



Руководство пользователя



# Моделирование динамики железнодорожных экипажей

Рассмотрены специализированные возможности программного комплекса «Универсальный механизм» для моделирования железнодорожных экипажей

## Оглавление

<b>8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ</b> .....	<b>8-6</b>
<b>8.1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ</b> .....	<b>8-6</b>
<b>8.2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬСОВОГО ЭКИПАЖА</b> .....	<b>8-8</b>
8.2.1. Тип объекта – рельсовый экипаж .....	8-8
8.2.2. Базовая система координат .....	8-9
8.2.3. Колесная пара и независимое колесо .....	8-9
8.2.3.1. Добавление колесной пары .....	8-9
8.2.3.2. Стандартная колесная пара .....	8-10
8.2.3.3. Колесная пара независимого вращения .....	8-13
8.2.3.4. Отдельное колесо.....	8-13
8.2.3.5. Геометрия колесной пары .....	8-15
8.2.3.6. Редактирование параметров КП.....	8-16
8.2.3.7. Задание жесткости оси КП на кручение .....	8-19
8.2.3.8. Добавление второй и всех последующих КП.....	8-19
8.2.3.9. Визуальное добавление колесной пары.....	8-20
8.2.4. Моделирование букс.....	8-21
8.2.4.1. Добавление букс – графических образов.....	8-22
8.2.4.2. Модель буксы как отдельного тела.....	8-23
8.2.4.3. Визуальное добавление букс .....	8-25
8.2.5. Моделирование линейных пружин подвески.....	8-26
8.2.6. Моделирование гасителей, тяг, поводков, поглощающих аппаратов .....	8-26
8.2.7. Особенности создания моделей локомотивов .....	8-27
8.2.7.1. Моделирование системы передачи тяги .....	8-27
8.2.7.1.1. Тела и шарниры .....	8-27
8.2.7.1.2. Тяговый момент.....	8-28
8.2.7.1.3. Зубчатое зацепление.....	8-31
8.2.7.1.4. Расчет начальных угловых скоростей с помощью файла фиксации .....	8-32
8.2.7.1.5. Расчет начальных угловых скоростей с помощью связей на начальные условия .....	8-34
8.2.7.2. Пример создания модели локомотива .....	8-38
8.2.7.2.1. Создание колесно-моторного блока локомотива.....	8-38
8.2.7.2.2. Создание тележки локомотива .....	8-43
8.2.7.2.3. Сборка локомотива.....	8-48
8.2.7.2.3.1. Доработка описанной модели .....	8-49
8.2.7.2.3.2. Создание файла фиксации.....	8-49
8.2.7.2.3.3. Определение связей на начальные условия .....	8-50
8.2.7.2.3.4. Тест сил .....	8-52
8.2.7.2.4. Исследование некоторых динамических характеристик локомотива .....	8-52
8.2.7.2.4.1. Сравнение коэффициентов динамики .....	8-53
8.2.7.2.4.2. Способ определения критической скорости.....	8-56
8.2.7.2.4.3. Сравнение степени износа бандажа при движении в кривых .....	8-57
8.2.7.3. Поддержка режима торможения .....	8-60
8.2.7.3.1. Общие положения .....	8-60
8.2.7.3.2. Использование визуальных компонент .....	8-62
8.2.8. Создание модели роликового стенда и особенности моделирования динамики .....	8-65
<b>8.3. Путь</b> .....	<b>8-68</b>
8.3.1. Геометрия пути .....	8-68
8.3.1.1. Геометрия рельсов в идеальной прямой.....	8-68
8.3.1.2. Макрогеометрия кривой.....	8-70
8.3.1.3. Геометрия стрелочного перевода .....	8-73
8.3.1.4. Система координат пути .....	8-74
8.3.1.5. Неровности рельсовых нитей .....	8-75
8.3.2. Модели пути .....	8-76
<b>8.4. КОНТАКТ КОЛЕСО-РЕЛЬС</b> .....	<b>8-78</b>
8.4.1. Расчет контакта колеса с безмассовым рельсом .....	8-79
8.4.1.1. Алгоритмы геометрического расчета контакта колесо-рельс .....	8-79

8.4.1.1.1. Алгоритм определения минимального расстояния между профилями .....	8-79
8.4.1.1.2. Расчет таблиц координат точек контакта .....	8-80
8.4.1.1.3. Упрощенный расчет геометрии контакта .....	8-83
8.4.1.1.3.1. Эффективная коничность .....	8-83
8.4.1.1.3.2. Параметр угла контакта .....	8-84
8.4.1.1.3.3. Упрощенная геометрия контакта .....	8-86
8.4.1.2. Расчет сил в контакте колесо-рельс .....	8-87
8.4.1.2.1. Методика расчета сил в контакте колесо-рельс .....	8-87
8.4.1.2.2. Алгоритмы расчета сил крива .....	8-90
8.4.1.2.2.1. Метод Мюллера .....	8-91
8.4.1.2.2.2. Метод Минова .....	8-91
8.4.1.2.2.3. FASTSIM .....	8-92
8.4.1.2.2.4. FASTSIM_A .....	8-93
8.4.2. Расчет контакта колеса с инерционным рельсом .....	8-94
8.4.3. Коэффициент трения в контакте колесо-рельс .....	8-97

**8.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ ..... 8-99**

8.5.1. Инструменты подготовки процесса моделирования .....	8-99
8.5.1.1. Создание профилей колес и рельсов .....	8-99
8.5.1.1.1. Поточный ввод с последующей сплайновой интерполяцией .....	8-100
8.5.1.1.2. Ввод профилей, составленных из отрезков прямых и дуг окружности .....	8-102
8.5.1.1.3. Инструмент анализа пар профилей .....	8-103
8.5.1.1.4. Автоматическое создание профиля нового рельса .....	8-106
8.5.1.1.5. Импорт профилей колес из САПР .....	8-109
8.5.1.1.6. Загрузка профилей колес и рельсов из MiniProf .....	8-110
8.5.1.1.7. Импорт профилей из MiniProf и других систем .....	8-111
8.5.1.2. Создание неровностей рельсовых нитей .....	8-114
8.5.1.2.1. Создание файлов неровностей .....	8-114
8.5.1.2.1.1. Аналитическое выражение .....	8-116
8.5.1.2.1.2. Просадка .....	8-116
8.5.1.2.1.3. Из файла .....	8-116
8.5.1.2.1.4. По точкам .....	8-116
8.5.1.2.1.5. Спектр .....	8-117
8.5.1.2.1.5.1. Генерация неровностей с использованием спектра, заданного поточно .....	8-118
8.5.1.2.1.5.2. Геометрия путевых неровностей .....	8-121
8.5.1.2.1.5.3. Генерация неровностей по спектрам FRA .....	8-122
8.5.1.2.1.5.4. Генерация неровностей по спектрам ERRI .....	8-125
8.5.1.2.1.5.5. Неровности ПНСТ 511-2020 .....	8-127
8.5.1.2.1.5.6. Генерация неровностей по спектру, заданному выражением .....	8-128
8.5.1.2.2. Программирование неровностей в файле управления .....	8-132
8.5.1.3. Создание файла макрогеометрии .....	8-134
8.5.1.3.1. Геометрия пути в горизонтальной плоскости .....	8-134
8.5.1.3.1.1. Прямой участок .....	8-135
8.5.1.3.1.2. Стандартная кривая .....	8-135
8.5.1.3.1.3. Стандартный стрелочный перевод .....	8-136
8.5.1.3.1.4. Поточно заданный участок плана пути .....	8-139
8.5.1.3.2. Вертикальный профиль пути .....	8-141
8.5.1.3.2.1. Участок постоянного уклона .....	8-142
8.5.1.3.2.2. Поточно заданный участок профиля пути .....	8-142
8.5.1.3.3. Импорт результатов тахеосъемки ж/д пути .....	8-143
8.5.1.4. Создание файла геометрических параметров стрелочного перевода .....	8-145
8.5.1.5. Оценка состояния пути .....	8-146
8.5.1.5.1. Постановка задачи .....	8-146
8.5.1.5.2. Анализ состояния пути .....	8-150
8.5.2. Задание параметров моделирование динамики рельсового экипажа .....	8-161
8.5.2.1. Файлы настроек .....	8-162
8.5.2.1.1. Файл конфигурации РЭ .....	8-162
8.5.2.1.2. Группа файлов настроек РЭ .....	8-164
8.5.2.2. Режимы продольного движения экипажа .....	8-165
8.5.2.2.1. Выбег .....	8-165
8.5.2.2.2. $v=const$ .....	8-165
8.5.2.2.3. По профилю .....	8-165
8.5.2.2.4. $v=0$ .....	8-167

8.5.2.2.5. Единица задания скорости.....	8-168
8.5.2.3. Назначение профилей колес и рельсов .....	8-169
8.5.2.3.1. Назначение профилей рельсов .....	8-169
8.5.2.3.1.1. Задание изменения профиля рельса вдоль пути.....	8-171
8.5.2.3.2. Назначение профилей колес .....	8-172
8.5.2.4. Параметры пути .....	8-174
8.5.2.4.1. Выбор модели и задание параметров пути .....	8-174
8.5.2.4.1.1. Упруго-диссипативные параметры пути .....	8-175
8.5.2.4.1.1.1. Безмассовый рельс.....	8-175
8.5.2.4.1.1.2. Инерционный рельс .....	8-176
8.5.2.4.1.1.3. Упругий путь.....	8-176
8.5.2.4.2. Макрогеометрия пути .....	8-176
8.5.2.4.2.1. Тип пути: прямая.....	8-177
8.5.2.4.2.2. Тип пути: кривая .....	8-177
8.5.2.4.2.3. Тип пути: S-кривая.....	8-178
8.5.2.4.2.4. Особенности задания возвышения в кривой и S-кривой.....	8-178
8.5.2.4.2.5. Как смоделировать движение в левой кривой? .....	8-180
8.5.2.4.2.6. Тип пути: перевод .....	8-180
8.5.2.4.2.7. Тип пути: из файла. Множество файлов макрогеометрии .....	8-181
8.5.2.4.3. Неровности рельсовых нитей .....	8-182
8.5.2.4.3.1. Неровности из файлов. Группы неровностей .....	8-183
8.5.2.4.3.1.1. Список групп неровностей.....	8-183
8.5.2.4.3.2. Детерминированные неровности .....	8-184
8.5.2.4.3.3. Задание неровностей идентификаторами .....	8-186
8.5.2.4.4. Изображение пути в анимационном окне .....	8-190
8.5.2.5. Параметры контактного взаимодействия колеса с рельсом .....	8-191
8.5.2.5.1. Параметры контакта безмассового рельса .....	8-191
8.5.2.5.2. Параметры контакта инерционного рельса.....	8-193
8.5.2.5.3. Упругий путь .....	8-194
8.5.2.5.4. Задание коэффициентов трения в контакте колесо-рельс .....	8-194
8.5.2.6. Задание сил, приложенных к автосцепке .....	8-198
8.5.2.6.1. Задание сил и точек приложения .....	8-198
8.5.2.6.2. Создание файла с описанием силы.....	8-199
8.5.2.6.3. Построение графиков и визуализация сил .....	8-199
8.5.2.6.4. Примеры создания файлов силы .....	8-200
8.5.2.7. Дополнительные параметры .....	8-203
8.5.2.7.1. Отклонение формы колеса от идеальной окружности .....	8-203
8.5.2.7.1.1. Ползун .....	8-203
8.5.2.7.1.2. Эллипс .....	8-205
8.5.2.7.1.3. Гармоника .....	8-206
8.5.2.7.1.4. По точкам.....	8-208
8.5.2.7.2. Дефекты радиусов .....	8-209
8.5.2.7.3. Настройки расчета геометрии контакта колеса с рельсом.....	8-210
8.5.3. Инструменты для отображения и анализа динамики рельсовых экипажей .....	8-211
8.5.3.1. Особенности создания списка переменных .....	8-211
8.5.3.1.1. Переменные, характеризующие контакт колеса с рельсом .....	8-212
8.5.3.1.2. Переменные, относящиеся к колесной паре в целом .....	8-216
8.5.3.1.3. Переменные, относящиеся к рельсовому экипажу в целом .....	8-217
8.5.3.1.4. Показатели безопасности движения в отношении вкатывания колеса на рельс .....	8-218
8.5.3.1.4.1. Критерии Надаля и Вайнштока.....	8-218
8.5.3.1.4.2. Российский критерий. Уточненный и комбинированный критерии .....	8-222
8.5.3.1.4.3. Пример прохождения грузовым вагоном неблагоприятного сочетания детерминированных неровностей .....	8-224
8.5.3.1.5. Боковые и рамные силы .....	8-227
8.5.3.1.6. Пример создания переменной «поперечное воздействие КП на путь» .....	8-228
8.5.3.1.7. Пример создания переменной «суммарная рамная сила для тележки».....	8-229
8.5.3.1.8. Построение графика поперечного смещения колесной пары относительно рельсовых нитей 8-232	
8.5.3.1.9. Кинематические характеристики тел относительно системы координат пути.....	8-235
8.5.3.1.10. Использование переменной <i>Путь</i> .....	8-236
8.5.3.1.10.1. Использование переменной <i>Путь</i> при построении графиков .....	8-236
8.5.3.1.10.2. Использование переменной <i>Путь</i> в списках автоматически рассчитываемых переменных.....	8-236

8.5.3.2. Окно анимации.....	8-238
8.5.3.3. Окно анимации контакта.....	8-241
8.5.3.4. Окно анимации пятен контакта .....	8-242
8.5.3.5. Табличный процессор .....	8-244
8.5.3.6. Функционалы для определения показателей плавности хода .....	8-245
8.5.3.7. Методы определения показателей комфорта пассажиров .....	8-250
8.5.3.7.1. Показатель постоянного комфорта .....	8-250
8.5.3.7.2. Показатель комфорта при прохождении кривого участка пути.....	8-252
8.5.3.7.3. Показатель комфорта при дискретных событиях .....	8-257
8.5.4. Численные методы.....	8-260
8.5.4.1. Метод Парка.....	8-260
8.5.4.2. Park Parallel.....	8-262
8.5.4.2.1. Условия, при которых можно использовать метод Park Parallel.....	8-262
8.5.4.2.2. Параметры метода .....	8-263
8.5.4.3. Сравнение производительности численных методов при моделировании динамики грузового вагона с трехэлементной тележкой.....	8-264
<b>8.6. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ .....</b>	<b>8-267</b>
8.6.1. Список внутренних идентификаторов, параметризующих условия функционирования РЭ.....	8-267
8.6.2. Пример задания полнофакторного эксперимента .....	8-271
<b>8.7. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ .....</b>	<b>8-272</b>
8.7.1. Метод постепенного снижения скорости .....	8-273
8.7.2. Оценка критической скорости с помощью многовариантного расчета .....	8-277
<b>8.8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>8-280</b>

## 8. Моделирование динамики железнодорожных экипажей

### 8.1. Общая информация

Программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ или УМ) разработан в лаборатории вычислительной механики Брянского государственного технического университета в сотрудничестве с кафедрой «Локомотивы» и ФГУП ВНИКТИ МПС. Правообладателем программного комплекса является проф. Погорелов Дмитрий Юрьевич (свидетельство Российского агентства по патентам и товарным знакам об официальной регистрации программы № 2001611072 от 22 августа 2001 г.).

Модуль **UM Loco** представляет собой набор дополнительных программных инструментов, интегрированных в программы **UM Input** и **UM Simulation**. Признаком наличия модуля в текущей конфигурации УМ является знак «+» в соответствующей строке окна **О программе** (команда меню **Помощь | О программе...**), рис. 8.1.

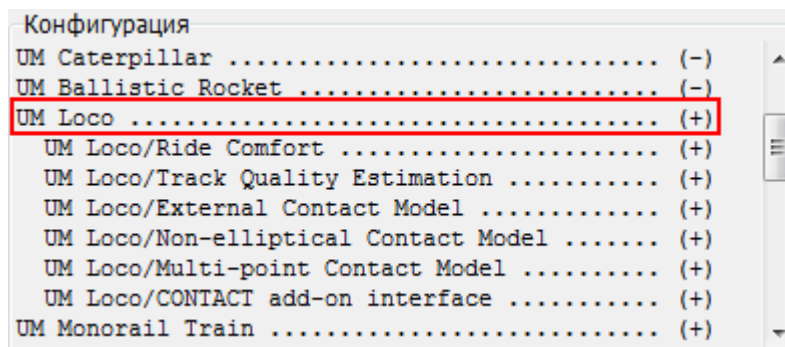


Рис. 8.1. Признак наличия модуля в текущей конфигурации УМ

Программный комплекс в конфигурации **UM Loco** имеет развитую программную среду, предназначенную для моделирования динамики рельсовых экипажей (РЭ): локомотивов, вагонов и путевых машин. Дополнительно к стандартным возможностям программы УМ реализованы:

- стандартная подсистема колесная пара;
- алгоритмы расчета сил в контакте колесо-рельс, в том числе алгоритм FASTSIM, модель В. Кика и И. Пиотровского, интерфейс к модели Калкера CONTACT;
- графический интерфейс анимационного представления сил контакта колесо-рельс в процессе моделирования движения;
- интерфейсные возможности по заданию профилей колеса и рельса, профилей неровности рельсовых нитей;
- интерфейс задания параметров кривых и стрелочных переводов, а также инструмент задания макрогеометрии пути любой сложности;
- список стандартных переменных, характеризующих особенности взаимодействия колеса с рельсом, позволяющий строить графики и выполнять численный анализ взаимодействия (силы крипа, углы набегания, направляющие силы и так далее);

- база данных профилей колес и рельсов;
- готовые модели РЭ;
- модуль создания конечноэлементных моделей (кузова, рамы) и построения гибридных моделей РЭ с учетом заданного числа низших частот и форм колебаний кузова и/или рамы (поддерживается модулем **UM FEM**);
- база данных неровностей пути;
- инструмент оценки состояния пути по нормам МПС.

**UM Loco** позволяет:

- определять критические скорости экипажей;
- рассчитывать динамику РЭ в полной пространственной постановке, в прямых и кривых участках пути, с учетом и без учета неровностей путевой структуры с одновременным расчетом переменных, характеризующих динамические показатели РЭ: ускорения произвольных точек любого тела, коэффициенты динамики, усилия в тягах и поводках, рамные силы, силы в контакте колесо-рельс, факторы износа, коэффициенты безопасности и так далее;
- моделировать динамику локомотива в режиме тяги и выбега с учетом и без учета эффекта замедления;
- исследовать зависимость динамики РЭ от геометрии профилей колеса и рельса;
- включать отдельные экипажи или сцепы в состав модели поезда;
- задавать программу численных экспериментов с целью анализа влияния параметров модели на динамические показатели РЭ, выполнять многокритериальную оптимизацию модели (поддерживается модулем **UM Experiments**);
- рассчитывать частоты и формы колебаний кузова и рамы с использованием конечноэлементных моделей;
- учитывать влияние на динамику РЭ любого числа низших частот и форм колебаний кузова и рамы.

Моделирование производится во временной области, то есть в зависимости от времени. С помощью UM Loco можно создавать *полностью параметризованные модели*, то есть задавать с помощью идентификаторов или выражений инерционные, геометрические параметры (в том числе и графические изображения элементов), а также основные характеристики силовых элементов (например, жесткости пружин, коэффициенты диссипации гасителей, коэффициенты трения в контактах и так далее). Параметризация модели является основой оптимизационных расчетов РЭ.

Дополнительную общую информацию об использовании UM для моделирования динамики РЭ можно найти в презентации MS PowerPoint по адресу

[www.universalmecanism.com/download/docs/umloco.zip](http://www.universalmecanism.com/download/docs/umloco.zip) (презентация PowerPoint в zip-архиве).

## 8.2. Создание моделей рельсового экипажа

Создание модели РЭ в основных чертах совпадает с разработкой модели любой системы абсолютно твердых или упругих тел, связанных посредством шарниров и силовых элементов. Обычно при моделировании РЭ с использованием УМ абсолютно твердыми телами считаются кузов, рамы тележек, колесные пары, буксы, роторы и статоры тяговых двигателей.

Предполагается, что пользователь освоил основные понятия, связанные с процессом создания моделей простейших механических систем в программе УМ и методы и инструменты их исследования. См. файл [gs\\_UM\\_Loco](#) для детального изучения процесса создания конкретной модели РЭ.

### 8.2.1. Тип объекта – рельсовый экипаж

При создании объекта – РЭ следует создать новый объект с помощью команды меню **Файл | Новый объект** (Ctrl+N), рис. 8.2, затем добавить к модели хотя бы одну колесную пару (КП). После этого к списку идентификаторов объекта автоматически добавляется идентификатор скорости продольного движения экипажа  $v_0$  (точнее, идентификатор определяет начальную скорость в момент времени  $t = 0$  в режимах выбега и поддержания постоянной скорости), рис. 8.3.

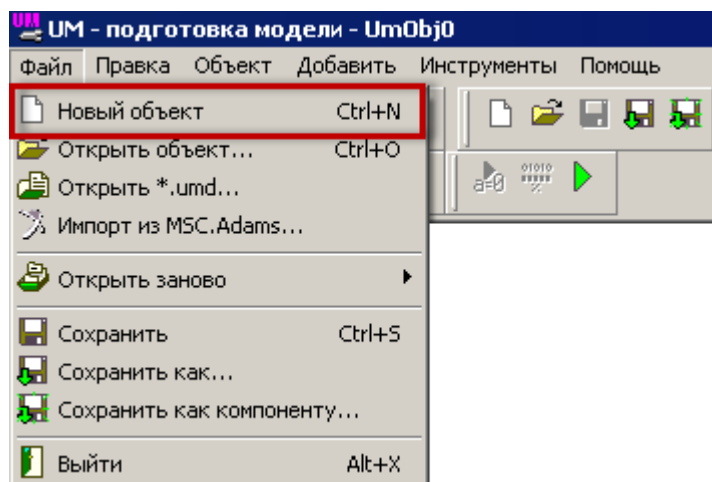


Рис. 8.2. Создание нового объекта

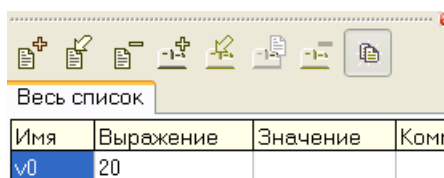


Рис. 8.3. Идентификатор скорости  $v_0$

## 8.2.2. Базовая система координат


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

- ось Z вертикальна, ось X направлена вдоль экипажа в направлении движения (то есть РЭ движется в положительном направлении оси X);
- начало координат расположено, как правило, либо на уровне головок рельсов (рекомендуется), либо на уровне осей КП на идеально ровном пути (устаревшее);

*Левым* считается элемент модели, имеющий положительную координату Y (то есть левый по ходу движения РЭ).

## 8.2.3. Колесная пара и независимое колесо

### 8.2.3.1. Добавление колесной пары

Колесная пара (КП) в УМ представлена *стандартной подсистемой*. Для добавления КП или отдельного колеса следует перейти к списку подсистем, добавить подсистему с помощью кнопки  и выбрать тип подсистемы **Колесная пара**, рис. 8.4.

Реализованы два типа КП, различающиеся по числу степеней свободы, а также отдельное колесо с индивидуальной системой подвески, рис. 8.5:

- **Стандартная:** КП с шестью степенями свободы и абсолютно твердой осью;
- **Независимого вращения:** используется в том числе для моделирования упругости на кручение оси обычной КП;
- **Отдельное колесо (левое);**
- **Отдельное колесо (правое).**

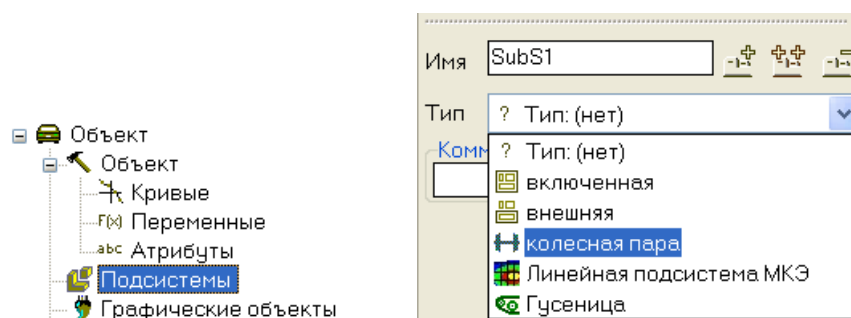


Рис. 8.4. Добавление колесной пары

Шаблоны подсистем находятся в каталоге {Данные УМ}\rw\wset:

*Standard.wst*

*Independent.wst*



*SingleRight.wst*

*SingleLeft.wst*

В версии УМ 7.2 появилась возможность использовать шаблоны колесных пар с инерционными рельсами. Рельсы представляют собой твердые тела с именами *leftrail* и *rightrail*. Рельсы как твердые тела имеют по три степени свободы – две поступательные относительно поперечной (Y) и вертикальной (Z) осей, и одну вращательную вокруг про-

дольной оси X. Тела соединены с базой силовыми элементами типа сайлент-блок, моделирующими подрельсовое основание. Чтобы использовать шаблоны колесных пар с инерционным рельсом необходимо установить флаг **Инерционный рельс**, рис. 8.5.

Подсистемы, представляющие колесные пары, могут корректироваться пользователем, однако **не следует изменять ни число, ни порядок следования координат**. Для редактирования шаблона следует выполнить следующие действия:

- создать копию старого шаблона,
- создать новый объект УМ,
- прочитать шаблон с помощью команды меню **Правка | Прочитать из файла...** или кнопки  на панели инструментов,
- выполнить редактирование,
- сохранить шаблон под тем же именем с помощью команды меню **Файл | Сохранить как компоненту...** или кнопки .

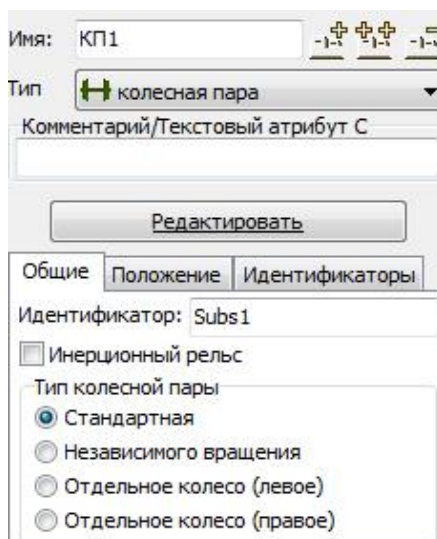


Рис. 8.5. Тип подсистемы – «Колесная пара»

### 8.2.3.2. Стандартная колесная пара

Модель стандартной КП с **шестью степенями свободы** содержит два тела, два шарнира и графический образ колесной пары. Одно тело образует базу колесной пары и имеет пять степеней свободы (отсутствует степень свободы – поворот вокруг оси симметрии колесной пары), рис. 8.6. Стандартное имя базы КП – *Wset*. Второе тело является *гиростатом*, то есть симметричным телом, у которого только момент инерции относительно оси Y (оси симметрии КП) отличен от нуля. Стандартное имя гиростата – *WsetRotat*. Гиростат имеет одну степень свободы относительно базы колесной пары – вращение вокруг оси симметрии КП. Уравнения движения базы с гиростатом в точности совпадают с уравнениями движения единственного тела, имеющего шесть степеней свободы.

Представление колесной пары двумя телами, а не одним имеет следующую важную цель: оно дает возможность исключить буксы как абсолютно твердые тела, тем самым, уменьшая число степеней свободы модели и повышая скорость численного моделирования. Действительно, если бы КП моделировалась одним телом с шестью степенями свобо-

ды, то невозможно было бы присоединение пружин, поводков, гасителей первой ступени напрямую к этому телу в силу его вращения, и потребовалось бы моделирование букс. При моделировании КП двумя телами можно прикреплять указанные элементы непосредственно к базе КП, поскольку у нее отсутствует вращение вокруг поперечной оси, поэтому буксы можно не вводить в компьютерную модель РЭ.

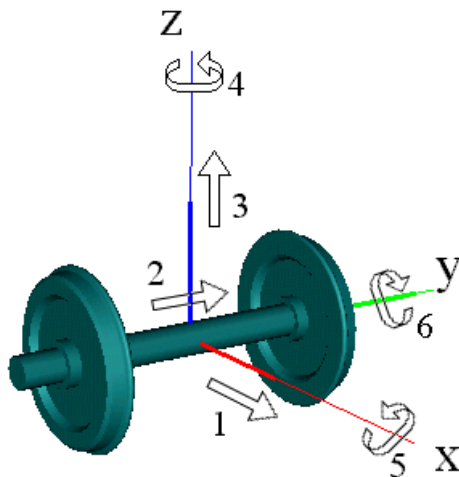


Рис. 8.6. Степени свободы колесной пары

Координаты КП пронумерованы в следующей последовательности (рис. 8.6):

- 1 – поступательная степень свободы относительно оси X;
- 2 – поступательная степень свободы относительно оси Y;
- 3 – поступательная степень свободы относительно оси Z;
- 4 – вращение вокруг оси Z;
- 5 – вращение вокруг оси X;
- 6 – вращение вокруг оси Y.

Подсистема КП содержит идентификаторы, список которых представлен в табл.8.1

Таблица 8.1

Идентификатор	Комментарий
<i>mwset</i>	Масса КП
<i>ixwset</i>	Момент инерции относительно продольной оси, проходящей через центр масс
<i>iywset</i>	Момент инерции относительно собственной оси КП
<i>axlelength</i>	Стандартный идентификатор длины графического образа оси КП. Не рекомендуется удалять или переименовывать этот идентификатор
<b>При установленном флаге <b>Инерционный рельс</b></b>	
<i>mrail</i>	Масса рельса
<i>hrail</i>	Высота рельса
<i>ixRail</i>	Центральный момент инерции рельса относительно продольной оси x

<i>iyRail</i>	Центральный момент инерции рельса относительно поперечной оси $y$
<i>izRail</i>	Центральный момент инерции рельса относительно вертикальной оси $z$
<i>zcRail</i>	Положение центра масс сечения рельса
<i>cyleftrail, cyrightrail</i>	Поперечная жесткость
<i>dissyleftrail, dissyrightrail</i>	Поперечное демпфирование
<i>czleftrail, czrightrail</i>	Вертикальная жесткость
<i>disszleftrail, disszrightrail</i>	Вертикальное демпфирование
<i>cangleftrail, cangrightrail</i>	Угловая жесткость
<i>dissangleftrail, dissangrightrail</i>	Угловое демпфирование
<i>rwheel</i>	Радиус колеса

### 8.2.3.3. Колесная пара независимого вращения

Данная КП используется как для моделирования колес независимого вращения, так и обычной КП с учетом упругости оси на кручение, рис. 8.7.

В данном случае КП имеет **семь степеней свободы**. По сравнению с моделью, описанной выше, вводится седьмая вращательная степень свободы правого колеса относительно левого. Модель состоит из трех тел и трех шарниров.

Вместо одного идентификатора момента инерции относительно оси КП, введены два идентификатора  $i_{wset\_l}$ ,  $i_{wset\_r}$  для левой и правой части соответственно.

Для моделирования упругих свойств оси КП на кручение пользователь должен самостоятельно ввести шарнирную силу для третьего шарнира  $jWSetRightWheel$ , описывающую крутильную жесткость оси и соответствующую диссипацию, см. п. 8.2.3.7.

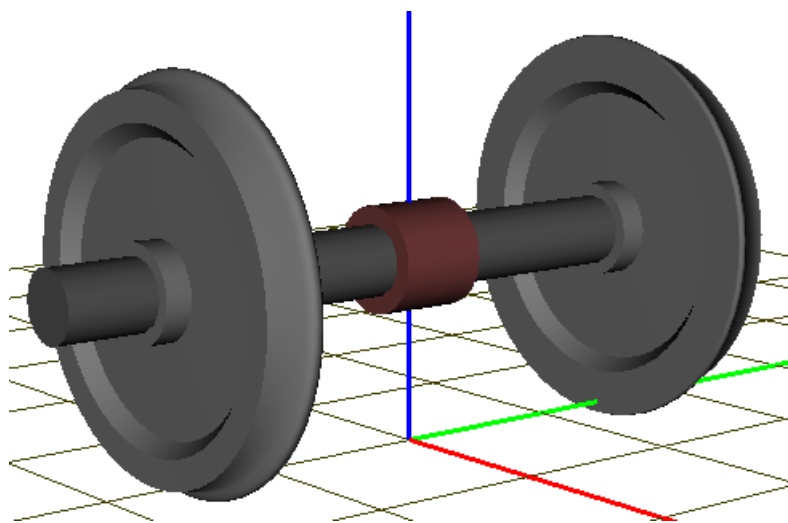


Рис. 8.7. Графическое изображение КП независимого вращения

### 8.2.3.4. Отдельное колесо

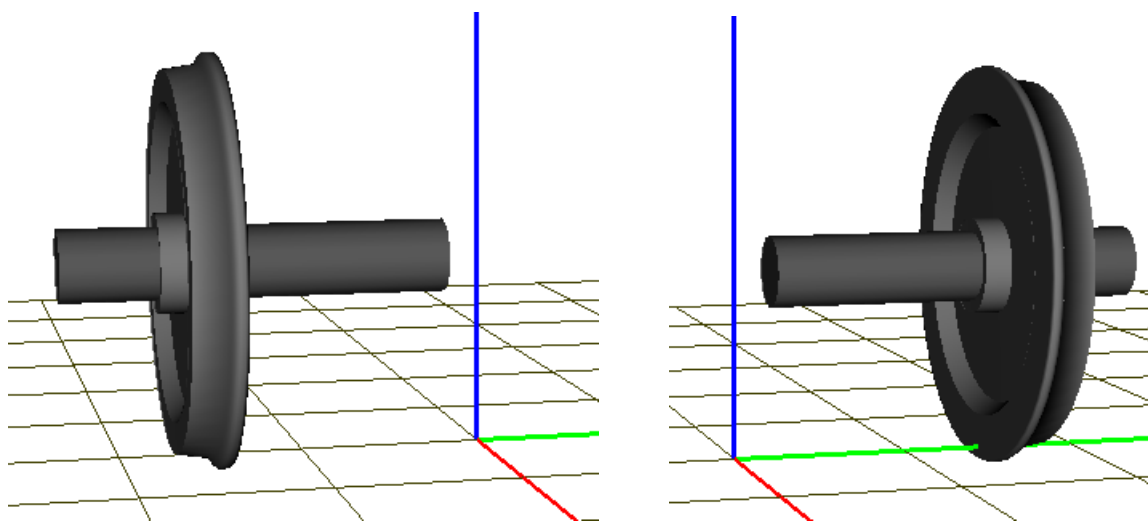


Рис. 8.8. Отдельное левое и правое колеса

В некоторых типах РЭ используются колеса с отдельной подвеской, не связанные осью. В УМ, начиная с версии 6.0, добавлена возможность создания такого типа колес, рис. 8.8. Описание соответствующей подсистемы в данном случае в основных чертах совпадает с описанием стандартной КП. Введен дополнительный идентификатор положения центра масс колеса в поперечном направлении *uscg*.

Отдельные колеса могут быть использованы для создания модели КП с упругостью оси как на кручение, так и на изгиб. Для этого надо добавить левое и правое колесо с одинаковой продольной координатой и соединить их специальной силой типа сайлент-блок.

### 8.2.3.5. Геометрия колесной пары

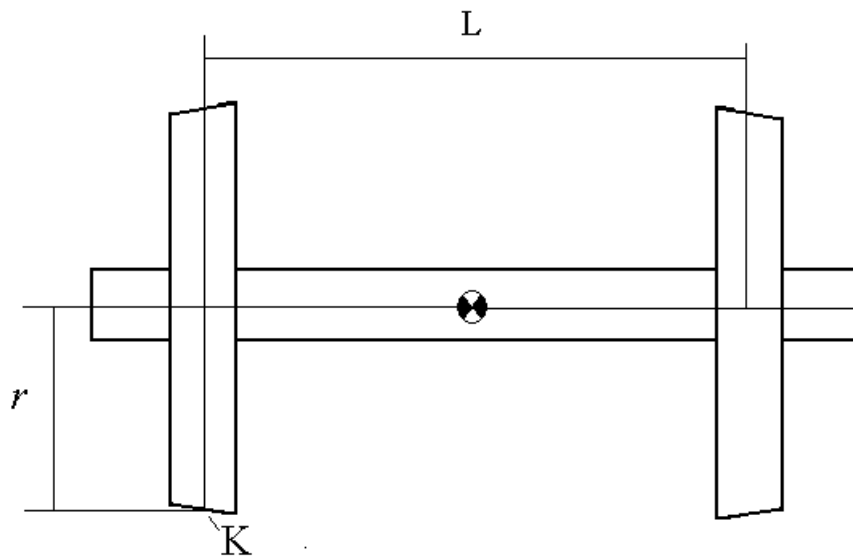


Рис. 8.9. Геометрические параметры КП

Геометрические свойства КП полностью описываются:

- полубазой КП ( $L/2$ );
- радиусом круга катания  $r$ ;
- дефектом радиуса круга катания  $dr$ ;
- отклонением формы колеса от идеальной окружности;
- профилями левого и правого колес, заданными в специальной системе координат профиля колеса.

Первые два параметра задаются в программе ввода в качестве параметров подсистемы колесная пара.

*Дефект радиуса круга катания* определяется для каждого из колес КП и равен разности фактического радиуса круга катания и заданным в программе ввода радиусом  $r$ , п. 8.2.3.6. "Редактирование параметров КП", стр. 8-16.

$$dr_l = r_l - r, \quad dr_r = r_r - r.$$

Здесь  $r_l, r_r$  – фактические радиусы левого и правого колес, п. 8.5.2.7.2. "Дефекты радиусов", стр. 8-209. Таким образом, колеса одной КП могут иметь разные радиусы. Кроме того, в пределах одной КП радиусы колес могут быть одинаковыми, но разные КП могут иметь разные радиусы колес.

Предусмотрены также различные отклонения формы колеса от идеальной окружности: ползун, эллиптичность и т.д., п. 8.5.2.7.1. "Отклонение формы колеса от идеальной окружности", стр. 8-203.

*Профили* выбираются из базы стандартных профилей УМ, а также создаются пользователем с помощью специального инструмента в модуле моделирования динамики (см. п. 8.5.1.1. "Создание профилей колес и рельсов", с. 8-99).

Введем понятие системы координат профиля бандажа КП (профиля колеса), рис. 8.10. Начало этой СК совпадает с точкой К на круге катания (рис. 8.9). Ось абсцисс ( $Y$ ) паралл-

лельна оси КП и направлена в сторону гребня. Ось Z вертикальна. Координаты точек на профиле вводятся в миллиметрах.

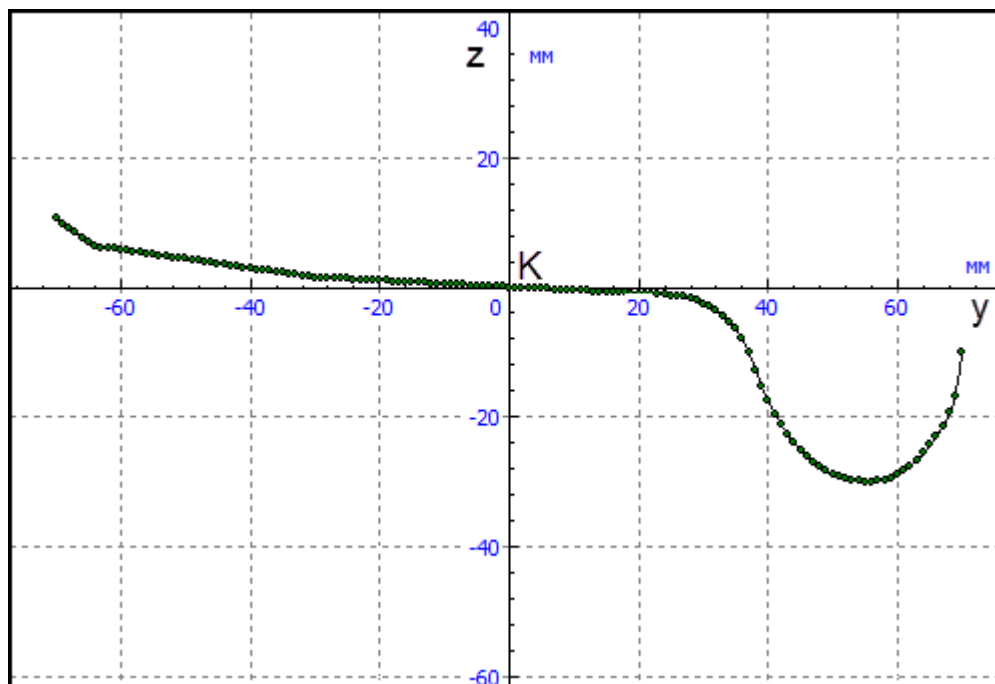


Рис. 8.10. Система координат профиля

### 8.2.3.6. Редактирование параметров КП

В инспекторе доступны следующие поля параметров КП (рис. 8.11):

- **имя** подсистемы, по которому его легко идентифицировать (например, КП1);
- **идентификатор** КП – набор латинских букв и цифр, не начинающийся с цифры (например, Wset1); идентификатор КП используется для организации доступа к списку идентификаторов отдельной КП (например, инерционные параметры могут быть заданы с использованием идентификаторов) в пределах одного объекта (подсистемы) идентификатор должен быть *уникальным*;
- **Тип КП** (см. п. 8.2.3.1. "Добавление колесной пары", стр. 8-9).

Далее на закладке **Общие** можно указать следующие параметры колесной пары:

- **радиус** круга катания (п. 8.2.3.5. "Геометрия колесной пары", стр. 8-15);
- **полубазу** – половину расстояния между кругами катания (п. 8.2.3.5. "Геометрия колесной пары", стр. 8-15).

Следующие параметры на закладке позволяют модифицировать графический образ колесной пары:

- **Длина оси** – увеличивает или уменьшает образ оси КП;

Изменение геометрических параметров колесной пары вызывает автоматическую корректировку графического образа (рис. 8.12).

На закладке **Положение** задаются продольная и вертикальная координаты КП в СК описываемого объекта. Если создается модель тележки, то продольное положение задается относительно СК тележки, если РЭ – относительно СК экипажа. Для того, чтобы совместить начало отсчета СК0 с уровнем рельсов следует задать z координату равной радиу-

су круга катания колесной пары (см. п. 8.2.2. "Базовая система координат", стр. 8-9), при нулевом значении начало СК0 помещается на уровень осей колесных пар.

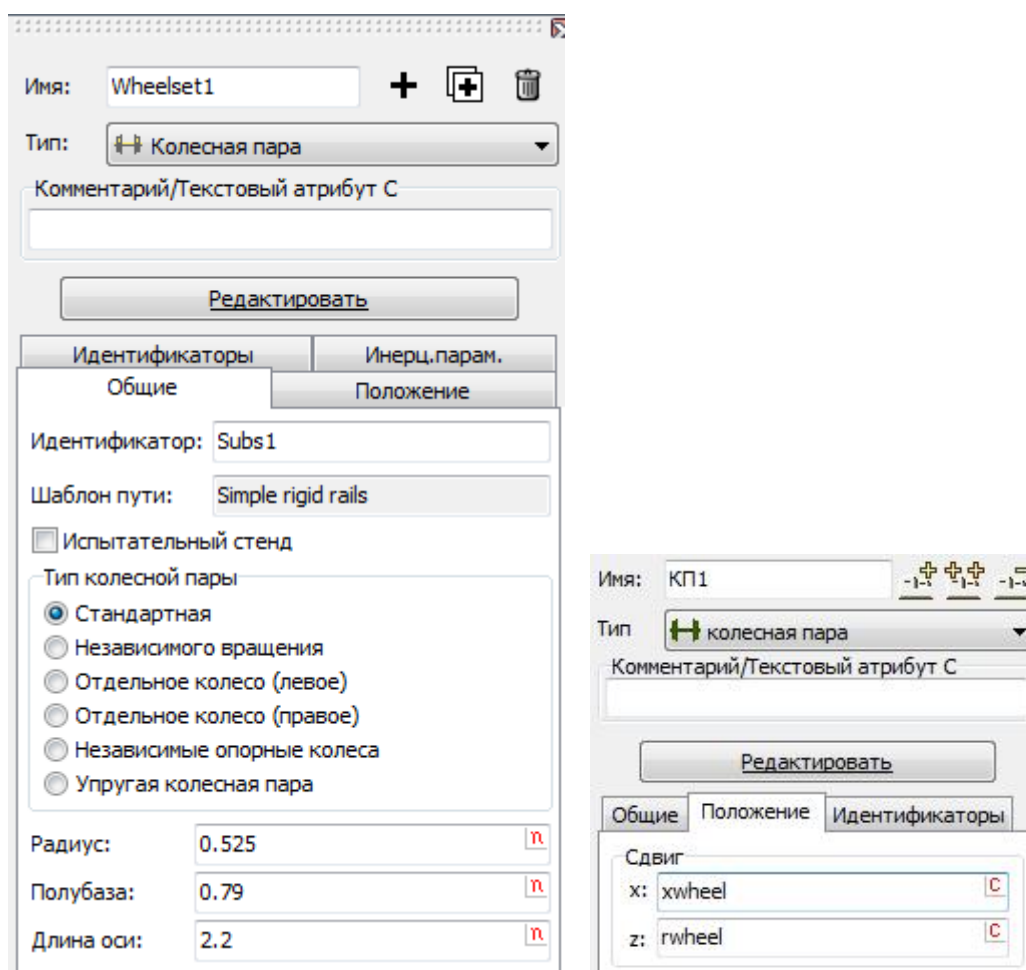


Рис. 8.11. Параметры колесной пары

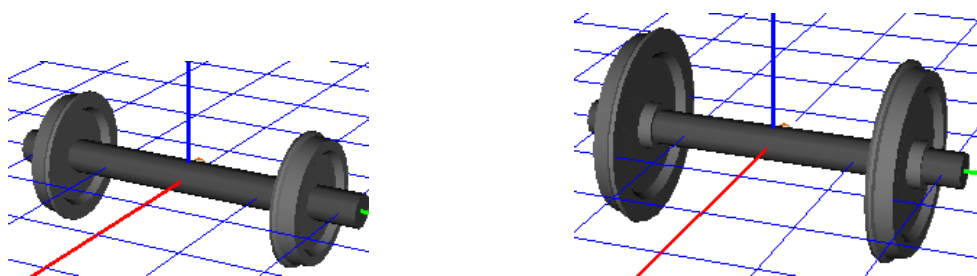


Рис. 8.12. Различные графические образы КП

Положение КП может быть параметризовано, то есть представлено в виде постоянного символического выражения (см. Глава 3, п. *Постоянное символическое выражение*), например *xwheel*.

Для изменения инерционных параметров, корректировки графического образа (например, для добавления образов букв), задания жесткости на кручение оси КП с семью степенями свободы (п. 8.2.3.3. "Колесная пара независимого вращения", стр. 8-13) используйте кнопку **Редактировать**, с помощью которой осуществляется доступ к данным, описыва-

ющим КП как отдельный объект. В этом же режиме можно переименовать тело/тела, входящие в КП, шарниры, графический образ КП.

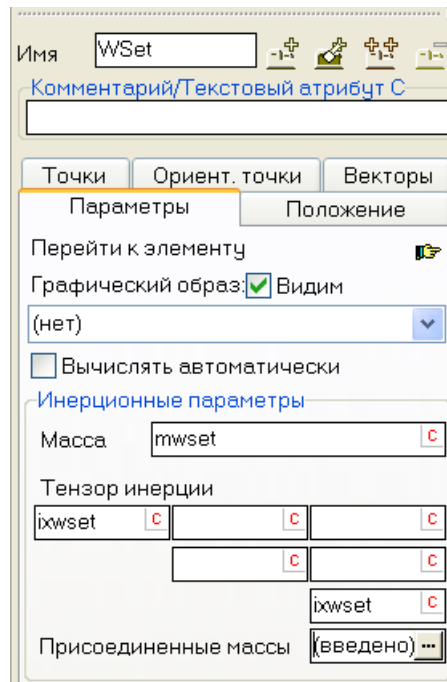


Рис. 8.13. Инерционные параметры базы КП

### 8.2.3.7. Задание жесткости оси КП на кручение

Для задания упругих свойств оси КП на кручение в случае КП с семью степенями свободы (п. 8.2.3.3. "Колесная пара независимого вращения", стр. 8-13) следует задать шарнирную силу типа **Линейная** (рис. 8.14), коэффициенты жесткости и диссипации.

Для задания коэффициента жесткости  $c$  и диссипации  $d$  при равных значениях моментов инерции левой и правой части КП относительно поперечной оси  $I_y$  рекомендуется использовать значение первой частоты крутильных колебаний КП  $f$  и долю демпфирования от критического  $\beta$ :

$$c = \frac{I_y(2\pi f)^2}{2}, d = 2\beta \sqrt{\frac{I_y c}{2}}.$$

Например, при  $f=40$  Гц,  $\beta=0.02$ ,  $I_z=150$  кг·м<sup>2</sup> рекомендуемые значения  $c = 4.74 \times 10^6$  Н·м,  $d = 754$  Н·м·рад/с.

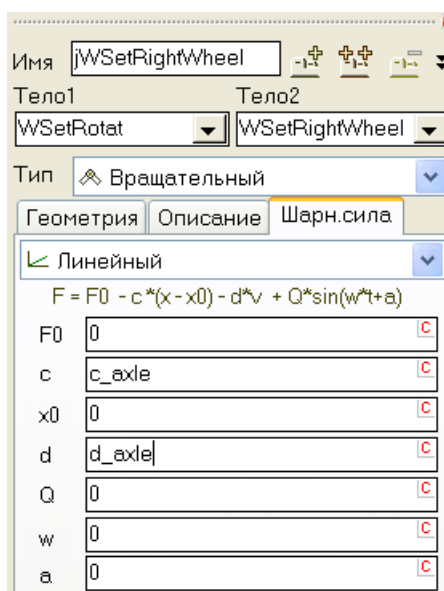



Рис. 8.14. Задание упругих свойств оси КП

### 8.2.3.8. Добавление второй и всех последующих КП

- Используйте операцию копирования введенной КП с помощью кнопки ;
- измените имя, идентификатор и положение добавленной КП;
- при необходимости измените параметры КП.

### 8.2.3.9. Визуальное добавление колесной пары

Для визуального добавления колесных пар используется закладка **UM Loco** списка визуальных компонент, рис. 8.15. Стандартная конфигурация включает три компонента:

- стандартная КП с шестью степенями свободы;
- КП с независимым вращением колес;
- КП с упругой на кручение осью; жесткость на кручение и диссипация заданы в соответствии с методикой, описанной в п. 8.2.3.7. "Задание жесткости оси КП на кручение", стр. 8-19.

Для всех компонент начало отсчета находится на уровне головки рельса, поэтому при изменении радиуса круга катания следует изменить положение КП по вертикали на вкладке **Положение**.

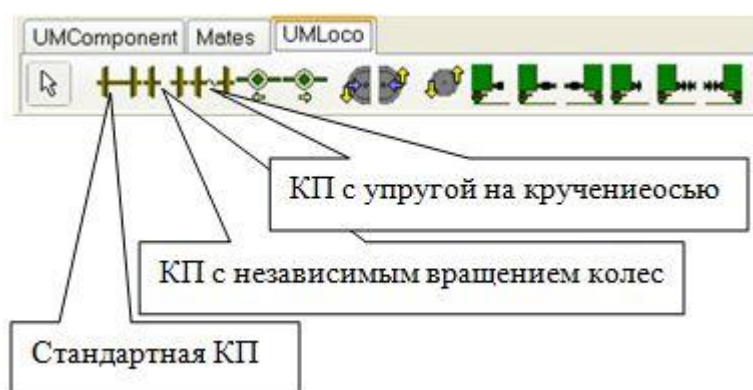


Рис. 8.15. Визуальные компоненты модуля **UM Loco**

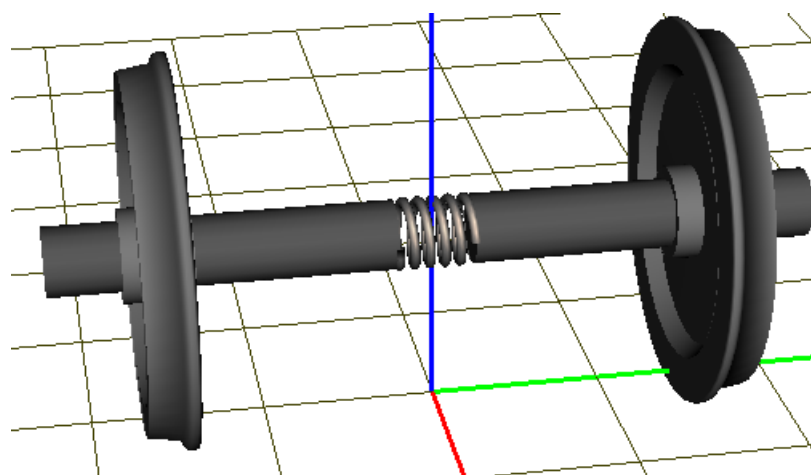


Рис. 8.16. КП с упругой осью на кручение

Графический образ компоненты, соответствующей КП с упругой осью на кручение, представлен на рис. 8.16. Модифицировать численные значения крутильной частоты и доли демпфирования можно на вкладке **Идентификаторы** подсистемы, рис. 8.17.

**Замечание.** Пользователь может разработать собственные компоненты и разместить их на панели компонент, см. [Глава 3](#), п. Создание библиотек визуальных компонент.

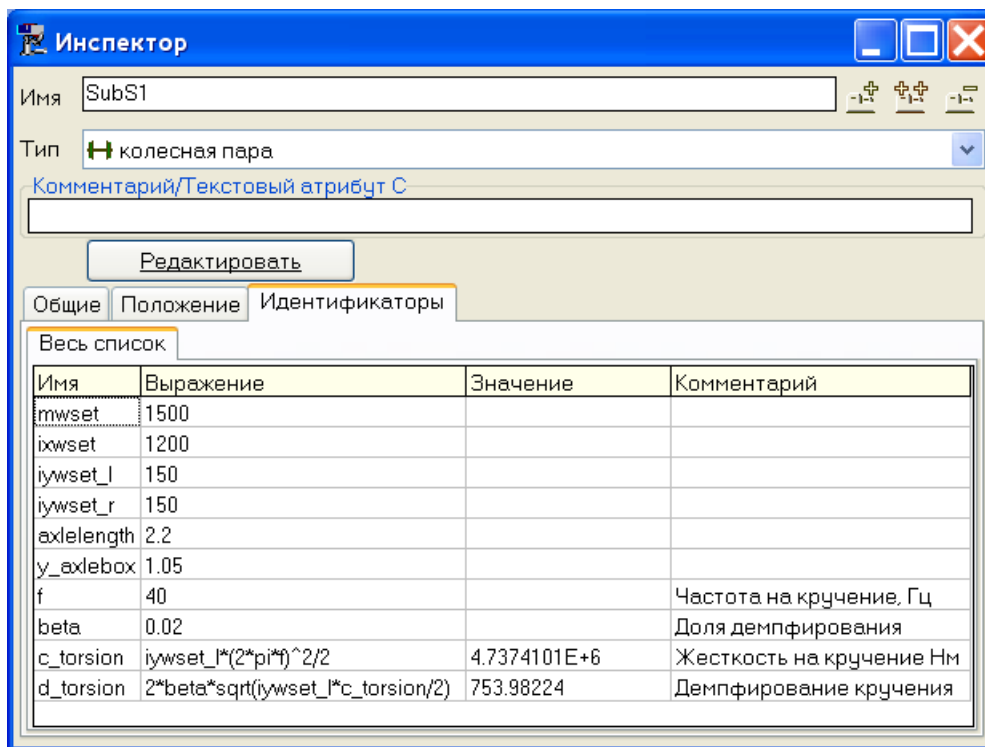


Рис. 8.17. Идентификаторы, параметризующие КП с упругой осью на кручение

#### 8.2.4. Моделирование букс



Иногда буксы не вводятся в модель РЭ в качестве отдельных тел. В этом случае все связи рамы с буксой устанавливаются непосредственно с телом, представляющим КП (с первым телом в модели КП как подсистемы). В этом случае для придания модели экипажа большей реалистичности часто вводят лишь графические образы букс, связывая их с *базой* (то есть не вращающейся частью) КП.

В других случаях введение буксы в виде отдельного тела является необходимым для получения корректного результата. Перечислим некоторые из таких случаев:

- несимметричное расположение и разные жесткости пружин подвески, опирающихся на буксу;
- несимметричное расположение тяговых поводков для тяговой КП;
- экипаж имеет пружины первой ступени подвески и моделируется его движения по вертикальному профилю со значительным вертикальным уклоном или подъемом;
- наличие поперечных зазоров в буксовых узлах для некоторых типов локомотивов с трехосными тележками.

### 8.2.4.1. Добавление букс – графических образов

Рассмотрим, каким образом можно добавить графические образы букс к колесной паре без добавления их в качестве тел. Для графического изображения букс будем использовать очень простой элемент, содержащийся в файле `{Данные УМ}\rw\Images\axlebox.img`. Для созданной подсистемы – колесной пары – выполните следующие действия.

- Перейдите в режим редактирования подсистемы, щелкнув на кнопке **Редактировать**, рис. 8.11.
- Прочитайте графический образ **левой** буксы из файла `{Данные УМ}\rw\Images\axlebox.imgc` помощью кнопки  на панели инструментов и переименуйте (например, *Букса Л*).
- Скопируйте графический образ левой буксы, разверните его на 180 градусов вокруг вертикальной оси и переименуйте (*Букса П*).
- Создайте новый графический образ и создайте в нем два графических элемента типа ГО, назначив элементам графические образы букс, рис. 8.18. Переименуйте графический образ (например, *Буксы*). Результат представлен на рис. 8.19.
- Наконец перейдите на закладку **Тела**, выбрав тело *Wset* (база КП, см. п. 8.2.3.2. "Стандартная колесная пара", стр. 8-10), и назначьте ему только что созданный графический образ, выбрав его из списка (рис. 8.20).
- Выйдите из режима редактирования колесной пары, закрыв конструктор с помощью кнопки **Принять** в специальном окне закрытия подсистемы (или кнопки  и подтвердив сохранение изменений). В результате колесная пара приобретет фиктивные буксы и примет вид, представленный на рис. 8.22.

Конечно, нельзя назначать графический образ букс вращающейся части КП, поскольку это приведет к соответствующему вращению ГО букс.

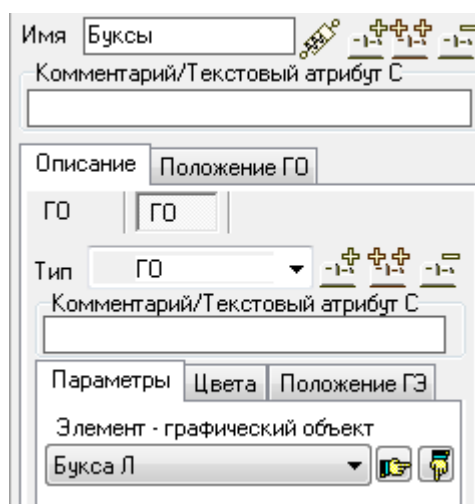


Рис. 8.18. Графические элементы типа “ГО”

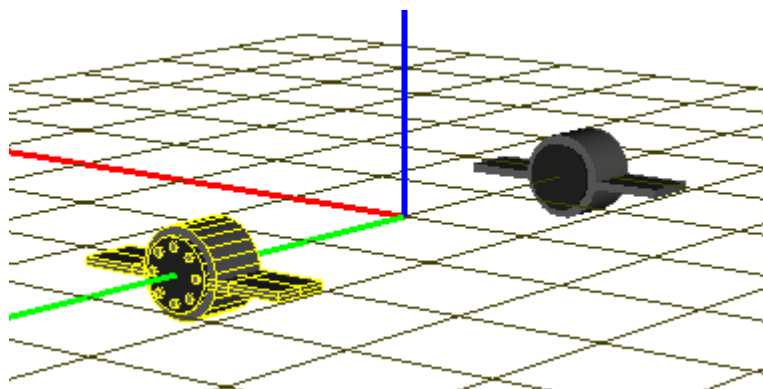


Рис. 8.19. Графический образ фиктивных букс

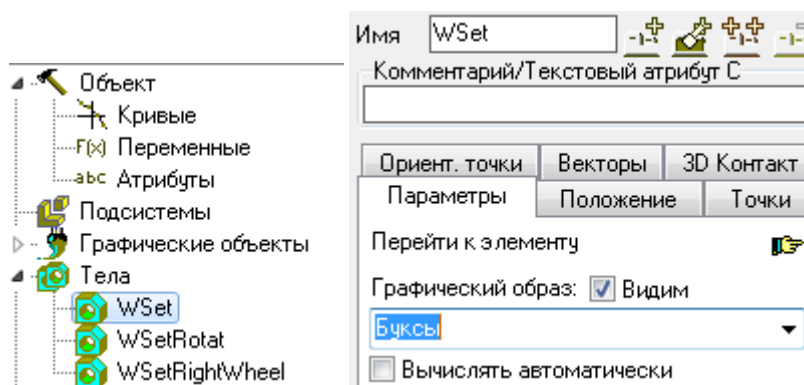


Рис. 8.20. Выбор тела в списке и назначение ему графического образа

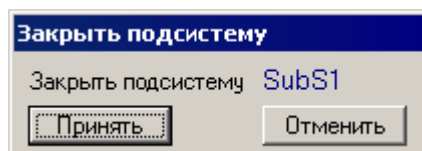


Рис. 8.21. Диалоговое окно для закрытия подсистемы

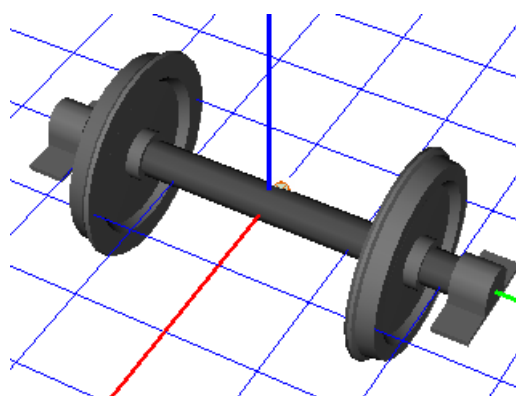



Рис. 8.22. Колесная пара с фиктивными буксами

### 8.2.4.2. Модель буксы как отдельного тела

При необходимости ввести буксу как отдельное тело можно руководствоваться следующей последовательностью действий в рамках объекта, содержащего колесную пару (то

есть не переходя в режим редактирования подсистемы колесной пары, как в предыдущем пункте).

1. Создайте новый графический объект (ГО), который будет соответствовать образу буксы. Можно использовать ГО, поставляемый вместе с УМ. Для этого воспользуйтесь кнопкой  в верхней части закладки инспектора, представляющей ГО, чтобы прочитать файл *axlebox.img*, содержащий ГО.
2. Добавьте тело, моделирующее буксу, укажите его инерционные характеристики и назначьте ей соответствующий ГО.
3. Назначьте буксе присоединенный шарнир типа *вращательный*, в описании которого выполните следующие действия:
  - задайте соединяемые тела (первое тело КП и буксу);

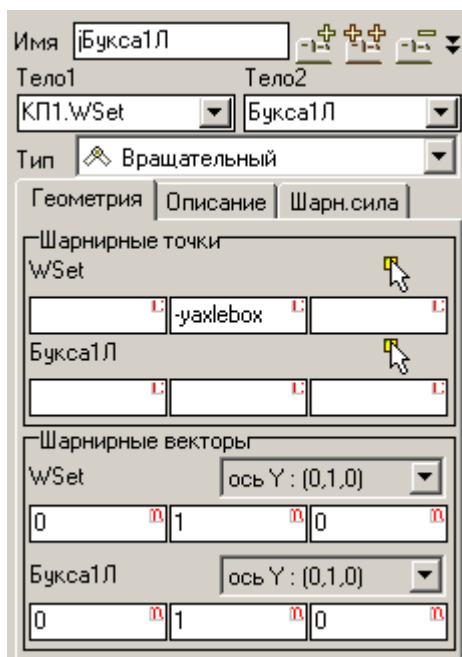


Рис. 8.23. Вращательный шарнир, описывающий степень свободы буксы относительно КП

- укажите ось вращения вектором  $(0,1,0)$  (вокруг оси Y) для каждого тела;
- задайте положение буксы на оси, назначив координату Y шарнирной точке, принадлежащей КП.

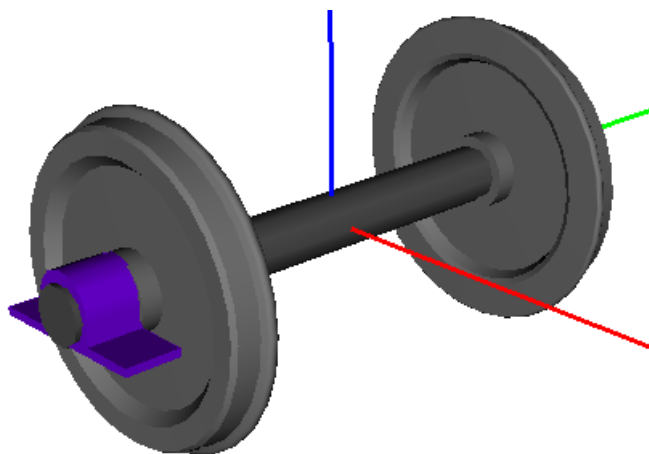


Рис. 8.24. Модель КП с буксой

### 8.2.4.3. Визуальное добавление букс

Буксы могут быть добавлены с помощью визуальных компонент.

- Перейдите на закладку **UM Loco** списка визуальных компонент.
- Щелкните на кнопке, соответствующей буксе, и затем на опорной сетке визуального окна, в которой временно разместится букса.
- Назначьте вращательный шарнир либо по методике, описанной выше, либо с помо-


щью визуальной компоненты вращательного шарнира . В последнем случае на базовом теле оси колесной пары должны быть заданы точки связи векторного типа, что делается автоматически, если колесная пара добавлена с помощью визуальной компоненты.



Рис. 8.25. Визуальные компоненты модуля UM Loco

### 8.2.5. Моделирование линейных пружин подвески

Для моделирования как линейных, так и нелинейных пружин подвески используются следующие силовые элементы.

- Специальный силовой элемент типа *Пружина*.

Используется для линейных пружин с одинаковой сдвиговой жесткостью в направлениях, перпендикулярных оси пружины.

Математическая модель элемента описана в [Главе 2](#), пп. *Специальные силы | Пружина, Обобщенный линейный силовой элемент*.

Примеры описания и использования:

- [Глава 7](#), п. Модели пружин;
- модель `{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\AC4`.
- Обобщенный линейный силовой элемент

Позволяет моделировать как такие же пружины, что и специальный силовой элемент, так и более сложные или упрощенные ситуации, например, когда сдвиговые жесткости пружины в разных направлениях различны. Может использоваться для моделирования билинейных пружин.

Математическая модель элемента описана в [Главе 2](#), п. *Обобщенный линейный силовой элемент*.

Примеры описания и использования:

[Глава 7](#), п. Модели пружин;

модель `{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\Manchester_benchmarks\Vehicle1`;

модель `{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\wedgetest`.

- Биполярный силовой элемент

Может быть использован в качестве линейной или нелинейной пружины, создающей силу вдоль направления, соединяющего пару точек взаимодействующих тел.

Общие рекомендации:

- следует создавать модель в положении равновесия или максимально близко к нему; с этой целью для вертикальных пружин задаются статические значения сил;
- при указании тел, соединяемых вертикальной пружиной, в качестве первого задавайте нижнее тело, а второго – верхнее (задание снизу-вверх); в этом случае вертикальная проекция статической силы будет положительной.

### 8.2.6. Моделирование гасителей, тяг, поводков, поглощающих аппаратов

Для моделирования линейных и нелинейных гасителей, а также тяг, поводков, поглощающих аппаратов рекомендуется использовать биполярные силовые элементы. В некоторых случаях для гасителей используются обобщенные линейные силовые элементы с заданием матрицы диссипации.

Для моделирования **поглощающих аппаратов** при наличии экспериментальной характеристики следует использовать скалярный силовой элемент типа Гистерезис, см. [Глава 2](#), п. *"Гистерезис"*. В программе реализованы также модели поглощающих аппаратов Ш-1-Т, Ш-2-Т, Ш-2-В, описание которых можно найти в работе [1].

## 8.2.7. Особенности создания моделей локомотивов

Особенностью моделей локомотивов является необходимость разработки подсистем, реализующих режимы тяги и торможения.

### 8.2.7.1. Моделирование системы передачи тяги

Для реализации режима тяги требуется моделирование тяговых двигателей и системы передачи тягового момента на колесную пару. Конкретная модель зависит от типа реализации тяги. Здесь мы остановимся на моделировании опорно-рамного подвешивания тяговых двигателей на примере электровоза ВЛ80, рис. 8.26.

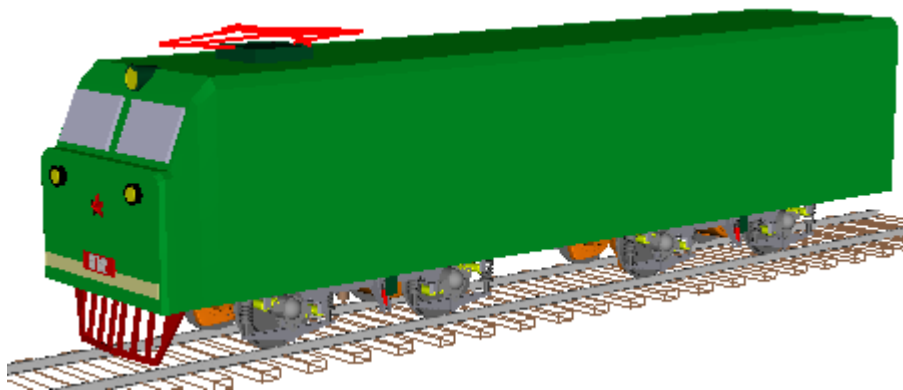


Рис. 8.26. Модель одной секции электровоза ВЛ80

#### 8.2.7.1.1. Тела и шарниры

Модель одной секции электровоза включает две подсистемы **тележка**, которая, в свою очередь, содержит две подсистемы «колесно-моторный блок». Реализация модели системы тяги сконцентрирована в подсистеме «колесно-моторный блок».

Модель колесно-моторного блока включает колесную пару, две буксы, корпус тягового электродвигателя (ТЭД) и два корпуса редукторов, объединенных в одно тело, ротор с двумя шестернями, силовые элементы первой ступени подвески и подвески двигателя к раме, рис. 8.28. Все силовые элементы подвески описаны как внешние элементы (второе тело – *External*) с включенным режимом автоопределения.

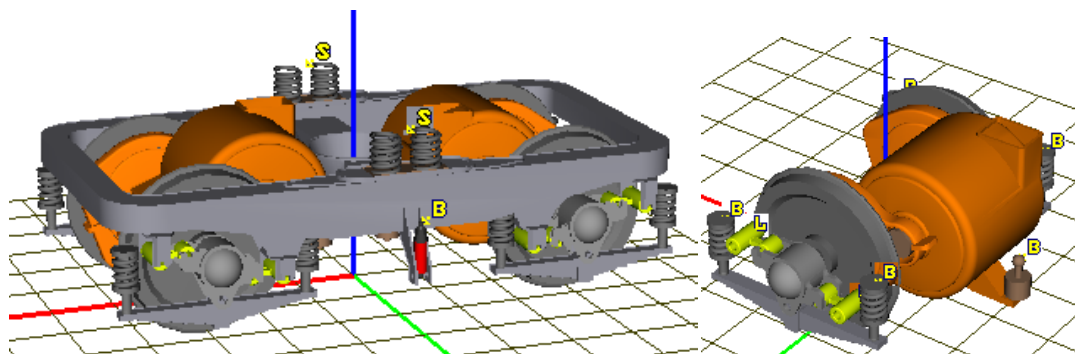


Рис. 8.27. Подсистемы «тележка» и «колесно-моторный блок»

Корпус ТЭД соединен вращательным шарниром с базовым телом колесной пары, ротор соединен вращательным шарниром с корпусом ТЭД. В обоих случаях оси шарниров параллельны оси Y.

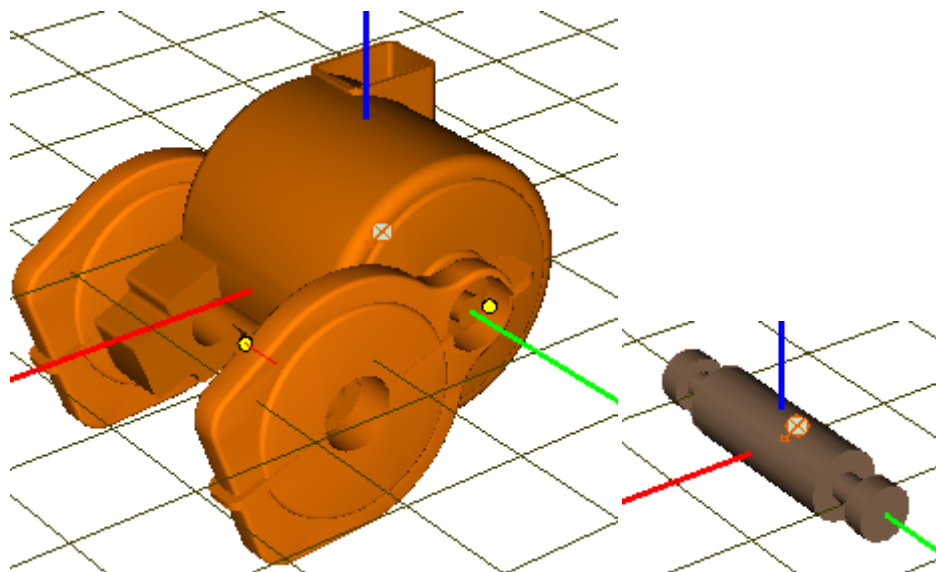


Рис. 8.28. Тела: корпуса тягового двигателя и редукторов и ротор

#### 8.2.7.1.2. Тяговый момент

Принципиальное значение для создания модели тягового момента имеет описание шарнирной силы для вращательного шарнира, задающего вращение ротора относительно корпуса тягового двигателя, рис. 8.29. Рекомендуется с этой целью использовать тип *Список сил* шарнирного момента. Список содержит два элемента. Первый имеет тип *Список характеристик* и позволяет моделировать изменение момента в зависимости от угловой скорости вращения ротора при различных положениях контроллера. Второй элемент списка типа *выражение* содержит идентификатор, который может быть использован для прямого задания тягового момента при включении модели локомотива в состав модели поезда **Train3D**.

В примере, который мы рассматриваем, тяговый момент задается с помощью набора зависимостей силы тяги, развиваемой одной секцией локомотива, от скорости продольного движения при различных положениях контроллера, рис. 8.30. Характеристики вводятся поточечно в виде отдельных кривых в порядке, соответствующем номерам положений контроллера (1...N).

Далее в полях описания типа силового элемента следует указать следующие данные, (рис. 8.29, слева).

- **Идентификатор кривой:** идентификатор, численное значение которого 0...N определяет положение контроллера (то есть выбирает кривую тяговой характеристики из введенного списка); нулевое значение идентификатора означает нулевое значение момента. **Строго рекомендуется** использовать идентификатор *trottle\_position*, что автоматизирует распознавание идентификатора при включении модели локомотива в состав модели поезда **Train3D**.

- Множитель X:** отличен от единицы, если при задании характеристик на рис. 8.29 по оси абсцисс отложена не угловая скорость ротора, а, например, скорость продольного движения экипажа. Также следует использовать этот параметр в случае, когда вращение ротора происходит в отрицательном направлении, что соответствует отрицательному значению производной от угла поворота ротора в шарнире. В примере для множителя использовано выражение  $0.625/4.19*rotation\_sign$ , что, во-первых, соответствует переводу угловой скорости ротора в скорость продольного движения (0.625 – радиус колеса, 4.19 – передаточное число зубчатого зацепления), во-вторых, позволяет сделать значение скорости положительной с помощью идентификатора  $rotation\_sign$ , если вращение ротора отрицательно, рис. 8.29. Таким образом,  $rotation\_sign$  должен принимать значение +1, если ротор вращается в положительную сторону, и -1, если вращение происходит в отрицательную сторону (см. замечание 2 в п. Расчет начальных угловых скоростей с помощью файла фиксации).
- Множитель Y:** отличен от единицы, если при задании характеристик на рис. 8.29 по оси ординат отложен не момент на роторе в Нм, а, например, сила тяги, развиваемая локомотивом. Также следует использовать этот параметр в случае, когда вращение ротора происходит в отрицательном направлении. В примере на рис. 8.29 для множителя использовано выражение  $ftraction\_to\_torque*rotation\_sign$ . Множитель  $ftraction\_to\_torque$  переводит силу тяги локомотива в величину момента на роторе отдельного ТЭД. В нашем примере этот идентификатор определяется с помощью выражения  $ftraction\_to\_torque = 1/4*0.625/4.19$  (4 – число колесных пар, 0.625 – радиус колеса, 4.19 – передаточное число зубчатого зацепления). Множитель  $rotation\_sign$  позволяет сделать значение момента одного знака с угловой скоростью ротора, что соответствует режиму тяги.

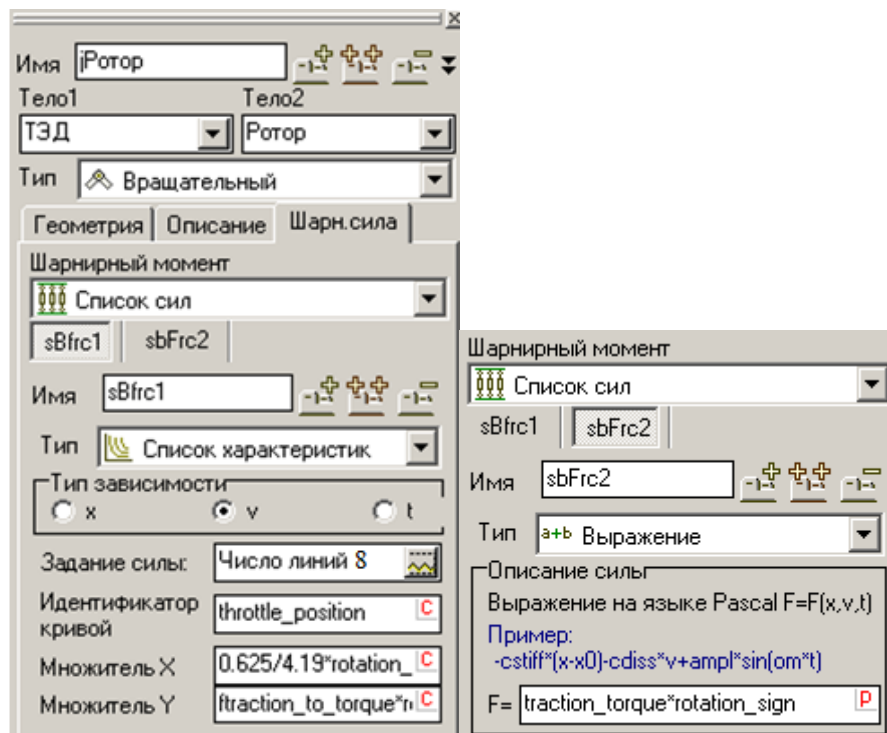


Рис. 8.29. Задание тягового момента

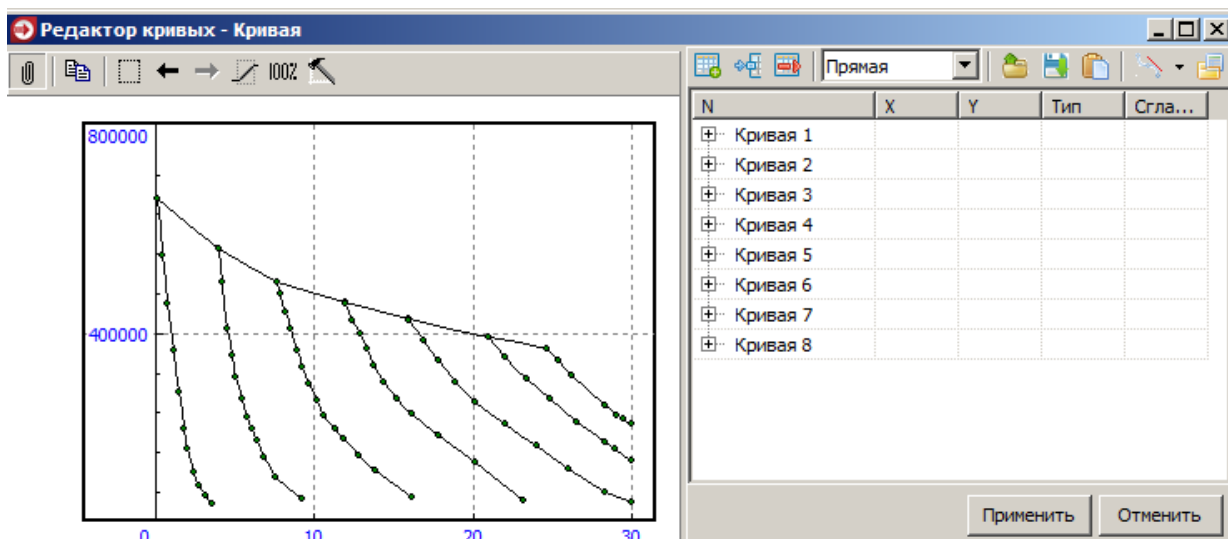


Рис. 8.30. Зависимость силы тяги от скорости

Теперь разберем прямое задание тягового момента с помощью идентификатора, которое часто используется при включении локомотива в состав модели поезда **Train3D**, справа на рис. 8.29. В поле внесено выражение  $traction\_torque * rotation\_sign$ , в котором множитель  $rotation\_sign$  учитывает направление вращения ротора, а  $traction\_torque$  равен величине момента. В свою очередь, величина момента вычисляется через суммарную силу тяги с помощью выражения  $traction\_torque = traction\_force * fraction\_to\_torque$ , где  $traction\_force$  – идентификатор суммарной силы тяги. **Строго рекомендуется** использовать идентификатор  $traction\_force$  для суммарной силы, что автоматизирует распознавание идентификатора при включении модели локомотива в состав модели поезда **Train3D**.

Наконец, для того, чтобы автоматически сообщить программе число положений контроллера, рекомендуется использовать стандартный идентификатор  $n\_throttle\_positions$  с численным значением, равным числу положений контроллера, вводя его не в подсистеме, а непосредственно в головной части модели локомотива.

## 8.2.7.1.3. Зубчатое зацепление

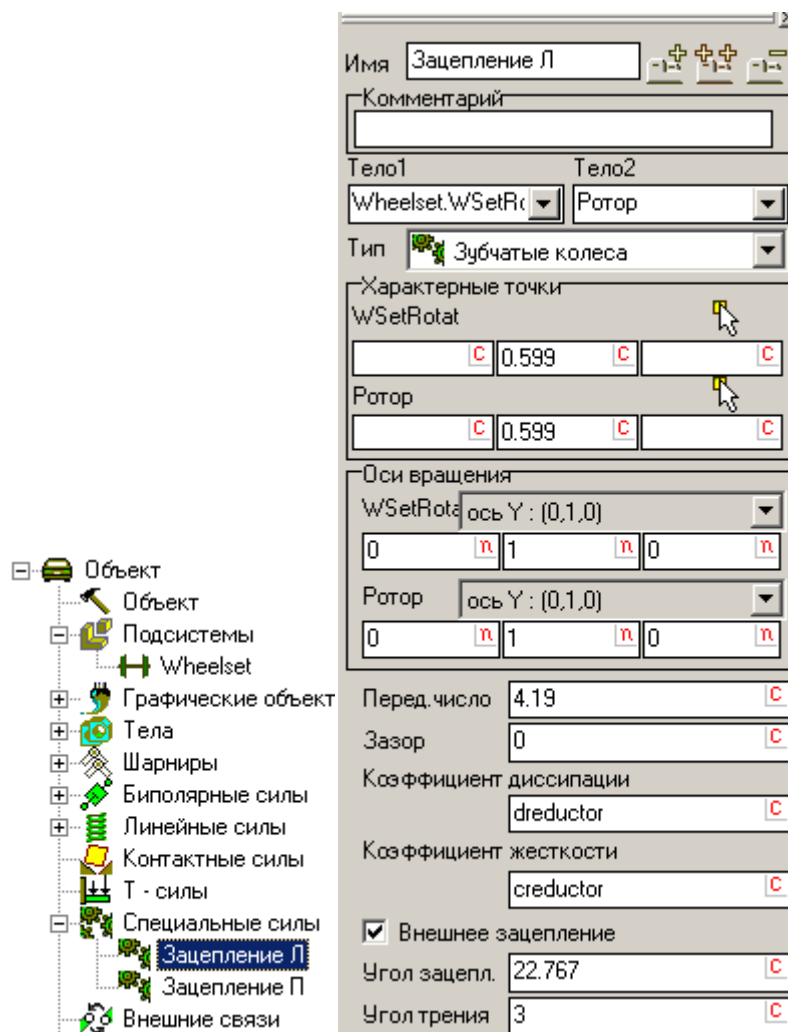


Рис. 8.31. Описание зубчатого зацепления

Обязательным элементом системы передачи тяги является модель зубчатого зацепления. Для моделирования зубчатого зацепления используется специальная сила типа *Зубчатые колеса*. Силовой элемент соединяет вращающуюся часть колесной пары (тело *WSetRotat*) и ротор. Для описания зацепления следует также задать следующие параметры:

- **Характерные точки** – координаты центров зубчатого колеса и шестерни в СК колесной пары и ротора;
- **Оси вращения** – единичные векторы  $(0, 1, 0)$ ;
- **Передаточное число** – отношение радиуса зубчатого колеса к радиусу шестерни;
- **Зазор** – величина возможного зазора вследствие износа ( $m$ );
- **Кoeffициенты жесткости и диссипации** передачи, приведенные к точке контакта между зубьями;
- Включить значок **Внешнее зацепление**.

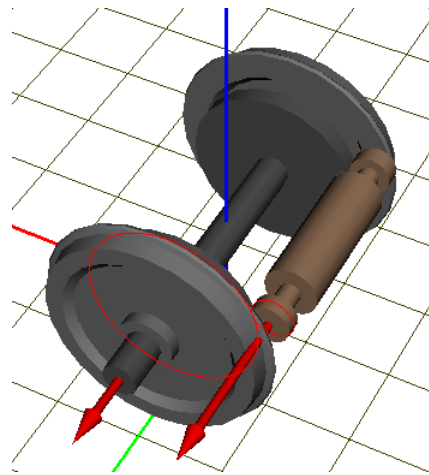



Рис. 8.32. Визуализация силового элемента, моделирующего зубчатое зацепление

Для контроля правильности задания геометрии зацепления следует перейти в режим отдельного элемента анимационного окна с помощью кнопки . Красные векторы в окне соответствуют осям вращения колес, а две проволочные окружности – центральным окружностям зубчатых колес, рис. 8.32.

**Замечание.** При использовании силового элемента данного типа перед началом моделирования необходимо создание файла фиксации или задание связей на начальные угловые скорости, см. ниже.

#### 8.2.7.1.4. Расчет начальных угловых скоростей с помощью файла фиксации

Использование зубчатых зацеплений требует задания корректных начальных условий по угловым скоростям. Нарушение этого требования приводит к возникновению больших усилий в системе передачи тяги, к отрывам колесных пар от рельсов на начальной стадии процесса моделирования движения рельсового экипажа. Один из основных инструментов автоматического расчета начальных угловых скоростей (точнее, производных по времени от углов поворота во вращательных шарнирах) состоит в создании пользователем так называемого **файла фиксации**, который подсказывает программе, какие угловые скорости оставлять при расчете неизменными.

Для того чтобы проиллюстрировать понятие фиксации координаты, рассмотрим систему передачи тяги одного из колесно-моторных блоков электровоза ВЛ80 с осевым подвешиванием тягового двигателя. Передача накладывает следующее уравнение на начальные значения угловых скоростей тел:

$$i\omega_w = -(\omega_r - \omega_m),$$

где  $\omega_w$  – угловая скорость колесной пары,  $\omega_m$  – угловая скорость корпуса двигателя относительно поперечной оси (относительно базы колесной пары),  $\omega_r$  – угловая скорость ротора относительно корпуса двигателя,  $i$  – передаточное число зацепления. Очевидно, что это уравнение не имеет однозначного решения. Программа не может автоматически выбрать, какая угловая скорость в этом соотношении должна быть выражена через остальные, и делает это, вообще говоря, произвольным образом, что приводит к совер-

шенно неверным решениям. Например, в случае одного из решений корпус тягового двигателя имеет угловую скорость, равную угловой скорости колесной пары умноженной на передаточное число. В другом абсурдном решении все начальные угловые скорости нулевые. Файл фиксации позволяет программе правильно решить это уравнение. А именно, если запретить изменять угловые скорости колесной пары и корпуса двигателя  $\omega_w, \omega_r$ , то программа автоматически выберет единственную угловую скорость, которую можно изменять, а именно угловую скорость ротора и выразит ее через угловую скорость колесной пары и передаточное число. Угловая скорость ротора при этом, естественно, должна быть исходно задана нулевой.

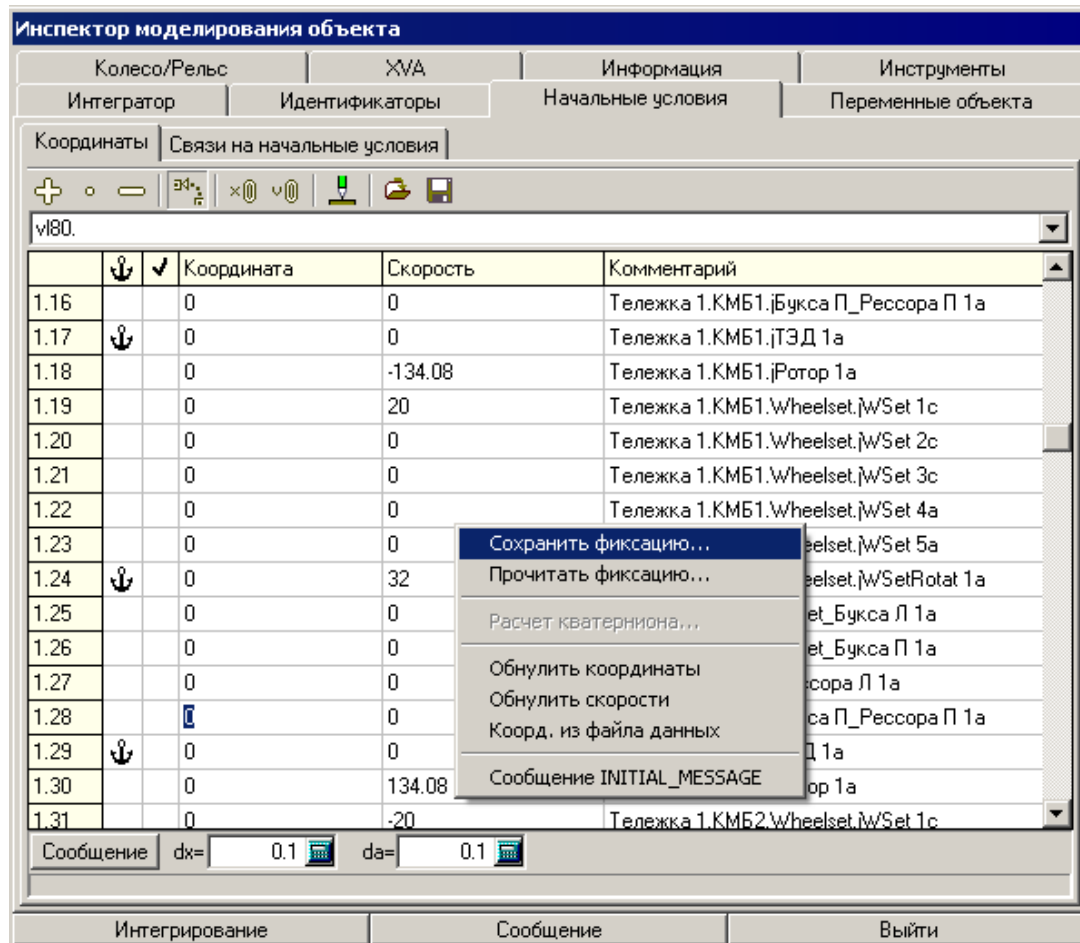




Рис. 8.33. Фиксация координат и создание файла фиксации

Фиксация координаты как раз и означает запрет на изменение координаты и ее производной по времени при расчете начальных условий. Файл фиксации содержит список всех фиксированных координат. Таким образом, в рассматриваемой нами модели электровоза ВЛ80 следует фиксировать координаты колесных пар, соответствующие вращению колесной пары относительно поперечной оси (шарниры  $jWSetRotat$ ), и координаты во вращательных шарнирах, задающих поворот корпуса тягового двигателя относительно базы колесной пары ( $jTЭД$ ). Файл фиксации создается в программе моделирования на закладке **Начальные условия | Координаты** инспектора моделирования объекта, рис. 8.33.

- Щелкните на верхней из двух кнопок **Сообщение**. По этому событию программа автоматически задаст угловые скорости колесным парам и продольные скорости некоторым телам (например, кузову). Эта операция не является обязательной, но позволяет видеть, например, начальные угловые скорости колесных пар, которые надо фиксировать.
- Фиксируйте нужные координаты щелчком мыши на ячейке колонки таблицы, помеченной маркером .
- Сохраните фиксацию в файле с именем модели в каталоге модели (будет предложено по умолчанию).
- Если выполнен первый пункт данного списка, то щелчком на кнопке  рассчитайте начальные угловые скорости и убедитесь, что роторам назначены корректные угловые скорости.

**Замечание 1.** В некоторых случаях использование файла фиксации недостаточно для корректного расчета угловых скоростей всех тел передачи. Например, в случае двигателей второго класса (как для электровоза ЭП10), когда ротор связан с шестерней с помощью упругой муфты, угловая скорость ротора не может быть рассчитана автоматически с помощью фиксаций. Похожая ситуация возникает при рамном подвешивании двигателей (двигатели третьего класса с полым карданным валом). В таких случаях следует дополнительно использовать связи на начальные условия, описанные в следующем разделе.

**Замечание 2.** Знак угловой скорости ротора (то есть соответствующей шарнирной скорости), определяемый по рис. 8.33 следует использовать для выбора значения множителя *rotation\_sign* в п. 8.2.7.1.2. "Тяговый момент", стр. 8-28.

### 8.2.7.1.5. Расчет начальных угловых скоростей с помощью связей на начальные условия

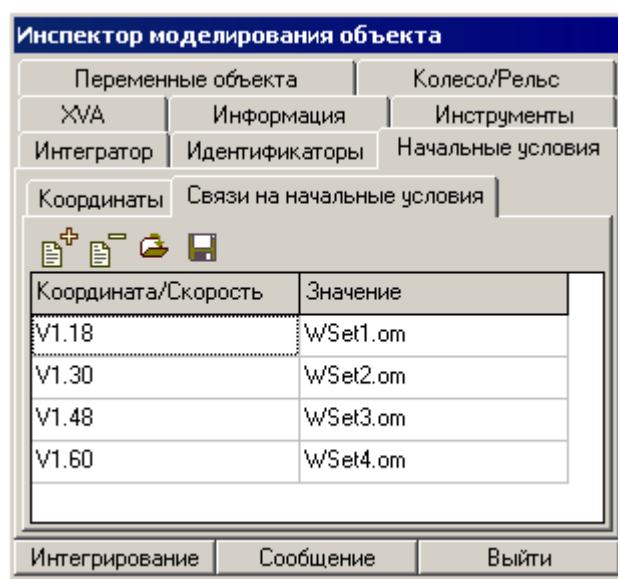


Рис. 8.34. Окно задания связей на начальные условия

Связи на начальные условия представляют собой альтернативу файлу фиксации и дают дополнительные возможности по заданию начальных условий.


Связь на начальное условия представляет собой уравнение одного из двух типов:

$$x_i = X_i,$$

$$v_i = V_i,$$

где  $x_i$  – координата в шарнире,  $v_i = \dot{x}_i$  – первая производная от координаты по времени (шарнирная скорость), а величины в правой части – произвольные выражения, создаваемые с помощью мастера переменных (см. [Глава 4](#), п. *Мастер переменных*).

Для задания новой связи выполните следующие действия.

- Добавьте строку в таблицу связей с помощью кнопки .
- Откройте мастер переменных, используя команду меню **Инструменты | Мастер переменных**.

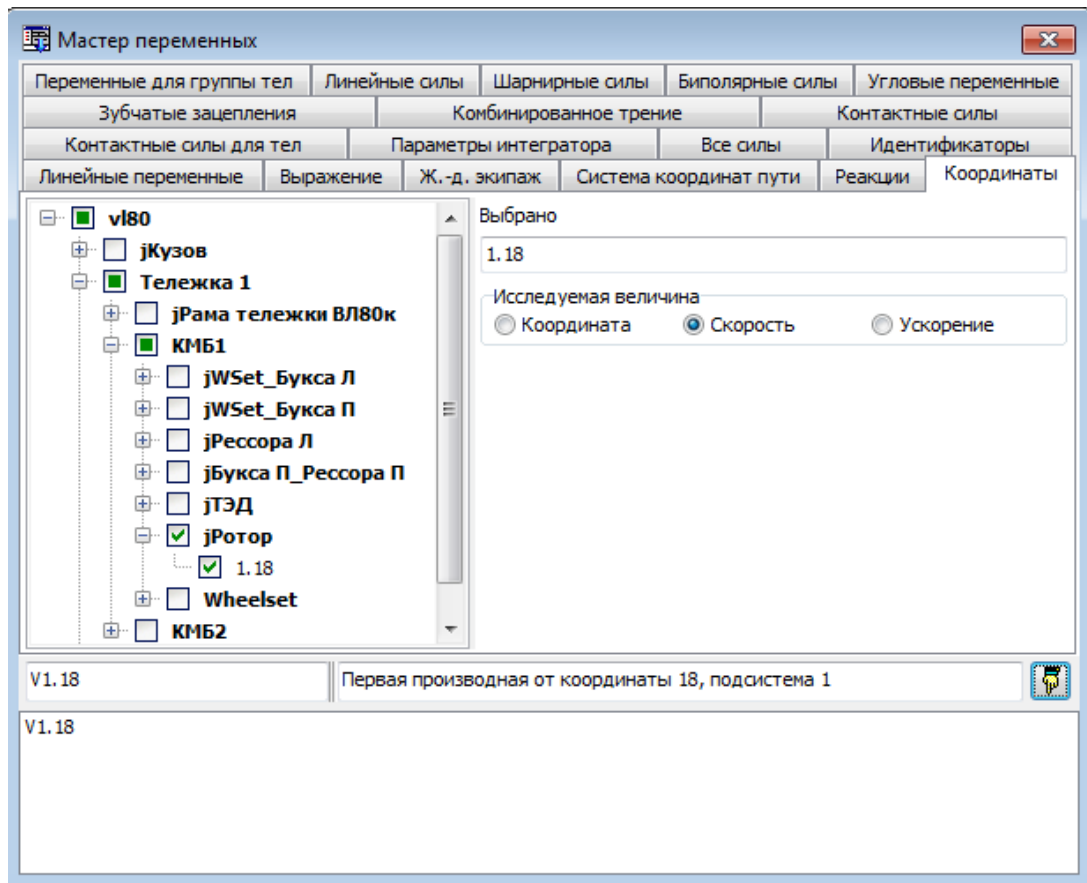



Рис. 8.35. Создание переменной: скорость вращения ротора относительно двигателя

- Создайте переменную, соответствующую шарнирной скорости, которой будет назначаться начальное значение. Для этого выберите закладку **Координаты**, выберите нужную шарнирную координату в списке, расположенном в левой части мастера.
- Задайте тип переменной **Скорость** и поместите ее в контейнер мастера с помощью кнопки , рис. 8.35.
- С помощью мышки перетащите созданную переменную в левое поле строки, соответствующей связи, рис. 8.36.

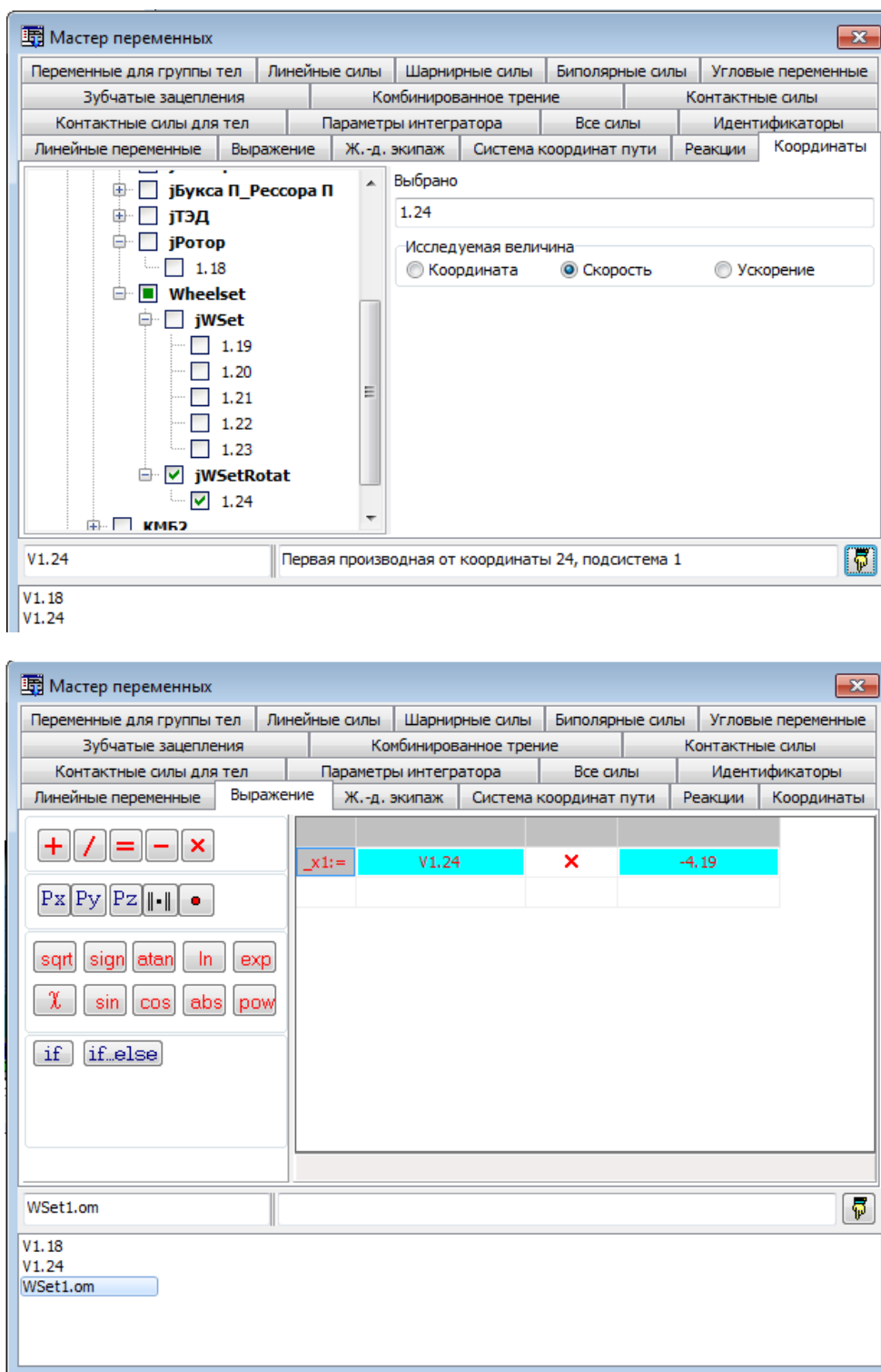





Рис. 8.36. Создание переменных: угловая скорость колесной пары и расчетного значения угловой скорости ротора

- Создайте переменную, соответствующую нужному значению скорости и поместите ее в правое поле строки связи. Приведем пример. Пусть угловой скорости ротора назначается угловая скорость колесной пары, умноженная на передаточное отношение 4.19. Следует также учесть, что колесная пара и ротор вращаются в разные стороны, то есть шарнирные скорости имеют разные знаки.

- Создайте переменную, соответствующую угловой скорости колесной пары (точнее, производной от угла поворота вокруг поперечной оси) – это шарнирная скорость в шарнире *jWSetRotat*.
  - Перейдите на закладку **Выражение** мастера переменных. Создайте операцию умножения с помощью кнопки .
  - Поместите с помощью мышки угловую скорость колесной пары в качестве первого сомножителя, внесите с клавиатуры число -4.19 (отрицательное!) в качестве второго сомножителя.
  - Задайте имя переменной вместо значения по умолчанию Expression.
  - Поместите переменную в контейнер мастера по кнопке  и перенесите ее в правое поле строки, соответствующей связи, рис. 8.36.
- 
- После того, как все связи созданы, сохраните их в файл в каталог задачи. Если сохранить связи в файл с именем задачи (значение, предлагаемое по умолчанию), то связи будут автоматически подгружаться при каждой загрузке модели в модель моделирования и рассчитываться перед процессом начала интегрирования.
  - Для проверки правильности задания уравнений связей перейдите на закладку **Начальные условия | Координаты** инспектора подготовки процесса интегрирования, выполните верхнюю команду **Сообщение** и рассчитайте значения начальных условий с помощью кнопки . Сравните расчетные значения скоростей с ожидаемыми величинами.

Недостатком данного метода является необходимость переформировывать уравнения связей, если в результате модификации модели изменяются номера соответствующих координат.

### 8.2.7.2. Пример создания модели локомотива

Рассмотрим принципы создания модели локомотива с двумя трехосными тележками, см. рис. 8.37. Каждая тележка содержит три колесно-моторных блока (КМБ). Колесно-моторный блок имеет привод с опорно-рамным подвешиванием тягового двигателя и опорно-осевым тягового редуктора<sup>1</sup>.

Модель рассматриваемого локомотива можно найти в каталоге [{Данные УМ}\Samples\Rail\\_Vehicles\Co-Co.](#)



Рис. 8.37. Общий вид локомотива

#### 8.2.7.2.1. Создание колесно-моторного блока локомотива

Разберем готовый пример модели локомотива. Запустите программу **UM Input** и откройте модель, расположенную в каталоге [{Данные УМ}\Samples\Rail\\_Vehicles\Co-Co.](#) Откройте подсистему *Bogie\_1*, а затем подсистему *Wheelset\_motor\_assembling\_1*. Рассмотрим эту подсистему, см. рис. 8.38.

Модель КМБ включает нескольких твердых тел: две одноповодковых буксы 3 (*Axle-box L* и *Axle-box R*), корпус осевого редуктор 7 (*Reduction gearbox*), тяговый электродвигатель 5 (*Traction motor*), ротор тягового электродвигателя (*Rotor*), ведущую шестерню осевого редуктора (*Gear wheel*) и карданный вал (*Cardanshaft*). Колесная пара с зубчатым колесом является подсистемой, описание которой рассматривалось выше (см. п. 8.2.7.1.3. "Зубчатое зацепление", стр. 8-31).

Для понимания принципов построения модели необходимо ознакомиться непосредственно со структурой модели КМБ, рис. 8.39. Тяговый электродвигатель (ТЭД) жестко закреплен на раме тележки. Ротор связан с ТЭД вращательным шарниром (*jTraction motor\_Rotor*). Карданный вал обладает двумя степенями свободы по отношению к ротору, это реализовано с помощью шарнира с шестью степенями свободы (*jRotor\_Cardan\_shaft*), в котором отключены четыре степени свободы. Через резинокордную муфту, которая моделируется с помощью сайлент-блока (*Rubber-cord coupler*), вал передает вращающий момент на ведущую шестерню осевого редуктора (*Gear wheel*). Корпус редуктора (*Reduction*

<sup>1</sup>Тяговый привод второго класса (по классификации проф. Бирюкова; Бирюков, И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев, Е.К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с. ).

*gearbox*) одной своей частью опирается на ось колесной пары, а другая часть подвешена к раме тележки с помощью наклонной реактивной тяги (Rod).

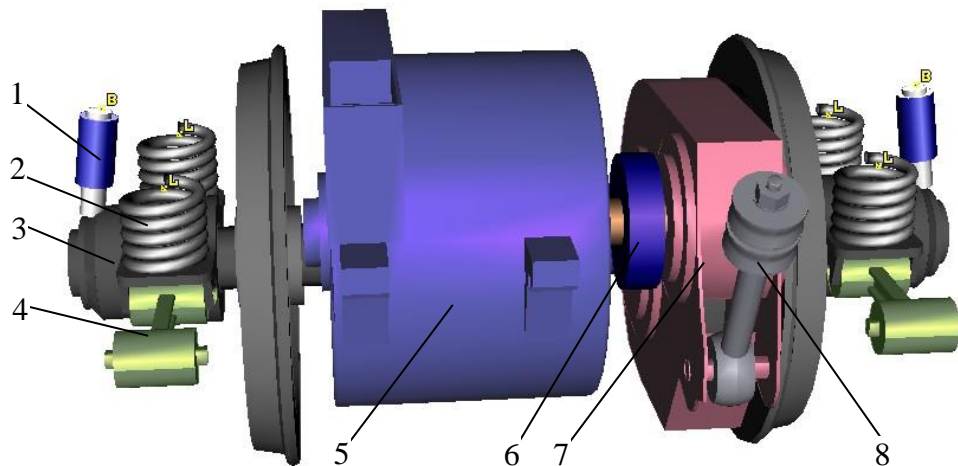


Рис. 8.38. Колесно-моторный блок с приводом второго класса.

1 – буксовый гаситель колебаний; 2 – рессорное подвешивание; 3 – букса; 4 – поводок; 5 – тяговый электродвигатель; 6 – муфта; 7 – корпус осевого редуктора; 8 – реактивная тяга

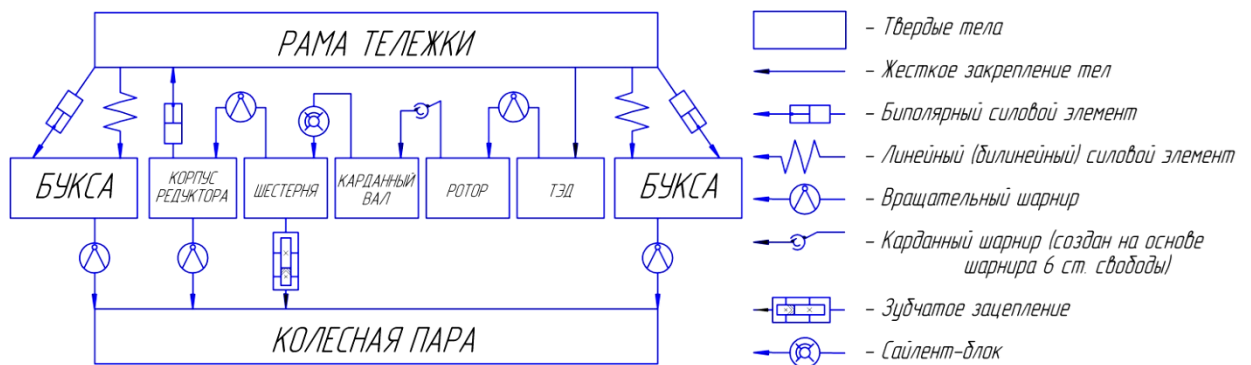


Рис. 8.39. Структура модели КМБ с приводом второго класса

**Замечание.** Простые графические объекты (далее ГО) быстро создаются непосредственно в УМ. Но при необходимости создания моделей, позволяющих получить эффектные анимации процесса моделирования (запись ролика из анимационного окна во время моделирования выгодно дополнит презентацию), существует возможность импортировать ГО из CAD систем. В нашем случае так и было сделано: простые ГО (*Rotor*, *Gearwheel*, *Cardan*, *Spring*, *Damper*) созданы в УМ, а остальные импортированы.

Первым описывается фиктивный шарнир *jBase\_Traction motor* (как видно из названия, это шарнир между телами *Base0* и *Traction motor*). Фиктивный шарнир при включении модели КМБ в качестве подсистемы модели следующего уровня будет замещен другим шарниром. Фиктивным шарниром может быть только шарнир типа *6 степеней свободы*, при обязательном включении всех степеней свободы.

**Замечание.** Рекомендуется задавать название шарнира по следующему принципу: «j» + «Имя первого тела» + «\_» + «Имя второго тела». Имена тел могут быть как полными, так и сокращенными. При использовании такого подхода к составлению названия шарнира, дальше во время работы будет легко разобраться только по одному названию, что это за шарнир.

Для описания вращения ротора был использован *обобщенный* тип шарнира. Также можно было использовать *вращательный* шарнир. Шарнирный момент в данном случае описан с использованием типа *Поточечный (числа)*. Момент задается в редакторе кривых по точкам. Шарнир Кардано можно смоделировать с помощью шарнира типа *б степеней свободы (jRotor\_Cardan\_shaft)*. Для этого достаточно лишь указать шарнирные точки и отключить ненужные степени свободы, оставив лишь две вращательных степени свободы вокруг осей X и Z. Взаимодействие карданного вала и ведущей шестерни осуществляется через резинокордную муфту и поэтому описать его будет правильно с помощью *Специальной силы* (этот этап будет рассмотрен позднее).

*Вращательный* шарнир *jReductiongearbox\_Gearwheel* описывает вращение шестерни внутри корпуса редуктора, который в свою очередь имеет вращательную степень свободы вокруг оси колесной пары (шарнир *jWSet\_Reduction gearbox*).

Последними в списке шарниров являются вращательные шарниры, описывающие взаимодействие букс и оси колесной пары (*jAxle-box L\_WSet* и *jAxle-box R\_WSet*). Кроме того следует различать буксовые шарниры для крайних КМБ тележки и для среднего. Дело в том, что крайние КМБ не имеют поперечной поступательной степени свободы (рис. 8.40), а средний – имеет (рис. 8.42). Поперечное перемещение на 15 мм в каждом направлении относительно начального положения средней оси тележки необходимо для обеспечения вписывания экипажа в кривые малого радиуса.

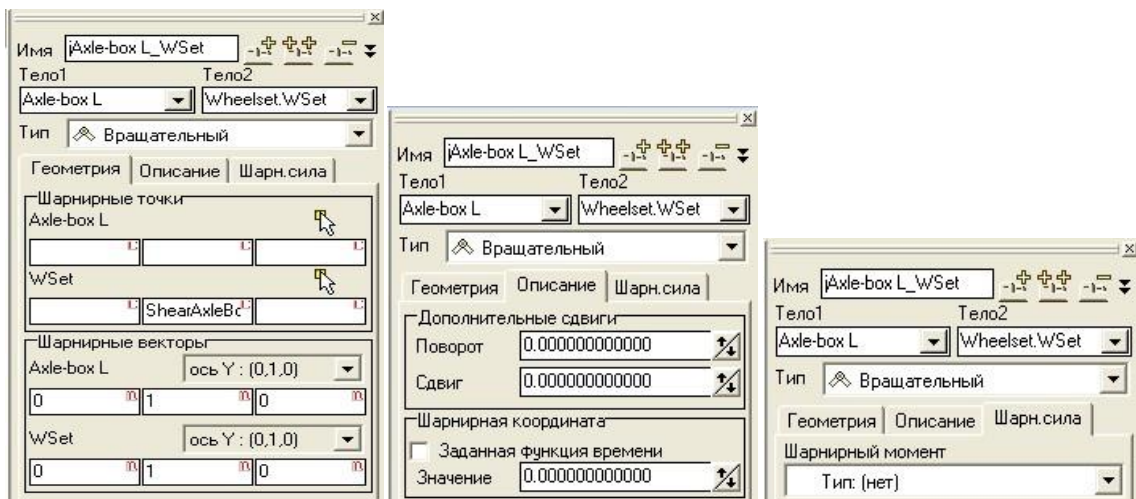


Рис. 8.40. Описание шарнира *jAxle-box L\_WSet* первого КМБ

Описание буксового шарнира для второго КМБ можно увидеть, зайдя в подсистему *Wheelset\_motor\_assembling\_2* и открыв, например, шарнир *jAxle-box L\_WSet*. Шарнир *jAxle-box L\_WSet* выполнен на основе шарнира *обобщенного* типа. Этот шарнир имеет три элементарных преобразования (далее ЭП, см. 2.3.2.3.), это: *tc* (постоянный сдвиг) – сме-

чение буксы по оси  $Y$  в нашем случае на  $ShearAxleBox = 1,085$  м в отрицательную сторону (рис. 8.42а);  $tv$  (поступательная степень свободы) – в нем описывается, как колесная пара может перемещаться в поперечном направлении;  $rv$  (вращательная степень свободы) – здесь указывается вектор преобразования (ось вращения). Стоит остановиться на описании поступательной степени свободы.

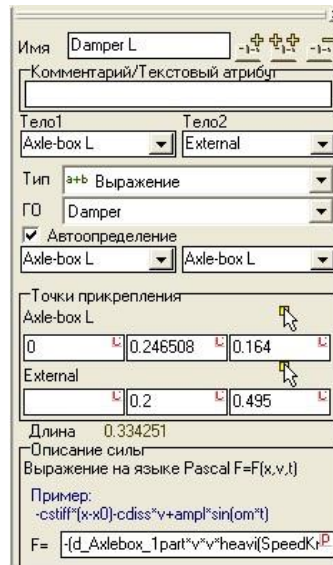


Рис. 8.41. Описание буксового гасителя колебаний

На закладке **Сила | Момент** описываются силы, воздействующие на ось при ее поперечном перемещении. В модели *Wheelset\_motor\_assembling\_2* использован тип *Список сил*. С помощью этого типа описывается две зависимости: *Bump stop* – поперечное перемещение КП и ее взаимодействие с упругим упором (рис. 8.42б); *AxleBox\_Friction* – фрикционное демпфирование колебаний, связанных с поперечным перемещением КП (рис. 8.42в). Значение использованных здесь параметров определяются конструкцией буксового узла среднего КМБ трехосной тележки.

С помощью силовых элементов *Биполярные силы* моделируется работа реактивной тяги (она содержит в себе две резинокордных шайбы, которые работают упруго с гашением высокочастотных колебаний) и буксовых гасителей колебаний (в данной модели они установлены под небольшим углом, таким образом, гася не только вертикальные колебания, но поперечные). Реактивная тяга представлена биполярной силой *Rod*. Она описана с помощью типа *Линейный*. В качестве второго тела важно выбрать *External* (тем самым указывая, что реактивная тяга своим вторым концом будет соединяться с некоторым, сейчас неизвестным телом в другой подсистеме) и включить *автоопределение*. Кроме того для того чтобы этот силовой элемент отображался на экране ему нужно назначить подготовленный ранее графический образ (*Rod*).

**Замечание.** При создании силовых элементов удобно использовать режим **автоопределения**, при котором положение системы координат тела 2 (далее СКТ2) автоматически выбирается совпадающей с СКТ1 при нулевых значениях координат объекта.

Гидравлические гасители колебаний *Damper L* и *Damper R*, которые отличаются лишь точками прикрепления, моделируется с помощью биполярного силового элемента типа *Выражение*. При таком типе задания работа гасителя моделируется с помощью аналитического выражения (появляется возможность описать идеальную характеристику). В данном случае выражение имеет вид:

$$-(d\_Axlebox\_1part*v^2*heavi(v\_damper-abs(v))+heavi(-v\_damper+abs(v))*(d\_Axlebox\_1part*v\_damper^2+d\_Axlebox\_2part*(abs(v)-v\_damper)))*sign(v).$$

Значение параметров и комментарии к ним можно увидеть в окне списка идентификаторов. Силовая характеристика буксового гасителя колебаний представлена на рис. 8.43.

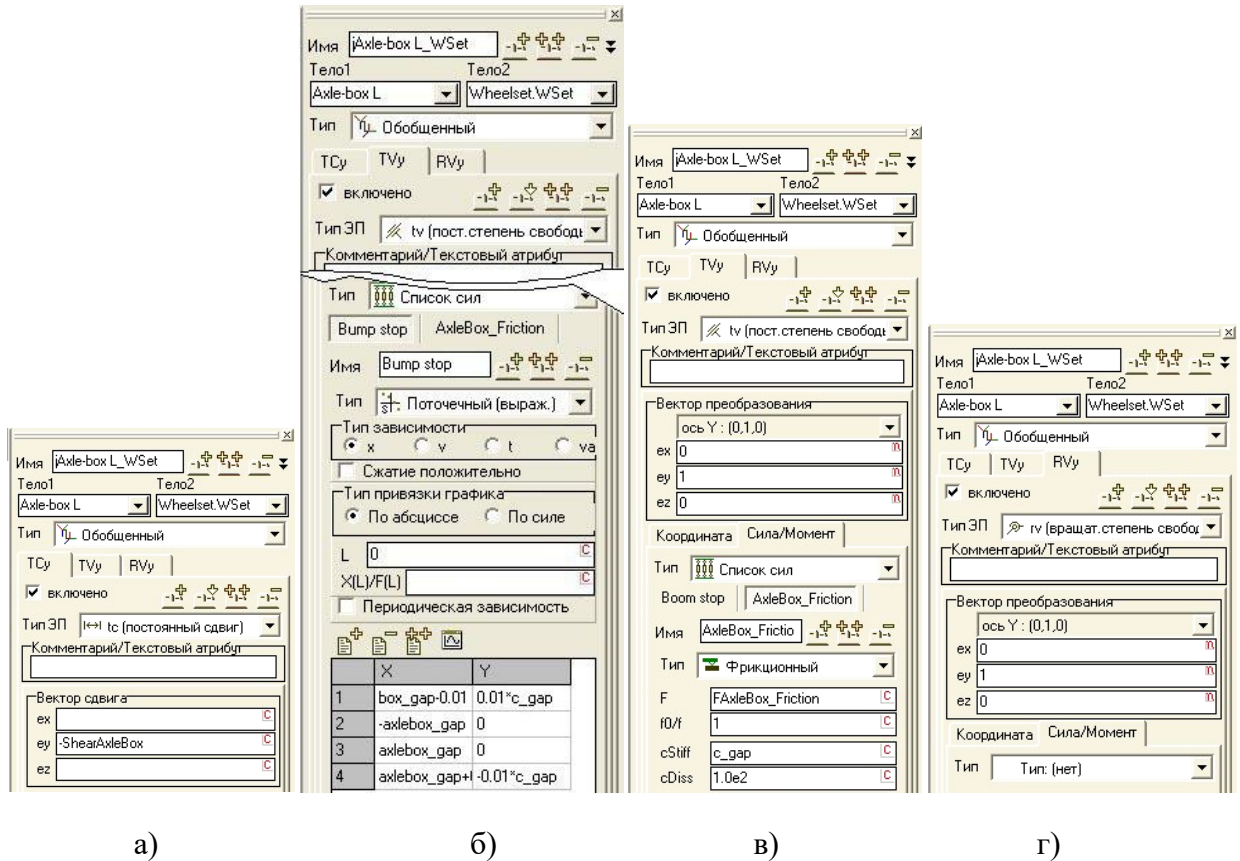


Рис. 8.42. Описание шарнира «jAxle-box L\_WSet» в Wheelset\_motor\_assembling\_2

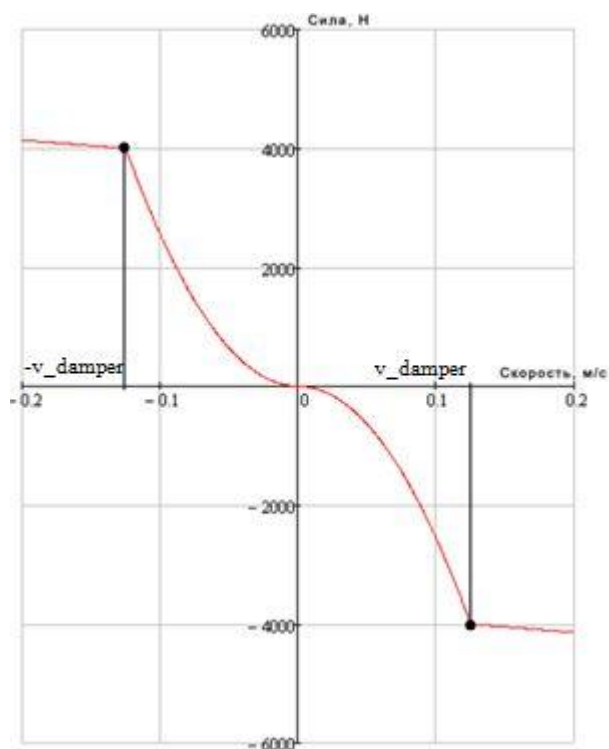


Рис. 8.43. Силовая характеристика буксового гасителя колебаний

Описание в модели КМБ пружин и поводков обычно выполняется с помощью *Линейных силовых элементов*.

Для моделирования работы резинокордной муфты (*Rubber-cord coupler*) подходит *Специальная сила* типа *Сайлент-блок*. Работу этой муфты необходимо описывать как объект с нелинейными характеристиками. Так в случае если одно из тел, связанных с муфтой, отклонится в радиальном направлении от своего среднего положения больше чем на 0.06 м, то коэффициенты демпфирования и жесткости возрастут. Коэффициенты жесткости и диссипации муфты в каждом направлении задается с помощью редактора кривых.

**Замечание.** Для возможности уточнения значений различных коэффициентов желательно их параметризовать. На первый взгляд может показаться, что при необходимости можно зайти в подсистему КМБ и исправить значения коэффициентов. Но таких подсистем в нашем случае шесть и исправление значений в каждой дело трудоемкое. В случае с параметрами достаточно, выделив подсистему в списке элементов и зайдя на закладку **Идентификаторы** инспектора моделирования объекта, исправить значение нужного параметра и нажать *Enter*, при этом откроется окно одноименных идентификаторов во всех подсистемах с предложением произвести изменения и с ними.

### 8.2.7.2.2. Создание тележки локомотива

Разберем некоторые особенности создания модели тележки. Откройте подсистему *Bogie\_1*. Построение модели тележки начинается с создания графических образов (ГО).

ГО рамы тележки импортирован из CAD-системы, а остальные создаются в UM. В модели тележки присутствует два тела *Frame* и *Traction rod*.

Тело *Frame* появляется в списке тел после импорта из CAD (см. [Глава 9](#)). Оно уже имеет инерционные параметры и координаты центра масс, которые рассчитаны в исходной CAD программе.

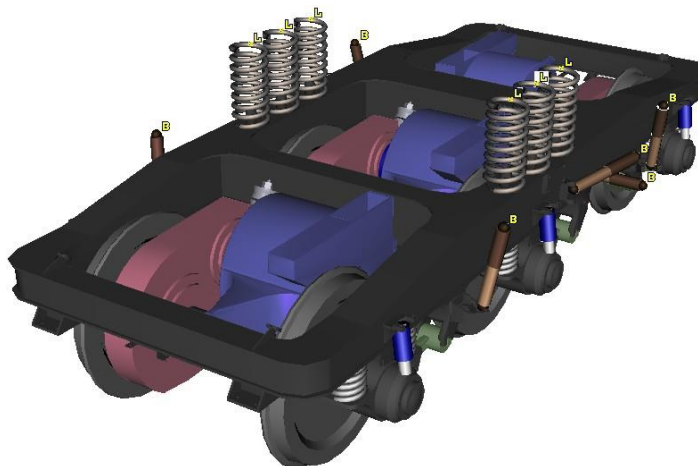



Рис. 8.44. Тележка локомотива

Для описания рамы тележки (*Frame*) как свободного тела используется шарнир типа *б степеней свободы* с названием *jBase\_Frame* (принципы именования были рассмотрены в п. 8.2.7.2.1. "Создание колесно-моторного блока локомотива", стр. 8-38). Положение и степени свободы наклонной тяги (*Traction*) описываются с помощью шарнира *jBase\_Traction* типа *обобщенный*. Положение тяги определяется посредством двух ЭП (элементарных преобразований): *tc* (постоянный сдвиг) – сдвиг тяги вдоль осей  $OX$  и  $OZ$ ; *rt* (вращательная функция времени) – задает параметризованный поворот тяги на угол  $a\_Traction = 0.0250164$ рад вокруг оси  $OY$ . Степени свободы тяги задаются с помощью ЭП: *TVx*, *TVy*, *TVz* – поступательные степени свободы вдоль соответствующих осей; *RVx*, *RVy*, *RVz* – вращательные степени свободы вокруг соответствующих осей. Этот шарнир описан с помощью типа *обобщенный* с целью ознакомления пользователей с универсальным способом определения сложного шарнира. Шарнир *jBase\_Traction* также можно описать с помощью типа *б степеней свободы*, указывая на закладке **Геометрия** необходимые сдвиг и поворот тяги, а степени свободы – на закладке **Координаты**.

В модели присутствуют три *включенные* подсистемы КМБ (в 8.2.7.2.1. "Создание колесно-моторного блока локомотива", стр. 8-38 были рассмотрены основные принципы создания такой подсистемы). При добавлении подсистем достаточно добавить лишь два различных по конструкции КМБ (*Wheelset\_motor\_assembling\_1* и *Wheelset\_motor\_assembling\_2*). Они различаются конструкцией буксового шарнира. Для добавления *Wheelset\_motor\_assembling\_3* необходимо сделать активной подсистему *Wheelset\_motor\_assembling\_1* и использовать функцию **Скопировать текущий элемент** (кнопка ). После чего ввести новое имя подсистемы. Для всех подсистем необходимо задать их положение на закладке **Положение** инспектора. Для обеспечения возможности изменения координат расположения КМБ рекомендуется задавать их с помощью параметров, в нашем случае:  $x\_Wheel\_1$ ,  $x\_Wheel\_3$ ,  $r\_Wheel$ .

Для закрепления трех КМБ создаются шарниры *jFrame\_Wheelset\_motor\_assembling\_1*, *jFrame\_Wheelset\_motor\_assembling\_2*, *jFrame\_Wheelset\_motor\_assembling\_3*. Для них удобно использовать *обобщенный* тип шарнира. Для позиционирования первого и второго КМБ используется ЭП *tc* (постоянный сдвиг) со значениями сдвига. Для третьего КМБ помимо ЭП *tc* (постоянный сдвиг) применяется поворот КМБ вокруг оси *OZ* – ЭП *RCz* (вращение на постоянный угол).

Гасители вертикальных колебаний описываются биполярными силами: *DamperZ 1R*, *DamperZ 2R*, *DamperZ 1L*, *DamperZ 2L*. Гашение колебаний отбоя осуществляется демпферами *Damper Y L* и *Damper Y R*, а колебаний виляния – *Damper X L* и *Damper X R*. Тип биполярных сил – «линейный» с коэффициентами диссипации  $d_{Spr2lv\_z} = 80000$ ,  $d_{Spr2lv\_y} = 80000$ ,  $d_{Spr2lv\_x} = 80000$  соответственно. Точки прикрепления определяются конструкцией. В качестве второго тела необходимо выбрать *External* и включить **Автоопределение**.

Линейные силовые элементы характеризуют работу пружин типа Флексикойл. На моделируемую тележку устанавливается шесть таких пружин. Стационарная сила приложена только вертикально и равна произведению вертикальной жесткости пружины на ее статический прогиб. Жесткостные характеристики пружины задаются с помощью матрицы жесткости. Точки прикрепления пружин к тележке задаются исходя из конструкции тележки. Вторым телом выбирается *External* с обязательным включением **Авторасчет для второго тела**.

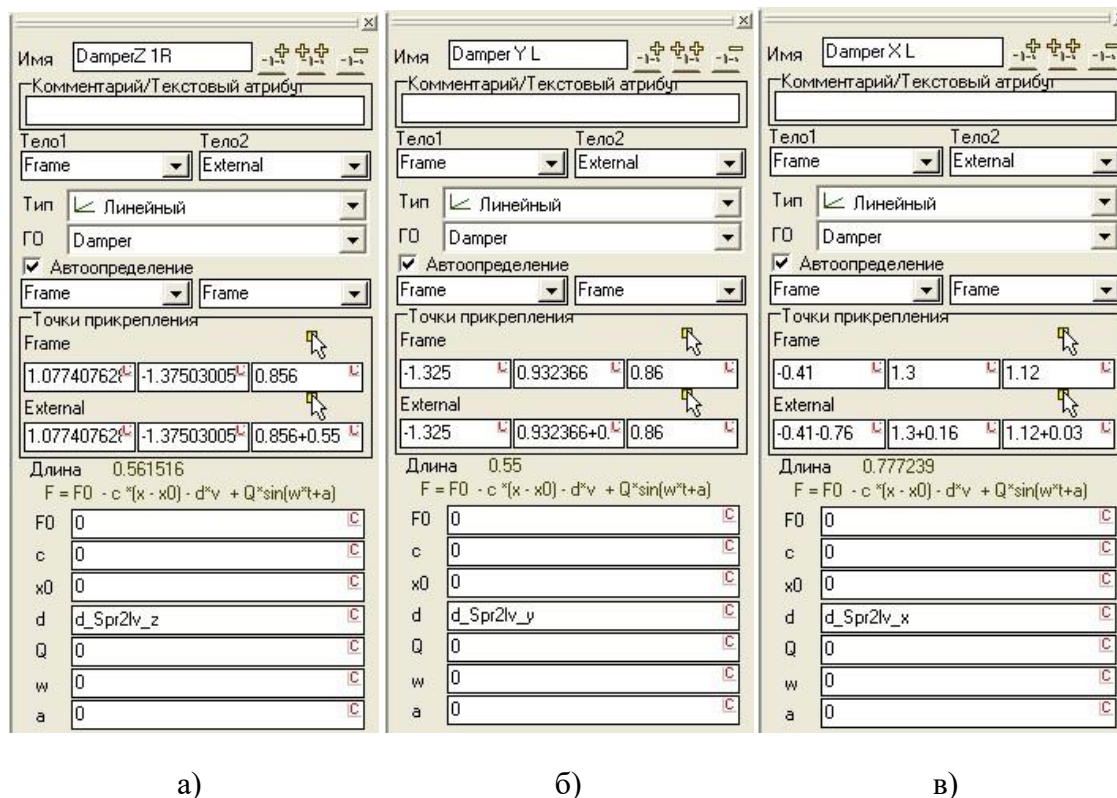


Рис. 8.45. Описание гасителей вертикальных (а), поперечных (б) и продольных (в) колебаний

В каждом конкретном типе тележки используется своя система передачи тягового усилия от рамы тележки на кузов локомотива. В настоящем примере рассмотрен способ передачи тягового усилия с помощью наклонной тяги. При этом учитывается, что соединение наклонной тяги с кузовом или с рамой тележки осуществляется с помощью сайлент-блока. Для моделирования такого типа соединения в «Универсальном механизме» предусмотрен особый тип *специальных сил* – *Сайлент-блок*. У наклонной тяги два таких соединения: *Joint\_traction\_1* и *Joint\_traction\_2*. Первое соединение описывает связь наклонной тяги и рамы тележки, а второе – тяги и внешнего тела (*External*). На закладке **Положение** для двух тел путем сдвигов и поворотов СК1 (*Traction*) и СК2 (*Frame*) располагают в точке соединения. После этого на закладке **Описание** выбирается *Линейный* тип и для него задаются параметры соединения. Аналогичные действия проделывается и для второго соединения, только в качестве второго тела выбираем *External* с включением **Автоопределения**.

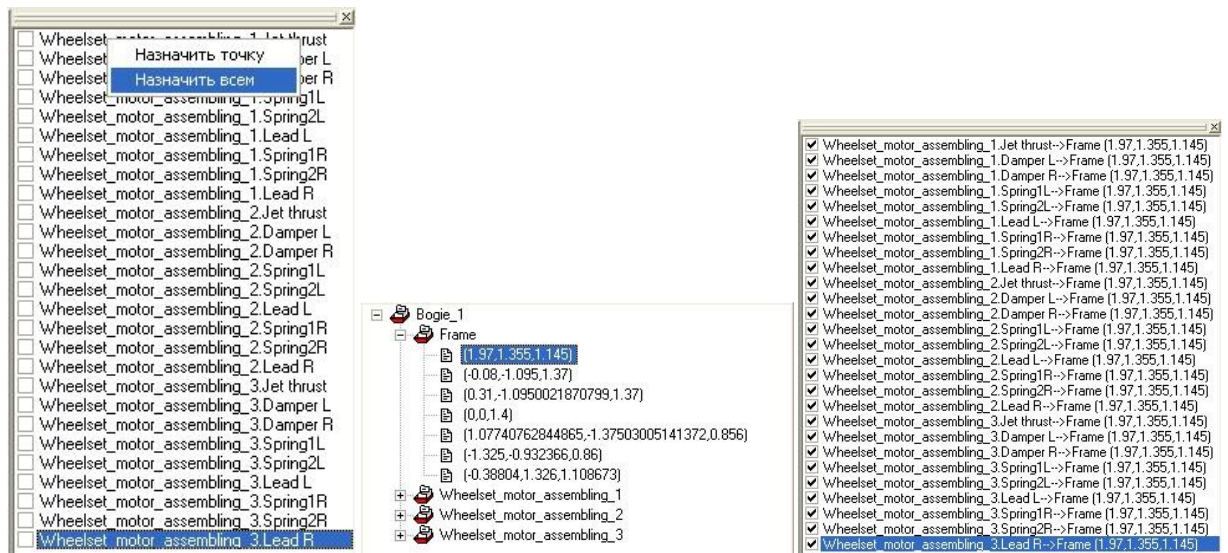


Рис. 8.46. Назначение точек связи с помощью функции «Назначить всем»

Для того чтобы считать модель тележки законченной не хватает лишь назначения внешних связей. Для этого необходимо зайти в раздел **Внешние связи**<sup>2</sup> в **Списке элементов**. Если при создании подсистем и описании в них внешних шарниров и силовых элементов были установлены галочки **Автоопределение**, то, убедившись, что все шарниры и силовые элементы указаны верно, можно воспользоваться функцией **Назначить всем**. Для использования функции необходимо чтобы у тела *Frame* имелась хоть одна точка связи, которую необходимо создать при описании тела на закладке **Точки**. Если до этого все было сделано верно, то находясь в разделе **Внешние связи** и вызвав контекстное меню в окне инспектора, появляется возможность вызвать функцию **Назначить всем**. После вызова этой функции пользователю предоставляется возможность выбрать из списка любую точку принадлежащую телу *Frame*. В результате программа автоматически рассчитывает точки связи рамы тележки и подсистем (КМБ). В случае если **Автоопределение** не ис-

<sup>2</sup>Внешние связи – инструмент назначения точек прикрепления для внешних шарниров и силовых элементов.

пользуется, то назначение каждой связи соответствующей точки тела (*Frame*) производится вручную.

### 8.2.7.2.3. Сборка локомотива

Остановимся на некоторых особенностях сборки модели локомотива. Создание модели начинается с разработки ГО для кузова в САД-системе и последующим его импортом в УМ.

**Замечание.** Графический образ (ГО) кузова создан из нескольких графических элементов (ГЭ). Это связано с тем, что разноцветный ГО необходимо создавать на основе нескольких ГЭ, т.к. каждый ГЭ может иметь только один цвет. Поэтому ГО кузова создавался на основе 6 графических элементов.

При импорте в списке тел появляется новое тело (*Body*). Для описания тележек локомотива добавляем *включенную* подсистему *Bogie\_1*. Копируем ее, создавая подсистему *Bogie\_2*. Для подсистем зададим положение, сместив их по оси *X* в положительном и отрицательном направлениях на половину базы *vehiclebase/2*.

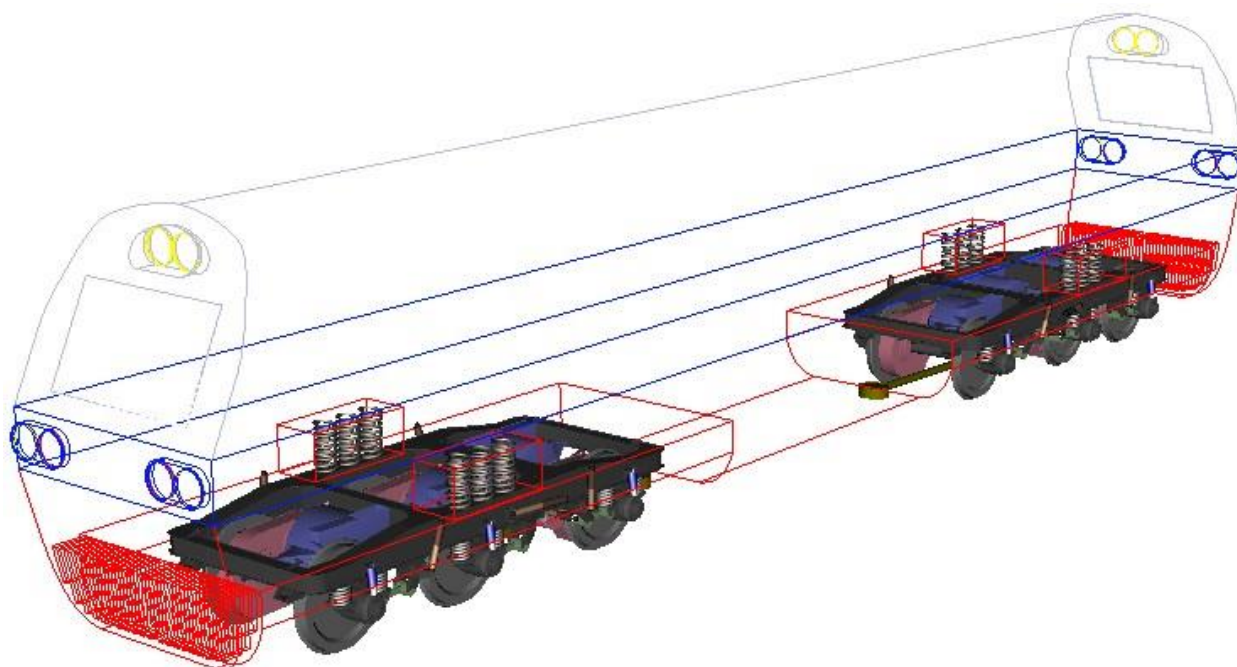


Рис. 8.47. Модель локомотива в сборе

В разделах **Тела** и **Шарниры** описаны характеристики только одного тела – *Body*, его положение и инерционные параметры, и связанный с телом шарнир *jBody* с шестью степенями свободы.

Для связи кузова с подсистемами необходимо зайти в раздел **Внешние связи** списка элементов и воспользоваться функцией **Назначить всем** рассмотренной в п. 8.2.7.1.5, "Расчет начальных угловых скоростей с помощью связей на начальные условия", стр. 8-34. После этого проверяем полученную модель на предмет явных ошибок в разделе **Протокол**.

### 8.2.7.2.3.1. Доработка описанной модели

После сборки в программе **UM Input** модель проводится тестирование и уточнение параметров модели уже в программе **UM Simulation**. Рассмотрим их в следующих главах.

### 8.2.7.2.3.2. Создание файла фиксации

Файл фиксации – это файл, в котором описываются фиксированные для расчета координаты и скорости, т.е. те координаты и скорости, которые при расчете начальных условий не изменяются (см. 4.4.2.5). В рассматриваемой модели локомотива, а именно в его экипажной части, имеется ряд фиксированных координат и скоростей, см. рис. 8.48.

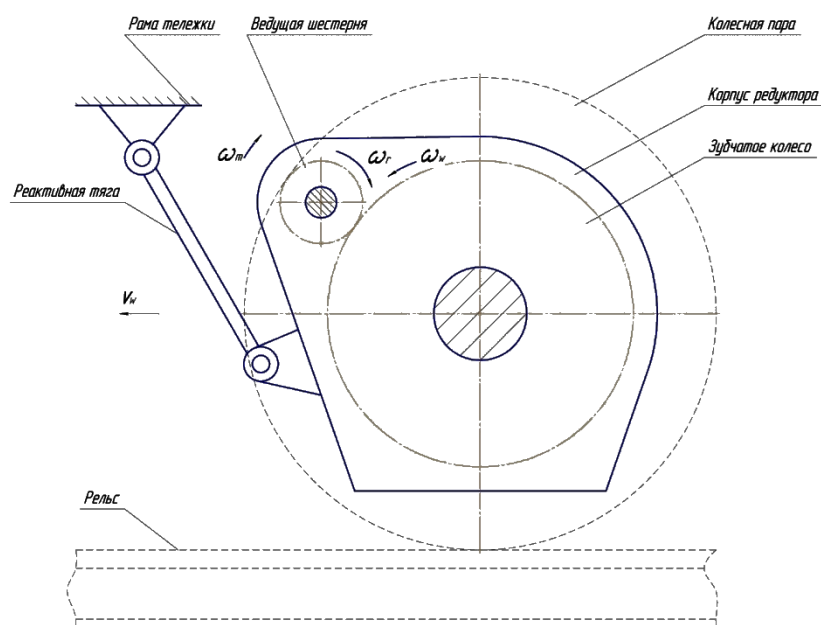



Рис. 8.48. К расчету угловых скоростей в тяговом приводе

Связь угловых скоростей зубчатых колес – ведущей шестерни, связанной с ротором ТЭД, и ведомой, жестко закрепленной на оси КП, описывается уравнением связи (см. п. 8.2.7.1.5. "Расчет начальных угловых скоростей с помощью связей на начальные условия", стр. 8-34). Решить это уравнение можно двумя способами, фиксируя значения одной из угловых скоростей. В нашем случае: фиксацией угловой скорости корпуса редуктора –  $\omega_m$ ; или фиксацией угловой скорости ведущей шестерни –  $\omega_r$ . Математически любое из этих решений верное, но исходя из здравого смысла и конструкции моделируемого объекта – видно, что необходимо зафиксировать возможность поворота корпуса редуктора.

Создание файла фиксации осуществляется с помощью **Инспектора моделирования** на закладке **Начальные условия | Координаты**, см. рис. 8.49. На этой закладке в графе со знаком  необходимо расставить маркеры напротив фиксируемых координат и скоростей. После чего, вызвав контекстное меню, сохранить файл фиксации.

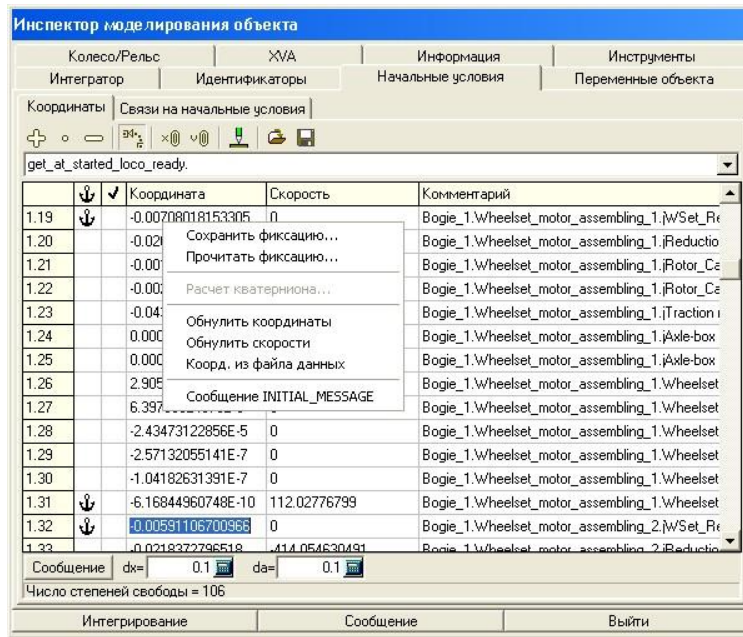


Рис. 8.49. Создание файла фиксации

### 8.2.7.2.3.3. Определение связей на начальные условия

Связи на начальные условия могут выступать как альтернатива файлу фиксации или дополнять его (см. п. 8.2.7.1.4. "Расчет начальных угловых скоростей с помощью файла фиксации", стр. 8-32).

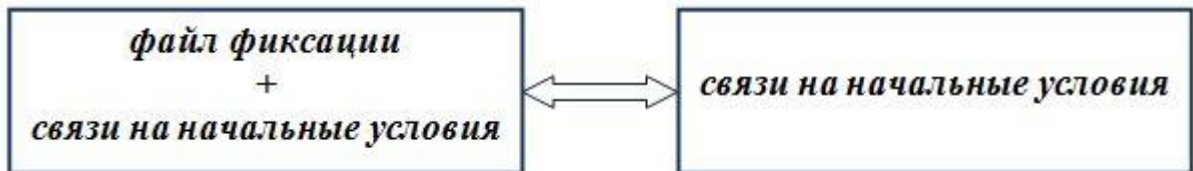



Рис. 8.50.

Наглядно это изображено на рис. 8.50. При использовании лишь связей на начальные условия пользователю придется вручную с помощью **Мастера переменных** рассчитывать начальные положения тел, определять начальные условия и т.д. Поэтому удобнее использовать *файл фиксации* и *связи на начальные условия* совместно. При такой постановке в *связях на начальные условия* указываются связи между телами, не имеющими кинематической связи. В нашем примере необходимо реализовать связь в КМБ между ротором ТЭД (*Rotor*) и ведущей шестерней редуктора (*Gear wheel*). Для этого в **Мастере переменных** получают угловые скорости для этих тел и добавляют связи, рис. 8.51. После этого необходимо записать связи на начальные условия. В качестве проверки верности составления *файла фиксации* и *связей на начальные условия* можно зайти на закладку **Координаты**, нажать кнопку **Сообщение**, после этого кнопку **Расчет конфигурации при заданных значениях координат** (кнопка ). Выполнив эти действия, пользователь в графе **Скорость** на закладке **Координаты** получает рассчитанные значения скоростей шарнирных координат.

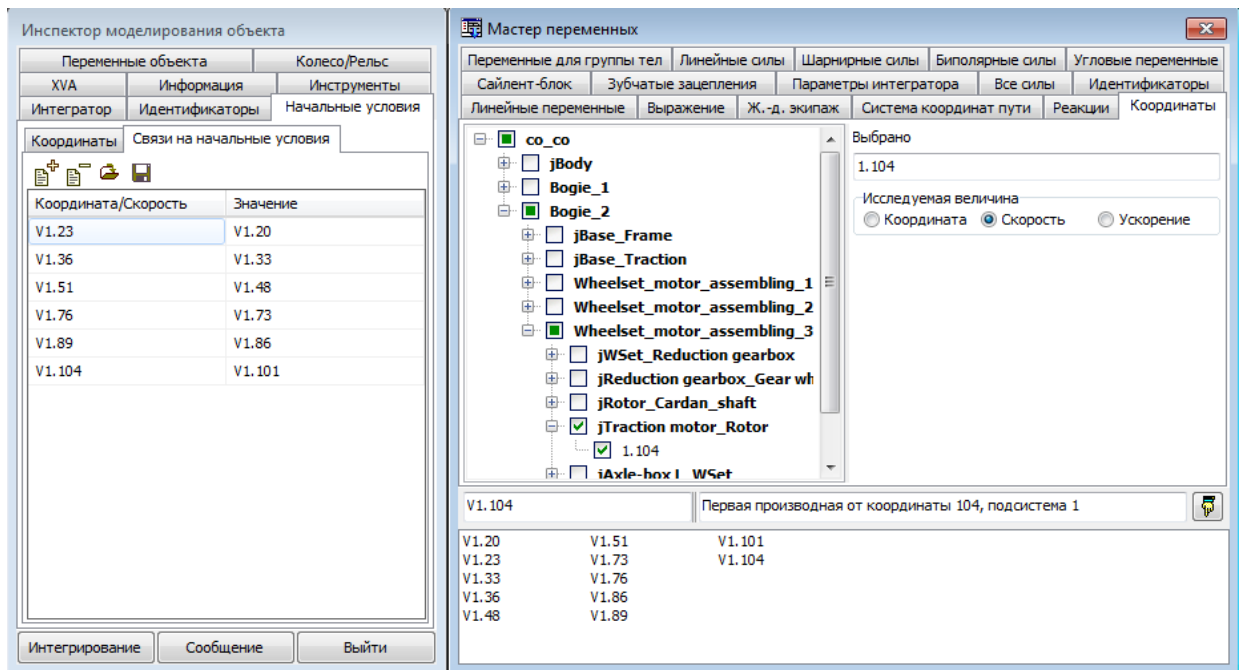


Рис. 8.51. Описание связей на начальные условия

Так в нашем случае пользователь может проверить правильность, сравнив значения полученных скоростей. Например, скорости вращения ротора ТЭД и ведущей шестерни редуктора должны быть одинаковы у всех КМБ, рис. 8.52.

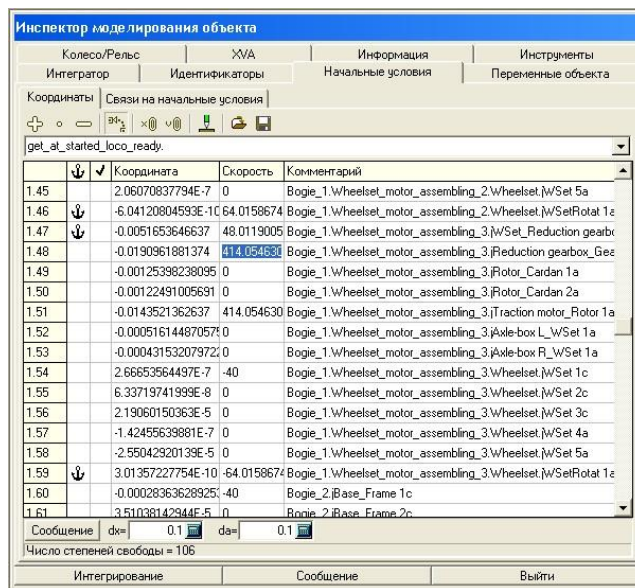


Рис. 8.52. Сравнение результатов после расчета конфигурации при заданных значениях координат

### 8.2.7.2.3.4. Тест сил

Для проверки корректности модели и ее параметров существует также инструмент **Тест сил**. С помощью этого инструмента пользователь получает возможность определить значения сил во всех силовых элементах при нулевой скорости с заданными начальными условиями. Для проведения этого теста необходимо зайти в **Инспекторе моделирования объекта** на закладку **Инструменты | Тест** и нажать на кнопку **Выполнить**, рис. 8.53. Корректность модели определяется сравнением значений сил полученных при тесте и ожидаемых значений.

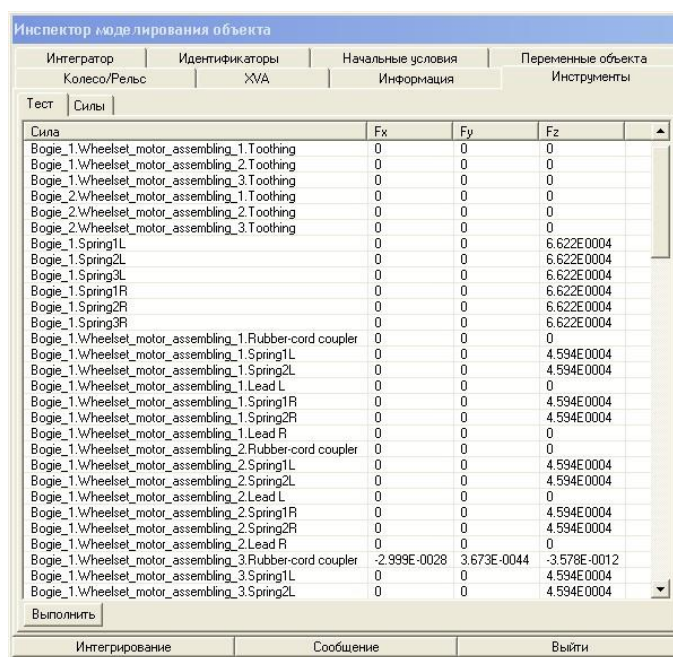


Рис. 8.53. Тест сил

### 8.2.7.2.4. Исследование некоторых динамических характеристик локомотива

С помощью полученной модели можно исследовать динамику движения локомотива в различных ситуациях: в прямых и кривых участках пути, при движении на выбеге, с постоянной скоростью или с заданным графиком скорости и т.д. При изучении динамики движения локомотива в прямых исследователи обычно интересуются показателями, используемыми в практике натурных испытаний: боковые и рамные силы, горизонтальные и вертикальные ускорения кузова, коэффициенты вертикальной динамики и т.д. При исследовании динамики экипажа в кривых анализируют значения боковых, рамных и направляющих сил, коэффициентов запаса устойчивости от вкатывания колеса на рельс, углов набегания, износа профилей колес и т.д.

В качестве примеров, проведем следующие простые исследования.

- Сравнение коэффициентов динамики для первой и второй ступени рессорного подвешивания при движении по различным неровностям.
- Движение экипажа со скоростями выше и ниже критической.
- Сравнение степени износа бандажа при движении в кривых.

### 8.2.7.2.4.1. Сравнение коэффициентов динамики

Сравнение значений коэффициентов динамики можно провести из условия варьирования одного из параметров модели при остальных неизменных. В этом примере мы будем синхронно варьировать значение параметров неровностей пути – *множитель*, на который умножаются горизонтальные и вертикальные неровности пути, рис. 8.54.

Пусть локомотив движется в режиме выбега на прямом участке пути с заданными неровностями со скоростью 30 м/с. Время моделирования 10 с. Для получения осциллограмм коэффициентов динамики (КД) необходимо с помощью **Мастера переменных** подготовить переменные<sup>3</sup> (см. п. 8.5.3.1. "Особенности создания списка переменных", стр. 8-211) и поместить их в графические окна.

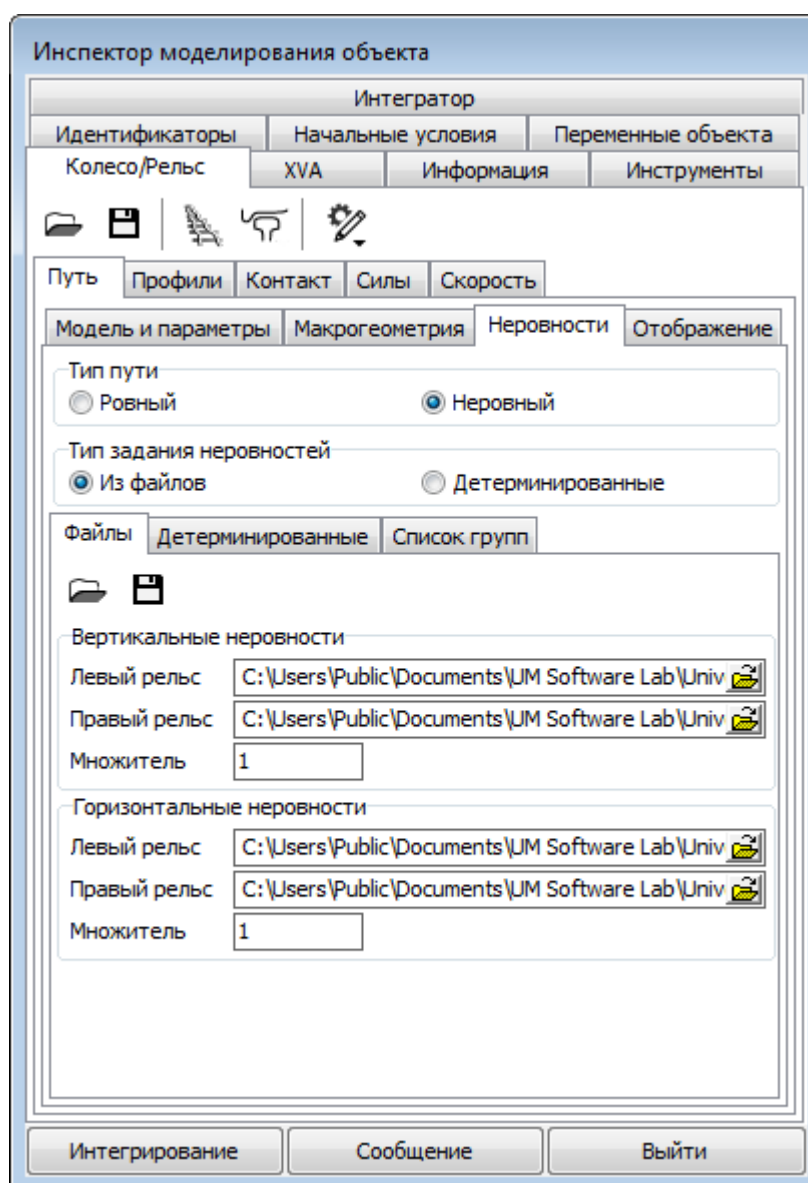


Рис. 8.54. Задание неровностей пути

<sup>3</sup>Переменной называется любая характеристика исследуемого объекта, которая может быть получена при помощи UM, например модуль вектора скорости точки, величина силы, координаты произвольной точки тела и т.д.

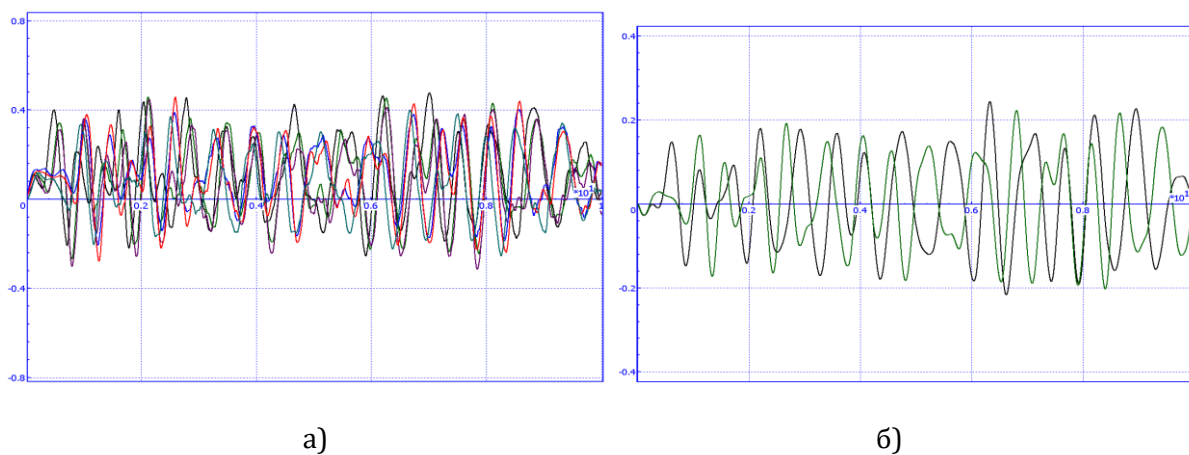


Рис. 8.55. КД первой (а) и второй (б) ступеней рессорного подвешивания при значении множителей 1

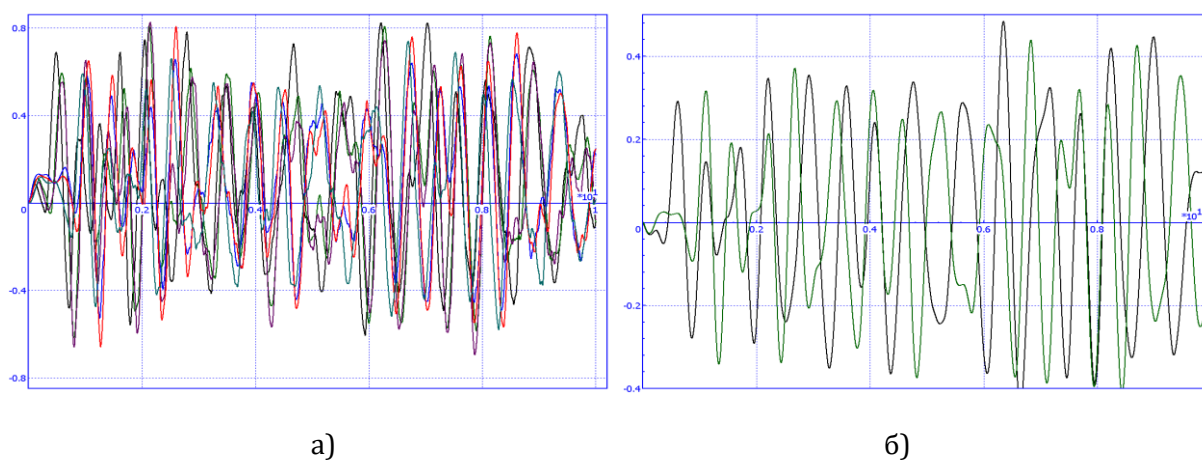


Рис. 8.56. КД первой (а) и второй (б) ступеней рессорного подвешивания при значении множителей 2

Для обработки осциллограмм (рис. 8.55 и рис. 8.56) воспользуемся **Табличным процессором**. Рассчитаем функционал «Среднее по четырем максимумам», **\_4Max\_Mean** (см. п. 8.5.3.5. *Табличный процессор*, стр. 8-244). Результаты, приведенные на рис. 8.57, показывают, что при большем множителе значения КД возрастают.

а)

б)

Рис. 8.57. Коэффициенты динамики для первого и второго опытов

### 8.2.7.2.4.2. Способ определения критической скорости

Определение критической скорости<sup>4</sup> экипажа локомотива является важной задачей. Одним из методов определения критической скорости экипажа локомотива является компьютерное моделирование.

**Замечание.** Подробно способы определения критической скорости в ПК УМ рассмотрены в п. 8.7. "Методика расчета критической скорости", стр. 8-272.

В нашем случае можно определить критическую скорость следующим образом:

- создать с помощью инструмента создания неровностей участок пути, у которого отсутствуют вертикальные неровности, а горизонтальные неровности рельсов имеют только единичную неровность;
- провести серию экспериментов с последовательным увеличением скорости движения по пути с описанными неровностями;
- проанализировать характер поперечных перемещения осей колесных пар после прохождения неровности.

Создаем необходимые неровности, см. рис. 8.58.

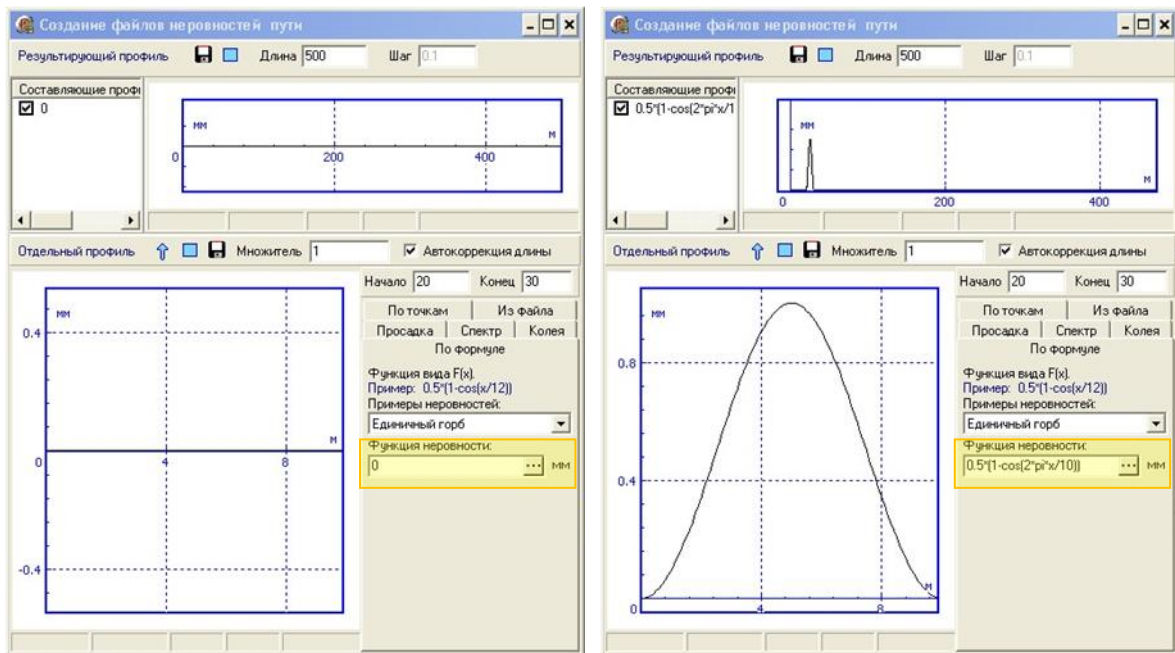


Рис. 8.58. Создание нулевой (а) и единичной (б) неровности

Критическая скорость описываемого экипажа 70 м/с. Для ее определения проводится серия опытов с достаточно крупным шагом увеличения скорости в предполагаемой области нахождения критической скорости. После проведения опытов сравнивают характер поперечного перемещения колесной пары и находят интервал, в котором форма осциллограммы меняет характер. Например, на рис. 8.59 представлены осциллограммы попереч-

<sup>4</sup>Критическая скорость – это скорость, при которой движение экипажа локомотива становится неустойчивым, т.е. при минимальном возмущении со стороны пути в прямой поперечные колебания экипажа не затухают.

ного перемещения осей колесных пар локомотива на скоростях до критической – 60 м/с и после критической – 80 м/с. Так при движении на докритической скорости амплитуда колебаний затухает, а при движении после критической скорости – не затухает. Сузив область нахождения критической скорости, проводят следующую серию опытов и так до тех пор, пока не будет найдена критическая скорость с необходимой точностью.

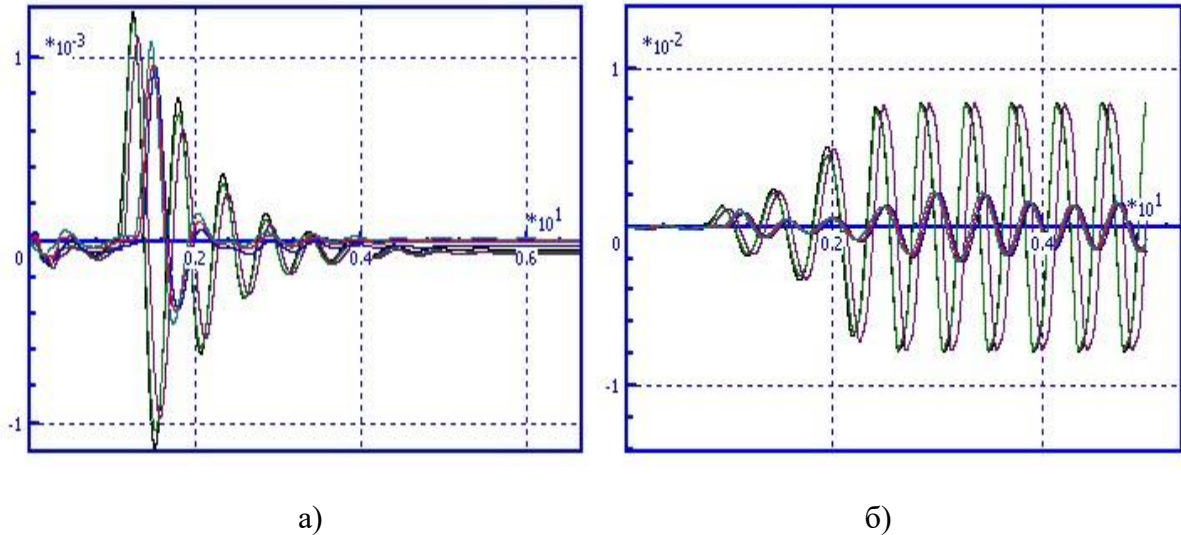


Рис. 8.59. Поперечное перемещение колесных пар при движении со скоростью 60 м/с (а) и 80 м/с (б)

### 8.2.7.2.4.3. Сравнение степени износа бандажа при движении в кривых

В этом примере сравним степени износа бандажа колеса при движении с различными скоростями в кривой радиусом  $R = 300$  м, с применением лубрикации и без нее. Исследования такого рода часто проводятся для оценки степени износа бандажей в зависимости от конструкции тележек, профиля бандажа, лубрикации гребней или внутренней поверхности головки наружного рельса в кривой и т.д.

Оценивать степень износа бандажей будем, опираясь на работу сил трения в контакте между колесом и рельсом. По умолчанию в УМ рассматриваются правые кривые. Поэтому износ обычно определяется на левых (набегающих) колесах. Рассмотрим суммарную работу сил трения в контакте колесо-рельс для всех левых колес локомотива. Таковую переменную можно сформировать с помощью **Мастера переменных**. Для этого на закладке **Колесо/Рельс** в группе **Переменные для колеса** выбираем  $AWear1$  – работа сил трения на круге катания (см. п. 8.5.3.1.1. "Переменные, характеризующие контакт колеса с рельсом", стр. 8-212) и выбираем все левые колеса, рис. 8.61. То же самое делаем и для переменной  $AWear2$  – работа сил трения на гребне. После этого с помощью закладки **Выражение** выполняется сложение работ для всех левых колес, рис. 8.62. Затем полученную переменную  $AWearSum$  перемещаем в окно построения графиков.

Предполагается сравнить работу сил трения для четырех экспериментов:

- движение в кривой без лубрикации со скоростью 6 м/с;
- движение в кривой без лубрикации со скоростью 12 м/с;

- движение в кривой с лубрикацией внутренней поверхности головки наружного рельса со скоростью 6 м/с;
- движение в кривой с лубрикацией внутренней поверхности головки наружного рельса со скоростью 12 м/с.

Обычно при таких расчетах значение коэффициента трения рельсов без применения лубрикации принимают равным 0.25, а с применением – 0.15 по заданным поверхностям. Коэффициенты выставляются в **Инспекторе моделирования объекта** на закладке **Колесо/Рельс | Контакт | Трение**.

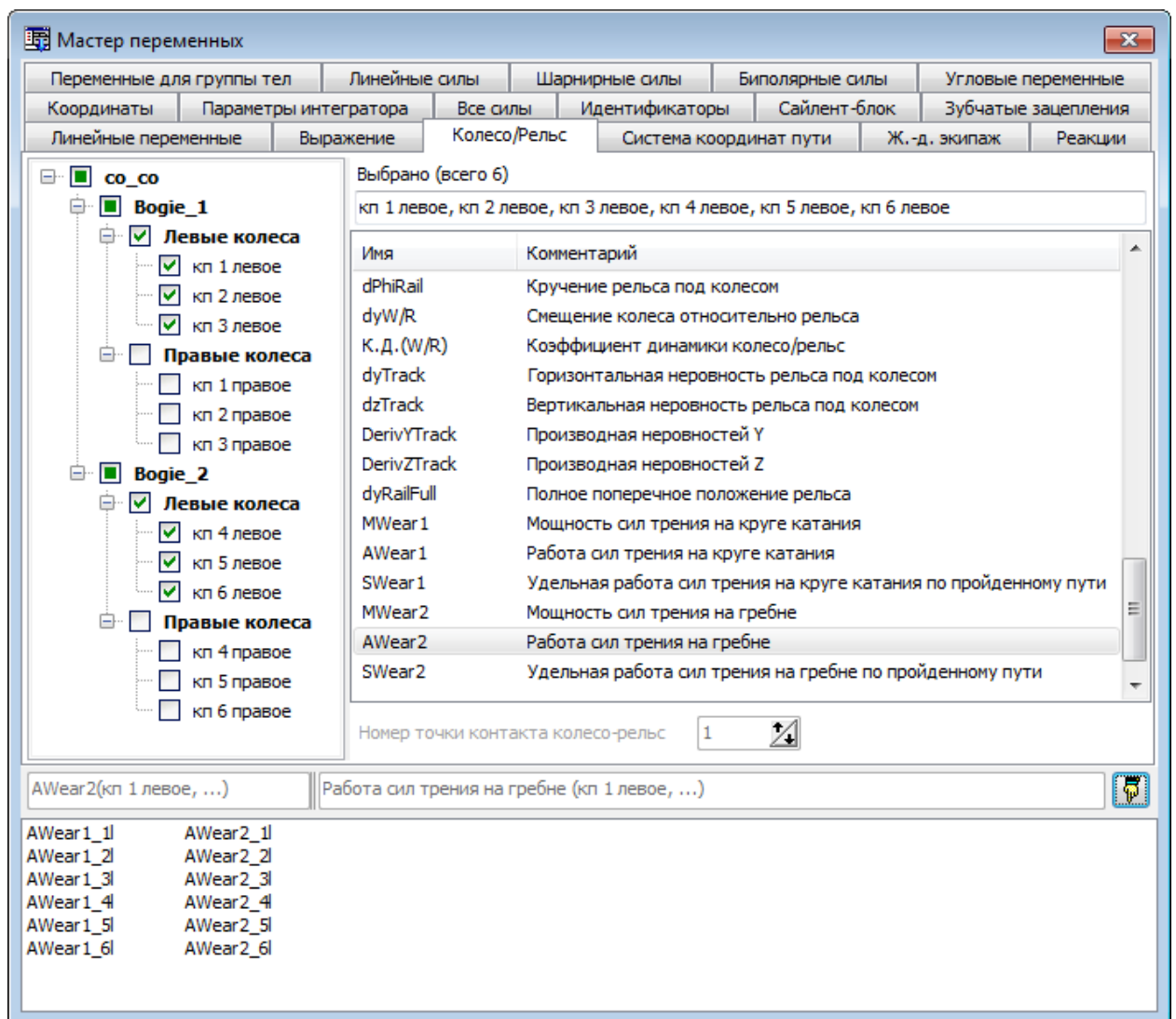


Рис. 8.60. Создание переменной «Работа сил трения»

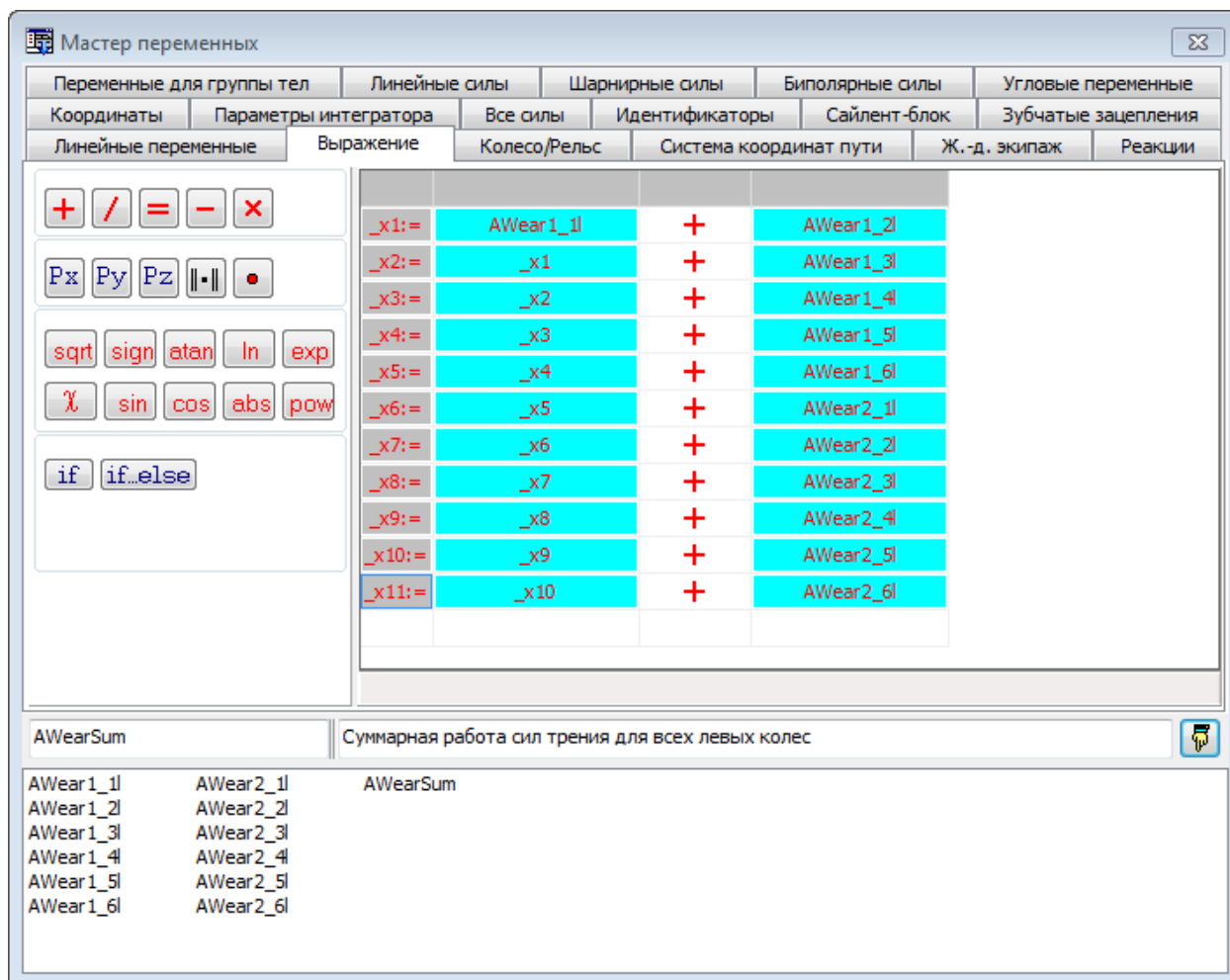


Рис. 8.61. Формирование суммарной работы сил трения

Эти эксперименты удобно проводить с использованием инструмента **Сканирование** из модуля **UM Experiments**. После проведения серии экспериментов получаем результаты, см. рис. 8.62. Графики показывают, что применение лубрикации позволяет снизить работу сил трения и соответственно уменьшить износ бандажей при прохождении кривых.

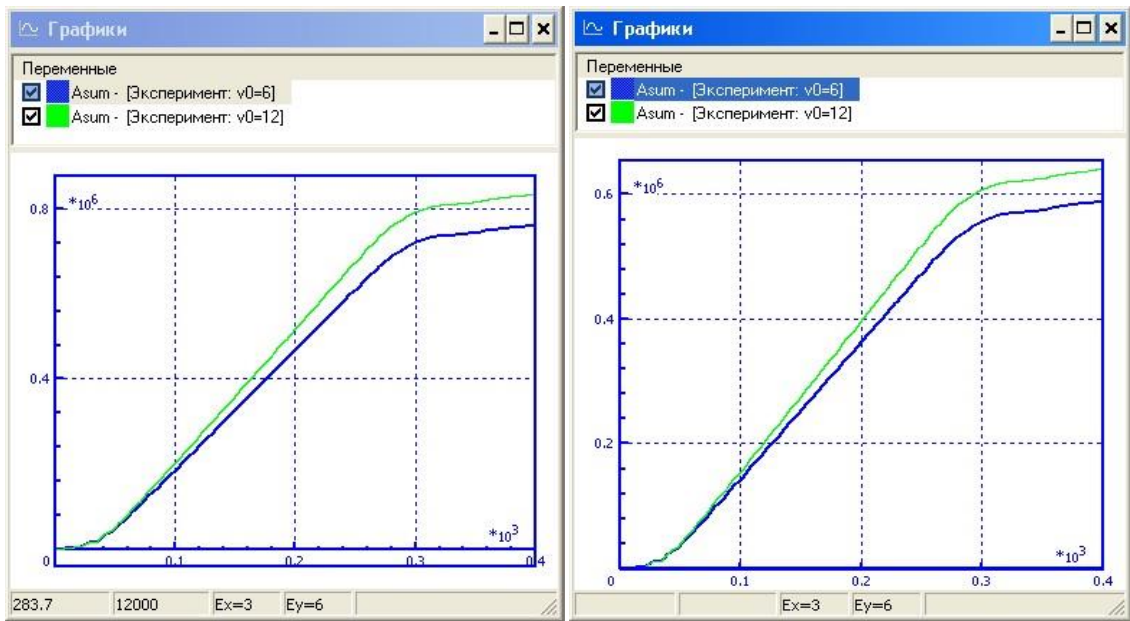


Рис. 8.62. Работа сил трения на скоростях 6 и 12 м/с: а) без лубрикации, б) с лубрикацией

### 8.2.7.3. Поддержка режима торможения

#### 8.2.7.3.1. Общие положения

Моделирование процесса торможения обсуждается в разделе руководства, посвященном моделированию продольной динамики поезда (см. [Главу 15](#)). Здесь мы остановимся только на добавлении в модель экипажа (вагона или локомотива) силовых элементов, с помощью которых силы торможения, рассчитанные в модуле продольной динамики, могут перераспределяться между телами модели рельсового экипажа. С помощью УМ возможна реализация уточненной модели механической части системы торможения, однако мы рассмотрим здесь упрощенную силовую модель, которая является вполне достаточной в большинстве случаев.

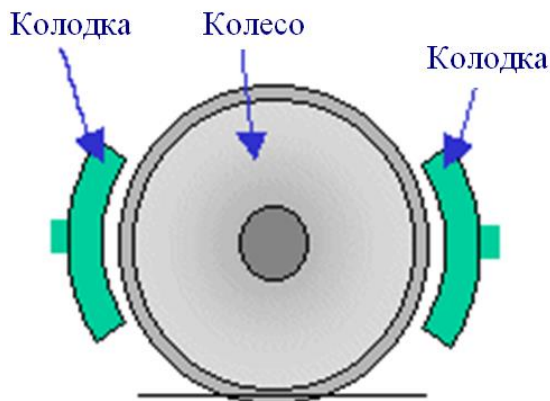


Рис. 8.63. Двухсторонние колодки

Пусть с помощью идентификатора задана суммарная сила торможения. Для автоматизации процесса распознавания программой идентификатора рекомендуется использовать для него имя *braking\_force*. Остановимся на случае, когда экипаж оборудован двухсторон-

ними тормозными колодками, в режиме торможения симметрично прижимаемыми к колесам или дисковыми тормозами. Примем также допущение, что каждая из колесных пар реализует одинаковую силу торможения. В этом случае сила торможения для каждой колесной пары может быть реализована в виде момента, приложенного со стороны рамы к колесной паре, направленного против вращения и равного  $\pm braking\_force/Nw * R$ , где  $Nw$  – число колесных пар,  $Rw$  – радиус колеса. Знак  $+$  в этой формуле берется, если продольному движению колесной пары соответствует отрицательная угловая скорость. Такая ситуация возможна, если колесная пара развернута на 180 градусов вокруг вертикальной оси вследствие поворота подсистемы, содержащая колесную пару. Знак угловой скорости колесной пары контролируется по рис. 8.33.

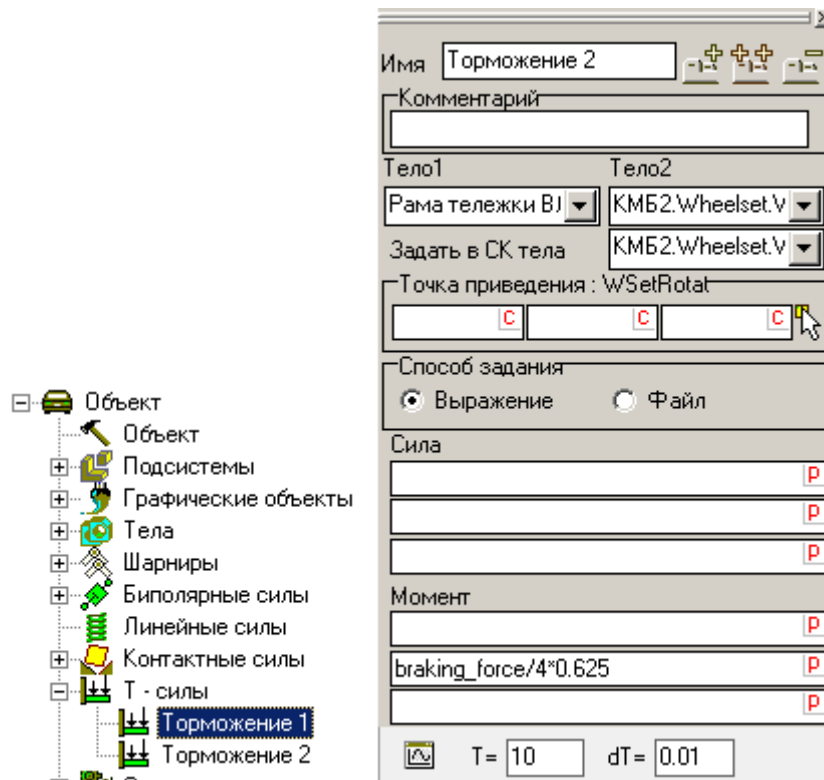


Рис. 8.64. Задание момента, реализующего торможение для электроваза ВЛ80

Данный момент следует добавить для каждой колесной пары с помощью силового элемента типа *T-сила*, см. рисунок выше. Первое тело для силового элемента – рама тележки, второе тело – вращающаяся часть колесной пары (*WSetRotat*), момент следует задать в СК базы колесной пары. Ошибкой будет задание момента в СК0 (тело *Base0*).

Аналогично можно задать реализацию торможения с помощью односторонних колодок. В этом случае, наряду с моментом, следует приложить вертикальную силу, равную силе трения в колодках. Пользователь должен позаботиться о корректном задании знаков как силы, так и момента, которые зависят не только от направления вращения колесной пары, но и от расположения тормозных колодок относительно колес.

### 8.2.7.3.2. Использование визуальных компонент

Использование визуальных компонент значительно ускоряет и облегчает процесс задания силовых элементов, моделирующих процесс торможения, описанных в предыдущем пункте.

Для визуального добавления силового элемента, моделирующего силы торможения для отдельной колесной пары, следует выполнить следующие действия.

- Выбрать щелчком кнопку нужной компоненты на рис. 8.65.
- Выбрать курсором мыши графический образ рамы или элемента тележки, к которому прикреплен механизм передачи тормозного усилия, например, надрессорной балки для трехэлементной тележки (первое тело).
- Выбрать курсором мыши графический образ колесной пары (второе тело).
- Выбрать курсором мыши точку связи в центре образа колесной пары. Эта точка автоматически добавляется базе колесной пары (тело, в СК которого задана сила).
- В окне **Инициализация численных значений** назначить нужные значения идентификаторам, соответствующим числу колесных пар и радиусу круга катания колеса, рис. 8.66. Это действие производится только для одной колесной пары.



Рис. 8.65. Визуальные компоненты модуля **UM Loco**

Для моделирования сил торможения используются три компоненты.



**Двухсторонние колодки или дисковый тормоз.**

Добавляется момент сил торможения на колесную пару и на раму, как это описано в предыдущем пункте. Список идентификаторов компоненты приведен на рис. 8.66.

Идентификатор	Значение	Комментарий
braking_force	0	Суммарная сила торможения
n_wheelsets	4	Число колесных пар
radius_wheel	0.475	Радиус круга катания КП

Принять Поместить на закладку: **Весь список**

Рис. 8.66. Список идентификаторов, параметризующих двухсторонний тормоз



**Односторонний тормоз, колодка сзади по ходу движения.** Сила задает суммарное действие от двух колодок.

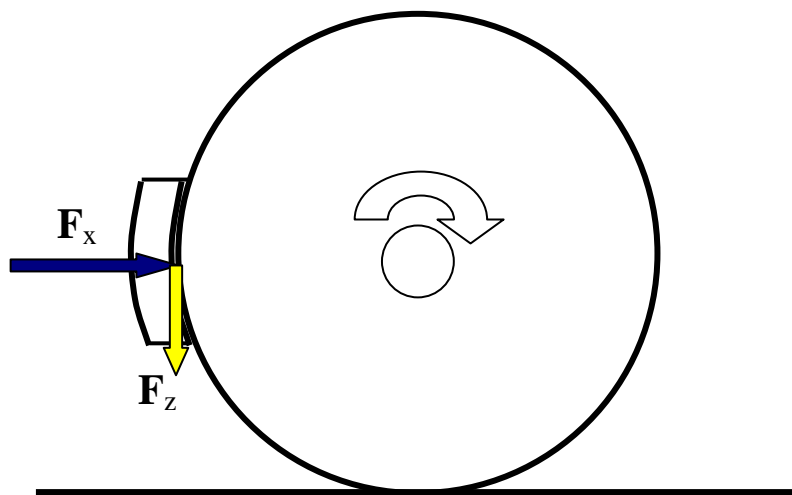


Рис. 8.67. Схема нагружения колеса односторонним тормозом, расположенным сзади

Схема нагружения представлена на рис. 8.67. Сила прижатия колодки  $F_x$  связана с силой трения  $F_z$  с помощью  $F_z = fF_x$ , где  $f$  – коэффициент трения колодка–колесо. Список идентификаторов по сравнению со списком на рис. 8.66 содержит идентификатор для коэффициента трения, рис. 8.68.

k_friction_brake_block	0.3	Коэффициент трения колодка-колесо
------------------------	-----	-----------------------------------

Рис. 8.68. Дополнительный идентификатор для одностороннего тормоза

Силы  $F_x, F_z$  приложены к ободу колес, однако, поскольку Т-силы должны быть приложены к фиксированной точке тела, производится их перенос в центр колесной пары. При этом переносе добавляется тормозящий момент относительно продольной оси КП

$$M_y = F_z r_w,$$

где  $r_w$  – радиус круга катания.



**Односторонний тормоз**, колодка спереди по ходу движения. Сила задает суммарное действие от двух колодок.

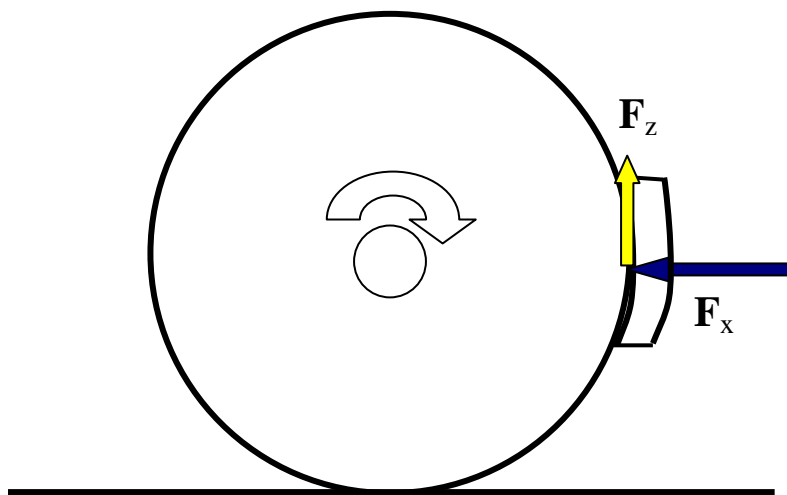


Рис. 8.69. Схема нагружения колеса односторонним тормозом, расположенным спереди

Описание элемента практически совпадает с предыдущим.

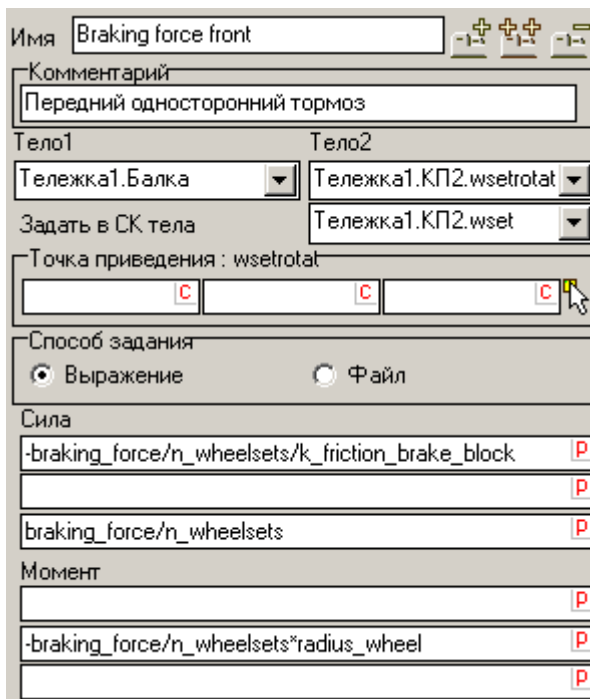


Рис. 8.70. Стандартное описание сил одностороннего тормоза в инспекторе

### Корректировка знаков сил

В случае одностороннего торможения знаки силы  $F_x$  и момента  $M_y$  зависят от знака угловой скорости колесной пары. Если угловая скорость отрицательная, то в инспекторе задания силы следует сменить знаки этих величин на противоположные, рис. 8.70. Такая ситуация возможна, если колесная пара развернута на 180 градусов вокруг вертикальной оси вследствие поворота подсистемы, содержащей колесную пару. Знак угловой скорости колесной пары контролируется по рис. 8.33.

### 8.2.8. Создание модели роликового стенда и особенности моделирования динамики

Роликовые тестовые стенды (рис. 8.71) используются для широкого спектра исследований, касающихся устойчивости экипажа, комфорта пассажиров, систем торможения, прогнозирования износа. Роликовые стенды просты в использовании и требуют существенно меньших инвестиций, чем полномасштабные полевые испытания.



Рис. 8.71. Роликовый стенд (Hongik University, Республика Корея).  
Приведено из [2].

Для создания модели роликового стенда выполните следующие действия в программе ввода данных **UM Input**:

1. Добавьте тела, моделирующие ролики, укажите их инерционные характеристики, назначьте соответствующие графические объекты и шарниры. Каждому колесу колесной пары должно соответствовать тело-ролик. Тела-ролики должны удовлетворять следующим требованиям:
  - Все ролики должны быть одинаковыми;
  - Ролик должен иметь одну вращательную степень свободы относительно оси  $Y$  и располагаться под соответствующим колесом колесной пары. Для этого назначьте ролику шарнир типа *вращательный* ([Глава 2](#), п. "*Поступательный и вращательный шарниры*"), в описании которого задайте:
    - Соединяемые тела: база (первое тело), ролик;
    - Ось вращения  $(0,1,0)$  для каждого тела;
    - Положение ролика, назначив соответствующие координаты шарнирной точке, принадлежащей базе, рис. 8.72.

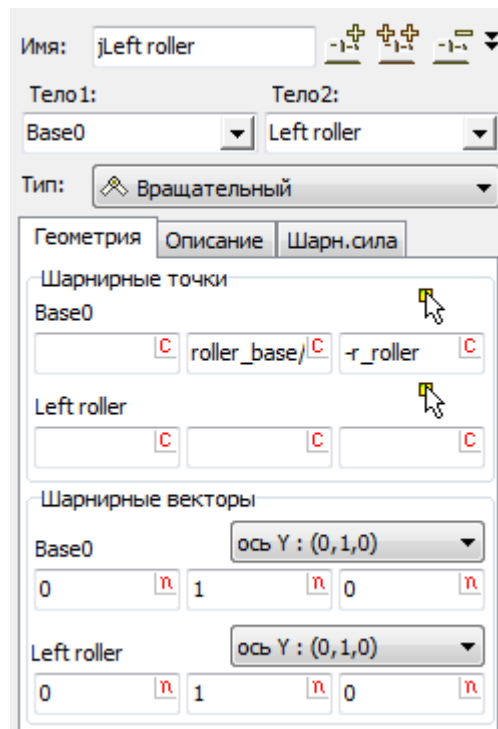


Рис. 8.72. Вращательный шарнир, описывающий степень свободы ролика относительно базы

2. Перейдите в окно инспектора данных подсистемы **«Колесная пара»** и активируйте ключ **«Испытательный стенд»**. После этого к списку идентификаторов автоматически добавится идентификатор **r\_roller**, которому нужно назначить значение величины радиуса ролика. Затем в списке тел укажите тела, соответствующие левому и правому роликам, рис. 8.73.

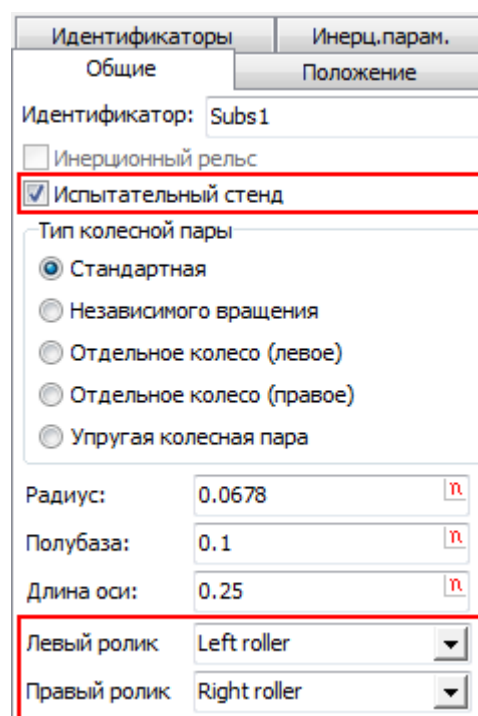


Рис. 8.73. Назначение колесной паре тел-роликов

Перед началом моделирования рекомендуется установить зависимость начальной угловой скорости ролика от "воображаемой" скорости продольного движения колесной пары  $v_0$ , соответствующей идентификатору  $\mathbf{v0}$ . Начальная скорость вращения колесной пары равна  $v_0/r_w$ , где  $r_w$  – радиус колеса. Соответственно угловая скорость ролика рассчитывается по формуле

$$\omega_r = -\frac{v_0}{r_r},$$

где  $r_r$  – радиус ролика. Создание связей на начальные условия описано в [Главе 4](#) п. "Связи на начальные условия"

Профили роликам назначаются на закладке **Колесо/рельс | Профили | Рельсы** инспектора моделирования, п. 8.5.2.3.1. *Назначение профилей рельсов*, стр. 8-169.

## 8.3. Путь

### 8.3.1. Геометрия пути

Геометрия пути включает в себя следующие компоненты:

- геометрию рельсов в идеальной прямой (ширина колеи, подуклонка, профили);
- макрогеометрию кривых и стрелочных переводов;
- неровности рельсовых нитей.

#### 8.3.1.1. Геометрия рельсов в идеальной прямой

Геометрия рельсов в идеальной прямой включает в себя следующие компоненты:

- профили рельсов,
- расстояние между центрами головок рельсов,
- подуклонку.

Левому и правому рельсу можно назначать различные профили.

*Профиль может изменяться вдоль пути (п. Задание изменения профиля рельса вдоль пути).* Для этого следует задать набор профилей и указать положение каждого из них вдоль колеи. Пусть в положениях  $S_1$  и  $S_2$  ( $S_2 > S_1$ ) заданы профили  $R_1$  и  $R_2$ . Тогда в положении  $S \in [S_1, S_2]$  программа строит промежуточный профиль  $R(S)$  в виде линейной интерполяции профилей  $R_1$  и  $R_2$ , так что  $R(S_1) = R_1$ ,  $R(S_2) = R_2$ .

В УМ профиль рельса задается в специальной системе координат рельса (СКР), рис. 8.74. Начало СКР расположено на центральной оси сечения рельса на его поверхности (то есть кривая профиля проходит через начало координат). Ось абсцисс ( $y$ ) перпендикулярна оси сечения рельса и направлена внутрь колеи. Ось ординат ( $z$ ) направлена вверх. Единица измерения при задании профиля – мм.

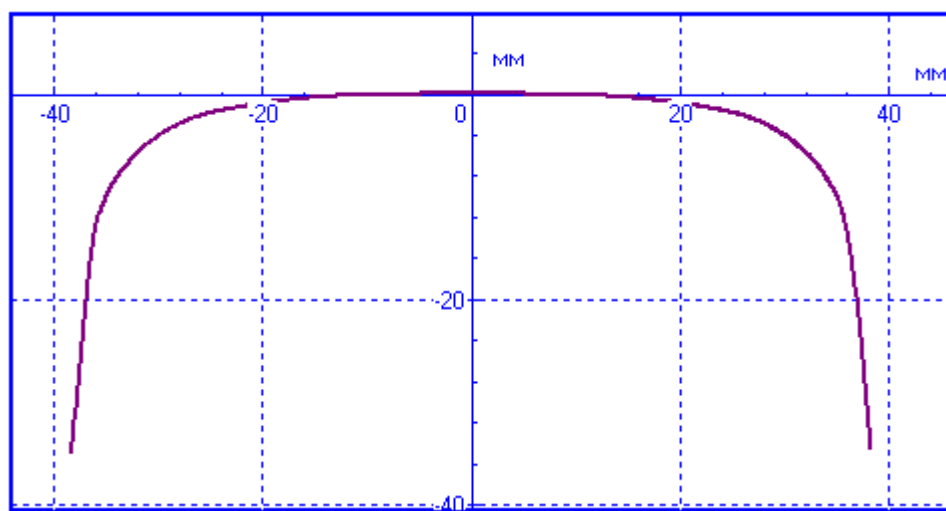


Рис. 8.74. Система координат профиля рельса

Положение рельса в поперечном направлении в идеальной прямой в УМ задается параметром *уширение колеи*  $\Delta y$  в прямой (рис. 8.75)

$$\Delta y = \frac{L_r - L}{2},$$

где  $L_r$  – расстояние между центрами головок рельсов,  $L$  – расстояние между кругами катания колесной пары. Другими словами, уширение колеи в прямой это поперечное расстояние от нижней точки на круге катания колеса до центральной точки головки рельса при их идеальном положении.

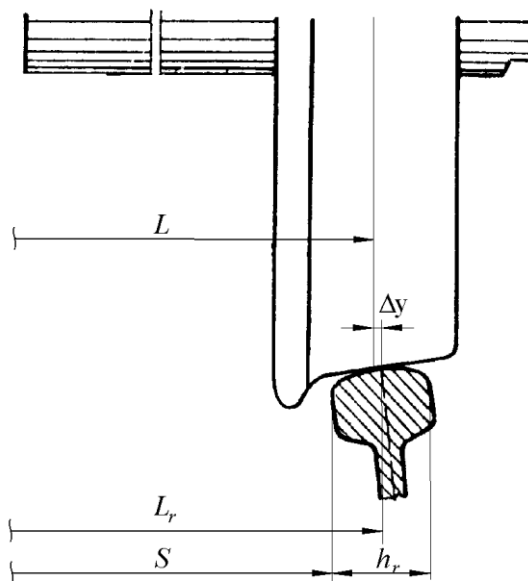


Рис. 8.75. К понятию уширения колеи в прямой

Другая формула для уширения, определяющего точное значение ширины колеи:

$$\Delta y = \frac{S + h_r - L}{2}$$

где  $S$  – ширина колеи,  $h_r$  – ширина головки рельса. Значение по умолчанию  $\Delta y = 0.003\text{м}$ .

Подуклонка  $\alpha_{r0}$  – угол между осью симметрии сечения рельса и вертикалью в идеальной прямой. Угол измеряется в радианах. Значение угла положительно, когда рельсы наклонены внутрь колеи. Значение по умолчанию  $\alpha_{r0} = 0.05$  рад.

### 8.3.1.2. Макрогеометрия кривой

В UM реализована возможность движения в правой, левой и S-образной кривых. На рис. 8.76 представлена S-образная кривая. Возможно также задание простой кривой, включающей две переходные кривые (вход и выход) и участок постоянного радиуса. Используются следующие обозначения:

- $L1$  – длина прямолинейного участка перед входом в кривую;
- $P11$  – длина первого переходного участка – заезда в кривую;
- $S1$  – длина кривой постоянного радиуса;
- $R1$  – радиус кривой;
- $H1$  – возвышение наружного рельса
- $P12$  – длина переходной кривой при выезде;
- $dy$  – дополнительное уширение колеи в кривой;
- $L2$  – длина прямолинейной вставки (для S-образной кривой).

Остальные параметры для S-образной кривой имеют аналогичное значение.

Переходные кривые заданы кубической параболой или клотоидой. Кривизна кривой на переходных участках изменяется примерно по линейному закону.

При наличии возвышения наружного рельса его подъем (опускание) на переходных кривых задается линейным законом. При задании макрогеометрии типа *Кривая* и *S-кривая* возвышение может быть задано поточечно (п. 8.5.2.4.2.2. "Тип пути: кривая", стр. 8-177). Возможно сглаживание стыков в начале и конце переходной кривой дугой окружности.

См. п. 8.5.2.4.2 *Выбор макрогеометрии пути (прямая, кривая, S-кривая, стрелочный перевод, из файла)*, стр. 8-176.

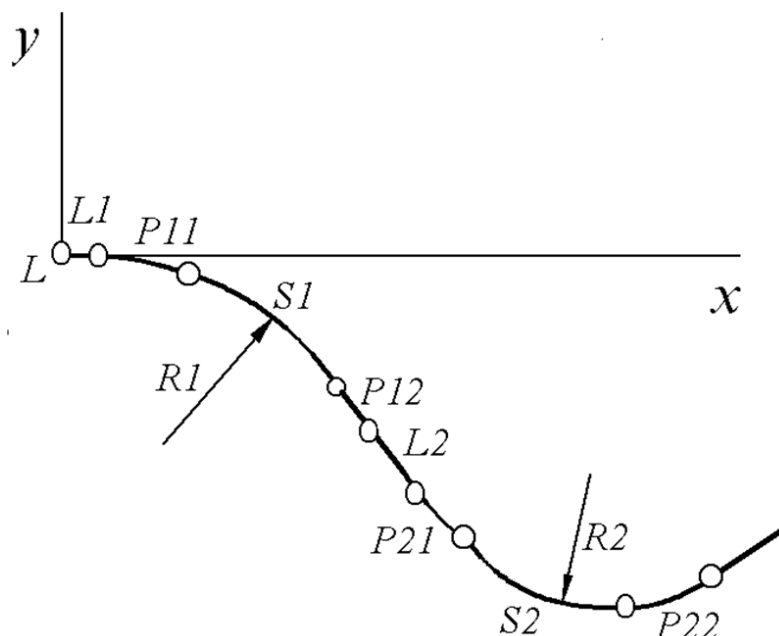


Рис. 8.76. Параметры кривой

**Замечание.** Для реализации движения в левой кривой следует задать малые значения параметров  $P11$ ,  $S1$ ,  $P12$ , нулевое значение возвышения  $H1$  и большое значение радиуса  $R1$ , например,  $P11=0.01$ ,  $S1=0.01$ ,  $P12=0.01$ ,  $R1=100000$ .

Дополнительное уширение  $du$  колеи учитывается для кривых с радиусом кривизны от 300 до 350 м – уширение  $du = 0.01$  м, при радиусе кривизны меньше 300 м – уширение  $du = 0.015$  м. Уширение реализовано за счет симметричного смещения обоих рельсов на половину уширения. На переходных участках уширение меняется по линейному закону.

Введем обозначения для переменных, используемых программой для расчета движения в кривых:

$X(s), Y(s)$  – уравнение кривой в осях  $X, Y$ ,  $s$  – дуговая координата;

$\psi_b(s)$  – угол между касательной к кривой и осью  $X$  в зависимости от натурального параметра (длины кривой);

$\rho(s)$  – зависимость радиуса кривизны пути от натуральной координаты;

$s_0$  – пройденный путь.

Рассмотрим пример расчета параметров S-образной кривой при следующих значениях параметров:

$L0=10m, p11=70m, s1=150m, R1=300m, p12=60m, h1=0.09m,$

$L=10m, p21=50m, s2=140m, R2=330m, p22=70m, h2=0.1m.$

Смысл параметров ясен из рис. 1.75,  $h1, h2$  – возвышения наружного рельса.

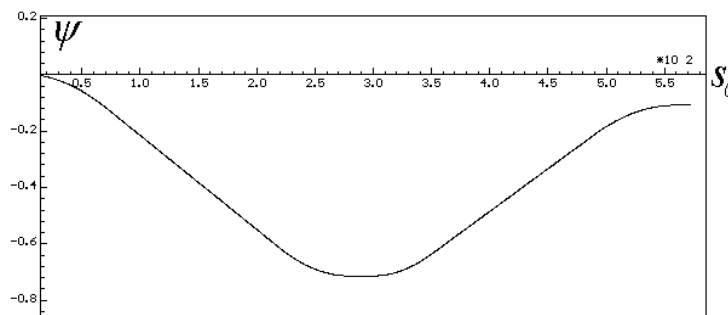


Рис. 8.77. Угол между рельсом и осью X

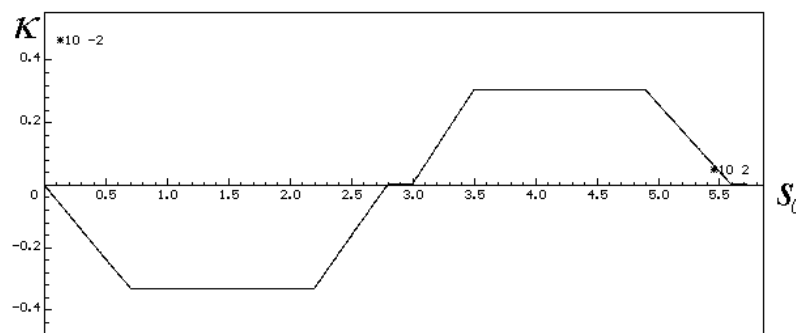


Рис. 8.78. Кривизна пути (S-образная кривая)

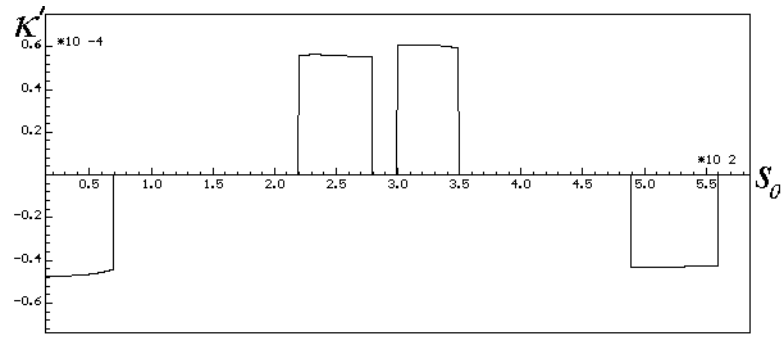


Рис. 8.79. Производная от кривизны (S-образная кривая)

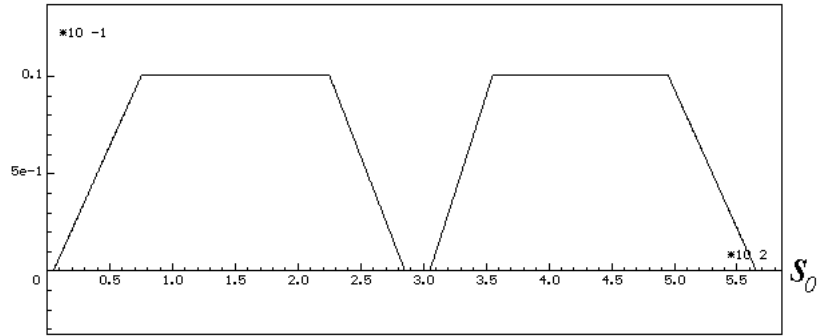


Рис. 8.80. Уширение колеи

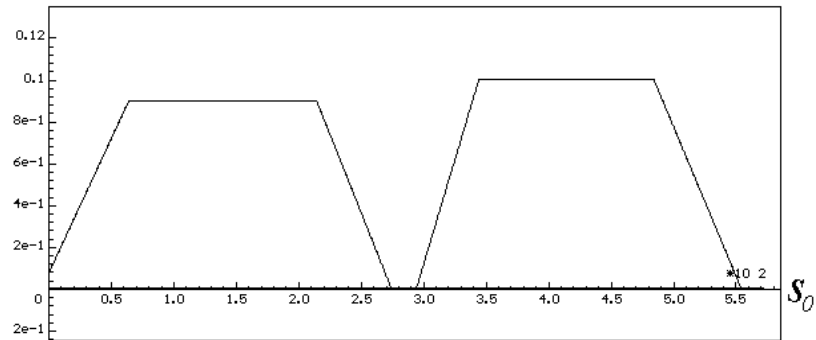


Рис. 8.81. Возвышение наружного рельса

8.3.1.3. Геометрия стрелочного перевода

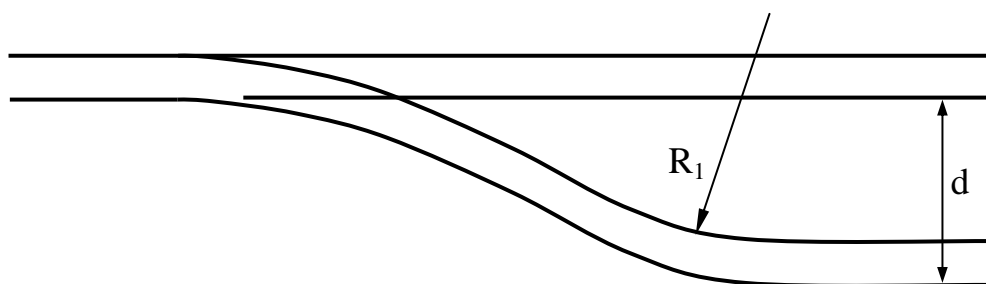
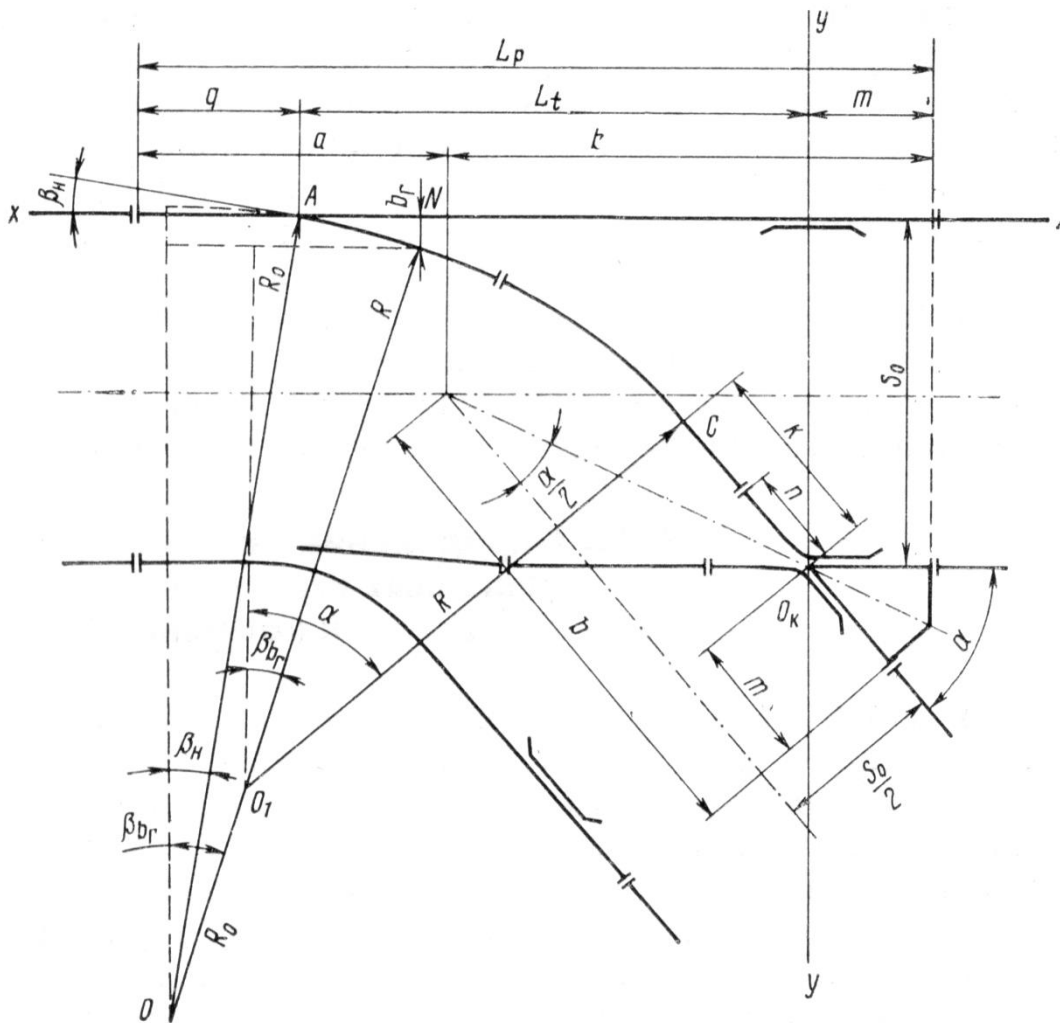


Рис. 8.82. Геометрические параметры стрелочного перевода

В УМ реализовано движение в обыкновенных стрелочных переводах (левых и правых) [3], основные геометрические параметры которых представлены на рис. 8.82. Для задания геометрии стрелочного перевода используются следующие параметры:

- $q$  – длина вылета рамного рельса;
- $\beta_i$  – начальный угол острья;
- $\alpha$  – угол крестовины (угол стрелочного перевода);

- $R_0$  – радиус кривизны остряка;
- $R$  – радиус стрелочного перевода;
- $br$  – ширина отвода для  $R_0$ ;
- $m$  – длина крестовины;
- $d$  – ширина междупутья.
- $R_1$  – радиус закрестовинной кривой.

Указанные параметры позволяют полностью определить геометрию стрелочного перевода и вычислить остальные параметры на рис. 8.82, в частности следующие:

- $L_p$  – полную длину стрелочного перевода;
- $L_t$  – теоретическую длину стрелочного перевода;
- $k$  – длину прямой вставки перед крестовиной.

В базу данных УМ входят параметры стрелочных переводов Р65 1/11 и Р65 1/9.

### 8.3.1.4. Система координат пути

Для каждого тела с номером  $i$  вводится система координат пути (СКП), начало  $W_i$  которой лежит на идеальной оси пути и является проекцией на эту ось центра масс тела. Ось абсцисс данной системы координат направлена по касательной к идеальной центральной линии пути, ось ординат – влево по ходу экипажа в плоскости рельсовых нитей.

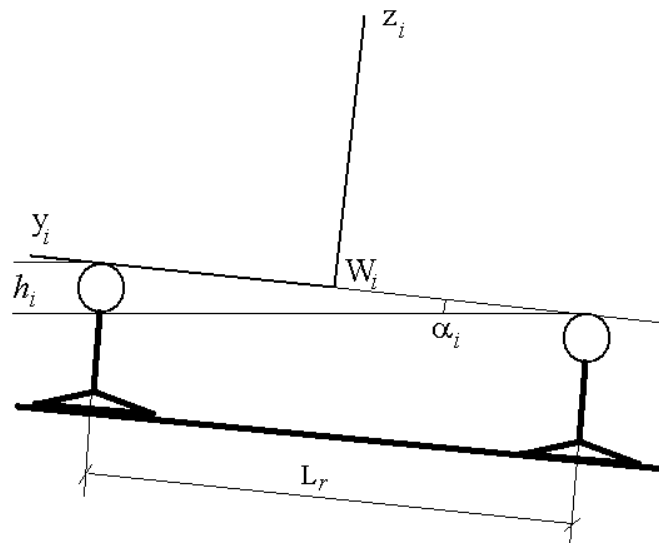


Рис. 8.83. Оси системы координат пути при наличии возвышения наружного рельса

Возвышение наружного рельса  $h_i$  позволяет определить угол  $\alpha_i$  поворота плоскости рельсовых нитей вокруг продольной оси за счет возвышения (рис. 8.83).

$$\alpha_i = \arcsin \frac{h_i}{L_r}$$

Система координат пути используется для расчета некоторых динамических характеристик, п. 8.5.3.1. "Особенности создания списка переменных", стр. 8-211.

### 8.3.1.5. Неровности рельсовых нитей

Вертикальные и горизонтальные неровности рельсовых нитей хранятся в файлах с расширением *way* и назначаются перед моделированием каждому из рельсов. Неровности в файле задаются с постоянным шагом 0.1 м.

При чрезмерном заужении колеи в случае неудачного задания горизонтальных неровностей, когда гребни обоих колес одной колесной пары приходят в контакт с рельсом, подается сообщение об ошибке и расчет динамики прерывается.

Пологие и длинные подъемы и спуски путевой структуры также моделируются неровностями.

Возможно также задание неровностей программным путем через файл управления, п. 8.5.1.2.2. "Программирование неровностей в файле управления", стр. 8-132.

**Замечание.** Чтобы избежать скачков сил при заезде на неровности, неровности из файла *обнуляются* на первых десяти метрах пути, и еще на следующих 20 происходит плавный "заезд на неровности" путем введения множителя линейно изменяющегося от 0 до 1. В качестве примера рассмотрим неровность постоянной высоты 1 мм. Реально при моделировании будет учитываться неровность, представленная на рис. 8.84. Замечание справедливо только для файловых неровностей и не относится к запрограммированным в файле управления.

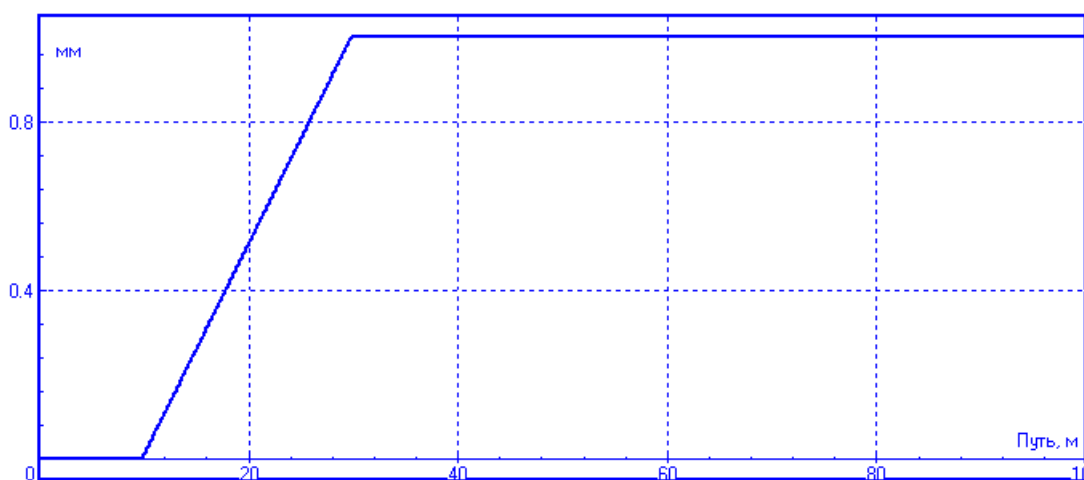


Рис. 8.84. Плавный заезд на неровность

### 8.3.2. Модели пути

В УМ реализованы три модели пути, различающиеся уровнем детализации описания путевой структуры:

- **Безмассовый рельс;**
- **Инерционный рельс;**
- **Упругий путь.**

В модели «**Безмассовый рельс**» рельс рассматривается как безмассовый элемент и, следовательно, относится не к телам, а к силовым элементам. Для рельса не вводятся свои обобщенные координаты, смещения рельса определяются в результате решения уравнений равновесия (п. 8.4.1.2.1. *"Методика расчета сил в контакте колесо-рельс"*, стр. 8-87). Модель «**Безмассовый рельс**» рекомендуется использовать в задачах исследования динамики экипажной части подвижного состава. Это связано со слабостью влияния, которое оказывает собственная динамика пути на результаты моделирования динамики рельсовых экипажей. Модель безмассового рельса используется как модель пути по умолчанию.

В модели «**Инерционный рельс**» рельсы моделируются как твердые тела под каждым колесом колесной пары, рис. 8.85. Тело-рельс имеет три степени свободы в системы координат пути (п. 8.3.1.4. *"Система координат пути"*, стр. 8-74) – две поступательные относительно поперечной (Y) и вертикальной (Z) осей, и одну вращательную относительно продольной оси (X). Подрельсовое основание моделируется специальной силой типа «сайлент-блок». Модель «**Инерционный рельс**» рекомендуется использовать для исследования сложных сценариев контакта «колесо-рельс», (эволюция профиля рельса в стрелочном переводе, конформный контакт), моделирования сходов, в задачах прогнозирования износа профилей колес и рельсов.

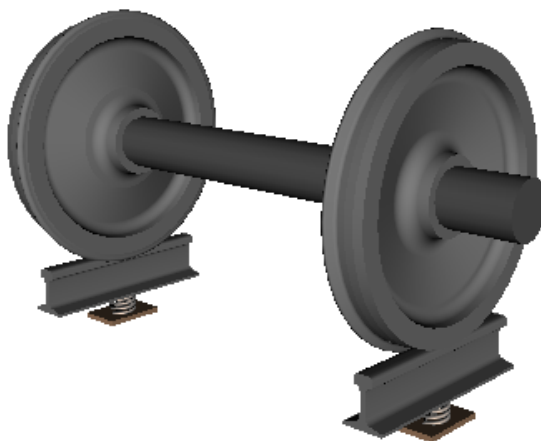


Рис. 8.85. Модель пути «**Инерционный рельс**»

Наличие тел-рельсов в модели рельсового экипажа регулируется флагом **Инерционный рельс** в настройках подсистемы **Колесная пара** в программе **UM Input** (п. 8.2.3.1. *"Добавление колесной пары"*, стр. 8-9).

Модель «**Упругий путь**» представляет собой детальную пространственную модель путевой структуры, включающую упругие рельсы, рельсошпальные скрепления, шпалы и

подшпальное основание. Для модели пути «Упругий путь» требуется модуль **UM Flexible Railway Track**. Основные сведения о работе с модулем **UM Flexible Track** приводятся в [Главе 27](#). Модель пути «Упругий путь» рекомендуется использовать для задач, в которых фокус исследования смещен на динамику пути и подрельсового основания.

Модели пути «Безмассовый рельс», «Инерционный рельс» и «Упругий путь» представляют собой последовательное усложнение подходов к описанию путевой структуры с одновременным увеличением требуемых вычислительных затрат. Можно дать следующие грубые оценки времени моделирования динамики экипажа на разных моделях пути. На модели «Инерционный рельс» моделирование будет в 2-3 раз медленнее, чем на модели «Безмассовый рельс», а на модели «Упругий путь» – в 50-80 раз медленнее.

Частотный диапазон для модели «Безмассовый рельс» составляет 0-20 Гц, тогда как модель «Инерционный рельс» позволяет моделировать процессы с частотами до 100 Гц, а модель «Упругий путь» – до 1000 Гц.

Модель рельсового экипажа может одновременно включать все вышеперечисленные модели пути. Модель пути выбирается на закладке **Колесо/Рельс | Путь | Модель и параметры**, рис. 8.86.

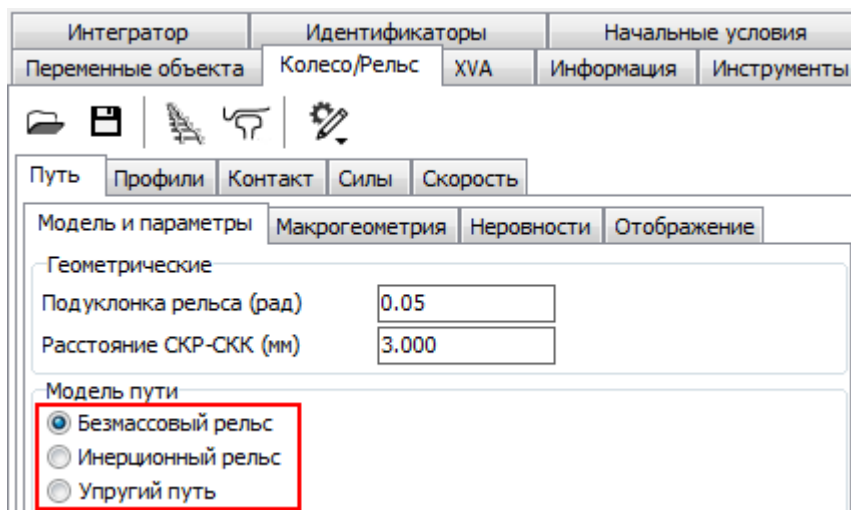


Рис. 8.86. Выбор модели пути

## 8.4. Контакт колесо-рельс

Расчет контакта колеса с рельсом на каждом шаге численного моделирования имеет три основных задачи:

1. расчет геометрии контакта, то есть определение положений точек контакта при заданном положении колесной пары;
2. расчет кинематических характеристик в точках контакта (величины крипов и спина);
3. определение нормальных и касательных сил взаимодействия колеса с рельсом по найденным геометрическим и кинематическим характеристикам.

Как будет показано ниже, данные задачи решаются не независимо, а в виде единой итерационной процедуры.

Значительная часть результатов, изложенных в данном разделе, получена совместно с В.С. Коссовым. При изложении данного раздела будем в основном следовать результатам и алгоритмам, представленным в диссертации В.С. Коссова<sup>5</sup>, внося некоторые уточнения, модификации и обобщения.

Основной метод расчета геометрии контактного взаимодействия колеса и рельса, рассмотренный в данном разделе, основан на учете точной геометрии кривых (профилей), являющихся сечениями колеса и рельса. Упрощенный метод, основанный на понятии эффективной коничности и эффективного значения параметра контактного угла, рассмотрен в п. 8.4.1.1.3. "*Упрощенный расчет геометрии контакта*", стр. 8-83.

Для повышения надежности и быстродействия расчета положения точки контакта реализованы две основные идеи. Во-первых, если профиль рельса не изменяется вдоль пути, то расчет координат точек контакта для заданных профилей выполняется однократно перед первым стартом процесса моделирования. Координаты точек контакта в зависимости от дискретного смещения профиля колеса относительно профиля рельса размещаются в массивах. При этом считается, что профиль колеса имеет две степени свободы относительно рельса: поворот вокруг продольной оси и поперечное смещение. В процессе моделирования движения значения координат (при текущем положении профиля колеса относительно рельса) вычисляются с помощью упомянутых предварительно рассчитанных массивов с использованием интерполяции. Это позволяет значительно уменьшить число арифметических операций и повысить быстродействие процесса.

Во-вторых, при поточечном задании профилей использование точных методов определения точки контакта (с вычислением производных от функций профилей и итераций ньютоновского типа) представляется проблематичным, поскольку выдвигаются слишком высокие требования к гладкости первой и второй производных. Поэтому ниже рассмотрена процедура, основанная на определении минимального расстояния между поточечно заданными плоскими кривыми. Данный подход зарекомендовал себя как высокоэффективный и надежный.

---

<sup>5</sup> Коссов В.С. Снижение нагруженности ходовых частей локомотивов и пути. Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н., Коломна, 2001.

### 8.4.1. Расчет контакта колеса с безмассовым рельсом

#### 8.4.1.1. Алгоритмы геометрического расчета контакта колесо-рельс

##### 8.4.1.1.1. Алгоритм определения минимального расстояния между профилями

Рассмотрим некоторое произвольное положение профилей колеса и рельса, рис. 8.87. Введем систему координат СКR0 связанную с рельсом. Ось  $Z_0$  направим вертикально вверх, а ось  $Y_0$  – к гребню колеса. Начало отсчета СКR0 расположим в центральной точке на поверхности рельса. Система координат профиля рельса СКR повернута на постоянный угол  $\alpha_r$  относительно СКR0 (подуклонка рельса), начала отсчета СКR0 и СКR совпадают. Положение системы координат профиля колеса СКW относительно СКR0 задано смещениями  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  и углом поворота  $\Delta\alpha$ . На рис. 8.87 углы и смещения показаны при положительных значениях. При расчетах значения углов будем считать малыми, линеаризуя соответствующим образом получаемые соотношения.

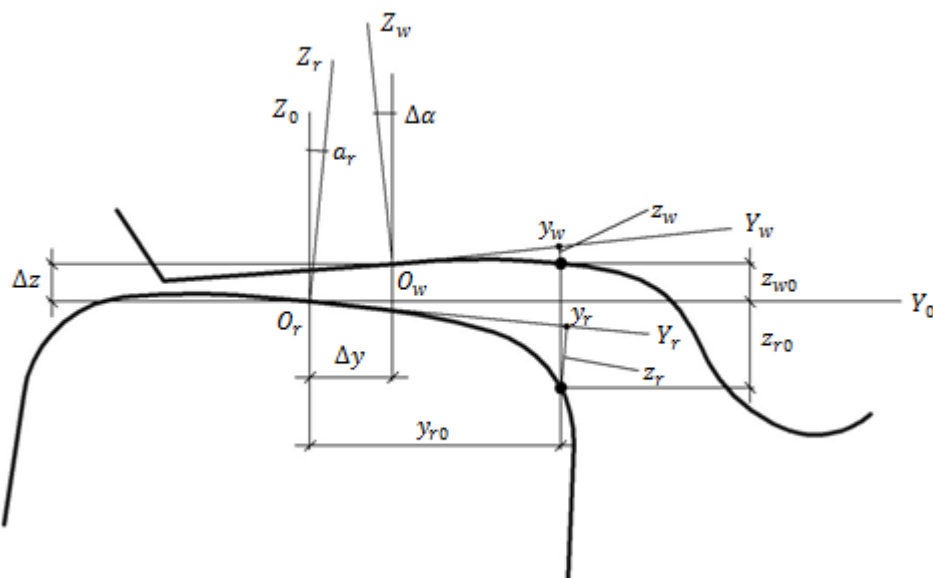


Рис. 8.87. Относительное положение профилей

Требуется определить координаты точек профилей, разность координат  $z$  которых относительно СКR0 минимальна (с учетом знака, то есть может быть отрицательной). На данном этапе игнорируется возможность «перекрытия» профилей, поскольку решение поставленной задачи не зависит от координаты  $\Delta z$ .

Сначала рассмотрим алгоритм расчета минимизируемой величины

$$\delta z = z_{w0} - z_{r0},$$

то есть разности координат  $z$  точек на профилях, имеющих одинаковые координаты  $y$  относительно СКR0. При этом *заданной* будем считать координату  $y_r$  точки на профиле рельса в СКR. Вычислим значения координат  $y_w$  и  $z_w$  соответствующей точки на профиле колеса, а также минимизируем величину  $\delta z$ .

Сначала определим координаты точки профиля рельса относительно СКR0

$$\begin{aligned} y_{r0} &= y_r + z_r(y_r)\alpha_r, \\ z_{r0} &= z_r(y_r) - y_r\alpha_r. \end{aligned}$$

Теперь следует определить координаты  $y_w$  и  $z_w$  точки профиля колеса, имеющей ту же координату  $y$  в СКR0, что и точка профиля рельса (обратите внимание, что  $y_w$  не равно  $y_{w0} = y_{r0} - \Delta y$ ). Справедливо нелинейное соотношение

$$y_{w0} = y_w - z_w(y_w)\Delta\alpha,$$

которое можно переписать следующим образом:

$$y_w = y_{w0} + z_w(y_w)\Delta\alpha.$$

Для решения данного нелинейного уравнения относительно неизвестной координаты  $y_w$  удобно использовать метод простых итераций

$$\begin{aligned} y_w^0 &= y_{r0} - \Delta y, \\ y_w^{i+1} &= y_{w0} + z_w(y_w^i)\Delta\alpha, \quad i = 0, 1, 2 \dots \end{aligned}$$

Как известно, прямая итерация сходится, если выполнено следующее условие:

$$\left| \frac{dz_w}{dy_w} \Delta\alpha \right| < 1.$$

Поскольку  $\Delta\alpha \ll 1$ , то для реальных профилей колеса это условие всегда выполняется.

Наконец, координата  $z_{w0}$  точки профиля колеса в СКR0 определяется выражением

$$z_{w0} = y_w\Delta\alpha + z_w(y_w) + \Delta z.$$

Таким образом, рассмотренный алгоритм позволяет по заданной точке на профиле рельса определить, во-первых, соответствующую точку на профиле колеса и, во-вторых, расстояние между ними (точнее, разность координат по вертикали). Основными преимуществами алгоритма являются его простота, надежность и независимость от гладкости задания профилей.

Определение *минимальной* разности координат  $\delta z_{\min}$  производится по следующему алгоритму. Последовательно рассматривая точки на профиле рельса с увеличением координаты  $y_r$  в СКR, для каждой определим величину  $\delta z$ . Сравнивая их, найдем минимальную. Для ускорения процесса счета определение минимальной разности координат проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется «грубое» определение координат, при этом точки на профиле рельса рассматриваются с достаточно большим шагом (например, 1 мм). Затем в малой окрестности найденной точки уточняется положение минимума с малым шагом (например, 0,1 мм).

#### 8.4.1.1.2. Расчет таблиц координат точек контакта

Как отмечалось выше, для ускорения процесса расчета контакта производится однократный предварительный расчет координат точек контакта для заданной пары профилей в зависимости от положения профиля колеса относительно профиля рельса. При рассмотрении рельса, как безмассового элемента, возможно два типа контакта – одноточечный и двухточечный, рис. 8.88.

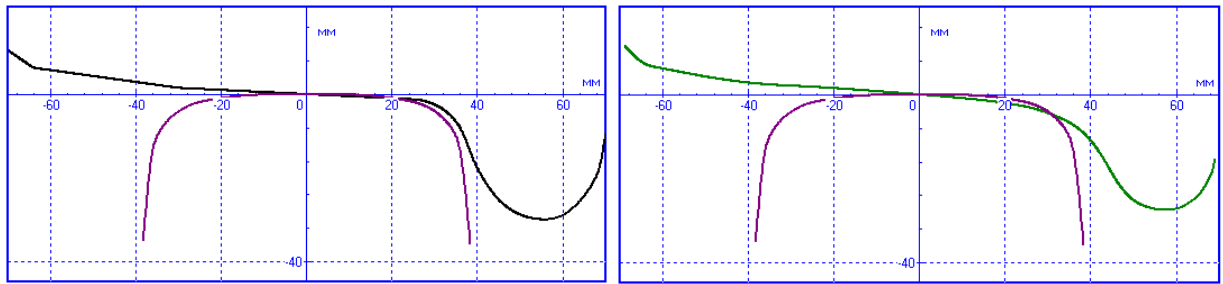


Рис. 8.88. Пары профилей, допускающих двухточечный контакт (слева) и только одноточечный контакт (справа)

При одноточечном контакте положение точки контакта зависит от двух координат: поперечного смещения  $\Delta y$  и угла поворота  $\Delta \alpha$ , а координаты точки контакта соответствуют точкам профилей с минимальной разностью координат в вертикальном направлении (п. 8.4.1.1.1. "Алгоритм определения минимального расстояния между профилями", стр. 8-79). Таким образом, рассчитываются таблицы координат точек контакта в СКР и СКВ для дискретного набора переменных  $\Delta y_i$ , и  $\Delta \alpha_j$ ,  $i = 1, 2 \dots N_y$ ,  $j = 1, 2 \dots N_\alpha$  с подходящим выбором области изменения переменных и шага дискретизации.



Рис. 8.89. Типы контактов пары профилей, допускающих двухточечный контакт: одноточечный контакт, двухточечный контакт и режим вкатывания

Поскольку в случае одноточечного контакта расчет координат производится на основании алгоритма, изложенного в предыдущем параграфе, остановимся на особенностях расчета биконтакта. Зафиксируем угол  $\Delta \alpha$ , зададим максимальное смещение  $\Delta y$  из реальной области изменения этого параметра (рис. 8.89, слева). Очевидно, что данному положению соответствует одноточечный контакт. Теперь, оставляя угол  $\Delta \alpha$  неизменным, будем уменьшать  $\Delta y$ , то есть смещать профиль колеса влево. При достижении некоторого критического значения  $\Delta y^*$  произойдет двухточечный контакт (если профили его допускают, рис. 8.89, в центре). При дальнейшем уменьшении  $\Delta y$  координаты точек контакта в соответствующих СК не изменяются, а происходит смещение рельса вместе с колесом в поперечном направлении. Режим биконтакта может нарушаться двумя способами. Во-первых, колесо может перейти в режим одноточечного контакта (рис. 8.89, слева). Во-вторых, если нормальная реакция в точке на круге катания становится равной нулю, то колесо переходит в режим вкатывания (рис. 8.89, справа). Это простое наблюдение и положено в основу алгоритма расчета геометрии двухточечного контакта. Перейдем к его изложению.

Зададим равномерную дискретизацию области реального изменения параметров  $\Delta \alpha$  и  $\Delta y$ . Теперь для каждого фиксированного значения  $\Delta \alpha_j$ ,  $j = 1, 2 \dots N_\alpha$  будем определять координаты точек контакта в соответствии с алгоритмом, описанным в п. 8.4.1.1.1. "Алгоритм определения минимального расстояния между профилями", стр. 8-79, рассматривая последовательно значения  $\Delta y_i$ ,  $i = N_y, N_y - 1 \dots 1$ , т.е. уменьшая смещение профиля

колеса. Если профили допускают двухточечный контакт, то для некоторого  $\Delta u_i$  положение расчетной точки контакта изменится скачкообразно, то есть внутри последнего интервала изменения  $\Delta u$  находится значение  $\Delta u^*$ , соответствующее двухточечному контакту. В качестве количественного критерия прохода через двухточечный контакт принято два условия:

$$y_{r,i} - y_{r,i-1} > \eta_y, \quad n_{r,y}/n_{r,z} > \eta_n,$$

где  $y_{r,i}, y_{r,i-1}$  – последовательные расчетные значения координат точки контакта на профиле рельса,  $n_{r,y}, n_{r,z}$  – проекции нормали к профилю рельса в последней расчетной точке контакта,  $\eta_y, \eta_n$  – эмпирически подобранные критериальные числа, например  $\eta_y = 20$  мм, и  $\eta_n = 0,5$ . Пользователь может изменить оба числа при моделировании, п. 8.5.2.7.3. "Настройки расчета геометрии контакта колеса с рельсом", стр. 8-210. Таким образом, двухточечный контакт считается обнаруженным, если координата точки контакта на рельсе изменила значение на достаточно большую величину, и нормаль значительно отклонилась от вертикали, что соответствует боковой поверхности рельса.

После обнаружения факта перехода через двухточечный контакт критическое значение  $\Delta u_j^*$  уточняется с шагом 0,1 мм.

Для моделирования процессов вкатывания колеса на рельс при наличии двухточечного контакта продолжается расчет положения точки контакта для значений  $\Delta u > \Delta u_j^*$ . Далее происходит переход к другому значению угла  $\Delta \alpha_j$  и процедура расчета повторяется.

Результатом расчетов являются таблицы значений координат точек контакта при различных значениях  $\Delta \alpha_j$  и  $\Delta u_i$ , а также критических значений смещения  $\Delta u_j^*$  для каждого  $\Delta \alpha_j$ .

Расчет геометрии двухточечного контакта предполагает также определение *забега* колеса  $x_c$ , т.е. отклонения точки контакта на гребне в продольном направлении при ненулевом значении угла набегания. Для вывода приближенного значения величины забега используем упрощенную геометрическую модель контакта гребня с боковой поверхностью рельса, представленную на рис. 8.90. Боковая поверхность рельса заменяется плоскостью, нормаль к которой соответствует нормали к поверхности в найденной точке контакта, гребень заменяется окружностью с радиусом, равным радиусу колеса в исследуемой точке контакта.

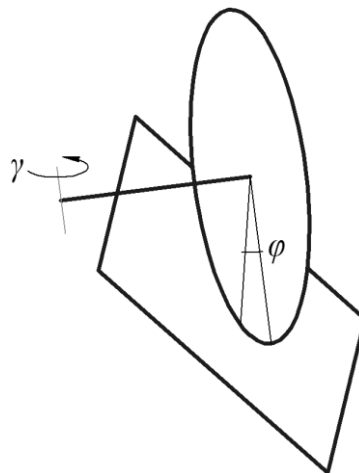


Рис. 8.90. Упрощенная модель гребневого контакта для расчета забега

Пусть  $\gamma$  – угол набегания колесной пары,  $\varphi$  – угол, определяющий положение точки контакта на гребне с учетом угла набегания. Значение угла  $\varphi$  найдем из условия ортогональности нормали к плоскости  $\mathbf{n} = (0 \quad -n_{ry} \quad n_{rz})^T$  и касательной к окружности в точке контакта. Вектор касательной задается в СК колесной пары выражением

$$\boldsymbol{\tau} = (r_w \cos \varphi \quad 0 \quad r_w \sin \varphi)^T$$

где  $r_w$  – радиус колеса в точке контакта.

Вводя матрицу направляющих косинусов

$$\mathbf{A}_{01} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

соответствующую повороту колесной пары на угол  $\gamma$ , получим условие ортогональности в виде

$$\mathbf{n}^T \mathbf{A}_{01} \boldsymbol{\tau} = 0$$

или, используя малость углов  $\gamma$  и  $\varphi$ ,

$$-n_{ry}\gamma + n_{rz}\varphi = 0$$

Поскольку в линейной постановке искомый забег может быть найден по формуле  $x_c = r_w\varphi$ , получим окончательное выражение

$$x_c = r_w n_{ry} / n_{rz}.$$

### 8.4.1.1.3. Упрощенный расчет геометрии контакта

В некоторых случаях необходимо исследовать на влияние динамику экипажа степени износа пары колесо/рельс, не привлекая точные кривые профилей, а основываясь на понятии **эффективной коничности** и **эффективного значения параметра угла контакта**. Остановимся сначала на определениях этих параметров.

#### 8.4.1.1.3.1. Эффективная коничность

При смещении колесной пары в поперечном направлении на величину  $y$  положение точки контакта на профилях колес изменяют свои положения, что приводит к изменению радиуса колес в точке контакта при заданных профилях колес и рельсов. Обозначим  $\Delta r_l(y)$ ,  $\Delta r_r(y)$  – приращения радиусов левого и правого колес. График зависимости от поперечного смещения величины  $\Delta r = \Delta r_l - \Delta r_r$ , имеющей на английском языке аббревиатуру RRD (rolling radius difference), используется для определения понятия эффективной коничности.

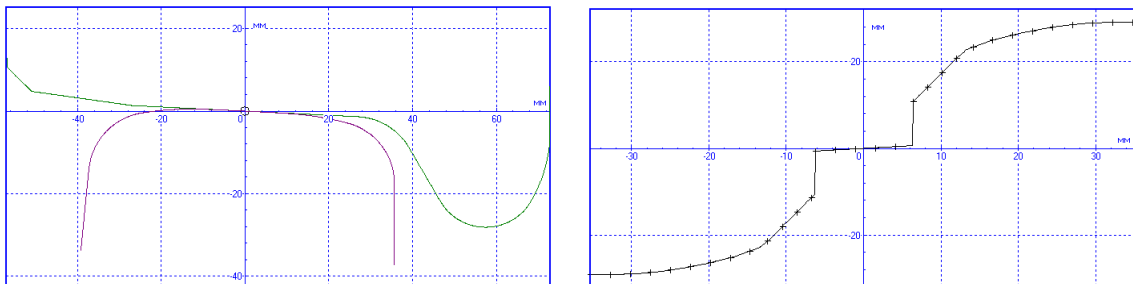


Рис. 8.91. Пара профилей Р65 и новое вагонное колесо (слева), график RRD (справа)

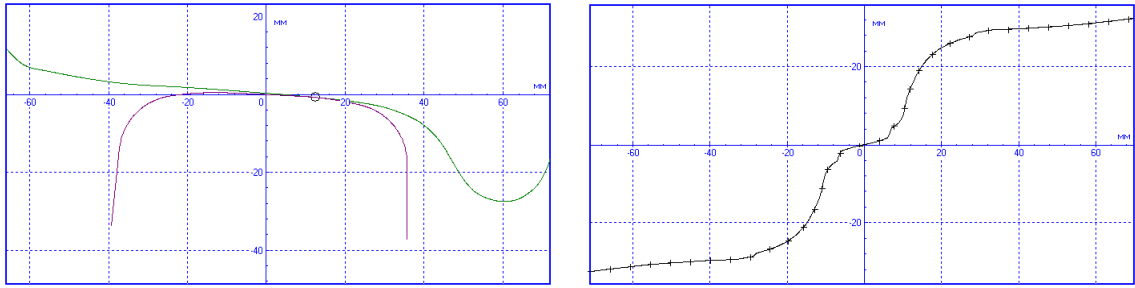


Рис. 8.92. Пара профилей Р65 и профиль колеса ДМетИ (слева), график RRD (справа)

Для неизношенной пары профилей рельса Р65 и вагонного колеса в области одноточечного контакта график RRD имеет вид прямой линии, тангенс угла которой равен удвоенной коничности профиля колеса  $\lambda = 1/20$ , рис. 8.91. Действительно, поскольку

$$r_l = r_0 + \lambda y, \quad r_r = r_0 - \lambda y,$$

то  $\Delta r = 2\lambda y$ .

Для криволинейного профиля рельса или для изношенных пар профилей зависимость RRD является нелинейной даже при малых смещениях колесной пары, рис. 8.92. В этом случае вводится понятие эффективной коничности  $\lambda$  как среднего значения на некотором заданном интервале смещения колесной пары  $\Delta y$ , рассчитываемого по формуле

$$\min_{\lambda} \int_0^{\Delta y} f(y)(\Delta r(y) - 2\lambda y)^2 dy, \tag{1}$$

$f(y)$  – плотность распределения вероятностей для величины поперечного смещения  $y$ .

Таким образом, эффективная коничность рассчитывается по методу наименьших квадратов в результате подбора прямой, наилучшим образом приближающей кривую RRD на интервале  $\Delta y$ . В качестве интервала  $\Delta y$  обычно принимается смещение колесной пары до выхода профиля на гребневой контакт. В настоящей версии УМ принят нормальный закон распределения величины поперечного смещения

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}.$$

В качестве стандартного отклонения по умолчанию принято значение  $\sigma = 2,5$  мм.

Вычисляя производную в формуле (1), получим значение эффективной коничности в следующем виде:

$$\lambda = \frac{\int_0^{\Delta y} y f(y) \Delta r(y) dy}{2 \int_0^{\Delta y} f(y) y^2 dy}.$$

### 8.4.1.1.3.2. Параметр угла контакта

Углом контакта называется угол  $\beta$  между нормалью к профилям в точке контакта и перпендикуляром к плоскости пути, совпадающим с вертикалью при движении в прямых участках пути, рис. 8.93.

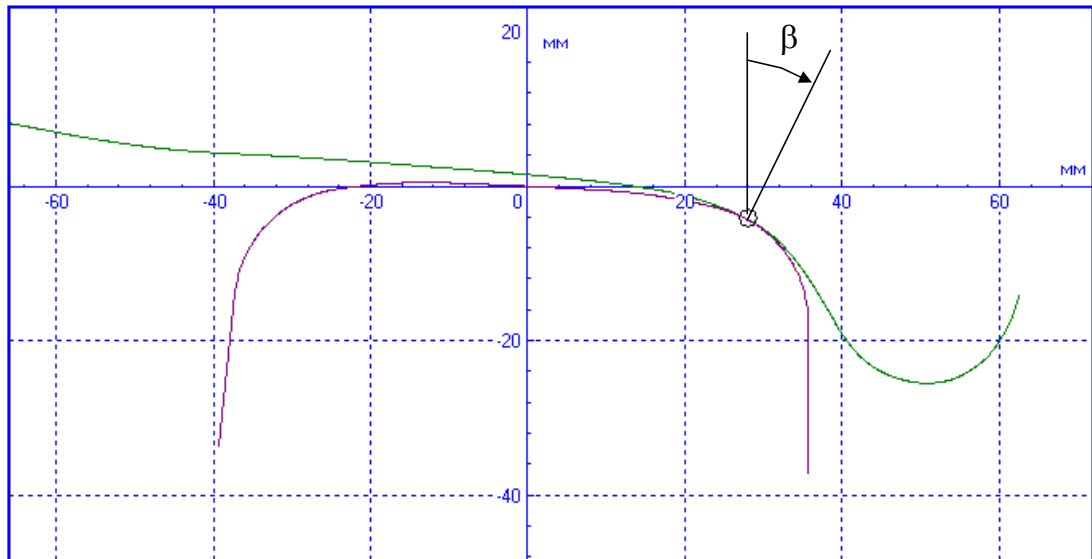


Рис. 8.93. Угол контакта

Введем обозначения  $\beta_l(y)$  и  $\beta_r(y)$  для зависимостей контактных углов левого и правого колеса соответственно в зависимости от поперечного смещения колесной пары. Считая левые и правые профили одинаковыми, получим  $\beta_l(0) = \beta_r(0) = \beta_0$  – значение контактного угла при несмещенном положении колесной пары.

Зависимость от поперечного смещения величины

$$E(y) = \frac{\beta_l(y) - \beta_r(y) S}{2} \frac{S}{2}$$

используется при определении параметра угла контакта. Здесь  $S$  – расстояние между кругами катания колесной пары.

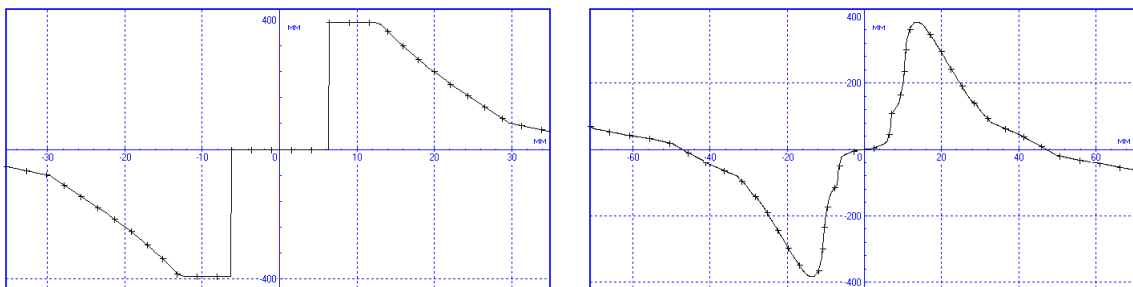


Рис. 8.94. Зависимости  $E(y)$  для пар профилей, приведенных на рис. 8.91 и рис. 8.92

Параметр контактного угла  $\varepsilon$  используется для линейного приближения функции  $E(y)$  на интервале  $\Delta y$  поперечного смещения колесной пары

$$E(y) = \frac{\beta_l(y) - \beta_r(y) S}{2} \frac{S}{2} \approx \varepsilon y.$$

Для определения этого параметра используется формула, которая получается аналогично расчетной зависимости для эффективной коничности

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\Delta y} y f(y) E(y) dy}{2 \int_0^{\Delta y} f(y) y^2 dy}.$$

### 8.4.1.1.3.3. Упрощенная геометрия контакта

При использовании упрощенного подхода к заданию геометрии профилей с помощью эквивалентной коничности и параметра угла контакта используются следующие приближенные зависимости для определения радиусов колес в точке контакта и углов контакта в зависимости от поперечных смещений колес относительно рельсов:

$$\begin{aligned}r_l &= r_0 + \lambda y_l, & r_r &= r_0 - \lambda y_r, \\ \beta_l &= \beta_0 + \frac{2\varepsilon y_l}{S/2}, & \beta_r &= \beta_0 - \frac{2\varepsilon y_r}{S/2}.\end{aligned}$$

Здесь  $y_l$  и  $y_r$  – смещения левого и правого колес относительно рельсов. Данные смещения являются различными в силу упругого поперечного отжатия рельсов.

При смещении колеса относительно рельса на величину, большую некоторого заданного значения  $y^*$ , возникает двухточечный контакт. Положение точки контакта на боковой поверхности рельса задается координатами контактной точки в СК рельса ( $y_r^*$ ,  $z_r^*$ ) и значением угла контакта  $\beta^*$ . При этом забег точки контакта рассчитывается по приближенной методике, описанной в п. 8.4.1.1.2. *"Расчет таблиц координат точек контакта"*, стр. 8-80.

### 8.4.1.2. Расчет сил в контакте колесо-рельс

#### 8.4.1.2.1. Методика расчета сил в контакте колесо-рельс

Модель рельса как безмассового элемента основана на следующих допущениях:

- деформации рельса под действием разных колесных пар не влияют друг на друга и могут рассчитываться независимо;
- деформации левой и правой рельсовых нитей не зависят друг от друга;
- деформация рельса задается двумя независимыми координатами, определяющими его отжатие параллельно оси Y СК пути  $\Delta y_r$  и вертикальную деформацию параллельно оси Z СК пути  $\Delta z_r$  (рис. 8.95);
- при вертикальной деформации и поперечном отжатии рельса возникают линейные упруго-диссипативные силы, причем диссипативная составляющая для поперечной силы рассчитывается только в режиме биконтакта.

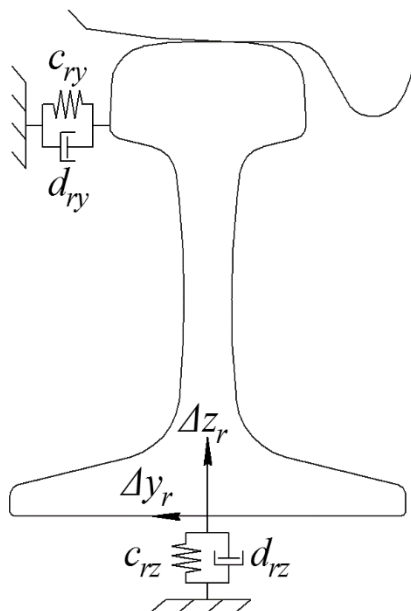


Рис. 8.95. Рельс как безынерционный упруго-диссипативный силовой элемент

Силы, действующие на рельс вследствие деформаций, определяются линейными соотношениями

$$\begin{aligned} R_y &= -c_{ry}\Delta y_r - d_{ry}\Delta \dot{y}_r, \\ R_z &= -c_{rz}\Delta z_r - d_{rz}\Delta \dot{z}_r, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $c_{ry}, c_{rz}, d_{ry}, d_{rz}$  – коэффициенты жесткости и демпфирования рельса в поперечном и вертикальном направлениях соответственно.

Поскольку рельс считается безмассовым элементом, то данные силы совместно с контактными силами, действующими на рельс со стороны колеса, должны образовывать уравновешенную систему сил. Силы, действующие в точках контакта на колесо в случае одноточечного и двухточечного контакта, показаны на рис. 8.96.

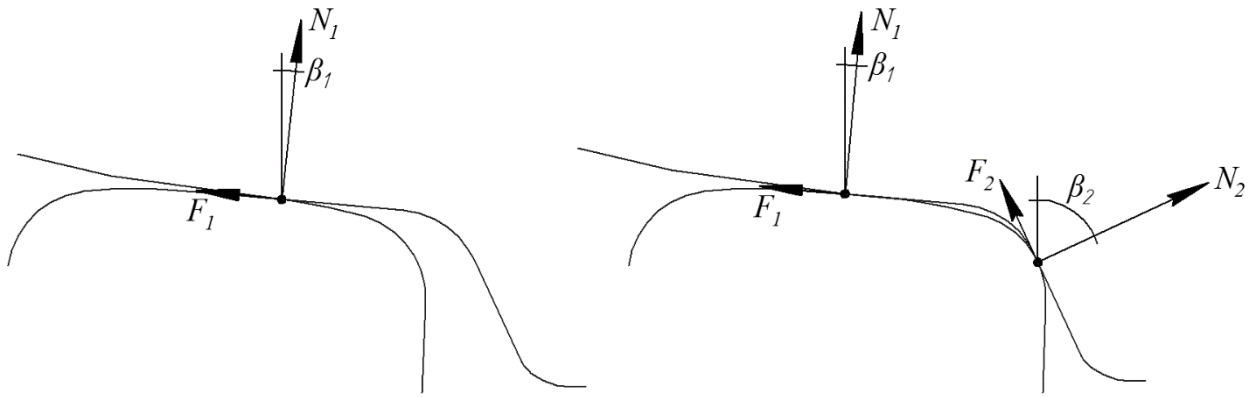


Рис. 8.96. Силы, действующие на колесо при однотоочечном и двухточечном контакте. Не указаны силы, действующие в продольном направлении.

Уравнения равновесия системы сил, действующих на рельс, в случае однотоочечного контакта в проекциях на оси СК пути имеют вид

$$\begin{aligned} R_y - F_1 \cos \beta_1 + N_1 \sin \beta_1 &= 0, \\ R_z - N_1 \cos \beta_1 - F_1 \sin \beta_1 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для двухточечного контакта получим аналогичные уравнения

$$\begin{aligned} R_y - F_1 \cos \beta_1 + N_1 \sin \beta_1 - F_2 \cos \beta_2 + N_2 \sin \beta_2 &= 0, \\ R_z - N_1 \cos \beta_1 - F_1 \sin \beta_1 - N_2 \cos \beta_2 - F_2 \sin \beta_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (3)-(4)  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – углы между нормальными к точкам контакта и вертикальной осью СК пути.

Уравнения (3) в случае однотоочечного контакта и (4) в случае двухточечного контакта представляют собой сложную систему нелинейных уравнений относительно неизвестных деформаций рельса и нормальных сил реакций в точках контакта.

Рассмотрим основные идеи алгоритма их решения, не останавливаясь на тонкостях программной реализации.

1. Расчеты контактного взаимодействия производятся при известных положениях колесной пары и в известные моменты времени. Поскольку смещение рельса за счет горизонтальных и вертикальных неровностей, уширение колеи и возвышение в каждый конкретный момент времени известны, то неизвестны только переменные  $\Delta y_r$  и  $\Delta z_r$ , определяющие деформацию рельса, и их производные по времени. Заметим, что вертикальная деформация  $\Delta z_r$  не является независимой, поскольку при известном значении  $\Delta y_r$  эта величина определяется из геометрических условий контакта – координаты  $z$  точки контакта колеса и рельса должны совпадать, поэтому величина  $\delta z$  (см. п. 8.4.1.1.1. "Алгоритм определения минимального расстояния между профилями", стр. 8-79), определяет вертикальную деформацию.
2. Расчет нормальных и касательных сил имеет итерационный характер, причем итерации включают два цикла: внешний и внутренний. Внутренний итерационный цикл предназначен для решения нелинейных уравнений равновесия рельса при известных значениях касательных сил. Внешний итерационный цикл используется для уточнения значения касательных сил. В качестве нулевого приближения во внутреннем цикле используются значения касательных сил, рассчитанных на предыдущем шаге инте-

гирования уравнений движения. Таким образом, расчет контакта выглядит следующим образом: включается внутренний итерационный цикл для определения неизвестных нормальных реакций и поперечного отжатия рельса, значения касательных сил берутся с предыдущего шага. Рассчитываются новые значения касательных сил, и при их отличии от предыдущих больше заданного допуска, включается внешняя итерация, то есть решение уравнений равновесия производится с новыми значениями касательных сил.

Рассмотрим некоторые особенности реализации внутренних итераций.

3. Поперечное отжатие рельса  $\Delta y_r$  раскладываем на две составляющие:
4.  $\Delta y_r = \Delta y_{r1} + \Delta y_{r2}$
5. Первая составляющая соответствует отжатию рельса силами контакта в первой точке, вторая отличная от нуля только при биконтакте и является результатом действия сил  $N_2$  и  $F_2$ .
6. В качестве нулевого приближения для неизвестной  $\Delta y_{r1}$  при итерационном решении уравнений контакта используются ее значение на предыдущем шаге интегрирования. В процессе итераций это значение уточняется.
7. На каждой итерации решения системы уравнений выполняются следующие действия:
  - По известному положению колесной пары и смещению рельса относительно СК пути за счет отжатия, неровностей и некоторых других факторов (например, уширения колеи в кривой) определяется смещение профиля колеса относительно профиля рельса ( $\Delta u$  и  $\Delta \alpha$ ), по этим значениям интерполируются координаты точек контакта по заранее рассчитанным таблицам. Определяются также: тип контакта (одноточечный или двухточечный), вертикальная деформация рельса  $\Delta z_r$ , угол  $\beta_1$ , (для двухточечного контакта – дополнительно  $\beta_2$ ). При двухточечном контакте геометрически определяется составляющая поперечного отжатия рельса  $\Delta y_{r2}$ .
  - Вычисляются силы  $R_y$  и  $R_z$  по формуле (3).
  - Для одноточечного контакта вычисляется нормальная реакция  $N_1$  из второго уравнения системы (3); для двухточечного контакта –  $N_1$  и  $N_2$  в результате решения системы уравнений (5).
8. Рассчитывается и сохраняется для использования на следующем шаге интегрирования новое значение деформации  $\Delta y_{r1}$ .

### 8.4.1.2.2. Алгоритмы расчета сил крипа

Модели касательных сил в контакте колесо-рельс (сил крипа) основаны на нелинейных зависимостях вида

$$F_x = F_x(N, \xi_x, \xi_y, \varphi, f, p), \quad F_y = F_x(N, \xi_x, \xi_y, \varphi, f, p).$$

Здесь введены следующие обозначения (см. также рис. 8.97):

$F_x, F_y$  – продольная и поперечная силы крипа;

$N$  – нормальная реакция в точке контакта;

$\xi_x, \xi_y$  – продольная и поперечная составляющие жесткого скольжения;

$\varphi$  – спин;

$f$  – коэффициент трения в точке контакта;

$p$  – набор геометрических параметров, характеризующих профили колеса и рельса в точке контакта (например, для алгоритма *FASTSIM* – радиусы кривизны поверхностей).

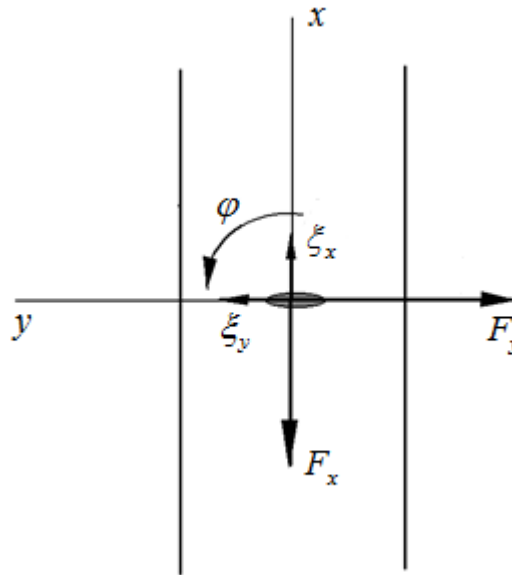


Рис. 8.97. Крипы, спин и силы крипа

Крипы и спин рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\xi_x = v_x/v_0, \quad \xi_y = v_y/v_0, \quad \varphi = \omega_n/v_0,$$

где  $v_x, v_y$  – соответствующие компоненты скорости точки колеса в точке контакта относительно рельса,  $v_0$  – скорость продольного движения колесной пары,  $\omega_n$  – проекция абсолютной угловой скорости колесной пары на нормаль к касательной плоскости в точке контакта.

**Замечание.** Для реализации движения с малыми скоростями, вплоть до нулевого значения начальной скорости, при  $v_0 < v_0^* = 0.1$  м/с применяются следующие формулы для вычисления крипа и спина:

$$\xi_x = v_x/v_0^*, \quad \xi_y = v_y/v_0^*, \quad \varphi = \omega_n/v_0^*$$

Параметр  $v_0^*$  называется **критической скоростью для расчета** крипа и может быть изменен пользователем, п. 8.5.2.5 *Параметры контактного взаимодействия колеса с рельсом*

Для модели контакта колеса с безмассовым рельсом реализованы следующие алгоритмы расчета сил крипа: *Метод Мюллера*, *Метод Минова*, *FASTSIM*, *FASTSIM\_A*.

#### 8.4.1.2.2.1. Метод Мюллера

В методе Мюллера силы крипа вычисляются по следующим зависимостям [4]:

$$F_{xy} = \frac{1000k_c}{\sqrt[m]{1 + \left(\frac{k_c \xi}{fP}\right)^m}}$$

$$\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}, \quad P = 0,001N, \quad k_c = (235 - (2,4 - 0,01P)P)P$$

$$F_x = -\xi_x F_{xy}, \quad F_y = -\xi_y F_{xy}.$$

Рекомендуемые значения параметра m: 3, 4.

При использовании данной модели силы крипа на гребне при двухточечном контакте рассчитываются как силы трения скольжения. Преимущество алгоритма состоит в его простоте и высокой вычислительной скорости. Недостаток – отсутствие учета спина и геометрических характеристик поверхностей в точке контакта.

**Замечание.** Метод Мюллера используется также для расчета сил крипа при упрощенном задании профилей с помощью эквивалентной коничности и параметра угла контакта (см. п. 8.4.1.1.3.3. "*Упрощенная геометрия контакта*", стр. 8-86).

#### 8.4.1.2.2.2. Метод Минова

Данный метод применяется при расчете сил крипа локомотива на основе экспериментальной зависимости между скоростью проскальзывания и силой сцепления колесных пар, полученной в эксплуатационных условиях [5]. Для экспериментальной кривой Д.К. Миновым построена аналитическая аппроксимация. Кривая сцепления локомотива (рис. 8.98) аппроксимируется тремя участками, [5], [6] [7]:

1.  $0 \leq |\xi| \leq 0,0014$  – участок упругого пропорционального проскальзывания

$$k = 359,61178|\xi|$$

2.  $0,0014 \leq |\xi| \leq 0,025$  – участок упругого проскальзывания

$$k = \frac{350|\xi| - 0,155}{0,195 + 336|\xi|}$$

3.  $|\xi| > 0,025$  – участок избыточного скольжения (буксования или юза)

$$k = \frac{1}{1 - \chi v_0(0,025 - |\xi|)},$$

где  $k$  – отношение силы сцепления (крипа) к ее предельному значению для заданного состояния рельсов;  $v_0$  – скорость продольного движения колесной пары, м/с;  $\chi$  – жесткость третьего (падающего) участка характеристики сцепления (табл. 8.2), с/м;

Таблица 8.2

**Зависимость жесткости  $\chi$  от скорости продольного движения колесной пары  $v_0$**

$v_0$ , км/ч	0-5	5-20	20-40	140-120
$\chi$	0,9	0,6	0,5	0,35

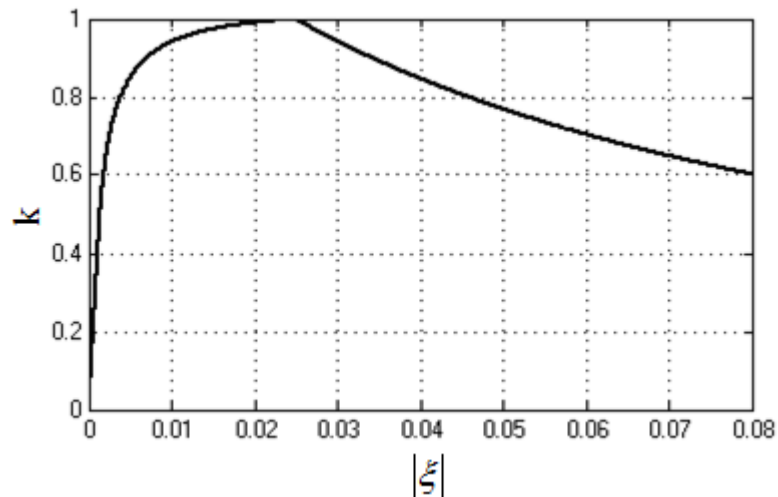


Рис. 8.98. Кривая сцепления в методе Минова

Силы крива рассчитываются по формулам:

$$F_{xy} = f \cdot N \cdot k(|\xi|),$$

$$\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2},$$

$$F_x = -F_{xy} \frac{\xi_x}{\xi}, \quad F_y = -F_{xy} \frac{\xi_y}{\xi}.$$

Силы крива на гребне при двухточечном контакте рассчитываются как силы трения скольжения.

Метод Минова позволяет рассчитывать силы крива для локомотивов в режиме тяги (торможения) и моделировать электромеханические процессы при срыве сцепления. Преимущество алгоритма в его простоте и высокой скорости вычислений.

**8.4.1.2.2.3. FASTSIM**

Алгоритм *FASTSIM*, основанный на линейной теории сил крива Калкера [8], де-факто стал стандартом расчета сил крива в контакте колесо-рельс в современных пакетах моделирования динамики рельсовых экипажей.

Исходными данными для алгоритма *FASTSIM* являются следующие параметры и переменные.

- **Свойства материала колеса и рельса**, которые предполагаются одинаковыми (модуль упругости и коэффициент Пуассона) – задаются пользователем;
- **Главные кривизны поверхностей в точке контакта** – рассчитываются программой в процессе моделирования динамики;

- **Значение нормальной реакции  $N$**  в контакте – рассчитывается программой в процессе моделирования динамики;
- **Полуоси эллиптического пятна контакта** – рассчитывается программой по теории Герца в процессе моделирования динамики;
- **Значения продольного и поперечного крипов  $\xi_x, \xi_y$  и спина  $\varphi$**  – рассчитывается программой в процессе моделирования динамики;
- **Коэффициент трения в точке контакта** – рассчитывается программой в процессе моделирования динамики по заданным пользователем параметрам.

С использованием этих данных алгоритм *FASTSIM* решает систему дифференциальных уравнений относительно касательных напряжений. С этой целью пятно контакта разбивается на узкие полосы одинаковой ширины и каждая из полос разбивается на одинаковое число элементов, имеющих в пределах отдельной полосы одинаковые размеры, рис. 8.99. Число полос  $m$  и элементов  $n$  задается пользователем. При этом разбивка полосы на элементы, фактически, представляет собой шаг численного решения дифференциальных уравнений относительно касательных напряжений. Таким образом, процедура требует порядка  $m \times n$  операций, и быстродействие процесса моделирования замедляется при увеличении числа элементов в пятне контакта.



Рис. 8.99. Дискретизация пятна контакта на элементы

#### 8.4.1.2.2.4. FASTSIM\_A

*FASTSIM\_A* (*FASTSIM-Analytic*) это полуаналитическая модификация классического алгоритма *FASTSIM*. Для дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений относительно касательных напряжений в пятне контакта, лежащих в основе алгоритма *FASTSIM*, в пределах отдельной полосы разбивки пятна контакта удалось получить точное решение для участка сцепления и приближенное – для участка скольжения. Найденное решение реализовано в УМ в виде алгоритма *FASTSIM\_A*. Эта процедура имеет число операций пропорциональное числу полос  $m$ . При  $m = 10$  она примерно в два раза быстрее, чем *FASTSIM*, и выигрыш в быстродействии возрастает при увеличении числа элементов в полосе. *FASTSIM\_A* дает очень близкие к *FASTSIM* результаты расчета сил крипа при сравнительно небольших значениях спина ( $\varphi < 0,5$ ) [9].

### 8.4.2. Расчет контакта колеса с инерционным рельсом

При контакте колеса с рельсом, представленным инерционным элементом (твердым телом или упругой балкой), допускается жесткое взаимопроникновение профилей колеса и рельса, при этом количество контактных точек формально неограниченно. Форму и размер пятен контакта определяет функция расстояния между недеформированными профилями.

Для определения границ областей пересечения профилей используется модификация алгоритма, изложенного в п. 8.4.1.1.1. "Алгоритм определения минимального расстояния между профилями", стр. 8-79. Очевидно, что граница области пересечения обнаружена, если величина  $\delta z$  изменила знак.

Координаты контактных точек в СК профилей определяются из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_w \times \mathbf{n}_r = 0, \\ \mathbf{n}_r \times \mathbf{d} = 0, \end{cases}$$

где  $\mathbf{n}_w$  и  $\mathbf{n}_r$  – нормали к профилям колеса и рельса в СКR0,  $\mathbf{d} = \mathbf{r}_{p_r^c} - \mathbf{r}_{p_w^c}$ , рис. 8.100.

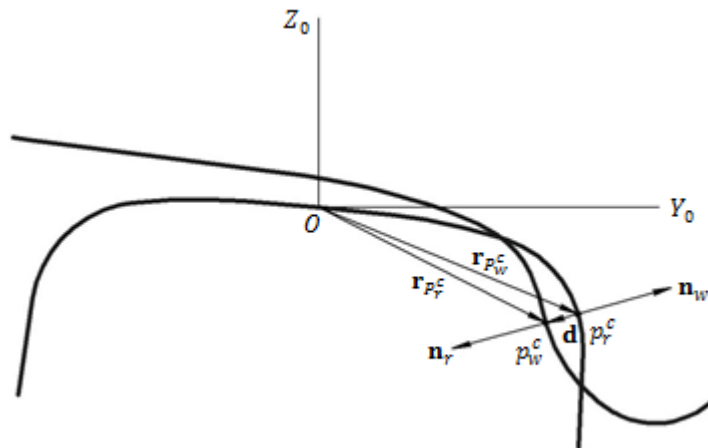


Рис. 8.100. Определение точек контакта

Приведенная система векторных уравнений определяет пару точек соответствующих максимальному взаимопроникновению профилей колеса и рельса. Первое уравнение системы задает условие коллинеарности нормалей к профилям в искомым точках, второе – условие коллинеарности одной из нормалей к радиус-вектору, соединяющему искомые точки. Система векторных уравнений образует систему двух нелинейных алгебраических уравнений относительно  $y_r$  и  $y_w$ . Хорошим начальным приближением при решении получившейся системы методом Ньютона-Рафсона является пара точек, удовлетворяющая условию минимума функции  $\delta z$  в рассматриваемой области пересечения профилей. Если гладкость задания профилей не обеспечивает сходимость метода Ньютона-Рафсона, то контактные точки отыскиваются простым перебором точек в потенциальной области контакта.

Определение границ областей пересечения профилей и поиск точек с максимальным проникновением является весьма ресурсоемким (до 60% процессорного времени). Но если профиль рельса не изменяется вдоль пути, то расчет координат потенциальных точек кон-

такта можно сделать однократно перед стартом процесса интегрирования. Координаты потенциальных точек контакта в зависимости от дискретного смещения профиля колеса относительно профиля рельса записываются в таблицы. При этом полагается, что профиль колеса относительно профиля рельса имеет две степени свободы – поворот относительно продольной оси и поперечное смещение. Потенциальными точками контакта считаются точки, в которых величина  $\delta z$  имеет минимум, рис. 8.101. В процессе моделирования для текущего положения профилей потенциальные точки контакта вычисляются по рассчитанным таблицам с использованием интерполяции, проверяются и уточняются.

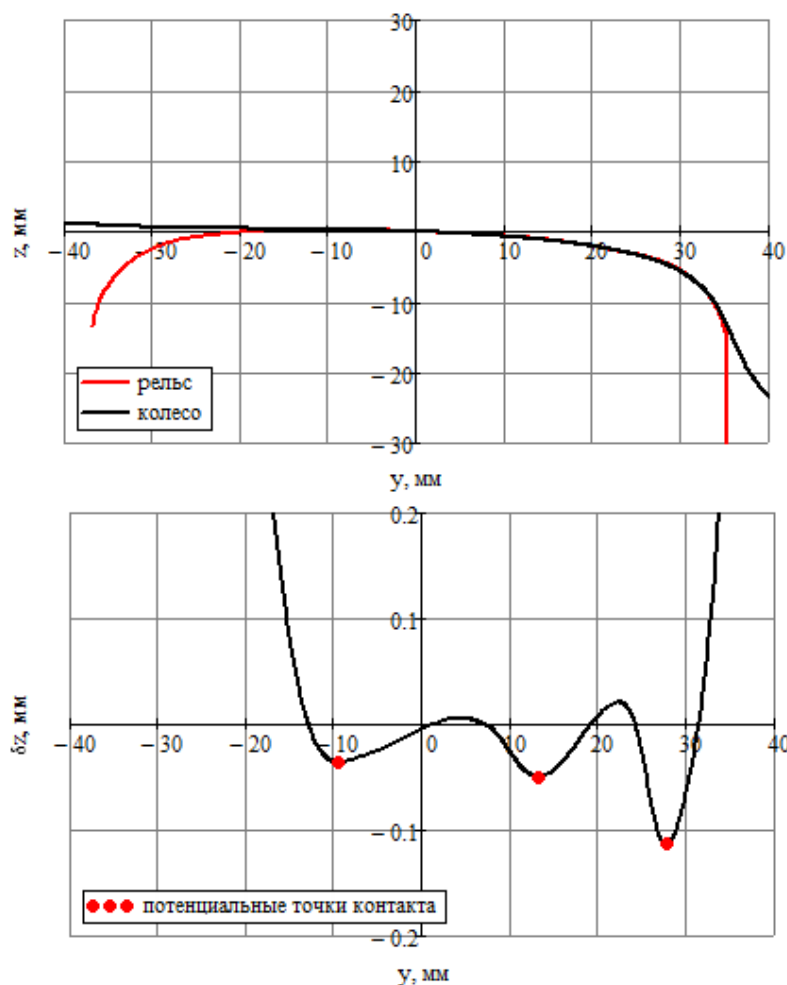


Рис. 8.101. Относительное положение профилей и функция  $\delta z$

После нахождения контактных точек для каждой потенциальной области контакта вводится локальная система координат пятна контакта (СКК). Начало СКК находится в контактной точке на профиле рельса, ось  $Z$  направлена по общей нормали к профилям, ось  $Y$  – по касательной. В СКК определяется функция расстояния между недеформированными профилями, рис. 8.102.

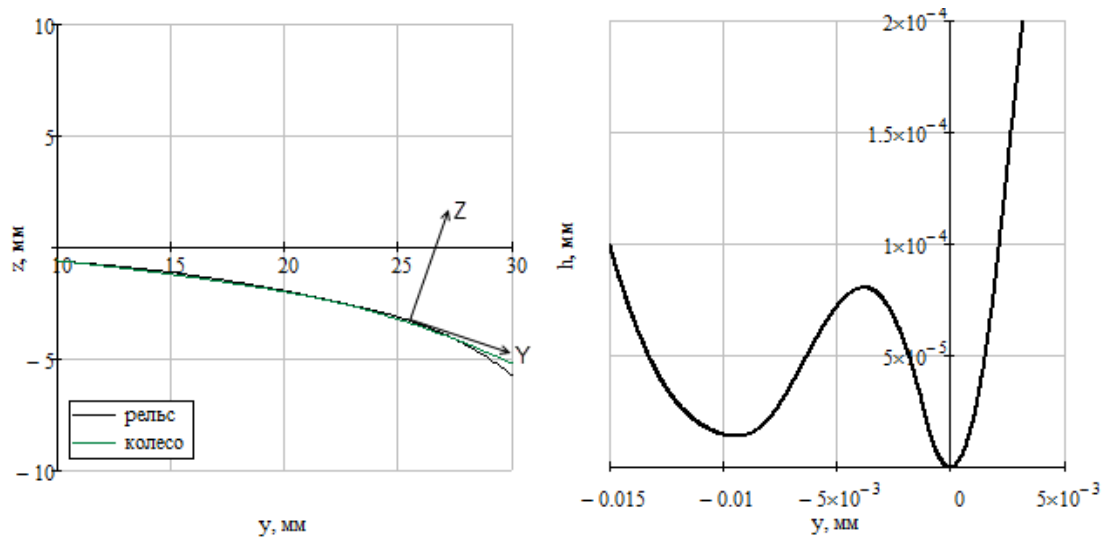


Рис. 8.102. Локальная система координат пятна контакта (слева) и функция расстояния между недеформированными профилями (справа)

Крипы и спин рассчитываются по следующим формулам:

$$\xi_x = \frac{(\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_r)\boldsymbol{\tau}_1}{v_0}, \quad \xi_y = \frac{(\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_r)\boldsymbol{\tau}_2}{v_0}, \quad \varphi = \frac{(\boldsymbol{\omega}_w - \boldsymbol{\omega}_r)\mathbf{n}}{v_0},$$

где  $\mathbf{v}_w$ ,  $\mathbf{v}_r$  – поступательные скорости контактной точки;  $\boldsymbol{\omega}_w$ ,  $\boldsymbol{\omega}_r$  – угловые скорости колесной пары и рельса соответственно;  $\boldsymbol{\tau}_1$ ,  $\boldsymbol{\tau}_2$ ,  $\mathbf{n}$  – касательные и нормаль к контактной точке в СКR0;  $v_0$  – скорость продольного движения колесной пары.

Контактные силы рассчитываются по модели В. Кика и И. Пиотровского [10] или при помощи программы CONTACT [11]. В модели В. Кика и И. Пиотровского для вычисления сил крива используется алгоритм *FASTSIM*, модифицированный для неэллиптических пятен контакта.

Суммарная нормальная реакция вычисляется по формуле

$$N = N_e + N_d,$$

где  $N_e$  – упругая составляющая (рассчитывается по соответствующей модели контактных сил),  $N_d$  – диссипативная составляющая.

$$N_d = 2\zeta\sqrt{c_c m_w} \dot{\delta},$$

где  $\zeta$  – доля демпфирования от критического,  $c_c$  – контактная жесткость,  $m_w$  – масса колеса,  $\dot{\delta} = (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_r)\mathbf{n}$  – скорость проникновения.

### 8.4.3. Коэффициент трения в контакте колесо-рельс

В УМ предусмотрено задание как переменных, так и постоянных коэффициентов трения в контактах колеса с рельсом. Для каждого рельса вводится два основных коэффициента трения: на поверхности катания рельса  $f_r$  и на боковой поверхности рельса  $f_s$ . Эти коэффициенты задаются либо численными значениями, либо зависимостями от продольной координаты вдоль пути  $f_r(x), f_s(x)$  или от времени  $f_r(t), f_s(t)$ .

Если для данного положения колеса коэффициенты принимают разные значения, то есть  $f_r \neq f_s$ , то коэффициент трения считается переменным вдоль профиля рельса в поперечном направлении.

В результате на поверхности рельса можно выделить три участка: поверхность катания с постоянным в поперечном направлении коэффициентом  $f_r$ , боковая внутренняя поверхность рельса с постоянным в поперечном направлении коэффициентом трения  $f_s$  и переходный участок, на котором коэффициент трения непрерывно по линейному закону в зависимости от угла  $\beta$  переходит от значения  $f_r$  к  $f_s$ . Для разделения профиля на зоны трения следует задать углы  $\beta_r$  и  $\beta_s$ .

Зависимость коэффициента от продольной координаты позволяет, например, моделировать наезд на масляное пятно. Различные значения трения на поверхности катания и на боковой поверхности рельса используются в основном для моделирования смазывания рельсов в кривых.

Также существует возможность задавать зависимость коэффициента трения от скорости скольжения в соответствии с моделью [12]

$$f = f_0((1 - A)e^{-Bv_1} + A),$$

где  $f_0$  – коэффициент трения при нулевой скорости проскальзывания,  $A = f_\infty/f_0$  – отношение коэффициентов трения при бесконечной и нулевой скоростях проскальзывания,  $B$  – коэффициент экспоненциального уменьшения коэффициента трения.

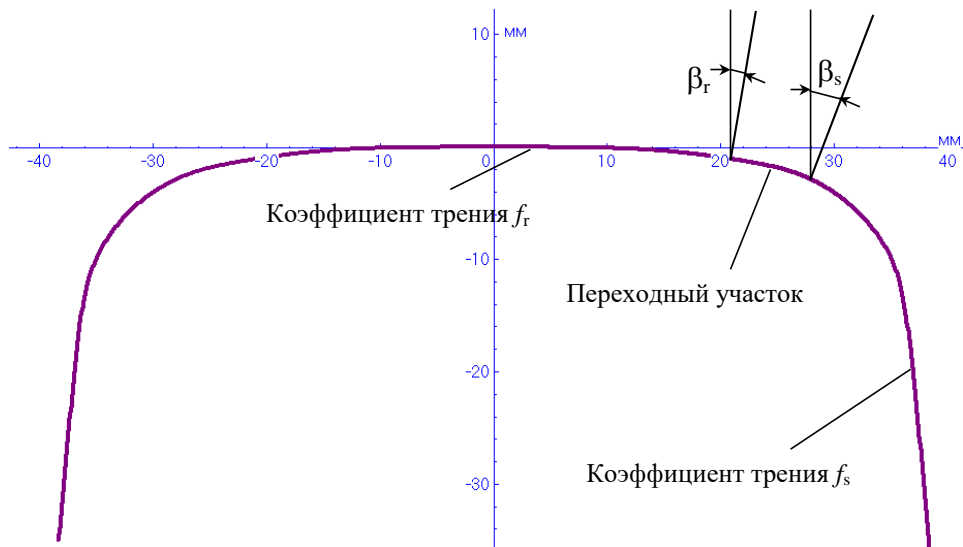


Рис. 8.103. Изменение коэффициента трения на профиле рельса

На рис. 8.104 представлена зависимость от скорости проскальзывания отношения коэффициента трения к его значению при нулевой скорости при значениях  $A=0.4, B=0.6$  с/м.

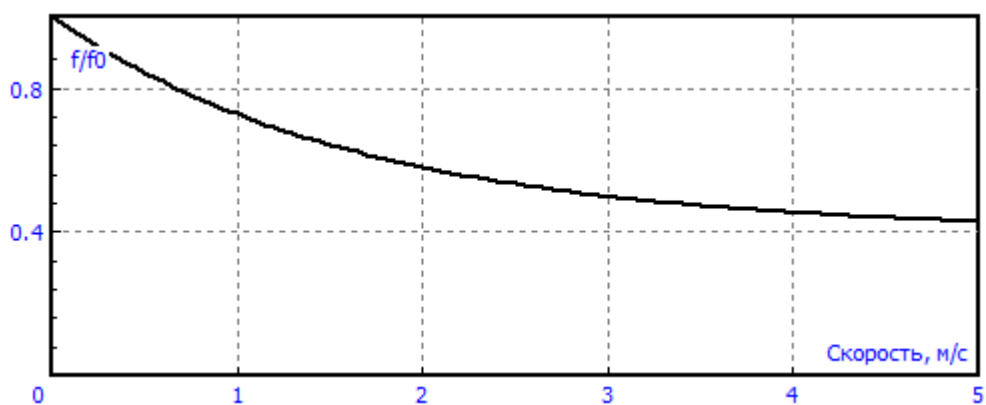


Рис. 8.104. Уменьшение коэффициента трения с ростом скорости проскальзывания

## 8.5. Моделирование динамики рельсовых экипажей

### 8.5.1. Инструменты подготовки процесса моделирования

#### 8.5.1.1. Создание профилей колес и рельсов

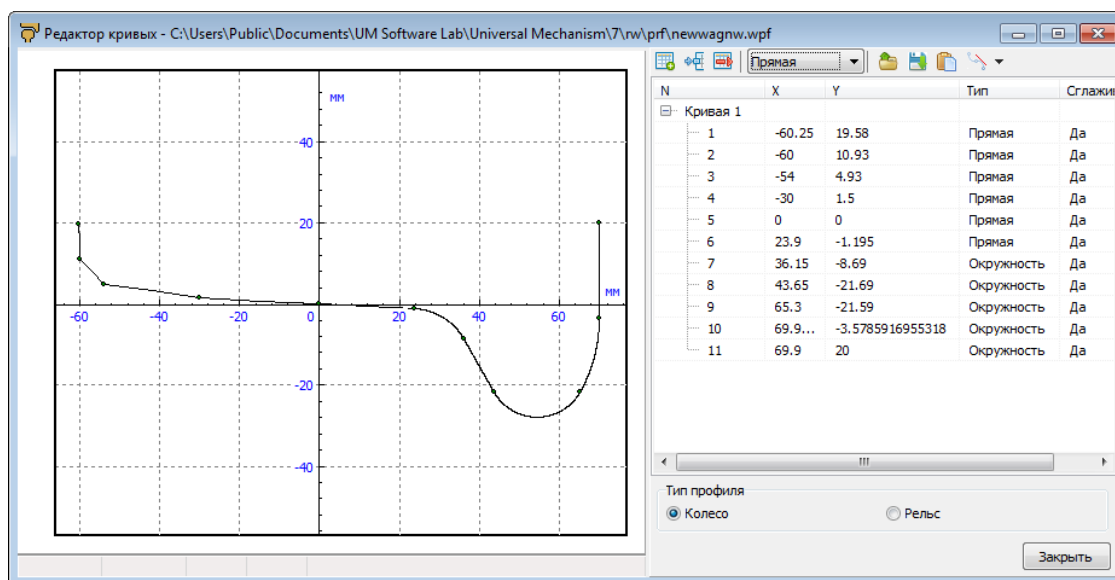



Рис. 8.105. Редактор кривых в режиме создания профилей

Профили колес и рельсов содержатся в каталоге {Данные УМ}\rw\prf в отдельных файлах с расширениями \*.wprf (колеса) и \*.rpf (рельса). Профили задаются в специальных системах координат (п. 8.3.1.1. "Геометрия рельсов в идеальной прямой", стр. 8-68) с использованием инструмента, доступного в программе моделирования **UM Simulation** с помощью команды меню **Инструменты | Создание профилей**, сочетания клавиш *Ctrl+P* или кнопки  на панели инструментов. Создание новых и модификация или корректировка существующих профилей осуществляется с помощью *Редактора кривых* (рис. 8.105). Подробное описание основных функций и инструментов редактора можно найти в [Главе 3](#) п. *Конструктор объекта | Редактор кривых*. С использованием данного инструмента задание профилей происходит в двух режимах:

- режим поточечного ввода с последующей сплайновой интерполяцией;
- режим ввода профилей, составленных из отрезков прямых и дуг окружности.

Второй способ ввода в основном используется для создания файлов новых стандартных профилей.

### 8.5.1.1.1. Поточечный ввод с последующей сплайновой интерполяцией

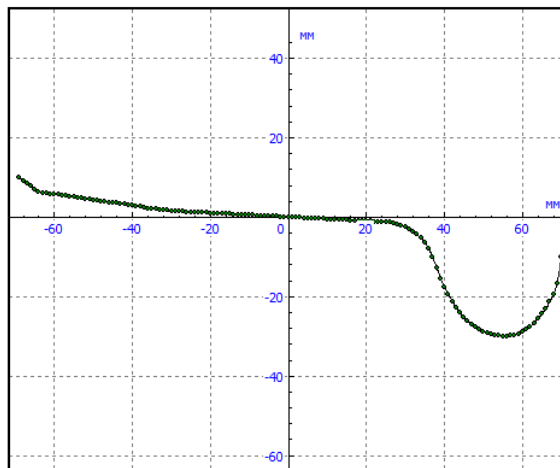


Рис. 8.106. Поточечное задание профилей

Для ввода координат точек на профиле используйте либо список точек в правой части окна, либо буфер обмена. Точки должны задаваться слева направо (с ростом абсциссы) в миллиметрах. Через буфер обмена передаются координаты точек в текстовом формате в виде двух колонок. Первая колонка содержит значение абсциссы, вторая – ординаты, например:

```
-68.9  11.7
-66    7.72
-65    7.01
-64    6.30
-63    6.16
.....
```

Для ввода данных из буфера:

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

После того, как все точки профиля введены в окно редактора, выделите мышкой кривую и выберите тип аппроксимации **В-сплайн** (рис. 8.107). Сохраните введенный профиль в файл.

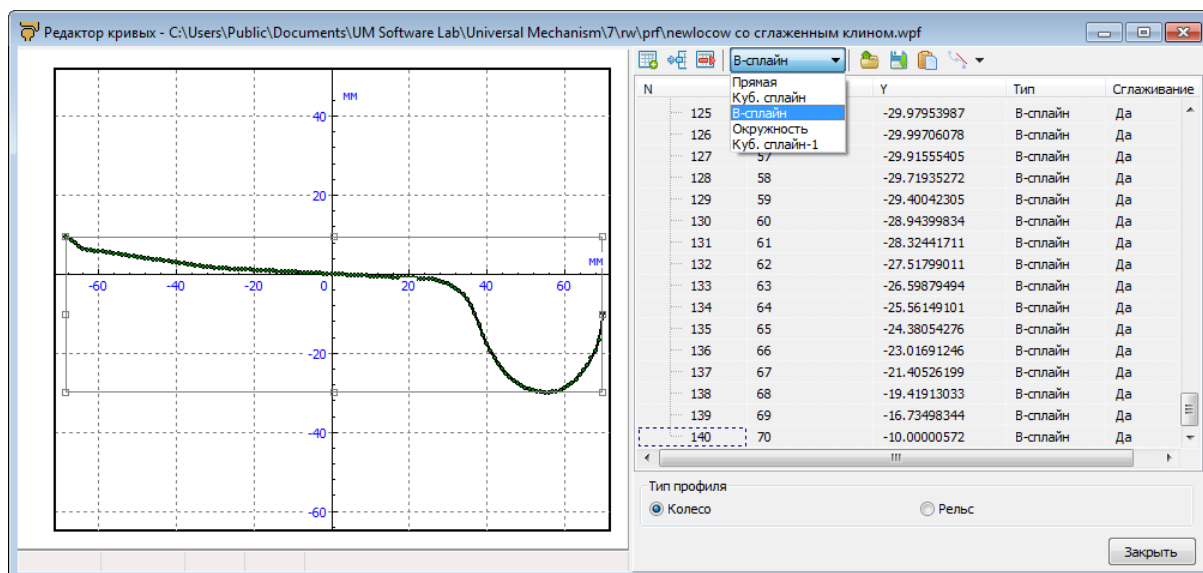


Рис. 8.107. Выделение кривой и задание аппроксимации

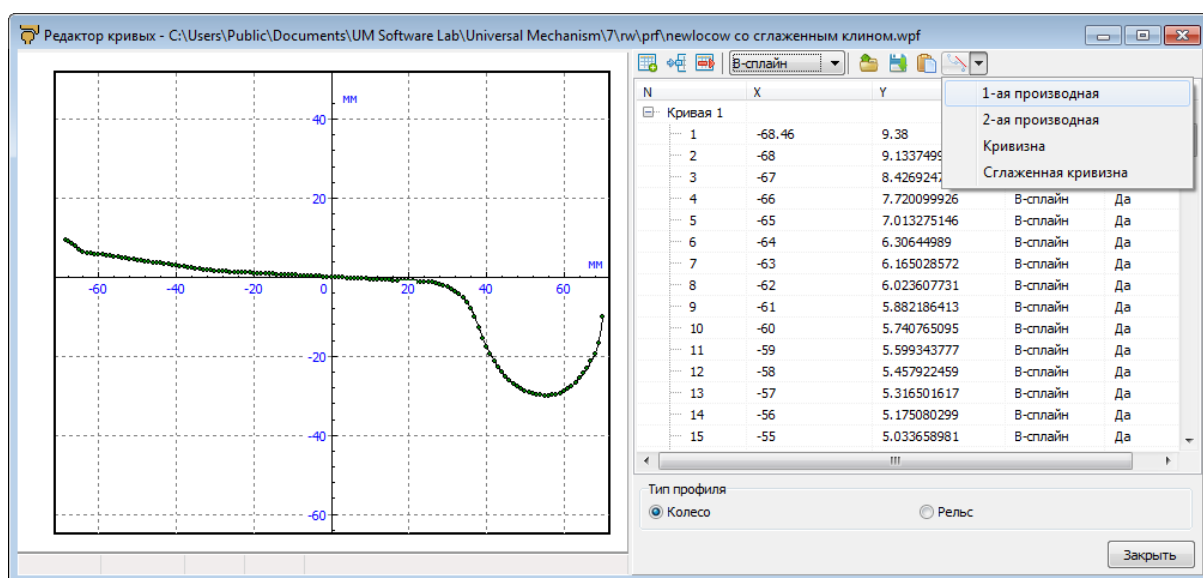


Рис. 8.108. Возможность построения касательных и кривизны

**Замечание 1.** Не рекомендуется задавать точки с шагом по оси абсцисс меньше, чем 1мм, в противном случае может образоваться “пила” на графике производной от кривой профиля, а на графике кривизны возникнут большие перепады. И то и другое плохо сказывается на процедуре расчета координат точки контакта и на непрерывности изменения координаты точки контакта при смещении профилей колеса и рельса относительно друг друга.

**Замечание 2.** Построение графика сглаженной кривизны профиля нужно при расчете сил крива с использованием алгоритма FastSim.

### 8.5.1.1.2. Ввод профилей, составленных из отрезков прямых и дуг окружности

Для создания профиля как набора отрезков и дуг окружностей следует выполнить следующие действия:

- задать координаты точек – концов отрезков и дуг окружностей в виде ломаной, вводя точки в список в правой части редактора слева направо (то есть с увеличением абсциссы);
- выделить мышкой отрезки или группу отрезков, которые надо заменить дугами окружностей и выбрать тип соединения выделенных точек – **Окружность** (рис. 8.109);
- сохранить файл профиля.

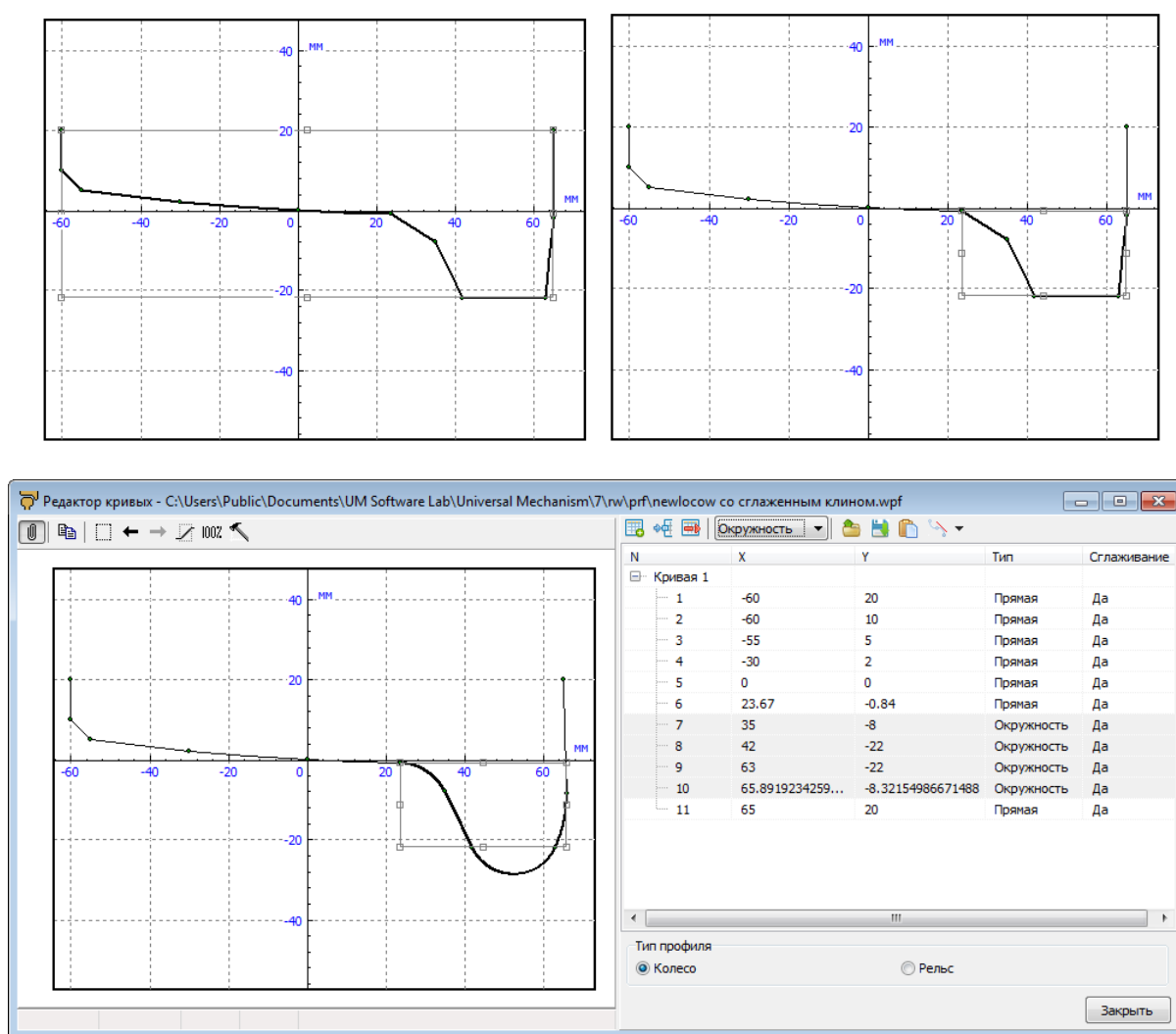



Рис. 8.109. Создание профиля как набора отрезков и дуг окружностей

### 8.5.1.1.3. Инструмент анализа пар профилей

В программе моделирования динамики при загруженной модели рельсового экипажа доступным становится инструмент анализа геометрии пар профилей при заданном текущем значении ширины колеи и подуклонки рельса (см. п. 8.5.2.4.2.7. "Тип пути: из файла. Множество файлов макрогеометрии", стр. 8-181). Для открытия инструмента используется команда меню **Инструменты | Анализ пар профилей...** или кнопка  на панели инструментов.

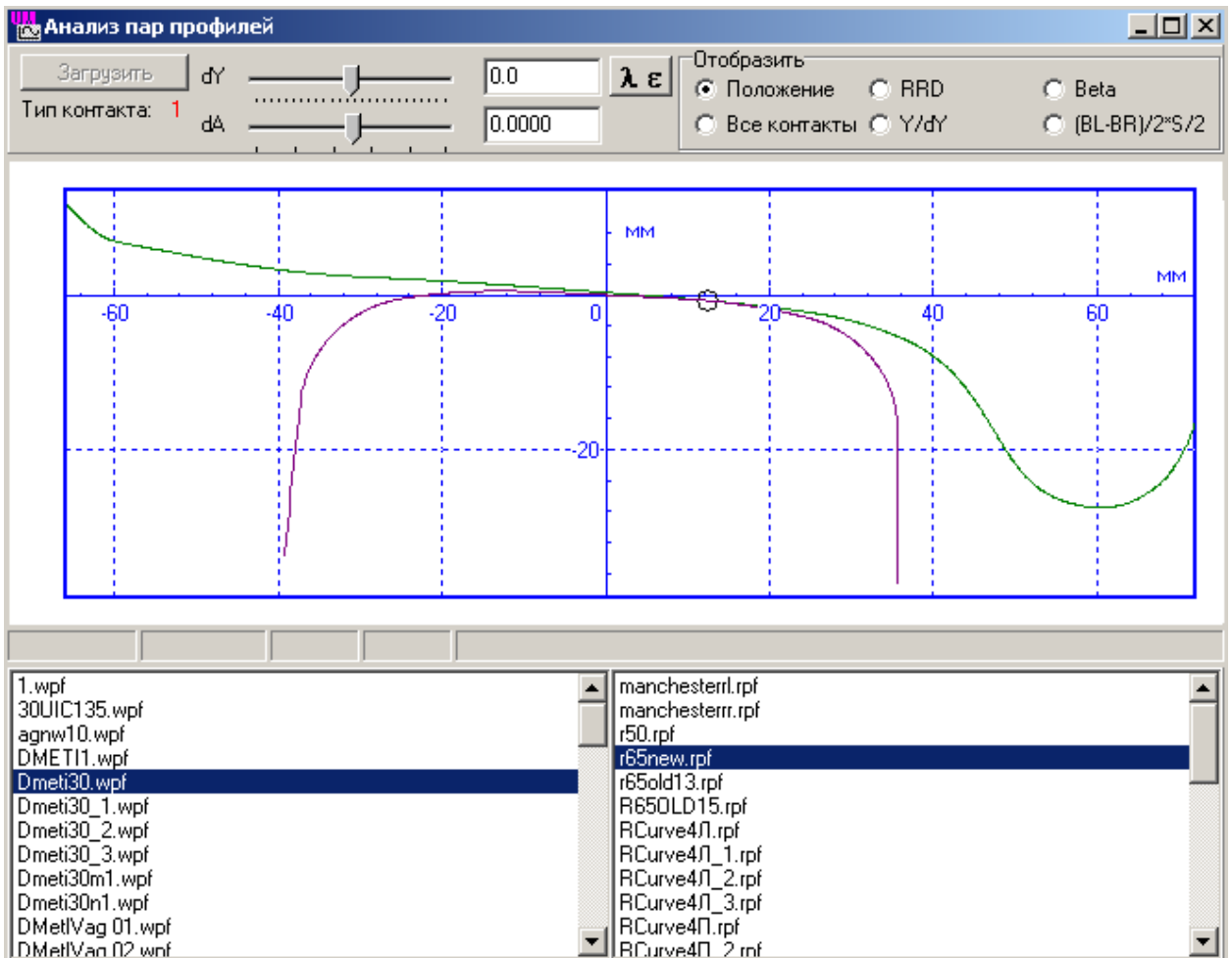


Рис. 8.110. Окно анализа пар профилей

#### Контейнер профилей

Контейнер представляет собой список профилей колеса (слева) и рельса (справа), обнаруженных по стандартному пути `{Данные УМ}\rw\prf`.



Для добавления к спискам профилей, находящихся по другому пути, щелкните правой кнопкой на левой или правой части контейнера, выберите одну из двух команд добавления («без сортировки» означает, что найденные профили добавляются внизу списка) и выберите файл с помощью стандартного диалога.

### Выбор пары профилей

Для выбора пары профилей следует выделить названия соответствующих файлов в контейнере, рис. 8.110. После этого щелкните на кнопке **Загрузить**.

### Результаты анализа

В качестве результатов анализа пользователю предоставляются следующие данные.

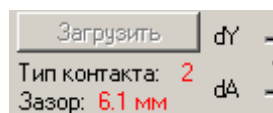


Рис. 8.111. Тип контакта и зазор на сторону

- **Тип контакта** (одноточечный или двухточечный), рис. 8.111.
- **Зазор** (на сторону) – величина смещения колеса, при котором возникает двухточечный контакт (только для пар профилей, допускающих двухточечный контакт)

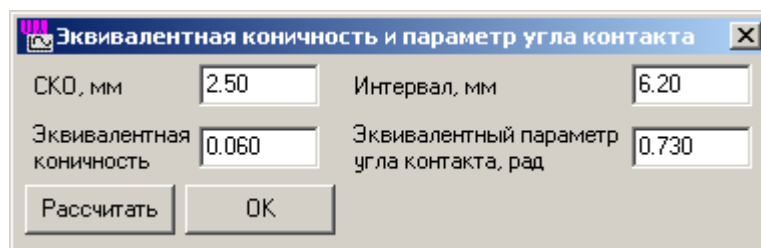


Рис. 8.112. Эффективная коничность и параметр угла контакта

- $\lambda$ ,  $\epsilon$  – эквивалентная коничность и параметр угла контакта см. п. *Упрощенный расчет геометрии контакта*. Данные параметры рассчитываются в зависимости от средне-квадратического отклонения координаты поперечного смещения (**СКО**, мм) и интервала усреднения (**Интервал**, мм), рис. 8.112.

В зависимости от выбора типа данных в группе **Отобразить** в графическом виде доступна следующая информация.

- **Положение** – положение точки контакта при смещении профиля колеса относительно рельса  $dY$  при различных значениях угла наклона профиля колеса  $dA$ , рис. 8.110. Для изменения значений  $dY$  (мм) и  $dA$  (градусы) используется либо смещение движка, либо прямой текстовый ввод. При прямом вводе смещения и угла следует нажать *Enter* для обновления информации. Угол изменяется примерно от -1.4 до 1.4 градусов.

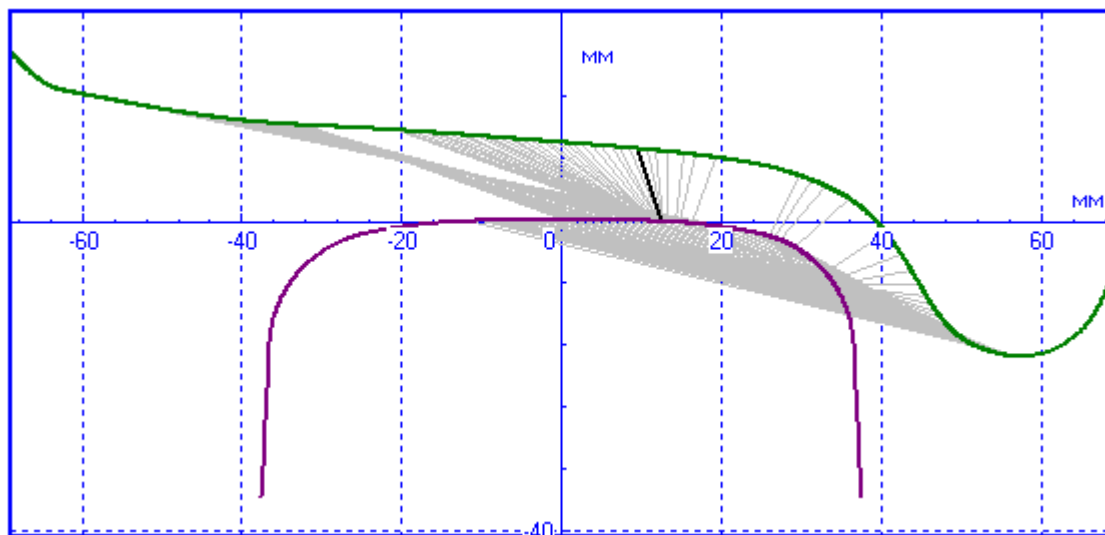


Рис. 8.113. Все контакты пары профилей

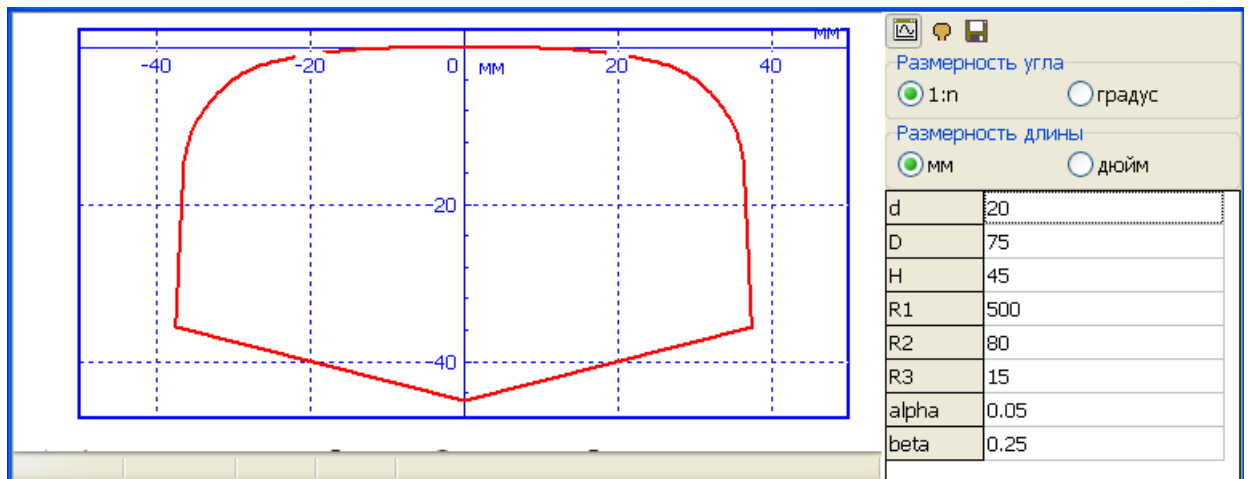
- **Все контакты** – пары контактных точек на профилях при различных значениях поперечного смещения профиля колеса относительно рельса соединены отрезками. Жирный отрезок соответствует текущему значению смещения.
- **RRD** – кривая разности радиусов левого и правого колес в зависимости от поперечного смещения колесной пары (см. п. 8.4.1.1.3.3. "Упрощенная геометрия контакта", стр. 8-86).
- **dY/Y** – координаты точки контакта колеса и рельса в СК каждого из профилей в зависимости от поперечного смещения колеса.
- **Beta** – зависимость угла контакта от поперечного смещения колеса, рис. 8.93.
- **(BL-BR)/2\*S/2** – зависимость от поперечного смещения величины

$$E(y) = \frac{\beta_l(y) - \beta_r(y) S}{2} \frac{S}{2}$$

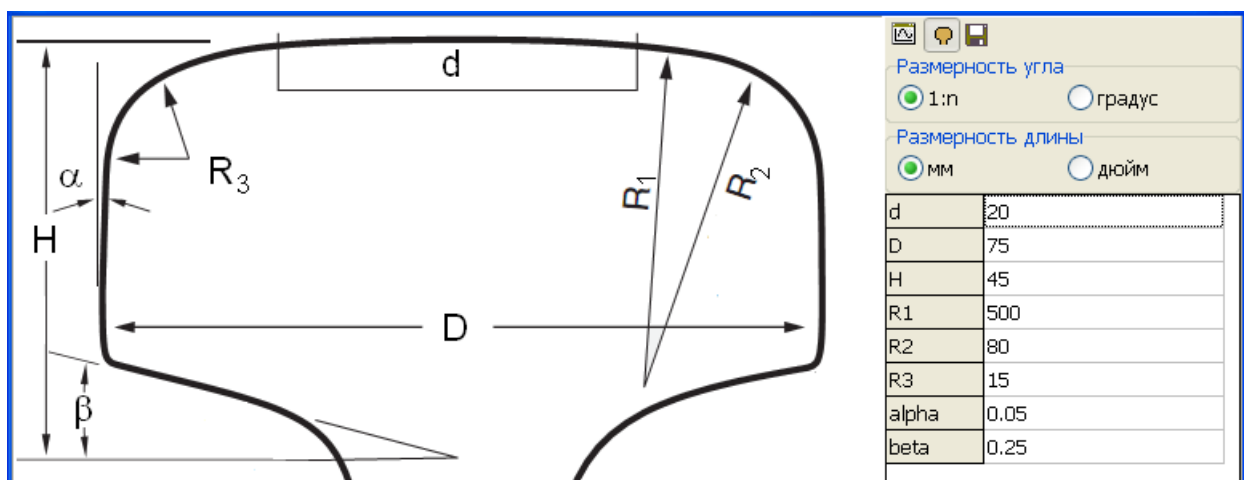
используемой при расчете параметра угла контакта (см. п. 8.4.1.1.3.3. "Упрощенная геометрия контакта", стр. 8-86).

### 8.5.1.1.4. Автоматическое создание профиля нового рельса

С помощью специального инструмента пользователь может автоматизировать процесс создания файлов нового профиля рельса. Для вызова окна генератора профиля следует использовать пункт меню **Инструменты | Генератор профиля рельса**, затем аналогичную команду, рис. 8.114. Численные данные, содержащиеся в окне генератора «по умолчанию», соответствуют новому рельсу Р65.



а)






б)

Рис. 8.114. Окно генератора профиля рельса в режимах отображения профиля (а) и схемы (б)

Для создания профиля следует выполнить следующие действия.

- Задать значения геометрических параметров, смысл которых поясняется на рис. 8.114б. Значения параметров обычно доступны на чертежах профилей, как на рис. 8.115. Численные данные в таблице на рис. 8.114 соответствуют рельсу Р65, чертеж которого представлен на рис. 8.115.

Если в окне генератора выбрана размерность угла 1:n, то задается «коничность», то есть тангенс соответствующего угла. Так, на рис. 8.115, коничности 1:4 соответствует численное значение 0.25 в таблице, а коничности 1:20 соответствует число 0.05.

- Просмотреть профиль, щелкнув на кнопке , рис. 8.114а и сохранить данные в файле, используя кнопку . Вернуться к изображению схемы профиля, рис. 8.114б, можно с помощью кнопки .

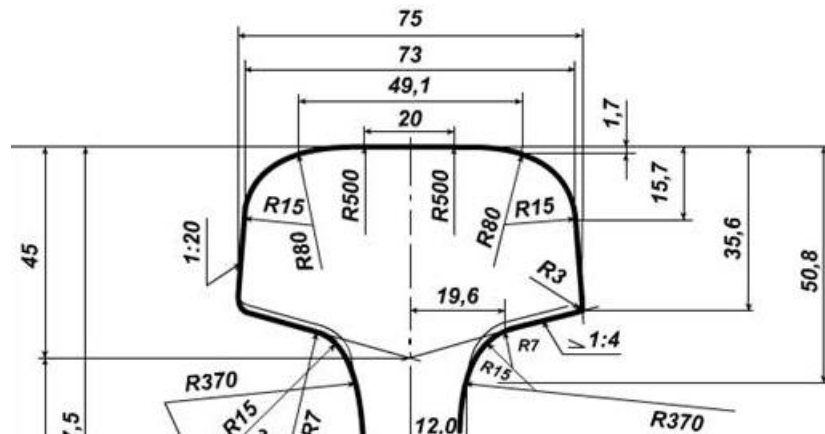


Рис. 8.115. Фрагмент чертежа рельса Р65, ГОСТ Р 51685-2000



Рис. 8.116. Рельс Р65 в окне анимации контакта

**Замечание.** Одновременно с файлом профиля \*.grf автоматически создается файл с графическим образом профиля для отображения в окне анимации контакта, рис. 8.116.

### Алгоритм расчета профиля

Рассмотрим математические соотношения, позволяющие рассчитать профиль рельса по геометрическим данным на рис. 8.114б. Расчетная схема профиля представлена на рис. 8.117. Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  определяются из соотношений

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{d}{2R_1}, \alpha_3 = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

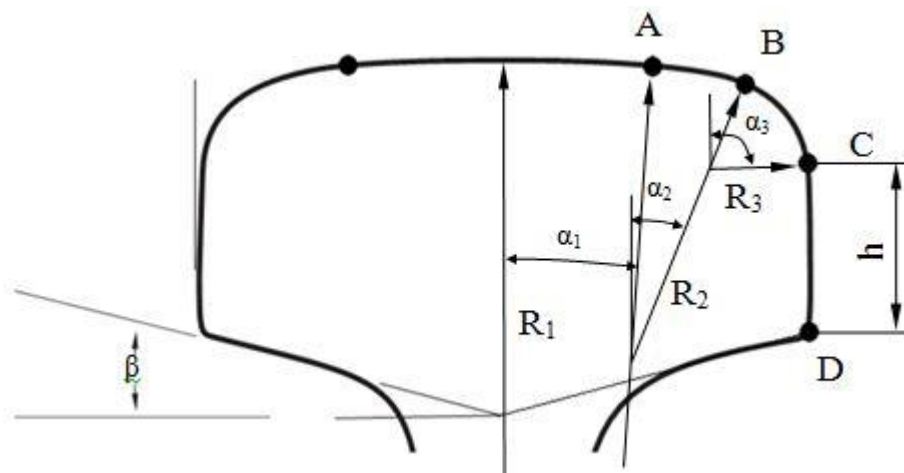


Рис. 8.117. Схема для расчета профиля

Из уравнений проекций на оси абсцисс и ординат получим два основных уравнения

$$(R_1 - R_2) \sin \alpha_1 + (R_2 - R_3) \sin \alpha_2 + R_3 \cos \alpha + h \operatorname{tg} \alpha = \frac{D}{2},$$

$$R_1 - [(R_1 - R_2) \cos \alpha_1 + (R_2 - R_3) \cos \alpha_2 + R_3 \sin \alpha] + h = H - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \beta$$

относительно неизвестных  $\alpha_2$  и  $h$ . Оставляя неизвестные в правой части, получим уравнения

$$\begin{aligned} (R_2 - R_3) \sin \alpha_2 + h \operatorname{tg} \alpha &= \alpha_1, \\ -(R_2 - R_3) \cos \alpha_2 + h &= \alpha_2, \end{aligned}$$

в которых введены обозначения

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{D}{2} - (R_1 - R_2) \sin \alpha_1 - R_3 \cos \alpha, \\ \alpha_2 &= H - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \beta - R_1 + (R_1 - R_2) \cos \alpha_1 + R_3 \sin \alpha. \end{aligned}$$

Исключая из первого уравнения неизвестную  $h$ , получим уравнение для угла  $\alpha_2$

$$\sin(\alpha_2 + \alpha) = \frac{\alpha_1 \cos \alpha - \alpha_2 \sin \alpha}{R_2 - R_3}$$

Полученные данные позволяют определить координаты точек A, B, C, D, достаточные для построения профиля.

### 8.5.1.1.5. Импорт профилей колес из САПР

Если в текущей конфигурации UM доступен импорт графических образов из САПР программы или с помощью конвертации деталей из STEP, IGES форматов, то пользователь может создать профиль в САПР программе с последующим импортом в UM.

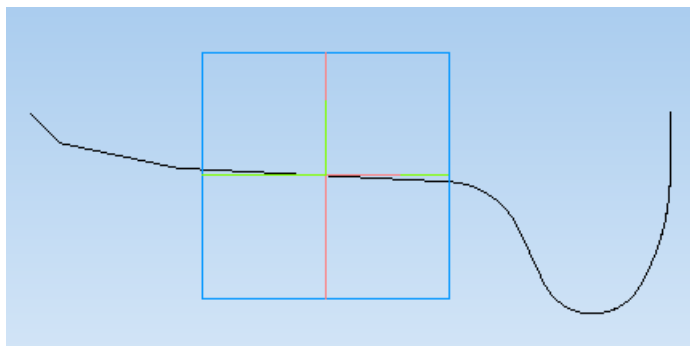


Рис. 8.118. Профиль колеса, созданный в САПР КОМПАС

Необходимы следующие действия.

9. В САПР создается эскиз профиля, в качестве единиц измерения используются миллиметры.
10. На базе эскиза создается тонкая деталь, толщиной порядка 0.001 мм по обоим направлениям выдавливания, рис. 8.118.
11. Если используются САПР КОМПАС, SolidWorks или Inventor, то импорт созданного профиля происходит напрямую из САПР. В противном случае следует предварительно экспортировать профиль в STEP или IGES файл.

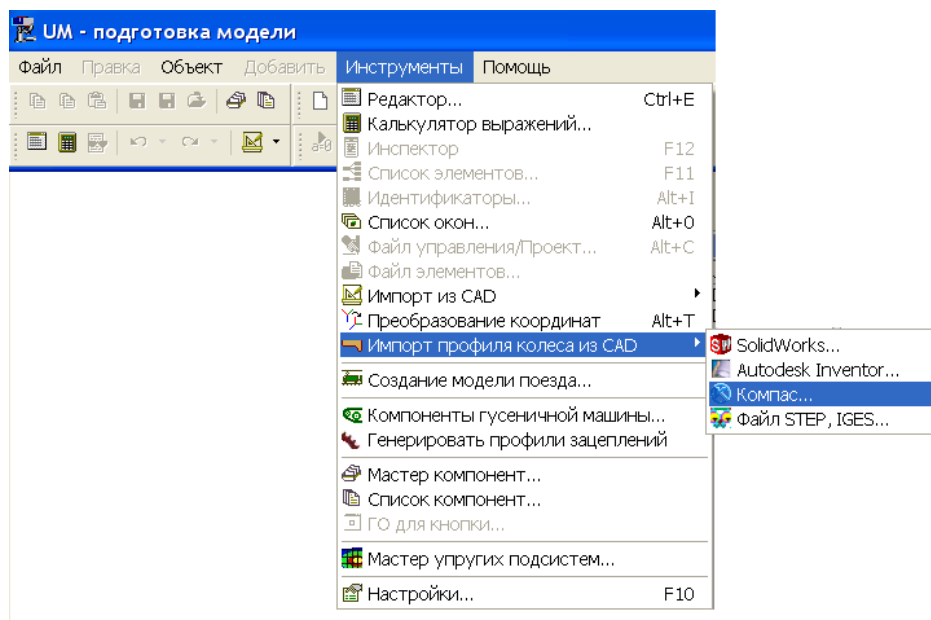


Рис. 8.119. Команда импорт профиля колеса

12. В программе ввода экспортировать профиль с помощью команды меню **Инструменты | Импорт профиля колеса из CAD**, рис. 8.119.

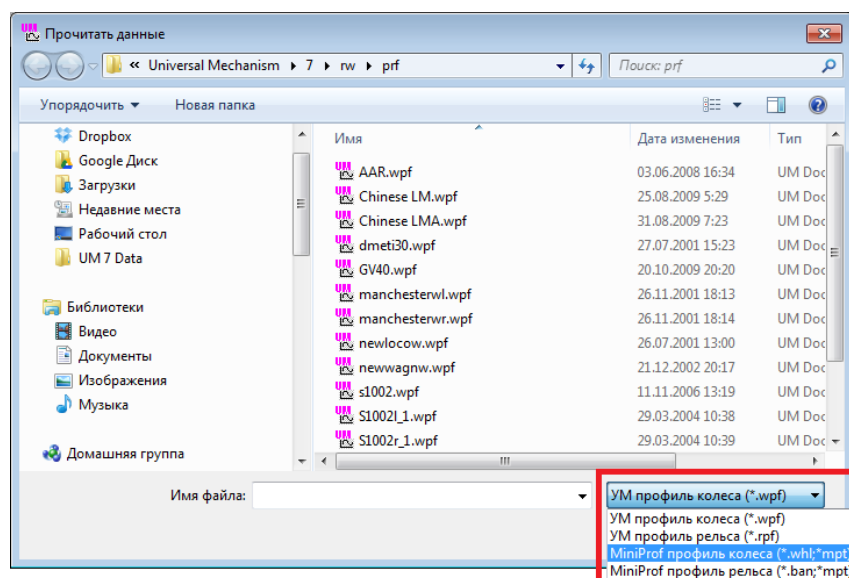
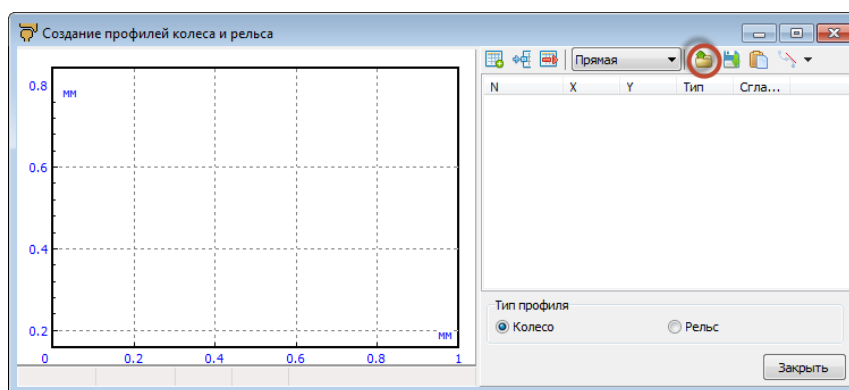
13. Сохранить профиль в файл в формате UM, задав путь и имя файла в стандартном окне.

### 8.5.1.1.6. Загрузка профилей колес и рельсов из MiniProf

Универсальный Механизм поддерживает прямую загрузку файлов \*.whl, \*.mpt, \*.ban, созданных с помощью популярного измерительного комплекса MiniProf. Подробную информацию о MiniProf вы можете найти на сайте производителя по ссылке [www.greenwood.dk/mini-prof.php](http://www.greenwood.dk/mini-prof.php).

Чтобы загрузить файлы MiniProf откройте инструмент создания профилей, доступный в программе **UM Simulation** с помощью команды меню **Инструменты | Создание профилей**. Далее щелкните на кнопке **Загрузить из файла** и в появившемся диалоге открытия файла выберите один из поддерживаемых типов файлов. Чтобы иметь возможность использовать профили, импортированные из MiniProf, сохраните загруженные файлы в формате UM.


Наряду с прямым импортом данных из файлов MiniProf (\*.whl, \*.mpt, \*.ban) существует возможность импорта данных из аналогичных систем вручную. О том, как это сделать, см. п. 8.5.1.1.7. "Импорт профилей из MiniProf и других систем", стр. 8-111.

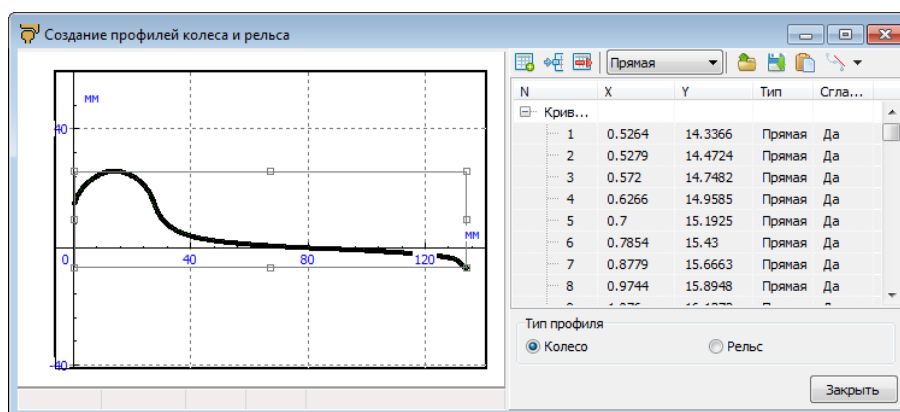



### 8.5.1.1.7. Импорт профилей из MiniProf и других систем

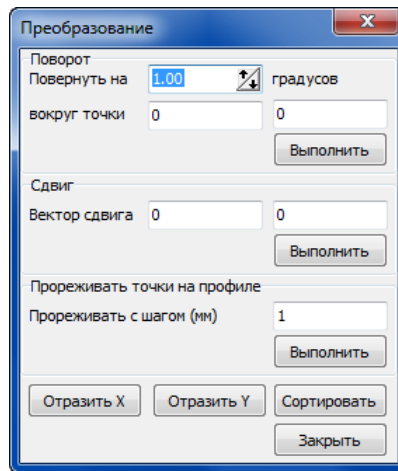
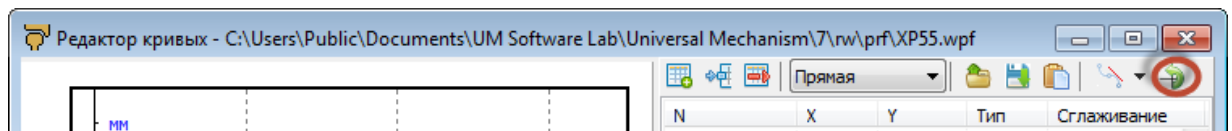
Для примера рассмотрим загрузку файла профиля колеса из формата \*.whl, созданного с помощью измерительного комплекса MiniProf.

14. Преобразуйте/экспортируйте данные в текстовом формате.
15. Удалите всю служебную информацию из файла. Файл должен содержать только числовые данные
 

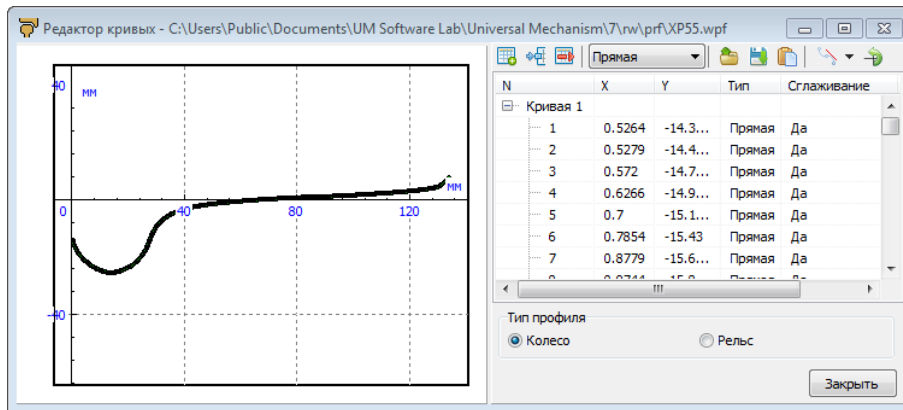
```
0.5264 14.3366 1.4173 -0.107470274760285 1
0.5279 14.4724 1.4173 -0.107470274760285 31
0.5720 14.7482 1.3878 -0.101892819434936 92
...
```
16. Запустите **MS Excel** и прочитайте там созданный файл. Преобразуйте таблицу таким образом, чтобы первый столбец содержал поперечные координаты профиля (X), а второй столбец – вертикальные (Y).
17. Запустите **UM Simulation** и откройте любую железнодорожную модель. Это нужно для того, чтобы стал доступен инструмент создания профилей колес и рельсов.
18. Откройте инструмент создания профилей, доступный в программе моделирования **UM Simulation** с помощью команды меню **Инструменты | Создание профилей...**, сочетания клавиш *Ctrl+P* или кнопки  на панели инструментов.
19. Скопируйте столбцы X и Y профиля из **MS Excel** в буфер обмена, а далее из буфера обмена скопируйте эти данные в окно **Создания профилей колеса и рельса (Ctrl+V)**.



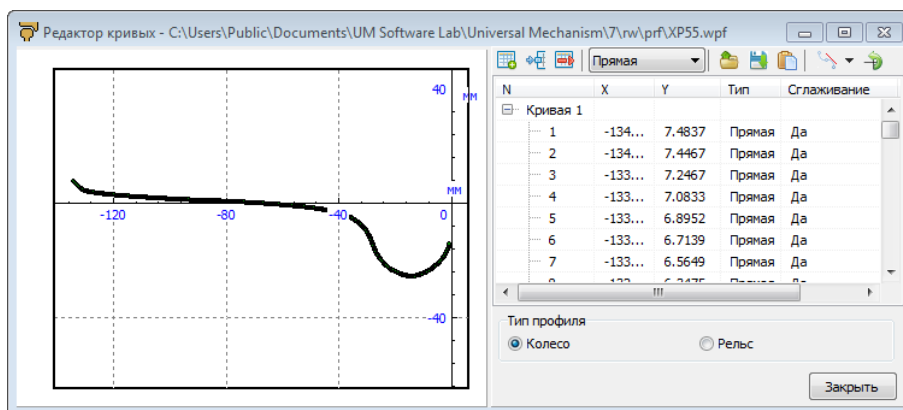
20. Для преобразования профиля нажмите кнопку  (**Поворот, сдвиг, отражение профиля**).



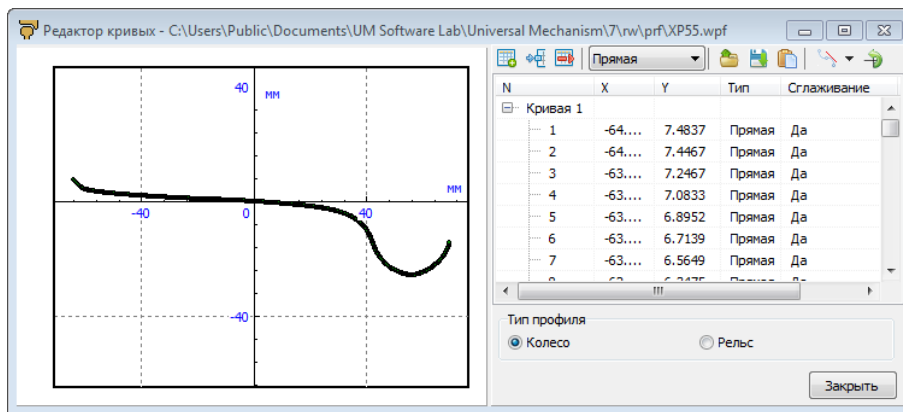
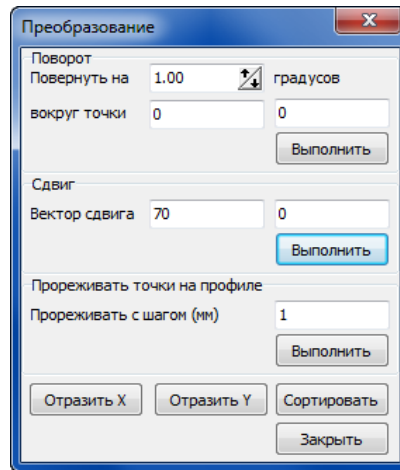
21. Нажмите кнопку **Отразить Y**.



22. Нажмите кнопку **Отразить X**.



23. Установите вектор сдвига (70; 0) и нажмите кнопку **Выполнить**.



24. Преобразование профиля завершено. Закройте окно **Преобразование** и сохраните полученный файл.

### 8.5.1.2. Создание неровностей рельсовых нитей

В УМ предусмотрено три способа задания неровностей рельсовых нитей:

- в виде файла неровностей;
- в виде детерминированных зависимостей типа «просадка» или модуль синуса;
- путем программирования в среде УМ с использованием файла управления.

Использование файлов неровностей является основным способом. Вместе с тем, программирование неровностей намного эффективнее, поскольку позволяет параметризовать неровности (начало неровности, ее величина и так далее) и использовать при исследованиях динамических свойств экипажа в зависимости от этих параметров.

#### 8.5.1.2.1. Создание файлов неровностей



Неровности рельсовых нитей хранятся в файлах с расширением \*.way в каталоге {Данные УМ}\rw. Файл содержит значения неровностей в метрах с постоянным шагом 0.1 м в формате single (число с плавающей точкой размером 4 байта).

Для создания нового файла неровностей используется специальный инструмент программы моделирования, для вызова которого используйте команду меню **Инструменты | Создание неровностей**. С помощью данного инструмента неровность создается как сумма произвольного числа неровностей различных типов.




*При использовании данного инструмента продольная координата неровности задается в метрах, а сама неровность – в миллиметрах.*

Рассмотрим структуру данного инструмента и значения отдельных элементов.

Результирующий профиль, график которого располагается в верхней части окна, представляет собой сумму отдельных неровностей. Список неровностей располагается в левой верхней части окна (рис. 8.120). Удаление отдельного элемента из этого списка удаляет соответствующую составляющую из результирующего профиля. Кнопки и поля на верхней панели инструментов используются

- кнопка  – для записи результирующей неровности в файл;
- кнопка  – для очистки результирующей неровности;
- поле **Длина** – для задания общей длины неровности в метрах.

Для создания отдельной неровности одного из типов следует использовать закладки в правой нижней части окна. Соответствующий график располагается в левой нижней части окна (рис. 8.120). Кнопки и поля на нижней панели инструментов используются

- кнопка  – для добавления текущей единичной неровности к результирующему профилю;
- кнопка  – для записи текущей неровности в файл;
- кнопка  – для очистки текущей неровности;
- поле **Множитель** – при добавлении к результирующему профилю текущая неровность умножается на число, указанное в данном поле. Рассмотрим пример. У пользователя имеется неровность, полученная в результате измерений в виде текстового файла, причем значение неровности представлено в метрах. С помощью закладки *По точкам* данная неровность может быть принята. Однако перед пересылкой в результирующий профиль следует установить 1000 в качестве множителя.

- ключ **Автокоррекция длины** – при включенном ключе длина результирующей неровности автоматически увеличивается, чтобы полностью вместить добавляемую неровность
- поле **Начало** – указывает, от какого значения продольной координаты будет добавлена текущая неровность к результирующему профилю; заметим, что график отдельной неровности в нижнем окне всегда начинается от нуля, то есть сдвинут на величину, указанную в качестве начала неровности;
- поле **Конец** – указывает длину текущей неровности, точнее, длина равна разности между конечной и начальной продольной координатой.

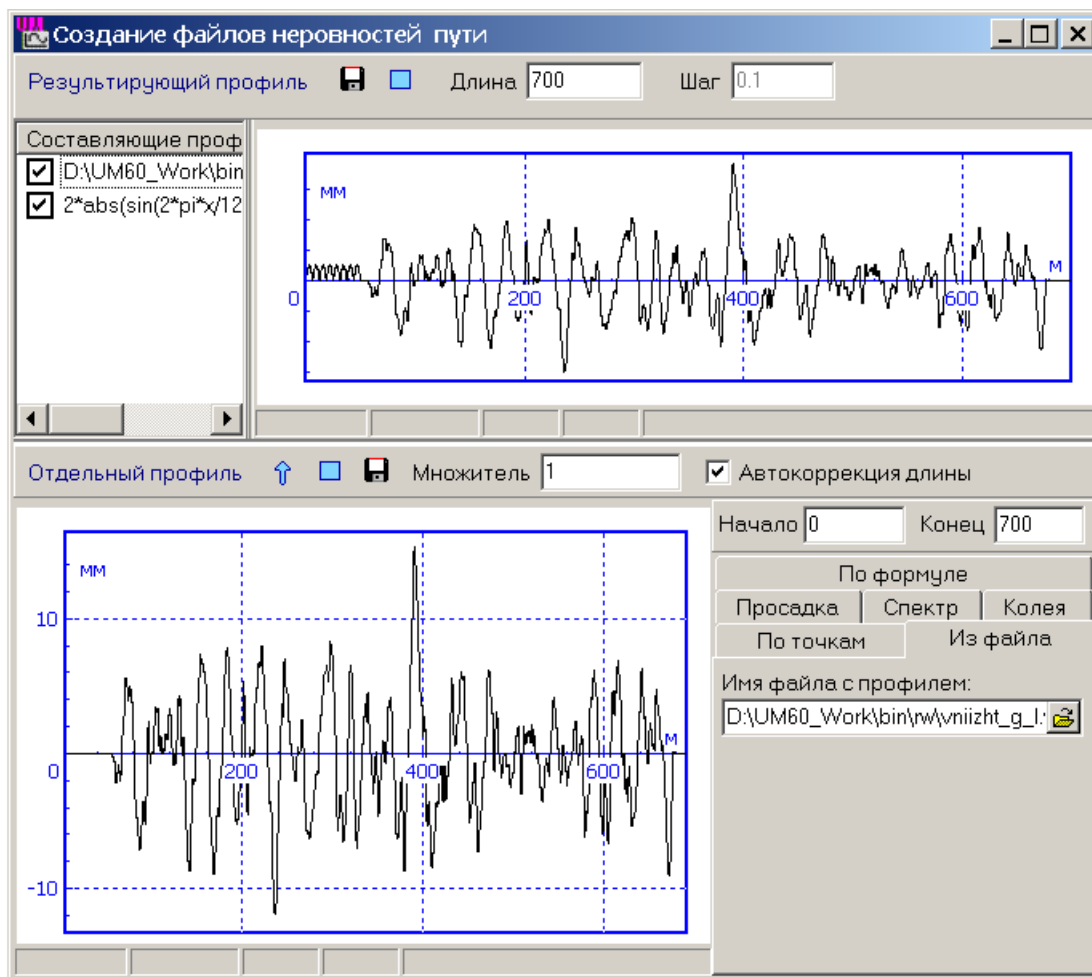



Рис. 8.120. Окно создания файлов неровностей

Рассмотрим типы отдельных неровностей.


### 8.5.1.2.1.1. Аналитическое выражение

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


### 8.5.1.2.1.2. Просадка

Длина просадки определяется разностью положений начала и конца неровности, задаваемых в полях **Начало** и **Конец**.

### 8.5.1.2.1.3. Из файла

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

### 8.5.1.2.1.4. По точкам

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

```
0 0
0.05 11
0.10 21
0.15 17
....
```

Для ввода этих данных из буфера

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

Для введенных данных может быть использована сплайновая аппроксимация.

### 8.5.1.2.1.5. Спектр

Путевые неровности могут быть созданы по спектральным плотностям мощности стандартного (FRA, ERRI B176) или произвольного вида (заданными поточечно или функцией). Для генерирования неровностей используется широко известный алгоритм, основанный на разложении Райса-Пирсона:

$$x[n\Delta s] = \sum_{m=0}^M \sqrt{2S_c(m\Delta\omega) \Delta\omega} \cos[m\Delta\omega n\Delta s + \varphi(m\Delta\omega)]$$

где  $\Delta s$  – шаг неровностей, м;  $M$  – количество гармоник;  $S_c(\omega)$  – спектральная плотность неровностей пути,  $\text{м}^2/(\text{рад}/\text{м})$ ;  $\Delta\omega$  – шаг по частоте,  $\text{рад}/\text{м}$ ;  $\varphi(m\Delta\omega)$  – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале  $[-\pi, \pi]$ . Спектральная плотность может быть задана как от круговой частоты ( $\text{рад}/\text{м}$ ) – для этого необходимо указать ключ **Круговая частота** на вкладке Спектр, так и от технической (кол/м).

Выбор спектра

FRA       Точки

ERRI       Формула

Спектр

(нет) ...

Круговая частота

Число гармоник

3000 ↕

Сформировать

### 8.5.1.2.1.5.1. Генерация неровностей с использованием спектра, заданного поточечно

В качестве примера создадим неровности пути со спектральной плотностью мощности, показанной на рис. 8.121. Для чего на вкладке **Спектр** откроем окно редактирования кривых и введём координаты точек спектральной плотности мощности.

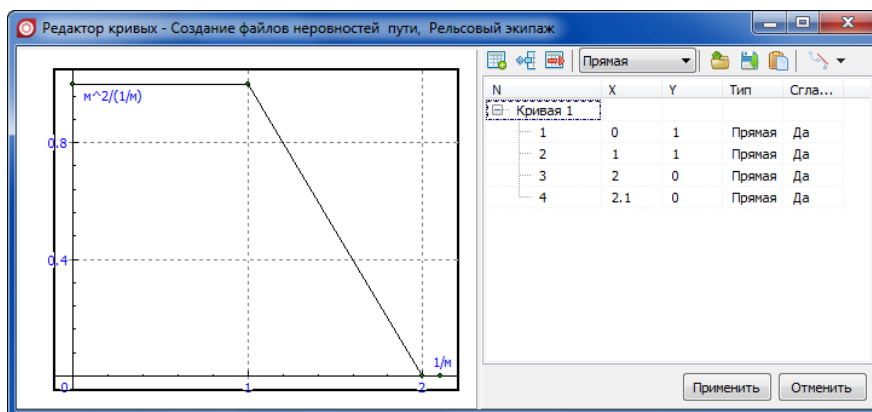


Рис. 8.121. Окно задания спектральной плотности мощности

Зададим параметры генерируемых неровностей, представленные на рис. 8.122, и добавим получившиеся неровности в результирующий профиль. Теперь неровности пути готовы и могут быть сохранены в файл.

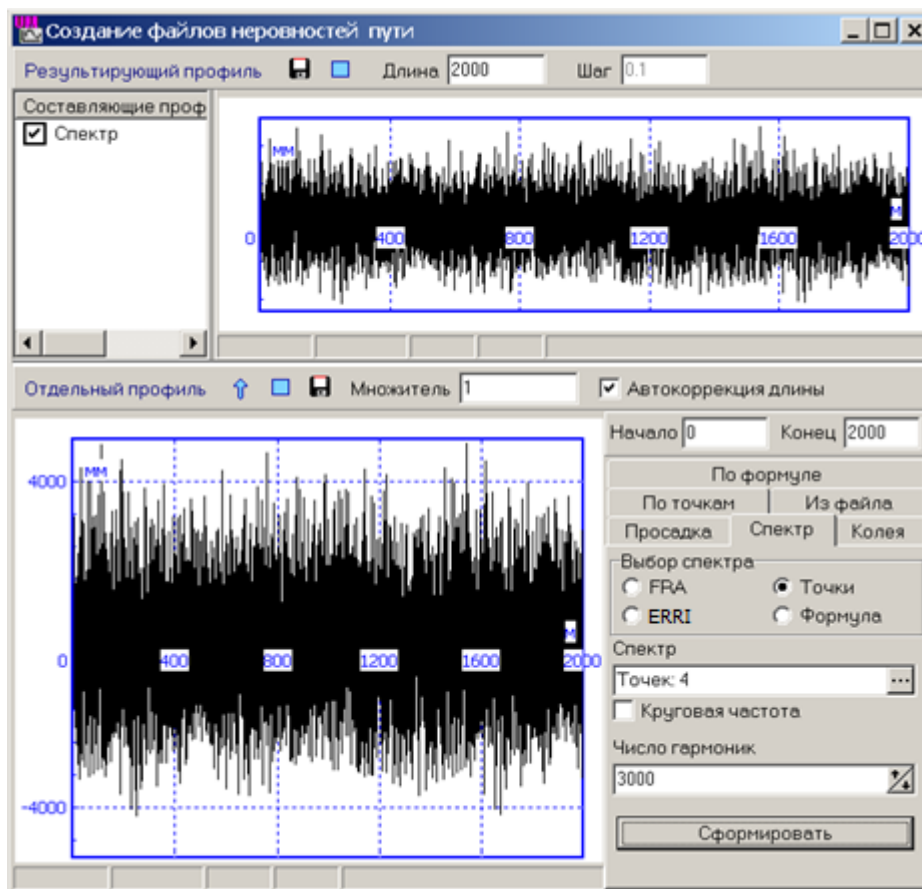


Рис. 8.122. Окно создания профиля пути

Для сгенерированных неровностей была построена спектральная плотность мощности с помощью окна *Статистики*, рис. 8.123. Видим, что полученная спектральная плотность очень близка к изначально заданной (в окне *Статистики* были использованы следующие настройки: спектральная оценка Хэннинга, несмещённая корреляционная оценка, отношение  $m/N = 0,002$ ).

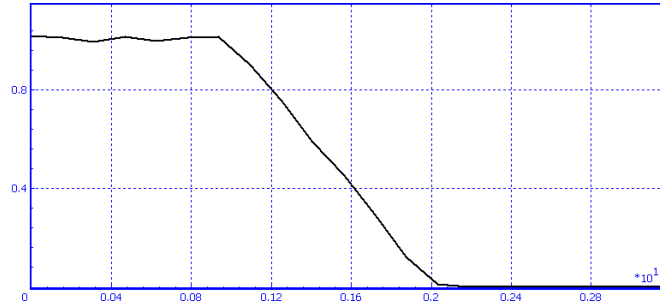


Рис. 8.123. Спектральная плотность мощности полученных неровностей

Для введенных данных может быть использована сплайновая аппроксимация. Поскольку величина неровности в результирующем профиле должна быть задана в миллиметрах, используйте необходимый масштабный множитель перед добавлением неровности к результирующему профилю.

Корректность работы инструментов оценки спектральной плотности мощности (СПМ) в окне *Статистики* и создания путевых неровностей с помощью задания поточечного спектра подтверждается сравнением спектров с аналитическим решением на примере прямоугольного единичного сигнала  $x(t)$  с интервалом времени 1с.

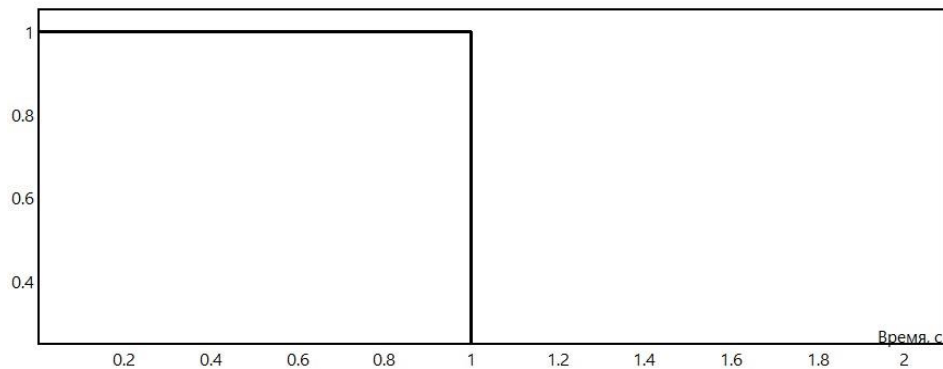


Рис. 124. Единичный прямоугольный сигнал

Спектральная плотность мощности:

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_T(\omega)|^2}{T},$$

где  $F_T(\omega)$  – преобразование Фурье от сигнала  $x(t)$ , которое рассчитывается по формуле

$$F_T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Спектральная плотность мощности прямоугольного сигнала  $x(t)$ , полученная аналитически, представлена на рис. 8.125.

Спектральная плотность мощности прямоугольного сигнала  $x(t)$ , полученная с помощью инструмента *Статистики* представлена на рис. 8.125. В окне *Статистики* были использованы следующие настройки: формирование выборки для БПФ - добавление нулями, спектральная оценка Хэннинга, несмещённая корреляционная оценка, отношение  $m/N = 0,2$ .

По полученной спектральной плотности мощности через окно *Статистики* путем задания поточечного спектра были сгенерированы неровности пути. Для сгенерированных неровностей была построена спектральная плотность мощности с помощью окна *Статистики*, рис. 8.125. В окне *Статистики* были использованы следующие настройки: формирование выборки для БПФ - усечение до ближайшего, спектральная оценка Хэннинга, несмещённая корреляционная оценка, отношение  $m/N = 0,08$ .

Из рис. 8.125 видно, что все три варианта полученных спектров очень близки.

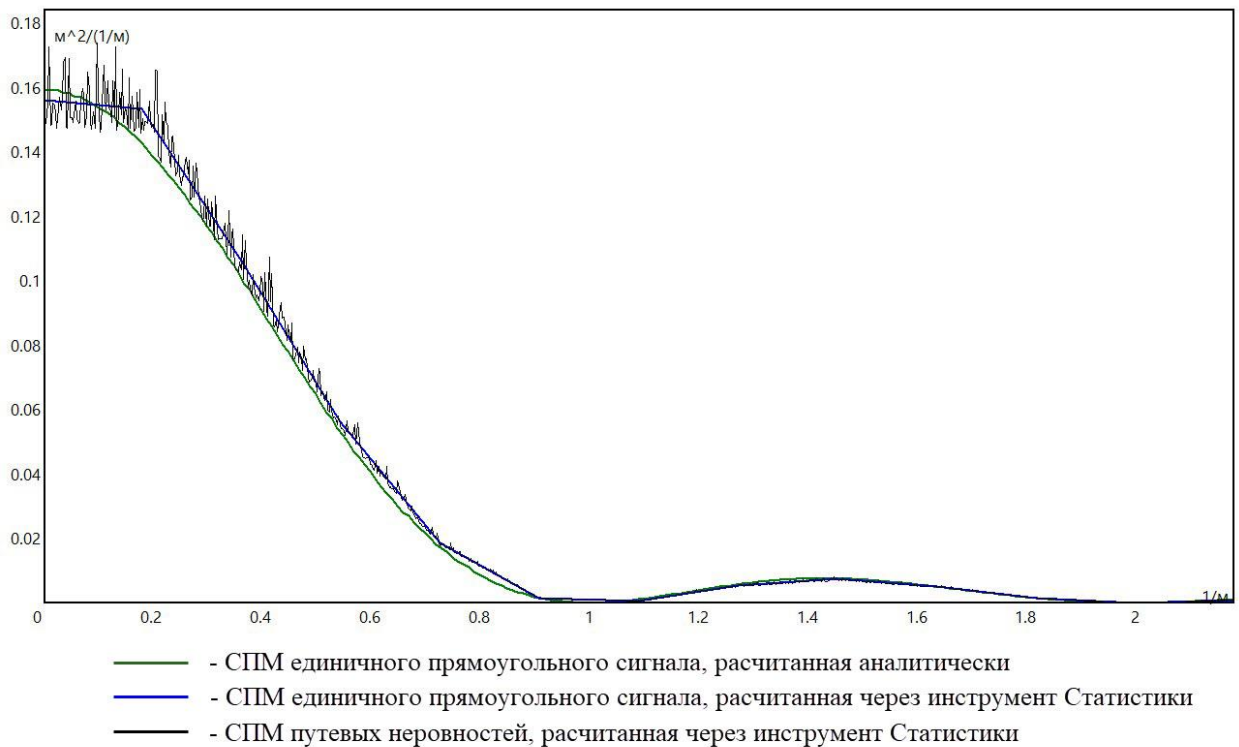


Рис. 8.125. Сравнение полученных СПМ

### 8.5.1.2.1.5.2. Геометрия путевых неровностей

Фактическая геометрия ж.-д. пути имеет отклонения от его идеального состояния. В зависимости от вертикальных или поперечных отклонений рельсов различают несколько видов неровностей пути. На рис. 8.126 показаны типовые характеристики неровностей пути: поперечные неровности оси пути ( $y$ ), отклонение ширины колеи от номинала ( $g$ ), вертикальные неровности оси пути ( $z$ ) и разница высот рельсовых нитей ( $\Delta z$ ) [13].

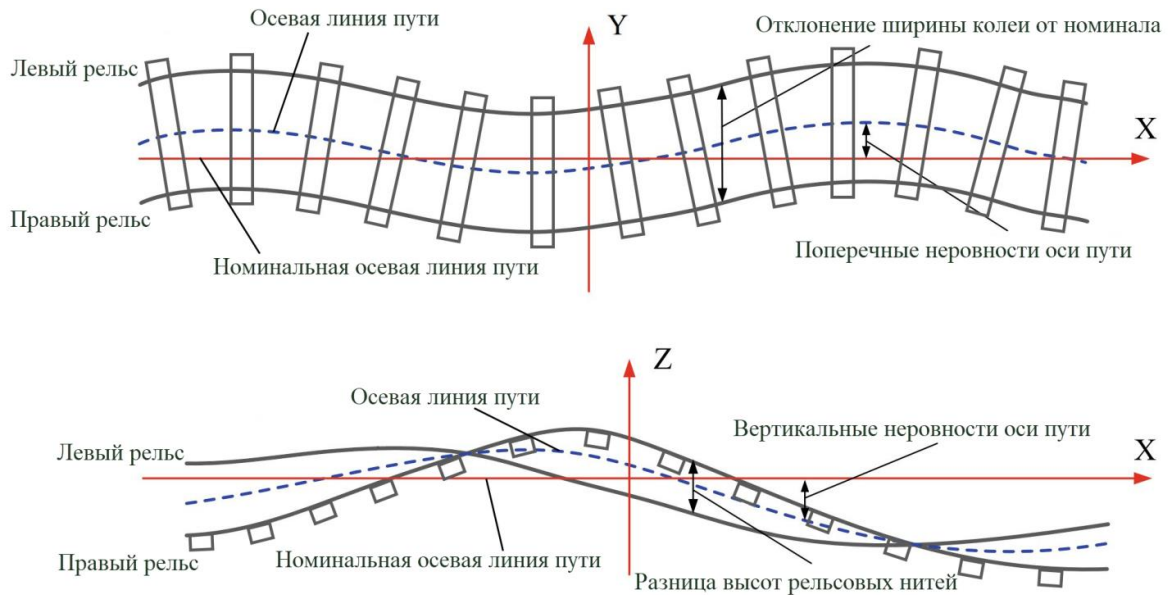


Рис. 8.126. Неровности рельсового пути

Поперечное отклонение осевой линии пути от ее номинального положения из-за боковых отклонений левого и правого рельсов вычисляется по формуле:

$$y = \frac{1}{2}(y_L + y_R),$$

где  $y_L$  и  $y_R$  – горизонтальные координаты левого и правого рельсов соответственно (отклонение положения левого и правого рельсов от их номинального положения – при номинальной оси пути и номинальной ширине колеи).

Изменение колеи от ее номинального положения из-за поперечных отклонений левого и правого рельсов определяется как:

$$g = y_L - y_R - g_0,$$

где  $g_0$  – номинальная ширина колеи.

Вертикальное отклонение осевой линии пути от ее номинального положения из-за вертикальных отклонений левого и правого рельсов вычисляется по формуле:

$$z = \frac{1}{2}(z_L + z_R),$$

где  $z_L$  и  $z_R$  – вертикальные координаты левого и правого рельсов соответственно (отклонение от номинального положения).

Разница высот левого и правого рельсов из-за их вертикальных отклонений определяется как:

$$\Delta z = z_L - z_R.$$

### 8.5.1.2.1.5.3. Генерация неровностей по спектрам FRA

В программном комплексе «Универсальный Механизм» реализованы алгоритмы создания путевых неровностей различного качества содержания по спектрам, рекомендованным FRA (Federal Railway Administration – USA) [14].

Федеральное управление железных дорог (FRA) оперирует девятью классами качества железных дорог, при этом лучшим считается девятый класс, а худшим – первый. Первые пять классов относятся к путям с обычным движением, а классы с шестого по девятый применяются для описания качества участков дорог с высокоскоростным движением, от 90 миль в час (145 км/ч) для пассажирских составов и от 80 миль в час (130 км/ч) для грузовых. Применимый диапазон длин волн составляет 1,524–304,8 м.

Функциональные зависимости, описывающие формы спектров неровностей имеют следующий вид:

- Спектральная плотность поперечных неровностей оси пути (y):

$$\Phi(\Omega) = \frac{k \cdot A_a \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0$$

$\Omega$  – путевая частота, радиан на метр;

$k$  – множитель, варьируемый в пределах 0,25~1, в общем случае 0,25.

- Спектральная плотность вертикальных неровностей оси пути (z):

$$\Phi(\Omega) = \frac{k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0$$

- Спектральная плотность отклонения ширины колеи от номинала (g):

$$\Phi(\Omega) = \frac{4 \cdot k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_s^2)}, \quad \Omega > 0$$

- Спектральная плотность разности высот рельсовых нитей ( $\Delta z$ ):

$$\Phi(\Omega) = \frac{4 \cdot k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_s^2)}, \quad \Omega > 0$$

Параметры функций спектральных плотностей (FRA) для различных классов содержания пути приведены в таблице.

Класс пути	Параметр			
	$A_v$ , см <sup>2</sup> рад/м	$A_a$ , см <sup>2</sup> рад/м	$\Omega_s$ , рад/м	$\Omega_c$ , рад/м
1 (худший)	1,2107	3,3634	0,6046	0,8245
2	1,0181	1,2107	0,9308	0,8245
3	0,6816	0,4128	0,8520	0,8245
4	0,5376	0,3027	1,1312	0,8245
5	0,2095	0,0762	0,8209	0,8245
6 (лучший)	0,0339	0,0339	0,4380	0,8245

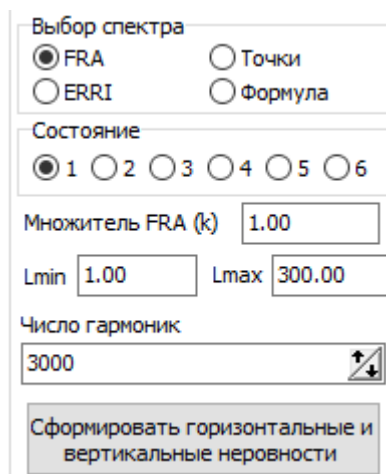


Рис. 8.127. Создание неровностей по спектрам FRA

Шесть позиций **состояния** позволяет создавать неровностей, соответствующих путям различного качества содержания. Минимальная и максимальная длины волн неровностей задаются параметрами **Lmin** и **Lmax** (в метрах), см. рис. 8.127.

Для *автоматической* подготовки группы вертикальных и горизонтальных неровностей обеих рельсовых нитей достаточно нажать кнопку **Сформировать горизонтальные и вертикальные неровности**.

Неровности рельсовых нитей рассчитываются по следующим формулам:

- Вертикальные неровности левой рельсовой нити  $Z_{Left}$ :

$$Z_{Left} = z + \frac{1}{2} \Delta z$$

- Вертикальные неровности правой рельсовой нити  $Z_{Right}$ :

$$Z_{Right} = z - \frac{1}{2} \Delta z$$

- Горизонтальные неровности левой рельсовой нити  $Y_{Left}$ :

$$Y_{Left} = y + \frac{1}{2} g$$

- Горизонтальные неровности правой рельсовой нити  $Y_{Right}$ :

$$Y_{Right} = y - \frac{1}{2} g$$

Созданные реализации вертикальных и горизонтальных неровностей левой и правой рельсовых нитей добавляются в результирующий профиль в следующей последовательности:

- Вертикальные неровности левой нити (...\_Z\_Left)
- Вертикальные неровности правой нити (...\_Z\_Right)
- Горизонтальные неровности левой нити (...\_Y\_Left)
- Горизонтальные неровности правой нити (...\_Y\_Right)

Указанная последовательность соответствует последовательности записей в файле группы неровностей \*.tig.

Для сохранения полученной группы неровностей достаточно выделить четыре составляющих результирующего профиля и выбрать опцию **Сохранить группу**

**неровностей \*.tig...** контекстного меню. При этом в указанном каталоге создается файл **\*.tig** и одноименный подкаталог, содержащий отдельные файлы вертикальных и горизонтальных неровностей группы с расширениями **\*.way**.

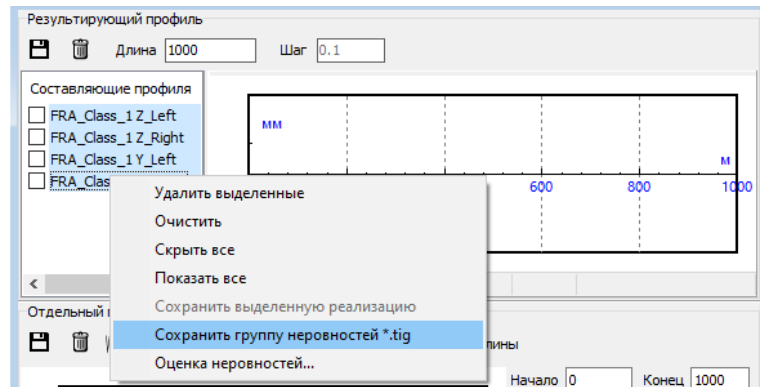


Рис. 8.128. Сохранение элементов результирующего профиля как группы неровностей

### 8.5.1.2.1.5.4. Генерация неровностей по спектрам ERRI

Для моделирования динамики рельсовых экипажей европейские исследователи часто используют схожий с FRA способ описания путевых неровностей (ERRI B176) [13], [15]. В программе заложены спектры, используемые для описания путей хорошего и плохого качества содержания. Обратите внимание, что горизонтальные неровности левой и правой рельсовой нити при описании по ERRI B176 совпадают.

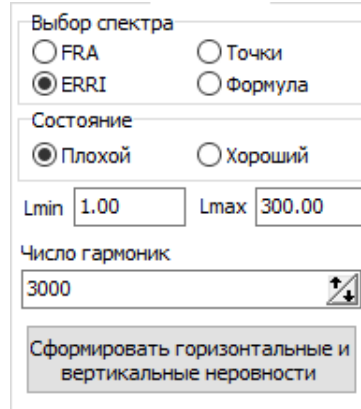


Рис. 8.129. Создание неровностей по спектрам

Функциональные зависимости, описывающие формы спектров неровностей имеют следующий вид:

- Спектральная плотность поперечных неровностей оси пути (y):

$$\Phi(\Omega) = \frac{a_h \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0$$

- Спектральная плотность отклонения ширины колеи от номинала (g):

$$\Phi(\Omega) = \frac{a_g \cdot \Omega_c^2 \cdot \Omega^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_S^2)}, \quad \Omega > 0$$

- Спектральная плотность вертикальных неровностей оси пути (z):

$$\Phi(\Omega) = \frac{a_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0$$

- Спектральная плотность разности высот рельсовых нитей ( $\Delta z$ ):

$$\Phi(\Omega) = \frac{1}{b_A^2} \cdot \frac{\Omega^2}{(\Omega^2 + \Omega_S^2)} \cdot \frac{a_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_R^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad \Omega > 0$$

Параметры функций спектральных плотностей (ERRI B176) для путей различного качества приведены в таблице.

Качество пути	Параметр		
	$a_v$ , м <sup>2</sup> рад/м	$a_h$ , м <sup>2</sup> рад/м	$a_g$ , м <sup>2</sup> рад/м
Плохое	1,08e-6	0,6125e-6	0.1032e-6
Хорошее	0,4032e-6	0,2119e-6	0.0532e-6
Параметр			
$\Omega_c$ , рад/м	$\Omega_R$ , рад/м	$\Omega_s$ , рад/м	$b_A$
0,8246	0,0206	0,4380	0,75

**8.5.1.2.1.5.5. Неровности ПНСТ 511-2020**

Для оценки показателей динамических качеств грузового вагона расчетными методами по ГОСТ 33211-2014 предварительный национальный стандарт Российской Федерации (ПНСТ 511-2020) [16] устанавливает требования к расчетным неровностям железнодорожного пути. Настоящий стандарт распространяется на методы математического (компьютерного) моделирования показателей динамических качеств грузовых вагонов с осевой нагрузкой до 245 кН (25 тс) включительно, предназначенных для обращения на железнодорожных путях шириной колеи 1520 мм.

Вертикальные и горизонтальные расчетные неровности правой и левой рельсовой нити предназначены для диапазона скоростей от 90 до 140 км/ч. Неровности рельсовых нити и группа данных неровностей хранятся в файлах:


- GOST\_RUS\_511\_2020\_1000m\_Y\_left.way;
- GOST\_RUS\_511\_2020\_1000m\_Y\_right.way;
- GOST\_RUS\_511\_2020\_1000m\_Z\_left.way;
- GOST\_RUS\_511\_2020\_1000m\_Z\_right.way;
- GOST\_RUS\_511\_2020\_1000m.tig.

Неровности получены путем интерполяции сплайном натуральных неровностей рельсовых нитей участка железнодорожного пути.

Для других скоростей движения для вертикальных и горизонтальных неровностей применяют масштабные коэффициенты, приведенные в таблице ниже. Тут следует иметь в виду, что масштабные коэффициенты из таблицы ниже следует применять для путей плохого качества, на которых уменьшена максимально разрешенная скорость движения. При моделировании движения по "обычному" пути следует применять единичный масштабный коэффициент на всём диапазоне скоростей.

Максимально разрешенная скорость движения по участку пути, км/ч	Масштабный коэффициент
От 90 до 140 включ.	1,0
От 81 до 90 включ.	1,3
От 61 до 80 включ.	1,5
От 26 до 60 включ.	1,6

### 8.5.1.2.1.5.6. Генерация неровностей по спектру, заданному выражением

В поле *Функция* следует указать аналитическое выражение  $f(w)$  с использованием стандартных функций ([Глава 3](#), п. *Стандартные функции и константы*) и нажать на клавишу *Enter* или щелкнуть на кнопке  в правой части поля ввода. Используйте элемент **Круговая частота** для выбора размерности частоты  $w$  (рад/м или кол/м). Поля **Wmax** и **Wmin** отображают границы интервала частот, рассчитанные по значениям **Lmin** и **Lmax**. Обратите внимание, выражение не должно иметь отрицательных значений на заданном интервале. Выражение может быть задано вручную или выбрано из **Примеров функций спектра**.

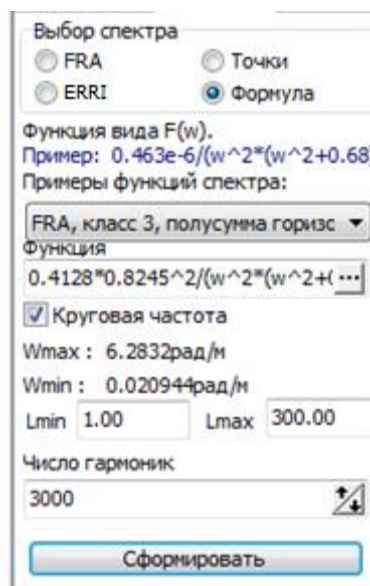
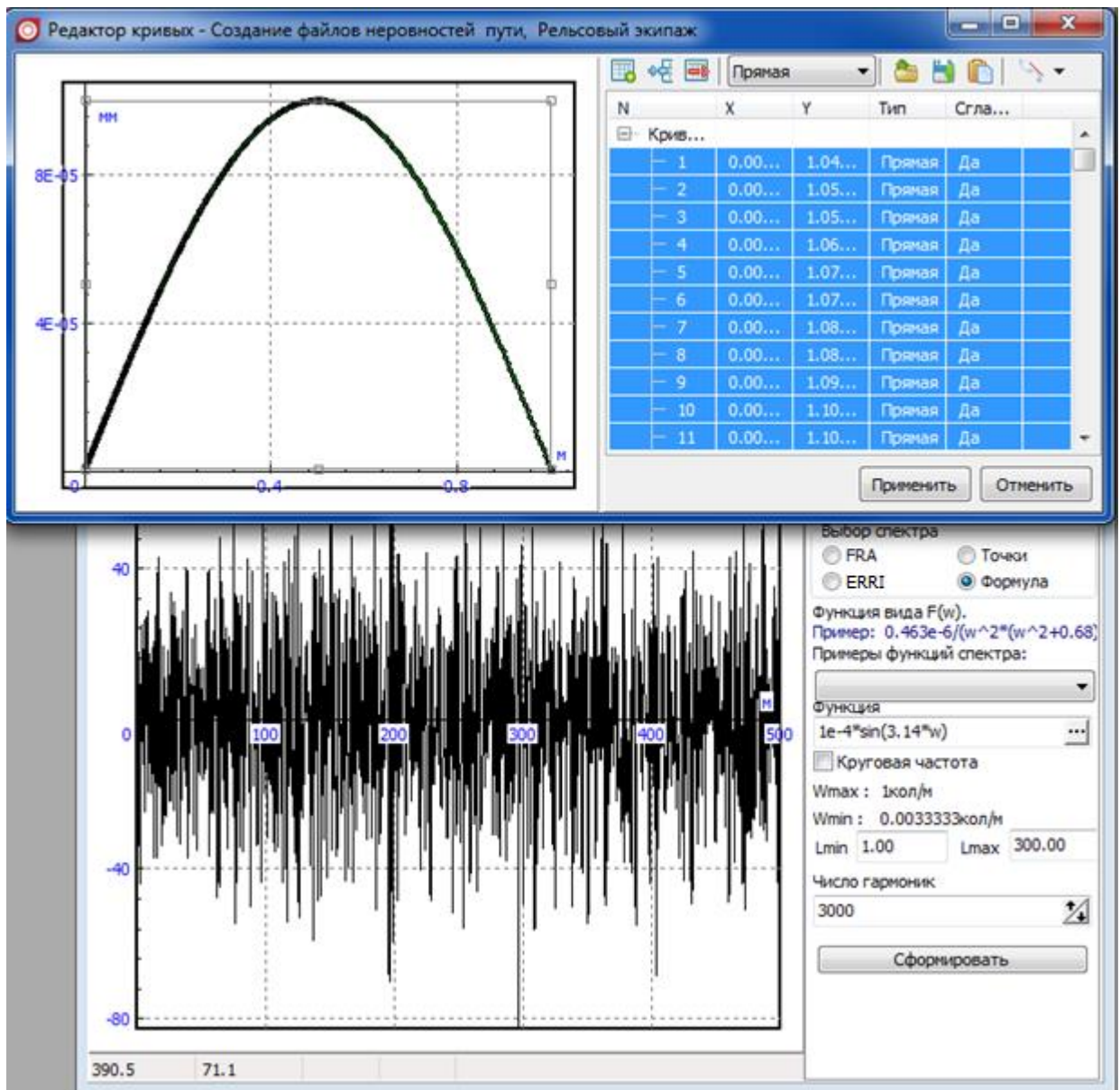


Рис. 8.130. Задание спектральной плотности функцией

Рассмотрим пример создания неровностей со следующими характеристиками:

- $F(w) = 1e-4 * \sin(3.14 * w)$ , где  $w$  – техническая частота, кол/м;
- *Начало: 0 м; Конец: 2000 м.*

Зададим параметры генерируемых неровностей, представленные на рис. 8.131, и добавим получившиеся неровности в результирующий профиль. Теперь неровности пути готовы и могут быть сохранены в файл.



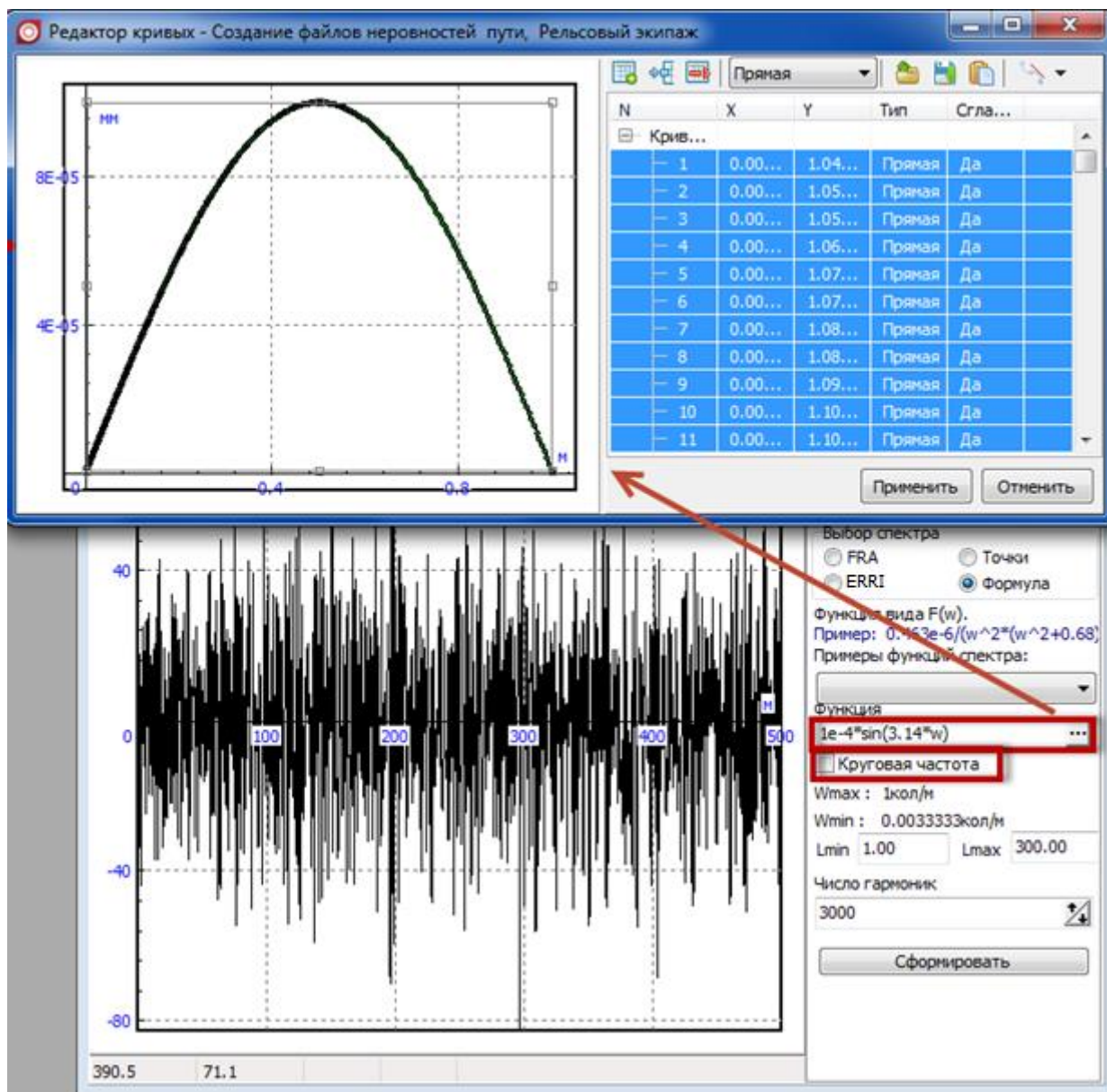


Рис. 8.131. Создание неровностей по спектру, заданному аналитическим выражением

Для сгенерированных неровностей была построена спектральная плотность мощности с помощью окна *Статистики*, рис. 8.132. Видим, что полученная спектральная плотность близка к изначально заданной (в окне *Статистики* были использованы следующие настройки: спектральная оценка Хэннинга, несмещённая корреляционная оценка, отношение  $m/N = 0,0075$ ).

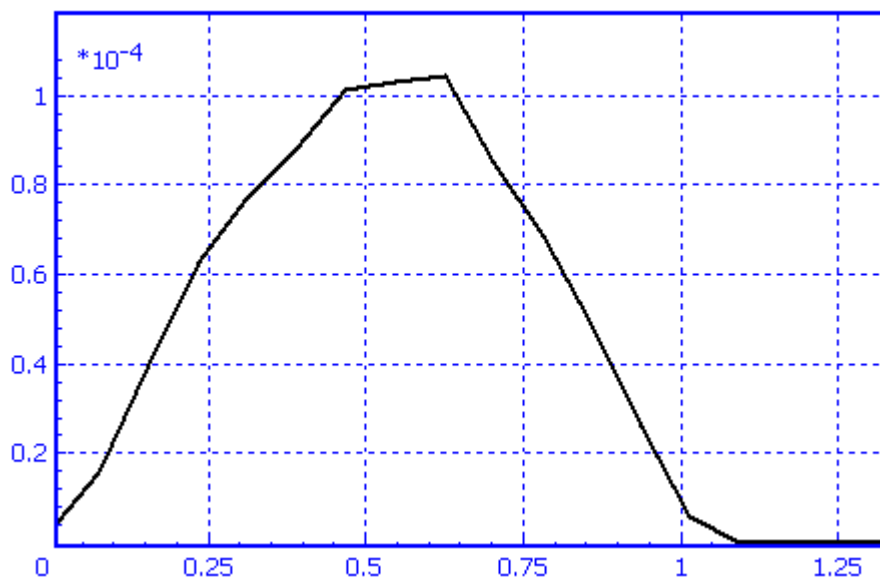


Рис. 8.132. Спектральная плотность мощности полученных неровностей

### 8.5.1.2.2. Программирование неровностей в файле управления

Файл управления – это основной инструмент внешнего программирования в среде UM (Глава 5). Файл управления моделей рельсовых экипажей содержит следующую процедуру.

```
functionTrackProfile( position : real_; varLeftZ, RightZ, LeftY, RightY, der-
LeftZ, derRightZ, derLeftY, derRightY : real_ ) : integer;
begin
Result := 0;
end;
```

В данной процедуре пользователь может запрограммировать горизонтальные и вертикальные неровности рельсов.

Список входных параметров:

*position* – продольная координата в метрах, для которой рассчитываются значения неровностей.

Список выходных параметров:

*Result* – возвращаемое значение функции. При значении 1 неровности будут учитываться, при любом другом значении – игнорироваться;

*LeftZ, RightZ* – значения вертикальных неровностей для левого и правого колеса в метрах;

*LeftY, RightY* – значения горизонтальных неровностей для левого и правого колеса в метрах;

*derLeftZ, derRightZ* – производные от вертикальных неровностей *LeftZ, RightZ* по продольной координате;

*derLeftY, derRightY* – производные от горизонтальных неровностей *LeftY, RightY* по продольной координате.

Рассчитанные в данной процедуре неровности *складываются* с неровностями, назначенными через файлы. Если необходимо, чтобы учитывались только программируемые неровности, назначьте в качестве неровностей файлы *НетНеровностей.way*.

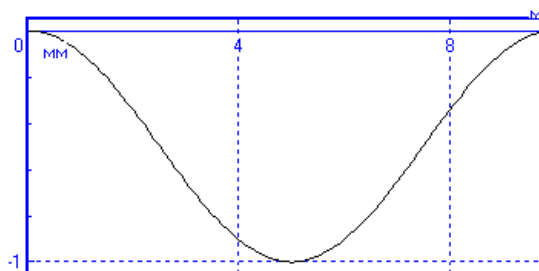


Рис. 8.133. Неровность в виде единичной просадки

В качестве примера рассмотрим программирование единичной просадки (рис. 8.133). Неровность и ее производная для левого заданы формулами

$$h = -\frac{H}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi(x - x_0)}{L} \right);$$

$$h' = -\frac{\pi H}{2L} \sin \frac{\pi(x - x_0)}{L},$$

$$x \in [x_0, x_0 + L].$$

Здесь  $H, L, x_0$  – высота и длина неровности, а также продольная координата, от которой начинается неровность. Пусть такая же неровность для правого рельса сдвинута в продольном направлении на  $dx$  относительно левого рельса. Предполагается, что эти четыре параметра внесены в список идентификаторов модели ([Глава 3](#), п. *Основные элементы конструктора*).

```
function TrackProfile( position : real_; var LeftZ, RightZ, LeftY, RightY,
derLeftZ, derRightZ, derLeftY, derRightY : real_ ) : integer;
begin
Result := 1;
LeftY:=0;
RightY:=0;
derLeftY:=0;
derRightY:=0;


//Неровностьдлялевогорельса
if (position>_pzAll[1].x0) and (position<_pzAll[1].x0 +
_pzAll[1].L) then begin
LeftZ:=
0.5*_pzAll[1].H*(1-cos(pi*(position-_pzAll[1].x0)/
_pzAll[1].L));
derLeftZ:=-0.5*pi*_pzAll[1].H*sin(pi*(position-_pzAll[1].x0)/
_pzAll[1].L))/_pzAll[1].L;
end else begin
LeftZ:=0;
derLeftZ:=0;
end;
//Неровность для правого рельса
if (position>_pzAll[1].x0+dx) and (position<_pzAll[1].x0 +
_pzAll[1].L+_pzAll[1].dx) then begin
RightZ:=-0.5*_pzAll[1].H*(1-cos(pi*(position-_pzAll[1].x0-
_pzAll[1].dx)/_pzAll[1].L));
derRightZ:=-0.5*pi*_pzAll[1].H*sin(pi*(position-_pzAll[1].x0 -
_pzAll[1].dx)/_pzAll[1].L))/_pzAll[1].L;
end else begin
RightZ:=0;
derRightZ:=0;
end;
end;
```

### 8.5.1.3. Создание файла макрогеометрии

Файлы макрогеометрии \*.msg пути используются в следующих случаях:

- Геометрия пути в плане отличается от прямой, отдельной или S-образной кривой и не является отдельным стрелочным переводом;
- Учитывается макрогеометрия пути по вертикали, то есть подъемы и спуски.

Файл макрогеометрии может содержать любое число кривых, прямых участков, обыкновенных стрелочных переводов, значения коэффициентов трения на отдельных участках, а также произвольно заданный вертикальный профиль.

Для создания или редактирования файла следует использовать команду меню **Инструменты | Создание макрогеометрии...** или кнопку .

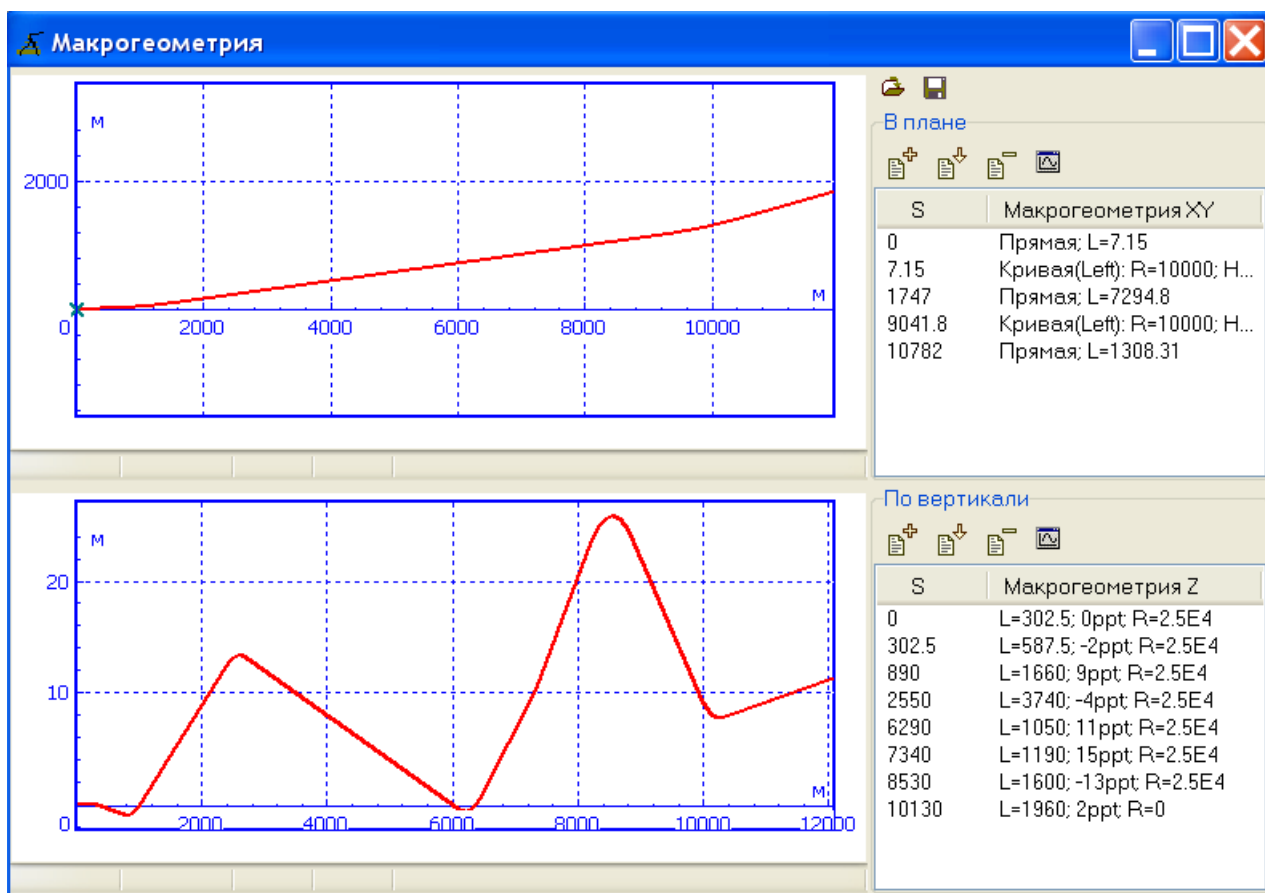



Рис. 8.134. Окно создания файла макрогеометрии

#### 8.5.1.3.1. Геометрия пути в горизонтальной плоскости

Для описания **плана пути** используется правая верхняя часть окна.

- Для **добавления** участка щелкните на кнопке  и выберите тип участка в появившемся меню. Участок добавится к списку.

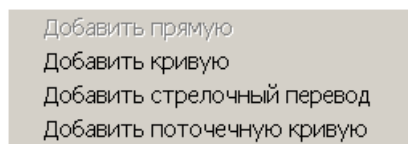


Рис. 8.135. Меню добавления участка плана пути

- Для *редактирования* параметров участка дважды щелкните на соответствующей строке списка участков или выделите строку и нажмите *Enter*.

#### 8.5.1.3.1.1. Прямой участок

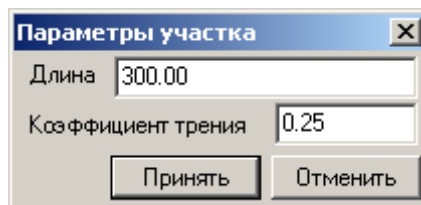


Рис. 8.136. Окно параметров прямого участка

Окно параметров прямого участка содержит численное значение длины и коэффициент трения.

#### 8.5.1.3.1.2. Стандартная кривая

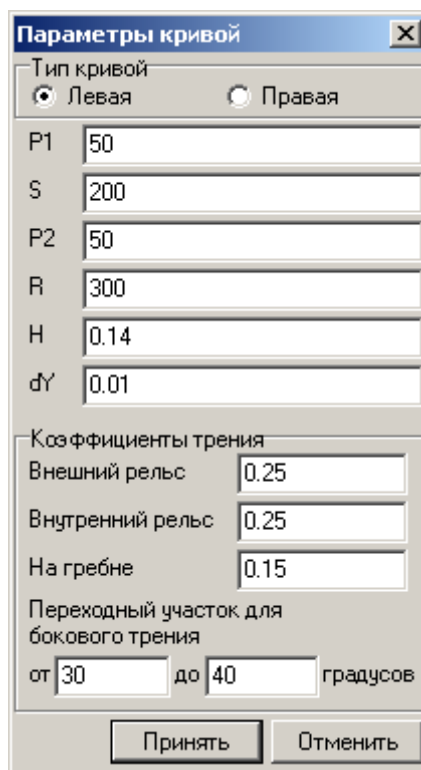


Рис. 8.137. Окно параметров кривой

Окно параметров кривой (см. п. 8.3.1.2. "Макрогеометрия кривой", стр. 8-70) содержит следующие настройки:

- тип кривой (левая или правая);
- геометрические параметры: длины переходных участков (P1, P2), участка кривой постоянного радиуса (S), радиус (R), возвышение наружного рельса (H) и уширение (dY);
- коэффициенты трения на поверхности катания наружного и внутреннего рельсов, на боковой поверхности наружного рельса, а также углы  $\beta_r, \beta_s$ , задающие разделение профиля наружного рельса на зоны различного трения в поперечном направлении при  $f_r \neq f_s$ .

**8.5.1.3.1.3. Стандартный стрелочный перевод**

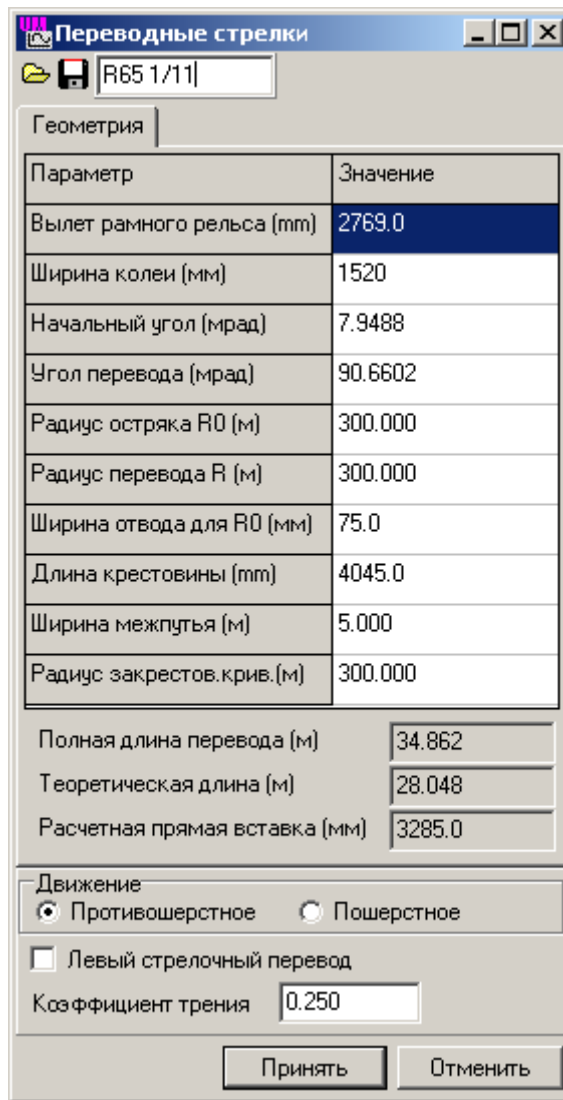


Рис. 8.138. Окно параметров стрелочного перевода

Окно параметров стрелочного перевода содержит значения

- длины вылета рамного рельса  $q$ ;
- ширины колеи;
- начального угла острьяка  $\beta_i$ ;
- угла стрелочного перевода  $\alpha$  (угол крестовины);

- радиуса остряка  $R_0$ ;
- радиуса перевода  $R$ ;
- ширины отвода для  $R_0$ :  $b_r$ ;
- длины крестовины  $m$ ;
- ширины междупутья  $d$ ;
- радиуса закрестовинной кривой  $R_1$ .

По введенным значениям геометрических параметров автоматически рассчитываются

- $L_p$  – полная длина стрелочного перевода;
- $L_f$  – теоретическая длина стрелочного перевода;
- $k$  – длина прямой вставки перед крестовиной.

Дополнительно указываются следующие параметры:

- направление движения в стрелочном переводе (противошерстное, пошерстное);
- тип перевода (левый или правый);
- коэффициент трения в контакте колеса с рельсом.

В базу данных УМ входят параметры стрелочных переводов Р65 1/11 и Р65 1/9.

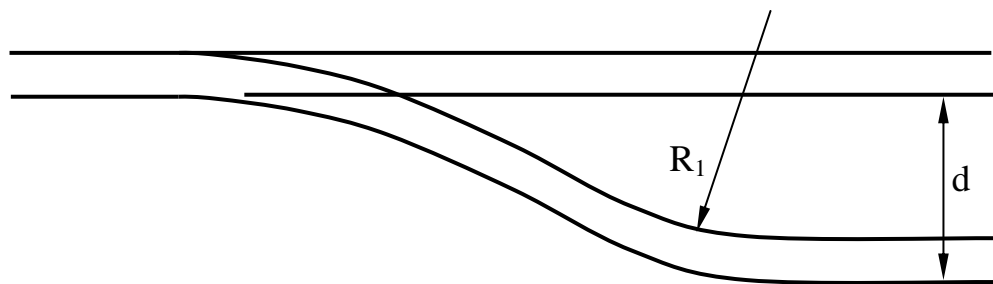
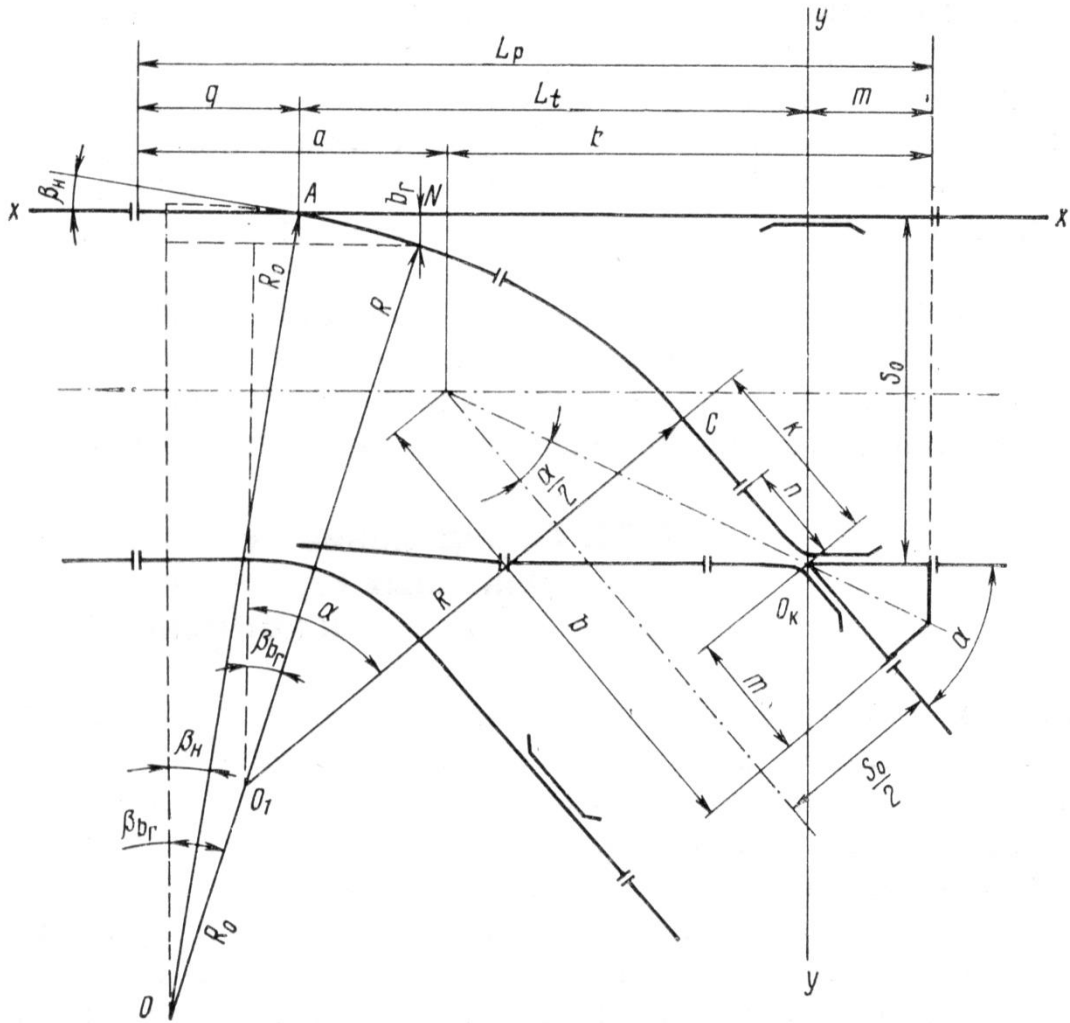



Рис. 8.139. Геометрические параметры стрелочного перевода

### 8.5.1.3.1.4. Поточечно заданный участок плана пути

Данный тип участка ж/д пути позволяет пользователю задать с помощью произвольных функций переходные участки кривых, возвышения, уширения и т.д. Для задания этих функций используется редактор кривых, который открывается с помощью кнопки  и команды *Добавить поточечную кривую*, рис. 8.140.

- **Кривая ХУ**

С помощью набора точек задается положение средней линии пути в плоскости ХУ. Длина участка вычисляется автоматически как длина данной кривой.

**Первая точка должна иметь нулевые координаты. Касательная к кривой в начальной точке должна совпадать с положительным направлением оси Х.**

Нет ограничений на число точек и длину кривой. Например, это может быть экспериментально замеренная кривая центральной линии пути или аналитически рассчитанный участок нестандартного переходного участка кривой.

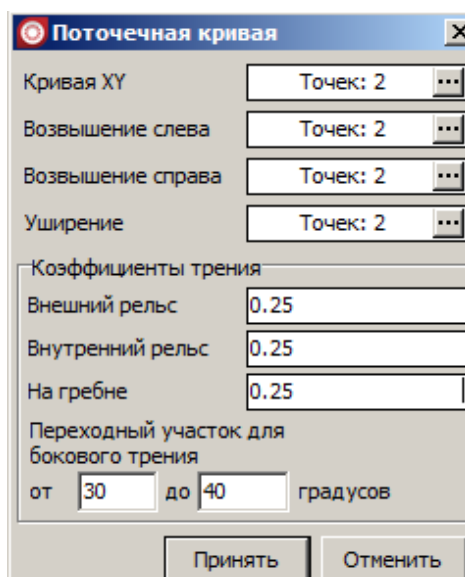


Рис. 8.140. Окно задания поточечной геометрии

В качестве примера переходного участка рассмотрим следующий набор точек:

X	Y	X	Y
0	0	26	0.4394
2	0.0002	28	0.5488
4	0.0016	30	0.675
6	0.0054	32	0.8192
8	0.0128	34	0.9826
10	0.025	36	1.1664
12	0.0432	38	1.3718
14	0.0686	40	1.6
16	0.1024	42	1.8522
18	0.1458	44	2.1296
20	0.2	46	2.4334

22	0.2662	48	2.7648
24	0.3456	50	3.125
26	0.4394		

Этот набор точек получен с помощью MS Excel в виде таблицы, содержащей две колонки. Затем таблица скопирована в буфер обмена и вставлена в редактор кривых (все точки в редакторе следует предварительно удалить!). В результате получена кривая на рис. 8.141. Для сглаживания кривой рекомендуется использовать В-сплайн. Автоматически рассчитанная длина участка показана на рис. 8.142.

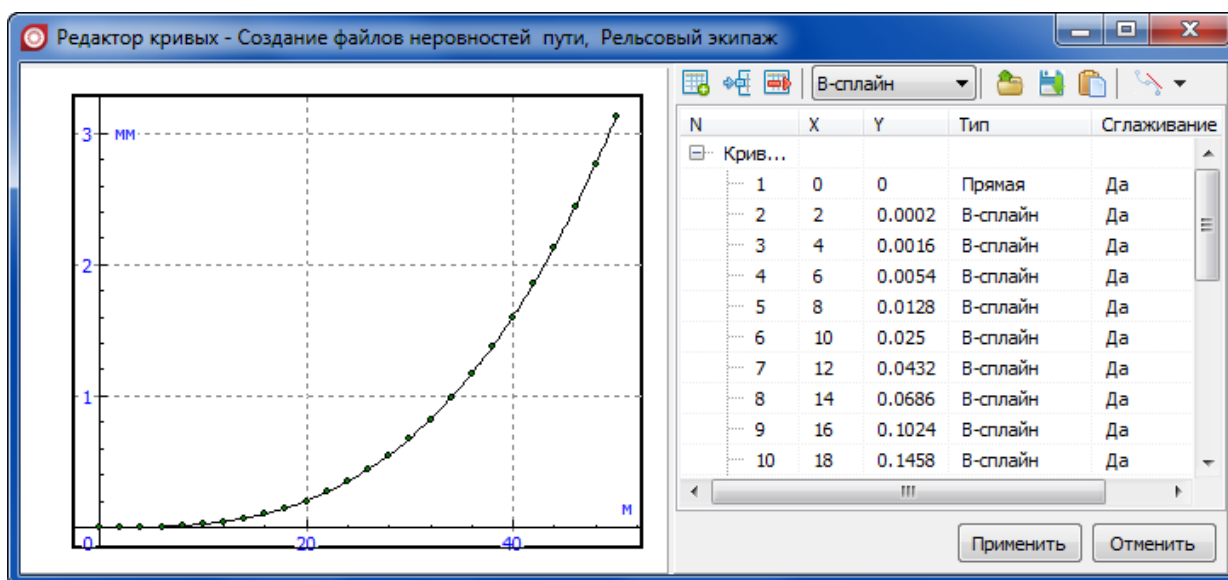


Рис. 8.141. Редактор кривых

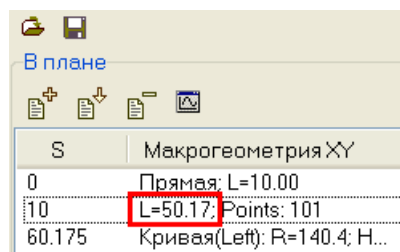


Рис. 8.142. Длина поточечной кривой

**Замечание.** При сглаживании сплайнами вторые производные кривой в начальной и конечной точках обращаются в ноль. Это означает, что иногда вторые производные и, соответственно, кривизны терпят разрывы в точках сопряжения поточечной кривой с другими участками пути. Например, если переходная кривая задана поточечно, а кривая постоянного радиуса – с помощью стандартного участка с нулевой длиной первого участка переходной кривой, имеется разрыв кривизны, рис. 8.143. В противоположность второй производной, первая непрерывна. Если поточечная переходная кривая имеет небольшой шаг задания 1-2 метра, разрыв кривизны не влияет на результаты моделирования. Проблема разрывов может быть решена, если все участки кривой заданы поточечно.

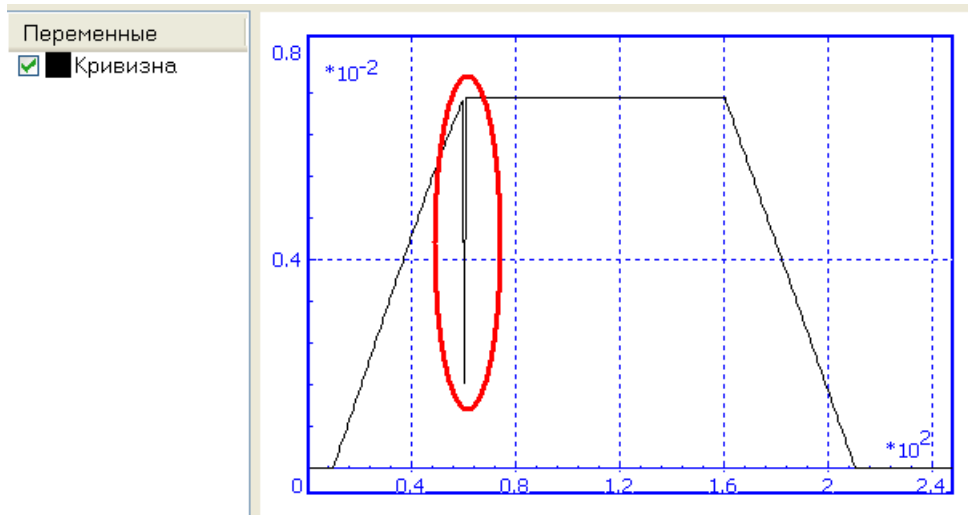


Рис. 8.143. Разрыв кривизны

- Возвышение слева и справа

Как левое, так и правое возвышения задаются поточечной функцией в зависимости от длины вдоль кривой ХУ в метрах. Левое и правое возвышения могут быть одновременно отличны от нуля и принимать как положительные, так и отрицательные значения. При необходимости пользователь может найти значения длины вдоль кривой ХУ в последнем столбце таблицы на рис. 8.141, выделенном прямоугольником.

- Уширение


Уширение задается как поточечная функция в зависимости от длины вдоль кривой ХУ в метрах.

- Параметры трения задаются так же, как и в п. 8.5.1.3.1.2. "Стандартная кривая", стр. 8-135.

**Замечание.** Пользователь должен позаботиться о непрерывности возвышения и уширения как в пределах поточечно заданной кривой, так и при ее сопряжениях с другими участками.

### 8.5.1.3.2. Вертикальный профиль пути

Для задания **профиля** пути используется правая нижняя часть окна.

- Для **добавления** участка щелкните на кнопке  и выберите тип участка в появившемся меню. Участок добавится к списку.

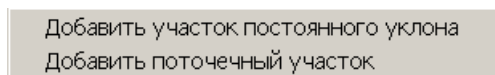


Рис. 8.144. Меню добавления участка профиля пути

- Для **редактирования** параметров участка дважды щелкните на соответствующей строке списка участков или выделите строку и нажмите *Enter*.

### 8.5.1.3.2.1. Участок постоянного уклона

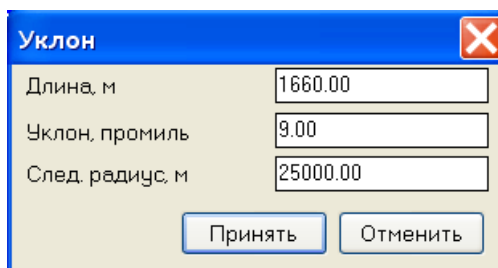


Рис. 8.145. Параметры участка постоянного уклона

Окно параметров участка постоянного уклона позволяет задать следующие параметры (рис. 8.145):

- значение длины участка;
- уклона в промилях;
- радиуса скругления стыка со следующим участком.

### 8.5.1.3.2.2. Поточечно заданный участок профиля пути

Данный тип участка позволяет пользователю задавать зависимость вертикальной координаты пути от путевой координаты с помощью поточечной функции в метрах. Для задания функции используется редактор кривых, который открывается при начале редактировании участка (рис. 8.146).

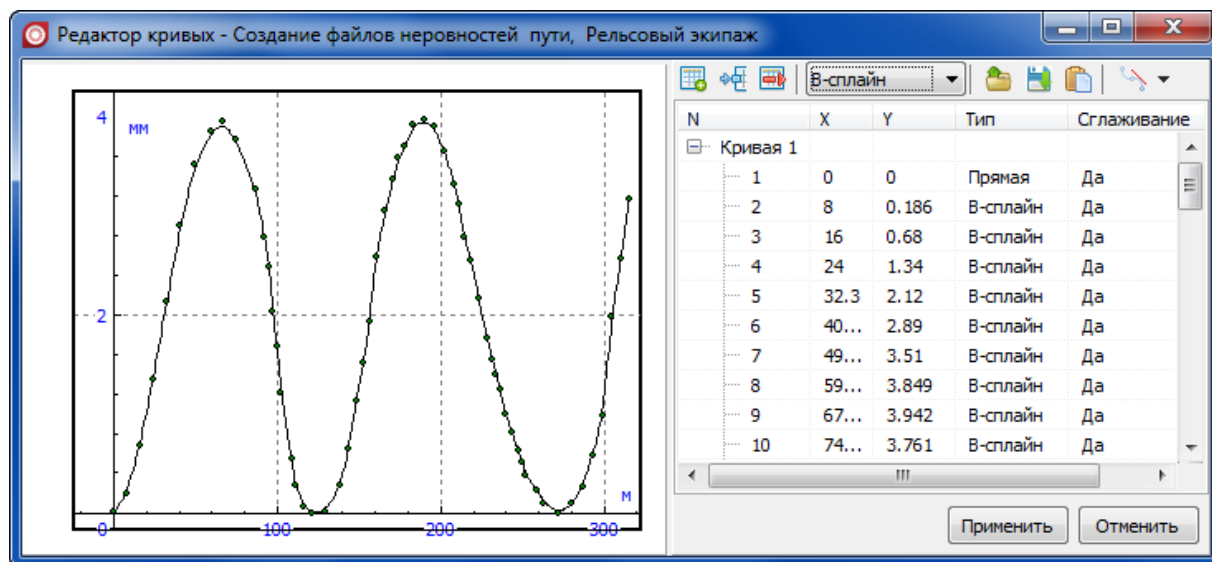


Рис. 8.146. Параметры поточечно заданного участка вертикального профиля

Параметр X соответствует путевой координате, параметр Y – вертикальной координате оси пути. Для сглаживания кривой рекомендуется использовать В-сплайн.

**Замечание.** При стыковке участка постоянного профиля с участком, заданным поточечно, первый должен иметь нулевой радиус скругления стыка со следующим участком, в противном случае будет возникать разрыв профиля.

### 8.5.1.3.3. Импорт результатов тахеосъемки ж/д пути

Тахеосъемка применяется для получения геометрических характеристик пути с привязкой к реальным объектам. Современные методы съемки ж/д пути, основанные на использовании высокоточных оптических тахеометров, уклонометров и GPS-приемников, позволяют для каждой из точек съемки получать набор данных, таких как положение оси пути (X, Y, Z координаты), ширина пути, возвышения рельсов и т.д.

В инструменте **Создание макрогеометрии** реализован интерфейс, позволяющий зачитывать данные съемки из текстовых файлов следующего содержания:

Описание пути							
N0	X	Y	Z	Mark	TW	DZ	Side
		322385.25			1530	100	Право
10000	5953037.719	5	472.55	2 st			
		322375.56			1530	100	Лево
10001	5953045.667	8	472.534	2s "Y2"			

, где

N0 – номер точки съемки (не используются);

X, Y, Z – координаты точки относительно базы (м);


Mark – дополнительные сведения (не используются);

TW – ширина колеи, замеренная в точке (мм);

DZ – возвышение наружного рельса в кривой (мм);

Side – направление поворота кривой (используется для выбора наружного рельса).

Стандартным способом файлы данных подготавливаются в программе Excel, а затем сохраняются как текстовый файл (разделители табуляции).

Для зачитывания данных съемки пути нажмите кнопку  в верхнем правом углу мастера создания макрогеометрии. В открывшемся окне (рис. 8.147) выберите файл данных, стандартную ширину колеи для участка и способ аппроксимации зачитываемых кривых.

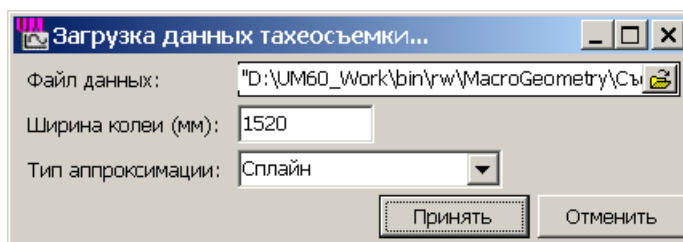



Рис. 8.147. Зачитывание данных тахеосъемки

После зачитывания данных в списки элементов плана и профиля пути добавляются поточечные участки (см. п. 8.5.1.3.1.4. "Поточечно заданный участок плана пути", стр. 8-139). Начало зачитанной кривой совмещается с последней точкой плана и профиля. Длина зачитываемого участка принимается равной длине участка в плане (по координатам X, Y). Пользователь может корректировать способ сглаживания зачитанных последовательностей, а также сами данные.

**Замечание.** Следует помнить, что уширение колеи, возвышения рельсов и вертикальная координата оси пути задаются относительно путевой координаты, рассчитываемой по кривой ХУ. При изменении кривой ХУ длина участка может измениться, что может привести к искажению данных. Поэтому не рекомендуется изменять данные кривой ХУ, и выбирать способ аппроксимации кривой на стадии импорта данных

### 8.5.1.4. Создание файла геометрических параметров стрелочного перевода

Для создания или редактирования файла параметров стрелочного перевода \*.swt используется команда меню **Инструменты | Стрелочный перевод** .

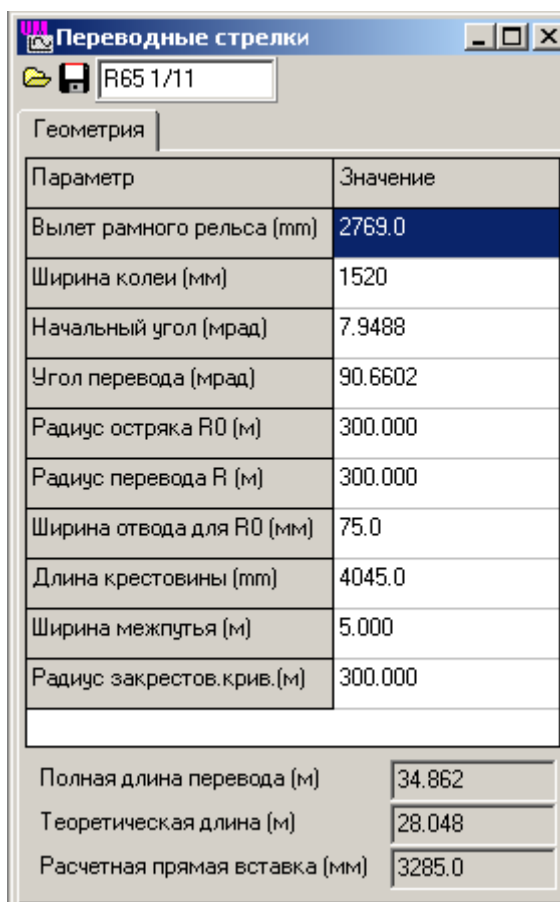


Рис. 8.148. Окно параметров стрелочного перевода

В верхнем текстовом поле можно указать название перевода. Значения параметров, задающих геометрию стрелочного перевода, указаны в предыдущем разделе.

### 8.5.1.5. Оценка состояния пути

В программном комплексе «Универсальный Механизм» реализован инструмент Анализ неровностей, позволяющий производить оценку геометрических параметров рельсовой колеи в соответствии с инструкциями, принятыми МПС РФ.

#### 8.5.1.5.1. Постановка задачи

Положениями РЖД (ЦП-515, ЦП-774, приказы МПС России от 1 сентября 2001 года №27Ц и №20 от 27 апреля 2002 года) утверждена процедура и критерии оценки неровностей рельсовых нитей – установлены контрольные параметры, введена система допусков, позволяющая отнести отклонения каждого из контрольных параметров к одной из четырех степеней, введена балловая и качественная оценка участков пути. Путевая служба РЖД проводит регулярные проверки состояния пути с использованием современных средств контроля – вагонов-путеизмерителей. В процессе движения контрольно-измерительная система вагона проводит комплекс измерений, на основании которых восстанавливаются контрольные параметры. Результаты анализа неровностей участка пути хранятся в РЖД в форме отчета, содержащего качественную и балловую оценки каждого проверенного километра пути и дистанции в целом, положение зафиксированных отклонений на километре. На основании полученных результатов устанавливается максимальная допустимая скорость движения на участке (либо закрывается движение до устранения выявленных отклонений) и организуется работа путевых служб.

Инструмент **Оценка состояния пути** используется при подготовке путевых неровностей для заданного качества содержания пути, а также для оценки состояния пути для замеренных или сгенерированных реализаций неровностей рельсовых нитей. Так, например, при анализе причин сходов подвижного состава, путевые службы располагают данными о состоянии пути в форме отчета последнего проезда путеизмерительного вагона, включающего балловую/качественную оценку участка (километра) пути и описание выявленных отклонений геометрии. Однозначно восстановить путевые неровности по этим данным не удастся. Поэтому возникает необходимость оценки восстановленных или сгенерированных, например, по спектру, неровностей для приведения в соответствие с реальным состоянием пути.

- **Контрольные параметры**

Согласно «Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути / МПС России, 2000» ЦП-755 и «Инструкции по расшифровке лент и оценки состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов / МПС России, 1997» ЦП-515 нормируются следующие виды отклонений геометрии пути от номинальных значений:

- *Уширение колеи / Сужение колеи*

Ширина колеи измеряется с помощью двух роликов, прижимаемых к внутренним боковым граням головок рельсов обеих нитей на уровне от поверхности катания колеса по рельсу 13 мм.

Ширина колеи определяется как разность горизонтальных отклонений неровностей правой и левой рельсовых нитей.

- *Отступление по уровню / Перекос*

Уровень – взаимное положение рельсов в плоскости, поперечной оси пути. Отклонения рельсовых нитей по уровню делятся на плавные отклонения и перекосы пути. К перекосам пути относятся резкие изменения положения рельсовых нитей по уровню в разные стороны при расстоянии между вершинами записи амплитуд отклонений 20 м и менее. При этом к перекоосу относятся и его ветви (по 5 метров за вершинами перекосов). Если перекос, размах которого не превышает 6 мм, накладывается на перекос с большим размахом (расстояние между экстремумами большего размаха не превышает 20 м), малый перекос не учитывается.

Запись уровня рассчитывается как разность вертикальных неровностей правой и левой рельсовых нитей.

- *Просадка рельсовых нитей*

Просадки – короткие просадки (или «бугры») рельсовых нитей в продольном направлении пути. Оценке подлежат просадки длиной до 6 м включительно.

- *Положение пути в плане*

Оценивается разностью смежных стрел изгиба от середины хорды длиной 20 м (понимается размах разносторонних отклонений от нулевого уровня записи стрелы, измеренной от середины хорды длиной 20 м). Учет и оценка отступлений пути в плане производится: в круговых и переходных кривых – по наружной нити; в прямых – по рихтовочной нити, а отступлений IV степени – по любой нити. Отступления в плане учитываются по разности смежных стрел при расстоянии между их вершинами до 20 м включительно.

Кроме перечисленных фиксируются сочетания отклонений, требующие ограничения установленной скорости движения поездов:

- одно или более сочетание отступления в плане 3 степени с перекосом или просадкой 3 степени для данного интервала скоростей; при этом к сочетающимся, относятся отступления расстояния между вершинами которых, измеренные по нулевой линии на прямой, накладываются одно на другое;
- три и более смежных отступления в плане III степени на длине 75 м и менее по рихтовочной нити на кривых; на прямых – независимо от нити;
- смежные разносторонние отклонения по уровню (аналогичные перекоосу) с амплитудой, большей удвоенного отступления III степени для данного интервала скоростей, с расстоянием между вершинами отклонений более 20 м до 30 м включительно;
- более 6 отступлений 3 степени на километре по уровню, перекосам, просадкам и в плане.

На основании приказов МПС России от 1 сентября 2001 года № 27Ц и приказа № 20 по МПС России от 27 апреля 2002 года в «Инструкцию по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов» были внесены следующие изменения и дополнения:

25. «В кривых участках пути с радиусами 850 метров и менее, уложенных на деревянные шпалы, и с радиусами 650 метров и менее на железобетонные шпалы допускаемая скорость грузовых поездов, имеющих в своем составе порожние грузовые вагоны,

ограничивается до 60 км/ч при наличии следующих последовательностей и сочетаний отступлений:

- Трех и более просядок II степени, периодически повторяющихся по обеим рельсовым нитям на длине 30 метров и менее;
- При обнаружении на отрезке длиной 100 метров следующих отступлений:
  - восьми и более просядок II степени;
  - или трех и более отступлений по рихтовке II степени до 20 метров включительно;
  - или двух и более перекосов II степени при расстоянии между вершинами пик 10 метров и менее;
  - или при сочетании на длине 12 метров и менее отступления по рихтовке II степени с длиной 20 метров и менее с перекосом II степени длиной 10 метров и менее или просядкой II степени;
  - или при наличии хотя бы одной неисправности III степени по перекосам длиной 10 метров и менее, просядкам, отступлениям по рихтовке длиной 20 метров и менее.

Километр, имеющий указанные отступления в кривых радиусом 850 метров и менее, уложенных на деревянные шпалы, и с радиусами 650 метров и менее на железобетонные шпалы, оценивается как «неудовлетворительный» в 500 баллов».

26. Для кривых участков пути с установленными скоростями грузовых поездов более 60 км/ч, подпадающих под критерии, изложенные в подпункте 1, ввести нормирование перекосов и отступлений в плане длиной до 10 м включительно.

27. «При оценке отступлений в геометрии рельсовой колеи скорости принимаются равными установленным скоростям для всего перегона».

При автоматической расшифровке отступление учитывается по более высокой степени, если его величина превышает нижнюю границу этой степени более чем на 0,6 мм.

- **Балловая и качественная оценка участка пути**

В соответствии с нормативной базой «качественная и балловая оценки состояния рельсовой колеи на километре устанавливаются в зависимости от степени и количества обнаруженных на нем отступлений, а на линейном участке, дистанции пути — исходя из среднего количества баллов, получаемого делением общей суммы баллов на число проверенных километров на подразделении».

Методика расшифровки отступлений, балловой и качественной оценки состояния рельсовой колеи на километре, линейном подразделении, дистанции пути приведена в табл. 8.3.

При наличии отдельных отступлений, последовательностей и сочетаний отступлений, перечисленных в пункте 3.3 ЦП-515, требующих ограничения скорости.

28. Для всех участков. Для кривых радиусом 850 метров и менее, уложенных на деревянные шпалы, и с радиусами 650 метров и менее на железобетонные шпалы при отсутствии последовательностей и сочетаний отступлений II степени, а так же отступлений III степени перечисленных в пункте 3.3 ЦП-515.

29. По просядкам, перекосам, отступлениям в плане.

30. По уровню, просядкам, перекосам, отступлениям в плане (по ширине колеи «удовлетворительно» при количестве отступлений III степени не более 10).

- 31. В кривых радиусом 850 метров и менее, уложенных на деревянные шпалы, и с радиусами 650 метров и менее на железобетонные шпалы при наличии последовательностей или сочетаний отступлений II, а также при наличии отступлений III степени, перечисленных в п.3.3 ЦП-515 с ограничением скорости для поездов с порожними грузовыми вагонами до 60 км/ч.
- 32. Скорость движения ограничивается до 60 км/ч.
- 33. Перечень участков магистральных линий с установленными скоростями движения 60 км/ч и менее, на которых километры относятся к «неудовлетворительным» при наличии 602) или 80 отступлений II степени на километр с ограничением скорости до 50 км/ч, устанавливается МПС России.

Таблица 8.3

**Качественная и балловая оценка состояния рельсовой колеи**

Качественная оценка состояния рельсовой колеи	Количественные критерии качественной оценки состояния рельсовой колеи				
	На километре			На подразделении	
	Количество отступлений по степеням			Балловая оценка километра	Среднее кол-во баллов на километре
	II	III	IV <sup>1)</sup>		
На участках со скоростями движения поездов более 60 км/ч					
Отлично (O) <sup>2)</sup>	До 5	0	0	10	До 25 вкл.
Хорошо (X) <sup>2)</sup>	6-25	0	0	40	Более 25 до 80 вкл.
Удовлетворительно (Y) <sup>2)</sup>	Более 25 до 80 или 603)	0	0	150	Более 80 до 180 вкл.
Удовлетворительно (Y) <sup>2)</sup>	Не более 80 или 603)	1-64)	0	150	Более 80 до 180 вкл.
Неудовлетворительно (H) <sup>5)</sup>	5)	5)	0	500	Более 180
Неудовлетворительно (H) <sup>6)</sup>	Более 80 или 603)	Независимо	0	500	Более 180
Неудовлетворительно (H)	Независимо	Более 64)	0	500	Более 180
Неудовлетворительно (H)	Независимо		1 и более	500	Более 180
На участке со скоростями движения поездов 60 км/ч и менее <sup>7)</sup>					
Отлично (O)	До 3	0	0	10	До 25 вкл.
Хорошо (X)	4-12	0	0	40	Более 25 до 80 вкл.
Удовлетворительно (Y)	Более 12	0	0	150	Более 80 до 180 вкл.

Удовлетворительно (У)	Независимо	1-34)	0	150	Более 80 до 180 вкл.
Неудовлетворительно (Н)	Независимо	Более 34)	0	500	Более 180
Неудовлетворительно (Н)	Независимо		1 и более	500	Более 180

### 8.5.1.5.2. Анализ состояния пути

Оценка состояния пути основывается на анализе записи вертикальных и горизонтальных неровностей рельсовых нитей, рассматриваемых в качестве отклонений от номинальной геометрии пути. Критерии и допуски оценки отклонений определяются с учетом номинальных параметров (рихтовочная нить, тип шпал, номинальная ширина колеи, радиус и возвышение рельса в кривой и пр.) и эксплуатационных характеристик пути (типы подвижного состава, установленная скорость движения).

Инструмент **Оценка состояния пути** позволяет производить оценку состояния участков пути с неизменными номинальными параметрами и эксплуатационными характеристиками. Реализована также оценка состояния пути в переходных кривых (номинальные параметры изменяются вдоль пути). Предусмотрено сохранение результатов оценки в текстовый файл.

С точки зрения структурного деления путевого хозяйства исследуемый участок пути соответствует *рабочему (линейному) отделению* пути.



Рис. 8.149. Структурное деление путевой структуры

Оценка километровых участков *рабочего отделения* ведется в соответствии с положениями РЖД. Если на конец участка приходится неполный километр, то его оценка производится на основании числа зафиксированных отклонений с учетом приведения к полному километру (если  $n_1$  – число отклонений на участке длиной  $l_1 < 1000$ м, то  $n_2$  – число отклонений, учитываемых при выставлении оценки, равняется  $n_1 \cdot 1000 / l_1$ ).

Результатом работы инструмента **Оценка состояния пути** является выставление балловой и качественной оценки участку пути, а также ведомости выявленных отклонений контрольных параметров.

Рассмотрим структуру данного инструмента и значения отдельных элементов.

### Интерфейс инструмента

Работа с инструментом **Оценка состояния пути** начинается с описания рабочего отделения пути (закладка *Описание пути*, см. рис. 8.150).

На закладке *Описание пути / Неровности* выбираются и корректируются реализации путевых неровностей, на закладке *Описание пути / Параметры* задаются параметры участка, в соответствии с которыми выбираются допуски и критерии оценки пути.

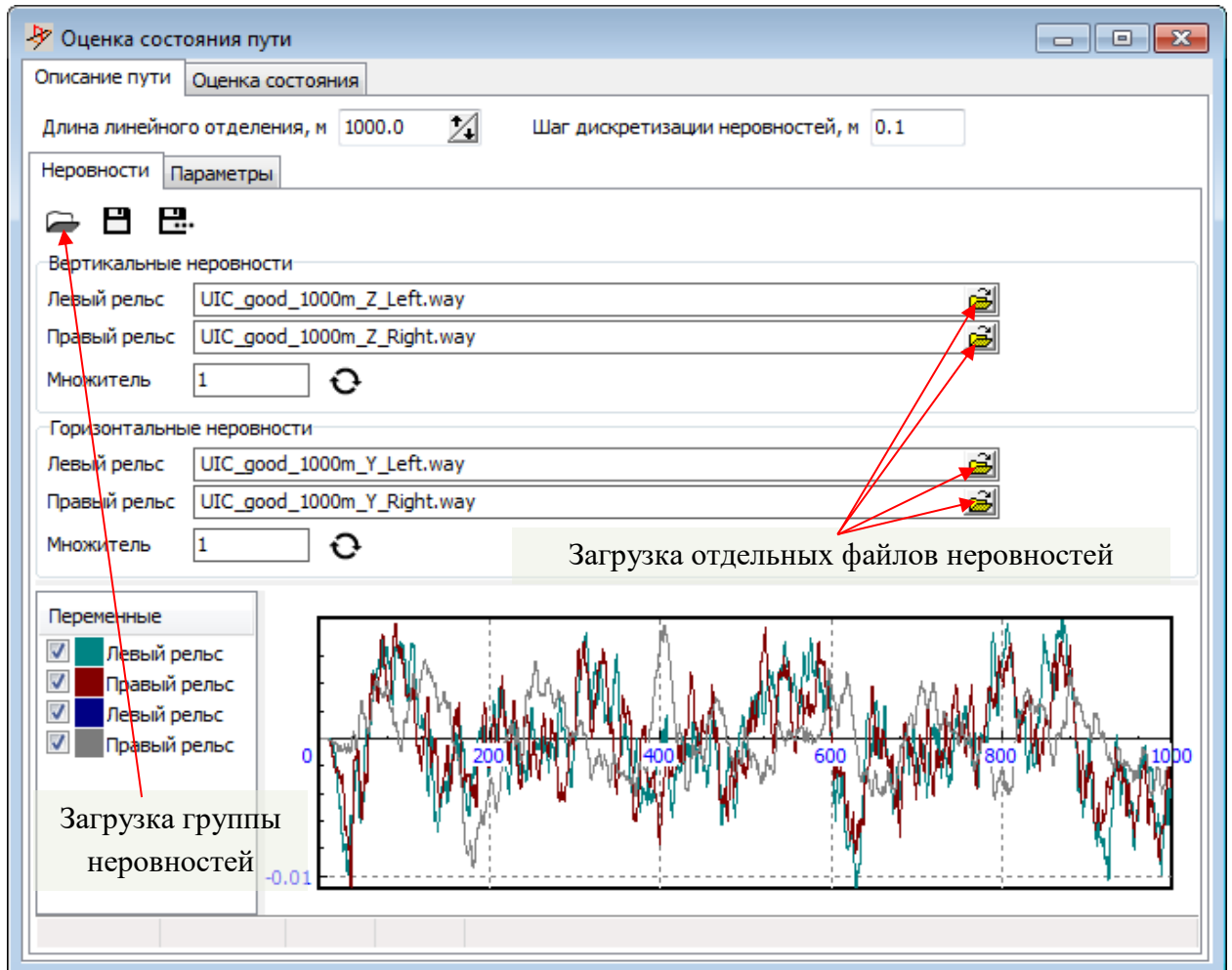



Рис. 8.150. Анализ неровностей: работа с файлами неровностей


Файлы вертикальных и горизонтальных неровностей рельсовых нитей могут быть загружены по отдельности, либо зачитаны из группы неровностей **\*.tig**. Предусмотрен также импорт группы неровностей из инструмента **Создание неровностей**, см. п. 8.5.1.2.1. "Создание файлов неровностей", стр. 8-114.

*Длина линейного отделения* выбирается по максимальной длине загруженных реализаций неровностей и может быть изменена пользователем. Если указанная длина превышает длину реализации неровностей, то ее в конец реализации добавляется участок без неровностей.

Изменяя значения в поле *Множитель* можно пропорционально менять величину неровностей.

Для сохранения файлов неровностей с учетом масштабных коэффициентов и *длины линейного отделения*, используйте кнопку . По выбранному пути будет создан файл

группы неровностей \*.tig, а также одноименная директория, содержащая новые файлы неровностей.

Для создания файла группы неровностей \*.tig без изменения файлов неровностей \*.way, используйте кнопку  (Сохранить файл \*.tig). Созданный файл будет содержать ссылки на исходные файлы неровностей.

Для задания номинальных параметров линейного отделения используется закладка Параметры, см. рис. 8.151.

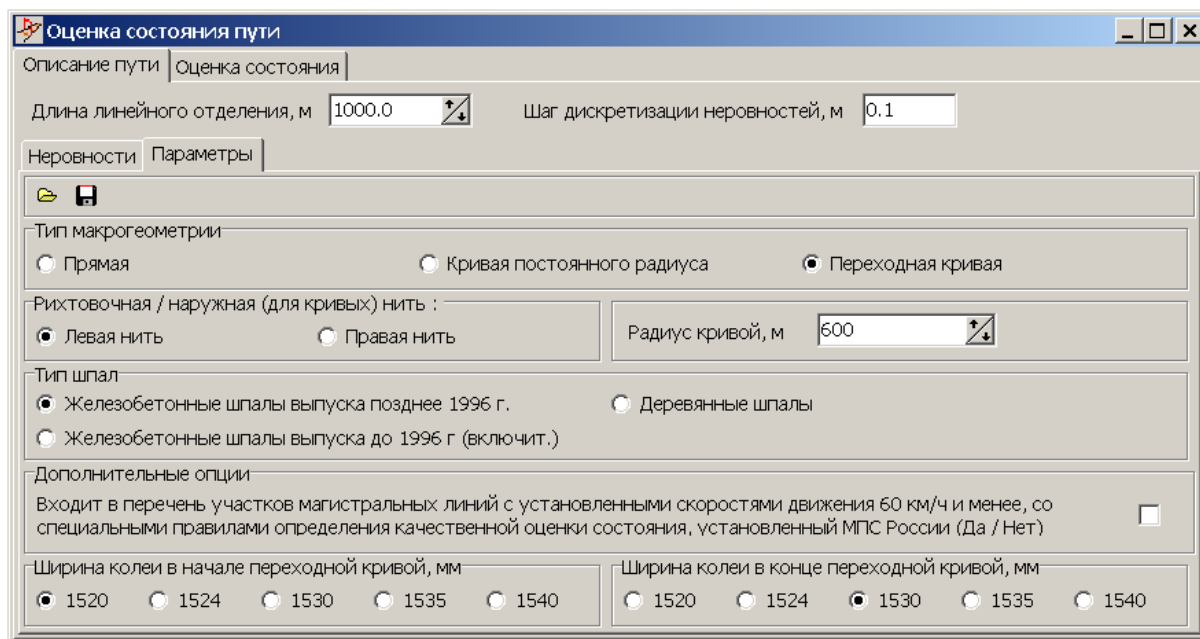




Рис. 8.151. Задание номинальных параметров пути

Рассмотрим значения отдельных элементов закладки:

- *Тип макрогеометрии* позволяет указать, соответствуют ли заданные неровности прямому участку, кривой постоянного радиуса или переходной кривой;
- Параметр *Рихтовочная нить* используется при оценке положения пути в плане и выявлении опасных сочетаний отступлений;
- Для кривых постоянного радиуса и переходных кривых указывается *Радиус кривой*;
- *Номинальная ширина колеи* может варьироваться от 1520мм до 1540мм, используется при классификации отступлений по ширине колеи. Для переходных кривых указывается два параметра *Ширина колеи в начале переходной кривой*, *Ширина колеи в конце переходной кривой*.
- *Тип шпал* определяет предельные допуски отклонений по ширине колеи;
- Дополнительно указывается, *входит ли рассматриваемый участок в перечень участков магистральных линий с установленными скоростями движения 60 км/ч и менее, со специальными правилами определения качественной оценки состояния, установленный МПС России* (позначить галочкой, если да).

К эксплуатационным характеристикам участка отнесены *Тип подвижного состава* (*Грузовой без порожних вагонов*, *Грузовой с порожними вагонами* и *Пассажирский*) и *Установленная скорость движения, км/ч*.

Заданные настройки параметров могут быть сохранены в файл параметров участка \*.tap и загружены из файла с помощью кнопок  и , расположенных в верхней части панели настроек.

Для задания эксплуатационных характеристик участка пути, и, непосредственно, оценки состояния пути необходимо перейти на закладку *Оценка состояния* инструмента, см. рис. 8.153.

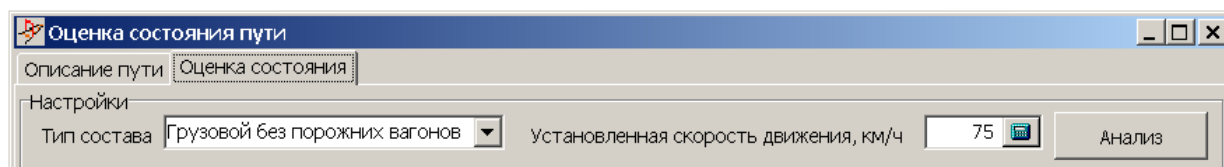


Рис. 8.152. Задание эксплуатационных характеристик участка

Процедура оценки неровностей запускается нажатием кнопки **Анализ**. Результаты оценки состояния исследуемого пути с учетом заданных параметров отображаются в поле *Результаты* и включают ведомость оценки состояния рельсовой колеи на километрах рабочего отделения (закладка *Оцениваемый участок*) и ведомости выявленных отступлений для каждого из километров (закладка *Километровые участки*), см. рис. 8.153.

При необходимости можно вернуться к заданию неровностей или параметров участка и повторить оценку. При изменении исходных данных результаты очищаются.

С помощью кнопки **Сохранение результатов**, расположенной в нижней части панели *Результаты*, характеристики линейного отделения и результаты оценки могут быть сохранены в текстовый файл с разделителями табуляцией (для просмотра удобно использовать MS Excel).

На закладке *Оцениваемый участок* указывается *Балловая* и *Качественная оценка* участка, рассчитываемая по балловой оценке отдельных километров, а также количество отступлений по видам для каждого километра. Контрольные параметры имеют следующие обозначения: *Суж* – сужение колеи; *Уш* – уширение колеи; *П* – перекосы; *Пр* – просадки; *Р* – разность стрел (рихтовка). В числителе указывается число отступлений II степени, в знаменателе – число отступлений III степени. В отдельные столбцы ведомости вынесены: количество отклонений IV степени, а также качественная и балловая оценка каждого из километров и участка в целом.

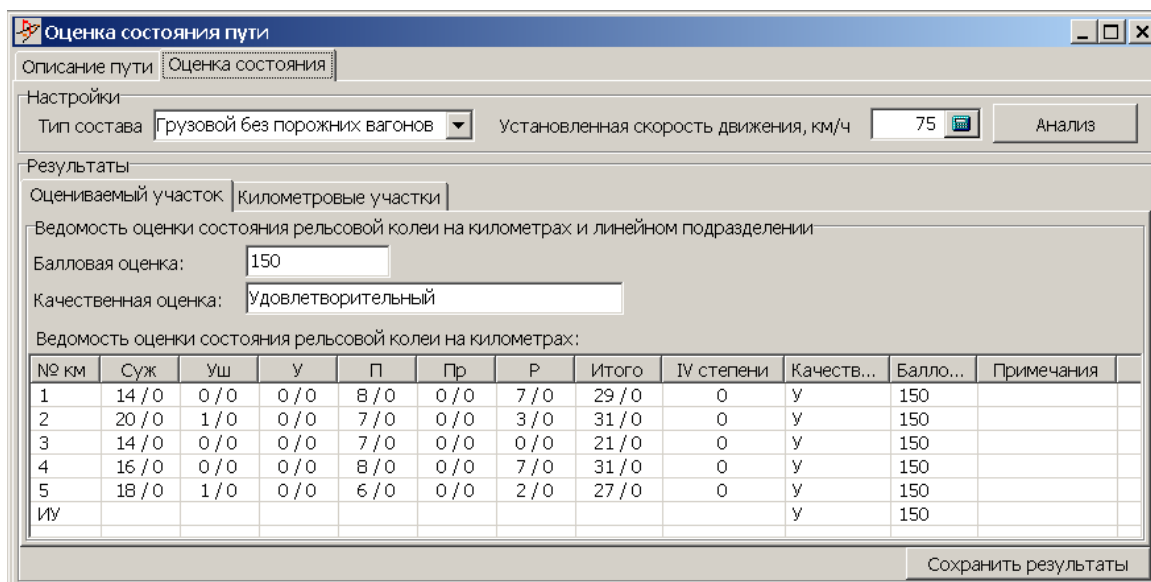


Рис. 8.153. Представление результатов: сводная ведомость состояния оцениваемого участка

Для доступа к результатам оценки отдельных километровых участков необходимо перейти на закладку *Километровые участки* и выбрать номер километра [1,2,3...], см. рис. 8.154.

В полях *Начало участка*, *Конец участка* отображаются границы выбранного участка, что позволяет отслеживать полноту километра (последний километр может быть неполным, если длина исследуемого пути не кратна 1000 метров).

Результаты оценки километра пути приведены на нескольких закладках.

- На закладке *Сводная ведомость* выводится *Балловая* и *Качественная оценка* километра (в соответствии с табл. 8.3), ведомость отступлений по типам контрольных параметров и классам, а также реализации неровностей, соответствующих рассматриваемому километру. Остальные закладки (*Уширения/Сужения колеи*, *Перекосы/Уровень*, *Просадки*, *Рихтовка*, *Сочетания отклонений*) содержат ведомости выявленных отклонений каждого из контрольных параметров, а также их опасных сочетаний.

Для перехода на закладку достаточно дважды щелкнуть по соответствующей строке ведомости отклонений.

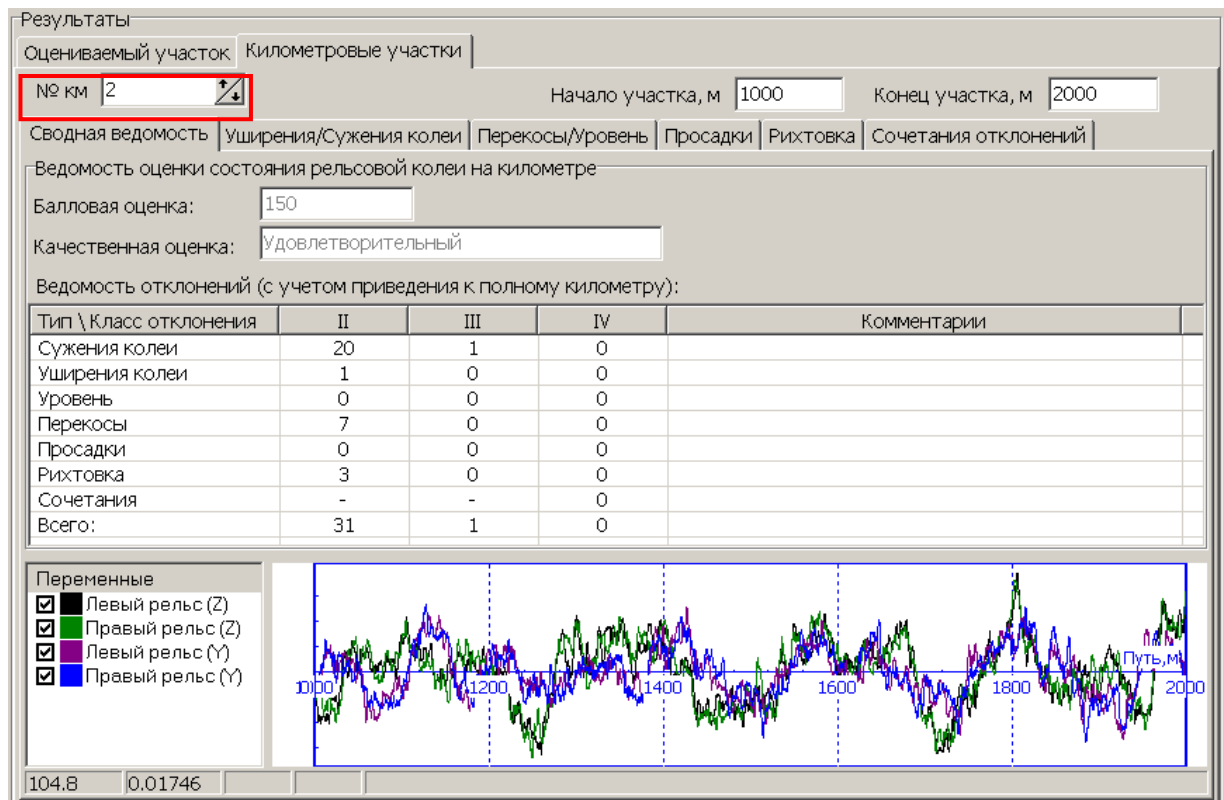


Рис. 8.154. Представление результатов оценки километровых участков пути

- Закладка *Уширение/Сужение колеи* (см. п. 8.5.1.5.1. "Постановка задачи", стр. 8-146) содержит две ведомости выявленных отклонений по *уширению колеи* (слева) и *сужению колеи* (справа) в следующем формате: порядковый номер; класс отступления; допуск отклонения контрольного параметра, соответствующего данному классу, в метрах; координаты начала и конца отклонения в метрах, см. рис. 8.155.

Данные представленные в ведомостях могут быть отсортированы по возрастанию/убыванию щелчком мыши на заголовке столбца.

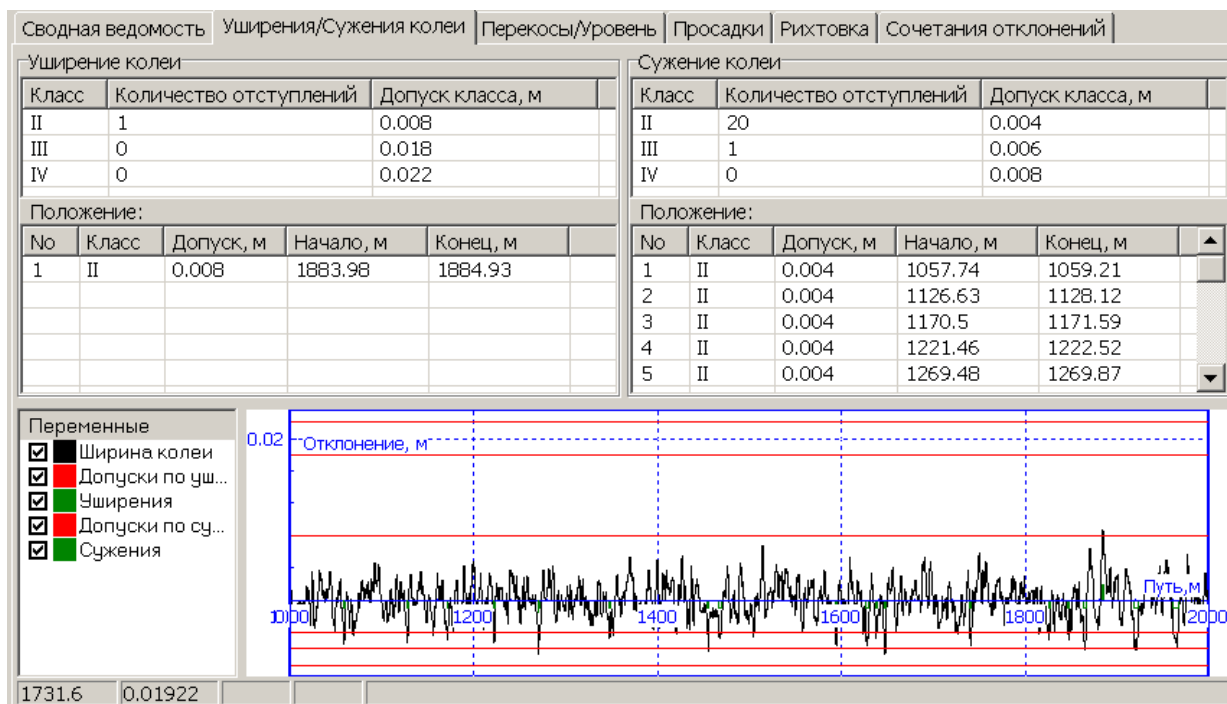


Рис. 8.155. Закладка Уширение/Сужение колеи

Запись изменения контрольного параметра – ширины колеи, границы допусков по уширению и сужению, а также метки выявленных отклонений представлены на графике в нижней части закладки. Для увеличения участка графика с отклонением достаточно дважды щелкнуть на строке данного отклонения в таблице *Положение*, см. рис. 8.156. Метки большей высоты соответствуют отклонениям более высоких классов.

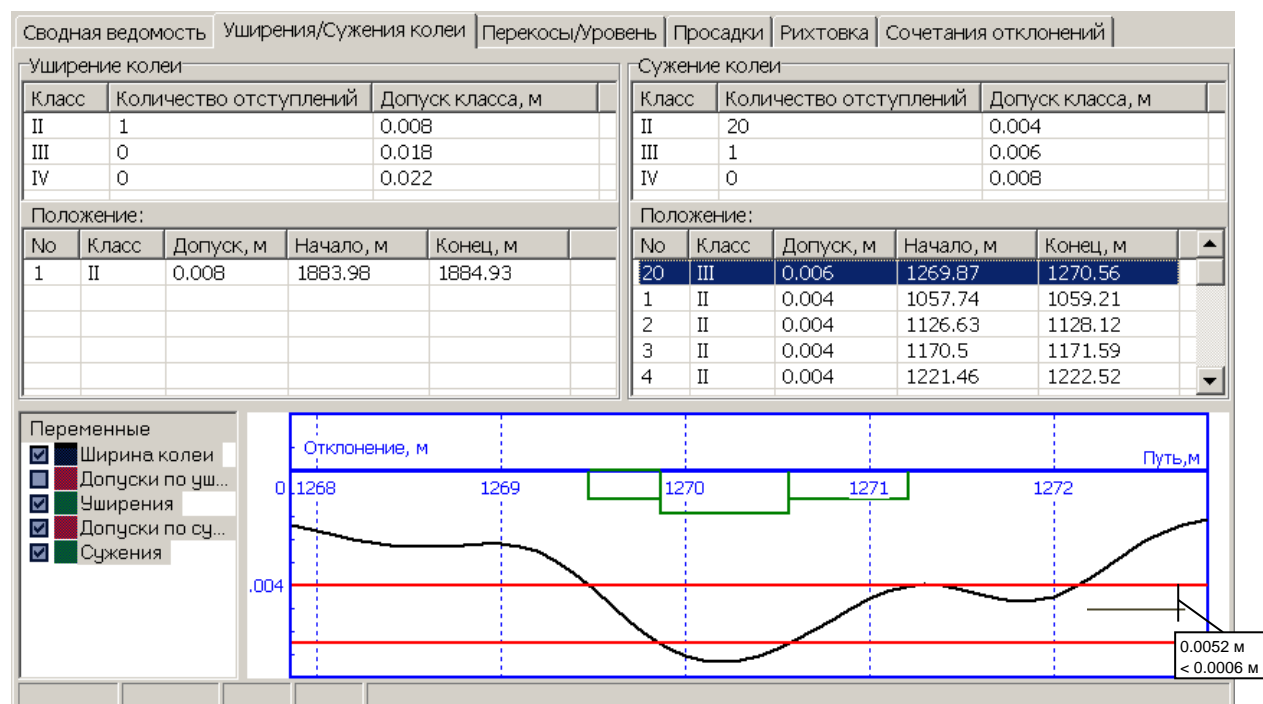


Рис. 8.156. Закладка Уширение/Сужение колеи: отображение отступлений

- На закладке *Перекосы/Уровень* отображаются результаты анализа записи уровня – разности вертикальных координат левого и правого рельсов (см. п. 8.5.1.5.1. "Постановка задачи", стр. 8-146): ведомости перекосов (резких изменений уровня) и отклонений по уровню (не относящиеся к перекосам), см. рис. 8.157.

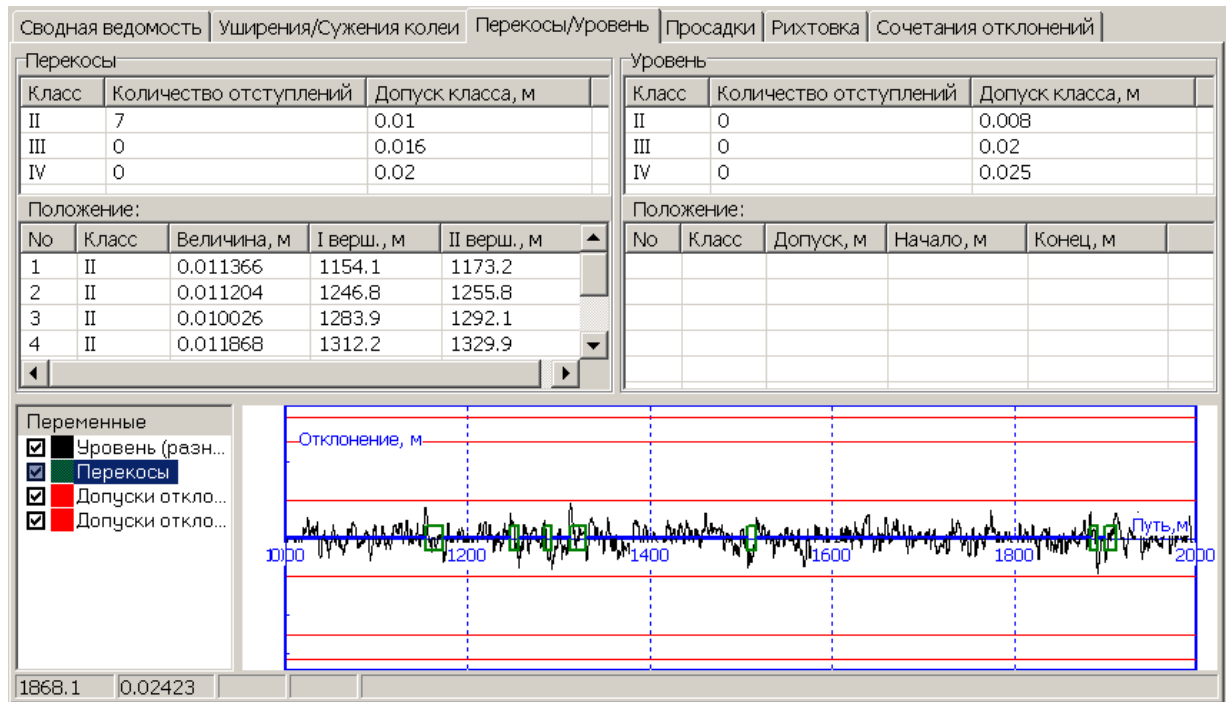


Рис. 8.157. Закладка Перекосы/Уровень

- На закладке *Просадки* отображаются результаты анализа вертикальных неровностей левого и правой рельсовых нитей на наличие просадок (см. п. 8.5.1.5.1. "Постановка задачи", стр. 8-146), см. рис. 8.158.

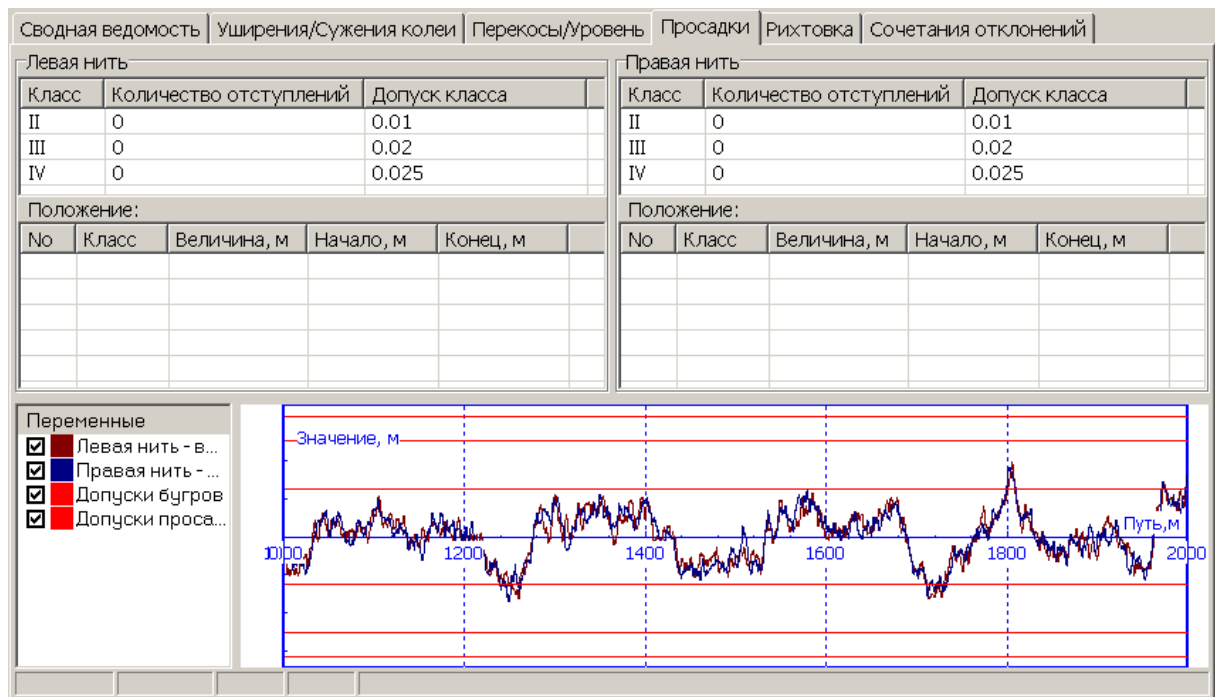


Рис. 8.158. Зкладка **Просадки**

- На закладке *Рихтовка* отображаются результаты анализа записей рихтовки (см. п. 8.5.1.5.1. "Постановка задачи", стр. 8-146), восстановленных по горизонтальным неровностям рельсовых нитей, разделенные на две группы (до 20 метров длиной и от 20 до 40 метров длиной), отличающиеся величинами допусков отклонений, см. рис. 8.159.

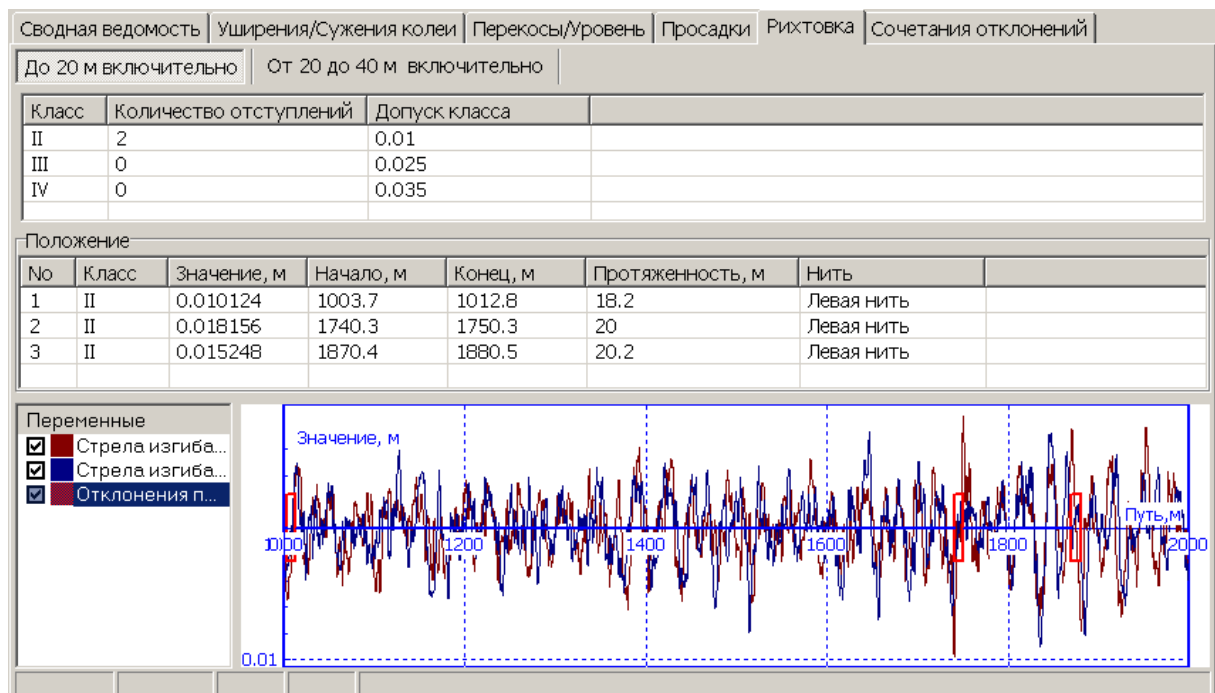


Рис. 8.159. Зкладка **Рихтовка**

- Закладка *Сочетания отклонений* предназначена для отображения результатов поиска опасных сочетаний отклонений (см. п. 8.5.1.5.1. "Постановка задачи", стр. 8-146). На графике представлены выявленные отклонения контрольных параметров, учитывающихся при анализе, см. рис. 8.160.

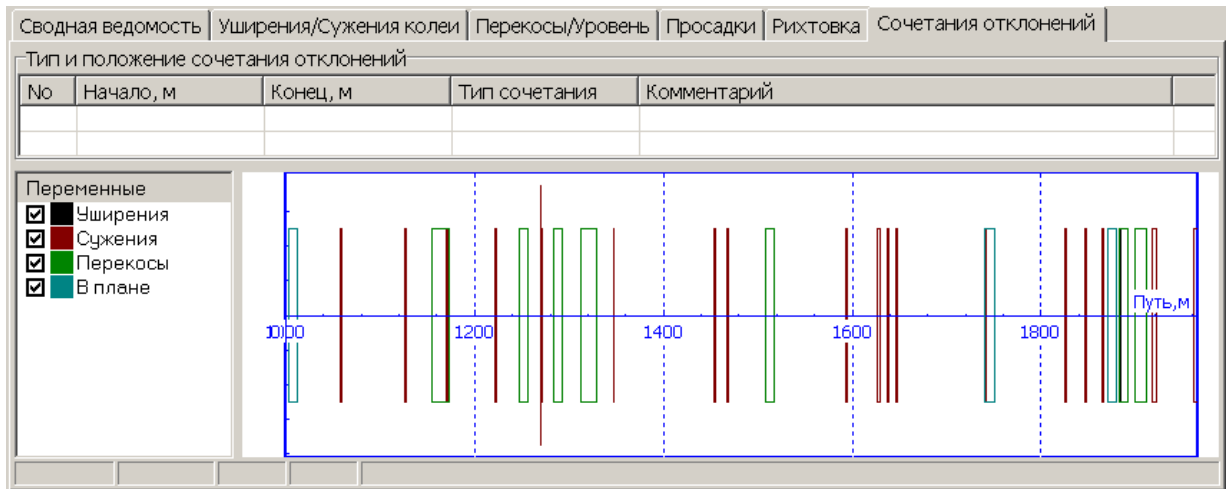


Рис. 8.160. Закладка **Сочетания отклонений**

В поставку входит набор файлов неровностей и групп неровностей, сгенерированных по спектрам FRA и ERRI B176 (см. п. 8.5.1.2.1. "Создание файлов неровностей", стр. 8-114) для путей различного качества содержания. В табл. 8.4 приведена оценка прямого участка пути с этими путевыми неровностями. Рассматривался прямой участок длиной 1000 метров, с левой рихтовочной нитью, на железобетонных шпалах выпуска позднее 1996 года, с номинальной шириной колеи 1520 мм, не входящий в перечень участков магистральных линий с установленными скоростями движения 60 км/ч и менее, со специальными правилами определения качественной оценки состояния, установленных МПС России, с заданными неровностями.

Таблица 8.4


**Качественная оценка участка пути, характеризуемого файлами неровностей, входящими в поставку**

Тип состава:		Грузовой состав без порожних вагонов			Грузовой состав с порожними вагонами			Пассажирский		
Установленная скорость движения, км/ч:		65	75	85	65	75	85	75	105	125
Группа неровностей	Длина, м	Качественная <sup>6</sup> оценка километра дистанции								
FRA_class_1_1000m.tig	1000	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
FRA_class_2_1000m.tig	1000	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
FRA_class_3_1000m.tig	1000	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
FRA_class_4_1000m.tig	1000	У	У	У	У	У	У	У	У	У
FRA_class_5_1000m.tig	1000	Х	Х	У	Х	Х	У	Х	Х	У
FRA_class_6_1000m.tig	1000	О	О	О	О	О	О	О	О	О
ERRI_Hi_3000m.tig	1000	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
ERRI_Low_3000m.tig	1000	У	У	У	У	У	У	Х	Х	Х

<sup>6</sup>Отлично (О); Хорошо (Х); Удовлетворительно (У); Неудовлетворительно (Н)





## 8.5.2. Задание параметров моделирование динамики рельсового экипажа

Параметры моделирования динамики рельсового экипажа задаются с использованием Инспектора моделирования объекта, переход к которому происходит с помощью:

- команды меню **Анализ | Моделирование**;
- сочетания клавиш *Ctrl+F9*;
- кнопки  на панели инструментов.

Значительная часть инструментов в инспекторе являются типовыми и описаны в [Главе 4](#), п. *Подготовка процесса интегрирования*. Здесь мы остановимся на особенностях, связанных с моделированием рельсовых экипажей.

Настройки процесса моделирования рельсового экипажа находятся на вкладке **Колесо/Рельс** инспектора, рис. 8.161. Вкладка содержит кнопки

-  – чтение ранее созданного файла конфигурации РЭ \*.rwc;
-  – запись текущей конфигурации РЭ в файл \*.rwc;
-  – просмотр назначенных неровностей рельсовых нитей в отдельном графическом окне;
-  – просмотр выбранных групп профилей колес и рельсов в отдельном графическом окне;
- навигатор по вкладкам настроек конфигурации РЭ; при щелчке на этой кнопке появляется меню, которое позволяет напрямую перейти к нужной вкладке, рис. 8.162.

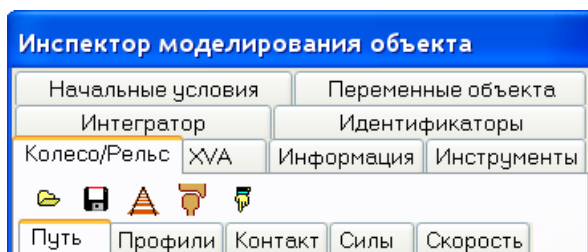


Рис. 8.161. Вкладка настроек моделирования РЭ

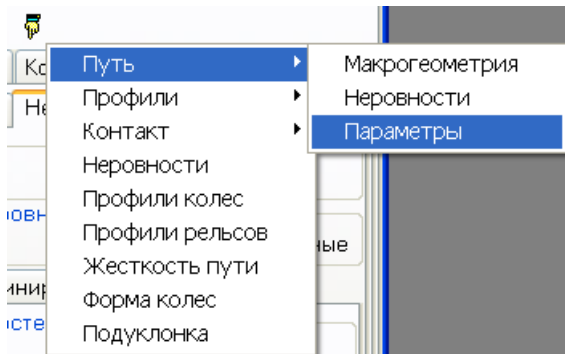


Рис. 8.162. Меню навигатора настроек РЭ

На вкладке **Колесо/Рельс** находятся также дополнительные вкладки с настройками конфигурации РЭ.

**Путь** – параметры макрогеометрии, неровности, жесткость пути, ширина колеи, подклонка рельсов и пр., п. 8.5.2.4 "*Параметры пути*", стр. 8-174.

**Профили** – задание профилей колес и рельсов, отклонения формы колес от идеальной окружности, разностей радиусов колес (дефект радиуса); некоторые настройки расчета контакта колеса с рельсом, п. 8.5.2.3. "*Назначение профилей колес и рельсов*", стр. 8-169, 8.5.2.7. "*Дополнительные параметры*", стр. 8-203.

**Контакт** – выбор модели контакта и задание ее параметров, задание коэффициентов трения в контакте колесо-рельс, п. 8.5.2.5. "*Параметры контактного взаимодействия колеса с рельсом*", стр. 8-191.

**Силы** – задание сил, действующих на уровне автосцепки, с помощью файлов, п. 8.5.2.6. "*Задание сил, приложенных к автосцепке*", стр. 8-198.

**Скорость** – задание режима продольного движения РЭ (выбег, постоянная скорость, нулевая скорость, заданная функция скорости).

### 8.5.2.1. Файлы настроек

#### 8.5.2.1.1. Файл конфигурации РЭ

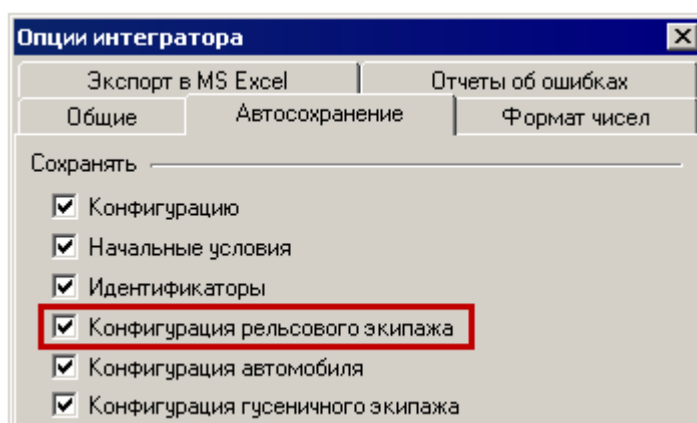




Рис. 8.163. Настройка автоматического сохранения файла конфигурации

Все данные, которые вносятся на вкладке **Колесо/Рельс**, сохраняются в текстовом файле конфигурации РЭ с расширением \*.rwc с помощью кнопки . Ранее созданные файлы можно прочитать с помощью кнопки . При выходе из программы или при смене объекта моделирования текущие настройки могут сохраняться в файле last.rwc. Для отмены или включения автоматического сохранения используется ключ окна настроек интегратора, доступного по команде меню **Инструменты | Настройки....**

**Замечание 1.** Если в каталоге текущей модели РЭ находится файл last.rwc, то он будет прочитан и будут установлены аналогичные настройки независимо от того, включен ли ключ автоматического сохранения конфигурации РЭ. Это же относится к файлу параметров last.par. **Поэтому изменения значений идентификаторов в программе ввода будут проигнорированы, если имеется файл last.par.** Для того чтобы принять численные значения иден-

тификаторов из модели (то есть из файла `input.dat`) следует перед открытием модели **удалить файл `last.par`** из каталога модели.

**Замечание 2.** Файл конфигурации РЭ может быть прочитан из каталога другой модели.

### 8.5.2.1.2. Группа файлов настроек РЭ

Текущая конфигурация РЭ будет сохранена вместе со всеми остальными настройками при использовании команды меню **Файл | Записать конфигурацию | Все настройки...**, рис. 8.164. В результате образуется группа файлов конфигурации, полностью соответствующая текущему состоянию настроек. Файлы имеют одинаковые имена, но различные расширения. В последующем пользователь может прочитать группу настройки с помощью команды меню **Файл | Прочитать конфигурацию | [Имя группы]**, рис. 8.165.

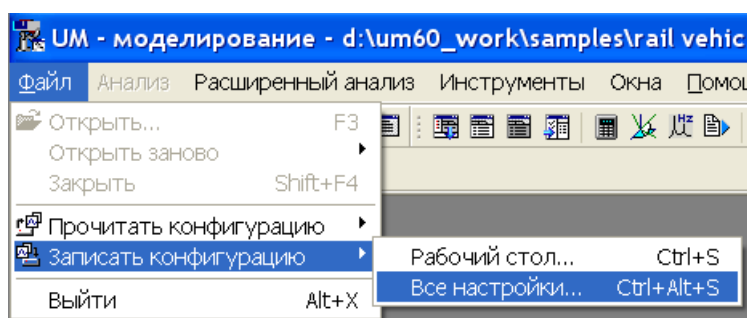


Рис. 8.164. Создание группы файлов конфигурации

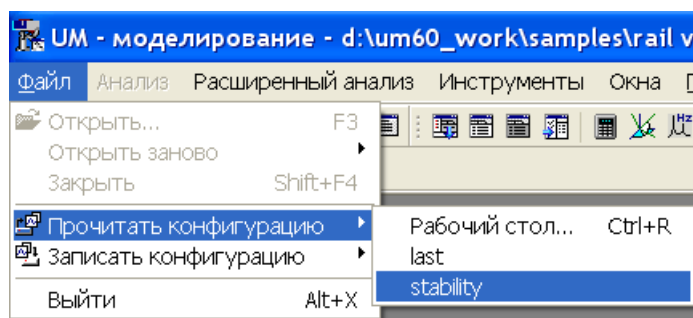


Рис. 8.165. Чтение группы файлов конфигурации

Например, мы полностью настроили процесс исследования устойчивости порожнего грузового вагона, выбрав численный метод, время и точность моделирования, назначив переменные в несколько графических окон, численные значения параметров, профили колес и рельсов, неровности, коэффициенты трения и пр. После этого мы провели анализ и решили сохранить удачные настройки, например, чтобы использовать их когда-либо потом. Используя команду **Файл | Записать конфигурацию | Все настройки...** сохраняем все настройки под именем *Stability* (можно назвать группу по-русски). В результате будут созданы следующие файлы:

- Stability.icf* (настройка рабочего стола и численных методов);
- Stability.par*(численные значения идентификаторов);
- Stability.rwc* (файл конфигурации РЭ);
- Stability.xv* (файл начальных условий);
- Stability.sim* (файл настроек интерфейса Matlab/Simulink).

Для того чтобы в последующем прочитать эти настройки следует использовать команду меню **Файл | Прочитать конфигурацию | *Stability***.

### 8.5.2.2. Режимы продольного движения экипажа

Режим продольного движения экипажа устанавливается на закладке **Скорость**.

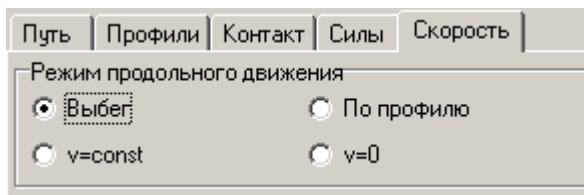


Рис. 8.166. Режимы продольного движения

#### 8.5.2.2.1. Выбег

В данном режиме начальная скорость задается идентификатором  $v_0$ . За счет сил сопротивления скорость падает в процессе движения экипажа.

#### 8.5.2.2.2. v=const

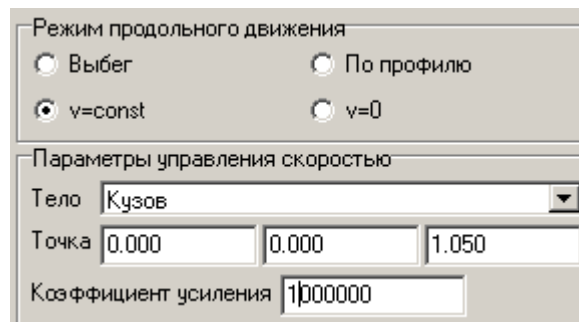





Рис. 8.167. Режимы поддержания постоянной продольной скорости

Режим поддержания постоянной скорости. В данном режиме постоянная скорость, заданная идентификатором  $v_0$ , поддерживается автоматически силой вида

$$F = -k(v-v_0),$$

где  $v_0$  – заданная скорость,  $v$  – текущая скорость продольного движения экипажа,  $k$  – коэффициент усиления. Сила прикладывается к телу заданному пользователем (обычно – к кузову) в точке, координаты которой в проекции на оси СК тела задаются в полях окна (рис. 8.167). Обычно точка приложения силы лежит на уровне автосцепки, продольная координата значения не имеет, если тело абсолютно твердое.

#### 8.5.2.2.3. По профилю

Режим поддержания заданной зависимости скорости от времени или от пройденного пути (группа **Тип зависимости**), рис. 8.168. Поддержание скорости производится так же, как и в предыдущем пункте ( $v=const$ ). Для задания графика скорости используется редактор кривых, доступный по кнопке , рис. 8.169. Кнопки  и  используются для чтения файла с предварительно созданным графиком скорости и для записи графика в файл.

**Замечание.** При начале движения с нулевой скоростью не следует использовать зависимость скорости от пройденного пути из-за вырождения в момент старта, нужно использовать зависимость от времени.

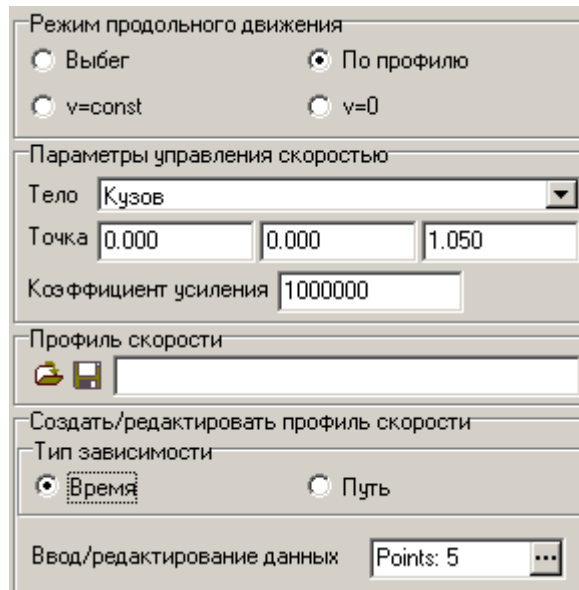


Рис. 8.168. Режимы поддержания заданного графика скорости

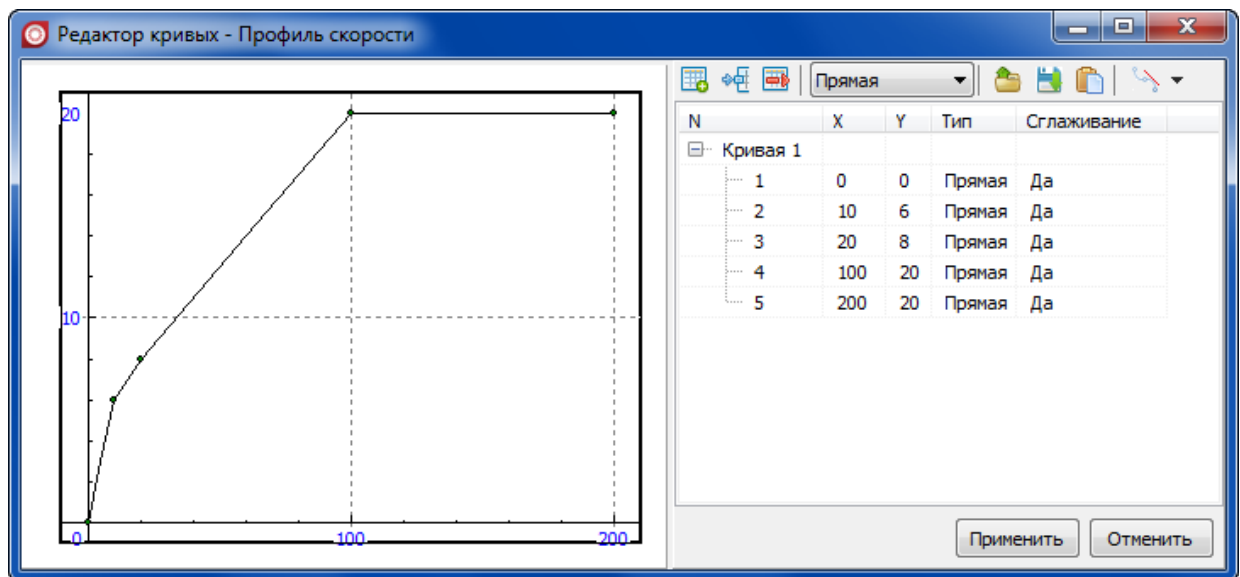


Рис. 8.169. Пример график скорости в зависимости от времени

8.5.2.2.4.  $v=0$

Режим нулевой скорости экипажа. Используется для приведения экипажа в состояние равновесия или моделирования колебаний под действием нагрузки, заданной в зависимости от времени. В последнем случае полезной является возможность блокировки движения колесных пар по степеням свободы: продольное и поперечное смещения ( $X$ ,  $Y$ ), а также повороты вокруг поперечной и вертикальной осей ( $aY$ ,  $aZ$ ), рис. 8.170. Для блокировки степени свободы следует активировать соответствующий флаг.

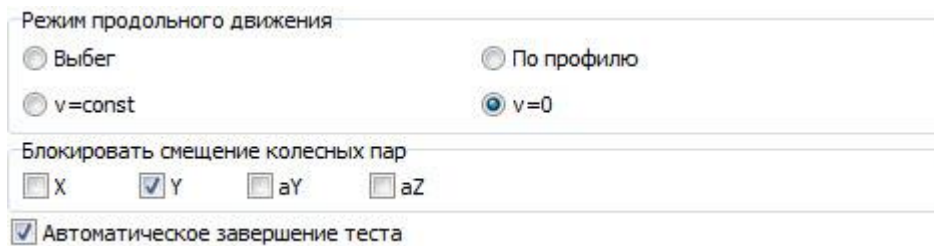


Рис. 8.170. Параметры режима нулевой скорости

Чтобы привести экипаж в состояние равновесия нужно активировать флаг **Автоматическое завершение теста** (рис. 8.170), запустить процесс интегрирования и дождаться завершения теста. Как правило, это первый шаг, с которого начинается работа с новой моделью рельсового экипажа. Во время выполнения теста равновесия полезным может быть график изменения во времени суммарной кинетической энергии экипажа. Переменная **Кинетическая энергия** доступна на закладке **Переменные для группы тел мастера переменных**. Тест равновесия завершается, когда значение кинетической энергии становится достаточно малым (рис. 8.171).

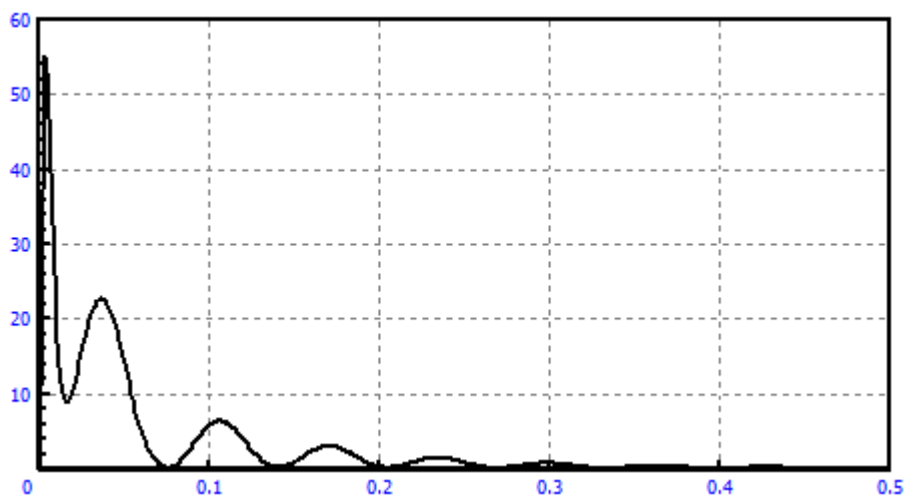


Рис. 8.171. Изменение кинетической энергии в процессе выполнения теста равновесия

### 8.5.2.2.5. Единица задания скорости

При задании скорости с помощью идентификатора  $v_0$  или графика, скорость может быть задана или в метрах в секунду, или в километрах в час. Для задания на локальном компьютере нужного варианта, следует использовать команду меню **Инструменты | Настройки**. Внесенное изменение записывается в реестр локальной машины. Следует **осторожно использовать данную возможность, поскольку могут возникать ошибки при переносе данных на другой компьютер или при использовании старых файлов параметров**.

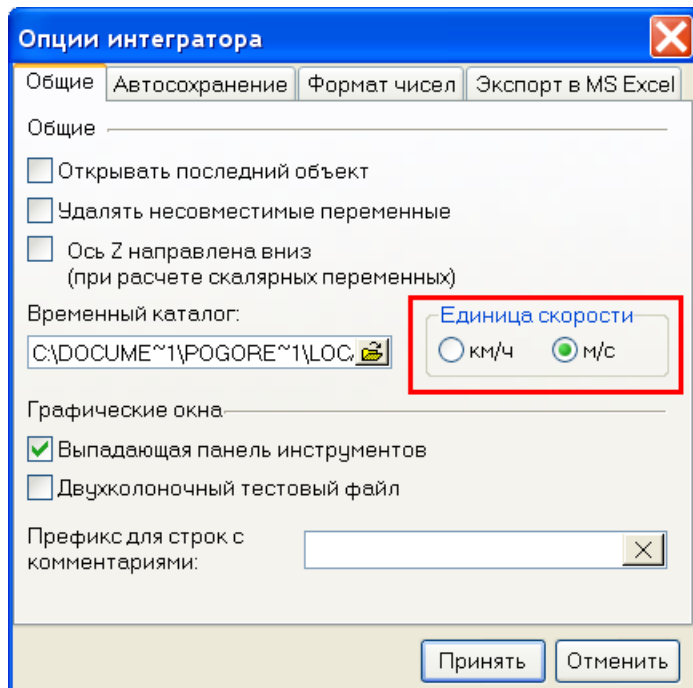




Рис. 8.172. Назначение единицы задания скорости

### 8.5.2.3. Назначение профилей колес и рельсов

Для назначения колесам и рельсам профилей используется закладка **Колесо/рельс** | **Профили Инспектора моделирования объекта**.

#### 8.5.2.3.1. Назначение профилей рельсов

Для назначения профилей правому и левому рельсу используйте кнопки  для выбора нужных файлов или контекстное меню списка профилей (рис. 8.173). Для просмотра назначенных профилей используйте кнопку  в инспекторе или на панели инструментов программы моделирования.

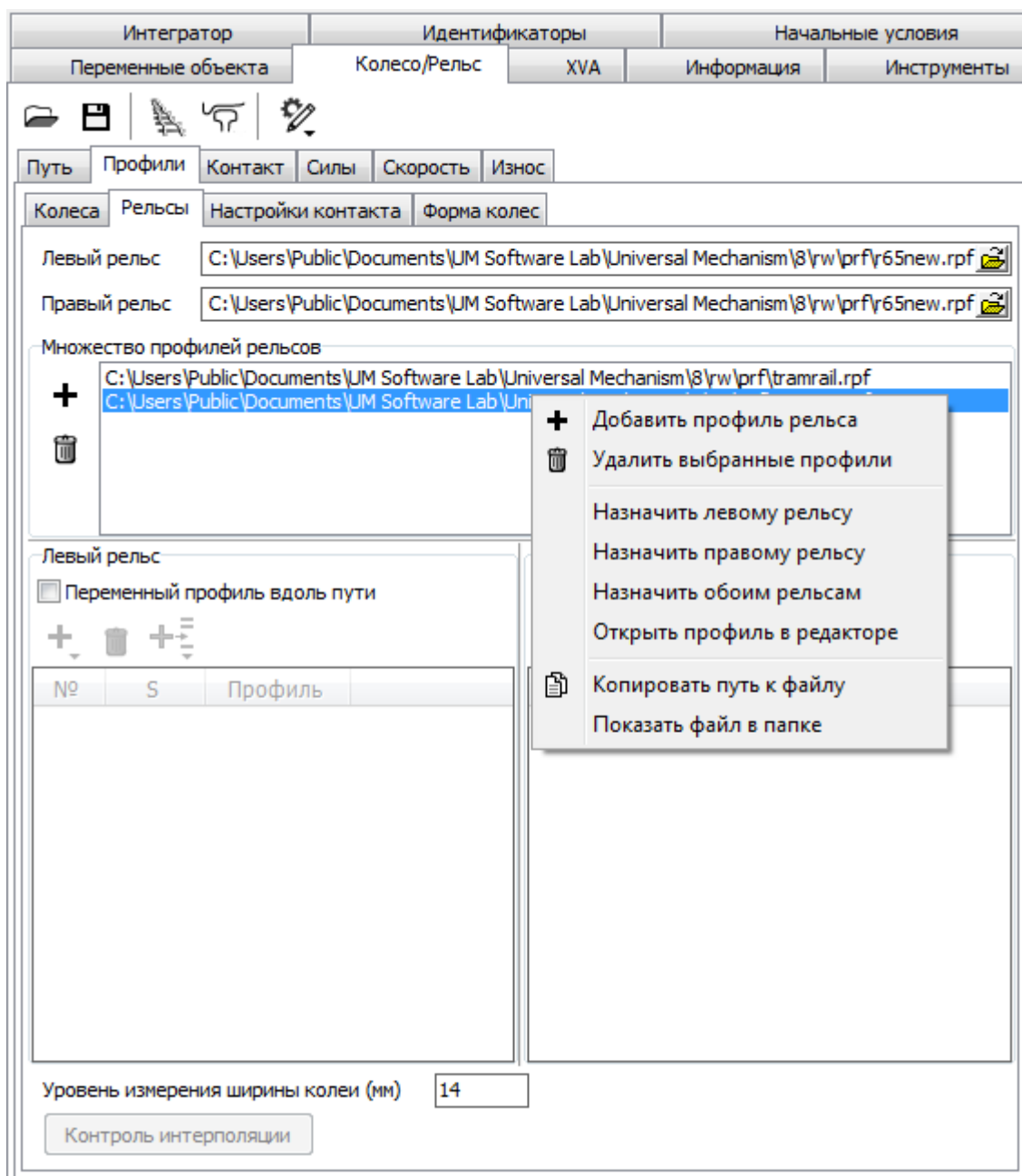


Рис. 8.173. Назначение профилей рельсов. Контекстное меню списка профилей

**Множество профилей рельсов** используется как для быстрого назначения профилей, так и при организации многовариантных расчетов с целью параметризации профилей по их номеру в данном списке, см. п. 8.6. "Особенности организации многовариантных расчетов", стр. 8-267. Список профилей рельсов, поставляемых вместе с УМ, приведен в табл. 8.5

Таблица 8.5

**Профили рельсов, поставляемы вместе с УМ**

115AREMA.rpf	Североамериканский профиль, 115 фунтов на ярд
119AREMA.rpf	Североамериканский профиль, 119 фунтов на ярд
132AREMA.rpf	Североамериканский профиль, 132 фунтов на ярд
133AREMA.rpf	Североамериканский профиль, 133 фунтов на ярд
136AREMA.rpf	Североамериканский профиль, 136 фунтов на ярд
141AREMA.rpf	Североамериканский профиль, 141 фунт на ярд
BS113A_crv.rpf	Рельс типа BS113
CN_Rail_60.rpf	Китайский рельс
CN_Rail_75.rpf	Китайский рельс
r50.rpf	Российский рельс P50
r65new.rpf	Российский рельс P65
r65old13.rpf	Российский рельс P65 с износом 13 мм
UIC60new.rpf	Рельс UIC60
UIC60l_1.rpf	Рельс UIC60 (используется в Манчестерских тестах)
UIC60r_1.rpf	Рельс UIC60 (используется в Манчестерских тестах)
UIC60_crv.rpf	Рельс UIC60
UIC60_Worn.rpf	Рельс UIC60 изношенный
tramrail.rpf	Трамвайный рельс

**Уровень измерения ширины колеи** – расстояние по вертикали от прямой, соединяющей вершины двух рельсов, определяющее точки замера ширины колеи с учётом заданной подкулонки рельсов (рис. 8.174). Используется для построения переменной *Ширина колеи*, см. п. 8.5.3.1.2 "Переменные, относящиеся к колесной паре в целом", стр. 8-216.

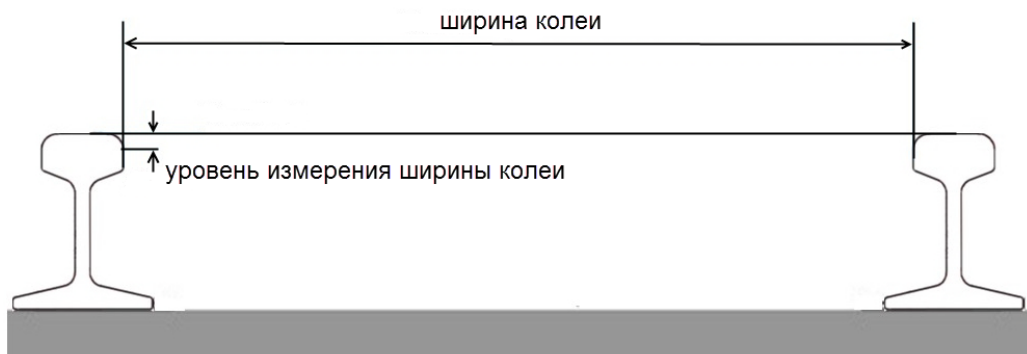


Рис. 8.174. Измерение ширины колеи

### 8.5.2.3.1.1. Задание изменения профиля рельса вдоль пути

Для задания переменного профиля левого и/или правого рельса вдоль пути следует выполнить следующие действия.

- Включить флажок **Переменный профиль вдоль пути** (рис. 8.175).
- Добавить к **Множеству профилей рельсов** профили рельсов в контрольных точках.
- Создать последовательность контрольных профилей. Для этого следует использовать кнопки **+** (добавить профиль), **🗑** (удалить выделенный профиль), **⏪** (вставить профиль перед выделенным).
- Назначить каждому профилю положение вдоль пути, задав соответствующее значение дуговой координаты  $S_i$ .

На рис. 8.175 показано задание переменного профиля левого рельса при движении в правой кривой (п. 8.5.2.4.2.2 "Тип пути: кривая", стр. 8-177) с параметрами:

$$L1 = 50 \text{ м}, P11 = 50 \text{ м}, S1 = 200 \text{ м}, P12 = 50 \text{ м}.$$

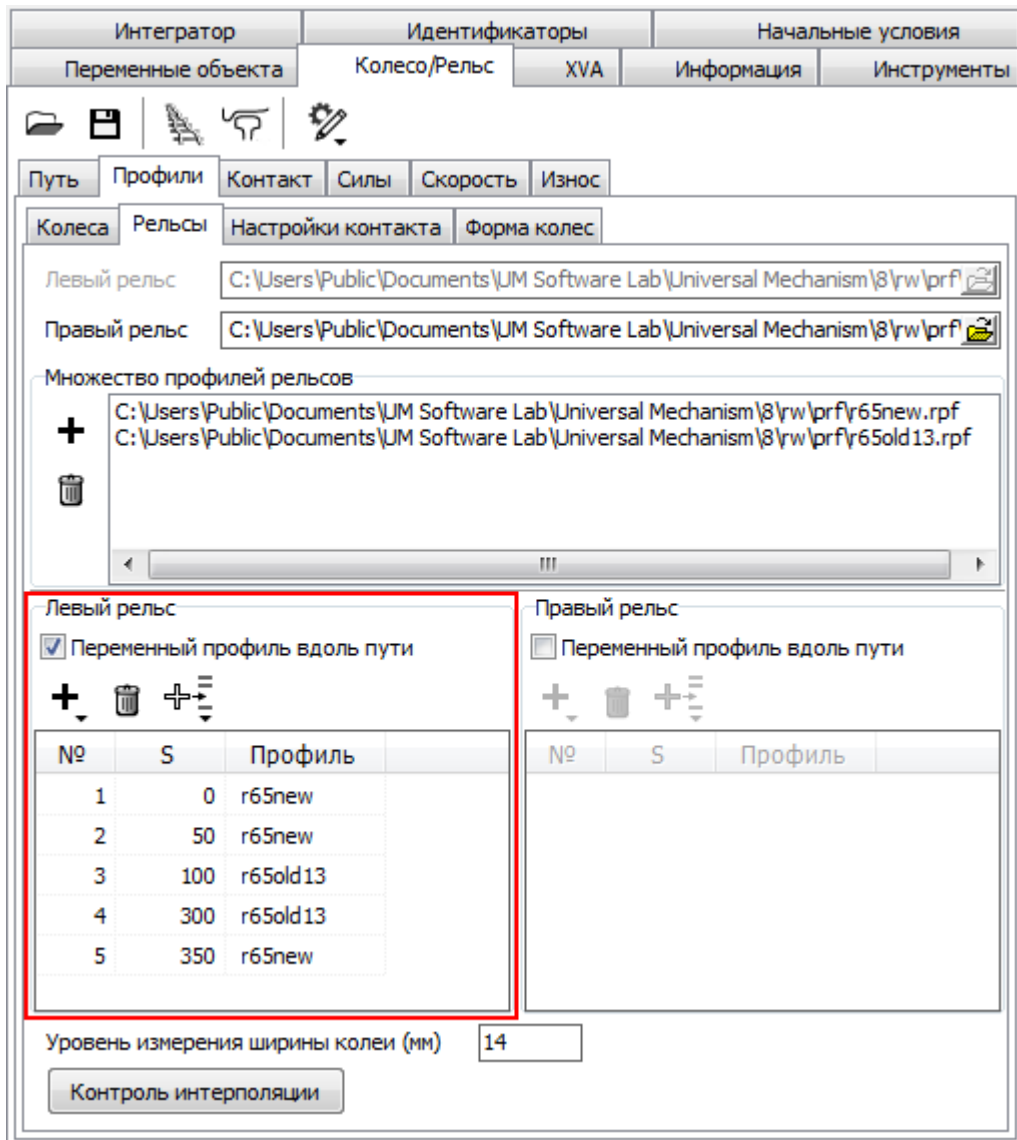


Рис. 8.175. Задание изменения профиля рельса вдоль пути

На участках прямой используется неизношенный профиль *r65new* (рис. 8.176). На первом переходном участке от 50 м до 100 м новый профиль переходит в изношенный профиль *r65old13*. В кривой постоянного радиуса (от 100 м до 300 м) профиль не меняется. На втором переходном участке (от 300 м до 350 м) профиль изменяется от изношенного до нового.

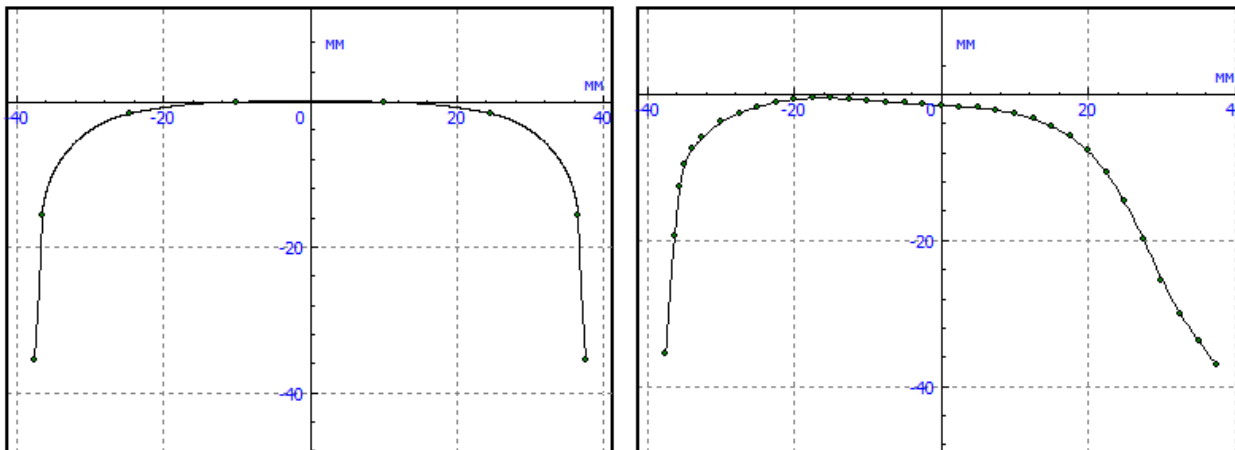


Рис. 8.176. Профили *r65new* (слева) и *r65old13*

### 8.5.2.3.2. Назначение профилей колес

Назначение профилей колес происходит в два этапа. На первом этапе создается список профилей (рис. 8.177). Для добавления профиля к списку используйте кнопку **+** или соответствующий пункт контекстного меню списка профилей. Для назначения профилей из созданного списка колесам следует выполнить следующие действия:

- Если все колеса имеют один и тот же профиль, то выделите нужный профиль в списке профилей, вызовите для него контекстное меню и выберите пункт *Назначить всем*.
- Если колеса имеют разные профили, то вызовите контекстное меню для нужного колеса из таблицы и выберите для него профиль из списка (рис. 8.177).

Список профилей колес, поставляемых вместе с УМ, приведен в табл. 8.6

Таблица 8.6

**Профили колес, поставляемые вместе с УМ**

AAR.wpf	Североамериканский профиль AAR
Chinese LM.wpf	Китайский профиль по стандарту ТВ/Т 449-2003
Chinese LMA.wpf	Китайский профиль по стандарту ТВ/Т 449-2003
dmeti30.wpf	Профиль ДМетИ
newlocow.wpf	Российский новый локомотивный профиль
newwagnw.wpf	Российский новый вагонный профиль
UIC 510-2 (*).wpf	Профили по стандарту UIC 510-2
S1002.wpf	Европейский профиль S1002
S1002l_1.wpf	Европейский профиль S1002 (Манчестерский тест)

S1002r_1.wpf	Европейский профиль S1002 (Манчестерский тест)
s1002worn.wpf	Европейский профиль S1002, изношенный
s1002worn2.wpf	Европейский профиль S1002, изношенный
tramwheel.wpf	Трамвайный профиль

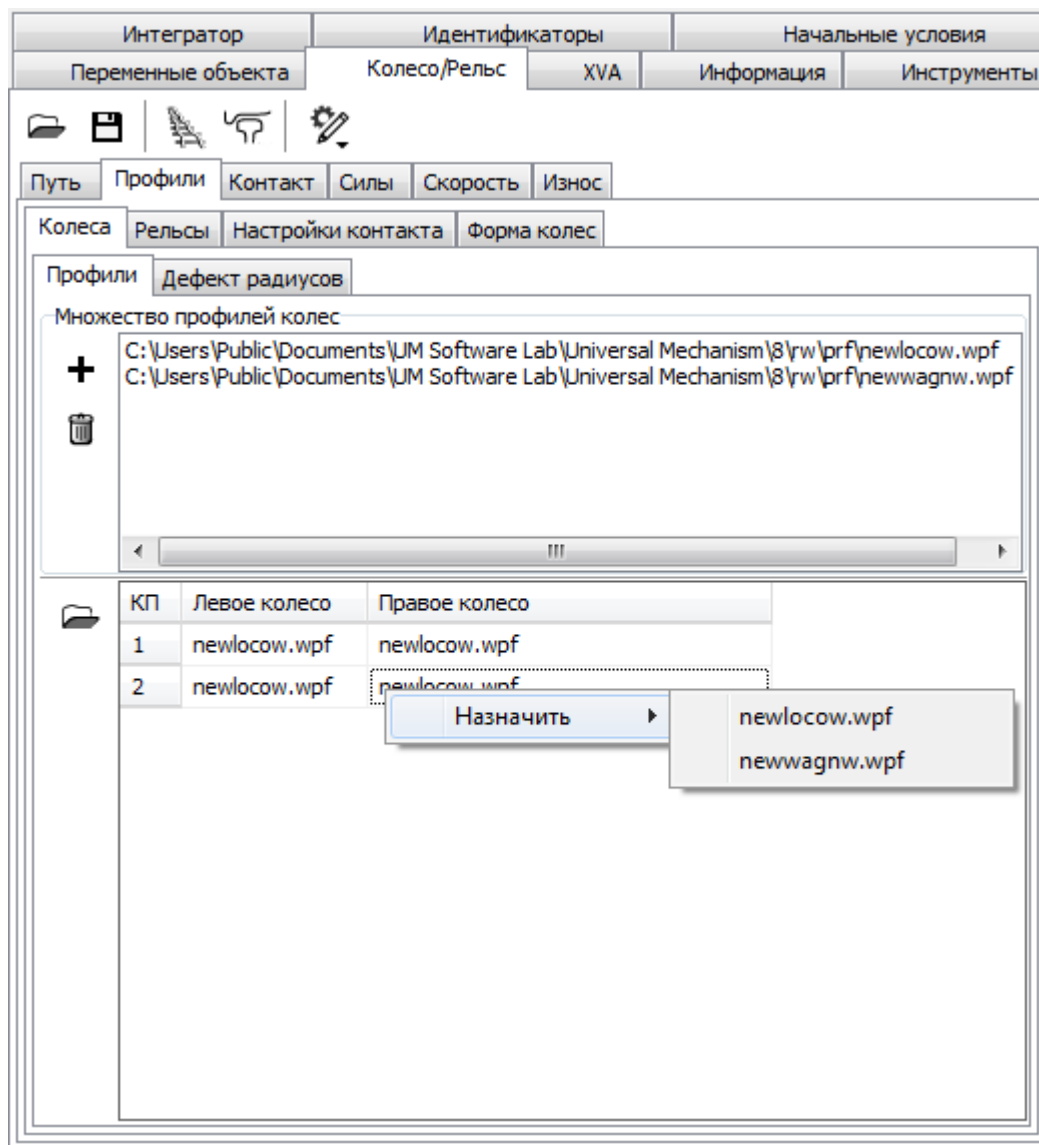



Рис. 8.177. Назначение профилей колес

Для просмотра назначенных профилей используйте кнопку  в инспекторе или на панели инструментов программы моделирования.

**Замечание.** Список профилей колес может быть использован для их параметризации при выполнении многовариантных расчетов, п. 8.6. "Особенности организации многовариантных расчетов", стр. 8-267.

### 8.5.2.4. Параметры пути

Параметры пути задаются на закладке **Колесо/Рельс | Путь** в **Инспекторе моделирования**. Закладка содержит закладки **Модель и параметры**, **Макрогеометрия**, **Неровности** и **Отображение**. На закладке **Модель и параметры** задаются подуклонка рельсов и ширина колеи, выбирается модель пути, задаются ее параметры. На закладке **Макрогеометрия** задается макрогеометрия пути, а на закладке **Неровности** – неровности рельсовых нитей. Изображение пути в анимационном окне настраивается на закладке **Отображение**.

#### 8.5.2.4.1. Выбор модели и задание параметров пути

Для задания подуклонки рельсов и ширины колеи, выбора модели пути и задания ее параметров используется закладка **Модель и параметры**, рис. 8.178.

**Подуклонка рельса**  $\alpha_{r0}$  (п. 8.3.1.1. "Геометрия рельсов в идеальной прямой", стр. 8-68) задается в радианах. **Ширина колеи** в идеальной прямой задается расстоянием между системами координат рельса и колеса  $\Delta u$  (п. 8.3.1.1. "Геометрия рельсов в идеальной прямой", стр. 8-68) в мм (**Расстояние СКР-СКК**).

Модели пути описаны в п. 8.3.2. "Модели пути", стр. 8-76.

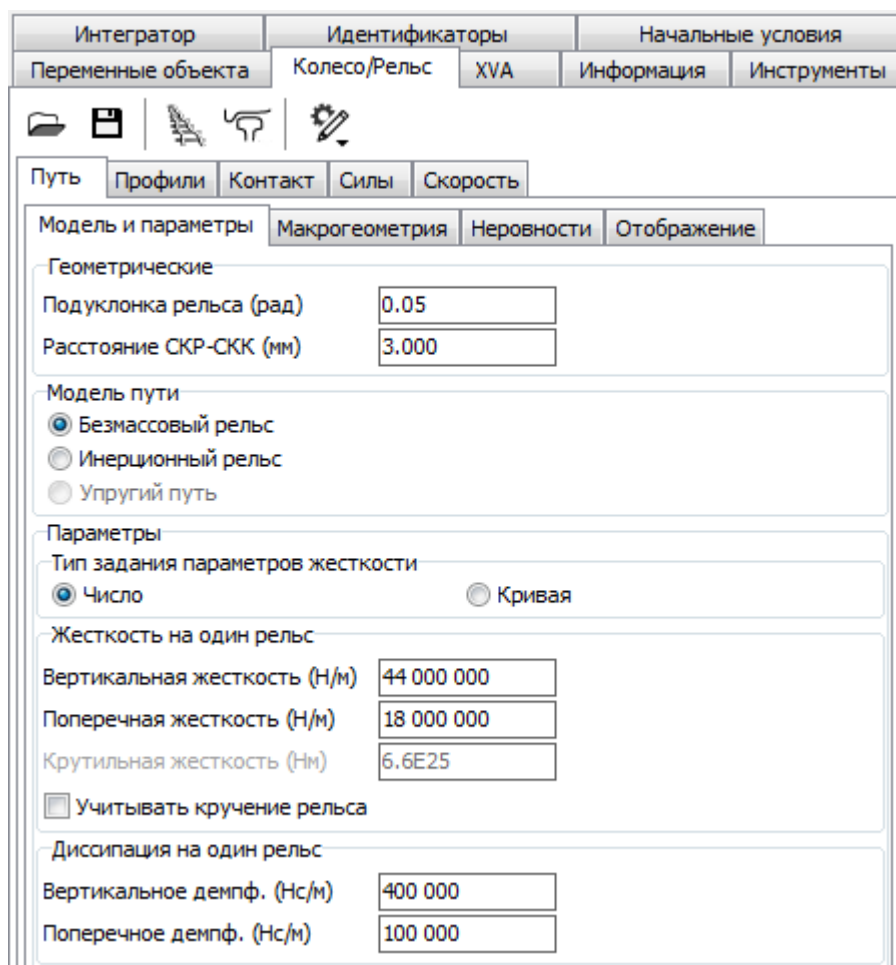


Рис. 8.178. Выбор модели и задание параметров пути

### 8.5.2.4.1.1. Упруго-диссипативные параметры пути

#### 8.5.2.4.1.1.1. Безмассовый рельс

Для модели пути **Безмассовый рельс** коэффициенты жесткости пути могут задаваться в двух формах.

#### Численное задание коэффициентов жесткости

В этом случае жесткости являются одинаковыми для левого и правого рельсов и задаются в полях **Вертикальная жесткость**, **Поперечная жесткость** и **Крутильная жесткость**. **Крутильная жесткость** учитывается только в том случае, когда активирован флаг **Учитывать кручение рельса**, рис. 8.178.

#### Задание переменной жесткости в виде кривых

Переменная жесткость рельсов задается в виде графиков зависимости коэффициентов жесткости от продольной координаты отдельно для левого и правого рельсов. Для перехода к редактору кривых используйте кнопку **...**, рис. 8.179. При заданной переменной жесткости рельсов может также учитываться постоянная жесткость на кручение.

Коэффициенты демпфирования пути под колесом, одинаковые для левого и правого рельсов, задаются в полях **Вертикальное демпф.** и **Поперечное демпф.**.

Параметры	
Тип задания параметров жесткости	
<input type="radio"/> Число	<input checked="" type="radio"/> Кривая
Задание переменной жесткости вдоль пути (Н/м)	
Вертикальная, левый рельс	(нет) ...
Вертикальная, правый рельс	(нет) ...
Горизонтальная, левый рельс	(нет) ...
Горизонтальная, правый рельс	(нет) ...
Диссипация на один рельс	
Вертикальное демпф. (Нс/м)	400 000
Поперечное демпф. (Нс/м)	100 000

Рис. 8.179. Задание переменных коэффициентов жесткости рельсов вдоль пути

Для задания переменных в продольном направлении коэффициентов жесткости и диссипации пути, а также для задания различных значений этих параметров для левого и правого рельсов используется также программирование в файле управления ([Глава 5](#), п. 5.1). Для программирования жесткостных параметров пути используется следующая процедура в файле управления:

```
function TrackStiffness(position: real_; var cLeftZ, cRightZ, cLeftY,
cRightY, dLeftZ, dRightZ, dLeftY, dRightY: real_): integer;
begin
  Result := 0;
end;
```

Список входных параметров:

*position* – продольная координата в метрах, для которой рассчитываются значения неровностей.

Список выходных параметров:

*Result* – возвращаемое значение функции. Если функция возвращает значение 1, изменения параметров жесткости и диссипации, произведенные внутри процедуры, будут учитываться, при любом другом изменении значений будут игнорироваться. Это позволяет включать/отключать процедуру через идентификатор;

*cLeftZ*, *cRightZ* – значения вертикальных жесткостей для левого и правого колеса в Н/м;

*cLeftY*, *cRightY* – значения горизонтальных жесткостей для левого и правого колеса в Н/м;

*dLeftZ*, *dRightZ* – значения вертикальных коэффициентов диссипации для левого и правого колеса в Нс/м;

*dLeftY*, *dRightY* – значения горизонтальных коэффициентов диссипации для левого и правого колеса в Нс/м.

**Замечание 1.** Параметры жесткости и диссипации, заданные в окне на рис. 8.178, игнорируются при использовании программируемых значений, в том случае если возвращаемое значение функции равно 1.

**Замечание 2.** Нулевые значения программируемых коэффициентов жесткости игнорируются и заменяются значениями, заданными через окно на рис. 8.178.

#### 8.5.2.4.1.1.2. Инерционный рельс

Упруго-диссипативные параметры пути в модели **Инерционный рельс** задаются идентификаторами (п. 8.2.3.2. "Стандартная колесная пара", стр. 8-10). Для изменения значений идентификаторов используется закладка **Идентификаторы | Список идентификаторов** инспектора моделирования. Для задания переменных вдоль пути жесткости и диссипации используется управление идентификаторами (**Инспектор моделирования | Идентификаторы | Управление идентификаторами**).

#### 8.5.2.4.1.1.3. Упругий путь

Задание и изменение упруго-диссипативных свойств модели **Упругий путь** выполняются в **Мастере упругого пути**, [Глава 27](#), п. 27.5.5.

#### 8.5.2.4.2. Макрогеометрия пути

Для задания макрогеометрии пути используется закладка **Колесо/рельс | Путь | Макрогеометрия** инспектора моделирования, рис. 8.180.

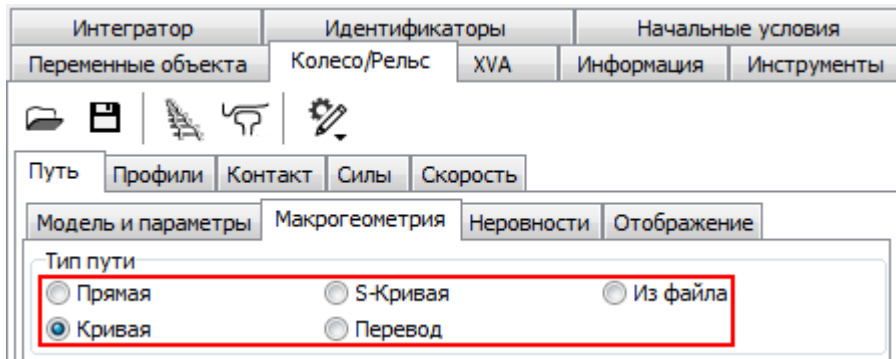


Рис. 8.180. Выбор макрогеометрии пути

#### 8.5.2.4.2.1. Тип пути: прямая

Движение в прямом участке пути.

#### 8.5.2.4.2.2. Тип пути: кривая

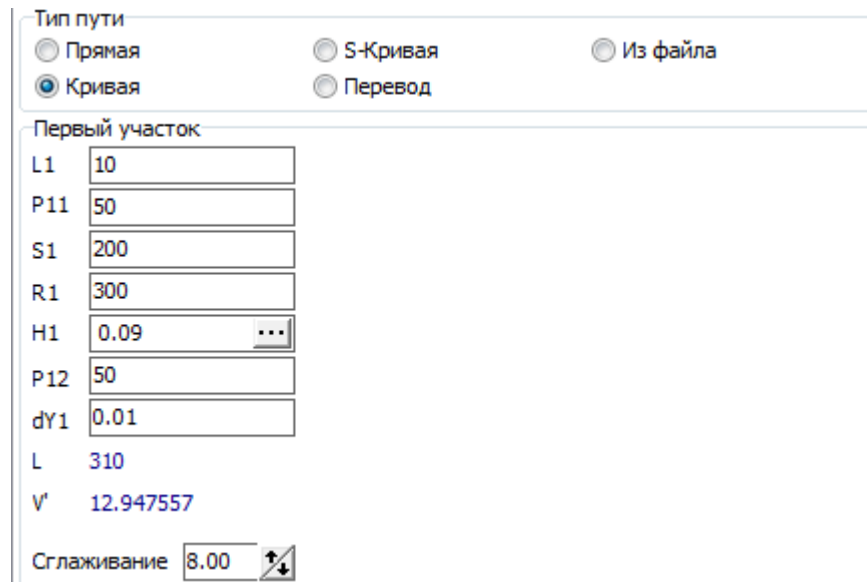


Рис. 8.181. Параметры кривой

Движение в *правой* кривой, рис. 8.181. Параметры, задаваемые в окне, описаны в п. 8.3.1.2. "Макрогеометрия кривой", стр. 8-70. Переходные участки задаются кубической параболой.

Возвышение задается как в численной форме, так и с помощью графика. Для задания графика зависимости возвышения от продольной координаты используется кнопка

Параметр **Сглаживание** используется для сглаживания вертикального стыка концов переходной кривой с прямой и кривой постоянного радиуса. Сглаживание производится по окружности на участке с длиной, определенной данным параметром.

Параметр **L** равен полной длине кривой, включая участок прямой длиной **L1**. Параметр **V'** равен значению равновесной скорости.

### 8.5.2.4.2.3. Тип пути: S-кривая

S-образная кривая – движение сначала в правой кривой, затем в левой.

Первый участок		Второй участок	
L1	10	L2	50
P11	50	P21	50
S1	200	S2	200
R1	300	R2	300
H1	0.09	H2	0.09
P12	50	P22	50
dY1	0.01	dY2	0.01
L	310	L	350
V'	12.947557	V'	12.947557

Сглаживание: 8.00

Рис. 8.182. Параметры S-образной кривой

**Замечание.** Переходные участки кривой и S-кривой задаются кубической параболой. При этом предполагается, что отношение длины переходного участка к радиусу кривой является малым и не превосходит 0.5. В случае переходных участков большой длины, когда данное условие не выполняется, следует использовать тип макрогеометрии **Из файла**, где для описания переходных кривых используется клотоида.

### 8.5.2.4.2.4. Особенности задания возвышения в кривой и S-кривой

При движении в кривой или S-кривой (рис. 8.181, рис. 8.182) возвышение наружного рельса может быть задано двумя различными способами.

Первый метод соответствует случаю, когда возвышение положительно и постоянно в кривой постоянного радиуса и равномерно возрастает или убывает в переходных участках. В этом случае возвышение задается напрямую в численном виде в полях **H1, H2**.

Второй метод используется, когда условия первого метода не выполнены, например, если возвышение не постоянно к кривой постоянного радиуса или изменяется неравномерно на переходных участках. Переменное возвышение вдоль кривой задается в редакторе кривых, для вызова которого используется кнопка **...** в правой части поля **H1**, рис. 8.181, рис. 8.182. Возвышение задается в метрах в зависимости от расстояния вдоль кривой в виде набора точек, рис. 8.183. После ввода данных поле выглядит следующим образом: **Профиль** **...**. Для того чтобы вернуться к первому методу задания возвышения, следует удалить все точки в кривой задания возвышения рис. 8.183.

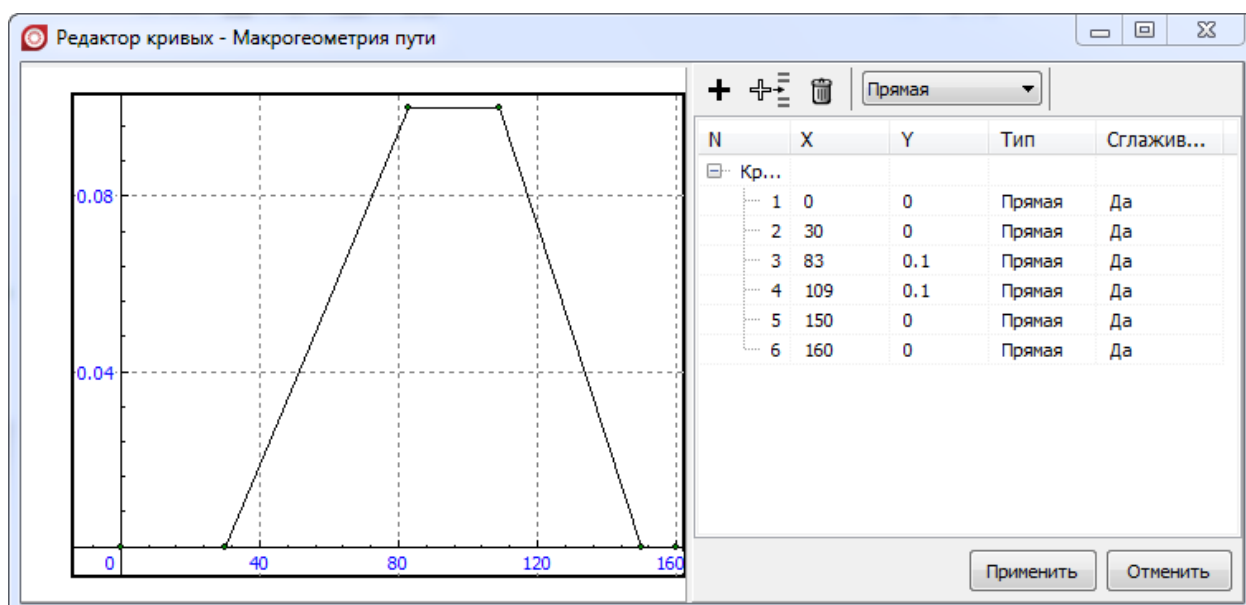


Рис. 8.183. Возвышение наружного рельса

Пользователь должен учитывать следующие важные особенности задания переменного возвышения.

34. Возвышение должно обязательно равняться нулю в прямых участках (до начала первой кривой, между кривыми и после второй кривой). Нарушение этого условия приводит к скачкам в вертикальном положении рельса.
35. Кривая возвышения задается с начала переходного участка первой кривой и не включает участок прямой **L1**. Например, точка (0,0) на рис. 8.183 соответствует началу кривой, а не началу задания пути. Кривая возвышения учитывает длину прямой вставки между двумя кривыми, то есть игнорируется только **L1**!
36. В случае S-кривой функция возвышения учитывается для обеих кривых, а не только для первой. В частности, значение, введенное в поле **H2**, игнорируется.

### 8.5.2.4.2.5. Как смоделировать движение в левой кривой?

Тип пути	
<input type="radio"/> Прямая	<input checked="" type="radio"/> S-Кривая
<input type="radio"/> Кривая	<input type="radio"/> Перевод
<input type="radio"/> Из файла	

Первый участок		Второй участок	
L1	10	L2	50
P11	0.0001	P21	50
S1	0.0001	S2	200
R1	100000	R2	300
H1	0	H2	0.09
P12	0.0001	P22	50
dY1	0	dY2	0.01
L	10.0003	L	350
V'	0	V'	12.947557

Сглаживание 8.00

Рис. 8.184. Создание левой кривой из S-кривой

S-кривая может быть использована для моделирования движения в левой кривой если длины первой кривой малы, возвышение нулевое, а радиус – большой.

**Замечание.** В данном режиме игнорируется сглаживание в начале и конце возвышения.

### 8.5.2.4.2.6. Тип пути: перевод

Тип пути	
<input type="radio"/> Прямая	<input type="radio"/> S-Кривая
<input type="radio"/> Кривая	<input checked="" type="radio"/> Перевод
<input type="radio"/> Из файла	


Движение	
<input checked="" type="radio"/> Противошерстное	<input type="radio"/> Пошерстное

Левый стрелочный перевод

Стрелочный перевод R65 1/11

Прямой участок 10.00

Рис. 8.185. Задание параметров стрелочного перевода

С использованием кнопки  (рис. 8.185) следует назначить заранее созданный файл геометрии стрелочного перевода, п. 8.5.1.4. "Создание файла геометрических параметров стрелочного перевода", стр. 8-145.

Условия прохождения перевода задаются параметрами **пошерстного** или **противошерстного** движения, а также ключом **Левый стрелочный перевод**, рис. 8.186.

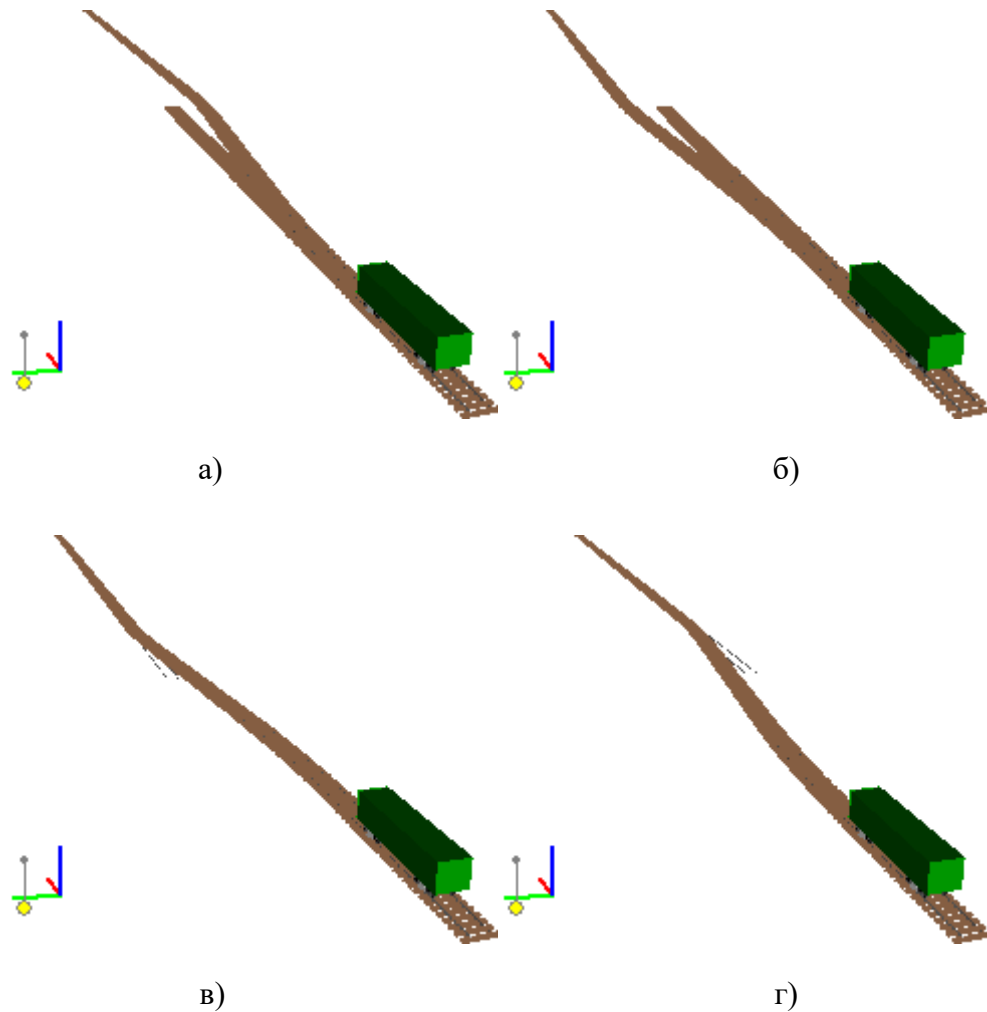


Рис. 8.186. Стрелочные переводы

а, в – противошерстное и пошерстное движения в правом стрелочном переводе,  
 б, г – противошерстное и пошерстное движения в левом стрелочном переводе.

**8.5.2.4.2.7. Тип пути: из файла. Множество файлов макрогеометрии**

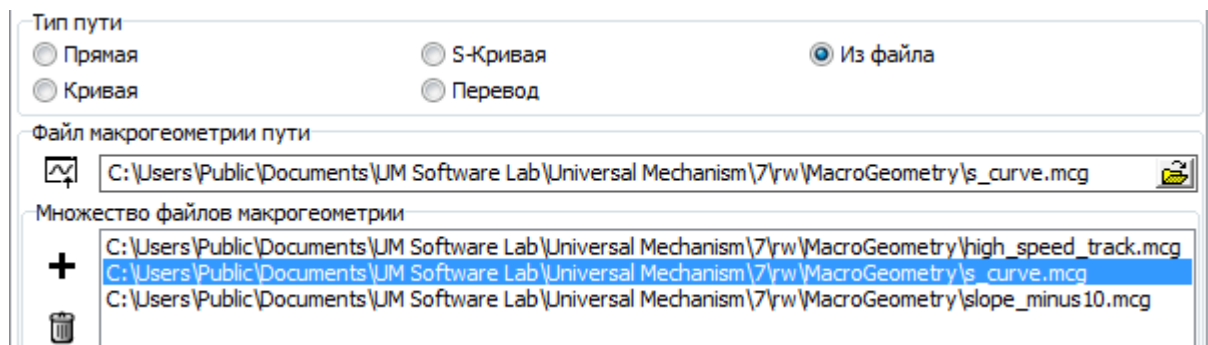




Рис. 8.187. Задание геометрии пути из файла

С использованием кнопки  (рис. 8.187) следует назначить заранее созданный файл макрогеометрии, п. 8.5.1.3. "Создание файла макрогеометрии", стр. 8-134.

Для просмотра файла или его редактирования используется кнопка .

**Множество файлов макрогеометрии** используется как для быстрого назначения текущего файла макрогеометрии, так и для параметризации файлов при выполнении многовариантных расчетов, п. 8.6.1. "Список внутренних идентификаторов, параметризующих условия функционирования РЭ", стр. 8-267. Для назначения текущего файла следует дважды щелкнуть на элементе списка.

#### 8.5.2.4.3. Неровности рельсовых нитей

Для назначения неровностей используется закладка **Колесо/рельс | Путь | Неровности** инспектора моделирования, рис. 8.188.

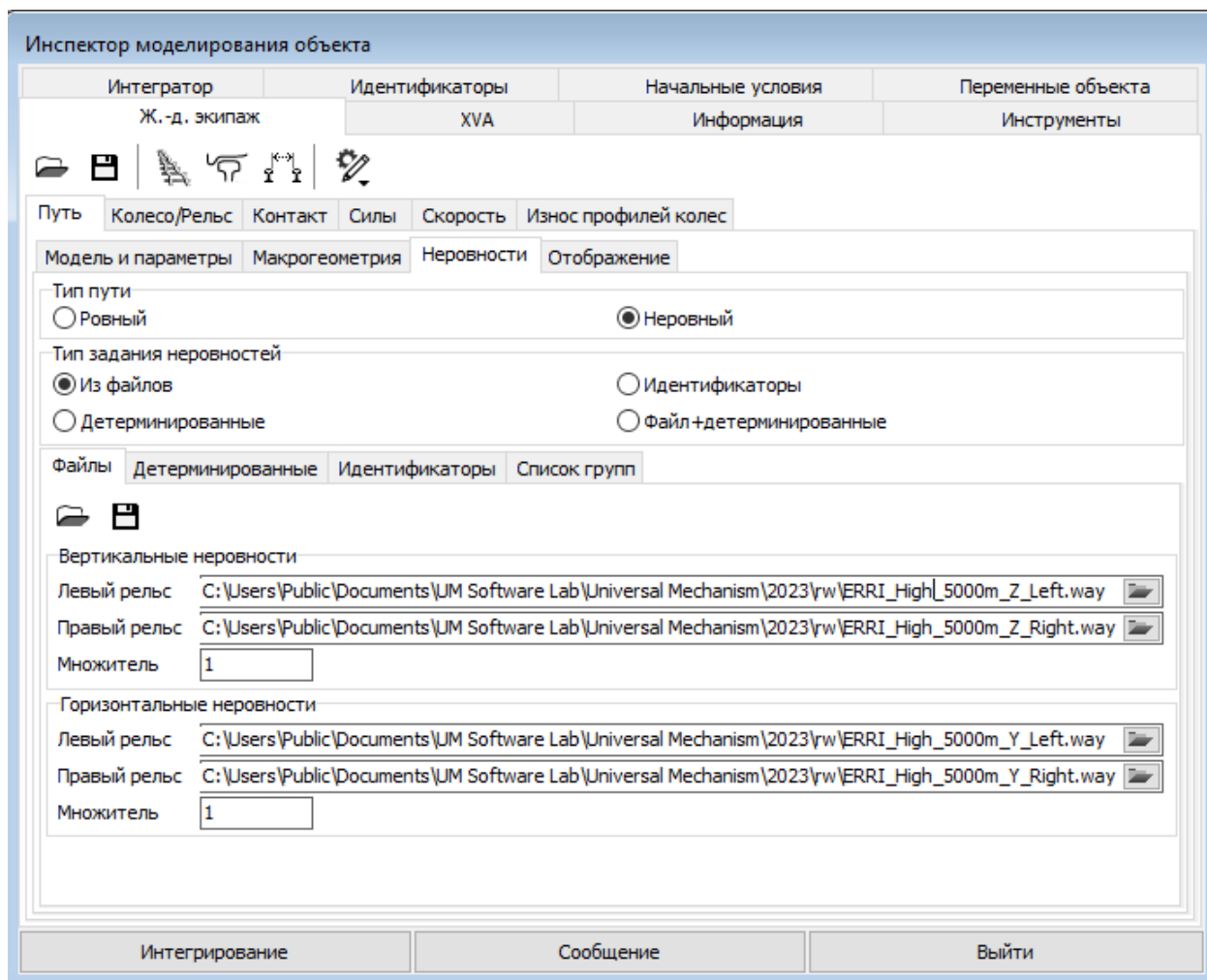


Рис. 8.188. Назначение неровностей



Неровности рельсовых нитей могут задаваться в двух формах: из файлов или детерминированные (группа **Тип неровностей**).



Для моделирования движения в идеально ровных прямых и кривых (то есть для игнорирования введенных файлов неровностей) следует установить значение параметра **Ровный** в группе **Тип пути**. Для учета неровностей следует установить значение параметра **Неровный**.

Параметры неровностей рельсов сохраняются в файле конфигурации рельсового экипажа (\*.rwc).

### 8.5.2.4.3.1. Неровности из файлов. Группы неровностей

Вместе с UM поставляются несколько файлов неровностей. Отметим здесь только *NoIrregularities.way* – файл с нулевыми неровностями. Создание файлов неровностей описано в п. 8.5.1.2. "Создание неровностей рельсовых нитей", стр. 8-114

Для назначения файлов вертикальных и горизонтальных неровностей правому и левому рельсу используйте кнопки  для выбора нужных файлов (рис. 8.188). Для просмотра назначенных неровностей используйте кнопку  в инспекторе моделирования или на главной панели инструментов **UM Simulation**.

Для ускорения процесса назначения, а также при параметризации списка неровностей в многовариантных расчетах, используется понятие «**группа неровностей**» – текстовый файл с расширением \*.tig, содержащий список четырех файлов с неровностями. Для создания группы неровностей, содержащей текущие файлы неровностей, используется кнопка . При чтении группы с помощью кнопки  назначаются сразу четыре файла группы.

**Пример.** Файл группы неровностей *ERRI\_Low\_5000m.tig* содержит список реализаций пути хорошего состояния по *ERRI B176* с длиной реализации 5000 м:

```
ERRI_Low_5000m_Z_Left.way  
ERRI_Low_5000m_Z_Right.way  
ERRI_Low_5000m_Y_Left.way  
ERRI_Low_5000m_Y_Right.way
```

Параметр **Множитель** используются для увеличения или уменьшения неровностей, полученных из файла неровностей или из файла управления. Неровности умножаются на введенный коэффициент. Например, если задать значение 0.7 множителю горизонтальных неровностей, то горизонтальные неровности будут уменьшены на 30%.

#### 8.5.2.4.3.1.1. Список групп неровностей

**Список групп неровностей** используется как для быстрого назначения текущей группы неровностей, так и для параметризации файлов при выполнении многовариантных расчетов, п. 8.6.1. "Список внутренних идентификаторов, параметризующих условия функционирования РЭ", стр. 8-267. Для назначения текущей группы неровностей следует дважды щелкнуть на элементе списка.

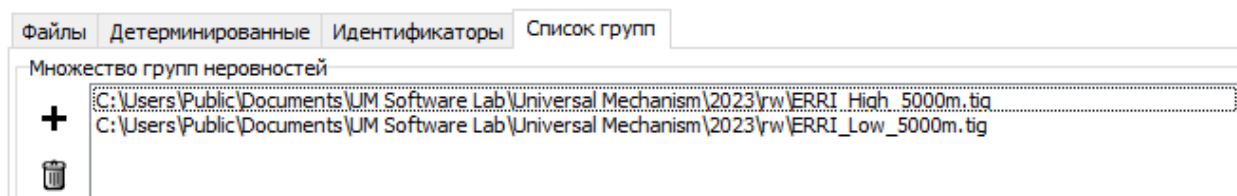


Рис. 8.189. Список групп неровностей

### 8.5.2.4.3.2. Детерминированные неровности

В UM реализовано два типа детерминированных вертикальных неровностей, рис. 8.190.

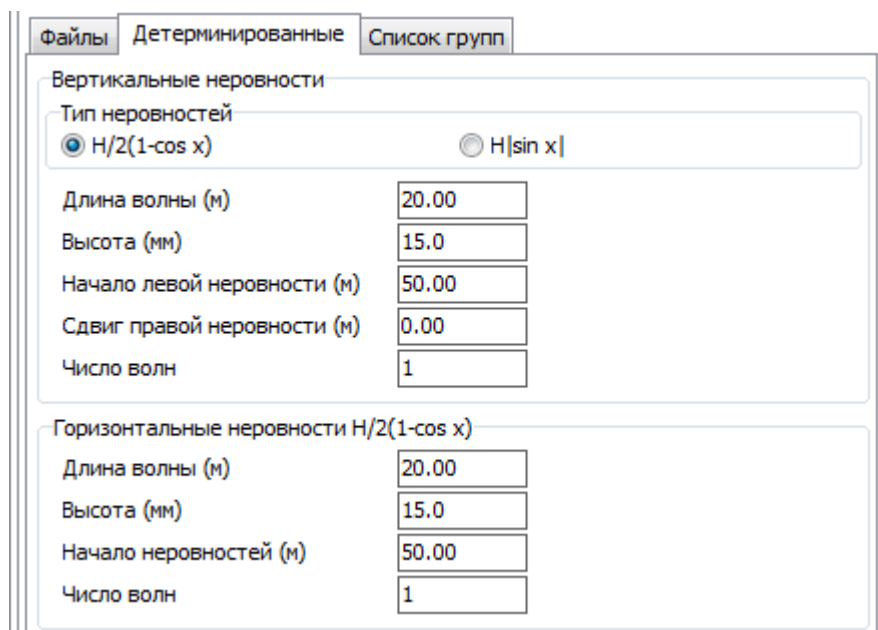


Рис. 8.190. Задание детерминированных неровностей

#### 1. Горб или просадка, рис. 8.191

Неровности данного типа рассчитываются по формуле:

$$\Delta z = \frac{H}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right),$$

где  $H$  – высота неровности (глубина просадки при отрицательном значении),  $L$  – длина волны,  $x$  – продольная координата.

Наряду с высотой и длиной волны следует задать значения следующих параметров:

- **начало левой неровности**  $x_0$  – продольная координата, начиная с которой задается неровность;
- **сдвиг правой неровности** по отношению к левой  $\Delta x$  – неровности одинаковы по форме, однако правая неровность может забегать или отставать на указанное значение;
- **число волн неровностей**  $N$ .

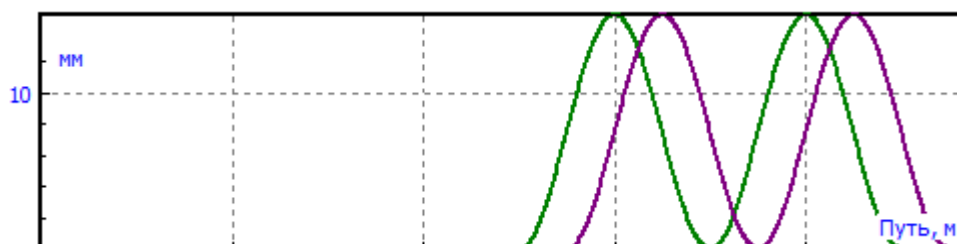


Рис. 8.191. Пример детерминированных вертикальных неровностей типа «горб» при следующих значениях параметров:  $L = 20$  м,  $H = 15$  мм,  $x_0 = 50$  м,  $\Delta x = 5$  м,  $N = 2$

## 2. Модуль синуса

Неровности данного типа рассчитываются по формуле:

$$\Delta z = H \left| \sin \frac{\pi x}{L} \right|$$

Используются те же параметры, что и для неровности типа «горб».

На рис. 8.192 приведен пример неровности при тех же значениях параметров, что и в примере неровностей типа «горб», рис. 8.191.

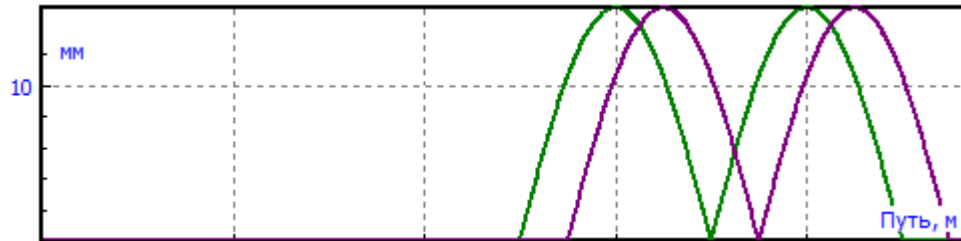


Рис. 8.192. Пример детерминированных вертикальных неровностей типа «модуль синуса»

Горизонтальные детерминированные неровности одинаковы для левого и правого рельсов и описываются теми же зависимостями, что и вертикальные неровности типа «горб».

### 8.5.2.4.3.3. Задание неровностей идентификаторами

Горизонтальные и вертикальные неровности могут быть заданы независимо для каждого колеса с помощью инструмента "Управление идентификаторами", интерфейса с Matlab/Simulink. Такой способ задания имеет некоторые дополнительные возможности по сравнению с файлами:

- Произвольный, в том числе переменный, шаг задания неровностей
  - Возможность задания положения рельса как функции времени.
- **Замечание 1.** Значения неровностей через идентификаторы задаются в метрах.
  - **Замечание 2.** При поточечном задании неровностей следует по возможности обеспечить гладкость производной кривой. Для этого следует использовать сплайновое сглаживание.

Рассмотрим последовательность действий по заданию неровностей идентификаторами.

#### а) Добавление стандартных идентификаторов неровностей к модели

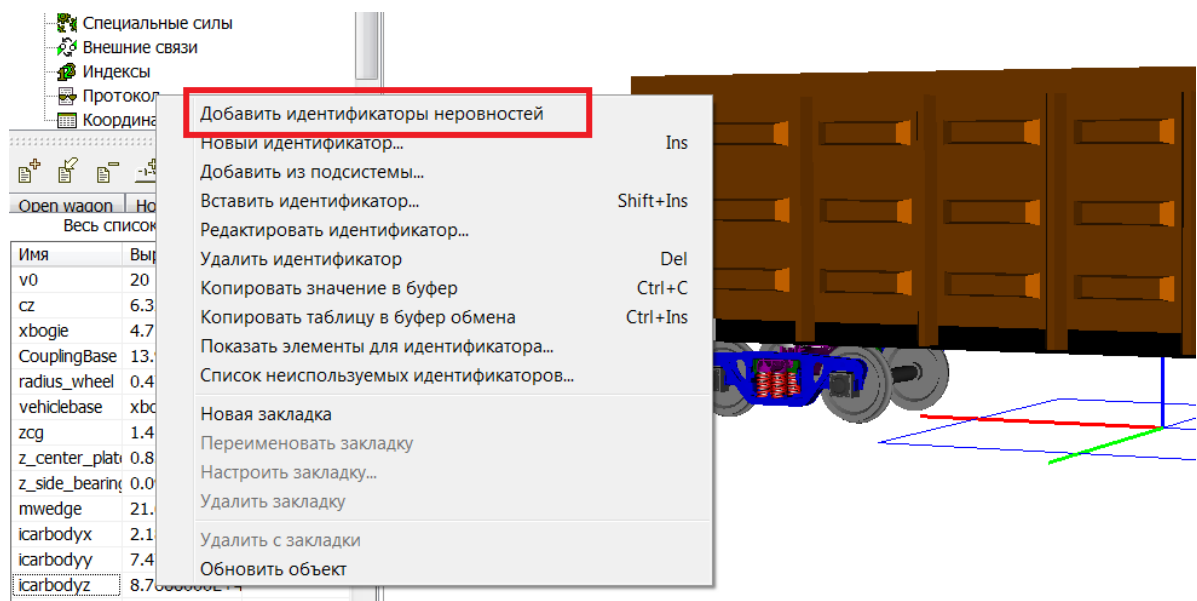


Рис. 8.193. Добавление идентификаторов неровностей

Откройте модель, содержащую моделируемый экипаж или группу экипажей, в программе ввода. Щелкните правой кнопкой мыши на списке идентификаторов и выполните команду **Добавить идентификаторы неровностей**, рис. 8.193.

Число добавляемых идентификаторов в четыре раза больше, чем число колесных пар в модели, рис. 8.194. Стандартный идентификатор имеет синтаксис

`irr[тип неровности]_[сторона]_[номер КП]`.

Имя	Выражение	Значение
CouplingHeigh	1.06	
couplinglenat	2	
irrZ_left_1	0	
irrY_left_1	0	
irrZ_right_1	0	
irrY_right_1	0	
irrZ_left_2	0	
irrY_left_2	0	
irrZ_right_2	0	
irrY_right_2	0	
irrZ_left_3	0	
irrY_left_3	0	
irrZ_right_3	0	
irrY_right_3	0	
irrZ_left_4	0	
irrY_left_4	0	
irrZ_right_4	0	
irrY_right_4	0	

Рис. 8.194. Стандартные идентификаторы неровностей для четырех КП

**б) Выбор типа неровностей в программе моделирования**

Модель и параметры | Макрогеометрия | Неровности | Отображение

Тип пути  
 Ровный  Неровный

Тип задания неровностей  
 Из файлов  Детерминированные  Идентификаторы

Файлы | Детерминированные | Идентификаторы | Список групп

Имя	Идентификатор	Значение
Неровность Z к.п. 1, левое колесо	irrZ_left_1	0
Неровность Y к.п. 1, левое колесо	irrY_left_1	0
Неровность Z к.п. 1, правое колесо	irrZ_right_1	0
Неровность Y к.п. 1, правое колесо	irrY_right_1	0
Неровность Z к.п. 2, левое колесо	irrZ_left_2	0
Неровность Y к.п. 2, левое колесо	irrY_left_2	0
Неровность Z к.п. 2, правое колесо	irrZ_right_2	0
Неровность Y к.п. 2, правое колесо	irrY_right_2	0
Неровность Z к.п. 3, левое колесо	irrZ_left_3	0

Рис. 8.195. Выбор типа задания неровностей

В программе моделирования выберите тип задания неровностей **Идентификаторы**, рис. 8.195. Если пользователь использует идентификаторы, отличные от стандартных, на данной вкладке можно выбрать соответствующие идентификаторы из списка двойным щелчком мыши на строке списка.

**с) Задание неровности поточноно как функции положения КП**

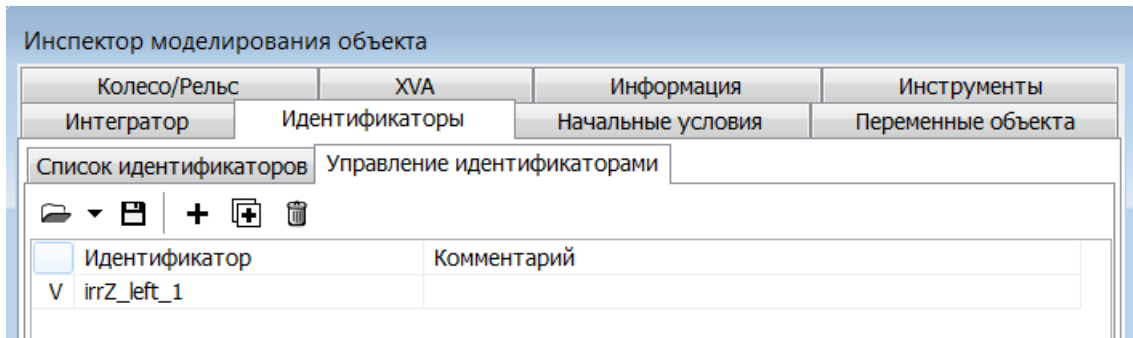


Рис. 8.196. Вкладка управления идентификаторами

Сначала рассмотрим задание неровности как функции положения колесной пары. На вкладке **Идентификаторы|Управление идентификаторами** (рис. 8.196) добавьте новый элемент:

- Щелкните на кнопке **+** для добавления управляемого идентификатора;

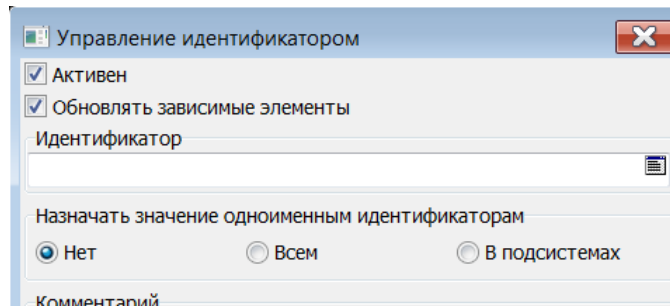



Рис. 8.197. Окно задания идентификатора

- В появившемся окне выберите идентификатор из списка щелчком на кнопке .

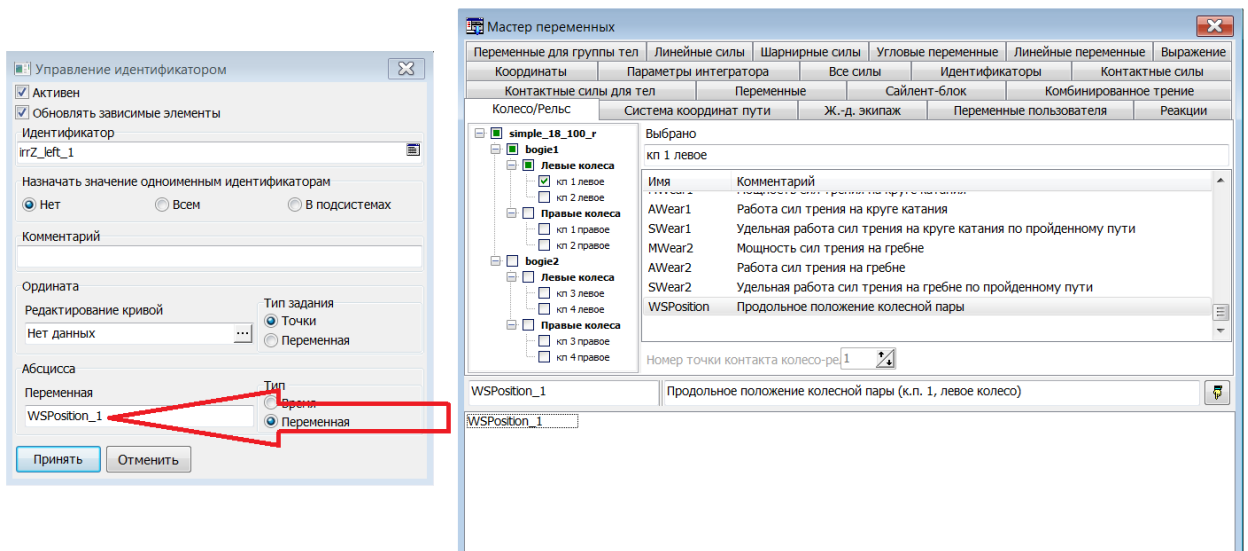


Рис. 8.198. Назначение положения КП в качестве абсциссы

- Задайте тип абсциссы **Переменная**; в мастере переменных создайте переменную, соответствующую положению колесной пары и перетащите переменную в соответствующее поле окна управления идентификатором.

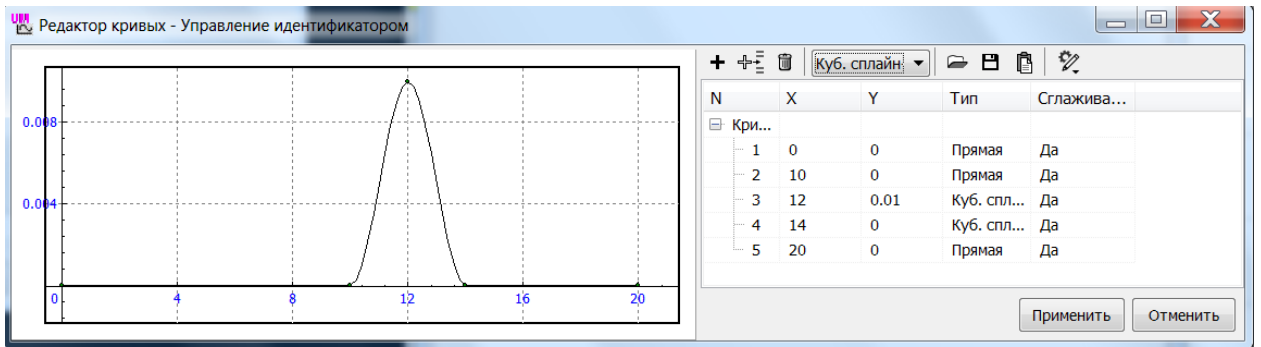



Рис. 8.199. Пример задания неровности в редакторе кривых

- Для задания графика неровности в зависимости от продольного положения КП используйте кнопку , вызывающую редактор кривых. В редакторе кривую можно задать поточечно или прочитать из предварительно созданного текстового файла.

**d) Задание положения рельса под колесом как функции времени**

Одна из целей задания перемещения рельса под колесом функцией времени - моделирование динамического стенда, когда на колесную пару подается заданное кинематическое возмущение. В этом случае рекомендуется установить режим нулевой скорости, п. 8.5.2.2.4 "v=0". Другая цель использования данного режима состоит в задании перемещений рельса, полученных из других источников, например, с использованием экспериментальных данных или расчетов с помощью программ МКЭ.

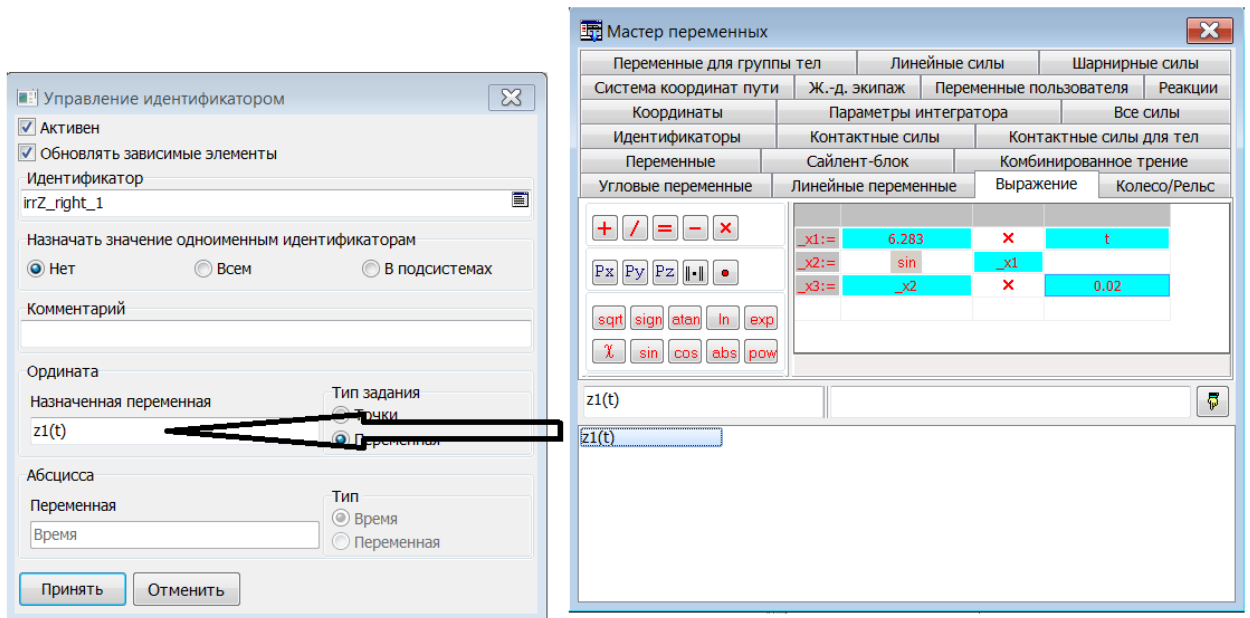


Рис. 8.200. Гармонические колебания рельса

Перемещение рельса как функция времени может быть задано либо точками на графике с помощью редактора кривых, либо с помощью переменной, сформированной с использованием мастера переменных. В качестве примера на рис. 8.200 показано задание вертикальных колебаний правого рельса под первой КП по закону

$$z_1(t) = 0.02 \sin 2\pi t$$

#### 8.5.2.4.4. Изображение пути в анимационном окне

Изображение пути в анимационном окне настраивается на закладке **Колесо/рельс | Путь | Отображение**, рис. 8.201. Отображение рельсошпальной решетки в анимационном окне регулируется ключом **Показывать рельсы**. При активном ключе **Показывать неровности** рельсы в анимационном окне отображаются с учетом неровностей. Шаг ломаной линии, вдоль которой рисуется рельс, задается в поле **Шаг образа рельса**. Параметры графического образа шпал выделены в группу **Геометрия шпал**.

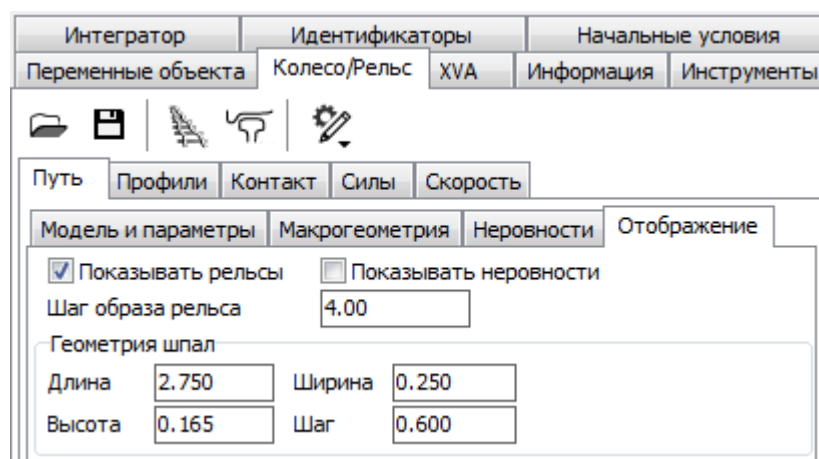


Рис. 8.201. Настройка изображения пути в анимационном окне

### 8.5.2.5. Параметры контактного взаимодействия колеса с рельсом

Модели контактных сил и сил крива выбираются на закладке **Колесо/рельс | Контакт | Контактные силы** инспектора моделирования. Различным моделям пути соответствуют различные модели контактных сил и сил крива.

Общим для всех моделей является параметр **Критическая скорость для крива**, который позволяет пользователю изменить значение критической скорости  $v_0^*$ , п. 8.4.1.2.2. "Алгоритмы расчета сил крива", стр. 8-90.

#### 8.5.2.5.1. Параметры контакта безмассового рельса

Методика расчета сил в контакте колесо-рельс при представлении рельса безмассовым элементом описана в п. 8.4.1.2. "Расчет сил в контакте колесо-рельс", стр. 8-87. Доступны следующие модели сил крива: *Мюллера, Минова, FASTSIM, FASTSIM\_A*, рис. 8.202.

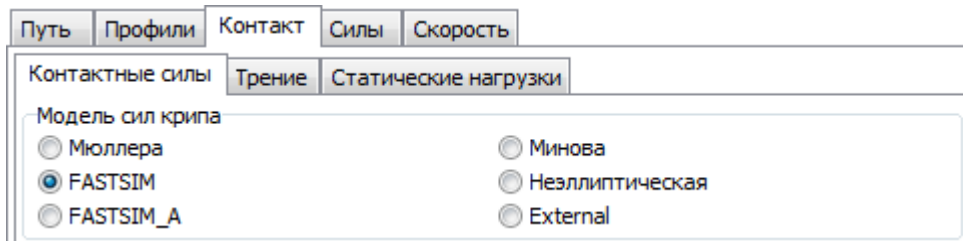


Рис. 8.202. Модели сил крива

- Модель Мюллера

Модель описана в п. 8.4.1.2.2.1. "Метод Мюллера", стр. 8-91. Единственный параметр  $m$  по умолчанию принимает значение 3, рис. 8.203.

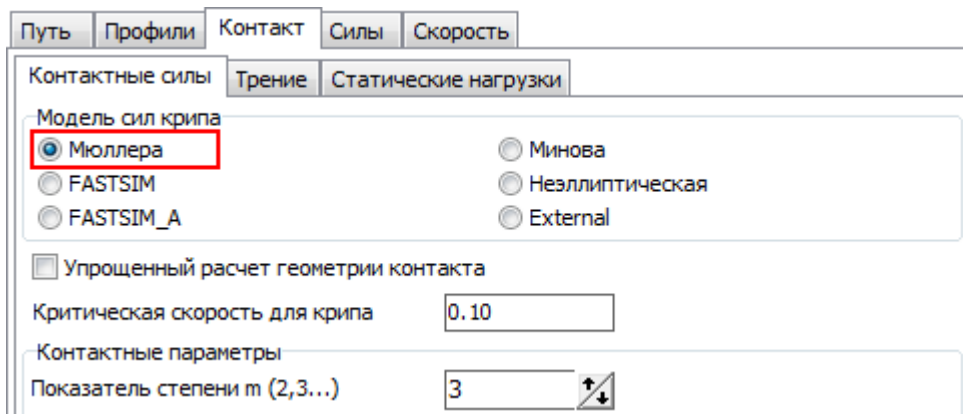


Рис. 8.203. Выбор модели Мюллера

- Модель Минова

Расчет сил крива по эмпирической аналитической зависимости, используется при моделировании движения локомотива в режиме тяги (торможения). Позволяет моделировать электромеханические процессы при срыве сцепления, п. 8.4.1.2.2.2. "Метод Минова", стр. 8-91.

- FASTSIM, FASTSIM\_A

Модели описаны в п. 8.4.1.2.2.3. "FASTSIM", стр. 8-92, и в п. 8.4.1.2.2.4. "FASTSIM\_A", стр. 8-93. Параметры моделей: **Модуль упругости** и **Коэффициент Пуассона**, **Число полос** и **Число элементов**, рис. 8.204.

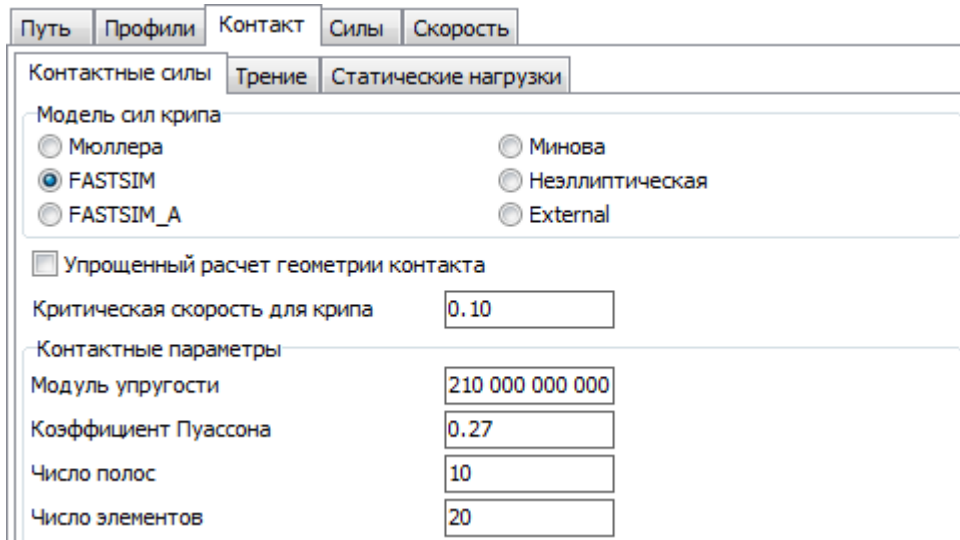


Рис. 8.204. Параметры моделей FASTSIM и FASTSIM\_A

Упрощенная модель пары профилей (п. 8.4.1.1.3. "Упрощенный расчет геометрии контакта", стр. 8-83) используется при активном ключе **Упрощенный расчет геометрии контакта**, рис. 8.205.

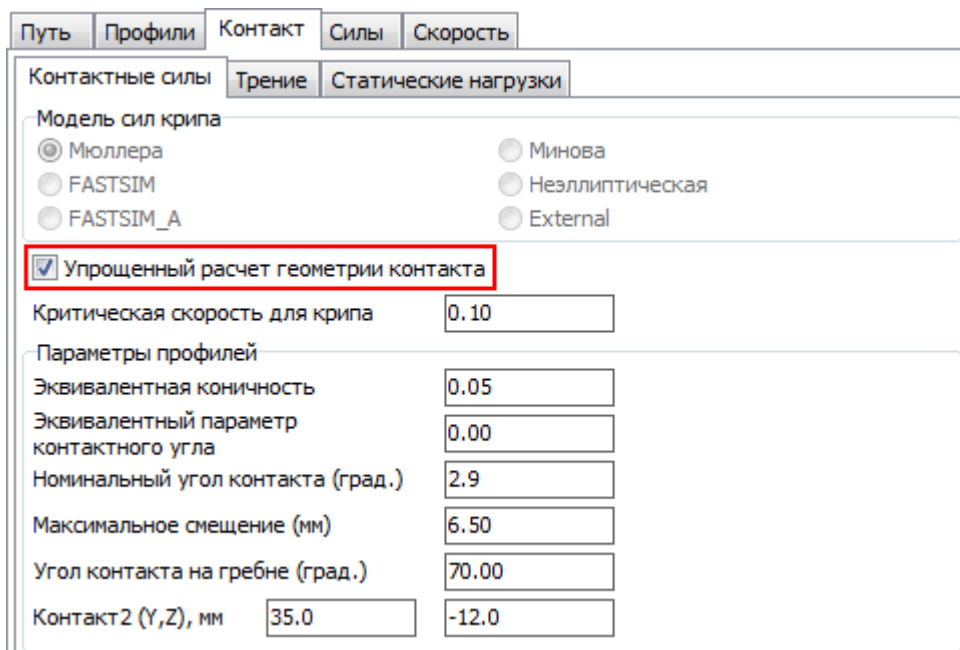


Рис. 8.205. Параметры упрощенной модели пары профилей колеса и рельса

Параметры упрощенной модели пары профилей колеса и рельса:

- **Эквивалентная коничность**  $\lambda$  (безразмерная величина);
- **Эквивалентный параметр контактного угла**  $\varepsilon$  (безразмерная величина);
- **Номинальный угол контакта**  $\beta_0$  (градусы);

- **Максимальное смещение** – максимальное поперечное смещение колеса относительно рельса до возникновения двухточечного контакта  $y^*$  (мм);
- **Угол контакта на гребне** – угол контакта гребня с боковой поверхностью рельса при двухточечном контакте  $\beta^*$  (градусы);
- **Контакт2** – координаты точки контакта гребня с боковой поверхностью рельса при двухточечном контакте в системе координат рельса  $y_r^*$  и  $z_r^*$  (мм).

**Замечание.** При упрощенном задании пары профилей колеса и рельса для расчета сил крипа используется модель Мюллера.

#### 8.5.2.5.2. Параметры контакта инерционного рельса

Методика расчета контакта колеса с инерционным рельсом описана в п. 8.4.2. "Расчет контакта колеса с инерционным рельсом", стр. 8-94. Для модели пути **Инерционный рельс** доступны модели контактных сил В. Кика и И. Пиотровского и модель Калкера CONTACT, рис. 8.206. Для модели В. Кика и И. Пиотровского требуется инструмент **UM Loco/Multipoint Contact Model**, а для использования программы CONTACT – инструмент **UM Loco/CONTACT add-on interface**. Обратите внимание, что с УМ распространяется только интерфейс к программе CONTACT. Сама программа разрабатывается, распространяется и поддерживается компанией Vtech CMCC (Нидерланды), <https://www.cmcc.nl/software/>. Для приобретения профессиональной или академической лицензии, а также для запроса пробной лицензии обращайтесь по адресу [info@cmcc.nl](mailto:info@cmcc.nl). Для запроса пробной лицензии в письме укажите имя, должность и место работы. После получения лицензии скопируйте файл лицензии в папку установки УМ C:\Program Files\UM Software Lab\Universal Mechanism\9\bin (по умолчанию) и перезапустите УМ.

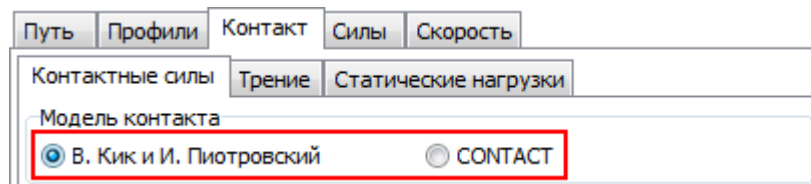


Рис. 8.206. Выбор модели контактных сил для модели пути **Инерционный рельс**

Кроме уже рассмотренных параметров, в модели В. Кика и И. Пиотровского добавляются **Коэффициент внедрения** и **Доля демпфирования**, рис. 8.207.

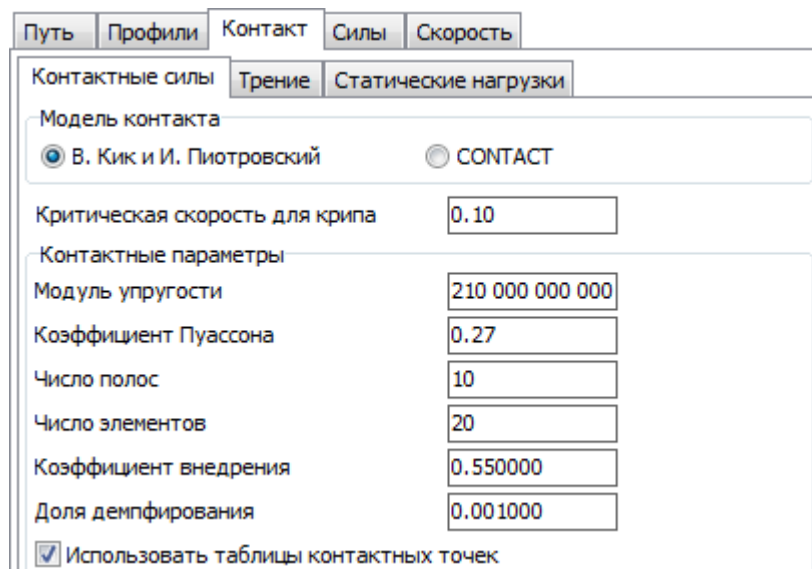


Рис. 8.207. Параметры модели контактных сил В. Кика и И. Пиотровского

**Коэффициент внедрения** ( $k_\delta$ ) – это коэффициент соответствия между областью жесткого взаимопроникновения профилей и пятном контакта [10]. Например, если принять  $k_\delta = 1$ , то за пятно контакта будет принята вся область жесткого взаимопроникновения; если принять  $k_\delta = 0,5$ , то за пятно контакта будет принята область жесткого взаимопроникновения, полученная смещением профилей на величину проникновения, уменьшенную в 2 раза. Рекомендуемое значение коэффициента внедрения 0,55.

**Доля демпфирования** – доля демпфирования от критического ( $\zeta$ ) входит в формулу расчета нормальной реакции в пятне контакта, п. 8.4.2. "Расчет контакта колеса с инерционным рельсом", стр. 8-94.

Таблицы контактных точек при расчете контакта используются при активном ключе **Использовать таблицы контактных точек**.

**Замечание.** Использование моделей контактных сил В. Кика и И. Пиотровского или CONTACT приводит к жестким дифференциальным уравнениям движения. Для этих моделей рекомендуется включать расчет матриц Якоби для контакта колесо-рельс, п. 8.5.4.1. "Метод Парка", стр. 8-260.

### 8.5.2.5.3. Упругий путь

Модель пути **Упругий путь** поддерживается только моделью контактных сил В. Кика и И. Пиотровского.

### 8.5.2.5.4. Задание коэффициентов трения в контакте колесо-рельс

**Коэффициенты трения** задаются на закладке **Колесо/рельс | Контакт | Трение** инспектора моделирования, рис. 8.208.

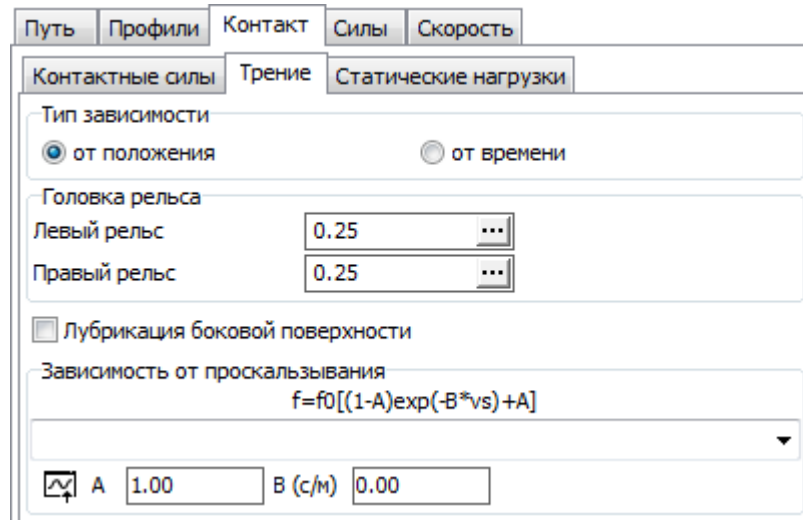


Рис. 8.208. Задание коэффициентов трения в контакте колеса с рельсом

Общая информация о коэффициентах трения в контакте колесо-рельс содержится в п. 8.4.3. "Коэффициент трения в контакте колесо-рельс", стр. 8-97.

Для задания постоянных **коэффициентов трения на поверхности катания**  $f_r$  левого и правого рельсов используются соответствующие поля группы **Головка рельса**, рис. 8.208. Если коэффициент трения переменный, то сначала нужно выбрать тип зависимости – **от положения** или **от времени**, а затем кликом по кнопке **...** вызвать редактор кривых для задания кривой зависимости коэффициента трения от выбранного параметра.

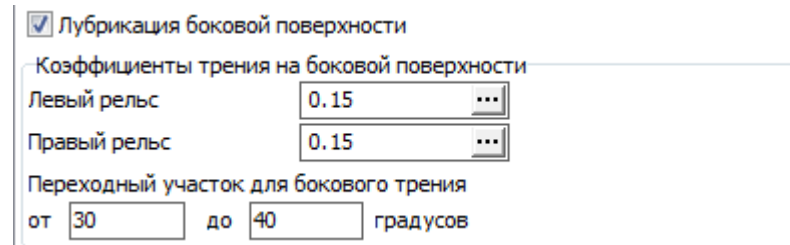


Рис. 8.209. Задание коэффициентов трения на боковой поверхности рельса

При моделировании лубрикации боковой поверхности рельса или гребня колесной пары следует активировать флаг **Лubrикация боковой поверхности** (рис. 8.209) и задать значение коэффициента трения  $f_s$  на боковой поверхности. Углы  $\beta_r$  и  $\beta_s$ , задающие разделение профиля рельса на зоны различного трения в поперечном направлении (рис. 8.103), задаются в полях **от** и **до**.

Параметры зависимости коэффициента трения на поверхности катания от скорости проскальзывания А и В (рис. 8.210) входят в формулу (см. п. 8.4.3. "Коэффициент трения в контакте колесо-рельс", стр. 8-97)

$$f = f_0((1 - A)e^{-Bv_1} + A)$$

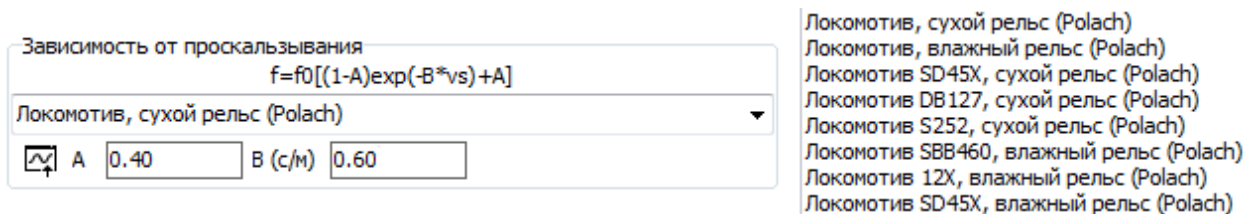


Рис. 8.210. Зависимость коэффициента трения от скорости проскальзывания. Модели зависимостей.

При отсутствии такой зависимости значения параметров  $A=1$ ,  $B=0$ . Параметр  $A$  показывает отношение коэффициента трения при бесконечной скорости проскальзывания к значению при нулевой скорости. Например,  $A=0.4$  соответствует случаю, когда при больших скоростях скольжения коэффициент падает в 2.5 раза. Параметр  $B$  показывает как быстро падает коэффициент трения, см. рис. 8.211.

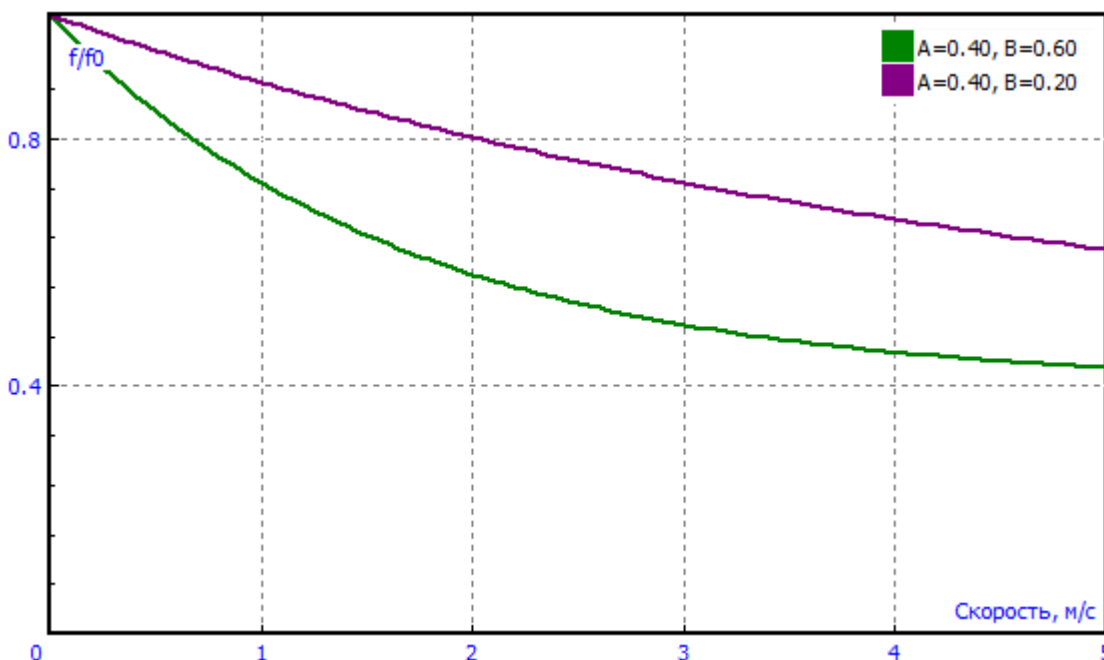


Рис. 8.211. Примеры падения коэффициента трения с ростом скорости скольжения

Выпадающий список на рис. 8.210 позволяет назначить значения параметров  $A$  и  $B$  из базы [12], табл. 8.7.

Таблица 8.7

**Параметры зависимости коэффициента трения от скорости проскальзывания**

Локомотив	Состояние рельса	A	B (с/м)
Типовой	Сухой	0.4	0.6
Типовой	Влажный	0.4	0.2
SD45X	Сухой	0.44	0.6
DB127	Сухой	0.38	0.7
S252	Сухой	0.36	0.55

SBB460	Влажный	0.5	0.16
12X	Влажный	0.4	0.4
SD45X	Влажный	0.38	0.18


### 8.5.2.6. Задание сил, приложенных к автосцепке

С использованием закладки **Колесо/рельс | Силы** пользователь может задать силы, действующие на экипаж в области автосцепки со стороны других вагонов, не входящих в модель (рис. 8.212).


#### 8.5.2.6.1. Задание сил и точек приложения

Рис. 8.212. Интерфейс задания сил на автосцепке

Силы могут быть получены в результате эксперимента или расчета в модуле продольной динамики поезда. Предусмотрено задание одной или двух сил. Каждая сила задается следующим набором данных и параметров.

- Тело, к которому приложена сила – выбирается из списка тел. Как правило, это кузов.
- Точка приложения силы. Координаты  $X$  и  $Y$  задаются в *системе координат выбранного тела*, а координата  $Z$  равна высоте точки приложения от *головки рельса*.
- Файлы с описанием силы. Сила задается тремя проекциями на оси СК тела. Для задания каждой проекции следует выбрать предварительно созданный файл с расширением *frc*. Для выбора файла используется кнопка  в правой части соответствующего поля рис. 8.212. Описание формата файла см. ниже.
- Используйте флаг **Включить** для включения или выключения сил.
- При включенном ключе **Функция пути** файлы должны содержать значения проекций сил в зависимости от пройденного экипажем пути, при выключенном – в зависимости от времени.
- Ключ **Менять знак сил на противоположный** используется, если необходимо сменить знак сил в файле. Например, если силы получены по результатам исследования продольной динамики поезда, то этот ключ следует активировать, потому

что силы в межвагонных связях в модуле **UM Train** считаются действующими на передний вагон.

Проекций сил, которым не назначены файлы с данными, принимают нулевые значения. С помощью кнопки  инспектора (рис. 8.212) можно построить графики введенных сил. Выбранные значения параметров и данных сохраняются в файле конфигурации модели \*.rwc.

Для удаления проекции силы используются следующие два метода:

- поместите курсор (текстовый, а не мыши) в поле с именем файла силы и нажмите клавишу *Delete*;
- подведите курсор мыши к полю с именем файла силы, щелчком на правой кнопке вызовите контекстное меню и выполните команду удаления.

### 8.5.2.6.2. Создание файла с описанием силы

Силы по п. 8.5.2.6.1. "*Задание сил и точек приложения*", стр. 8-198 должны быть предварительно описаны в виде файлов, содержащих зависимость проекции силы в СК тела (кузова) от пройденного пути или времени. Сила задается в ньютонах, путь – в метрах, время – в секундах.

При расчете непрерывных значений сил используется линейная интерполяция.

Предусмотрено задание силы в двух форматах.

- **Формат \*.txt**

В данном случае текстовый файл содержит график изменения силы в виде двух столбцов: абсцисса (время или путь) и сила. Пример:

0	0
50	0
70	30000
150	30000
170	0
180	0

- **Формат \*.frc (устаревший)**

Файл содержит последовательные значения силы с постоянным шагом 0.1 м или 0.1 с, начиная со значения при нуле независимой переменной. Сила записывается в формате single (число с плавающей запятой длиной 4 байта).

Для создания файла \*.frc рекомендуется использовать мастер создания неровностей (см. п. 8.5.1.2.1. "*Создание файлов неровностей*", стр. 8-114), поскольку в результате получается файл нужного формата, следует лишь переименовать его расширение на *frc* вместо *wav*. Рекомендуется созданные файлы размещать в каталоге модели или в каталоге {Данные УМ/rw}.

### 8.5.2.6.3. Построение графиков и визуализация сил

Переменные для построения графиков сил в процессе моделирования движения экипажа, с целью контроля над правильностью их задания, доступны на закладке **Ж.-д. экипаж Мастера переменных** (п. 8.5.3.1.3. "*Переменные, относящиеся к рельсовому экипажу в целом*", стр. 8-217)

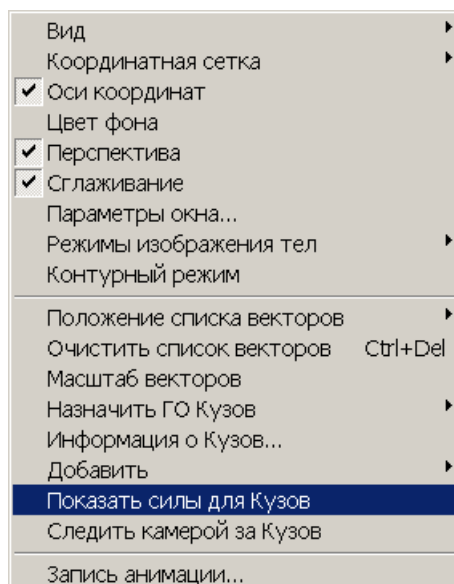


Рис. 8.213. Визуализация сил для тела Кузов

Для того чтобы визуализировать векторы сил в анимационном окне при моделировании движения, следует задать визуализацию всех сил для тела, к которому силы приложены. Для этого наведите курсор мыши на тело, щелкните правой кнопкой и выберите пункт *Показать силы для [Имя тела]*, рис. 8.213. Если векторы не появляются при моделировании, то возможной причиной могут быть либо неверно заданные координаты точки приложения, либо слишком большой масштабный коэффициент для сил (в последнем случае для изменения масштаба используйте команду *Масштаб векторов* контекстного меню, рис. 8.213)

#### 8.5.2.6.4. Примеры создания файлов силы

В качестве примера рассмотрим задание поперечных сил на передней и задней автоцепке (рис. 8.214). Пусть силы образуют пару. Поперечная сила впереди равна нулю на первых 50 метрах пути, далее равномерно растет до значения 3000 Н на интервале от 50 до 70 м. Далее до 150 метров она остается постоянной, и, наконец, равномерно падает до нуля еще на 20 м. Поперечная сила сзади имеет противоположный знак.

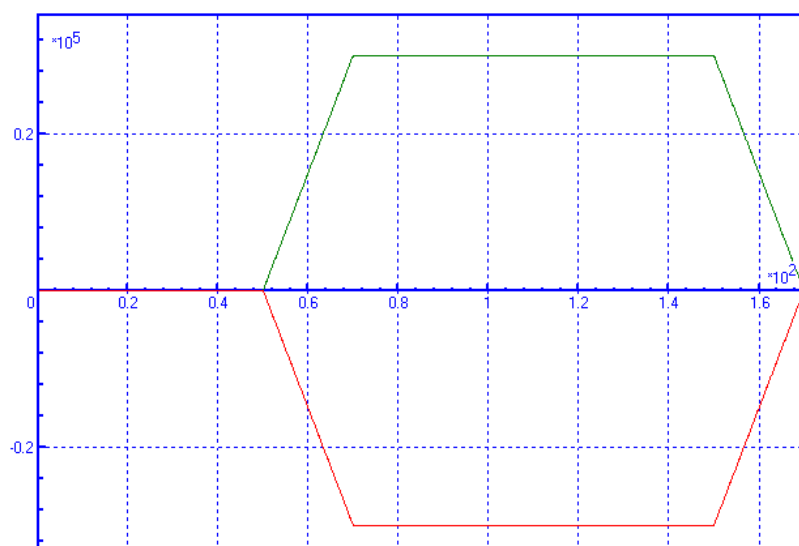


Рис. 8.214. Графики сил

Откройте мастер создания неровностей (команда меню **Инструменты | Создание неровностей | Железнодорожный путь**), перейдите на вкладку **По точкам** и далее – к редактору задания поточечного графика щелчком на кнопке

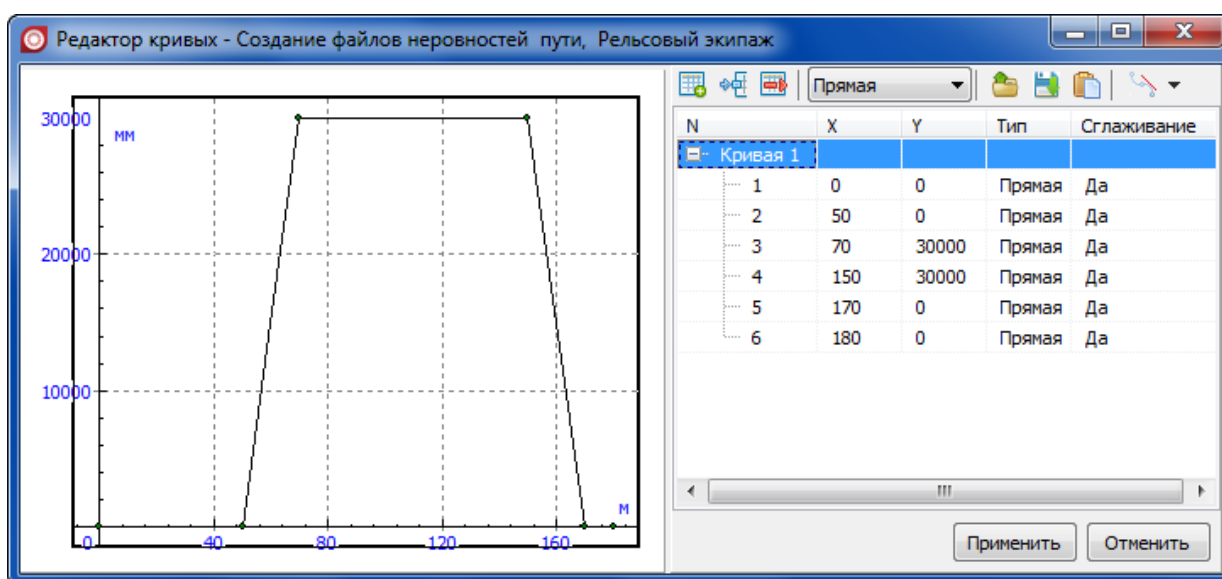


Рис. 8.215. Поточечное задание силы

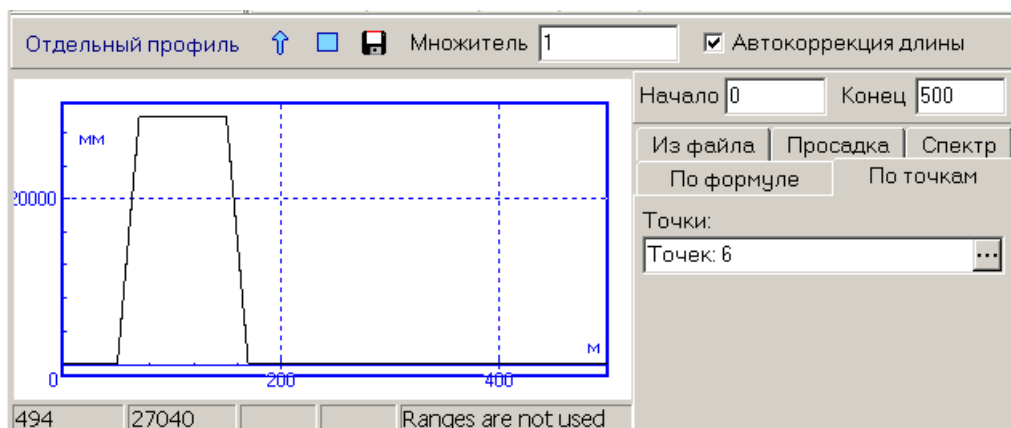
Щелчками на кнопке задайте 6 точек и внесите значения абсцисс и ординат, как показано на рис. 8.215. Щелчок на кнопке позволяет увидеть график силы.

Используйте кнопку **Выйти** для того, чтобы закрыть окно редактора. Запишите результат в файл, используя кнопку в нижней части мастера. Переименуйте вручную расширение файла на *frc* вместо *way*.

Вместо того чтобы вносить точки через таблицу в правой части рис. 8.215, можно записать значения абсциссы и ординаты в две колонки в любом текстовом редакторе

0	0
50	0
70	30000
150	30000
170	0
180	0

затем скопировать их в буфер обмена (Ctrl+C) и вставить в окно редактора (Ctrl+V). Таким образом можно конвертировать в нужный формат большие объемы данных, полученные, например, из эксперимента или из расчета продольной динамики. В последнем случае следует сначала сохранить рассчитанные данные в текстовый файл из графического окна.



Для того, чтобы создать файл с силой противоположного знака, задайте значение -1 (минус единица) в поле **Множитель**, и отошлите график в верхнюю часть мастера с помощью кнопки . Запишите результат в отдельный файл с помощью верхней кнопки и измените нужным образом расширение.

Созданные таким образом файлы можно сразу же назначить проекциям сил (рис. 8.212) и использовать при моделировании динамики экипажа.

### 8.5.2.7. Дополнительные параметры

#### 8.5.2.7.1. Отклонение формы колеса от идеальной окружности

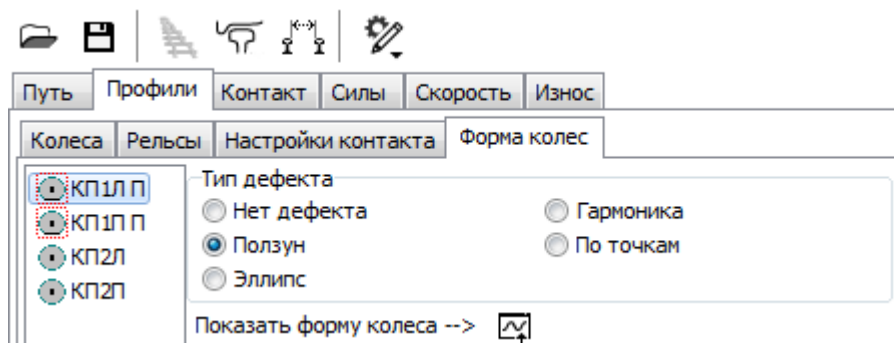


Рис. 8.216. Задание формы колеса

Для задания отклонения формы колеса от идеальной окружности используется вкладка **Колесо/Рельс | Профили | Форма колес**, рис. 8.216. В левой части вкладки содержится список колес с визуальным указанием типа отклонения. Например, на рис. 8.216 экипаж имеет две колесные пары, для первой из которых задан ползун, а колеса второй имеют форму идеальной окружности.

Доступ к форме конкретного колеса происходит при клике на соответствующем элементе списка колес.

При учете отклонений динамически *изменяется нормальная реакция* на круге катания и *учитывается возможное продольное смещение* точки контакта, в том числе скачком для ползуна.

##### 8.5.2.7.1.1. Ползун

Ползун – это повреждение колеса, выражающееся в появлении на круговой поверхности катания плоского места, рис. 8.217.

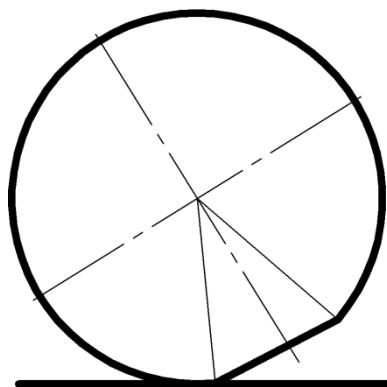


Рис. 8.217. Ползун

Различают новообразованный и изношенный ползуны. Новообразованный – это ползун с острыми краями, т.е. ползун сразу после образования. Изношенный – это ползун с

закругленными краями. Края новообразованного ползуна быстро закругляются вследствие пластических деформаций и износа. Форма ползуна указывается в группе **Тип**, рис. 8.218.

Тип дефекта

Нет дефекта                       Гармоника  
 Ползун                                       По точкам  
 Эллипс

Показать форму колеса -->

Фаза (градусы)

Параметры ползуна

Тип

Новообразованный                       Изношенный

d (мм)

L0 (мм)

L1 (мм)

Смещение (мм)

Профиль ползуна

Рис. 8.218. Параметры ползуна

Ползун задается следующими параметрами.

**d** – глубина ползуна. Длина новообразованного ползуна рассчитывается как длина хорды:  $L_0 = \sqrt{8Rd - d^2}$ , рис. 8.219.

**L1** – длина изношенного ползуна, рис. 8.219. Форма изношенного ползуна аппроксимируется функцией [17].

$$z_{rf}(x) = \frac{d}{2} \left[ 1 + \cos \left( 2 \frac{\pi x}{L_1} \right) \right].$$

Минимальное значение **L1**, гарантирующее выпуклую форму колеса, должно превосходить  $\pi L_0/2$ .

**Смещение** – поперечное смещение СК профиля ползуна относительно круга катания (СКК).

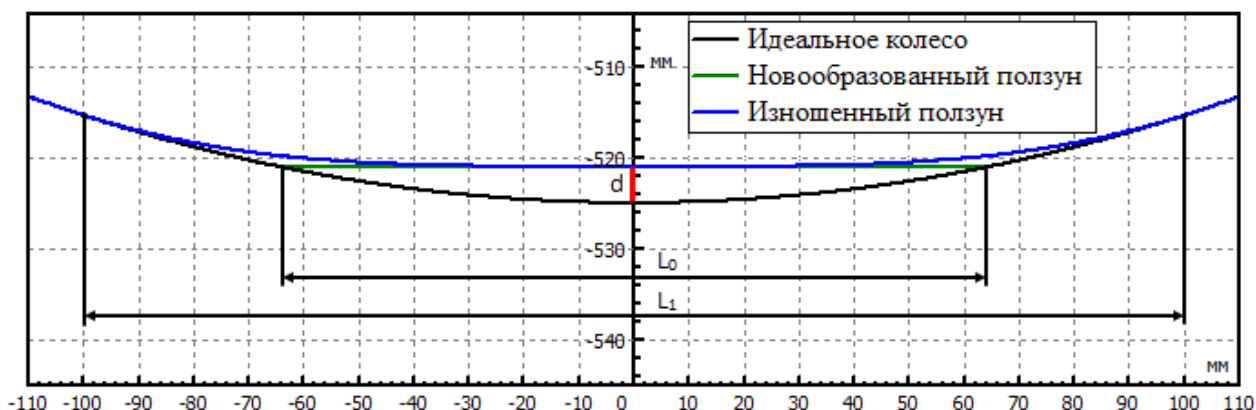


Рис. 8.219. Геометрия новообразованного и изношенного ползунков

**Профиль ползуна** соответствует профилю поверхности рельса, на котором он был образован, рис. 8.220.

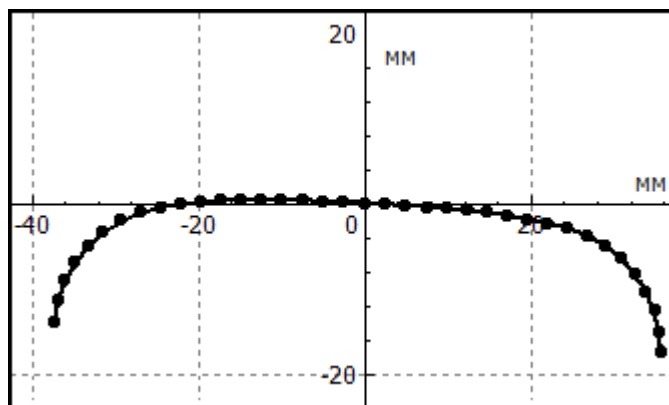


Рис. 8.220. Профиль ползуна

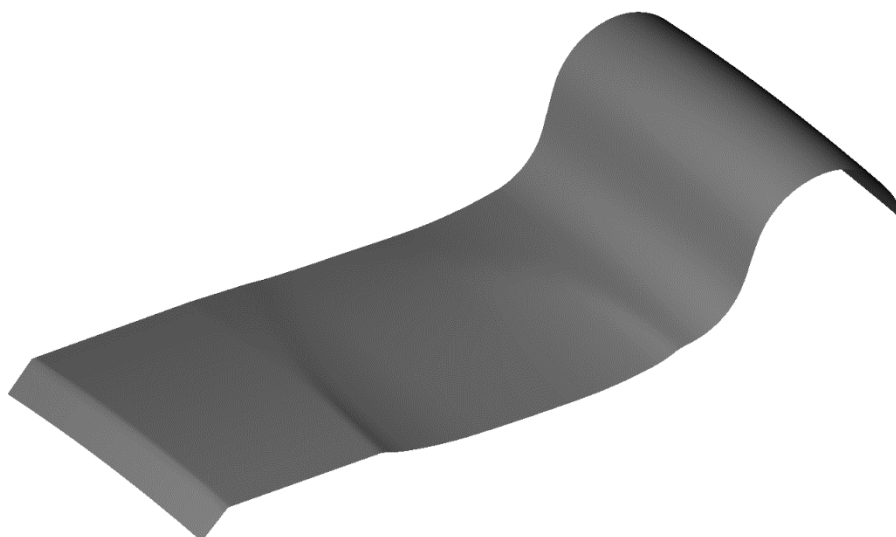


Рис. 8.221. Пространственная модель ползуна

**Замечание.** Пространственная модель ползуна поддерживается только моделями контактных сил В. Кика и И. Пиотровского или CONTACT.

### 8.5.2.7.1.2. Эллипс

Тип дефекта

<input type="radio"/> Нет дефекта	<input type="radio"/> Гармоника
<input type="radio"/> Ползун	<input type="radio"/> По точкам
<input checked="" type="radio"/> Эллипс	

Показать форму колеса -->

Фаза (градусы)

Параметры эллипса

dA (мм) <input style="width: 60px;" type="text" value="1.000"/>	dB (мм) <input style="width: 60px;" type="text" value="-1.000"/>
---	--

Рис. 8.222. Параметры эллиптического колеса

Форма эллиптического колеса задается уравнением

$$\frac{x^2}{(R + dA)^2} + \frac{y^2}{(R + dB)^2} = 1,$$

где параметры  $dA$  и  $dB$  задают отклонение значений полуосей от радиуса круга катания  $R$ , заданного в программе ввода, п. 8.2.3.5. "Геометрия колесной пары", стр. 8-15, п. 8.2.3.6. "Редактирование параметров КП", стр. 8-16, рис. 8.223.

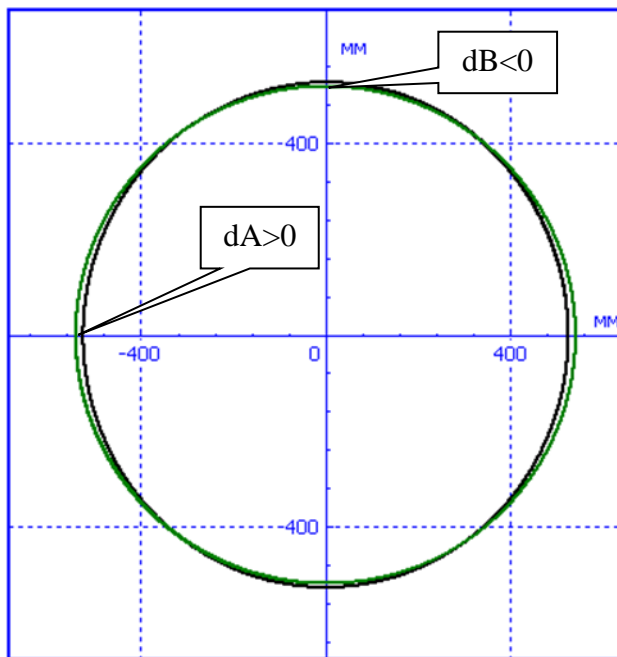


Рис. 8.223. Пример эллиптического колеса

### 8.5.2.7.1.3. Гармоника

Форма колеса задается уравнениями

$$\begin{aligned} x &= (R + A \sin N\varphi) \sin \varphi \\ y &= (R + A \sin N\varphi) \cos \varphi \\ \varphi &\in [0, 2\pi] \end{aligned}$$

где отклонение переменного радиуса от радиуса круга катания  $R$  задается гармонической функцией с амплитудой  $A$ , рис. 8.224. Число «горбов» на кривой равно задаваемому пользователем значению  $N$ , рис. 8.225.

Тип дефекта

Нет дефекта
  Гармоника
  По точкам

Ползун
  Эллипс

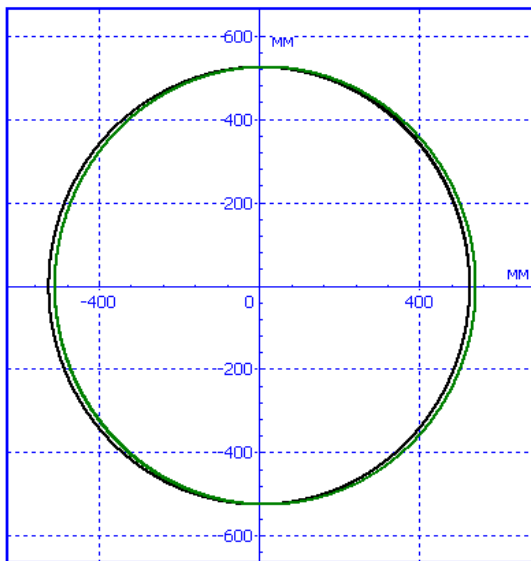
Показать форму колеса -->

Фаза (градусы)

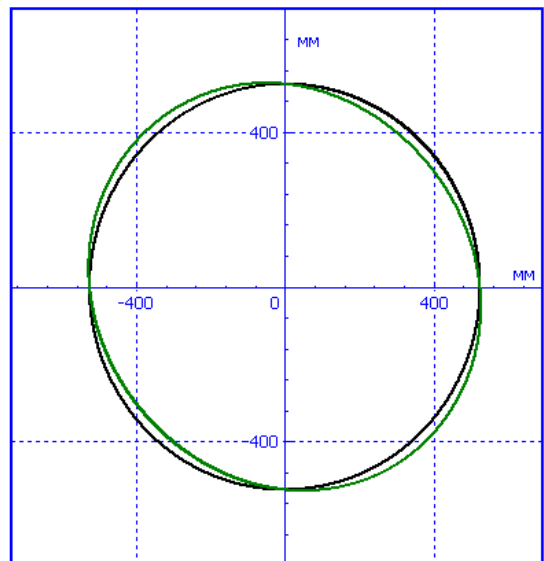
Параметры гармоника

A (мм)  N

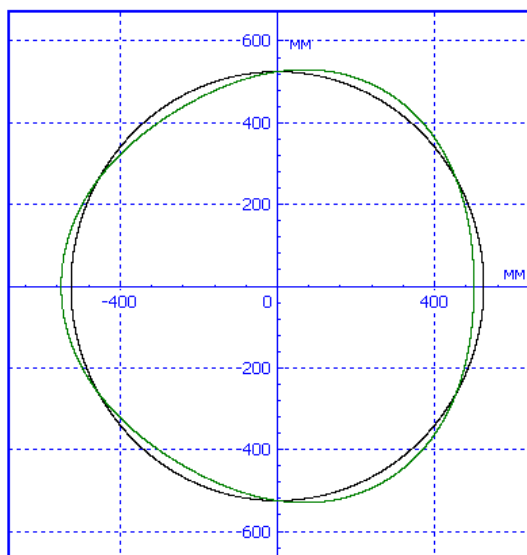
Рис. 8.224. Параметры колеса с гармоническим отклонением формы от окружности



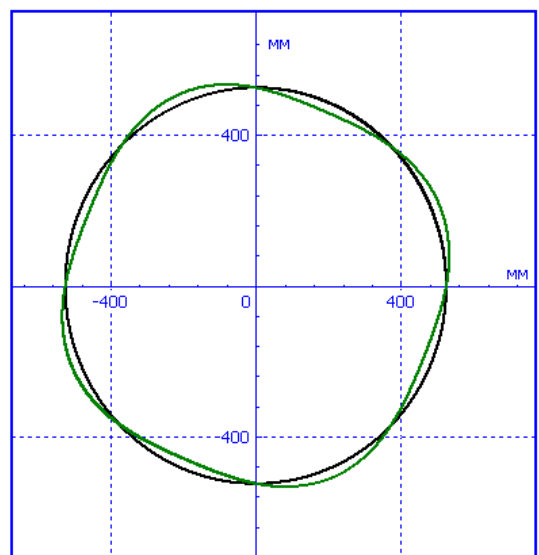
N=1



N=2



N=3



N=4

Рис. 8.225. Примеры колес с разным значением числа «горбов»

**8.5.2.7.1.4. По точкам**

Форма колеса задается уравнениями

$$x = (R + dr(\varphi)) \sin \varphi$$

$$y = (R + dr(\varphi)) \cos \varphi$$

$$\varphi \in [0, 2\pi]$$

где отклонение переменного радиуса  $dr$  от постоянного значения  $R$  задается пользователем текстовом файле в виде зависимости от угла, рис. 8.227. Форма колеса с этим отклонением показана на рис. 8.228.

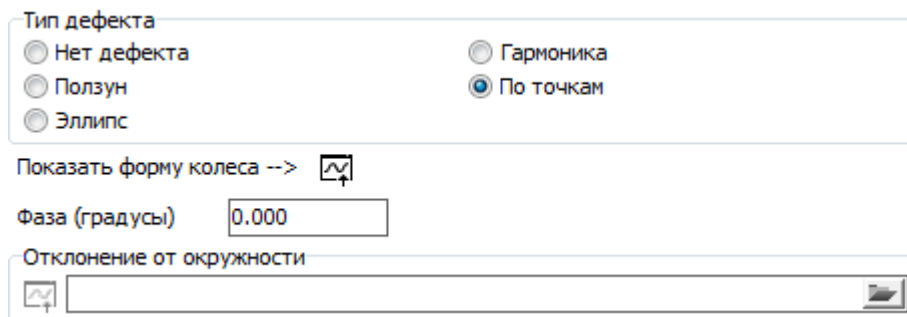


Рис. 8.226. Поточное задание формы колеса

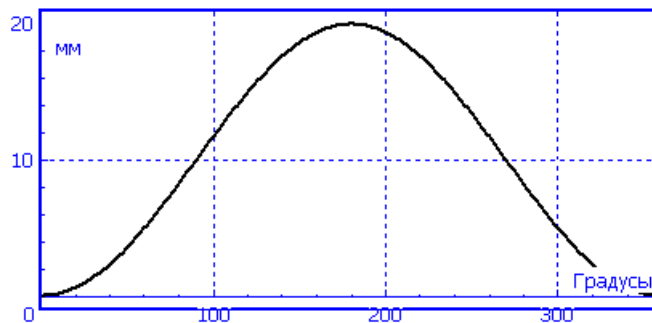


Рис. 8.227. Зависимость отклонения радиуса от угла

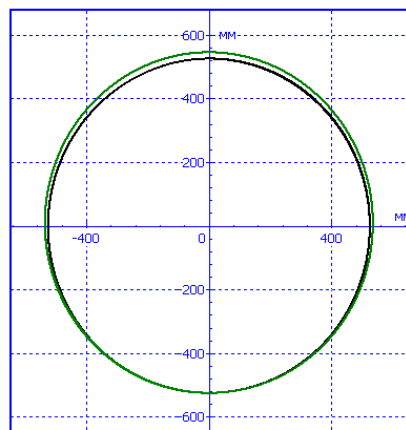


Рис. 8.228. Пример поточного задания формы колеса

В текстовом файле точки задаются в два столбца. Первый содержит значение угла в градусах, второй: отклонение радиуса в миллиметрах. Пример:

```

0      0
1      0.000456917
2      0.001827527
3      0.004111415
4      0.007307883
5      0.011415959
6      0.016434391
7      0.02236165
8      0.02919593
9      0.036935151
10     0.045576954
11     0.055118707
12     0.065557503
    
```

.....

Для чтения данных из файла следует щелкнуть на кнопке  и выбрать нужный файл.

Для получения значения *dr* при произвольном значении угла используются интерполяционные полиномы Лагранжа 3-го порядка.

### 8.5.2.7.2. Дефекты радиусов

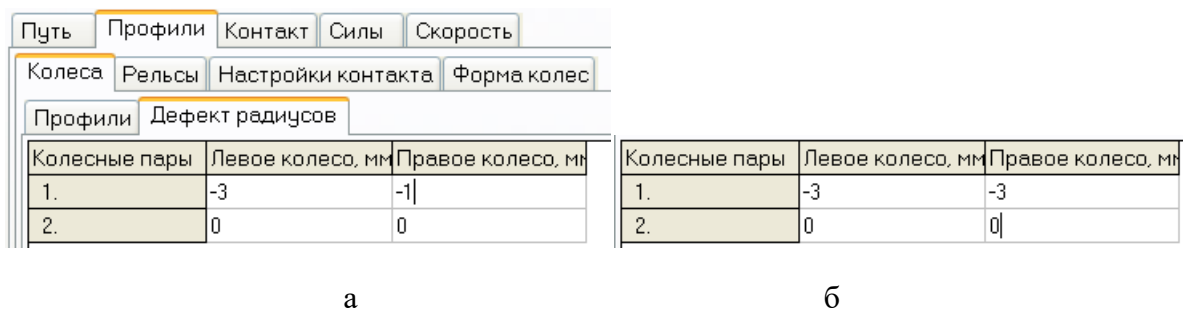


Рис. 8.229. Задание дефектов радиусов

Дефект радиусов колес (разница между фактическим радиусом круга катания колеса и радиусом, заданным в программе ввода, п. 8.2.3.6. "Редактирование параметров КП", стр. 8-16) в миллиметрах вводится на закладке **Колесо/рельс | Профили | Колеса | Дефект радиусов**. На рис. 8.229а левое колесо первой КП имеет радиус на 2 мм меньше, чем правое. На рис. 8.229б радиусы колес первой КП на 3мм меньше, чем радиусы второй КП.

Для организации многовариантных расчетов дефекты радиусов параметризованы внутренними идентификаторами, п. 8.6.1. "Список внутренних идентификаторов, параметризующих условия функционирования РЭ", стр. 8-267.

### 8.5.2.7.3. Настройки расчета геометрии контакта колеса с рельсом

Параметр	Значение
Параметр скачка в критерии двухточечного контакта (мм)	10
Параметр угла в критерии двухточечного контакта	0.5
<input checked="" type="checkbox"/> Учитывать поворот профилей X	
<input checked="" type="checkbox"/> Прореживать точки на профиле	
Шаг точек при прореживании (мм)	1
Интервал сглаживания кривизны на круге катания (мм)	10
Интервал сглаживания кривизны на гребне (мм)	1
Граница скачка контакта (мм)	20

Рис. 8.230. Дополнительные параметры расчета геометрии контакта

При использовании изношенных профилей колес и/или рельсов, а также при расчете износа колес и рельсов могут возникать некоторые проблемы. Рассмотрим эти проблемы и способы их решения с помощью дополнительных параметров, настраиваемых пользователем. Параметры отображаются на закладке **Колесо/рельс | Профили | Настройки контакта** инспектора моделирования.

- **Параметр скачка и угла в критерии двухточечного контакта.**

Данные параметры используются в процедуре расчета координат точек контакта для проверки факта перехода к двухточечному контакту (см. параметры  $\eta_y$  и  $\eta_n$  в п. 8.4.1.1.2. "Расчет таблиц координат точек контакта", стр. 8-80). Варьирование данных параметров в некоторых случаях позволяет улучшить работу процедуры определения двухточечного контакта.

- **Ключ Учитывать поворот профилей X**

Иногда профили колес и рельсов в районе выкрушки допускают конформный контакт (контакт согласованных поверхностей), и при небольших относительных поворотах  $\Delta\alpha$  профилей вокруг продольной оси происходит резкий скачок в значениях координат точки контакта или переход от одноточечного контакта к двухточечному контакту и обратно. Такие переходы характеризуются резкими скачками в значениях сил взаимодействия колеса с рельсом и приводят к расходимости численного метода интегрирования уравнений движения. В таких случаях часто удается стабилизировать процесс выключением зависимости координат точек контакта от угла  $\Delta\alpha$  (см. п. 8.4.1.1.2. "Расчет таблиц координат точек контакта", стр. 8-80).

- **Ключ Прореживать точки на профиле**

Задание профилей с очень маленьким шагом по оси абсцисс и без сглаживания, как правило, приводит к нарушению непрерывности зависимости координат от поперечного

смещения профилей и угла поворота. В этом случае предлагается автоматически увеличивать шаг до рекомендуемого значения 1 мм (параметр **Шаг точек при прореживании**).

- **Интервал сглаживания кривизны**

Интервал, на котором сглаживается кривизна. Сглаживание производится методом наименьших квадратов. Сглаженная кривизна используется в алгоритмах определения контактных пятен, в основе которых лежит теория Герца (*FASTSIM*, *FASTSIM\_A*), требующая плавного изменения кривизны в окрестностях контактной точки.

- **Граница скачка контакта**

Таблицы координат точек контакта на профиле колеса и рельса при поперечном смещении имеют дискретный характер. Если расстояние между соседними точками контакта в таблице больше данного параметра, то диагностируется скачок (разрыв графика) координаты, то есть координата будет меняться скачком при непрерывном смещении профиля колеса относительно профиля рельса. Если же расстояние меньше данного параметра, то происходит линейная интерполяция координаты между двумя заданными точками.

### **8.5.3. Инструменты для отображения и анализа динамики рельсовых экипажей**

#### **8.5.3.1. Особенности создания списка переменных**

Общие сведения о создании и использовании переменных, а также списков переменных содержатся в [Главе 4](#), пп. *Переменные*, *Мастер переменных*, *Список переменных*. Здесь мы остановимся на переменных, относящихся исключительно к моделированию динамики рельсовых экипажей.

### 8.5.3.1.1. Переменные, характеризующие контакт колеса с рельсом

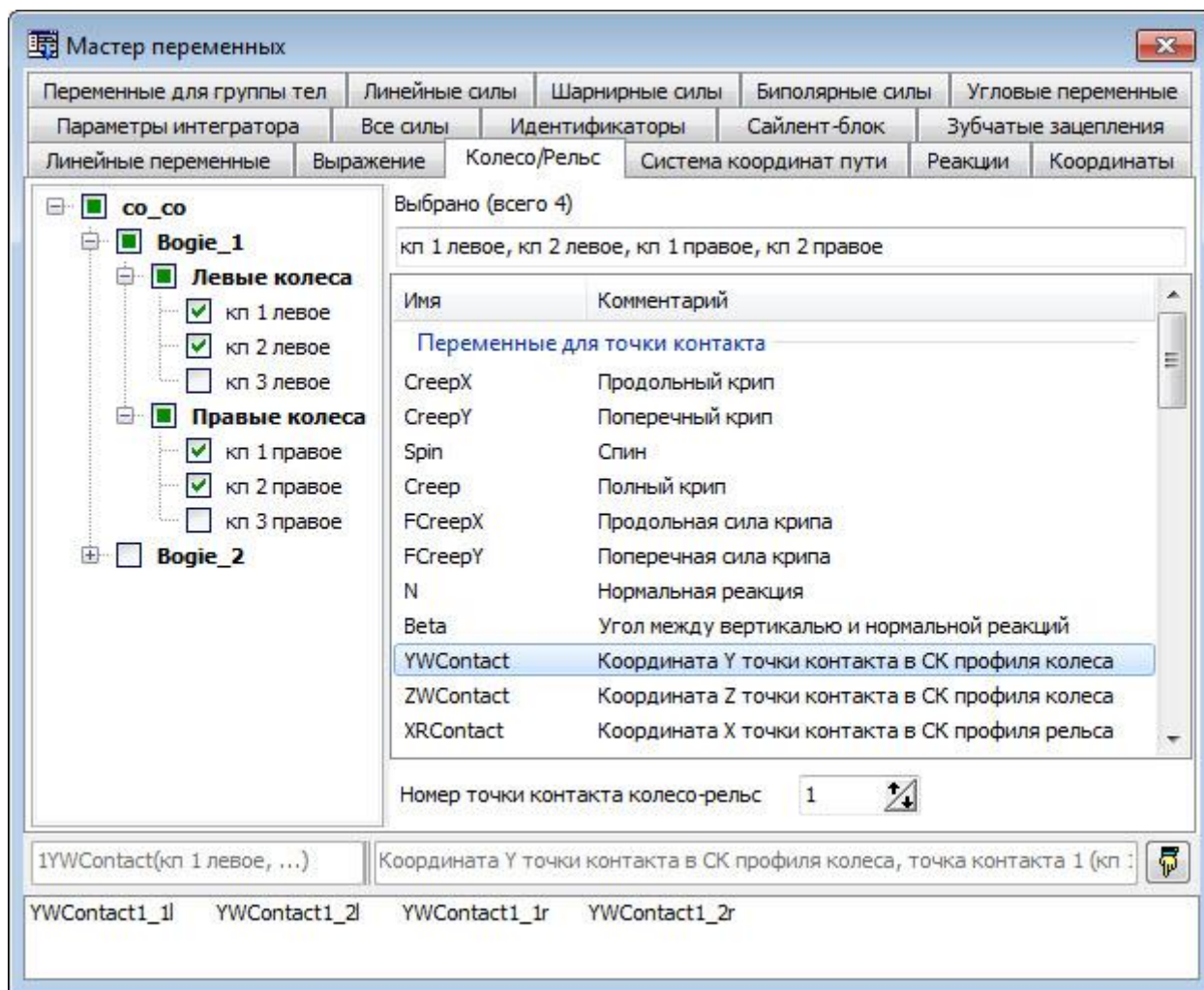


Рис. 8.231. Создание списка переменных контактного взаимодействия колеса с рельсом

Для формирования переменных, определяющих взаимодействие каждого колеса экипажа с рельсом, используется закладка **Колесо/Рельс** Мастера переменных (рис. 8.231). Методика работы с мастером детально рассмотрена в [Главе 4](#), п. *Мастер переменных*.

**Замечание.** Колесные пары нумеруются 1,2... в соответствии с убыванием их продольной координаты.

Переменные на закладке **Колесо/Рельс** сгруппированы в две группы – **Переменные для точки контакта** и **Переменные для колеса**. Первая группа содержит переменные, описывающие точки контакта колесо-рельс. Следует отметить, что модели **контактных сил Упрощенная** и **Двухточечная** предполагают максимум две точки контакта. В этом случае первая точка контакта соответствует **одноточечному контакту** или контакту на круге катания при двухточечном контакте (рис. 8.96, справа), а вторая точка контакта соответствует контакту на гребне для профилей, допускающих двухточечный контакт (рис. 8.96, слева). Модели **контактных сил Многоточечная** и **CONTACT** допускает неограниченное число точек контакта. Точки нумеруются в порядке их расположения от внешней стороны рельса к внутренней (рис. 8.232). Переменные этой группы описаны в табл.

8.8. Вторая группа содержит переменные для колеса, не связанные непосредственно ни с одной из точек контакта. Описание этих переменных приведено в табл. 8.9

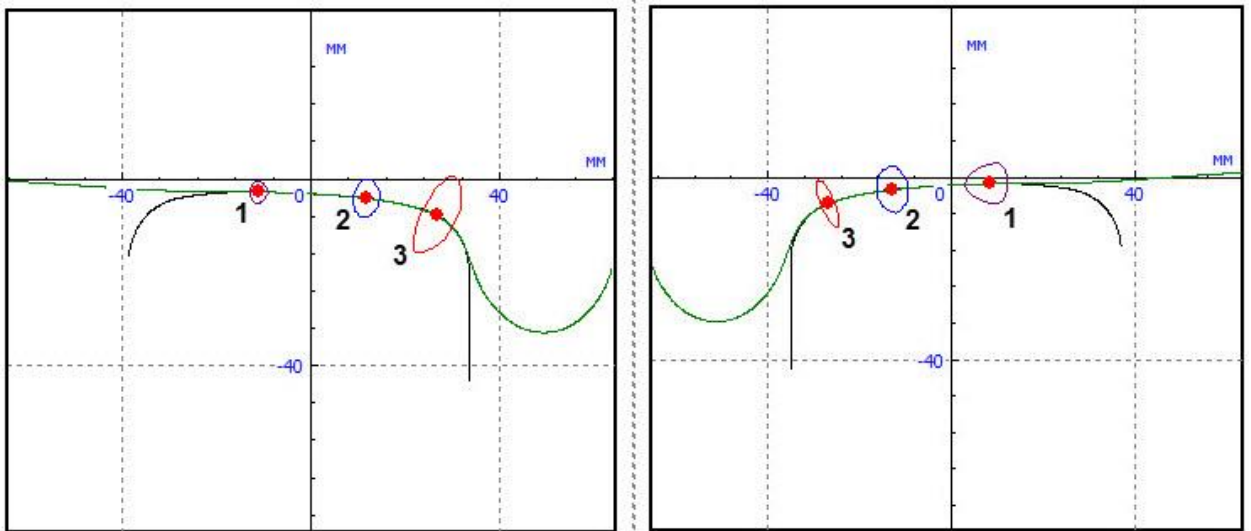



Рис. 8.232. Нумерация точек контакта

Для создания переменной, соответствующей отдельному колесу, следует выделить нужное колесо в списке в левой части **Мастера переменных**. Например, выделение элемента “кп 1 левое” соответствует выбору левого колеса первой колесной пары.

В примере, изображенном на рисунке, щелчком на кнопке  одновременно созданы четыре переменные в контейнере.

Список типов переменных расположен в правой части мастера. В первой колонке списка располагается имя типа, из которого имя формируемой переменной получают добавлением номера колесной пары и букв *l* для левого колеса (left) и *r* для правого (right). Например, имя переменной *YWContact1\_Ir* (координата Y первой точки контакта колеса с рельсом в СК профиля колеса – Y Wheel Contact 1) образовано из стандартного имени типа *YWContact1* и соответствует правому колесу первой колесной пары.

Если выбирается переменная для отдельного колеса, то пользователь может обычным образом изменить как идентификатор, так и комментарий. Если же выбирается группа переменных, то им назначаются стандартные идентификаторы и комментарий.

Таблица 8.8

**Переменные для точки контакта**

Идентификатор	Комментарий
Creep[i]x, Creep[i]y	Продольный $\xi_x$ и поперечный $\xi_y$ кривы, используются в алгоритмах расчета сил кривы.
Spin[i]	Спин $\varphi$ . Используется в алгоритмах расчета сил кривы.
Creep[i]	Модуль вектора кривы $\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$
FCreep[i]x, FCreep[i]y	(Н) Продольная $T_x$ и поперечная $T_y$ силы кривы.
N[i]	(Н) Нормальная сила $N$ в контакте, рис. 8.96.
Beta[i]	(рад) Угол $\beta$ между нормальной реакцией $N$ и осью Z СК пу-

	ти (рис. 8.96). Угол положителен при наклоне нормальной реакции внутрь колес.
YWContact[i], ZWContact[i]	(м) Координаты y (поперечная) и z (вертикальная) точки контакта в СК профиля колеса.
XRContact[i], YRContact[i], ZRContact[i]	(м) Координаты x (продольная), y (поперечная) и z (вертикальная) точки контакта в СК профиля рельса.
MWear[i]	Показатель износа – мощность сил трения (Вт): $M_{wear} = \int_A \mathbf{v} \boldsymbol{\tau} dA,$ где $\mathbf{v}$ – скорость «истинного» скольжения, $\boldsymbol{\tau}$ – касательные усилия.
Tgamma[i]	Показатель износа $T\gamma$ (Н): $T\gamma =  T_x \xi_x  +  T_y \xi_y $
Iw[i]	Показатель износостойкости (Н/мм <sup>2</sup> ): $I_w = \frac{T\gamma}{A},$ где $A$ – площадь пятна контакта.
FIs[i]	Показатель поверхностной усталости (Н): $FI_{surf} = \frac{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}}{N} - \frac{k}{p_0} > 0,$ где $T_x$ и $T_y$ – продольная и поперечная силы крива, $N$ – нормальная сила, $k$ – предел текучести при чистом сдвиге, $p_0$ – максимальное контактное давление.
Area[i]	(м <sup>2</sup> ) Площадь пятна контакта.
Pressure[i]	(Па) Максимальное контактное давление.
TauMax[i]	(Па) Максимальное напряжение сдвига на поверхности контакта.
a[i], b[i]	(мм) Продольная и поперечная полуоси эллиптического пятна контакта или эквивалентного неэллиптического.
AdhArea[i]	(м <sup>2</sup> ) Площадь зоны сцепления в пятне контакта.
Penetration[i]	(мм) Максимальное геометрическое проникновение.

Таблица 8.9

**Переменные для колеса**

Идентификатор	Комментарий
CSafety	Коэффициент запаса устойчивости в отношении вкатывания колеса на рельс (18), п. 8.5.3.1.4.2. "Российский критерий. Уточненный и комбинированный критерии", стр. 8-222.
CSafetyRefined	Уточненный коэффициент запаса устойчивости (19), п. 8.5.3.1.4.2. "Российский критерий. Уточненный и комбинированный критерии", стр. 8-222.

Nadal	Критерий безопасности Надаля по вкатыванию колеса на рельс (16), п. 8.5.3.1.4.1. " <i>Критерии Надаля и Вайнштока</i> ", стр. 8-218.
Weinstock	Критерий безопасности Вайнштока по вкатыванию колеса на рельс (17), п. 8.5.3.1.4.1. " <i>Критерии Надаля и Вайнштока</i> ", стр. 8-218.
SFC	Комбинированный коэффициент безопасности $\lambda_c$ (21), п. 8.5.3.1.4.2. " <i>Российский критерий. Уточненный и комбинированный критерии</i> ", стр. 8-222.
ZLifting	(м) Отрыв по вертикали поверхности катания колеса от рельса при вкатывании. Для профилей одноточечного контакта (рис. 8.88, справа) – подъем колеса выше критического положения.
ZLiftingRelative	Относительный подъем колеса над головкой рельса $z^*$ (20), п. 8.5.3.1.4.2. " <i>Российский критерий. Уточненный и комбинированный критерии</i> ", стр. 8-222.
psi	(рад) Угол набегания – угол между касательной к нитке рельса и плоскостью колеса
Fx, Y(L), Q(V)	(Н) Суммарные силы, действующие на колесо со стороны рельса в направлении оси СК пути для данной колесной пары (продольная, боковая и вертикальная силы). Y(L) соответствует <b>боковой силе</b> , п. 8.5.3.1.5. " <i>Боковые и рамные силы</i> ", стр. 8-227.
dyRail	(м) Поперечное отжатие рельса
dzRail	(м) Вертикальный прогиб рельса под колесом
dPhiRail	(рад) Угол закручивания рельса
dyW/R	(м) Поперечное смещение колеса относительно рельса
К.Д.(W/R)	Коэффициент динамики колесо/рельс в вертикальном направлении: $k_d = \frac{F_z - F_{z0}}{F_{z0}},$ где $F_z$ – проекция суммарной силы, действующей на колесо на ось Z СК пути, $F_{z0}$ – статическая нагрузка на колесо.
dyTrack, dzTrack	(м) Горизонтальная и вертикальная неровности рельса в текущем положении колеса (п. 8.3.1.5. " <i>Неровности рельсовых нитей</i> ", стр. 8-75 и п. 8.5.1.2. " <i>Создание неровностей рельсовых нитей</i> ", стр. 8-114).
DerivYTrack, DerivZTrack	Производные от графика вертикальных и горизонтальных неровностей по продольной координате
dyRailFull	(м) Полное смещение рельса в поперечном направлении за счет начального расстояния от гребня до боковой поверхности, неровностей и упругого отжатия. Начальное расстояние рассчитывается как расстояние от точки на гребне с максимальным наклоном до боковой поверхности рельса.
MWear,	Просуммированные по всем точкам контакта факторы износа –

<p><math>A_{wear}</math>, <math>S_{wear}</math></p>	<p>мощность (Вт), работа (Дж), удельная работа (Дж/м) сил трения.</p> $A_{wear} = \int_0^t M_{wear} dt$ <p><math>S_{wear} = A_{wear}/S</math>, здесь <math>S</math> – пройденный путь.</p>
---	--

**8.5.3.1.2. Переменные, относящиеся к колесной паре в целом**

Переменные, относящиеся к колесной паре в целом, представлены на закладке **Колесные пары** (рис. 8.233). Описание переменных приводится в табл. 8.10.

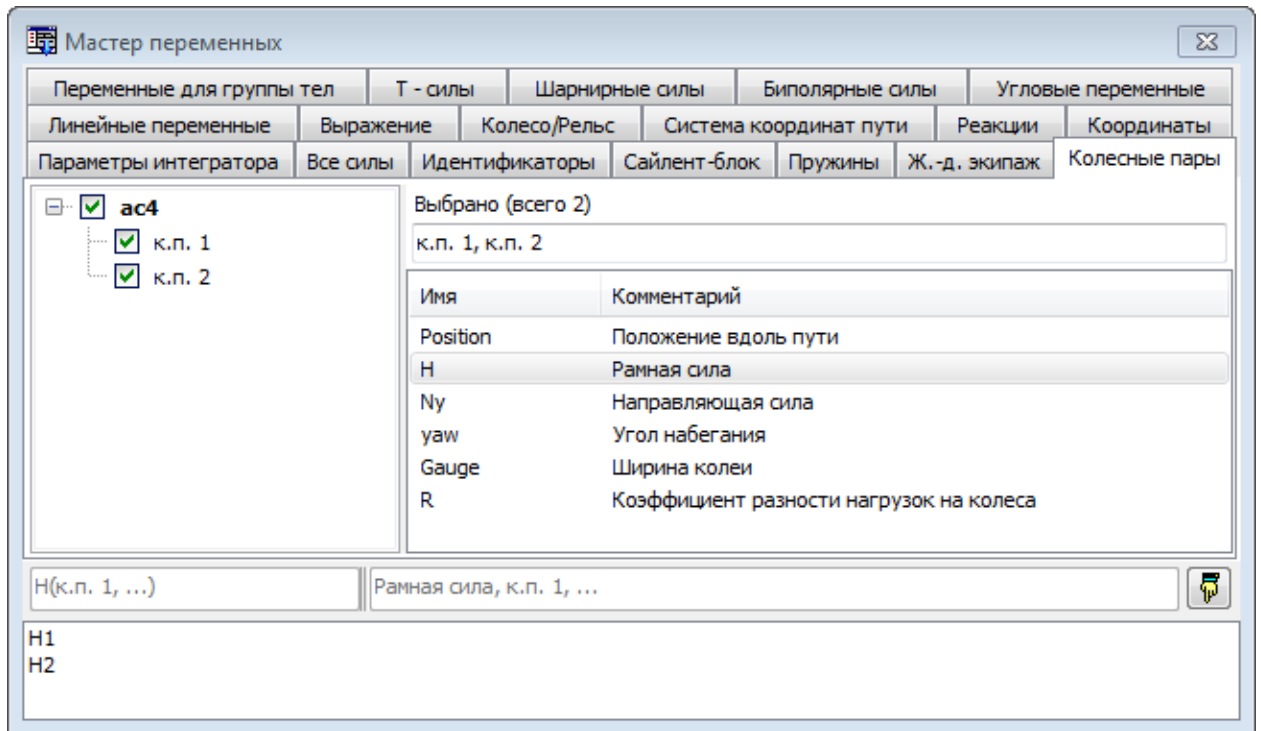


Рис. 8.233. Переменные, относящиеся к колесной паре в целом

Таблица 8.10

**Переменные, относящиеся к колесной паре в целом**

Идентификатор	Комментарий
Position	(м) Положение колесной пары вдоль пути
H	(Н) Рамная сила. Рассчитывается как сумма сил, действующих на раму со стороны данной колесной пары, см. п. 8.5.3.1.5. <i>"Боковые и рамные силы"</i> , стр. 8-227.
Ny	(Н) Направляющая сила – проекция нормальной реакции $N$ на ось $Y$ СК пути для данной колесной пары. Проекция рассчитывается по формуле $N_y = \pm N \sin \beta$ , причем знак минус берется для левого колеса.
yaw	(рад) Угол набегания колесной пары
Gauge	(м) Ширина колеи под колесной парой, см. рис. 8.174.
R	Кoeffициент разности нагрузок на колесо (Ratio of wheel load

	<p>difference per axle согласно стандарту EN 14363):</p> $R = \frac{ Q_l - Q_r }{Q_l + Q_r},$ <p>где <math>Q_l</math> и <math>Q_r</math> – суммарная сила в вертикальном направлении для левого и правого колеса соответственно.</p>
--	--

### 8.5.3.1.3. Переменные, относящиеся к рельсовому экипажу в целом

Переменные, относящиеся к рельсовому экипажу в целом, представлены на закладке **Ж.-д. экипаж** (рис. 8.234). Описание переменных приводится в табл. 8.11.

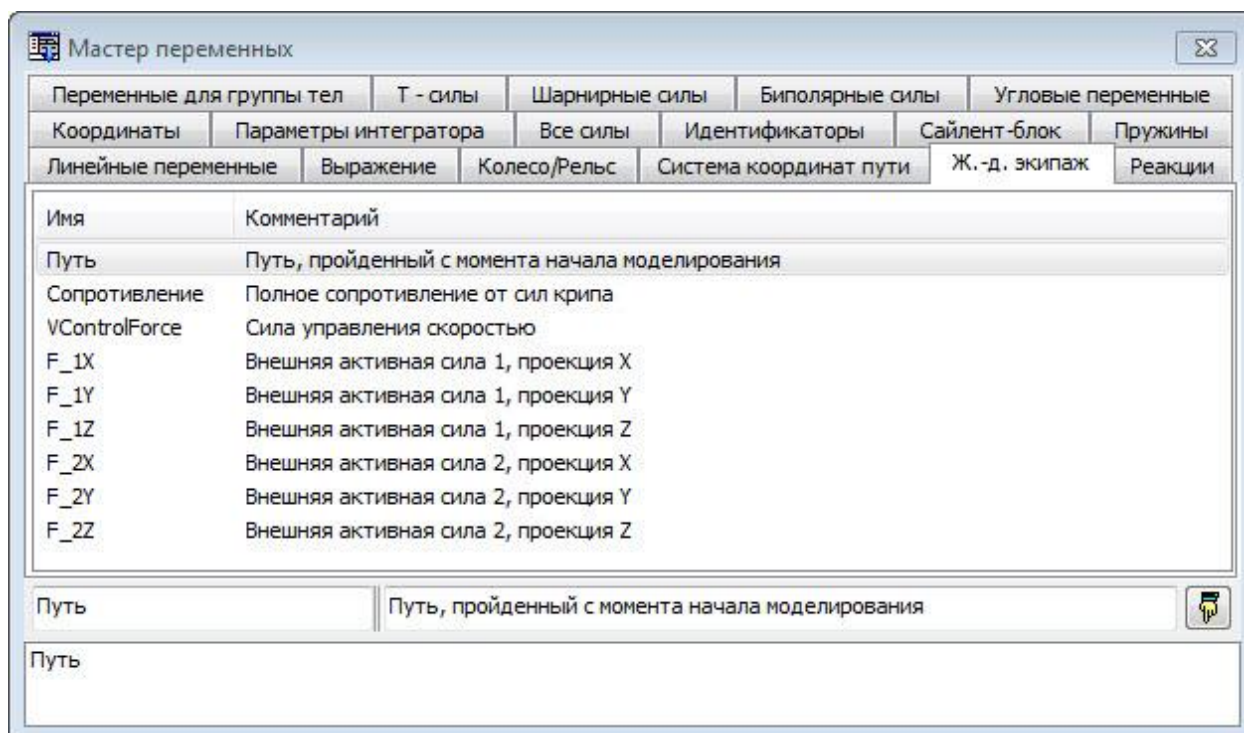


Рис. 8.234. Переменные, относящиеся к экипажу в целом

Таблица 8.11

### Переменные, относящиеся к рельсовому экипажу в целом

Идентификатор	Комментарий
Путь	(м) Путь, пройденный экипажем с момента начала моделирования. Переменная используется для построения графиков других переменных в зависимости от пути.
Сопротивление	(Н) Сила сопротивления, вызванная силами крипа. Рассчитывается как суммарная мощность сил крипа всех КП, деленная на скорость продольного движения.
VControlForce	(Н) Сила управления скоростью (п. 8.5.2.2. "Режимы продольного движения экипажа", стр. 8-165, п. 8.5.2.2.2. " $v=const$ ", стр. 8-165. и п. 8.5.2.2.3. "По профилю", стр. 8-165).

F_1X, F_1Y, F_1Z, F_2X, F_2Y, F_2Z	(Н) Силы, приложенные к автосцепкам (п. 8.5.2.6. "Задание сил, приложенных к автосцепке", стр. 8-198).
---------------------------------------	--

### 8.5.3.1.4. Показатели безопасности движения в отношении вкатывания колеса на рельс

#### 8.5.3.1.4.1. Критерии Надаля и Вайнштока

Предложенный еще в конце девятнадцатого века М. Надалем [18] способ оценки опасности схода колеса за счет вкатывания на рельс до сегодняшнего дня лежит в основе большинства современных методик. Он основывается на рассмотрении равновесия колеса в условиях начала его вкатывания на рельс. Это состояние колеса и действующие в контакте гребня и рельса силы в проекции на поперечную вертикальную плоскость изображены на рис. 8.235.

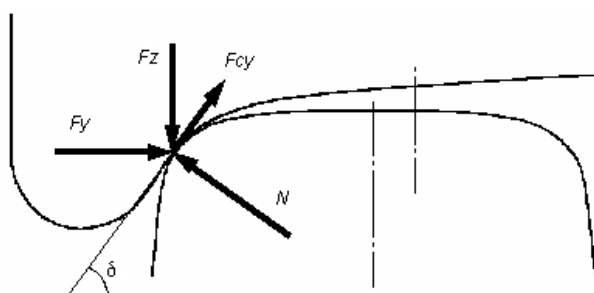


Рис. 8.235. Проекция сил в контакте гребня колеса и рельса на поперечную вертикальную плоскость в момент начала схода

Равновесие сил в точке контакта колеса с рельсом перед началом вкатывания в соответствии со схемой рис. 8.235 можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} F_y &= N \cdot \sin \delta - F_{cy} \cdot \cos \delta; \\ F_z &= N \cdot \cos \delta + F_{cy} \cdot \sin \delta, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $F_y$  и  $F_z$  – боковое и вертикальное давления на рельс;  $N$  – нормальная сила в контакте;  $F_{cy}$  – поперечная сила крива.

Соотношения между этими силами можно также записать в виде

$$\begin{aligned} N &= R_z \cdot \cos \delta + F_y \cdot \sin \delta; \\ F_{cy} &= F_z \cdot \sin \delta - F_y \cdot \cos \delta, \end{aligned}$$

Полагая  $\mu_y = \frac{F_{cy}}{N}$  и поделив первое уравнение системы (2) на второе, после элементарных преобразований получим точное условие начала вкатывания колеса на рельс в случае пары профилей колесо-рельс одноточечного контакта

$$\frac{F_y}{F_z} = \frac{\operatorname{tg} \delta - \mu_y}{1 + \mu_y \cdot \operatorname{tg} \delta} \tag{3}$$

Заметим, что в такой форме критерий справедлив и для профилей двухточечного контакта. При достижении это равенства нормальная реакция на круге катания принимает нулевое значение.

Правая часть выражения (3) используется как нормировочный коэффициент при формировании критериев для оценки опасности схода. Левая часть выражения (3) представляет собой оценочную функцию. Трудности выполнения нормировки в соответствии с выражением (3) связаны с определением значения величины  $\mu_y = \frac{F_{cy}}{N}$  при проведении натуральных экспериментов. Использование упрощающих предпосылок позволяет получить нормировочный коэффициент с большей или меньшей степенью точности.

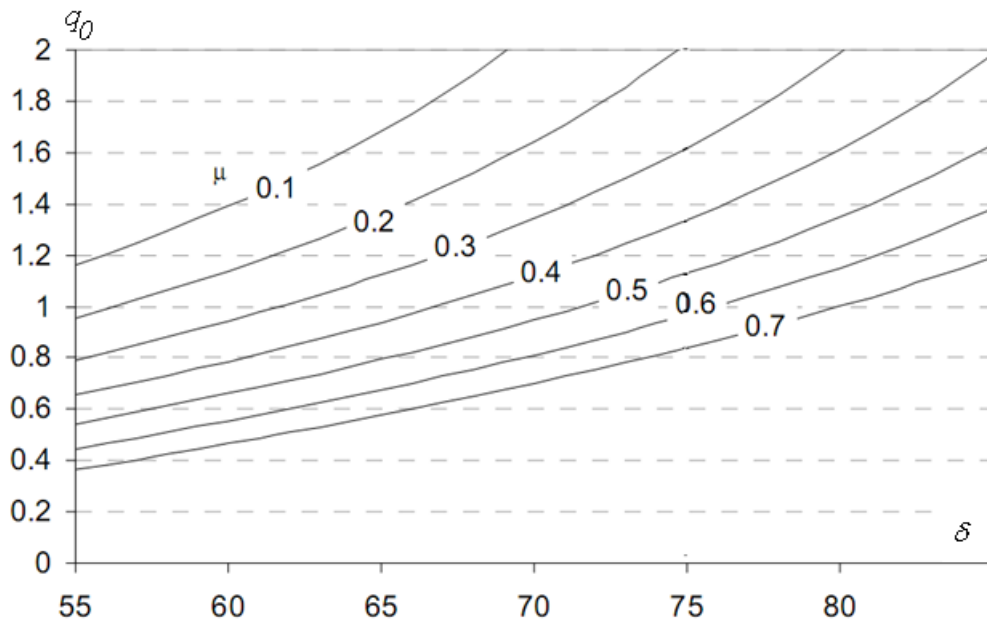


Рис. 8.236. Зависимость предельного отношения  $q_0$  по критерию Надаля от угла наклона гребня при различных значениях коэффициента трения

В качестве предельного значения отношения поперечной силы к вертикальной в критерии Надаля [1] используется выражение

$$q_0 = \frac{tg\delta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\delta},$$

где  $\mu$  – коэффициент трения в контакте гребня и рельса. Изначально предполагалось, что критерием безопасности должно быть выполнение условия (здесь мы используем принятое для критерия Надаля обозначения  $L, V$  для значений поперечной и вертикально сил)

$$\frac{L}{V} = \frac{F_y}{F_z} < q_0. \tag{4}$$

Однако опыт применения этого критерия для оценки опасности схода показал, что движение может быть неопасным и при значениях отношения в левой части неравенства (16) больших значениях числа Надаля  $Nad$ . Это нарушение критерия особенно велико при малых и отрицательных углах набегания колеса на рельс, когда величина  $\mu_y$  может суще-

ственно отличаться от  $\mu$  в меньшую сторону. Поэтому критерий Надаля дает очень консервативную оценку опасности схода, указывая на опасность даже в тех случаях, когда её не существует. Результаты подробного исследования, раскрывающего недостатки нормативного коэффициента устойчивости приведены ниже в данном разделе, а также в п. 8.5.3.1.4.3. Пример прохождения грузовым вагоном неблагоприятного сочетания детерминированных неровностей.

В работе [19] Г. Вайнштоком для оценки опасности схода, кроме соотношения  $(F_y/F_z)_F$  на набегающем колесе, предлагается использовать соотношение  $(F_y/F_z)_T$  на сбегающем колесе. Критерием безопасного движения при этом должно быть выполнение условия

$$\frac{\left(\frac{F_y}{F_z}\right)_F - \left(\frac{F_y}{F_z}\right)_T}{\mu + Nad} < 1. \tag{5}$$

Таким образом, оценочной функцией критерия Вайнштока является разность отношений поперечных и вертикальных усилий в контакте между набегающим и сбегающим колесами колесной пары, а в качестве нормировочного коэффициента используется сумма  $\mu + Nad$ .

К достоинствам критерия (5) можно отнести меньшую чувствительность нормировочного коэффициента к изменению трения в контакте колеса и рельса. Графики на рис. 8.237 иллюстрируют это на примере нового вагонного профиля колес с максимальным углом  $\delta$  на гребне  $60^\circ$ . Это особенно важно при оценке опасности схода в условиях натуральных экспериментов.

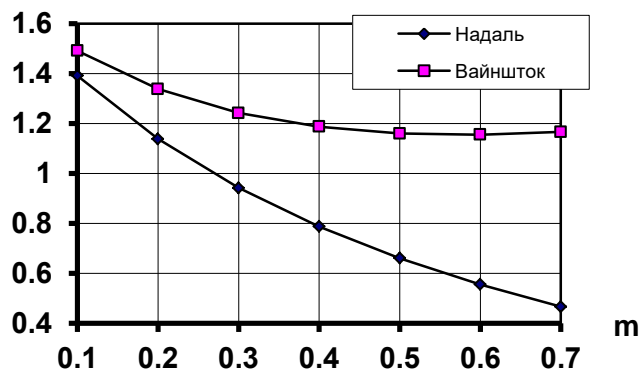


Рис. 8.237. Изменение нормирующих коэффициентов критериев Надаля и Вайнштока в зависимости от коэффициента трения

Критерий (5) позволяет более точно оценить ситуацию начала схода, однако и он имеет заметную погрешность, т.к. по-прежнему возможны ситуации, когда при значении критерия больше единицы движение остается безопасным (при малых и отрицательных углах набегания).

На рис. 8.238 приведены характерные ситуации начала вкатывания и соответствующие им фрагменты графиков для критериев Надаля, Вайнштока и точного критерия (3), иллюстрирующие сказанное. Графики получены путем компьютерного моделирования движения грузового вагона по прямому участку пути со скоростью 35 м/с. Для каждого графика

в левой части рисунка приведены соответствующие состояния в контактах колесной пары и рельсов в виде копии с экрана.

Изображения на рис. 8.238 а, б, д соответствуют различным случаям выхода пятна контакта на боковую поверхность гребня, расположенную под углом  $60^\circ$ . Точный критерий при этом равен строго единице. На рис. 8.238 в, г показаны неопасные для схода случаи, когда набегающее колесо еще не начало вкатываться и имеет две точки контакта с рельсом. При этом точный критерий не превышает значения 0,8, в то время критерии Вайнштока и особенно Надаля имеют значения больше единицы. Из рисунков видно, что критерий Вайнштока дает значения более близкие к точному критерию, чем критерий Надаля. Все ситуации, приведенные на рис. 8.238, не приводят к сходу.

Рассмотренные выше критерии Надаля и Вайнштока разрабатывались для нужд натуральных испытаний, когда измерительная система обеспечивала только данные о боковой и вертикальной силе, действующей в контактах между колесом и рельсом. Дополнительные возможности для уточнения текущих значений параметра  $\mu$  в опасных ситуациях, соответствующих выходу пятна контакта на гребень возникают, если в процессе натуральных испытаний возможна оценка  $F_x$  – продольных усилий взаимодействия колеса и рельса.

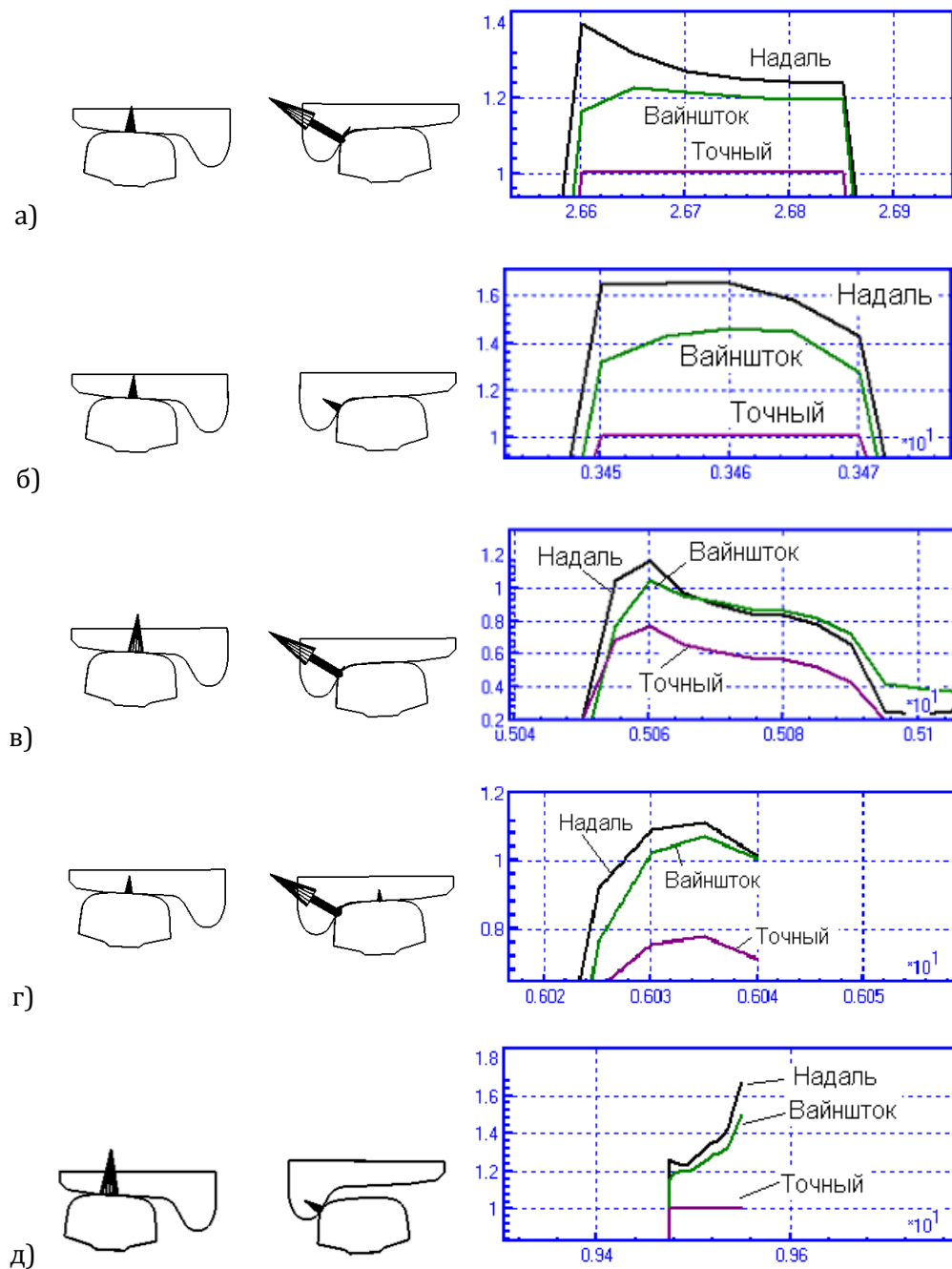


Рис. 8.238. Состояние в контактах колесной пары и рельсов и соответствующие этим состояниям фрагменты графиков для трех критериев, оценивающих опасность схода (профиль новый конический)

### 8.5.3.1.4.2. Российский критерий. Уточненный и комбинированный критерии

Российский критерий безопасности в отношении вкатывания колеса на рельс основан на критерии Надаля. Оцениваемой переменной является «коэффициент запаса устойчивости»

$$\lambda = \frac{F_z \operatorname{tg} \delta - \mu}{F_y (1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \delta)} = \frac{F_z}{F_y} q_0, \quad (6)$$

Здесь  $\delta$  – угол наклона гребня. Для профилей двухточечного контакта рассчитывается только в режиме двухточечного контакта. Для профилей, не допускающих двухточечный контакт, рассчитывается при значении контактного угла  $\beta > 30^\circ$ . При значении  $\lambda > 5$

принимается  $\lambda = 5$ . При отсутствии контакта колеса с рельсом (то есть при полном отрыве колеса) принимается  $\lambda = 5$ . Опасными для безопасности считаются значения  $\lambda < 1,2$ .

Российский критерий связан с критерием Надаля (16) соотношением

$$Nadal = \frac{L}{V} = \frac{q_0}{\lambda}$$

т.е. в соответствии с критерием Надаля рост опасности схода соответствует увеличению показателя, а по российскому – уменьшению.

Определенным преимуществом коэффициента устойчивости (6) является независимость его критического значения, равного единице, от коэффициента трения и угла наклона гребня. С другой стороны, при натурных испытаниях требуется знание коэффициента трения для оценки величины коэффициента устойчивости.

При моделировании пользователь может воспользоваться также уточненным коэффициентом устойчивости, рассчитываемым по формуле

$$\lambda_r = \frac{F_z \cdot \operatorname{tg} \delta - \mu_y}{F_y \cdot 1 + \mu_y \cdot \operatorname{tg} \delta}, \quad \mu_y = \frac{F_{cy}}{N} \quad (7)$$

Приведенные критерии не оценивают процесс вкатывания колеса на рельс, когда происходит отрыв колеса от круга катания. В этом случае рекомендуется использовать **комбинированный коэффициент запаса устойчивости  $\lambda_c$** .

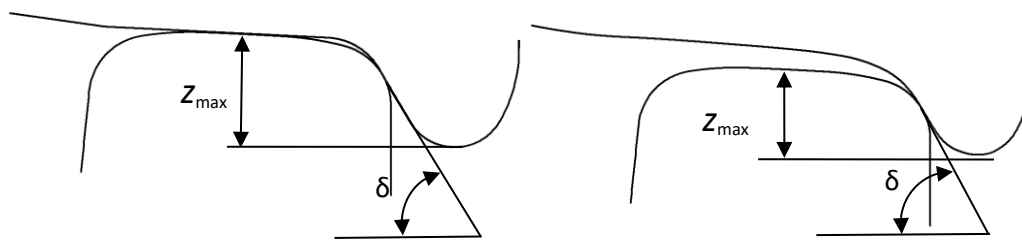


Рис. 8.239. Критическое положение профилей двух- и одноточечного контакта

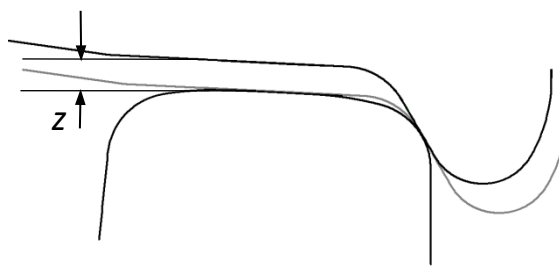


Рис. 8.240. Подъем колеса над поверхностью катания рельса для профилей двухточечного контакта

Для введения коэффициента  $\lambda_c$  рассмотрим критические положения пар профилей одноточечного и двухточечного контактов, рис. 1.217. Для профиля двухточечного контакта это положение, при котором контакт происходит в двух точках одновременно, однако нормальная реакция на круге катания близка к нулю, т.е. начинается процесс отрыва круга катания от поверхности рельса. Для профилей одноточечного контакта это положение, при котором контакт профиля колеса происходит в точке, в которой контактный угол ра-

вен углу наклона гребня, т.е.  $\beta = \delta$ . Обозначим через  $z$  величину подъема профиля колеса над критическим положением в процессе вкатывания колеса на головку рельса, рис. 1.218 и введем показатель **относительного подъема колеса**  $z^*$  по формуле

$$z^* = \frac{z_{max} - z}{z_{max}} \in [0,1], z > 0 \tag{8}$$

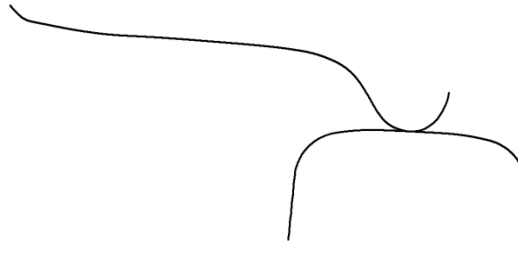


Рис. 8.241. Полный подъем колеса

Показатель  $z^*$  равен единице в критическом положении профилей и равен нулю при полном подъеме колеса, рис. 1.219. Поскольку в критическом положении уточненный коэффициент  $\lambda_r$  (7) также равен единице, то объединяя уточненный критерий и относительный подъем, получим комбинированный коэффициент запаса устойчивости

$$\lambda_c = \begin{cases} \lambda_r, & z \leq 0, \\ z^*, & z > 0. \end{cases} \tag{9}$$

В этом показателе до критического положения используется значение  $\lambda_r$ , а при вкатывании гребня (т.е. при отрыве круга катания) – относительный подъем  $z^*$ . Такая комбинация дает универсальный показатель, непрерывно уменьшающийся при увеличении опасности вплоть до нулевого значения при качении гребня по головке рельса, см. пример в п. 8.5.3.1.4.3. *"Пример прохождения грузовым вагоном неблагоприятного сочетания детерминированных неровностей"*, стр. 8-224.

Показатель  $\lambda_c$  рекомендуется использовать при анализе случаев схода, при поиске неблагоприятных сочетаний неровностей, и при других компьютерных исследованиях проблем безопасности, когда требуется уточненная оценка опасности схода путем вкатывания колеса на головку рельса.

**8.5.3.1.4.3. Пример прохождения грузовым вагоном неблагоприятного сочетания детерминированных неровностей**

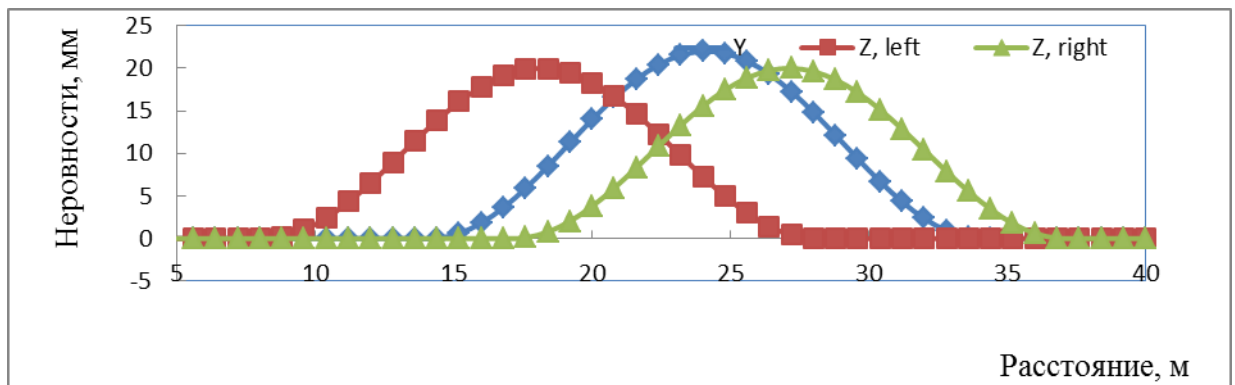


Рис. 8.242. Неблагоприятное сочетание вертикальных и горизонтальных неровностей

Один из вариантов неблагоприятных сочетаний детерминированных горизонтальных и вертикальных неровностей представлен на рис. 8.242. Неровности расположены в прямом участке пути. Рассмотрим движения по данным неровностям порожнего хоппера со скоростью 20 м/с.

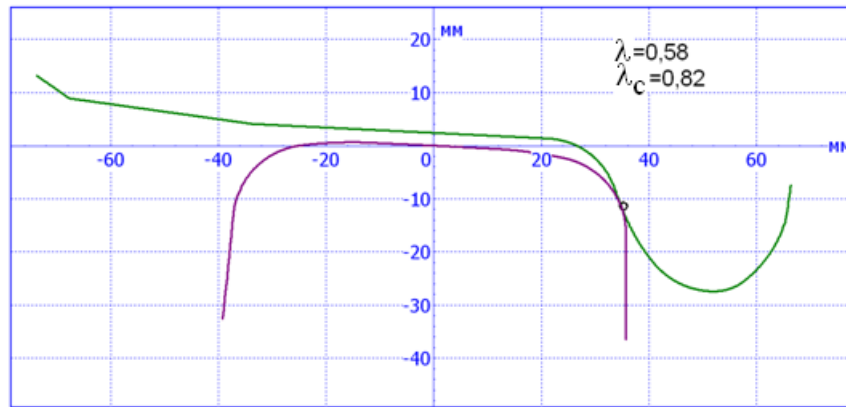


Рис. 8.243. Положение колеса в процессе вкатывания и оценки критериев безопасности

В численном эксперименте при проходе неровностей на левое колесо первой оси поднялось над поверхностью рельса примерно на 2 мм в результате вкатывания, что соответствует 18% от полного закатывания гребня на головку рельса (рис. 8.243). Нормативный критерий принимает минимальное значение  $\lambda = 0,58$ . Это значение не полностью отражает физику процесса и никак не оценивает процесс вкатывания. Комбинированный критерий точно указывает как момент начала вкатывания (когда он достигает значения 1) так и точно определяет величину подъема. Например, значение фактора  $\lambda_c = 0,82$  соответствует состоянию, при котором колесо поднялось на 18% от полного вкатывания. Графики коэффициентов устойчивости в зависимости от положения колесной пары вдоль пути приведены на рис. 8.244. Смещение колесной пары в поперечном направлении представлено на рис. 8.245 (жирная линия). Тонкими линиями отмечены положения рельсов в плане с учетом поперечного упругого отжатия. Касание жирной линии рельса соответствует касанию гребнем боковой поверхности рельса, а выход на графике жирной линии из коридора рельсовых нитей – процессу вкатывания колеса на рельс.

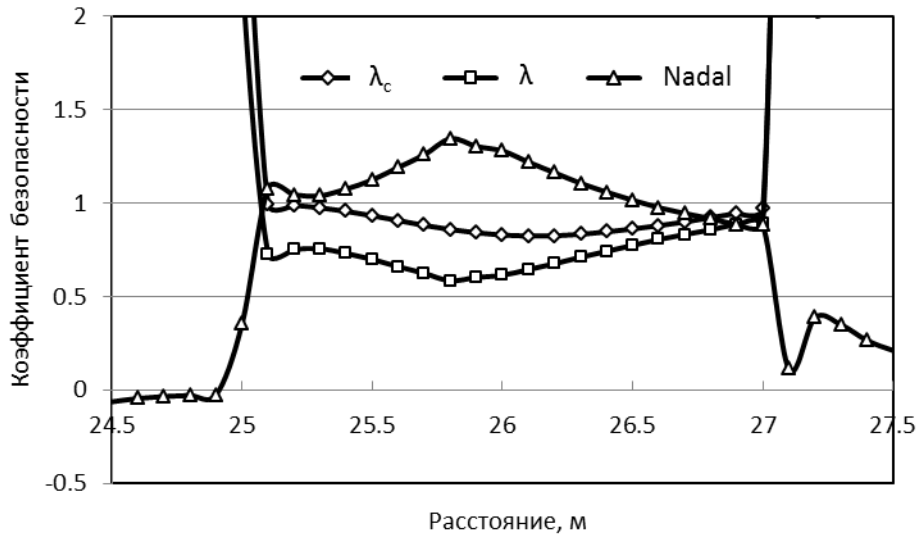


Рис. 8.244. Сравнение коэффициентов безопасности при проходе детерминированных неровностей

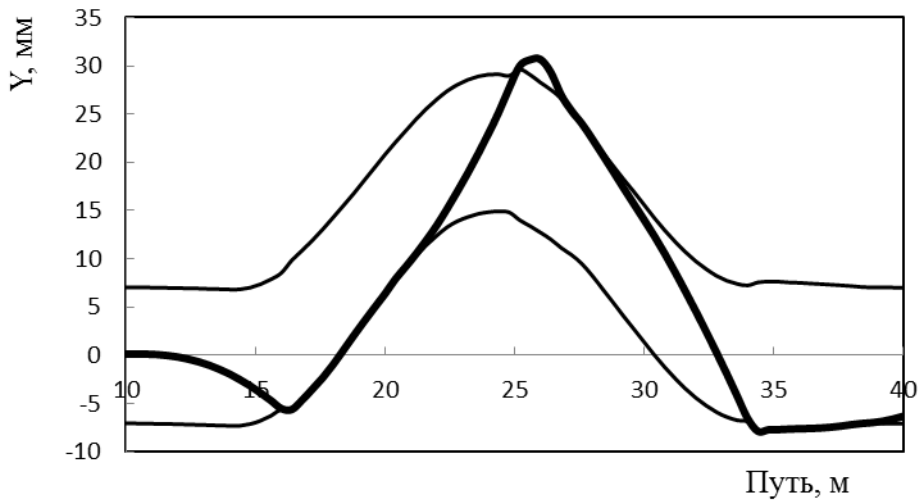


Рис. 8.245. Смещение колесной пары относительно неровностей

### 8.5.3.1.5. Боковые и рамные силы

Боковые и рамные силы являются важными показателями, оценивающими силовое воздействие экипажа на путь. Превышение нормативных значений этих сил может явиться причиной разрушения пути и схода экипажа.

В программе рамная сила  $H_p$  рассчитывается как суммарная поперечная сила, действующая со стороны КП на раму. Таким образом,  $H_p$  отличается от поперечной силы, действующей со стороны рельсов на КП (сумма боковых сил), на величину поперечной силы инерции (принцип Даламбера: силы, действующие на тело, уравновешены, если добавить силы инерции).

Следует различать два типа воздействий на путь:

- приводящие к сдвигу рельсошпальной решетки;
- приводящие к отжатию или опрокидыванию рельса.

В соответствии с данной классификацией воздействий в полевых экспериментах оценивают рамные силы (косвенная оценка опасности сдвига решетки) и боковые силы с использованием тензометрической колесной пары, либо непосредственно измеряя напряжения в рельсе.

Причиной схода вследствие поперечного воздействия на путь, главным образом, является отжатие (опрокидывание рельса), в то время как сдвиг решетки приводит к недопустимым отклонениям рельсовых нитей в плане.

Максимально допустимые рамные и боковые силы нормируются [20].

Рамные силы:

- для порожнего вагона  $H_p/P_0 \leq 0.38$ ;
- для грузового вагона  $H_p/P_0 \leq 0.3$ .

Здесь  $P_0$  – статическая нагрузка на ось.

Боковые силы: не более 100 кН.

Нормируется также суммарное значение рамных сил по тележке.



При компьютерном моделировании динамики рельсовых экипажей оцениваются все указанные показатели. Для расчета боковых сил используется совокупность всех сил, действующих на колесо при контактом взаимодействии с рельсом во всех точках контакта.

### 8.5.3.1.6. Пример создания переменной «поперечное воздействие КП на путь»

Создадим переменную, равную сумме поперечных сил, действующих на КП со стороны рельсов. Данная переменная с точностью до знака характеризует воздействие КП на путь. Кроме того, данная сила отличается от рамной силы на величину силы инерции КП. Таким образом, при небольших скоростях движения силы близки. Для создания переменной выполним следующие действия:

37. С помощью **Мастера переменных** на вкладке **Колесо/Рельс** создайте три переменные:  $Y(L)_{1l}$ ,  $Y(L)_{1r}$  (суммарные силы в поперечном направлении для левого и правого колеса КП1) и  $H1$  (рамная сила для КП1), рис. 8.246.

38. На вкладке **Выражение** (рис. 8.247):

- добавьте оператор сложения с помощью кнопки ;
- с помощью мышки перенесите боковые силы в поля оператора;
- заполните поля названия переменной и комментария;
- оправьте переменную в контейнер с помощью кнопки .

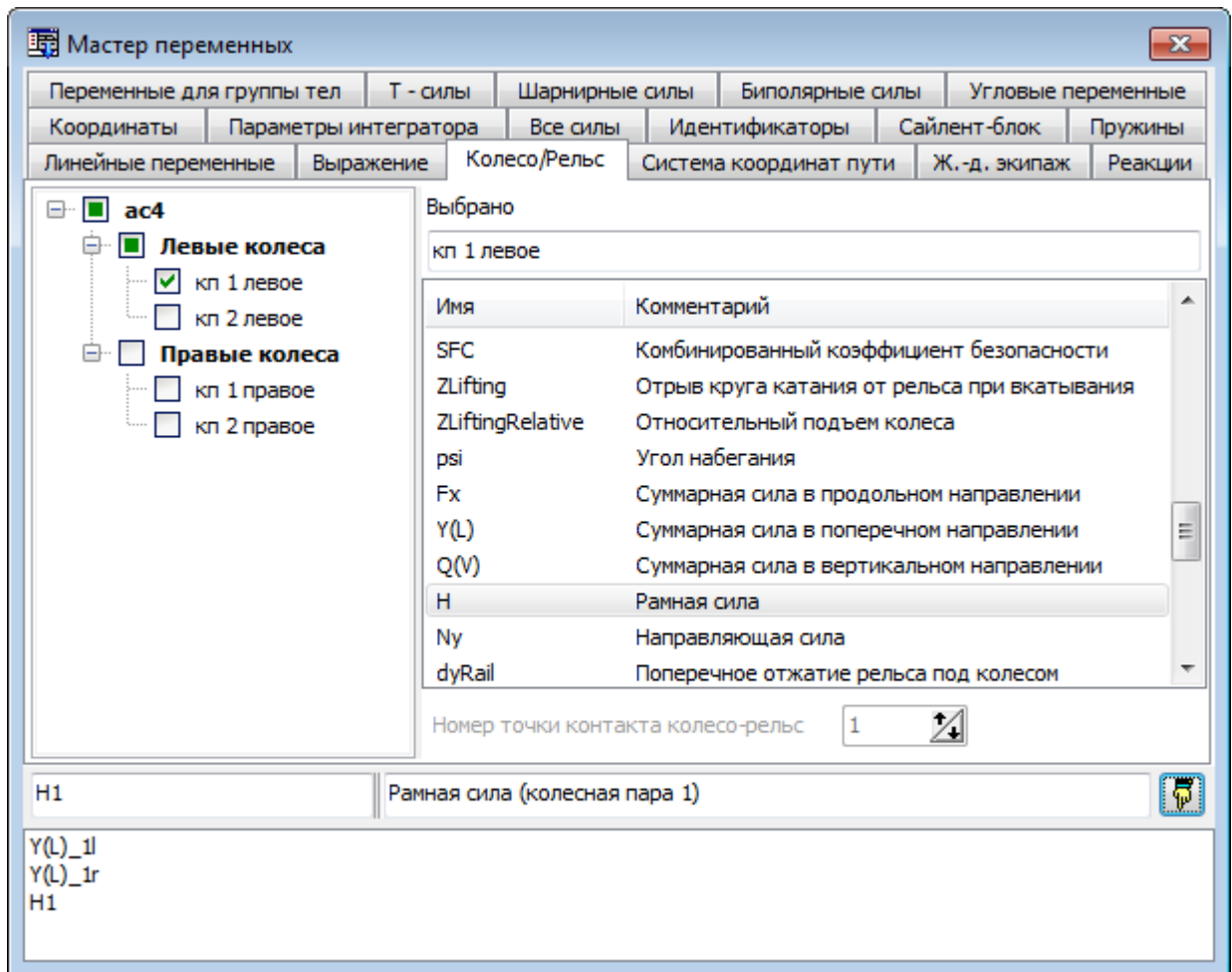


Рис. 8.246. Боковые силы, действующие на КП1

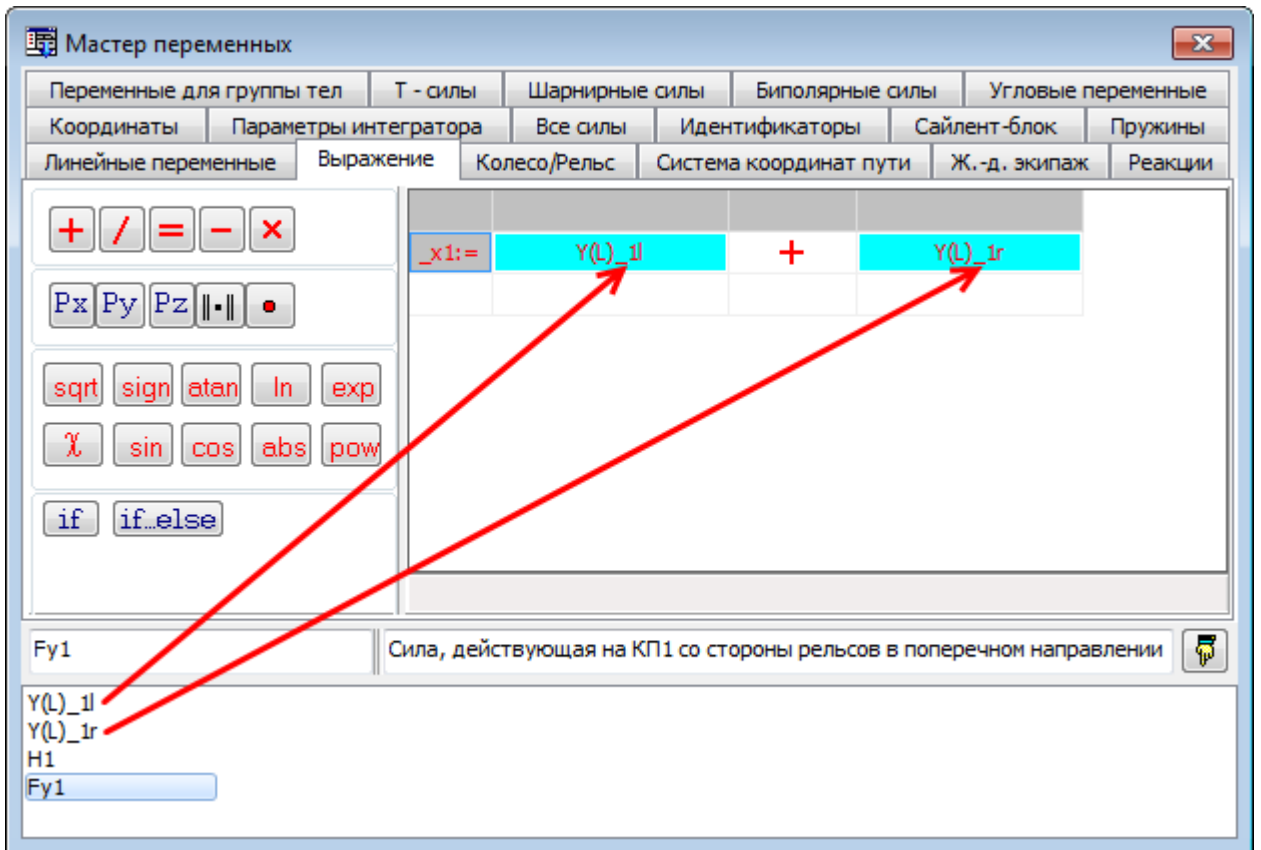


Рис. 8.247. Суммарное воздействие на КП1 со стороны рельса в поперечном направлении

Сравнение построенной переменной с рамной силой для автомотрисы АС4 показано на рис. 8.248.





Рис. 8.248. Сравнение рамной силы и силы, действующей на КП1 со стороны рельсов

### 8.5.3.1.7. Пример создания переменной «суммарная рамная сила для тележки»

Для создания переменной, соответствующей суммарной рамной силе для тележки следует выполнить следующие действия.

39. На вкладке Колесо/Рельс мастера переменных создать переменные  $H1$ ,  $H2$  и  $H3$  – рамные силы для колесных пар первой тележки, рис. 8.249.

40. На вкладке **Выражение** (рис. 8.250):

- добавить два оператора сложения с помощью кнопки ;
- с помощью мышки перенести рамные силы в поля операторов;
- заполнить поля названия переменной и комментария;
- опрavitить переменную в контейнер с помощью кнопки .

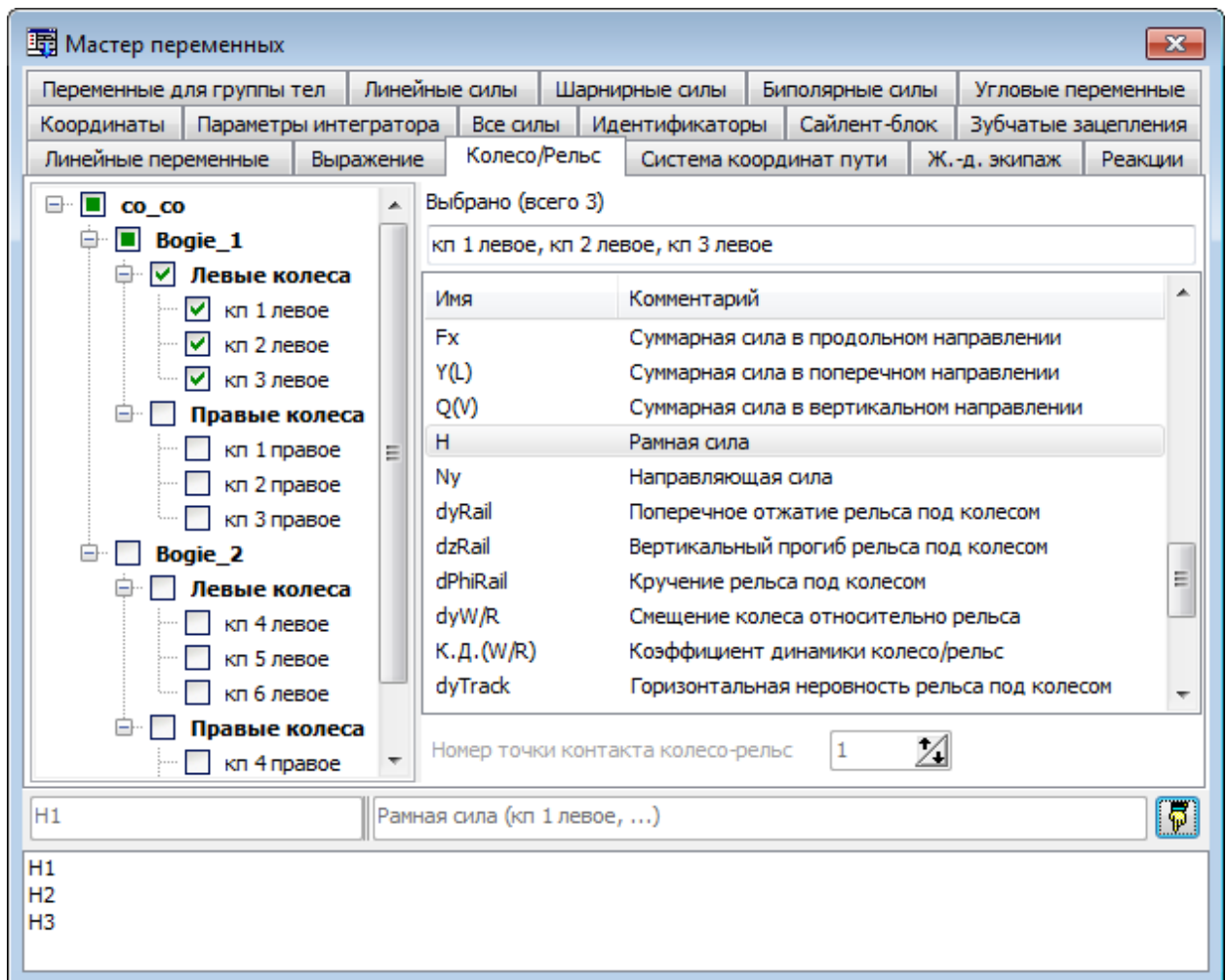


Рис. 8.249. Создание переменных, соответствующих рамным силам

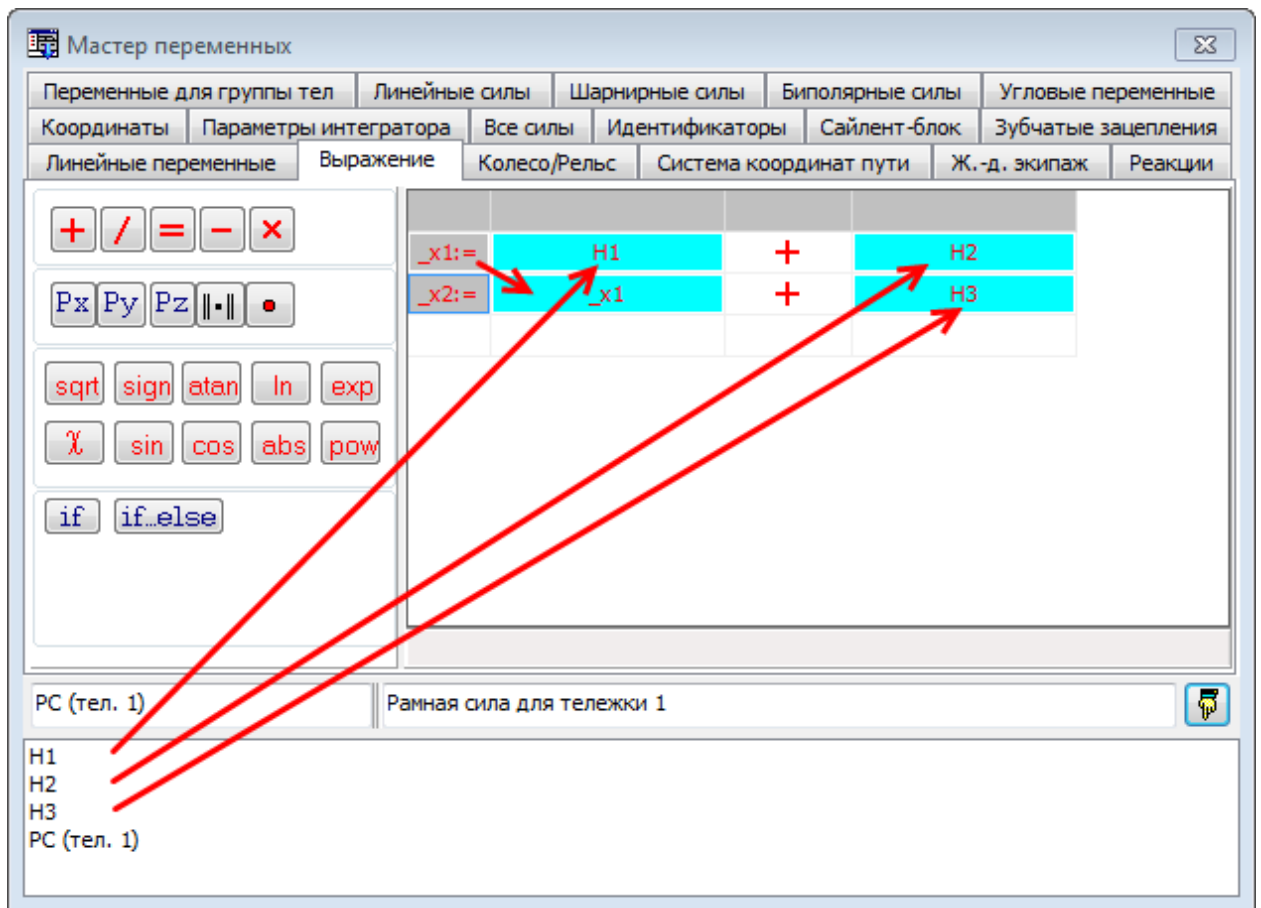


Рис. 8.250. Создание переменной, соответствующей суммарной рамной силе на тележку

### 8.5.3.1.8. Построение графика поперечного смещения колесной пары относительно рельсовых нитей

При моделировании динамики РЭ полезным является график поперечного сдвига КП относительно рельсовых нитей с учетом поперечных неровностей и упругого отжатия рельсов, рис. 8.251, рис. 8.252 (см. также рис. 8.245). На этих графиках КП (жирная линия) движется в рельсовом коридоре с учетом зазора между гребнем и рельсом. На графике рельсов учитываются их неровности и упругие отжатия, особенно заметные в момент входа колеса в двухточечный контакт.

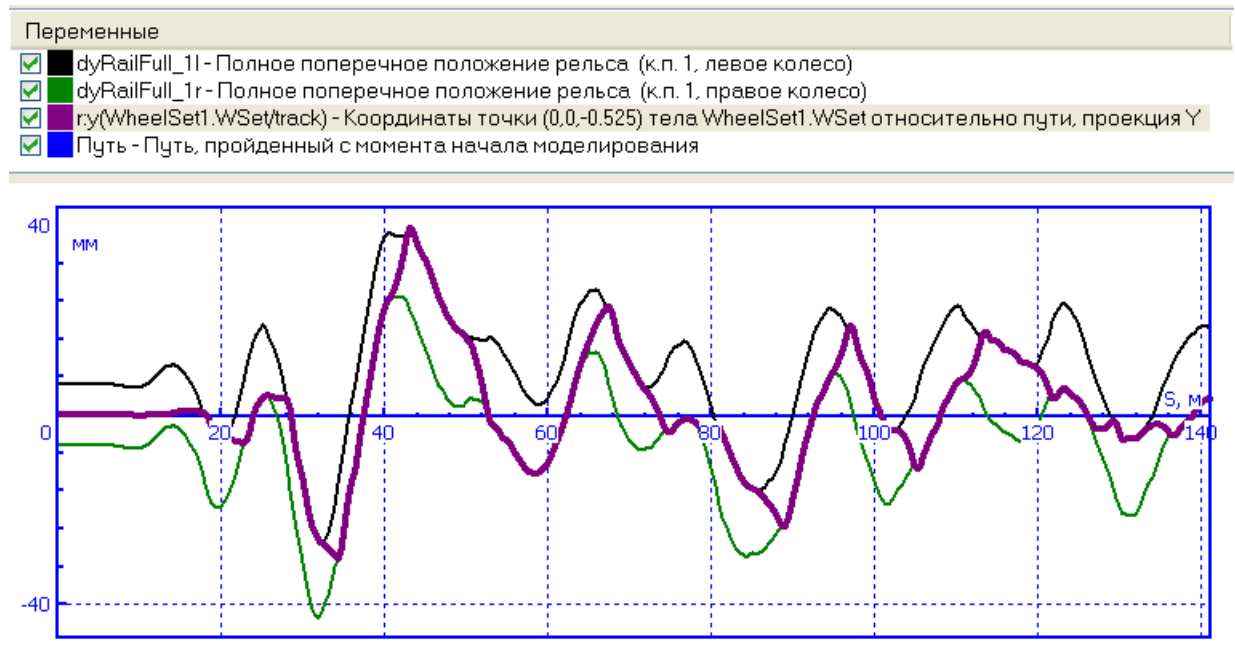


Рис. 8.251. Смещение КП относительно рельсового коридора. Профили двухточечного контакта

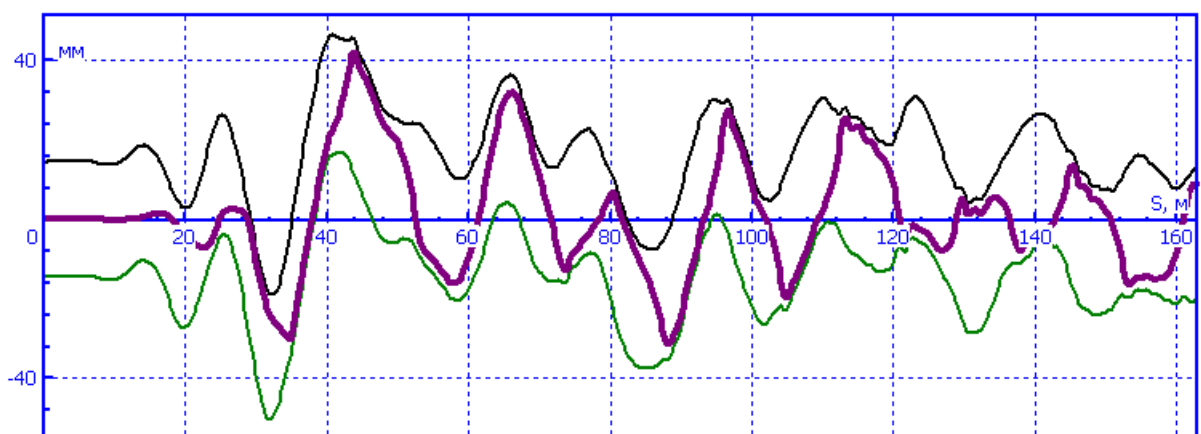


Рис. 8.252. Смещение КП относительно рельсового коридора. Профили одноточечного контакта

При касании графика поперечного смещения КП линии рельса в случае профилей двухточечного контакта имеет место касание соответствующего гребня боковой поверх-

ности рельса. В случае профилей однотоочечного контакта касание графиков КП и рельса соответствует выходу на колеса на критическое положение (см. рис. 8.239 справа). Для обоих типов профилей выход графика поперечного смещения КП за рельсовый коридор соответствует процессу вкатывания колеса на головку рельса за критическим положением, рис. 8.245.

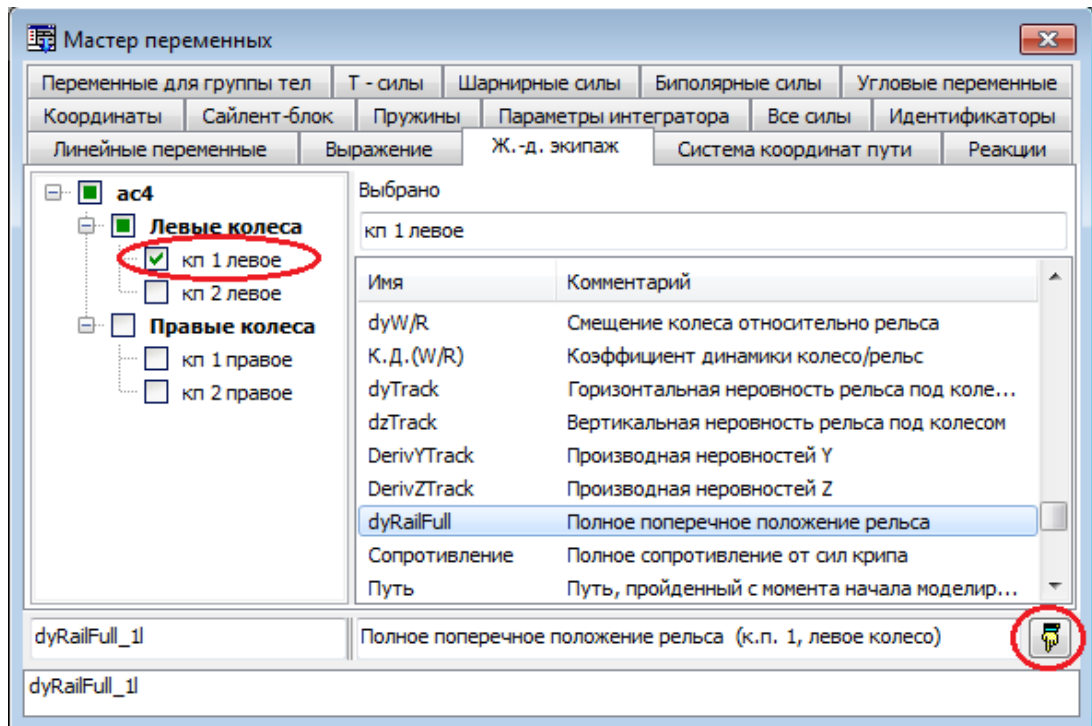


Рис. 8.253. Создание переменной «Положение рельса»

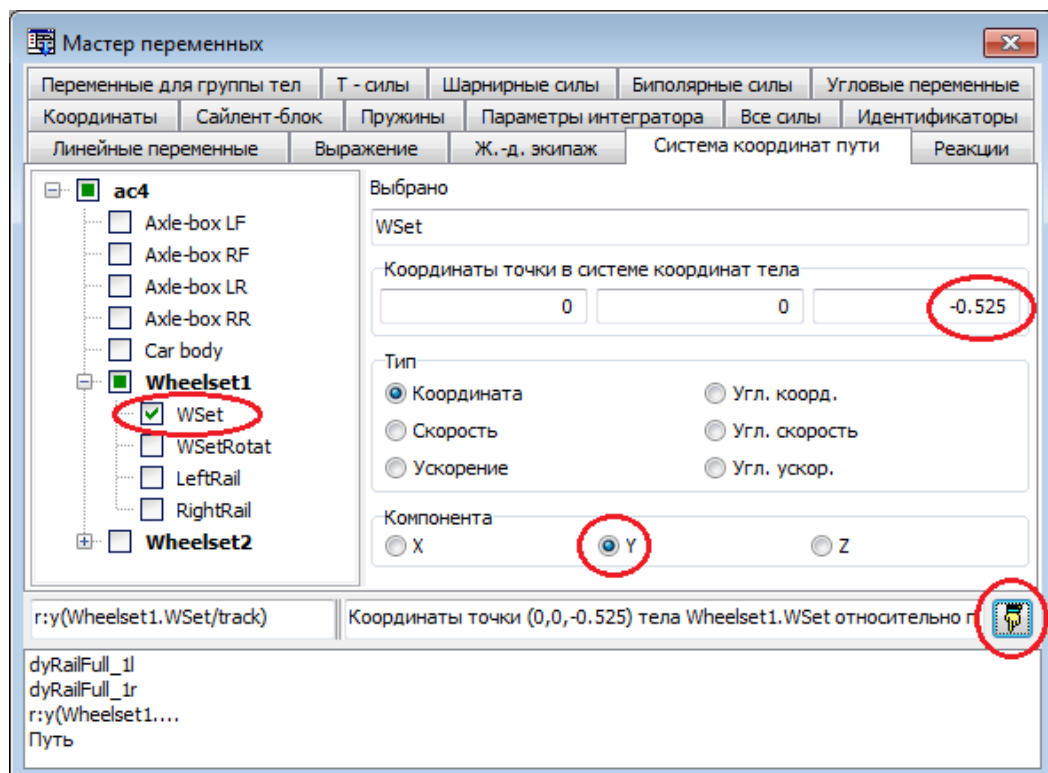


Рис. 8.254. Создание переменной «Поперечное смещение КП»

Для построения таких графиков следует создать соответствующие переменные с помощью **Мастера переменных**, рис. 8.253 (положения рельса), рис. 8.254 (смещение КП). Заметим, что поперечное смещение колесной пары должно задаваться относительно СК пути, п. 8.5.3.1.9. *"Кинематические характеристики тел относительно системы координат пути"*, стр. 8-235, координата  $Z$  точки, для которой строится график, должна быть равна минус радиусу колеса, рис. 8.254. Вдоль абсциссы рекомендуется откладывать пройденный путь, п. 8.5.3.1.10. *"Использование переменной Путь"*, стр. 8-236.

### 8.5.3.1.9. Кинематические характеристики тел относительно системы координат пути

Часто кинематические характеристики тел, входящих в модель рельсового экипажа, следует проектировать на оси СК пути. Заметим, что при движении в прямых участках пути оси СК пути и СК0 параллельны, поэтому проекции векторов на оси этих систем координат одинаковы.

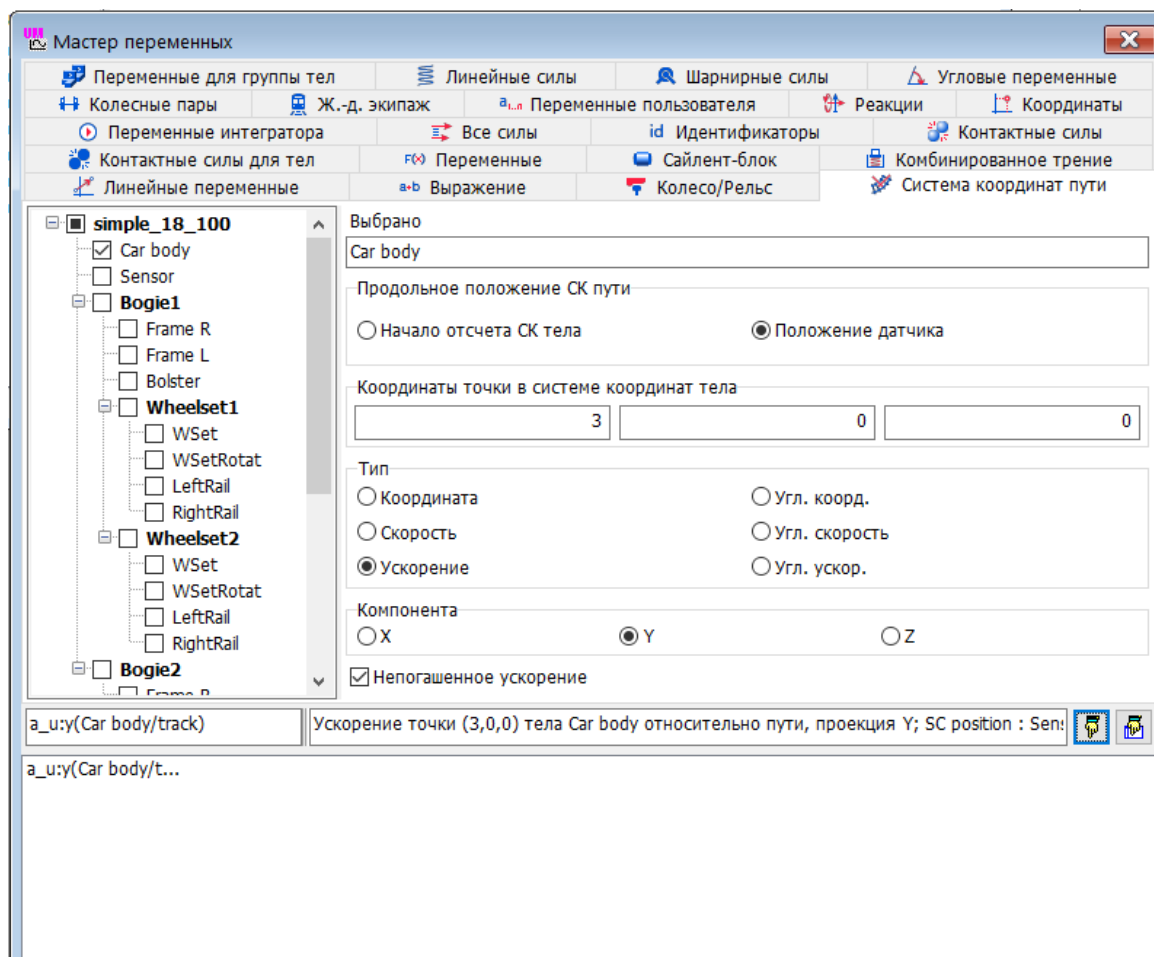


Рис. 8.255. Кинематические характеристики тел относительно СК пути

Положение СК пути связано с телом, для которого строится кинематическая переменная. При этом возможны два варианта определения положения начала отсчета СК на центральной траектории пути: продольное положение этой точки может определяться по положению начала отсчета системы координат, связанной с телом, либо по положению точки, кинематические характеристики которой определяются (датчик), см. рис. 8.255.

Для создания переменной в виде проекции кинематической характеристики тела на оси системы координат пути, соответствующей данному телу, используется закладка СК пути мастера переменных (рис. 8.255). Для создания переменной следует выполнить следующие действия:

- выбрать тело в списке;
- выбрать тип задания продольного положения СК пути: по положению начала отсчета СК выбранного тела или по положению датчика;

- выбрать тип переменной: линейную переменную (координату, скорость ускорение) или угловую (вектор поворота, угловая скорость или угловое ускорение);
- для линейных переменных следует дополнительно указать координаты точки тела в СК тела, которой соответствует переменная;
- выбрать ось, на которую будет проектироваться выбранная векторная величина.

При задании проекции ускорения на ось Y программа предлагает выбрать непогашенное либо обычное ускорение (рис. 8.255).

### 8.5.3.1.10. Использование переменной *Путь*

Переменная путь создается с помощью закладки **Ж.-д. экипаж Мастера переменных**. Эта переменная имеет стандартное имя, которое не следует менять. С использованием переменной легко сравнивать результаты моделирования, полученные при движении экипажа по одному и тому же пути, но с разными скоростями. Рассмотрим основные варианты использования данной переменной.

#### 8.5.3.1.10.1. Использование переменной *Путь* при построении графиков

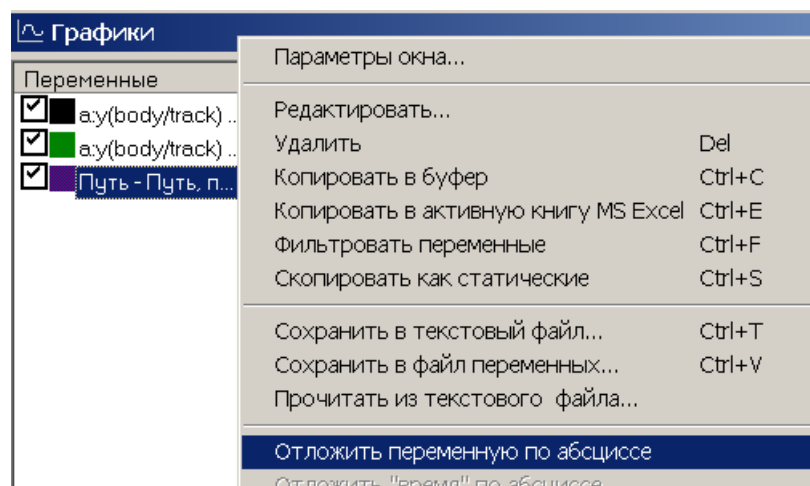


Рис. 8.256. Построение графиков ускорений в зависимости от пройденного пути

Поместите переменную в список переменных графического окна. Выделите ее и щелкните правой кнопкой мыши. Выберите команду **Отложить переменную по абсциссе** в появившемся меню.

#### 8.5.3.1.10.2. Использование переменной *Путь* в списках автоматически рассчитываемых переменных

При составлении список переменных модели рельсового экипажа следует добавить в список переменную **Путь**. После расчета списка переменных при единичном моделировании ([Глава 4](#), п. *Задание и использование списка автоматически рассчитываемых переменных*) или сканировании перетащите переменную **Путь** в поле **Откладывать по абсциссе**. Тогда все рассчитанные переменные, переносимые из списка в графические окна, табличный процессор и т.д., будут представлены в зависимости от пройденного пути.

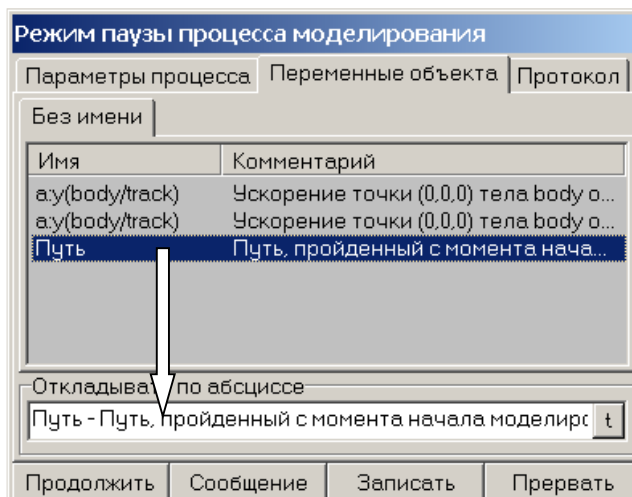


Рис. 8.257. Задание зависимости рассчитанной переменной от пройденного пути

### 8.5.3.2. Окно анимации

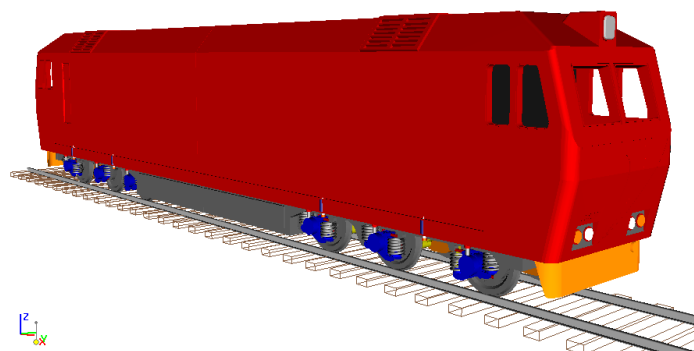


Рис. 8.258. Изображение тепловоза ТЭП70 в анимационном окне

Общие сведения об использовании анимационных окон можно найти в [Главе 3](#), п. *Анимационное окно конструктора* и [Главе 4](#), п. *Анимационное окно программы моделирования*.

При моделировании рельсовых экипажей для анимационного окна реализовано изображение рельсов и шпал, флаг **Изображения рельсовых нитей** на закладке **Колесо/Рельс** | **Путь** | **Макрогеометрия** инспектора подготовки процесса моделирования.

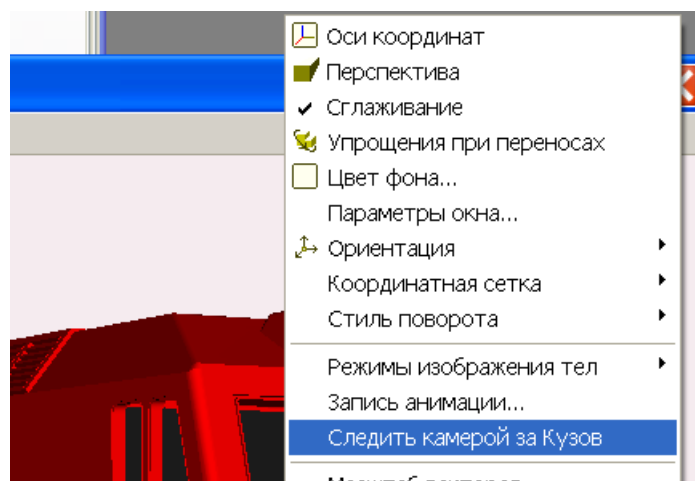


Рис. 8.259. Назначение слежения камерой за телом

Для того чтобы камера следила за движением экипажа, следует подвести мышку к одному из тел (например, кузову), вызвать контекстное меню щелчком на правой кнопке и выбрать команду слежения камерой за выделенным телом, рис. 8.259.

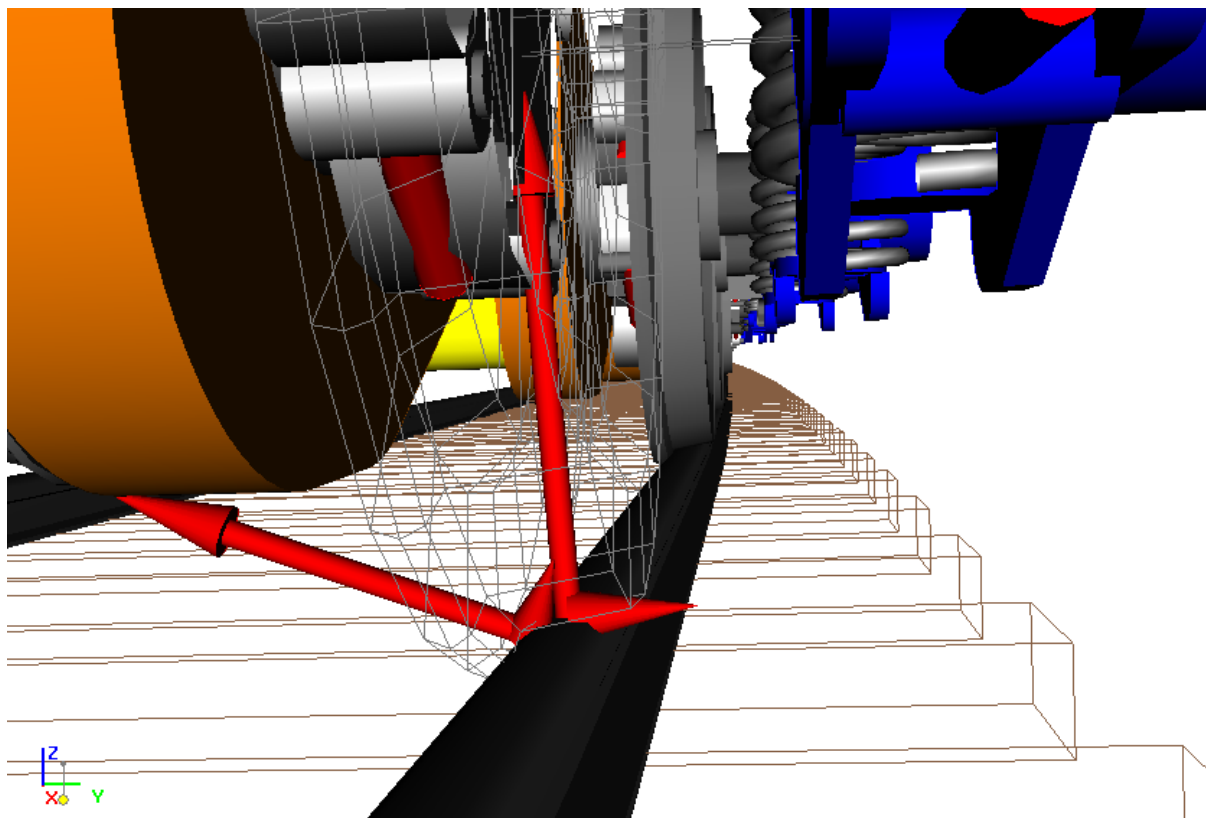


Рис. 8.260. Силы контакта колесо-рельс в анимационном окне (колесо рисуется в проволочном режиме)

В анимационном окне можно получить изображение сил в контакте колеса с рельсом, рис. 8.260. Для этого следует воспользоваться закладкой **Все силы Мастера переменных**, выделить тело – базу колесной пары, задать тип сил: активные, создать переменную и перенести мышкой в анимационное окно, рис. 8.261. Как правило, следует настроить масштаб изображения силы, рис. 8.262.

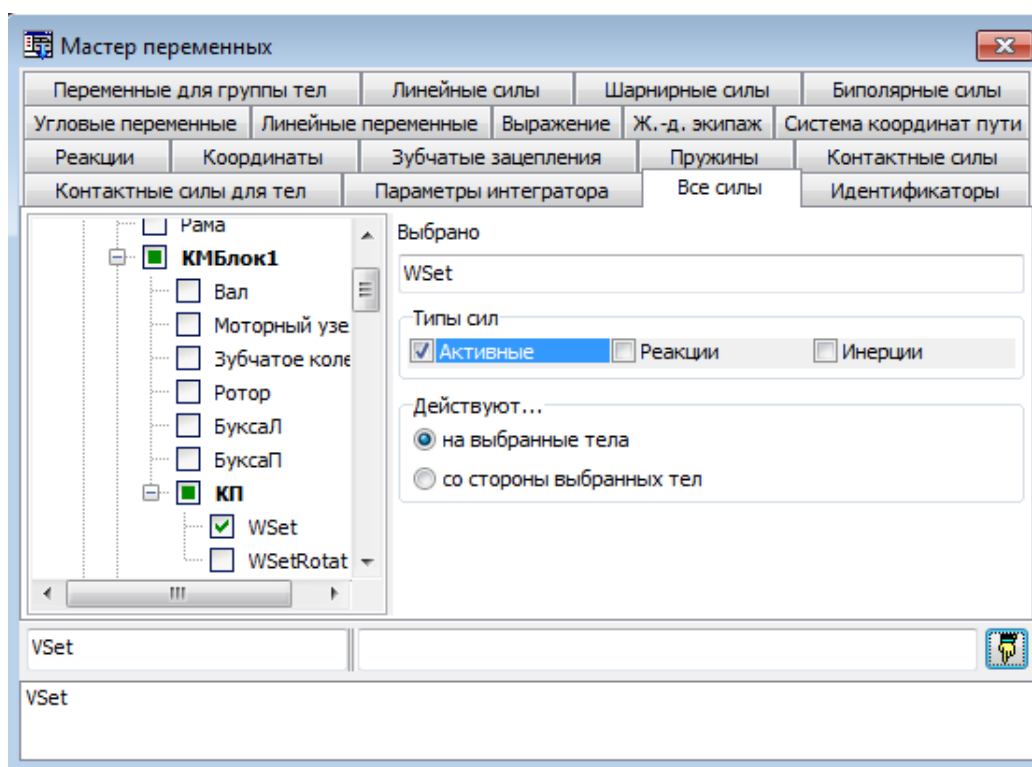


Рис. 8.261. Создание переменной, включающей векторы контактных сил

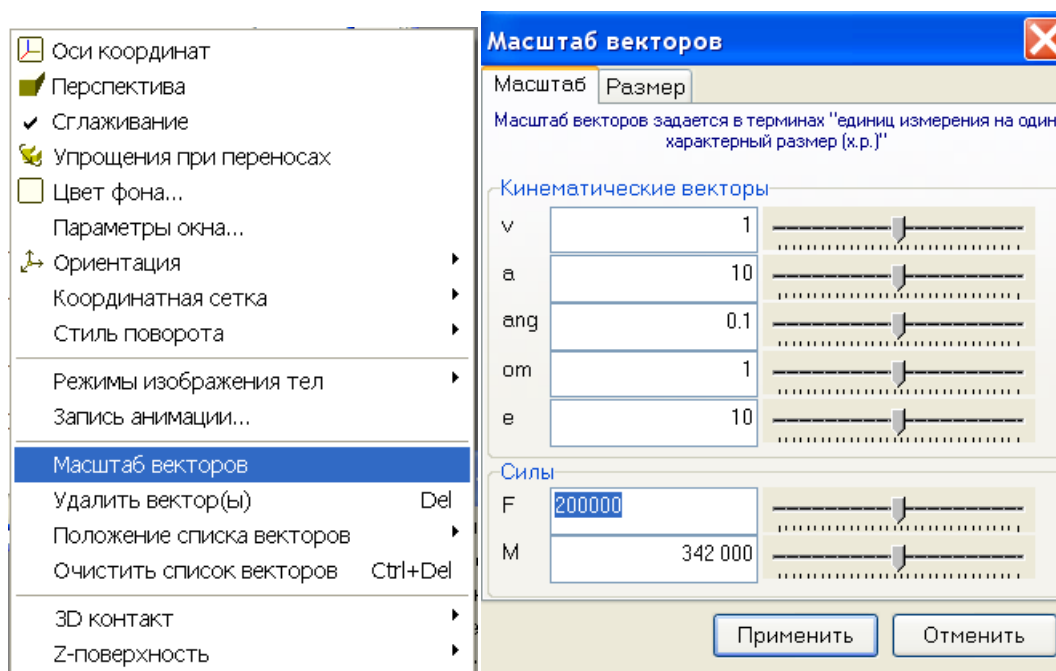


Рис. 8.262. Вызов окна настройки масштаба сил с помощью контекстного меню анимационного окна

8.5.3.3. Окно анимации контакта

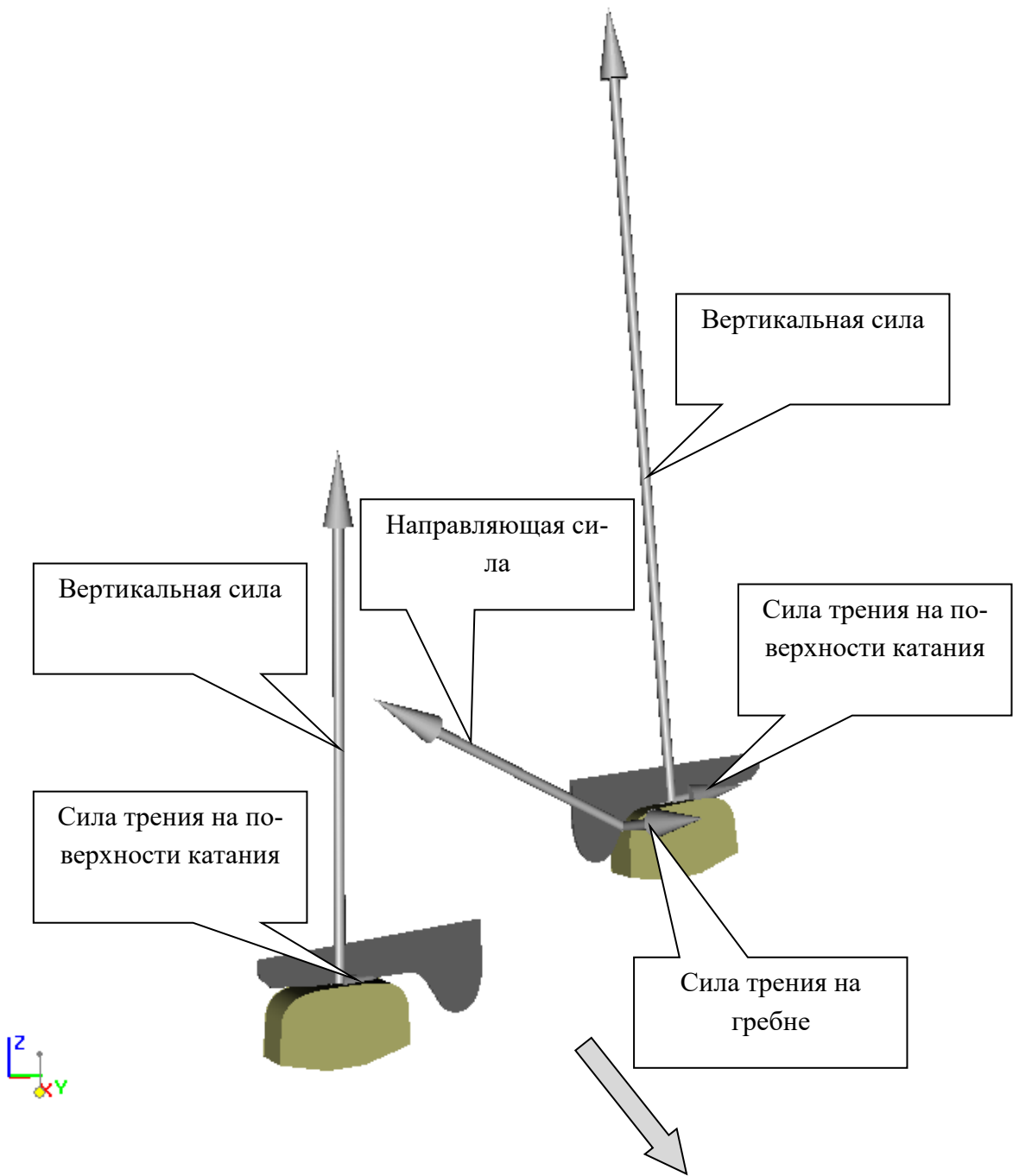


Рис. 8.263. Классификация сил в окне анимации контакта

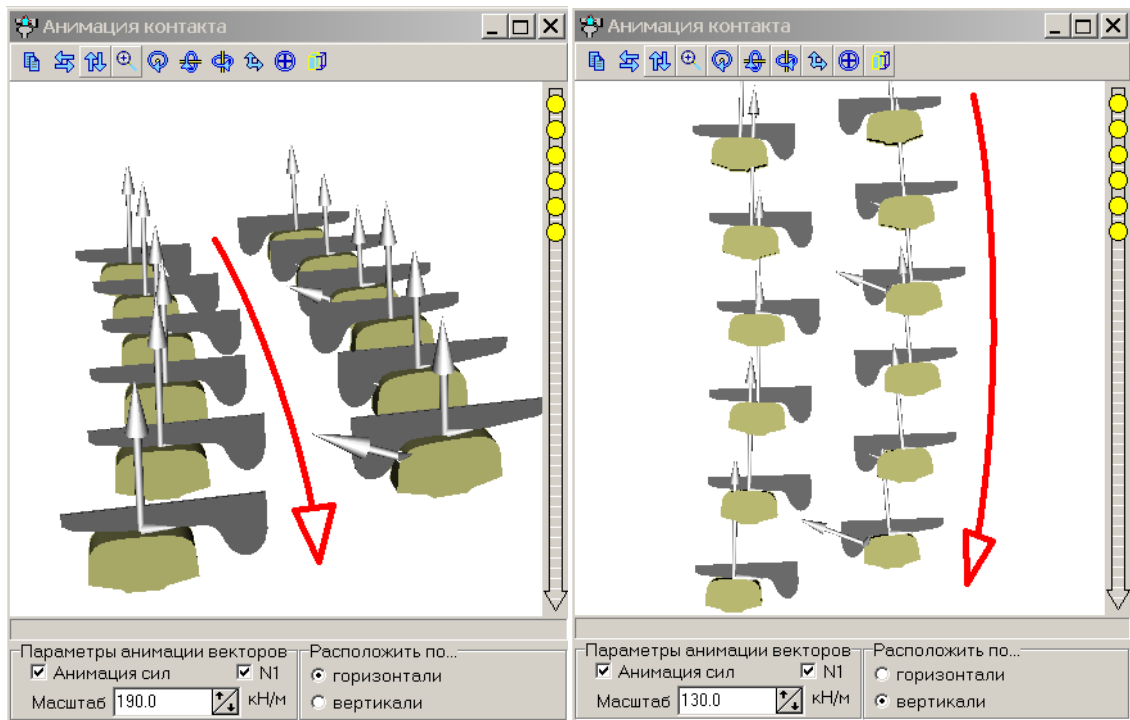



Рис. 8.264. Окно анимации контакта. Стрелкой указано направление движения

Окно анимации контакта (рис. 8.264) является специальным анимационным окном для визуализации относительного положения профилей колес и рельсов и сил взаимодействия колес с рельсами при движении экипажа (рис. 8.263). Для вызова окна используется команда основного меню **Инструменты | Анимация контакта**, кнопка  на панели инструментов или сочетание клавиш *Ctrl+N*.

В нижней части окна расположены параметры настройки, позволяющие включать/выключать изображения векторов сил, изменять масштаб векторов, изменять тип изображения профилей (по вертикали или горизонтали).

Наведение курсора мыши на отдельный вектор позволяет выяснить текущее значение величины силы.

Щелчки на вертикально расположенных кружках в правой части окна включают/выключают изображения профилей отдельных колесных пар и соответствующих рельсов.

#### 8.5.3.4. Окно анимации пятен контакта

Для вызова окна анимации пятен (рис. 8.265) контакта используйте команду главного меню **Инструменты | Анимация пятен контакта**.

В окне анимации пятен контакта в процессе моделирования динамики пользователь может наблюдать следующие величины:

- относительное положение профилей колес и рельса в СК пути;
- контактные точки;
- векторы нормальных сил;
- пятна контакта;
- систему координат пятна контакта;

- зону сцепления;
- распределение касательных усилий по пятну контакта в СК пятна контакта.

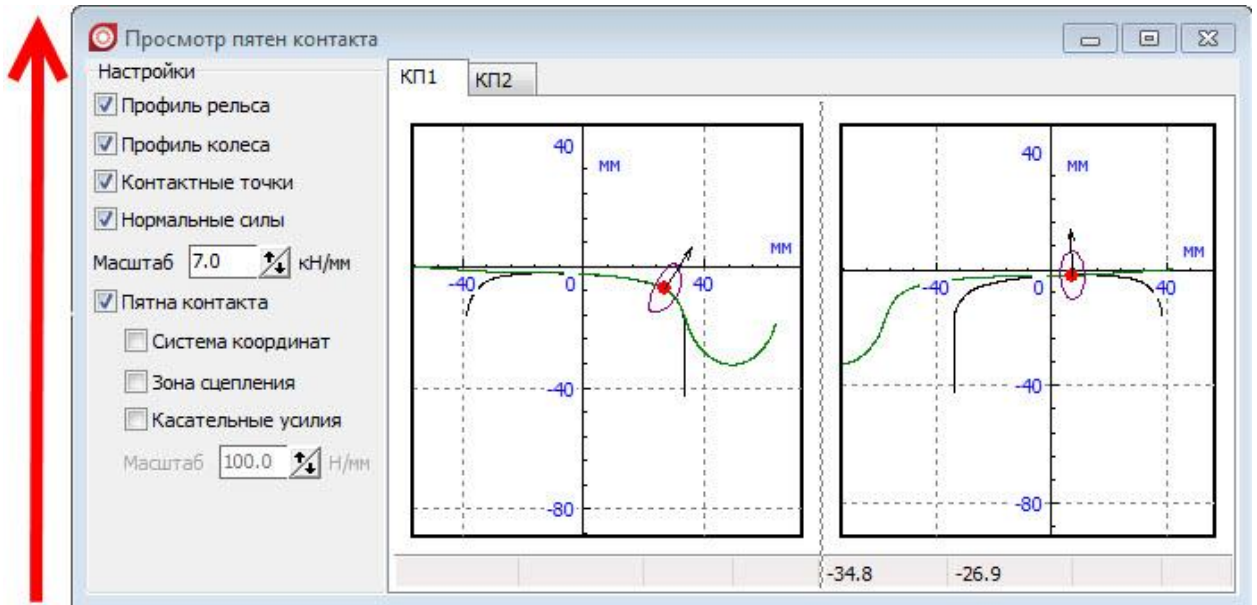


Рис. 8.265. Пятна контакта при движении экипажа в кривой. Стрелкой указано направление движения.

### 8.5.3.5. Табличный процессор

В железнодорожной конфигурации «Универсального механизма» в табличный процессор добавляются следующие функционалы:

#### Функционалы железнодорожной конфигурации «Универсального механизма»

Функционал	Комментарий
<p><b>_3Min_Mean</b>  <b>_3Max_Mean</b>  <b>_3Max_Zero</b>  <b>_4Min_Mean</b>  <b>_4Max_Mean</b>  <b>_4Max_Zero</b></p>	<p>Среднее по трем/четырем минимумам/максимумам. Все функционалы работают по одному и тому же алгоритму с некоторыми небольшими вариациями. Вначале вычисляется среднее значение процесса. Далее формируется список локальных экстремумов. Для функционалов <b>_3Min_Mean</b> и <b>_4Min_Mean</b> формируется список локальных минимумов, а для функционалов <b>_3Max_Mean</b>, <b>_3Max_Zero</b>, <b>_4Max_Mean</b> и <b>_4Max_Zero</b> – список локальных максимумов. При анализе графика переменной используется окно равное 1/20 от длины реализации. Два экстремума, расстояние между которыми меньше ширины окна, помещаются в список, только если график пересек ось абсцисс (для функционалов с постфиксом <b>Zero</b>) или пересек среднее значение процесса (для функционалов с постфиксом <b>Mean</b>) на отрезке между этими экстремумами. В противном случае выбирается только одно значение. Далее, в сформированном списке выбираются три или четыре максимума (префикс <b>3</b> или <b>4</b>). Далее для функционалов <b>_4Min_Mean</b>, <b>_4Max_Mean</b> и <b>_4Max_Zero</b> отбрасывается наибольший (для функционалов <b>Max</b>) или наименьший (для функционалов <b>Min</b>) из них. По оставшимся трем экстремумам определяется среднее, что и является результатом расчета функционала.</p> <p>Для анализа графиков движения в прямых участках рекомендуется использовать функционалы с постфиксом <b>Zero</b>. Для анализа графиков движения в кривых участках пути рекомендуется использовать функционалы с постфиксом <b>Mean</b>.</p>
<p><b>_ValueAtPosition</b></p>	<p>Функционал возвращает значение ординаты для некоторого заданного значения абсциссы, которое вводится в поле <b>Процессор переменных/Табличный процессор/Положение (м)</b>. Поле доступно только в случае если в <b>UM Simulation</b> в настоящий момент загружена модель железнодорожного экипажа.</p>
<p><b>Ride_Comfort_G</b></p>	<p>Показатель плавности хода для вибрации, действующей в горизонтальном направлении (по отраслевому стандарту «Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода. ОСТ 24.050.16-85)</p>
<p><b>Ride_Comfort_V</b></p>	<p>Показатель плавности хода для вибрации, действующей в вертикальном направлении (по отраслевому стандарту «Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода. ОСТ 24.050.16-85)</p>

### 8.5.3.6. Функционалы для определения показателей плавности хода

В данном параграфе описаны функционалы для определения показателей плавности хода.

#### Показатель плавности хода по ГОСТ 34939 – 2023 и ГОСТ 35088 – 2024

Нормативные документы ГОСТ 34939 – 2023 [29] и ГОСТ 35088 – 2024 [30] содержат одинаковые формулы расчета показателей плавности хода по виброускорениям. Ниже по тексту данного параграфа будем ссылаться на формулы из ГОСТ 34939 – 2023 [29]. Данный ГОСТ заменил ГОСТ Р 55513-2013 [22], методика которого была использована для оценки плавности хода в ПК «Универсальный механизм».

**Замечание.** С 2026 года вступает в силу ГОСТ 35088 – 2024 [30], устанавливающий методику определения показателя плавности хода. В отличие от [29], в новом стандарте те же формулы представлены в иной форме записи, однако математическое содержание и смысл полностью совпадают.

Методика определения показателя плавности хода описана и в более ранних документах, в настоящее время утративших силу: ОСТ 24.050.16-85 [21], ГОСТ Р 55513 – 2013 [22], Р 513 [23].

**Функционалы:** *Ride\_Comfort\_G, Ride\_Comfort\_V*

**Библиотека:** *Ride\_Comfort.dll*

Функционалы **Ride\_Comfort\_V** и **Ride\_Comfort\_G** рассчитывают показатели плавности хода  $W_j$  для вибрации, действующих соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях, для отдельной  $j$ -ой реализации продолжительностью  $T_j$  согласно формуле [29]:

$$W_j = a \cdot \tilde{a}_{kj}^{0,3} \tag{1}$$

где  $a = 4,436$  для вибрации, действующей в вертикальном направлении,  
 $a = 4,676$  для вибрации, действующей в горизонтальном направлении,  
 $\tilde{a}_{kj}$  – среднее квадратическое значение виброускорения на выходе корректирующего фильтра,  $м/с^2$ .

Среднее квадратическое значение виброускорения на выходе корректирующего фильтра определяется по формуле:

$$\tilde{a}_{kj} = \sqrt{2 \int_{f_H}^{f_B} q_H^2(f) S_j(f) df}, \tag{2}$$

где  $f_H = 0,5$  Гц – значение нижней граничной частоты диапазона измерения показателя плавности хода,

$f_B = 20$  Гц – значение верхней граничной частоты диапазона измерения показателя плавности хода,

$S_j(f)$  – функция спектральной плотности виброускорения на  $j$ -ом отрезке измерения,  $\text{м}^2\text{с}^{-4}\text{Гц}^{-1}$ ,

$f$  – частота колебаний, Гц,

$q_n(f)$  – значения нормированной амплитудно-частотной характеристики корректирующего фильтра, определяемые по формуле

$$q_n(f) = 1,15f \sqrt{\frac{1 + 0,1f^2}{(1 + 4,04f^2)[(1 - 0,0364f^2)^2 + 0,045f^2]}} \quad (3)$$

Данные функционалы предназначены для обработки переменных, созданных с помощью **Мастера переменных**. В качестве переменных должны использоваться соответствующие проекции ускорений точек кузова. Единицы измерений –  $[\text{м}/\text{с}^2]$ . Так как верхняя граничная частота корректирующего фильтра равна 20 Гц, то шаг представления результатов должен быть не больше 0,025 с (см. поле ввода **Шаг представления результатов** в окне **Инспектор моделирования объекта**).

Плавность хода по UIC 513

**Функционалы:** *UIC513\_Nmv\_axup95*, *UIC513\_Nmv\_azp95*

**Библиотека:** *Ride\_Comfort\_UIC513.dll*

**UIC513\_Nmv\_axup95** определяет  $a_{XP95}^{Wd}$  или  $a_{YP95}^{Wd}$  для упрощенной формулы показателя плавности хода п. 7.2.1 [15]:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{(a_{XP95}^{Wd})^2 + (a_{YP95}^{Wd})^2 + (a_{ZP95}^{Wb})^2} \quad (1)$$

**UIC513\_Nmv\_azp95** определяет  $a_{ZP95}^{Wb}$  для упрощенной формулы (1).

**Замечание.** Оцениваемая переменная должна содержать время в качестве абсциссы и быть не короче 5 с.

Данные функционалы предназначены для обработки переменных, созданных с помощью **Мастера переменных**. В качестве переменных должны использоваться соответствующие проекции ускорений точек кузова. Единицы измерений – [м/с<sup>2</sup>]. При расчете с помощью данных функционалов временной ряд для оцениваемой переменной делится на отрезки по 5 с. Таким образом, переменная должна содержать время в качестве абсциссы и быть не короче 5 с. Соответствующие эффективные ускорения  $a^{Wd}$  рассчитываются для каждого отрезка по методике, изложенной в [24]. После расчета эффективных ускорений они обрабатываются процентилем 95%. Значение процентиля и есть результат работы функционала. Далее пользователь может самостоятельно вычислить показатель плавности хода, используя результаты функционалов по формуле:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{\left( UIC513\_Nmv\_axup95(a_x(t)) \right)^2 + \left( UIC513\_Nmv\_axup95(a_y(t)) \right)^2 + \left( UIC513\_Nmv\_azp95(a_z(t)) \right)^2} \quad (2)$$

где  $UIC513\_Nmv\_axup95(a_x(t))$  – результат обработки продольной компоненты ускорения функционалом **UIC513\_Nmv\_axup95**,

$UIC513\_Nmv\_axup95(a_y(t))$  – результат обработки поперечной компоненты ускорения функционалом **UIC513\_Nmv\_axup95**,

$UIC513\_Nmv\_axup95(a_z(t))$  – результат обработки вертикальной компоненты ускорения функционалом **UIC513\_Nmv\_azp95**.

Так как верхняя граничная частота используемого фильтра равна 100 Гц, то шаг представления результатов должен быть не больше 0,005 с (см. поле ввода **Шаг представления результатов** в окне **Инспектора моделирования объекта**).

## Индекс плавности хода Шперлинга

**Функционалы:** *Vertical\_Sperling\_Index, Lateral\_Sperling\_Index*

**Библиотека:** *Ride\_Comfort\_Sperling.dll*

**Vertical\_Sperling\_Index** и **Lateral\_Sperling\_Index** рассчитывают индекс плавности хода Шперлинга в вертикальном и поперечном направлениях соответственно по [25]. Индекс плавности хода в поперечном направлении определяется следующим образом

$$W_z = 10 \sqrt{\int_{0.5}^{30} a^3 B_w^3 df}, \quad (1)$$

где  $a$  – ускорение в частотной области ( $\text{см}/\text{с}^2$ ),

$f$  – частота, Гц,

$B_w$  определяется по следующей формуле:

$$B_w = 0.737 \left[ \frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Индекс плавности хода в вертикальном направлении определяется как

$$W_z = 10 \sqrt{\int_{0.5}^{30} a^3 B_s^3 df}, \quad (3)$$

где  $B_s$  определяется по формуле

$$B_s = 0.588 \left[ \frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

**Замечание.** Оцениваемые переменные ускорений в УМ должны быть заданы в СИ [ $\text{м}/\text{с}^2$ ].

Данные функционалы предназначены для обработки переменных, созданных с помощью **Мастера переменных**. В качестве переменных должны использоваться соответствующие проекции ускорений точек кузова. Единицы измерений – [ $\text{м}/\text{с}^2$ ]. Так как верхняя граничная частота используемого фильтра равна 30 Гц, то шаг представления результатов должен быть не больше 0,0167 с (см. поле ввода **Шаг представления результатов** в окне **Инспектора моделирования объекта**).

**Шкала показателей для оценки плавности хода и комфортности**

Показатель плавности хода	Качественная оценка плавности хода
1	Очень хорошая
2	Хорошая
3	Удовлетворительная
4	Приемлемая для эксплуатации
4,5	Неприемлемая для эксплуатации
5	Опасная

Показатель плавности хода	Оценка комфортности (оценка ощутимых вибраций)
1	Едва заметные
2	Четко различаемые
2,5	Явно ощутимые, но не являются неприятными
3	Сильные, нерегулярные, но еще переносимые
3,25	Весьма нерегулярные
3,5	Очень нерегулярные, неприятные, раздражающие при длительном воздействии (экспозиции)
4	Очень неприятные, длительное воздействие (экспозиция) вредно для здоровья

### 8.5.3.7. Методы определения показателей комфорта пассажиров

В данном параграфе описаны методы определения оценки влияния ускорений на комфорт пассажиров в рельсовых транспортных средствах по стандарту СТО РЖД 03.005-2018 [27]. Стандарт [27] разработан с учетом требований Европейского стандарта EN12299 [28].

Данный стандарт включает в себя четыре показателя комфорта:

- показатель среднего уровня комфорта  $N_{MV}$ ;
- показатель постоянного комфорта  $C_{C_x}, C_{C_y}, C_{C_z}$ ;
- показатель комфорта при прохождении кривой  $P_{CT}$ ;
- показатель комфорта при дискретных событиях  $P_{DE}$ .

**Замечание.** В отличие от Европейского стандарта EN 12299 в стандарте ОАО "РЖД" "Услуги на железнодорожном транспорте. Метод оценки влияния ускорений на комфорт пассажиров в поездах" от 14 января 2019 г. № 43/р отмечается, что настоящий стандарт не распространяется на определение влияния ускорений на комфорт пассажиров в положении "стоя".

Показатель среднего уровня комфорта  $N_{MV}$  реализован в ПК УМ в виде функционалов  $UIC513\_Nmv\_axup95$  и  $UIC513\_Nmv\_azp95$  в табличном процессоре (см. п. 8.5.3.6). Ниже рассмотрим показатель постоянного комфорта  $C_{C_x}, C_{C_y}, C_{C_z}$ , показатель комфорта при прохождении кривой  $P_{CT}$  и показатель комфорта при дискретных событиях  $P_{DE}$ .

#### 8.5.3.7.1. Показатель постоянного комфорта

Данный метод может быть применен для оценки комфорта пассажиров в прямых и кривых участках пути для учета краткосрочного воздействия, который оценивается по значениям трех величин ускорений: в продольном, поперечном и вертикальном направлениях. Показатель постоянного комфорта представляет собой временные функции  $C_{C_x}, C_{C_y}(t), C_{C_z}(t)$  пятисекундных среднеквадратических частотно-взвешенных ускорений:

$$C_{C_x}(t) = a_X^{W_d}(t),$$

$$C_{C_y}(t) = a_Y^{W_d}(t),$$

$$C_{C_z}(t) = a_Z^{W_b}(t),$$

где  $a$  – среднеквадратические значения ускорений,  $m/c^2$  за период 5 с;

$W_i$  – надстрочный индекс, относится к значениям частоты в соответствии с определенным направлением  $i$ : ( $i = d, d, b$ ):

$d$ : продольное направление,  $W_d$ ;

$d$ : боковое направление,  $W_d$ ;

$b$ : вертикальное направление,  $W_b$ .

Пятисекундные среднеквадратические частотно-взвешенные ускорения  $a_X^{W_d}(t), a_Y^{W_d}, a_Z^{W_b}(t)$  рассчитываются по следующим формулам:

$$a_x^{W_d}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t (\ddot{x}_{W_d}(t))^2 dt},$$

$$a_y^{W_d}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t (\ddot{y}_{W_d}(t))^2 dt},$$

$$a_z^{W_d}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t (\ddot{z}_{W_d}(t))^2 dt},$$

где  $T$  равен 5 с, а значение  $t$  кратно 5 с.

**Замечание.** Оцениваемая переменная должна содержать время в качестве абсциссы и длина сигнала должна быть длиннее 5 секунд.

Показатель постоянного комфорта оценивается в соответствии со шкалой показателей постоянного комфорта  $C_{C_x}(t)$ ,  $C_{C_y}(t)$ ,  $C_{C_z}(t)$ , представленной в таблице 13.

Таблица 13

**Шкала показателей постоянного комфорта  $C_{C_x}(t)$ ,  $C_{C_y}(t)$ ,  $C_{C_z}(t)$**

Диапазон значений показателей постоянного комфорта	Уровень комфорта в части влияния ускорений
Положение "сидя по/против направления движения"	
$C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,2 \text{ м/с}^2$	Очень комфортно
$0,2 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,3 \text{ м/с}^2$	Комфортно
$0,3 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,4 \text{ м/с}^2$	Пограничное ощущение
$0,4 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t)$	Менее комфортно
Положение "сидя поперек направлению движения"	
$C_{C_x}(t), C_{C_z}(t) < 0,2 \text{ м/с}^2$	Очень комфортно
$0,2 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_x}(t), C_{C_z}(t) < 0,3 \text{ м/с}^2$	Комфортно
$0,3 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_x}(t), C_{C_z}(t) < 0,4 \text{ м/с}^2$	Пограничное ощущение
$0,4 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_x}(t), C_{C_z}(t)$	Менее комфортно
Положение "лежа по/против направлению движения"	
$C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,2 \text{ м/с}^2$	Очень комфортно
$0,2 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,3 \text{ м/с}^2$	Комфортно
$0,3 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,4 \text{ м/с}^2$	Пограничное ощущение
$0,4 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t)$	Менее комфортно
Положение "лежа поперек направлению движения"	
$C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,2 \text{ м/с}^2$	Очень комфортно
$0,2 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,3 \text{ м/с}^2$	Комфортно
$0,3 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t) < 0,4 \text{ м/с}^2$	Пограничное ощущение
$0,4 \text{ м/с}^2 \leq C_{C_y}(t), C_{C_z}(t)$	Менее комфортно

Чтобы рассчитать показатели постоянного комфорта  $C_{C_x}(t)$ ,  $C_{C_y}(t)$  или  $C_{C_z}(t)$ , в графическом окне для графика продольных, поперечных или вертикальных ускорений в контекстном меню выберите **Рассчитать показатель постоянного комфорта**, рис. 266. В результате расчёта будет построена новая переменная. Показатели рассчитываются на каждом интервале времени по 5 секунд.

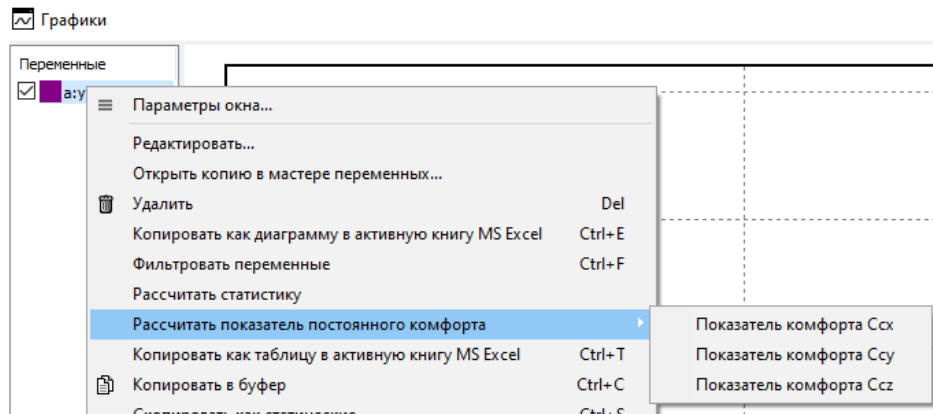


Рис. 266. Расчет показателей постоянного комфорта

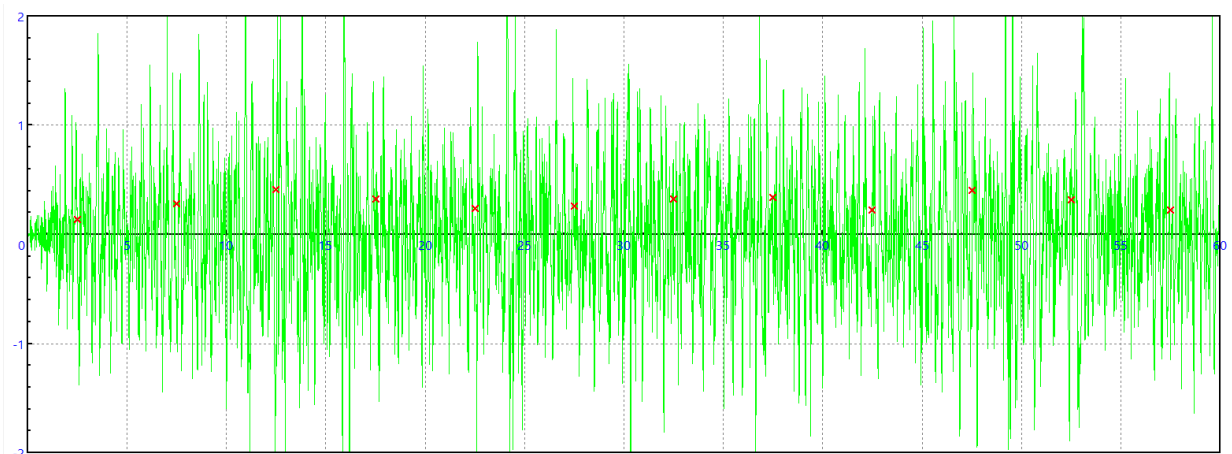


Рис. 267. Показатель постоянного комфорта  $C_{C_y}(t)$

### 8.5.3.7.2. Показатель комфорта при прохождении кривого участка пути

Данный метод касается оценивания показателя комфорта при прохождении кривой  $P_{CT}$ , мгновенно воспринимаемого пассажирами как внезапное изменение усредненного ощущения комфорта во время движения транспортного средства. Этот вид оценки дает возможность определить влияние ускорений на комфорт пассажиров при прохождении отдельной кривой, исключая оценивание накопительных эффектов.

Показатель комфорта при прохождении кривой  $P_{CT}$  рассчитывается на основе бокового ускорения кузова  $\ddot{y}(t)$  и скорости крена кузова  $\dot{\phi}(t)$  транспортного средства. Измеряемые сигналы фильтруются при помощи фильтра низких частот  $W_p$  и усредняются в односекундном окне:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{1s}(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-0.5T}^{t+0.5T} \dot{y}_{W_p}(\tau) d\tau, \\ \dot{\phi}_{1s}(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-0.5T}^{t+0.5T} \dot{\phi}_{W_p}(\tau) d\tau, \\ \ddot{y}_{1s}(t) &= \frac{1}{T} \left[ \dot{y}_{1s} \left( t + \frac{T}{2} \right) - \dot{y}_{1s} \left( t - \frac{T}{2} \right) \right], \end{aligned}$$

где  $\dot{y}_{1s}(t)$  – фильтрованное значение бокового ускорения кузова, усредненное в односекундном окне;

$\dot{\phi}_{1s}(t)$  – фильтрованное значение скорости крена кузова, усредненное в односекундном окне;

$\ddot{y}_{1s}(t)$  – фильтрованное значение скорости нарастания бокового ускорения, усредненное в односекундном окне.

Показатель комфорта указывает на процент недовольных пассажиров. По стандарту [27] п.7.5 показатель комфорта рассчитывается по формуле:

$$P_{CT} = 100 \cdot \{ \max[0.2854 \cdot |\dot{y}_{1s}|_{max} + 0.2069 \cdot |\ddot{y}_{1s}|_{max} - 0.111; 0] + (3.64 \cdot |\dot{\phi}_{1s}|_{max})^{2.283} \},$$

где  $|\dot{y}_{1s}|_{max}$  – максимальное абсолютное значение бокового ускорения  $\dot{y}_{1s}(t)$  в кривой, включая переходные кривые, плюс 1,6 с;

$|\ddot{y}_{1s}|_{max}$  – максимальное абсолютное значение скорости нарастания бокового ускорения  $\ddot{y}_{1s}(t)$  в кривой, включая переходные кривые;

$|\dot{\phi}_{1s}|_{max}$  – максимальное абсолютное значение скорости крена кузова  $\dot{\phi}_{1s}(t)$  в кривой, включая переходные кривые.

По Европейскому стандарту [28] п.7.7 показатель комфорта можно рассчитать для положений сидя или стоя по формуле:

$$P_{CT} = 100 \cdot \{ \max[A \cdot |\dot{y}_{1s}|_{max} + B \cdot |\ddot{y}_{1s}|_{max} - C; 0] + (D \cdot |\dot{\phi}_{1s}|_{max})^E \}.$$

Таблица 14

**Постоянные составляющие для показателя комфорта  $P_{CT}$  по EN 12299**

Положение	A[с <sup>2</sup> /м]	B[с <sup>3</sup> /м]	C[-]	D[с/рад]	E[-]
Стоя	0,2854	0,2069	0,111	3,64	2,283
Сидя	0,0897	0,0968	0,059	0,916	1,626

Чтобы рассчитать показатель комфорта при прохождении кривой  $P_{CT}$ , выполните следующие действия.

1. Для исследуемой модели рассчитайте или загрузите готовые графики бокового ускорения кузова и скорости крена кузова в кривой.

2. Выберите пункт меню **Инструменты | Показатели комфорта | Показатель комфорта в кривых...**, рис. 268. После этого появится окно **Калькулятора показателя комфорта при прохождении кривой**, рис. 269.

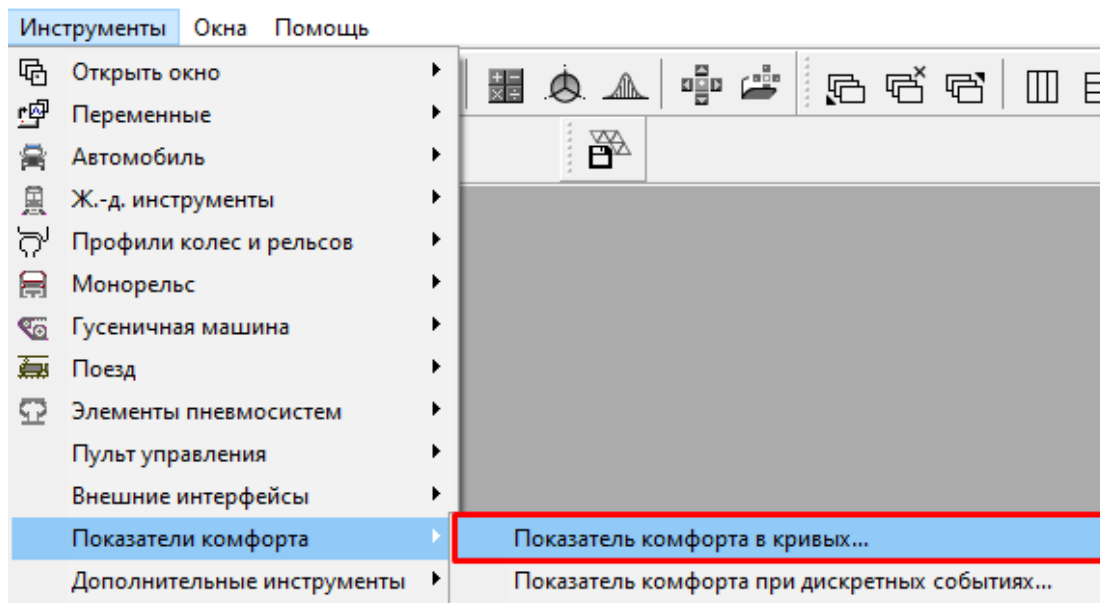


Рис. 268. Загрузка калькулятора показателя комфорта  $P_{СТ}$

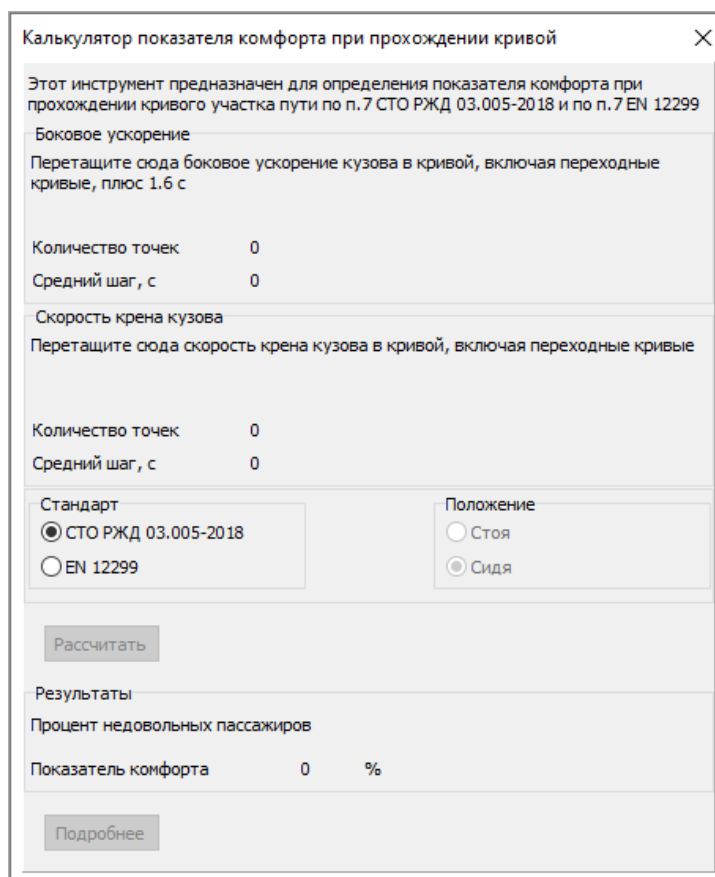


Рис. 269. Окно калькулятора показателя комфорта при прохождении кривой  $P_{СТ}$

3. В графическом окне вызовите контекстное меню и активируйте поле **Показать линейку**, рис. 270. После этого для бокового ускорения при помощи ползунков линейки выберите участок кривой, включая переходные участки, и плюс 1,6 с.

**Замечание.** Временной период может быть увеличен, если очевидно, что ускорение достигает максимального значения после прохождения конечной точки кривой плюс 1,6 секунд.

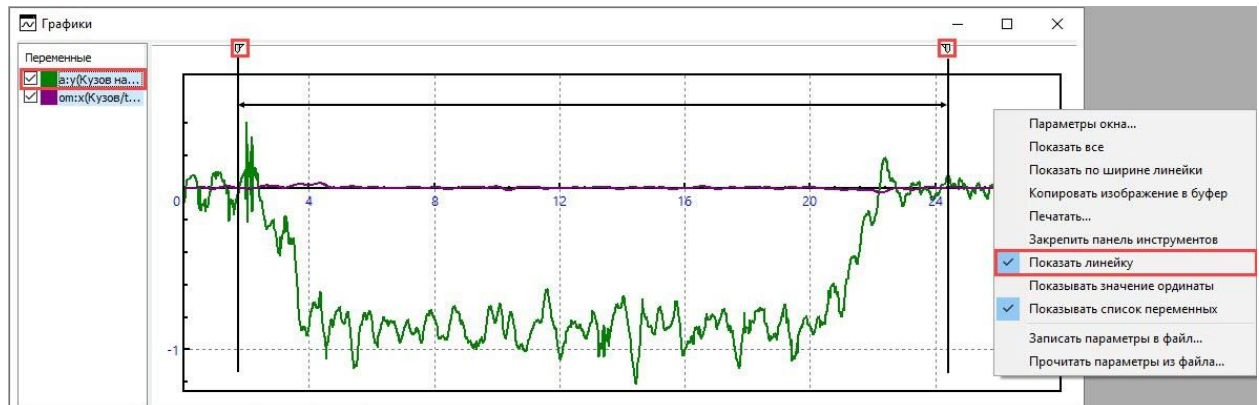


Рис. 270. Выбор участка графика бокового ускорения кузова

4. Перетащите переменную бокового ускорения в поле калькулятора **Боковое ускорение**, см. рис. 269.

5. В графическом окне при помощи ползунков линейки для скорости крена кузова выберите участок кривой, включая переходные кривые, рис. 271, и перетащите переменную в поле калькулятора **Скорость крена кузова**. При загрузке графиков в калькулятор показателя комфорта в полях **Бокового ускорения** и **Скорости крена кузова** отображаются название загруженной переменной, количество точек графика и средний шаг, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

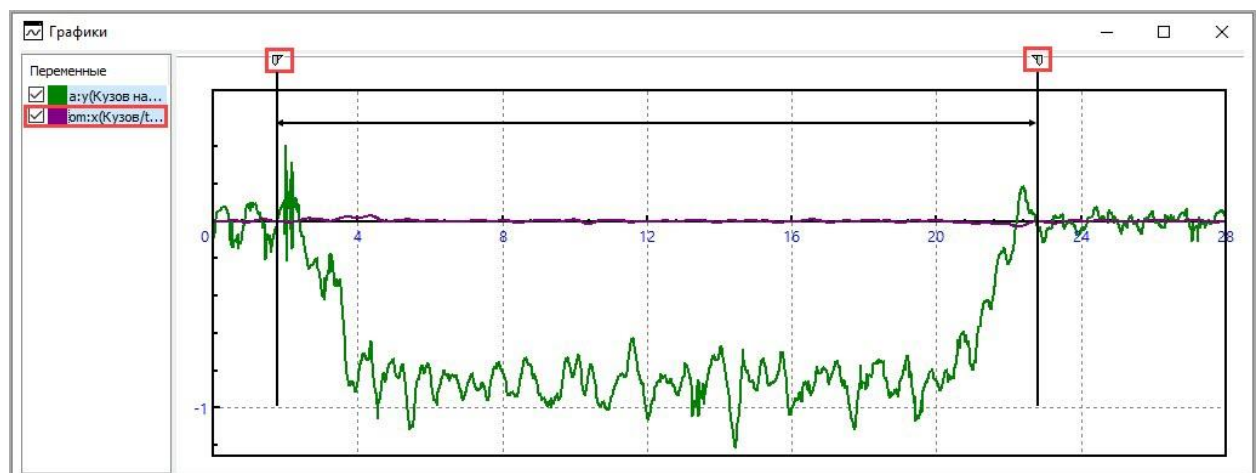


Рис. 271. Выбор участка графика скорости крена кузова

6. После загрузки графиков нажмите кнопку **Рассчитать**. В поле **Результаты** отобразится процент недовольных пассажиров.

7. При нажатии на кнопку **Подробнее** в разделе **Дополнительные сведения** при необходимости можно посмотреть промежуточные рассчитанные величины: максимальное абсолютное значение бокового ускорения  $|\ddot{y}_{1s}|_{max}$ , максимальное абсолютное значение скорости нарастания бокового ускорения  $|\dot{\ddot{y}}_{1s}|_{max}$ , максимальное абсолютное значение ско-

рости крена кузова  $|\dot{\varphi}_{1s}|_{max}$ , рис. 272. В графическом окне можно отобразить рассчитанные промежуточные фильтрованные переменные, рис. 273, рис. 274.

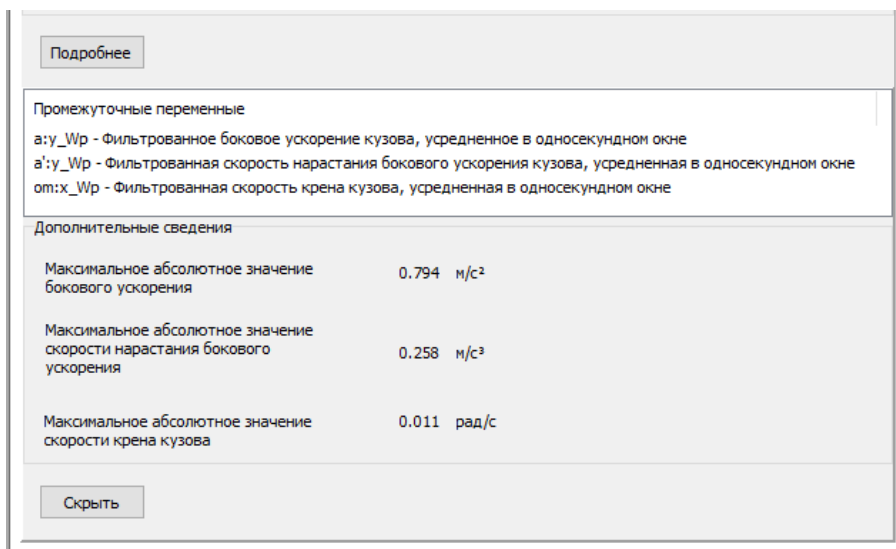


Рис. 272. Промежуточные результаты

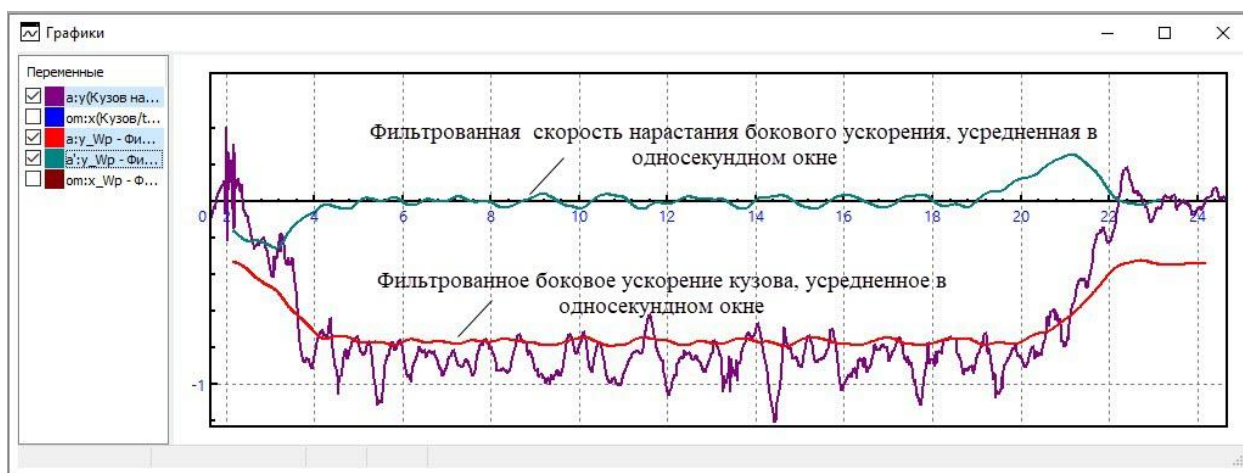


Рис. 273. Фильтрованное боковое ускорение и фильтрованная скорость нарастания бокового ускорения, усредненные в односекундном окне

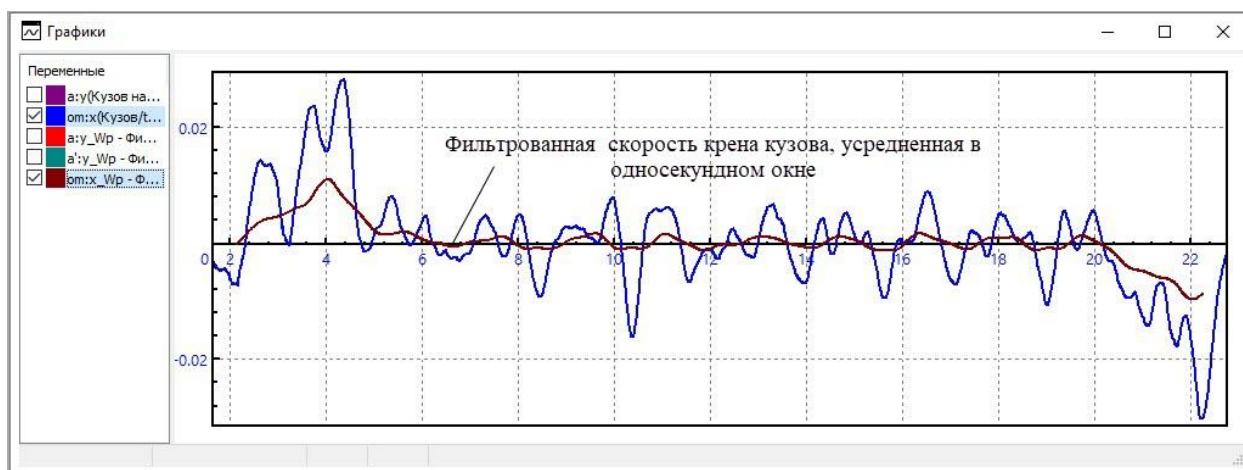


Рис. 274. Фильтрованная скорость крена кузова, усредненная в односекундном окне

### 8.5.3.7.3. Показатель комфорта при дискретных событиях

Данный метод касается измерений и оценки показателя комфорта при дискретных событиях  $P_{DE}$ , мгновенно воспринимаемого пассажирами как внезапное изменение ощущения комфорта во время движения транспортного средства. Этот метод позволяет оценивать влияние ускорений на степень комфорта для пассажиров при отдельном дискретном событии, исключая оценивание накопительных эффектов.

Показатель комфорта при дискретных событиях рассчитывается на основе измеренных в центре кузова транспортного средства продольного  $\dot{x}(t)$ , поперечного  $\dot{y}(t)$  и вертикального  $\dot{z}(t)$  ускорений. Измеряемые сигналы фильтруются с помощью фильтра низких частот  $W_d$  для продольного ускорения  $\dot{x}_{W_d}(t)$ , фильтра низких частот  $W_p$  для бокового ускорения  $\dot{y}_{W_p}(t)$  и фильтра низких частот  $W_b$  для вертикального ускорения  $\dot{z}_{W_b}(t)$ . По фильтрованным значениям ускорений определяется полное ускорение:

$$\ddot{a}^W(t) = \sqrt{\dot{x}_{W_d}^2(t) + \dot{y}_{W_p}^2(t) + \dot{z}_{W_b}^2(t)}.$$

Полное ускорение  $\ddot{a}^W(t)$  усредняется в двухсекундном окне, результатом которого является зависимость

$$|\ddot{a}_{2s}|(t) = \left| \frac{1}{T} \int_{t-0.5T}^{t+0.5T} \ddot{a}^W(\tau) d\tau \right|.$$

Во время периода  $T$ , равного 2 секунды, рассчитывается размах колебаний полного ускорения:

$$\ddot{a}_{pp}(t) = \max(\ddot{a}^W(\tau), \tau \in [t - 0.5T, t + 0.5T]) - \min(\ddot{a}^W(\tau), \tau \in [t - 0.5T, t + 0.5T]).$$

Показатель комфорта при дискретных событиях  $P_{DE}$  указывает на процент недовольных. По стандарту [27] п.8.4 показатель комфорта при дискретных событиях рассчитывается по формуле:

$$P_{DE}(t) = 100 \cdot \max(0.0846 \cdot \ddot{a}_{pp}(t) + 0.1305 \cdot |\ddot{a}_{2s}|(t); 0).$$

По Европейскому стандарту [28] п.8.7 показатель комфорта можно рассчитать для положений сидя или стоя по формуле:

$$P_{DE}(t) = 100 \cdot \max(a \cdot \ddot{a}_{pp}(t) + b \cdot |\ddot{a}_{2s}|(t) - c; 0).$$

Таблица 15

#### Постоянные составляющие для показателя комфорта $P_{DE}$ по EN 12299

Положение	a[с <sup>2</sup> /м]	b[с <sup>2</sup> /м]	c[-]
Стоя	0,1662	0,2701	0,37
Сидя	0,0846	0,1305	0,217

**Замечание.** Показатель комфорта  $P_{DE}$  не сможет быть рассчитан, если количество точек или шаг исходных сигналов ускорений не совпадает. Шаг не должен превышать 0,1 секунды.

Чтобы рассчитать показатель комфорта при дискретных событиях  $P_{DE}$ , выполните следующие действия.

1. Для исследуемой модели рассчитайте или загрузите в графическое окно готовые графики продольного, поперечного и вертикального ускорений кузова одинаковой длины. При необходимости исследования отдельного участка используйте инструмент **Линейка**.

2. Выберите пункт меню **Инструменты | Показатели комфорта | Показатель комфорта при дискретных событиях...**, рис. 275. После этого появится окно **Калькулятора показателя комфорта при дискретных событиях**, рис. 276.

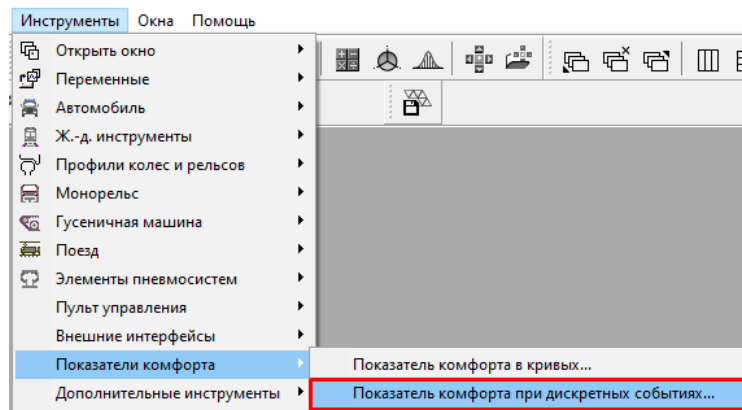


Рис. 275. Загрузка калькулятора показателя комфорта  $P_{DE}$

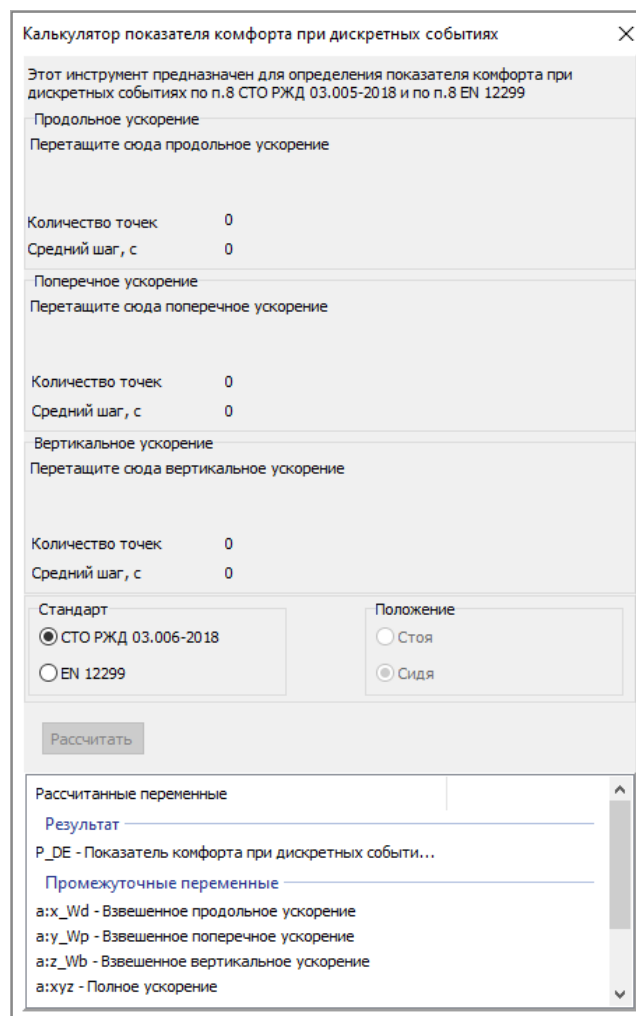


Рис. 276. Окно калькулятора показателя комфорта при дискретных событиях  $P_{DE}$

3. Перетащите переменную продольного ускорения в поле калькулятора **Продольное ускорение**. Аналогично перетащите графики поперечного и вертикального ускорения в соответствующие поля.

4. Убедитесь, что количество точек и средний шаг сигналов совпадают.

5. После загрузки графиков нажмите кнопку **Рассчитать, Ошибка! Источник ссылки не найден..** После этого из поля **Результат** перетащите переменную **P\_DE** в графическое окно и оцените процент недовольных пассажиров.

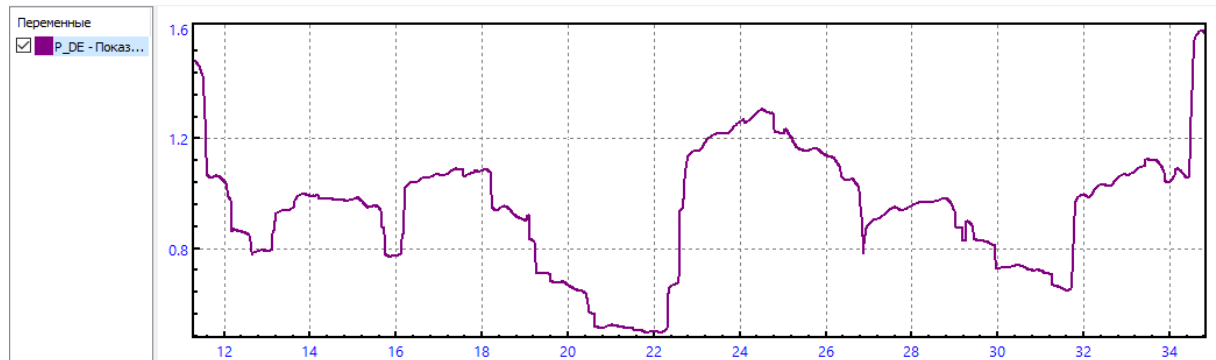


Рис. 277. Показатель комфорта  $P_{DE}$ , рассчитанный по ускорениям на прямом участке пути с небольшими неровностями

При необходимости можно посмотреть промежуточные рассчитанные переменные: взвешенные продольное  $\dot{x}_{W_d}(t)$ , поперечное  $\dot{y}_{W_p}(t)$  и вертикальное  $\dot{z}_{W_b}(t)$  ускорения, полное ускорение  $\ddot{a}^W(t)$ , модуль полного ускорения, усредненного в двухсекундном окне  $|\ddot{a}_{2s}|(t)$  и размах колебаний полного ускорения в двухсекундном окне  $\ddot{a}_{pp}(t)$ , см. рис. 276.

### 8.5.4. Численные методы

Для моделирования РЭ рекомендуется использовать метод Парка в одной из двух реализаций (рис. 8.278, слева): без использования многопоточных режимов (**Park**) и с возможностью использования многопоточного режима (**Park Parallel**). Конкретный выбор делает пользователь путем сравнения быстродействия при использовании этих методов на данном компьютере.

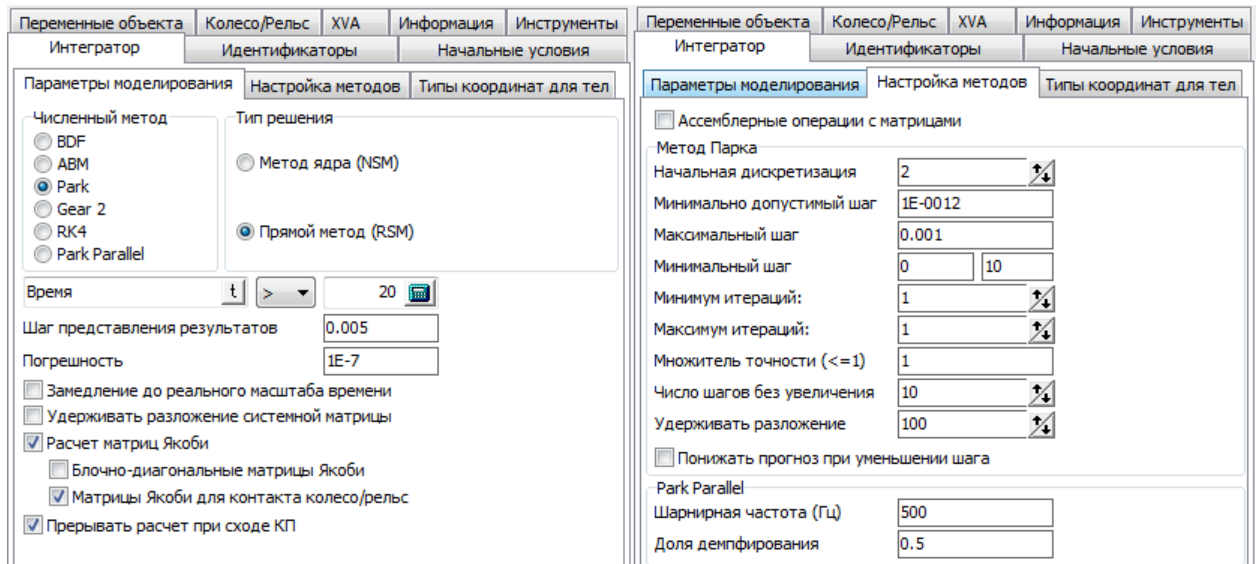


Рис. 8.278. Параметры метода Парка

Рассмотрим некоторые общие рекомендации по выбору рациональных параметров численных методов.

Рекомендуется использовать метод Парка со значением **погрешности** 4E-6...1E-7.

Ключ **Замедление до реального масштаба времени** активируется, если моделирование происходит быстрее реального времени, и пользователь хочет видеть в анимационных окнах движение в реальном масштабе времени.

**Шаг представления результатов** задает интервал времени, через который обновляется положение объекта в анимационных окнах и рассчитываются переменные на графиках или в списке переменных. Рекомендуемое значение для моделирования РЭ: 0.005с. Обратите внимание, что автоматически назначаемый решателем шаг интегрирования не может устанавливаться больше этого значения.

На рис. 8.278, справа указаны рекомендуемые настройки параметров методов Парка. При выполнении уточненных расчетов динамики следует устанавливать нулевое значение в поле **Минимальный шаг**.

#### 8.5.4.1. Метод Парка

При расхожимости численного метода (наличие “бороды” на некоторых графиках, в основном – ускорений) следует включить расчет матриц Якоби, либо увеличить точность (уменьшить погрешность) до исчезновения “бороды”. Также следует использовать матрицы Якоби, если при этом повышается скорость моделирования динамики РЭ.

Использование матриц Якоби позволяет значительно ускорить процесс моделирования в следующих ситуациях:

- движение экипажа с малой скоростью (меньше 8-10 м/с); в этом случае следует включить как ключ **Расчет матриц Якоби**, так и ключ **Матрицы Якоби для контакта колесо/рельс**;
- наличие жестких сил, то есть сил, в описании которых присутствуют большие коэффициенты жесткости и/или демпфирования, дающие большие парциальные частоты и демпфирование; например, контактные силы при взаимодействии тел, масса одного из которых много меньше массы другого; силовой элемент типа последовательного соединения пружины с демпфером.

Для некоторого ускорения процесса моделирования при включенных матрицах Якоби рекомендуются следующие действия:

- использовать блочно-диагональные матрицы Якоби (ключ **Блочно-диагональные матрицы Якоби**, рис. 8.278);
- выключить расчет матриц Якоби нежестких сил на закладке инспектора **Инструменты | Силы** (как правило – это пружины, гасители колебания и пр., рис. 8.279)

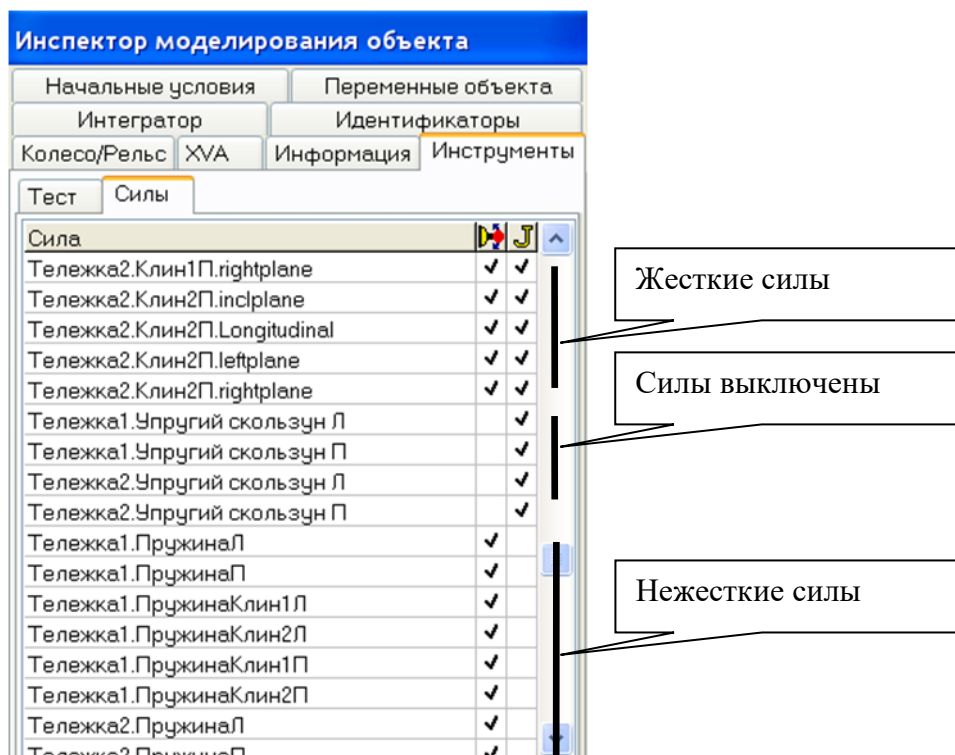


Рис. 8.279. Включение/выключение расчета матриц Якоби отдельных силовых элементов

При включенном ключе **Прерывать расчет при сходе КП** моделирование прерывается при поперечном смещении колесной пары относительно рельса, превосходящем некоторое критическое значение. Это значение рассчитывается автоматически по профилям колеса и рельса.

Ключ **Удерживать разложение системной матрицы**, как правило, не используется при моделировании динамики РЭ.

**Замечание.** Использование матриц Якоби и остальные рекомендации имеют смысл только в том случае, если они повышают устойчивость процесса интегрирования и/или ускоряют его. Рекомендуется оптимизировать параметры метода интегрирования для каждой новой модели рельсового экипажа.

#### 8.5.4.2. Park Parallel

В УМ, начиная с версии 6.0, реализован новый алгоритм **Park Parallel** формирования уравнений движения РЭ и их решения. Важнейшей особенностью алгоритма является возможность использования многопоточных режимов расчета на многоядерных компьютерах, что часто позволяет значительно ускорить процесс моделирования.

##### 8.5.4.2.1. Условия, при которых можно использовать метод Park Parallel

Метод накладывает некоторые незначительные ограничения на подготовку модели РЭ, без удовлетворения которых метод недоступен.

- В программе ввода **UM Input** модели и всем внешним подсистемам должен быть установлен *численно-итерационный* метод синтеза уравнений, рис. 8.280;
- Массы и моменты инерции относительно осей X, Y, Z всех тел должны быть отличны от нуля;
- Не допускается моделирование интерфейсных функций с Matlab\Simulink и внешних библиотек;
- Игнорируются силовые взаимодействия 3D Контакт ([Глава 3](#), п. 3.6.9.8).

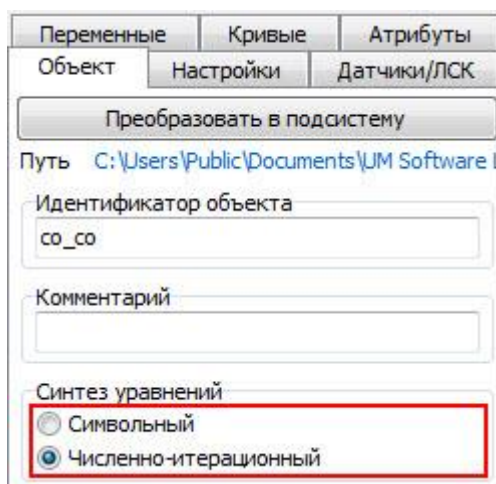


Рис. 8.280. Выбор метода синтеза уравнений в программе ввода **UM Input**

Если эти условия не выполнены, то при попытке выбрать данный метод появляется сообщение об ошибке и ссылка на текстовый файл с перечнем невыполненных условий, рис. 8.281.

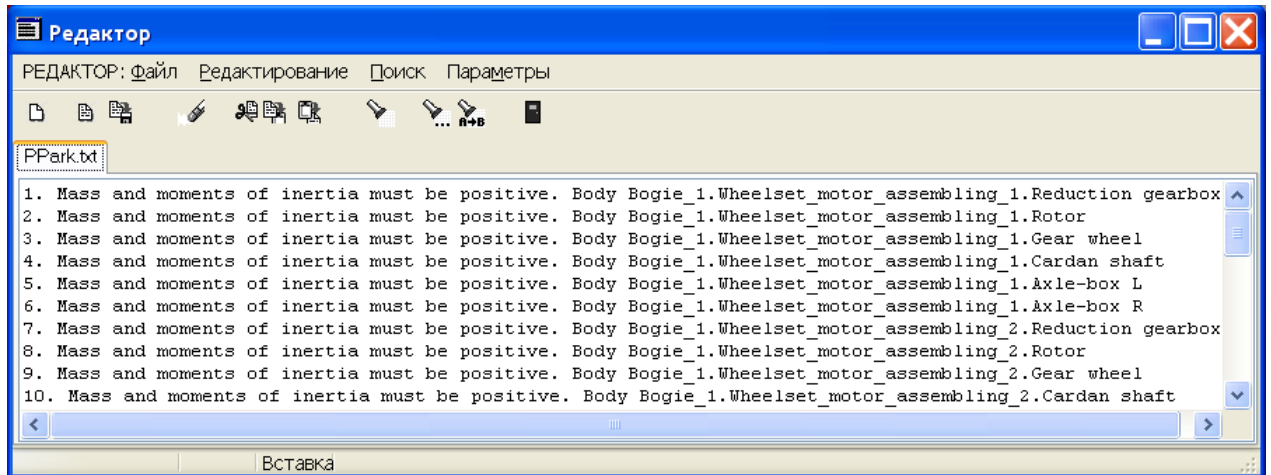
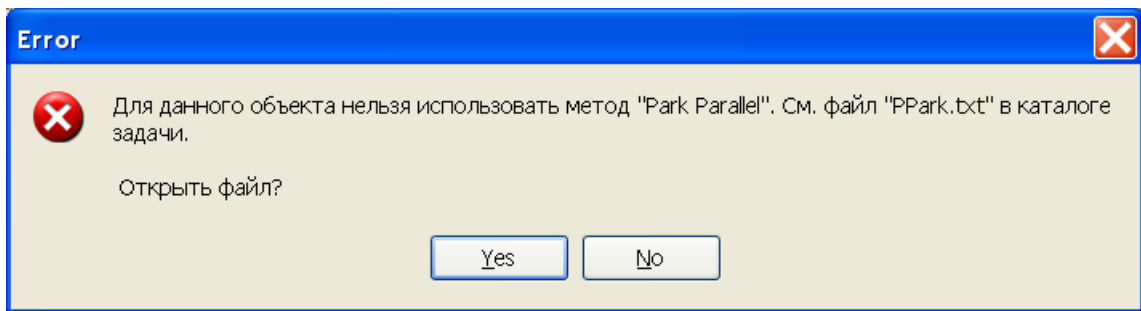


Рис. 8.281. Сообщение о невозможности использовать метода и список нарушений

### 8.5.4.2.2. Параметры метода

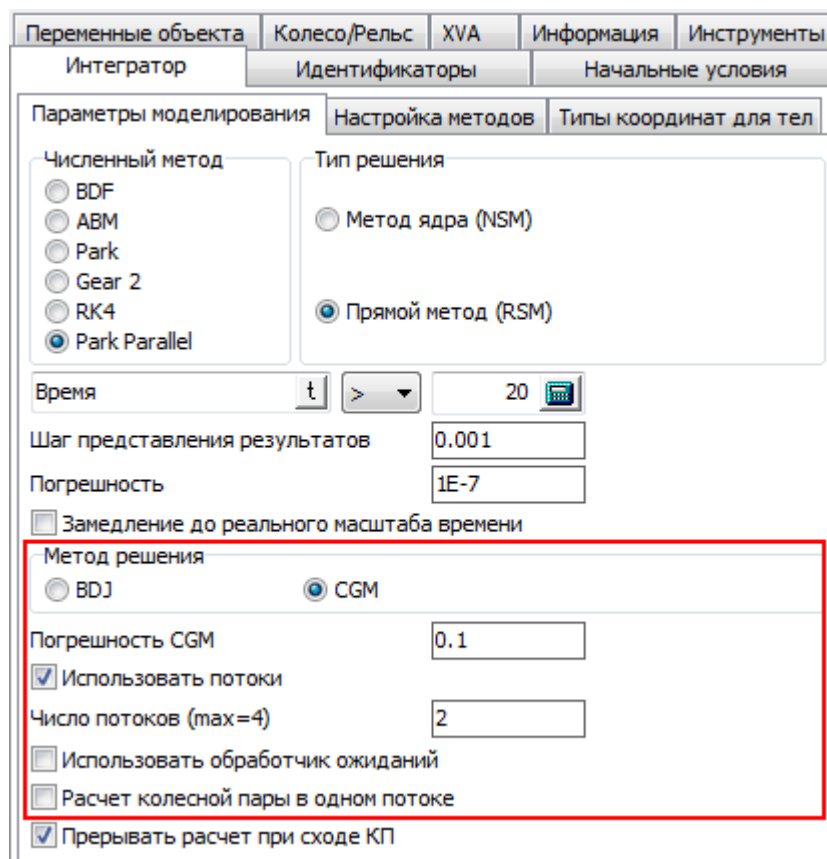


Рис. 8.282. Параметры метода Park Parallel

Дополнительно к методу Парка метод Park Parallel использует следующие параметры, рис. 8.282.

- **Метод решения**

**BDJ** – использование блочно-диагональных матриц Якоби. **SGM** – использование итераций метода сопряженных градиентов для уточнения решения жестких уравнений. В итерациях участвуют полные матрицы Якоби. Нет строгих рекомендаций по использованию того или иного метода. Пользователь может руководствоваться простым правилом: используется тот метод, который ускоряет моделирование. При использовании **SGM** следует задать погрешность итерационного процесса – отношение невязок текущей и предыдущей итераций. Как правило, результаты хорошие даже при низкой точности, порядка 0,1.

- **Использовать потоки**

Использование потоков возможно только для многоядерных компьютеров. При активном ключе расчет динамики производится параллельно на указанном числе потоков. Максимально допустимое число потоков равно числу ядер на процессоре локальной машины и определяется автоматически. В это число включаются как физические, так и логические ядра. Оптимальное число потоков зависит от модели РЭ и определяется пользователем опытным путем. В настоящее время наиболее эффективным является использование четырехъядерных и восьмиядерных процессоров. В некоторых случаях за счет распараллеливания удается достичь ускорения в 2,5-3 раза.

- **Использовать обработчик ожиданий**

Использование обработчика ожиданий высвобождает процессор для других задач в режиме "Паузы". Также влияет на скорость расчетов. В зависимости от архитектуры CPU может несколько замедлять или ускорять выполнение расчетов.

#### **8.5.4.3. Сравнение производительности численных методов при моделировании динамики грузового вагона с трехэлементной тележкой**

Рассмотрим пример моделирования динамики порожнего вагона – хоппера с трехэлементными тележками модели 18-100, рис. 8.283. Модель является уточненной по сравнению с той, которая поставляется вместе с УМ ([{Данные УМ}\samples\Rail\\_Vehicles\simple\\_18\\_100](#)) и включает фрикционные клинья как абсолютно твердые тела с шестью степенями свободы каждое. Модель имеет 114 степеней свободы и принята ОАО РЖД в качестве основной модели при анализе проблем безопасности методами компьютерного моделирования [26].

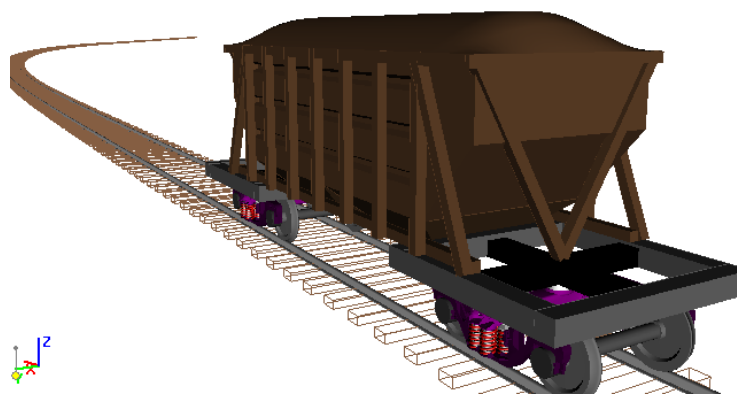


Рис. 8.283. Грузовой вагон – хоппер

**Замечание.** Модель грузового вагона *{Данные УМ}\Samples\Rail\_Vehicles\simple\_18\_100* использует программирование вы среде УМ для расчета сил трения и по этой причине метод Park Parallel не может использоваться для ее динамического анализа.

Моделируется движение хопера в правой кривой радиусом 600 м (рис. 8.284) со скоростью 20 м/с, время моделирования 15 с. Настройки метода Парка соответствуют рис. 8.278.

Первый участок	
L1	10
P11	50
S1	200
R1	600
H1	0.09 ...
P12	50
dY1	0
L	310
V'	18.310611
Сглаживание	8.00 ↕

Рис. 8.284. Параметры кривой

Сравнение быстродействия численных методов при различных формах синтеза уравнений движения и вариантах использования матриц Якоби представлено в табл. 8.15. Расчеты проводились на компьютере с четырехъядерным процессором (все ядра физические) Intel Core 2 Quad Q6700 2.66 GHz.

Таблица 8.15

**Сравнение быстродействия численных методов**

Метод	Число потоков	Время расчета, с		
		Без матриц Якоби	С матрицами Якоби	Блочнo-диагональные матрицы Якоби
Метод Парка, символьные уравнения	1	40.7	16.1	15.4
Метод Парка, численно-итерационные уравнения	1	-	20.4	23.2
Park Parallel	1		8.4	11.8
	2		5.6	7.6
	3		4.5	6.1
	4		3.7	5.0

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Модель является жесткой, поскольку использование матриц Якоби резко повышает производительность моделирования. Этот вывод очевиден, поскольку в модели присутствует множество контактных взаимодействий тел, моделируемых податливым контактом с высокой жесткостью.
2. В случае использования метода Парка рекомендуется формировать уравнения движения в символьной форме. Для этого в программе ввода **UM Input** надо установить соответствующий ключ (рис. 8.280) и следовать инструкциям, изложенным в п. 3.9.3. [Главы 3](#) руководства пользователя.
3. В случае метода Парка использование блочно-диагональных матриц Якоби может быть оправданным.
4. Для рассматриваемой модели метод ParkParallel значительно быстрее метода Парка, даже если не используется многопоточный режим.
5. Использование многопоточного режима значительно ускоряет моделирование. В случае четырех потоков коэффициент ускорения составил примерно 2.3 раза.
6. Для рассмотренной модели в случае метода Park Parallel использование блочно-диагональных матриц Якоби приводит к замедлению моделирования. В случае других моделей выводы могут отличаться от приведенных.
7. И основной вывод: сочетание нового метода с высокопроизводительным компьютером позволило достичь скорости моделирования в **четыре раза превосходящую реальный масштаб времени!**

**Замечание.** При выполнении многовариантных расчетов многопоточный режим метода Park Parallel не используется, поскольку более эффективным является запуск одновременно нескольких заданий на локальной машине (см. модули **UM Experiments** и **UM Cluster**, [Глава 23](#) руководства пользователя).

## 8.6. Особенности организации многовариантных расчетов

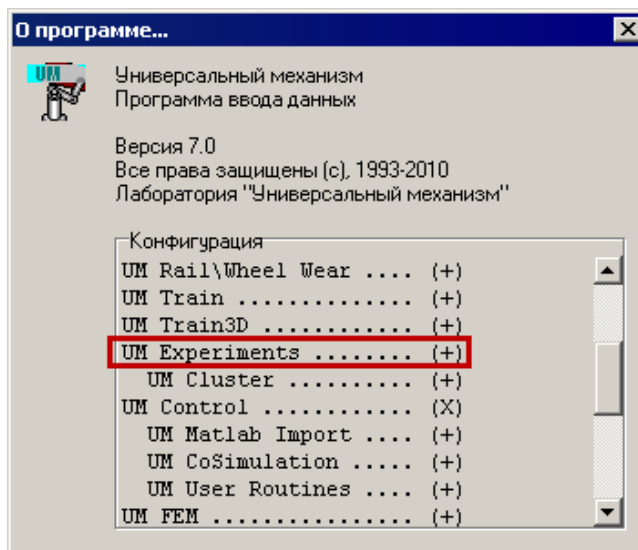


Рис. 8.285. Список модулей UM

Данный раздел предполагает наличие модуля UM Experiments в конфигурации UM, рис. 8.285.

### 8.6.1. Список внутренних идентификаторов, параметризующих условия функционирования РЭ

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

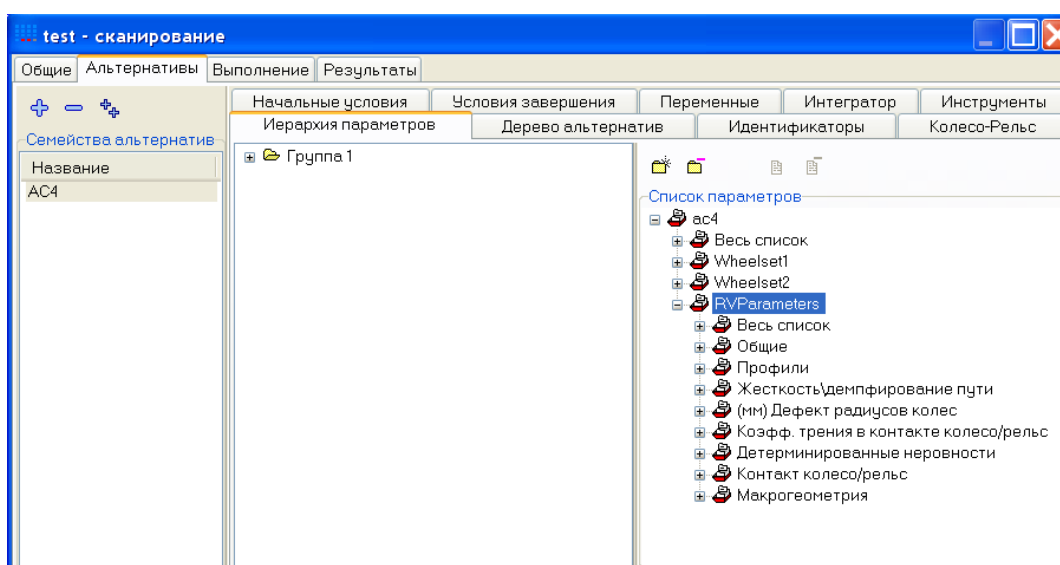


Рис. 8.286. Использование внутренних стандартных идентификаторов

Для удобства организации многовариантных расчетов динамики РЭ в модуле **UM Experiments**, введены **внутренние стандартные идентификаторы** для условий функционирования РЭ (макрогеометрия, неровности рельсовых нитей, профили колес и рельсов и т.д.) задаваемых в программе моделирования. Данные идентификаторы могут быть использованы для варьирования соответствующих параметров при составлении плана эксперимента.

Список внутренних стандартных идентификаторов доступен в дереве параметров на вкладке **Альтернативы | Иерархия параметров | Список параметров**, ветвь **RVParameters**, рис. 8.286.

Полный список стандартных внутренних идентификаторов приведен в табл. 8.16.

Таблица 8.16

**Список стандартных внутренних идентификаторов**

Ветвь дерева идентификаторов	Имя идентификатора	Комментарий
Общие	_irr_type	Тип задания неровностей: 0 – нет неровностей, 1 – файл, 2 – детерминированные неровности, п. 8.5.2.4.3. <i>"Неровности рельсовых нитей"</i> , стр. 8-182.
	_irr_group	Номер группы неровностей, начиная с 1, п. 8.5.2.4.3.1.1. <i>"Список групп неровностей"</i> , стр. 8-183.
	_scr_scw_distance	(мм), расстояние между СК рельса и СК колеса, задает ширину колеи, п. 8.3.1.1. <i>"Геометрия рельсов в идеальной прямой"</i> , стр. 8-68.
	_y_irr_factor	Множитель для горизонтальных неровностей рельса, п. 8.5.2.4.3.1. <i>"Неровности из файлов. Группы неровностей"</i> , стр. 8-183.
	_z_irr_factor	Множитель для горизонтальных неровностей рельса, п. 8.5.2.4.3.1. <i>"Неровности из файлов. Группы неровностей"</i> , стр. 8-183
	_rail_inclination	Подуклонка рельсов, п. 8.3.1.1. <i>"Геометрия рельсов в идеальной прямой"</i> , стр. 8-68.
Профили	_i_wheel_profile	Номер профиля колеса в списке, начиная с 1, п. 8.5.2.3.2. <i>"Назначение профилей колес"</i> , стр. 8-172
	_i_rail_left_profile	Номер профиля левого рельса в списке, начиная с 1, п. 8.5.2.3.1. <i>"Назначение</i>

		<i>профилей рельсов"</i> , стр. 8-169.
	_i_rail_right_profile	Номер профиля правого рельса в списке, начиная с 1, п. 8.5.2.3.1. <i>"Назначение профилей рельсов"</i> , стр. 8-169.
Жесткость, демпфирование пути, п. 1.5.2.4.4.2	_z_rail_stiffness	(Н/м) Вертикальная жесткость рельса
	_y_rail_stiffness	(Н/м) Поперечная жесткость рельса
	_z_rail_damping	(Нс/м) Вертикальное демпфирование пути
	_y_rail_damping	(Нс/м) Поперечное демпфирование пути
	_torsional_rail_stiffness	(Нм/рад) Крутильная жесткость рельса
Дефект радиуса колеса, п. 1.5.2.7.1	_dr_wheel_[n]l _dr_wheel_[n]r	(мм) Дефекты радиусов левого и правого колеса КП номер n
Коэф. трения в контакте колесо-рельс, п. 8.4.3. <i>"Коэффициент трения в контакте колесо-рельс"</i> , стр. 8-97	_cfriiction_left	Поверхность катания левого колеса
	_cfriiction_right	Поверхность катания правого колеса
	_cfriiction_left_s	Боковая поверхность левого колеса
	_cfriiction_right_s	Боковая поверхность правого колеса
Детерминированные неровности, п. 8.5.2.4.3.2. <i>"Детерминированные неровности"</i> , стр. 8-184.	_type_z	Тип вертикальных неровностей (0: $h/2(1-\cos x)$ ; 1: $h \sin x $ )
	_l_z	Длина волны вертикальной неровности L
	_h_z	Высота вертикальной неровности H
	_s0_z	Начало левой вертикальной неровности
	_ds0_z	Сдвиг начала правой вертикальной неровности
	_count_z	Число волн вертикальной неровности N
	_l_y	Длина волны горизонтальной неровности L
	_h_y	Высота горизонтальной неровности H
	_s0_y	Начало горизонтальной неровности
	_count_y	Число волн горизонтальной неровности N
Контакт колесо-рельс, п. 8.5.2.5. <i>"Параметры контактного взаимодействия колеса с рельсом"</i> , стр. 8-191.	_contact_model	Модель контакта (0 – упрощенная, 1 – Мюллер, 2 – FastSim, 3 – FastSimA, 4 – Минова)
	_sc_eq_conicity	Эквивалентная коничность $\lambda$
	_sc_eq_cont_ang_par	Эквивалентный параметр контактного угла $\epsilon$
	_sc_cont_ang0	(град.) Номинальный угол контакта $\beta_0$
	_sc_dy2_max	(мм) Максимальное поперечное смещение $y^*$

	_sc_cont_ang2	(град.) Угол контакта на гребне $\beta^*$
	_sc_y2	(мм) Координата Y точки контакта на гребне $y_r^*$
	_sc_z2	(мм) Координата Z точки контакта на гребне $z_r^*$
	_fastsim_nstrips	FastSim: число полос
	_fastsim_nelem	FastSim: число элементов
Макрогеометрия, п. 8.5.2.4.2. <i>"Макрогеометрия пути"</i> , стр. 8-176.	_mg_type	Тип макрогеометрии (0 – прямая, 1 – кривая, 2 – S-образная кривая, 3 – стрелочный перевод, 4 – file)
	_mg_file	Индекс файла макрогеометрии в списке, п. 8.5.2.4.2.7. <i>"Тип пути: из файла. Множество файлов макрогеометрии"</i> , стр. 8-181.
	_mgc_l1	(м) Кривая, L1 (прямая перед заездом)
	_mgc_p11	(м) Кривая, P11 (переходный участок)
	_mgc_s1	(м) Кривая, S1 (длина кривой постоянного радиуса)
	_mgc_r1	(м) Кривая, R1 (радиус)
	_mgc_h1	(м) Кривая, H1 (возвышение)
	_mgc_p12	(м) Кривая, P12 (переходный участок)
	_mgc_dy1	(м) Кривая, dy1 (уширение)
	_mgsc_l2	(м) S Кривая, L2 (прямая вставка)
	_mgsc_p21	(м) S Кривая, P21 (переходный участок)
	_mgsc_s2	(м) S Кривая, S2 (длина кривой постоянного радиуса)
	_mgsc_r2	(м) S Кривая, R2 (радиус)
	_mgsc_h2	(м) S Кривая, H2 (возвышение)
	_mgsc_p22	(м) S Кривая, P22 (переходный участок)
_mgsc_dy2	(м) S Кривая, dy2 (уширение)	

### 8.6.2. Пример задания полнофакторного эксперимента

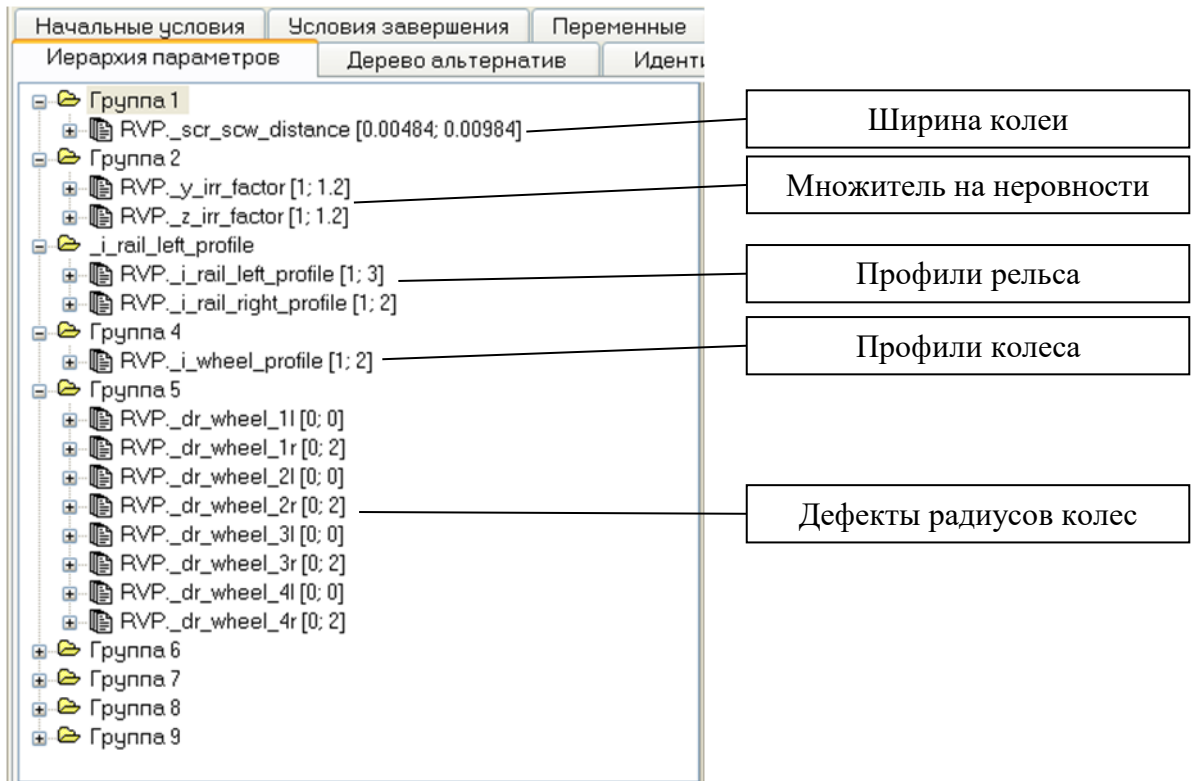


Рис. 8.287. Иерархия параметров в полнофакторном эксперименте

На рис. 8.287 приведен пример задания полнофакторного эксперимента, оценивающего влияние девяти факторов, среди которых пять заданы с помощью внутренних идентификаторов.

## 8.7. Методика расчета критической скорости

Для расчета критической скорости рекомендуется использовать два описанных ниже метода. В обоих случаях следует задавать *единичную поперечную неровность*, которая задает начальное поперечное возмущение движения, и **вертикальные неровности вдоль всего пути** движения РЭ.

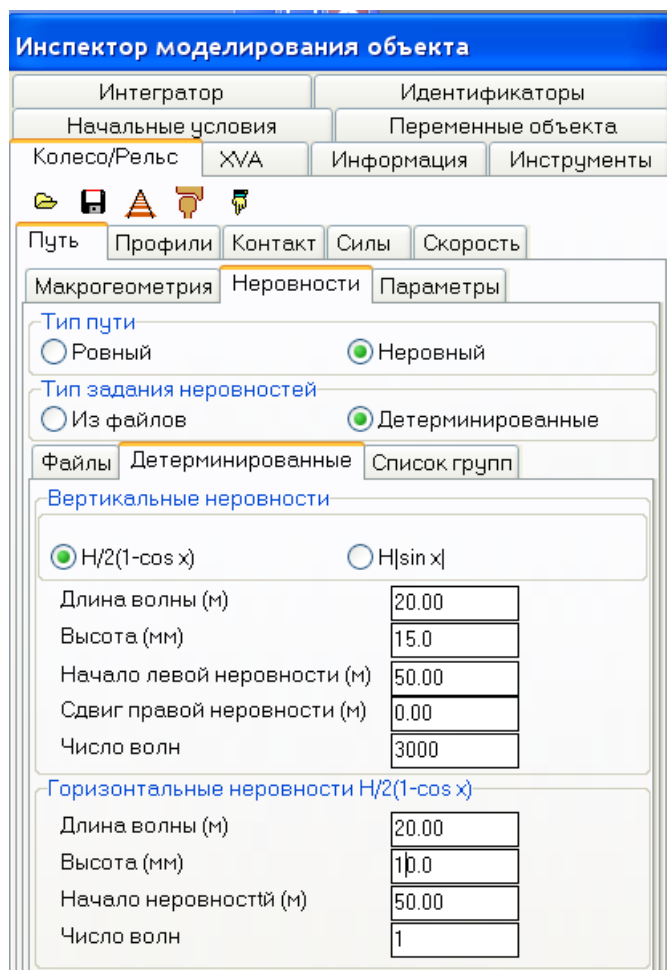


Рис. 8.288. Типовые настройки детерминированных неровностей при определении критической скорости

Для задания поперечной и вертикальных неровностей можно использовать детерминированные неровности, п. 8.5.2.4.3.2. "*Детерминированные неровности*", стр. 8-184. Пример задания неровностей приведен на рис. 8.288. Следует соблюдать следующие правила:

- вертикальные неровности должны быть гармоническими, одинаковыми для левого и правого рельса и содержать большое число волн;
- горизонтальная неровность должна содержать малое число волн (рекомендованное значение: 1).

### 8.7.1. Метод постепенного снижения скорости

В данной методике экипаж моделируется в режиме выбега. Ему задается достаточно большая начальная скорость (заведомо превосходящая критическую) и сообщается небольшое замедление 0.1-0.2 м/с<sup>2</sup>. Для этого к кузову следует приложить постоянную силу, направленную против движения, равную

$$F_x = -Ma,$$

где  $M$  – масса рельсового экипажа,  $a$  – желаемое ускорение.

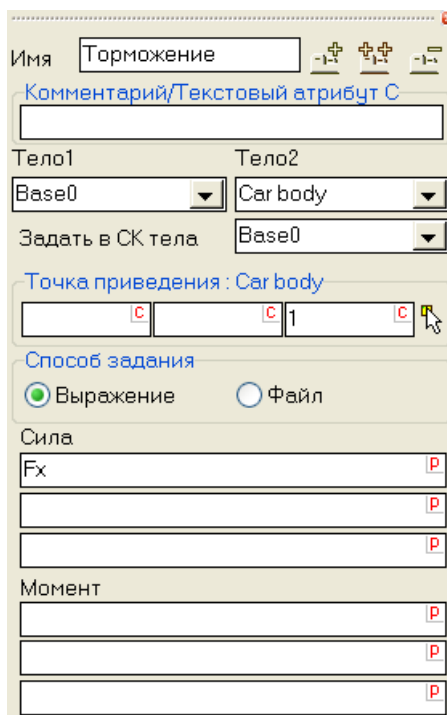


Рис. 8.289. Задание продольной силы

Чтобы можно было приложить к кузову данную силу надо предварительно описать ее в модели в программе ввода. Следует добавить Т-силу и задать значение продольной силы с помощью идентификатора, задав ему нулевое значение по умолчанию. Сила должна быть приложена примерно на уровне автосцепки, рис. 8.289.

Для исследования устойчивости надо построить график поперечных колебаний колесной пары (обычно первой) от величины продольной скорости. Для этого с помощью мастера переменных создаются соответствующие переменные и помещаются в графическое окно, см. рис. 8.290, рис. 8.291. Скорость следует отложить вдоль абсциссы. Для этого следует выделить скорость в графическом окне, вызвать контекстное меню по правой кнопке мыши и выбрать пункт меню **Отложить переменную по абсциссе**, рис. 8.292.

После это следует задать нужное (и отрицательное!) значение идентификатору продольной силы, идентификатору начальной скорости, установить достаточно большое значение времени моделирования и проверить режим продольного движения, рис. 8.293. Рекомендуется также выключить изображение рельсов в анимационном окне (динамически расчет ГО рельсов и шпал потребует значительное время, поскольку РЭ предстоит проехать большое расстояние).

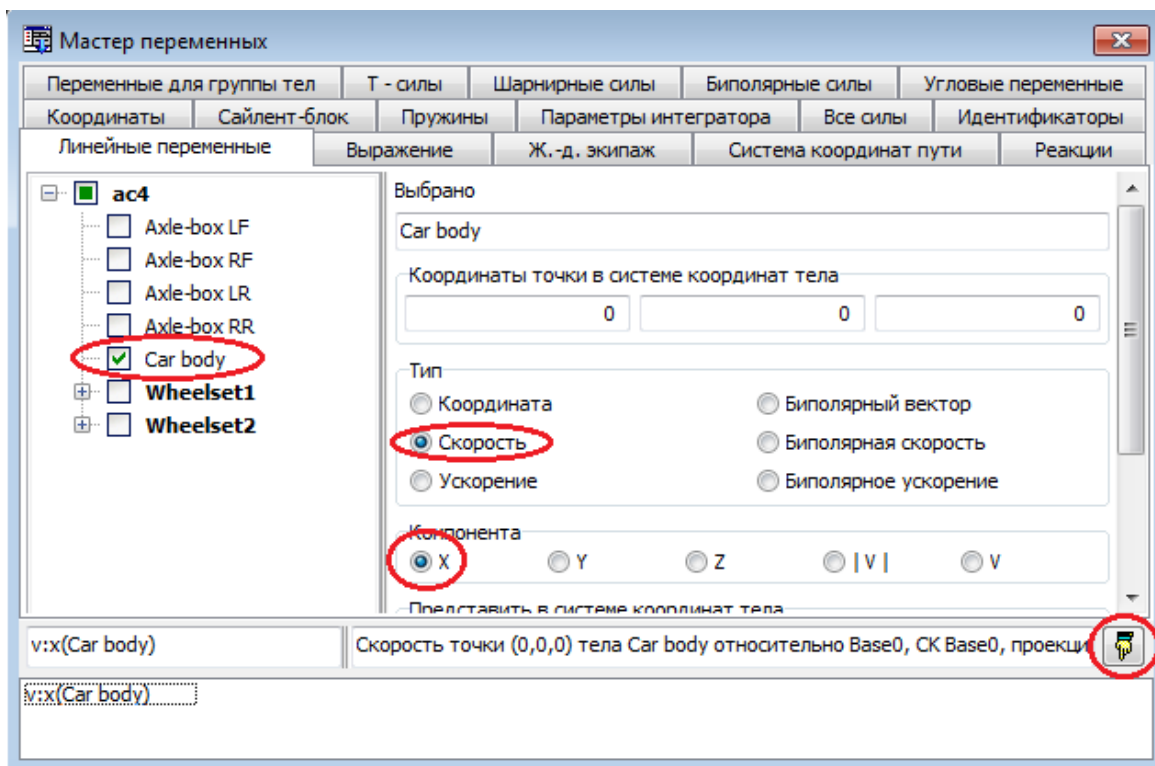


Рис. 8.290. Создание переменных: продольная скорость экипажа

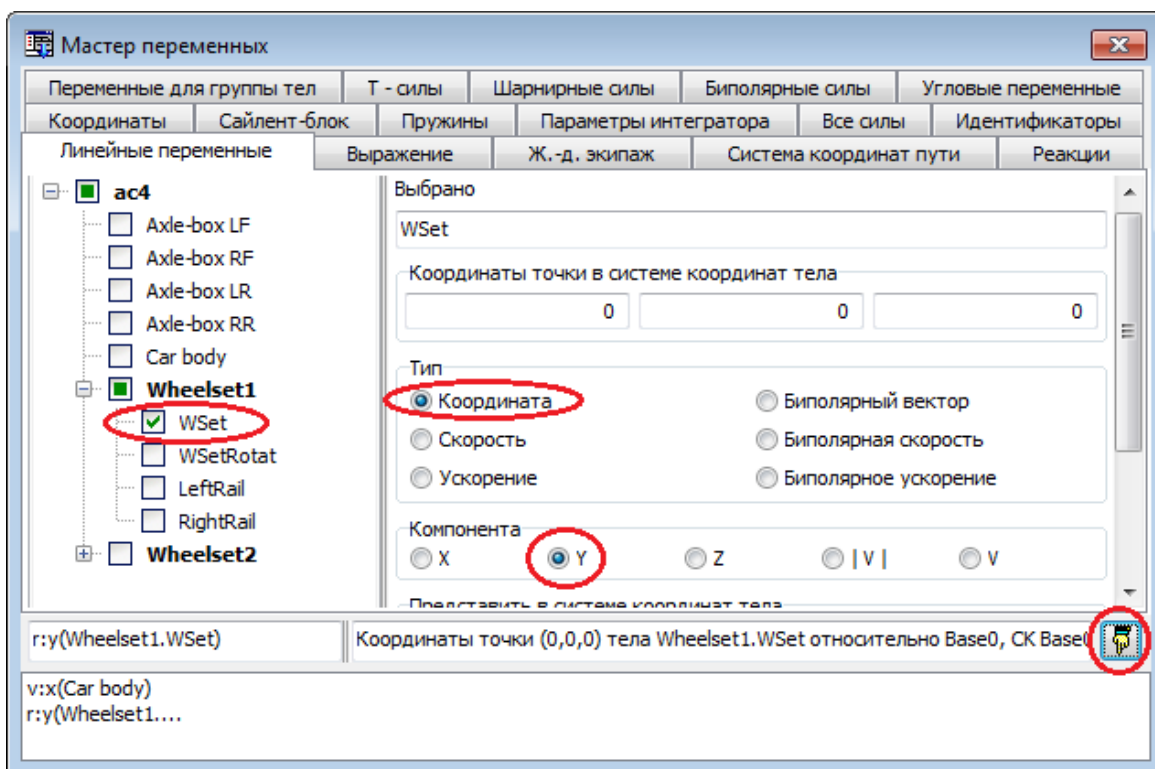


Рис. 8.291. Создание переменных: поперечное смещение первой колесной пары

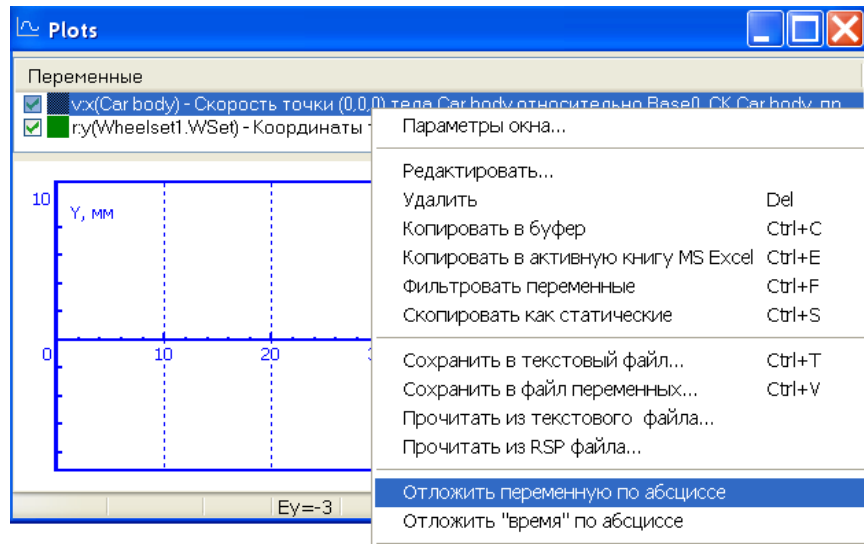


Рис. 8.292. Переменная vx будет отложена по абсциссе

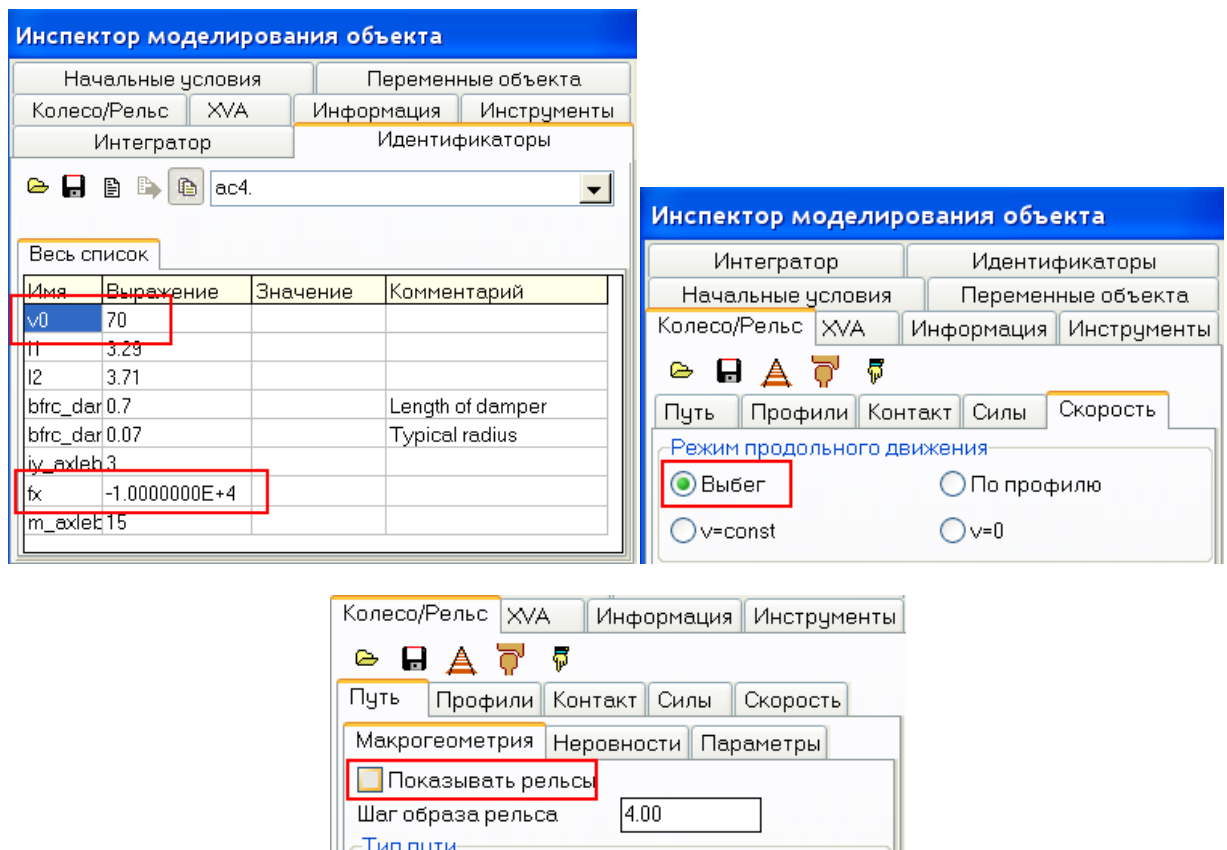


Рис. 8.293. Значение начальной скорости и тормозной силы (слева); режим выбега продольного движения (слева); выключение отображения рельсов

Запустив процесс моделирования можно наблюдать большие поперечные колебания КП, соответствующие автоколебаниям КП при скоростях выше критической. Если они не наблюдаются, то следует увеличить начальную скорость.

Следует дождаться уменьшения колебаний, что соответствует переходу в область устойчивости. Критическая скорость может быть приближенно оценена по границе между автоколебаниями и устойчивым движением.

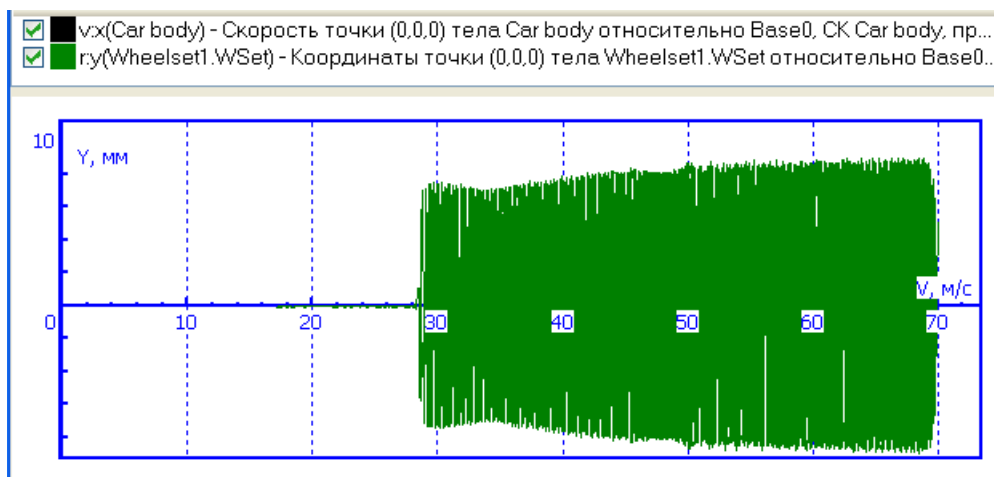


Рис. 8.294. Зависимость поперечных колебаний первой КП от скорости продольного движения

В качестве примера на рис. 8.294 приведен график зависимости колебаний КП в зависимости от продольной скорости при определении критической скорости автомотрисы АС4. Модель автомотрисы доступна пользователю по пути

[{Данные УМ}\Samples\Rail\\_Vehicles\AC4](#)

Из рисунка следует, что критическая скорость автомотрисы примерно 29 м/с. Этот результат незначительно изменяется при использовании различных методов расчета сил крива в контакте колеса с рельсом.

Приведем также результат определения критической скорости при выключенных вертикальных неровностях: примерно 42 м/с, рис. 8.295. Это ошибочное значение. Разница возникла потому, что в автомотрисе применяются фрикционные гасители, которые должны «работать» на всем интервале расчета критической скорости. В первом результате это достигается благодаря вертикальным неровностям. Во втором случае гасители переходят в режим сцепления при достаточно высокой скорости, и мы получаем совсем другой экипаж и другую критическую скорость.

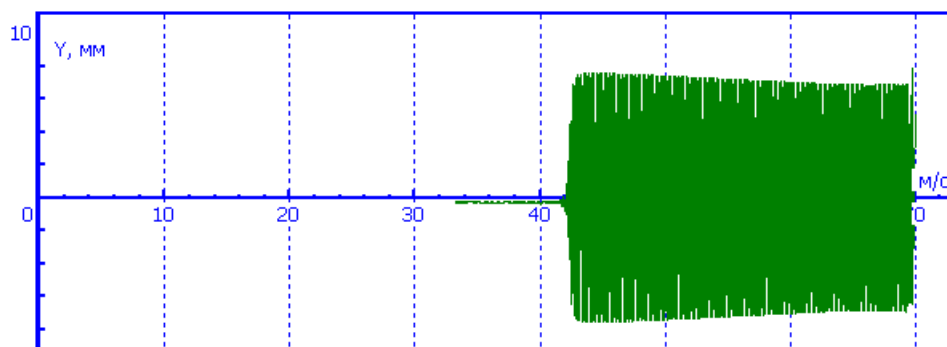


Рис. 8.295. Определение критической скорости при отключенных вертикальных неровностях

## 8.7.2. Оценка критической скорости с помощью многовариантного расчета

Данный раздел предполагает наличие модуля **UM Experiments** в конфигурации UM, рис. 8.285.

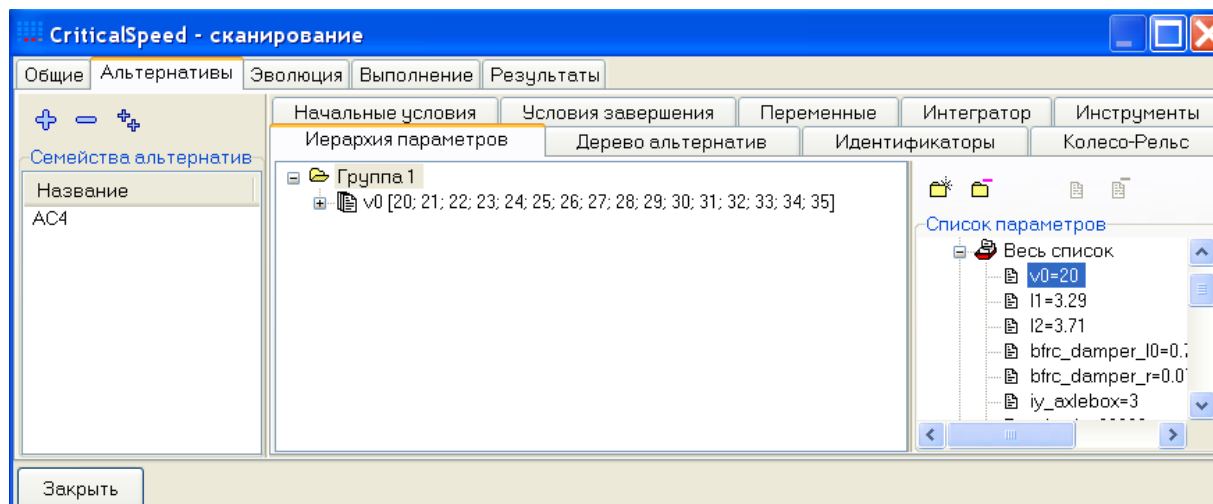



Рис. 8.296. Список скоростей для расчета критической скорости

Последовательность действий при расчете критической скорости с помощью многовариантного расчета.

1. Создается новый многовариантный расчет с помощью команды меню **Расширенный анализ | Сканирование: новый проект...**
2. В проекте с помощью кнопки  загружается единственная альтернатива: модель РЭ, рис. 8.296.
3. Создается список скоростей, начинающийся в области устойчивости и заканчивающийся заведомо за пределами критической скорости. Для этого следует
  - выбрать идентификатор скорости **v0** в списке скоростей и щелкнуть на нем, рис. 8.296;
  - задать список скоростей в появившемся окне с некоторым шагом, например, 1 м/с.

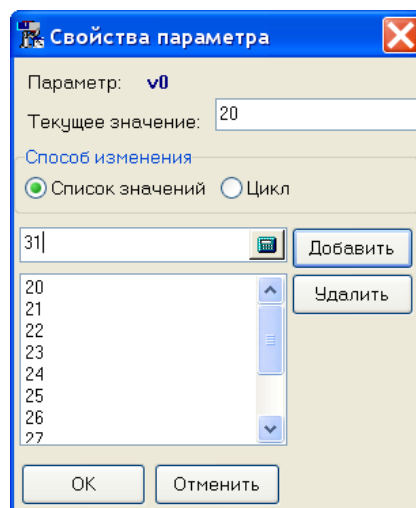


Рис. 8.297. Задание списка скоростей

4. На вкладке **Альтернативы** | **Колесо/Рельс** | **Путь** | **Неровности** следует задать детерминированные неровности, рис. 8.288. Назначить колесам и рельсам нужные профили и установить другие параметры (ширина колеи, подуклонка). Назначить необходимые значения идентификаторам.

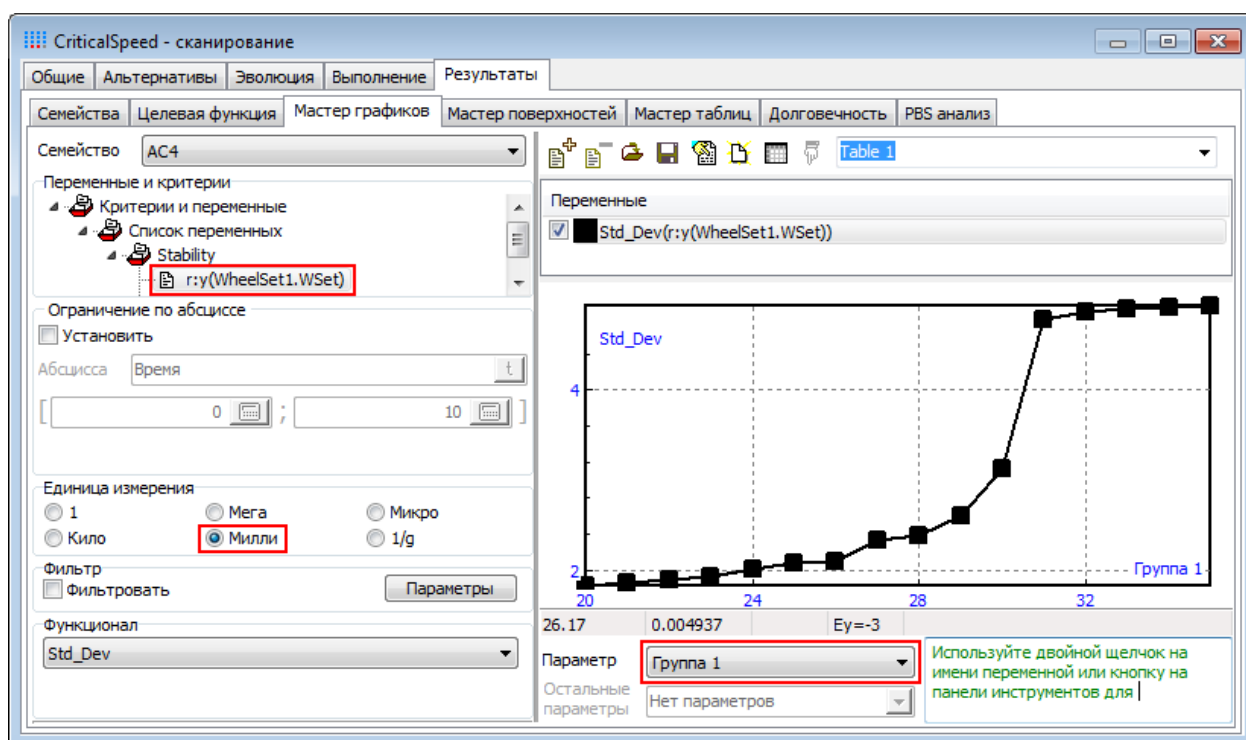


Рис. 8.298. Обработка результатов

5. На вкладке **Альтернативы** | **Переменные** с помощью мастера переменных добавить переменную, соответствующую поперечному смещению первой колесной пары, рис. 8.292.
6. На вкладке **Выполнение** запустить расчет. Дождаться его окончания.
7. На вкладке **Результаты** | **Мастер графиков** получить зависимость среднеквадратического отклонения поперечного смещения первой КП от скорости, рис. 8.298:

- назначить **Группа 1** в списке **Параметр**;
- выбрать единицу измерения результата **Милли**;
- дважды щелкнуть на переменной **gy**;
- проанализировать результаты в полученном графике; критическая скорость оценивается по росту СКО.

В нашем случае критическая скорость лежит в интервале от 30 до 31 м/с, что близко к результату, полученному с помощью метода постепенного снижения скорости.

## 8.8. Список литературы

- [1] К. Б. Никольский Л.Н., Амортизаторы удара подвижного состава, М.: Машиностроение, 1986.
- [2] E. Jie, J.Y. Kim, D.H. Hwang, J.H. Lee, K.J. Kim, J.C. Kim, An Experimental Study of Squeal Noise Characteristics for Railways using a Scale Model Test Rig // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Stirlingshire, 2016.– Paper 231.
- [3] Амелин С.В., Дановский Л.М., Путь и путевое хозяйство. – М.:«Транспорт», 1972.- 216с.
- [4] Ушкалов В.Ф., Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств, АН УССР. Ин-т техн. механики.- Киев: Наук. думка, 1989.-240с.
- [5] Минов Д.К., Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. - М: Транспорт, 1965. - 268 с.
- [6] Меншутин Н.Н., Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях// Тр. ВНИИЖТ, 1960, вып. 188, с. 113-132.
- [7] Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями /Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; Под ред. Н.А. Ротанова - М.: Транспорт, 1991. - 336 с.
- [8] Kalker J.J. and Piotrowski J., Some New Results in Rolling Contact, Vehicle System Dynamics, 18 (1989).
- [9] D. Y. Pogorelov, Simulation of rail vehicle dynamics with universal mechanism software. In: A. Sladkowski (ed.) Rail vehicle dynamics and associated problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005, pp. 13-58.
- [10] J. Piotrowski , W. Kik, A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations // Vehicle System Dynamics. – 2008. – V.46(1-2) – P.27-48.
- [11] Kalker J.J., Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Dordrecht; Boston; London: Kluwer academic publishers, 1990. – 314 p.
- [12] Polach O., Creep forces in simulation of traction vehicles running on adhesion limit // Wear 258 (2005) pp. 992-1000.
- [13] W. Zhai, Vehicle-Track Coupled Dynamics. Theory and Applications, Science Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020.
- [14] V. Quarz, Die Generierung von Fahrwegstorungen fur vorgegebene Spektraldichten mit Hilfe orthogonaler Funktionen, Dresden: Universitaet Dresden, 2004.
- [15] ERRI B176/DT 290: B176/3 Benchmark Problem, Results and Assessment. Technical report, European Rail Research Institute, 1993.
- [16] Предварительный национальный стандарт Российской федерации. Вагоны грузовые.

Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. ПНСТ 511-2020.

- [17] Pieringer A., Kropp W., Nielsen J.C.O, The influence of contact modelling on simulated wheel/rail interaction due to wheel flats // Wear – 2014. – V.314(1-2) – P.273-281.
- [18] Nadal, M.J., "Theorie de la stabilite des Locomotives, part 2, Mouvement de Lacet", Annales des Mines, Vol.10, 1896, p.232.
- [19] Weinstock H., "Wheel Climb Derailment Criteria for Evaluation of Rail Vehicle Safety" Paper no.84-WA/RT-1, Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, November.
- [20] Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (не-самоходных). ГосНИИВ-ВНИИЖ, М.: 1996г.
- [21] ОСТ 24.050.16-85 Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода.
- [22] ГОСТ Р 55513-2013 Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам.
- [23] Памятка № Р 519 Способ определения плавности хода пассажирских вагонов. Организация сотрудничества железных дорог..
- [24] UIC 513R. Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in Relation to Vibration in Railway Vehicle, International Union of Railways, 1994.
- [25] Гарг В.К., Дуккипати Р.В., Динамика подвижного состава: Пер. с англ. / Под ред. Н.А. Панькина. – М.: Транспорт, 1988, 391 с.
- [26] Завертальюк А.В., Черкашин Ю.М., Погорелов Д.Ю., Симонов В.А., Яковлева Е.В., Технология моделирования условий схода подвижного состава (с применением программного комплекса «Универсальный механизм»). Шифр работы: 19.5.018.Н. М.:ОАО РЖД, ОАО ВНИИЖ. 2009.
- [27] Стандарт ОАО "РЖД", Услуги на железнодорожном транспорте. Метод оценки влияния ускорений на комфорт пассажиров в поездах. СТО РЖД 03.005-2018.
- [28] DIN EN 12299-2009 Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation
- [29] ГОСТ 34939-2023 Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам
- [30] ГОСТ 35088-2024 Вагоны пассажирские, локомотивы и моторный подвижной состав. Метод определения плавности хода