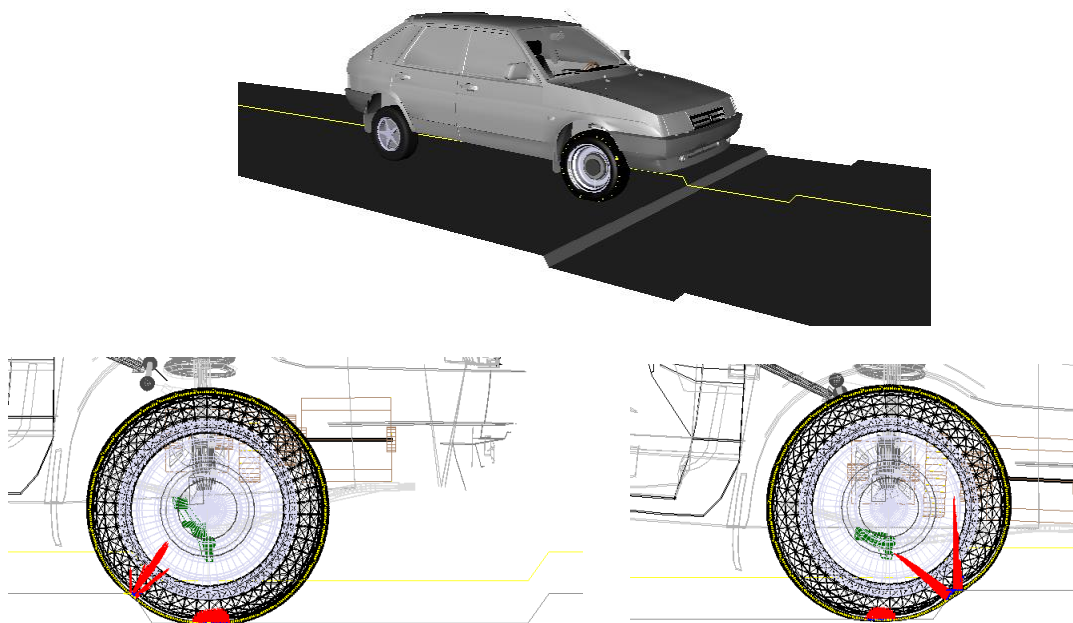


Рис. 33.184. Переезд через повреждение дороги

Загрузите полную конфигурацию **Road hole**. В данном тесте автомобиль движется с постоянной скоростью 1.5м/с через яму на дороге глубиной 7см.

### 33.4.9.1.3. Переезд через бордюр

Загрузите полную конфигурацию **Road curb**. В данном тесте автомобиль движется с постоянной скоростью 1.5м/с и переезжает передними и задними колесами через бордюр высотой 11см.

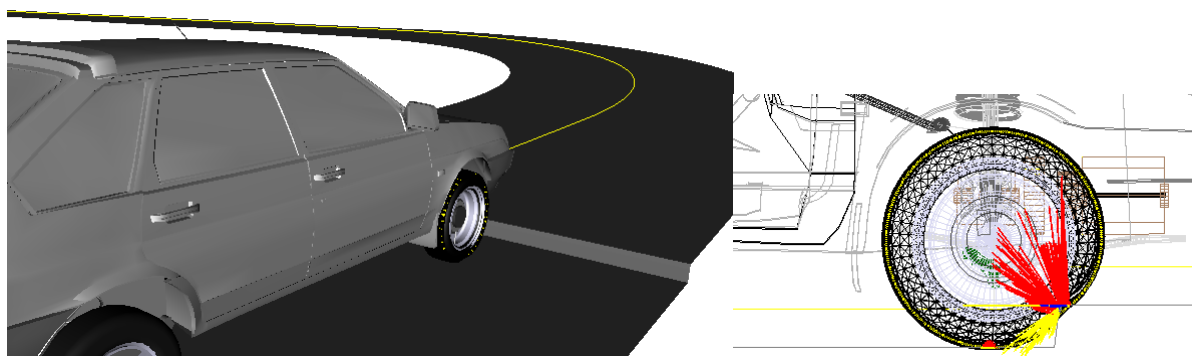


Рис. 33.185. Переезд через бордюр

### 33.4.9.2. Примеры моделирования монорельсового экипажа

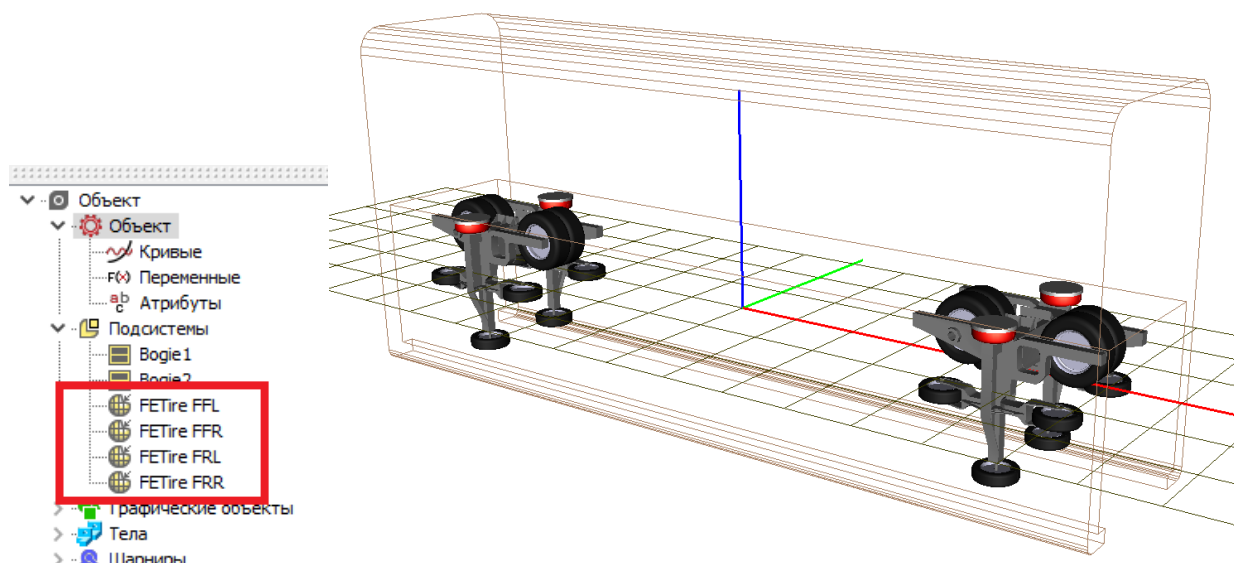


Рис. 33.186. Модель монорельсового вагона с четырьмя УШ в программе ввода

Пример монорельсового экипажа с упругими шинами находится по пути [{Данные УМ}\SAMPLES\Monorail\Monorail vehicle 4FETire](#)

В модели монорельсового экипажа УШ можно назначать только тяговым колесам. В рассматриваемой модели УШ предварительно назначены всем четырем тяговым колесам первой тележки

#### 33.4.9.2.1. Проезд по неровностям в виде ступенек

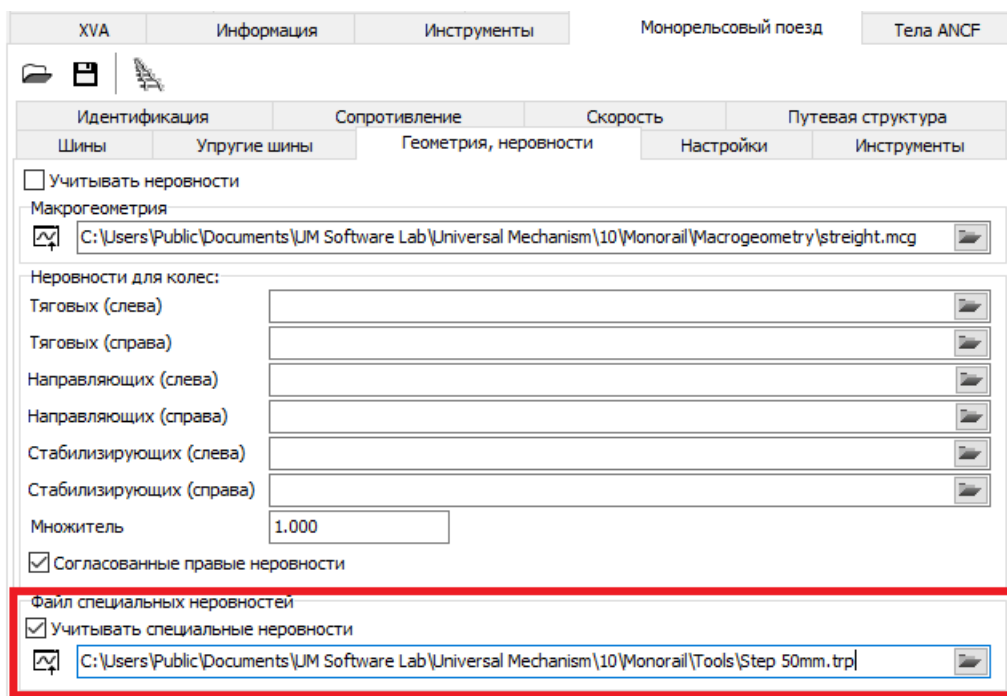


Рис. 33.187. Назначение файла специальных неровностей

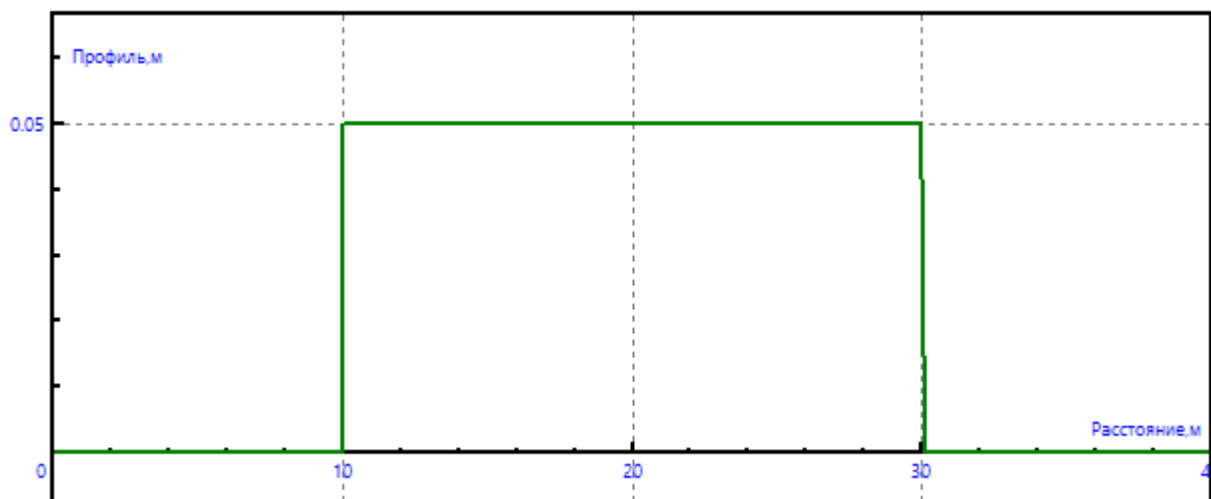


Рис. 33.188. График специальной неровности ‘Step 50mm.trp’

Откройте модель в программе UMSimul и загрузите полную конфигурацию **Steps**. В данной конфигурации вагон едет по прямолинейному участку, заезжает на ступеньку высотой 50мм и съезжает с нее. Геометрия ступенек задана в файле специальных неровностей ‘Step 50mm.trp’, рис. 33.187. Микронеровности не учитываются. Наезд на ступеньку происходит на расстоянии 10м от начала отсчета системы координат пути, а съезд – на расстоянии 30м, рис. 33.188. Для создания и модификации файлов специальных неровностей используется вкладка **Инструменты**, рис. 33.189.

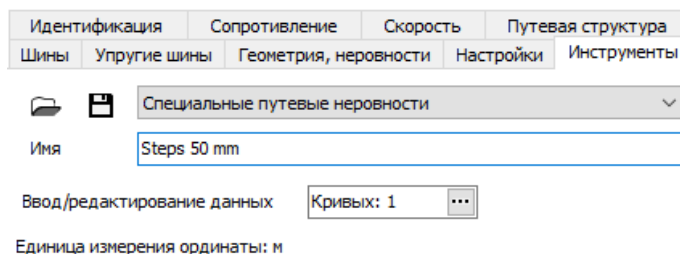


Рис. 33.189. Инструмент задания файла специальных неровностей

Любой тест с включенными УШ должен начинаться с назначения моделей УШ (п. 33.4.4.1 *Назначение колесам моделей упругих шин*) и соответствующим им моделей упрощенных безынерционных шин, (п. 33.4.4.5 *Согласованные модели безынерционных и упругих шин*). После этого следует рассчитать начальные условия в ситуации, когда все УШ активны, п. 33.4.4.6.2 *Расчет начальных условий для УШ в рамках выполнения теста равновесия*. Эти действия уже выполнены в загруженной конфигурации.

Для моделирования проезда неровностей всеми восьмью тяговыми колесами с УШ, в тесте реализовано динамическое управление включением и выключением УШ. Поясним составление расписания включения и выключения на примере упругой шины, назначенной в начальном состоянии переднему левому тяговому колесу передней тележки, рис. 33.190. Следует определить положения, в которых шину следует включить и выключить. Положения определяются путем, пройденным шиной с момента начала движения.

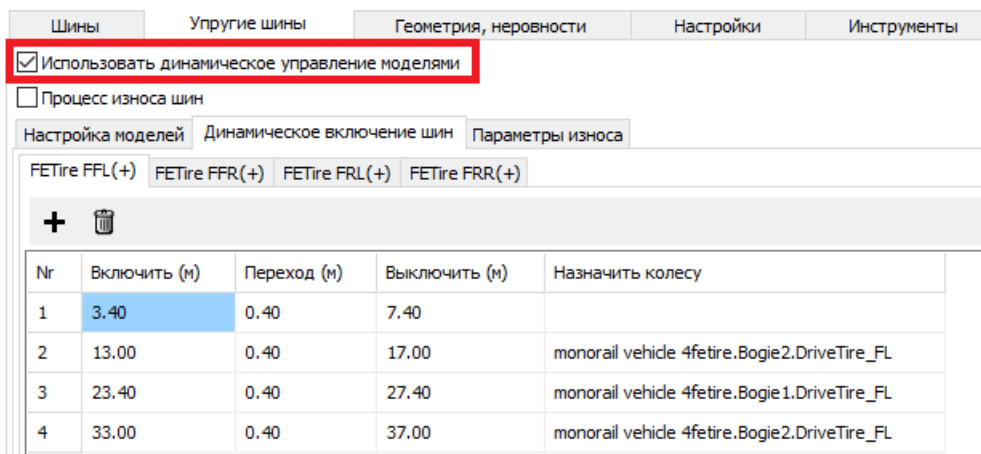


Рис. 33.190. Секции активизации шины FETire FFL

Постоим графики вертикальных сил для всех шин в зависимости от пройденного пути, используя упрощенные безынерционные модели шин. С этой целью деактивируем все УШ (рис. 33.191). Обратите внимание, что при деактивации УШ теряется информация о ее координатах, и при повторном включении им присваиваются нулевые значения.

Запустите процесс моделирования. В графическом окне строятся графики вертикальных сил всех тяговых колес в зависимости от пройденного пути. После окончания моделирования в режиме паузы скроем графики всех сил, кроме передних левых тяговых колес обеих тележек, рис. 33.192. Наезд на ступеньку и съезд с нее для этих колес моделируется одной упругой шиной FETire FFL.

Первая секция включения УШ FETire FFL соответствует включению шины после проезда 3.4м, длина переходного участка 0.4м, то есть в положении 3.8 м упругая шина подменяет упрощенную и включается в динамический процесс в качестве шины переднего левого колеса первой тележки, которому данная УШ назначена по умолчанию. В положении 7.4м УШ выключается и заменяется безынерционной.

На второй секции шина FETire FFL назначается переднему левому колесу второй тележки, на третьем – первой тележки и на последней секции – опять второй.

Для шины, используемой для назначения передним правым тяговым колесам, параметры секций такие же, поэтому можно использовать инструмент копирования набора секций с использованием всплывающего меню по правой кнопке мыши, рис. 33.193.

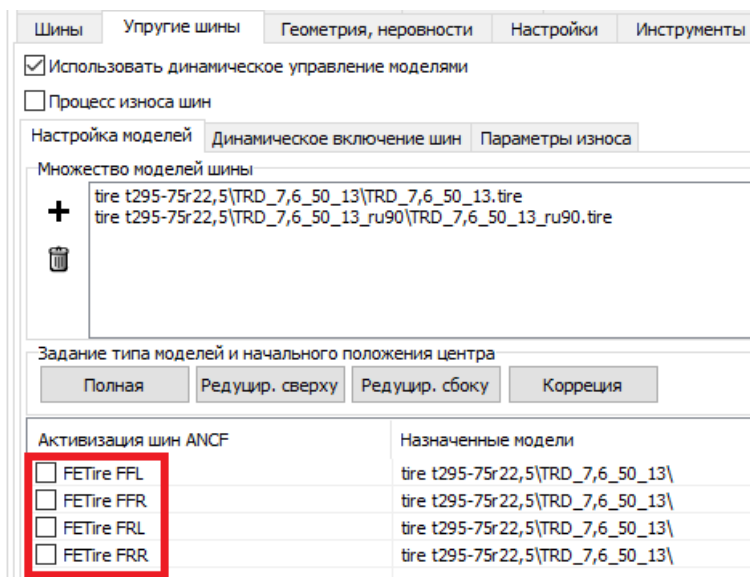


Рис. 33.191. Все УШ деактивированы

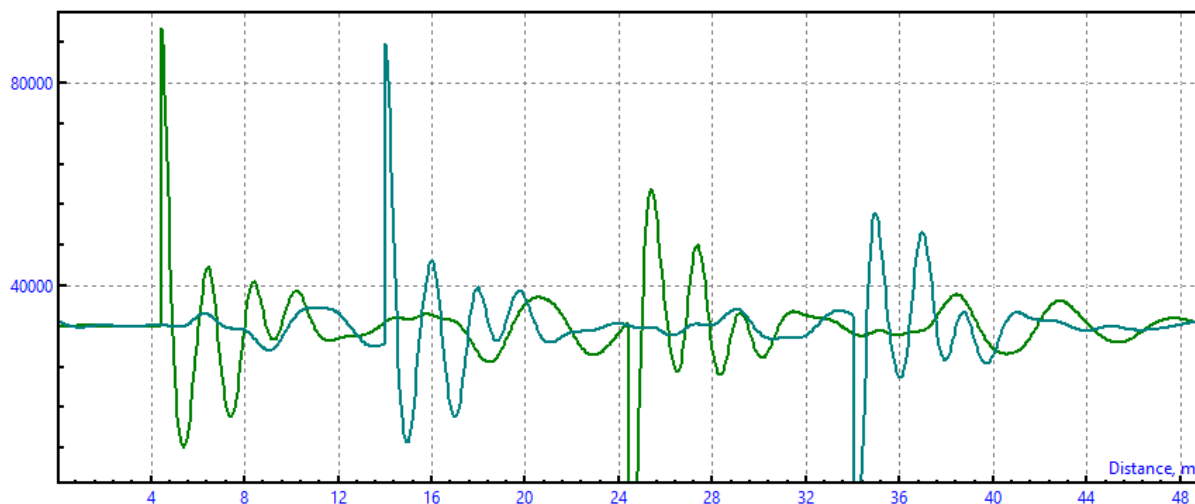


Рис. 33.192. Графики вертикальных сил для передних левых тяговых колес в зависимости от пройденного пути

Nr	Включить (м)	Переход (м)	Выключить (м)	Назначить колесу
1	3.40	0.40	7.40	
2	13.00	0.40	17.00	
3	23.40	0.40	27.40	monorail vehicle
4	33.00	0.40	37.00	monorail vehicle

Назначить шине >	FETire FFL
	FETire FFR
	FETire FRL
	FETire FRR

Рис. 33.193. Копирование параметров секций для другой УШ

После введения всех секций следует

- загрузить заново полную конфигурацию **Steps** или активировать все УШ и прочитать начальные условия из файла last.xv, поскольку при деактивации УШ

теряется информация о ее координатах, и при повторной активации им присваиваются нулевые значения;

- запустить моделирование динамики проезда специальных неровностей с использованием УШ. Результат моделирования движения со скоростью 10м/с приведен на рис. 33.194.

Сравнение результатов для различных моделей УШ (полная, редуцированные) показывает в данном тесте очень хорошее совпадение (рис. 33.195), причем интегрирование уравнений с использованием редуцированных моделей УШ происходит примерно вдвое быстрее, чем с использованием полной модели.

В заключение отметим, что использование не модифицированной модели УШ с боковых редуцированием приводит к значительному отличию результатов в силу избыточной жесткости редуцированной части при больших упругих перемещениях, рис. 33.196, п. 33.3.13.4.4 *Статический тест для оценки параметров модифицированной модели шины с редуцированной боковой частью.*

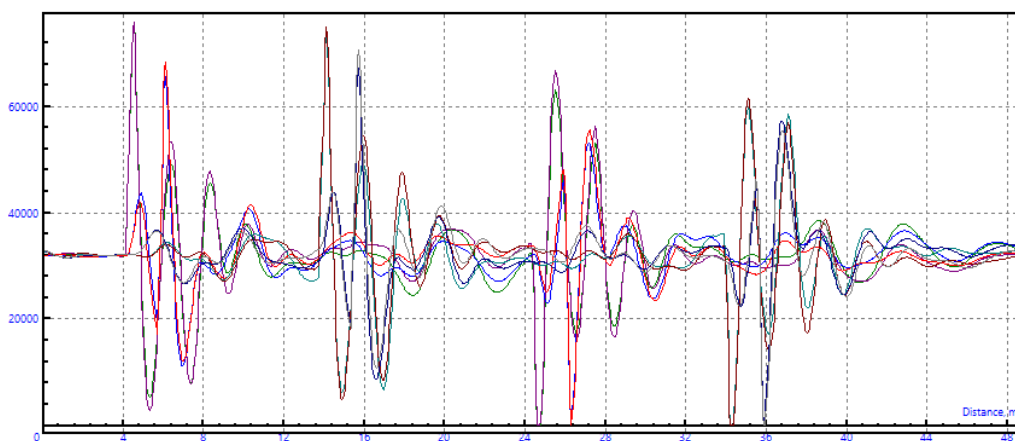


Рис. 33.194. Проезд специальных неровностей с использованием УШ

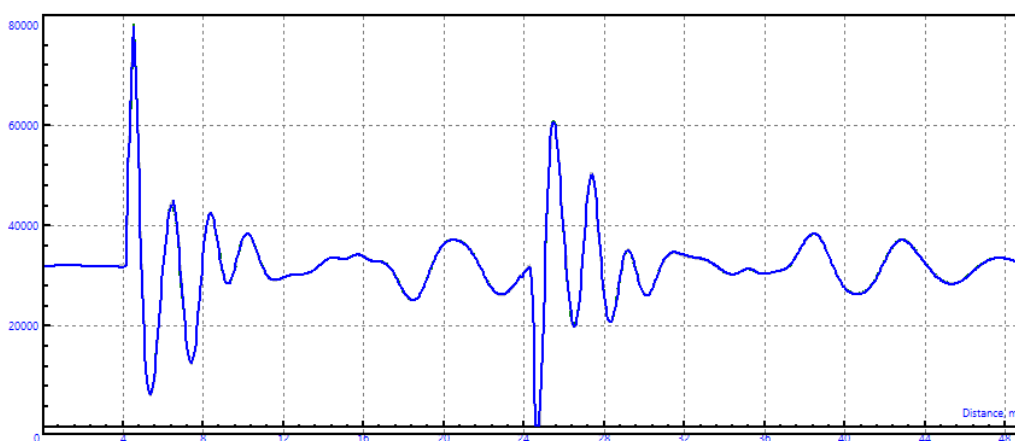


Рис. 33.195. Сравнение вертикальной силы на передней левой шине первой тележки для полной и редуцированных моделей УШ. Результаты практически совпадают.

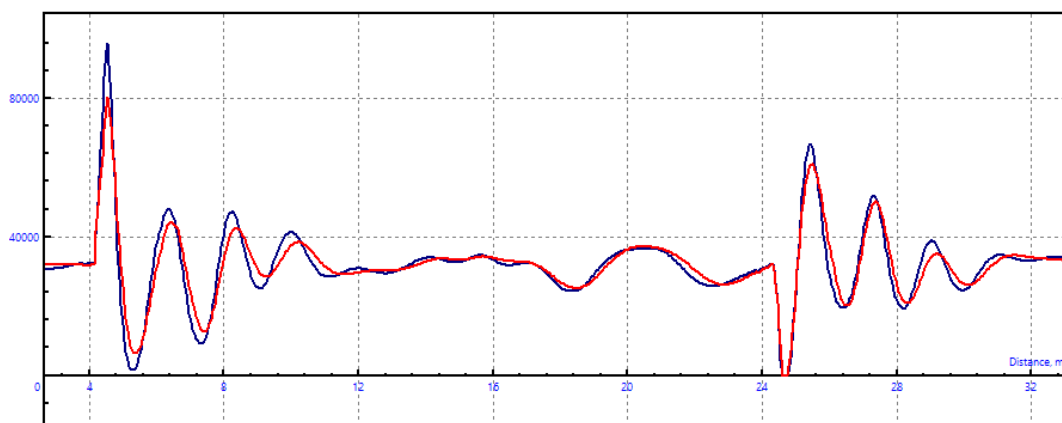


Рис. 33.196. Сравнение вертикальной силы на передней левой шине первой тележки для полной и не модифицированной моделей УШ с боковым редуцированием

### 33.4.9.2.2. Переезд через узкую щель в путевой структуре

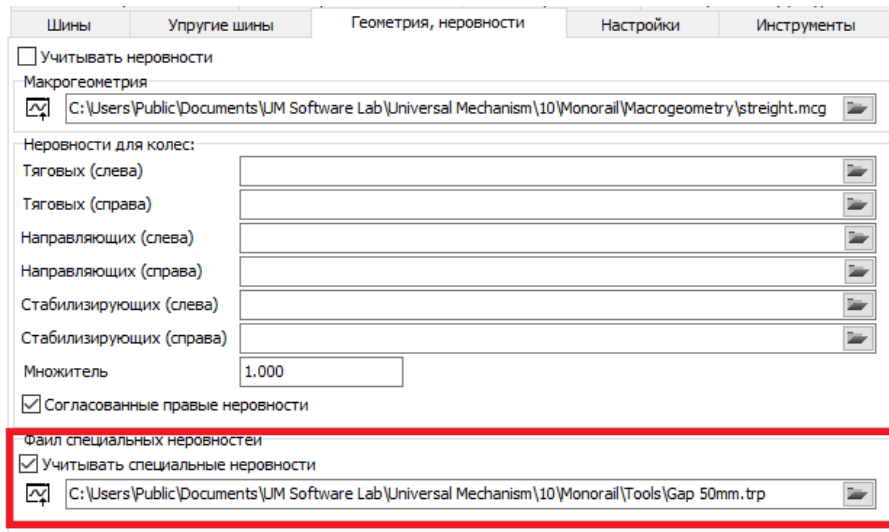


Рис. 33.197. Назначение файла специальных неровностей 'Gap 50mm.trp'

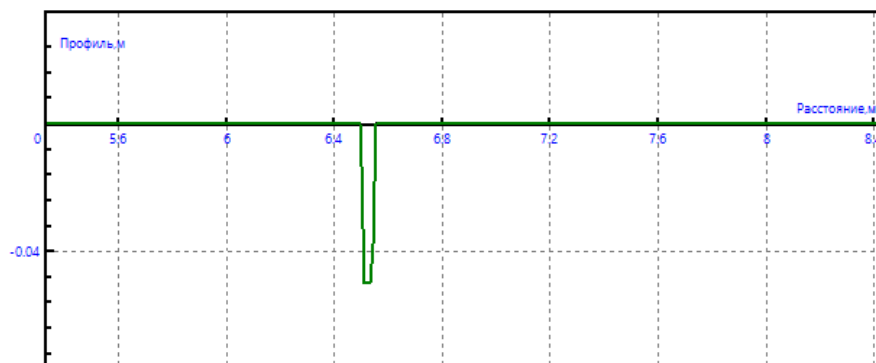


Рис. 33.198. График специальной неровности 'Gap 50mm.trp'

Откройте модель в программе UMSimul и загрузите полную конфигурацию **Gap**. В данной конфигурации вагон едет по прямолинейному участку и проезжает по поперечному разрыв в путевой структуре шириной 50мм. Геометрия разрыва задана в файле специальных неровностей 'Gap 50mm.trp', рис. 33.197. Микронеровности не учитываются. Наезд на разрыв происходит на расстоянии 6.5м от начала отсчета системы координат пути, рис. 33.198, рис. 33.199.

Для ускорения процесса моделирования проезда неровностей четырьмя тяговыми колесами передней тележки с УШ в тесте реализовано динамическое управление включением и выключением УШ. Графики вертикальных сил, действующих на колеса при проезде разрыва представлены на рис. 33.200.

Для получения более плавных графиков в данном тесте по сравнению с предыдущим увеличено вдвое число щетинок в продольном направлении, рис. 33.201.

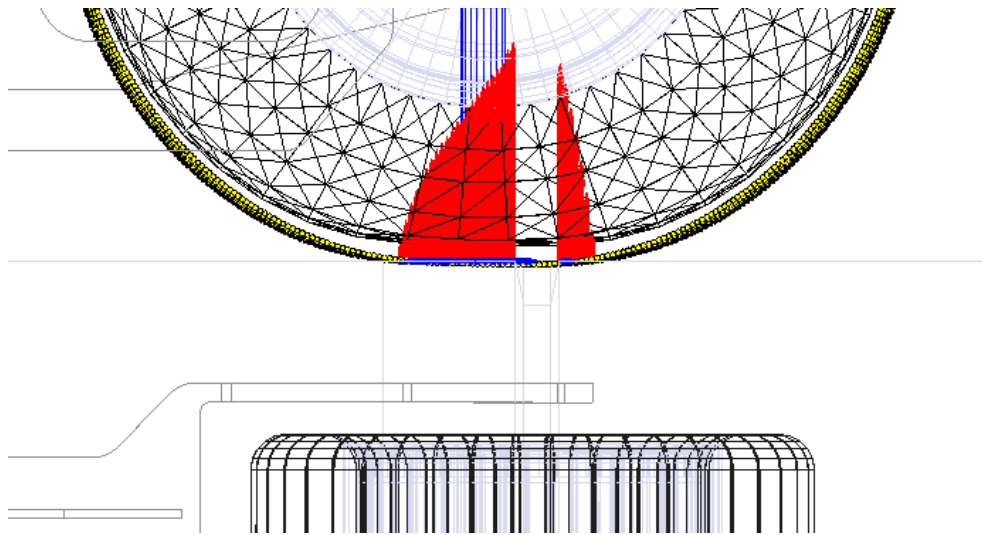


Рис. 33.199. Вертикальные давления шины при проезде разрыва

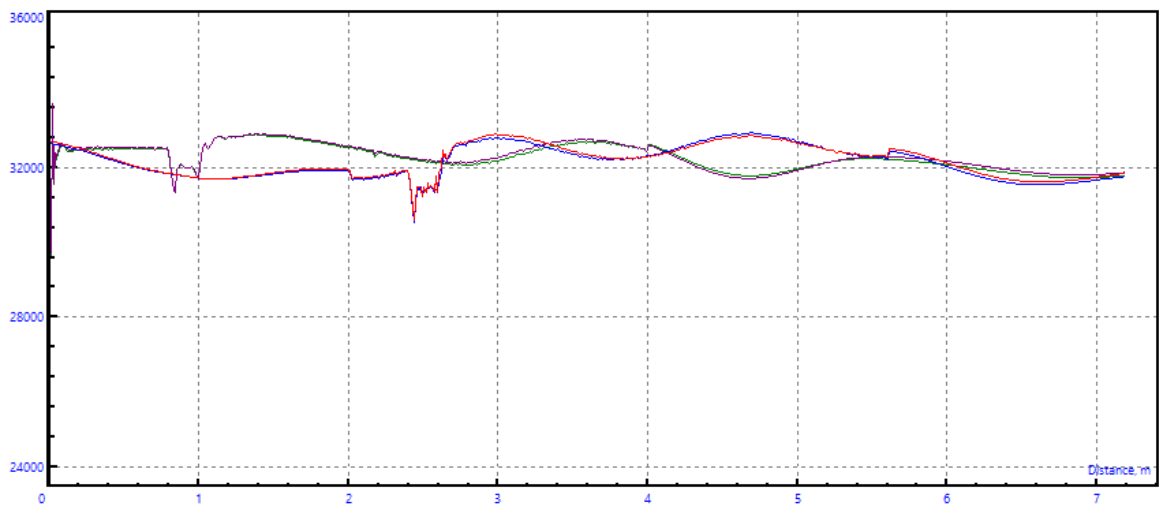


Рис. 33.200. Вертикальные силы для шин передней тележки при проезде щели в балке путевой структуры

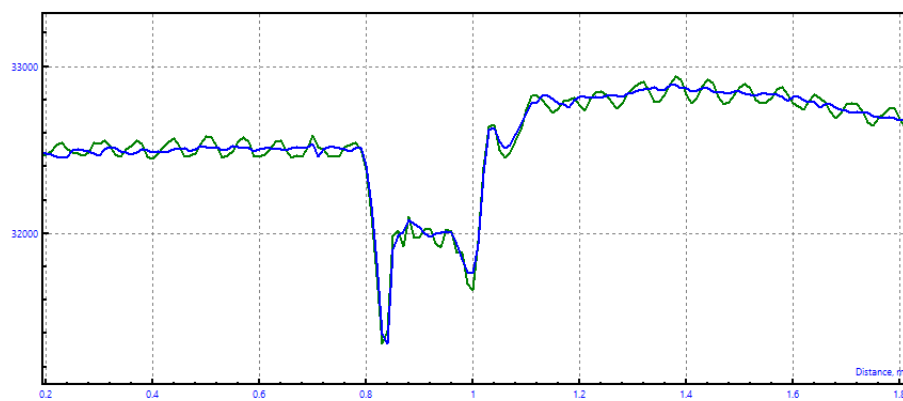


Рис. 33.201. Сравнение вертикальной силы для переднего левого колеса при числе щетинок 5 и 10 в продольном направлении для одного элемента

## Список литературы

- [1] D. Pogorelov and A. Rodikov, "The Trapezoidal Finite Element In Absolute Coordinates For Dynamic Modeling Of Automotive Tire And Air Spring Bellows. Part I," *Transport problems*, vol. 16, no. 2, pp. 141-152, 2021.
- [2] D. Pogorelov and A. Rodikov, "The Trapezoidal Finite Element In Absolute Coordinates For Dynamic Modeling Of Automotive Tire And Air Spring Bellows. Part II," *Transport problems*, vol. 16, no. 3, pp. 5-16, 2021.
- [3] L. Kollar and G. Springer, *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [4] M. Bampton and R. Craig, "Coupling of Substructures for Dynamic Analyses," *AIAA Journal.*, vol. 6, no. 7, pp. 1313-1319, 1968.
- [5] Д. Ю. Погорелов, Введение в моделирование динамики систем тел, Брянск: Брянский государственный технический университет, 1997.
- [6] J. Wong, *Theory of Ground Vehicles*. 4th Edition, Wiley, 2008.
- [7] W. Hirschberg, G. Rill и Н. Weinfurter, «User-Appropriate Tyre-Modelling for Vehicle Dynamics in Standard and Limit Situations,» *Vehicle System Dynamics*, т. 38, № 2, pp. 103-125, 2002.
- [8] W. Hall, «Finite element modelling and simulation for a 'smart' tyre. PhD thesis, University of Warwick,» 2003. [В Интернете]. Available: <https://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/1238/>. [Дата обращения: 2024].
- [9] N. Y. Kuznetsov, A. I. Fedotov и V. G. Vlasov, «Test benches for studying the properties of car tyres,» Ekaterinburg, Russia, 2017.
- [10] ABACUS Example Problems Manual, «3.1.8 Tread wear simulation using adaptive meshing in ABAQUS/Standard,» [В Интернете]. Available: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/exa/ch03s01aex83.html>. [Дата обращения: 2024].