



# Манчестерские тесты для моделирования железнодорожных экипажей

---

Руководство пользователя

2010

Манчестерские тестовые примеры разработаны в 1998 г. с целью предоставить потенциальным пользователям возможность выбора подходящего программного обеспечения для исследования динамики рельсовых экипажей. В настоящее время Манчестерский тест является одним из основных в области моделирования динамики рельсовых экипажей. Тестовые расчеты выполнены программами ADAMS/Rail, MEDYNA, GENSYS, NUCARS, SIMPACK и VAMPIRE и опубликованы в литературе. Данный раздел содержит описание моделей UM, построенных в соответствии Манчестерскими тестами, а также результаты моделирования.

**Оглавление**

**10. МАНЧЕСТЕРСКИЕ ТЕСТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ..... 10-3**

**10.1. Общая информация о Манчестерских тестах..... 10-3**

**10.2. УМ модели тестовых экипажей..... 10-4**

10.2.1. Модель экипажа 1..... 10-4

10.2.2. Модель экипажа 2..... 10-6

10.2.3. Моделирования контактного взаимодействия колес с рельсами..... 10-7

10.2.4. Варианты путевой структуры..... 10-7

10.2.4.1. Тип пути 1 ..... 10-7

10.2.4.2. Тип пути 2 ..... 10-8

10.2.4.3. Тип пути 3 ..... 10-8

10.2.4.4. Тип пути 4 ..... 10-8

**10.3. Процессорное время моделирования..... 10-10**

**10.4. Результаты моделирования экипажа 1 ..... 10-11**

10.4.1. Частоты и собственные значения ..... 10-11

10.4.1.1. Результаты..... 10-11

10.4.1.2. Указания пользователю..... 10-13

10.4.2. Тип пути 1 ..... 10-14

10.4.2.1. Табличные результаты ..... 10-14

10.4.2.2. Графические результаты ..... 10-17

10.4.2.3. Указания пользователю..... 10-22

10.4.3. Тип пути 2..... 10-25

10.4.3.1. Графические результаты ..... 10-25

10.4.3.2. Указания пользователю..... 10-28

10.4.4. Тип пути 3..... 10-30

10.4.4.1. Графические результаты ..... 10-30

10.4.4.2. Указания пользователю..... 10-33

10.4.5. Сравнение графических результатов УМ с результатами других участников теста ..... 10-33

**10.5. Результаты моделирования экипажа 2 ..... 10-35**

10.5.1. Собственные частоты ..... 10-35

10.5.2. Тип пути 2..... 10-35

10.5.3. Тип пути 3..... 10-38

10.5.4. Тип пути 4..... 10-40

## 10. Манчестерские тесты для моделирования рельсовых экипажей

### 10.1. Общая информация о Манчестерских тестах

Манчестерские тестовые примеры разработаны в 1998 г. с целью предоставить потенциальным пользователям возможность выбора подходящего программного обеспечения для исследования динамики рельсовых экипажей.

Тесты содержат два примера рельсовых экипажей:

Экипаж 1 – упрощенная модель пассажирского вагона;

Экипаж 2 – модель двухосного грузового вагона с зависимым от нагрузки фрикционным демпфированием.

В настоящее время Манчестерский тест является одним из основных в области моделирования динамики рельсовых экипажей. Тестовые расчеты выполнены программами ADAMS/Rail, MEDYNA, GENYSYS, NUCARS, SIMPACK и VAMPIRE и опубликованы в монографии

Iwnicki, Simon D. *The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation* / ed. by S. Iwnicki. - Lisse: Swets & Zeitlinger, 1999. - 199 S.

Данный раздел содержит описание моделей UM, построенных в соответствии Манчестерскими тестами, а также результаты тестирования.

Модели Манчестерских тестов включены в качестве демонстрационных примеров и доступны пользователю для самостоятельного анализа. Пути к моделям:

{um\_root}\samples\Rail vehicles\Manchester Benchmarks\Vehicle1;

{um\_root}\samples\Rail vehicles\Manchester Benchmarks\Vehicle2.

В данной главе руководства пользователя приведены не только результаты тестов программы UM, но и описания моделей, а также указания для пользователя, каким образом можно самостоятельно получить эти результаты.

## 10.2. UM модели тестовых экипажей

### 10.2.1. Модель экипажа 1



Рис. 10.1. Общий вид модели пассажирского вагона

Модель пассажирского вагона, входящего в Манчестерский тест (рис.10.1), разработана с использованием метода подсистем. Дерево включенных подсистем имеет три уровня (рис. 10.2). Модель экипажа включает две подсистемы – тележки (Bogie1,2, рис.10.3), каждая из которых, в свою очередь, включает по две стандартные подсистемы – колесные пары (Wheelset 1,2,3,4).

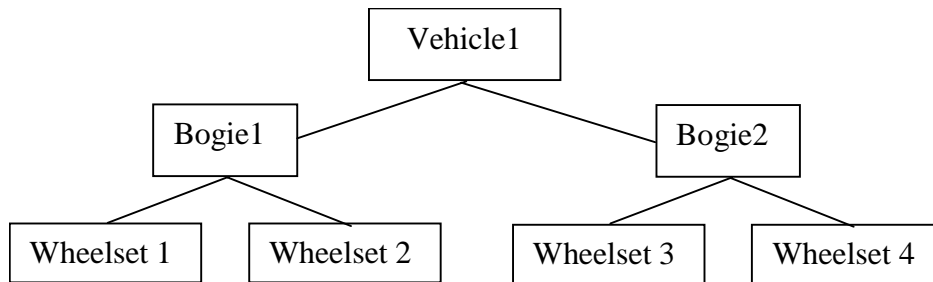


Рис. 10.2. Иерархическая структура модели вагона

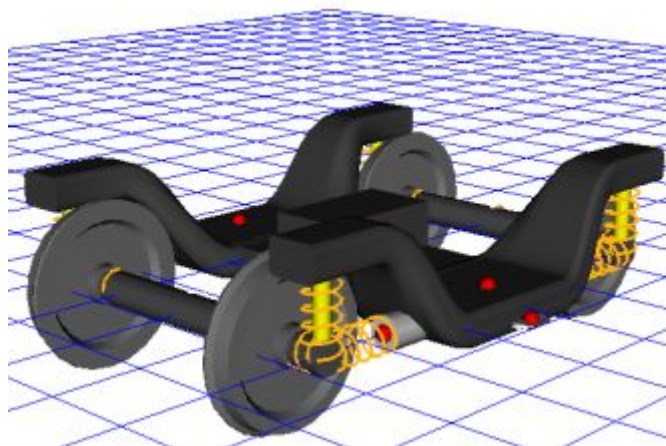


Рис. 10.3. Подсистема - тележка

Модели элементов подвески описаны в табл.1. Силовые элементы полностью параметризованы, что позволяет исследовать зависимость свойств экипажа от численных значений параметров силовых элементов.

Таблица 1

Модели силовых элементов

	Тип силового элемента	Имя	Комментарий
Первая ступень (элементы описаны в подсистемах - тележках)			
Вертикальная жесткость	Биполярный, линейный	Spring1Z_1L, Spring1Z_1R Spring1Z_2L, Spring1Z_2R	При нулевых значениях координат силы принимают стационарное значение
Продольная жесткость	Биполярный, выражение	Spring1X_1L, Spring1X_1R Spring1X_2L, Spring1X_2R	При нулевых значениях координат силы равны нулю.
Поперечная жесткость		Spring1Y_1L, Spring1Y_1R Spring1Y_2L, Spring1Y_2R	Элементы включают параллельное демпфирование
Вертикальные гасители	Биполярный, упруго-вязкий	Damper1Z_1L, Damper1Z_1R Damper1Z_2L, Damper1Z_2R	Последовательное соединение линейного демпфирования с линейной упругостью
Вторая ступень (элементы описаны в головном объекте)			
Пружины подвески	Обобщенный линейный силовой элемент	Spring1Z_1L, Spring1Z_1R Spring1Z_2L, Spring1Z_2R	Задается недиагональной матрицей жесткости. При нулевых значениях координат силы принимает стационарное значение
Продольный торсион		Roll bar 1, Roll bar 2	Задаёт упругую связь кузова с рамами тележек при относительном кручении вокруг продольной оси
Вертикальные гасители	Биполярный, упруго-вязкий	Damper2Z_1L, Damper2Z_1R Damper2Z_2L, Damper2Z_2R	Последовательное соединение линейного демпфирования с линейной упругостью
Поперечные гасители		Damper2Y_1L, Damper2Y_1R Damper2Y_2L, Damper2Y_2R	
Продольные тяги	Биполярный, выражение	Traction rod 1, Traction rod 1	Элементы включают параллельное демпфирование
Упор поперечного отношения тележек	Биполярный, набор точек	Bumpstop1, Bumpstop2	
Регулятор скорости	Сила общего типа	Traction force	Пропорциональный регулятор, поддерживающий постоянную скорость. Сила приложена на уровне автосцепки. Рассчитывается путем программирования в файле управления

### 10.2.2. Модель экипажа 2

На рис.10.1 представлена модель грузового двухосного вагона, входящего в Манчестерский тест. Единственной сложностью этой очень простой модели является учет фрикционных гасителей, зависящих от вертикальной нагрузки и работающих в вертикальной плоскости, перпендикулярной продольной оси. Трение является неразделенным, т.е. его нельзя представить в виде двух независимых фрикционных элементов (как это, например, сделано в соответствующих моделях, представленных разработчиками программы ADAMS/Rail), потому что трение в поперечном направлении зависит от трения по вертикали и наоборот. Так может быть простейшим путем учтены, например, свойства фрикционного клина.

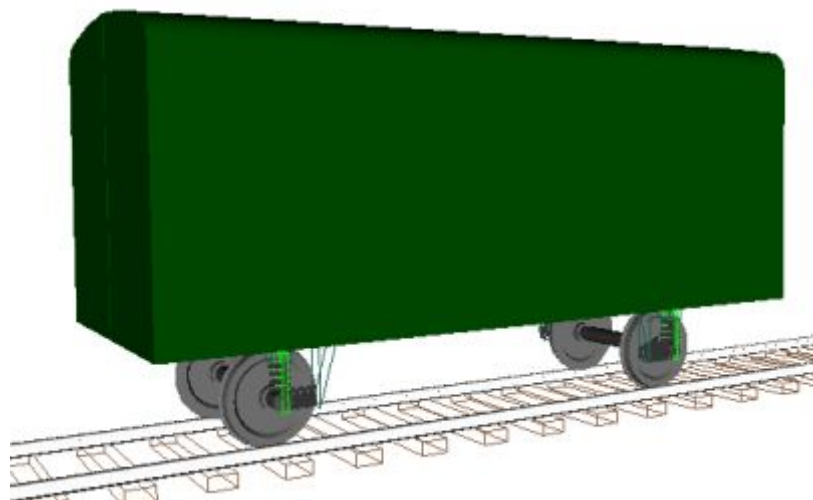


Рис. 10.4. Общий вид модели грузового вагона

Поскольку в УМ моделирование клиновой системы грузового вагона основано на уточненной модели самого клина и его геометрии, в программе отсутствует силовой элемент, специально предназначенный для моделирования взаимодействия описанного типа. Вместе с тем, строгое описание фрикционного взаимодействия данного типа возможно на базе пары силовых элементов типа “комбинированное трение”. В качестве осевой силы (аналог нормальной реакции для трения) для каждого из этих двух силовых элементов рассматривается половина вертикальной нагрузки, передаваемой со стороны вертикальной пружины через файл управления. Осевая нагрузка прикладывается в продольном направлении и имеет противоположные знаки, поэтому суммарная осевая силы для пары фрикционных элементов равна нулю, а суммарная силы трения точно соответствует модели, предложенной в тесте.

Модели элементов подвески описаны в табл.2. Силовые элементы полностью параметризованы, что позволяет исследовать зависимость свойств экипажа от численных значений параметров силовых элементов.

Таблица 2

Модели силовых элементов

	Тип силового элемента	Имя	Комментарий
Вертикальная жесткость	Биполярный, линейный	Vert1bFrc, Vert2bFrc, Vert3bFrc, Vert4bFrc	При нулевых значениях координат силы принимает стационарное значение
Продольная жесткость		Long1bFrc, Long2bFrc, Long3bFrc, Long4bFrc	При нулевых значениях координат силы равны нулю.
Поперечная жесткость		Later1bFrc, Later 2bFrc, Later 3bFrc, Later 4bFrc	

Фрикционные гасители	Спецсила Комбинированное трение	sFrc1_1- sFrc1_2, sFrc2_2, sFrc3_1- sFrc3_2, sFrc4_1- sFrc4_2	Попарно принимают по половине от 0.35 соответствующей вертикальной нагрузки
Регулятор скорости	Сила общего типа	Traction force	Пропорциональный регулятор, поддерживающий предписанный закон изменения скорости. Сила приложена на уровне автосцепки. Рассчитывается путем программирования в файле управления

### 10.2.3. Моделирования контактного взаимодействия колес с рельсами

Манчестерские тесты предоставляют в распоряжение файлы с поточечно заданными профилями колес и рельсов. На рис.10.5 представлены данные профили после преобразования к системе координат, принятой в УМ.

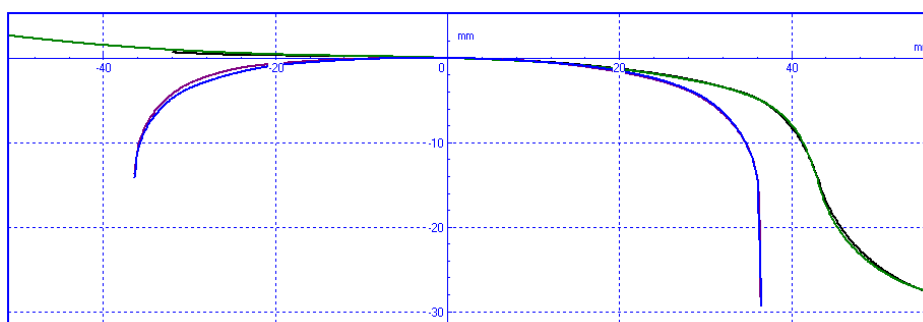


Рис. 10.5. Профили колес и рельсов

Профили допускают два типа контакта: одноточечный (на поверхности катания) и двухточечный (одновременно - на поверхности катания и гребня с боковой поверхностью рельса). Для расчета сил крива в точках контакта используется модифицированная процедура FASTSIM (полуаналитический алгоритм FASTSIMA). Модификация известного алгоритма заключается в том, что реализованы аналитические решения дифференциальных уравнений касательных напряжений в отдельной полосе пятна контакта (точные в области сцепления и приближенные по спину в области скольжения). Таким образом, в пределах пятна контакта суммирование производится лишь по числу полос, что позволяет ускорить процесс расчета сил крива. Например, при десяти элементах в полосе полуаналитический алгоритм примерно в 1,5 раза быстрее классического, а при 20 элементах в 2,6 раза.

Значение коэффициента трения в контакте колесо – рельс 0,4.

### 10.2.4. Варианты путевой структуры

С каждой из моделей по условиям теста следует выполнить несколько расчетов, отличающихся макрогеометрией путевой структурой, неровностями и скоростями движения. Всего предлагается четыре варианта путевой структуры.

#### 10.2.4.1. Тип пути 1

Вариант соответствует движению в правой кривой пассажирского вагона с постоянной скоростью 4,4 м/с. Параметры кривой:

- прямая до заезда в кривую – 50 м;
- переходная кривая – 30 м;
- кривая постоянного радиуса R = 150 м длиной 60 м;
- переходная кривая – 30 м.

В конце переходной кривой предусмотрена просадка на правом (внутреннем) рельсе глубиной 20 мм, рассматривая в УМ в качестве неровности (рис.10.6).

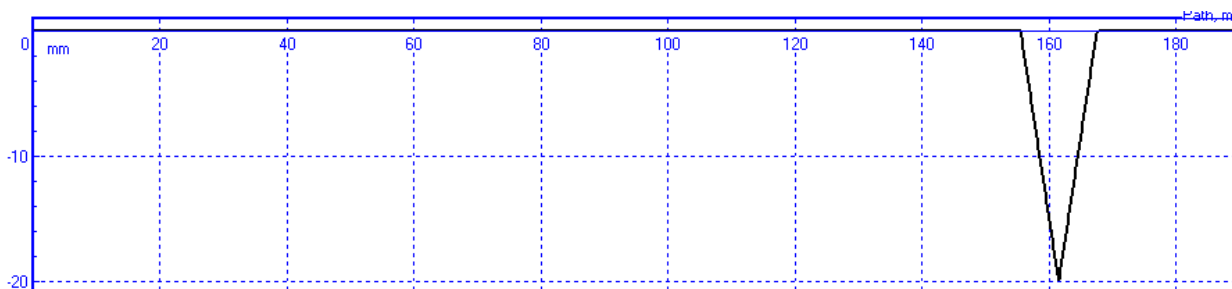


Рис. 10.6. Неровность для внутреннего рельса

#### 10.2.4.2. Тип пути 2

Движение обоих экипажей в прямой следующей структуры:

- прямая ровная 50 м;
- смещение рельсов горизонтально вправо на 5 мм на участке пути длиной 0,1 м
- далее – ровная прямая.

Скорости экипажей: 45 м/с (экипаж 1) и 22,5 м/с (экипаж 2).

#### 10.2.4.3. Тип пути 3

Движение обоих экипажей в прямой с синусоидальными горизонтальными неровностями, одинаковыми для левого и правого рельсов (рис. 10.7) с уширением колеи 25,4 мм (в УМ задается половина уширения, т.е. 12,7 мм). Скорость экипажей 22,5 м/с.

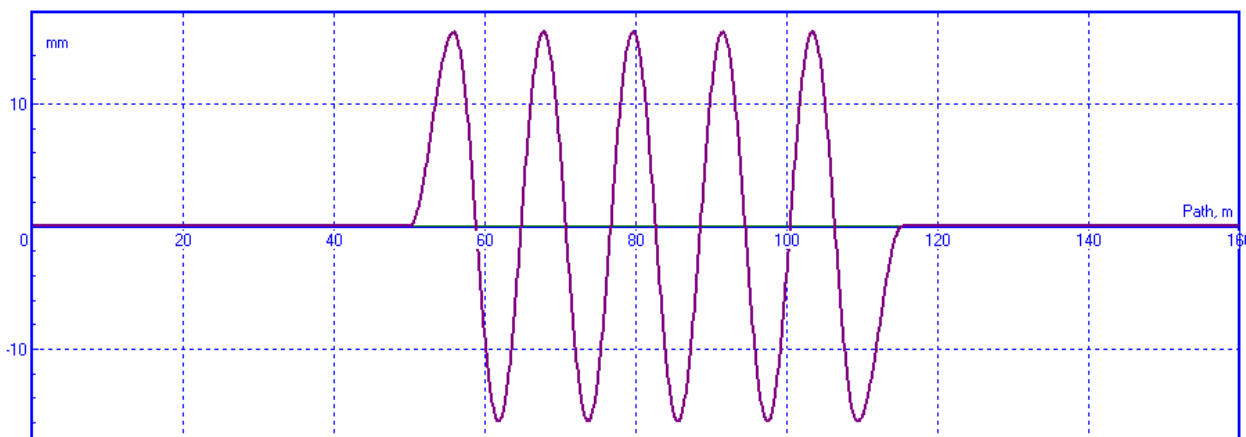


Рис. 10.7. Горизонтальные неровности рельсов

#### 10.2.4.4. Тип пути 4

Движение экипажа 2 в прямой с синусоидальными вертикальными неровностями, одинаковыми для левого и правого рельсов амплитуды 10 мм (рис.10.8). Над неровностями скорость экипажа возрастает с 20 до 24 м/с.

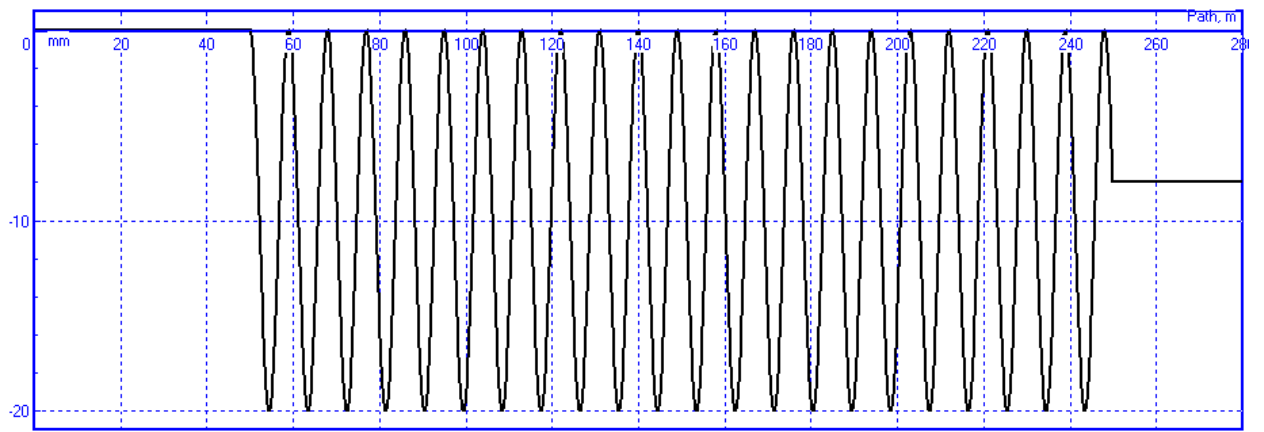


Рис. 10.8. Вертикальные неровности рельсов

### 10.3. Процессорное время моделирования

Таблица 3

Вариант	Время ЦПУ, с		
	UM P4 – 2,4 ГГц	MSC.ADAMS/Rail 12.0 P3 – 500 МГц	SimPack P II – 450 МГц
Экипаж 1			
Тип пути 1	22.5	138.1	90.6
Тип пути 2	0.90	79.3	33.5
Тип пути 3	1.95	233.5	252.0
Экипаж 2			
Тип пути 2	0.8	42.9	17.9
Тип пути 3	1.7	90.2	130.8
Тип пути 4	5.36	171.7	406.2

Как показывают данные о времени ЦПУ, необходимого для проведения расчетов, программа UM по большинству из приведенных тестов значительно быстрее, чем ADAM/Rail 12.0 и SimPack.

## 10.4. Результаты моделирования экипажа 1

### 10.4.1. Частоты и собственные значения

#### 10.4.1.1. Результаты

При расчете собственных частот рельсового экипажа степени свободы колесных пар блокируются автоматически введением дополнительных линейных упругих связей с большими коэффициентами жесткости, поэтому результаты соответствуют степеням свободы кузова и тележек. Одновременно отключаются все неконсервативные элементы (га-сители колебаний, фрикционные элементы и пр.).

Таблица 4

Собственные частоты экипажа (Гц)

Форма колебаний	Собственные частоты (Гц)
Кузов	
Нижняя боковая качка	0.56
Виляние	0.84
Подпрыгивание	1.07
Верхняя боковая качка	1.27
Галопирование	1.28
Подергивание	2.85
Тележки	
Подпрыгивание (в фазе)	7.47
Подпрыгивание (в противофазе)	7.48
Верхняя боковая качка (в противофазе)	9.68
Верхняя боковая качка (в фазе)	9.70
Галопирование (в противофазе)	11.68
Галопирование (в фазе)	11.69
Нижняя боковая качка (в противофазе)	12.64
Нижняя боковая качка (в фазе)	12.64
Виляние (в противофазе)	35.14
Виляние (в фазе)	35.17



Нижняя боковая качка



Виляние



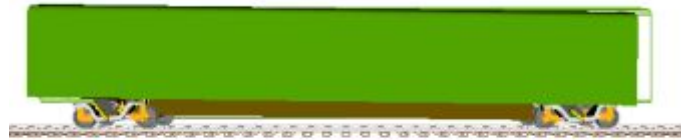
Подпрыгивание



Верхняя боковая качка



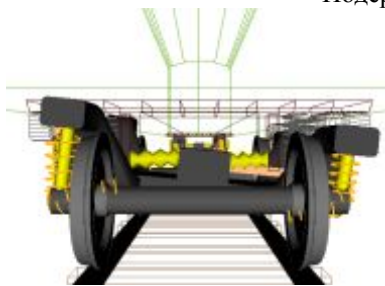
Галопирование



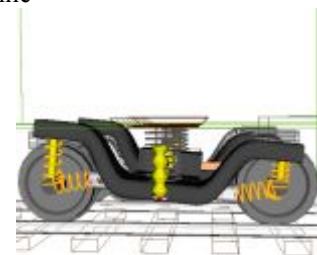
Подергивание



Подпрыгивание



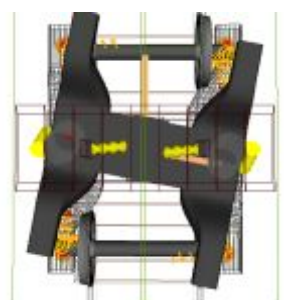
Нижняя боковая качка



Галопирование



Верхняя боковая качка



Виляние

Расчет собственных значений линеаризованных уравнений движения рельсовых экипажей в УМ производится в двух режимах: при заблокированных степенях свободы колесных пар линейными упругими элементами большой жесткости (порядка  $1,0e10$  Н/м) и при освобожденных от дополнительной фиксации колесных парах (точнее, первая колесная пара связана в продольном направлении малой жесткостью).

Расчет собственных значений экипажа 1 и сравнение с результатами других участников тестов приведены в табл.5. В результатах УМ значения через черту соответствуют закрепленным/свободным колесным парам.

Таблица 5

Собственные значения

Форма колебаний	Частота (Гц)			Доля демпфирования от критического (%)		
	УМ	Adams/ Rail	Другие участни- ки	УМ	Adams/ Rail	Другие участни- ки
Кузов						
Нижняя боковая качка	0.58	0.60	0.53÷0.59	21.1	22.8	21.0÷22.0

Виляние	0.73	0.71	0.73÷0.86	53.6	54.6	52.3÷54.6
Подпрыгивание	1.07	1.07	1.07÷1.08	13.5	13.5	13.4÷13.5
Верхняя боковая качка	1.10	1.09	1.10÷1.23	45.4	45.3	41.1÷43.9
Галопирование	1.28/1.29	1.28	1.28÷1.30	15.9/16.1	15.9	15.9÷16.3
Подергивание	2.85/-	2.85	-**)	4.288/-	42.84*)	-
<b>Тележки</b>						
Подергивание (в противофазе)	-/4.22	-**)	4.20÷4.27	-/6.2	-	6.1÷6.2
Подергивание (в фазе)	-/5.11	-	5.13÷5.16	-/7.5	-	7.4÷9.8
Подпрыгивание (в противофазе)	7.51/7.42	7.50	7.33÷7.60	24.6/24.8	24.6	23.9÷24.8
Подпрыгивание (в фазе)	7.53/7.44	7.52	7.35÷7.62	24.1/24.3	24.1	23.5÷24.3
Верхняя боковая качка (в противофазе)	9.92/9.62	9.93	9.25÷9.72	41.4/41.8	41.8	39.6÷41.9
Верхняя боковая качка (в фазе)	9.95/9.66	9.93	9.32÷9.84	41.7/42.0	41.6	39.8÷42.2
Галопирование (в противофазе)	12.0/11.9	-	-	11.2	-	-
Галопирование (в фазе)	12.0/11.9	-	-	11.2	-	-
Нижняя боковая качка (в фазе)	13.1/13.0	-	-	17.7/19.6	-	-
Нижняя боковая качка (в противофазе)	13.1/13.1	-	-	17.2/18.9	-	-
Виляние (в противофазе)	35.1/35.0	-	-	5.3/10.6	-	-
Виляние (в фазе)	35.1/35.0	-	-	5.4/10.6	-	-

\*) Видимо, опечатка. Реальное значение в 10 раз меньше.

\*\*) Часть участников тестирования предоставили частоты подергивания тележек, но не предоставили частоты подергивания кузова, а ADAMS/Rail – наоборот. По-видимому, это определяется способом закрепления модели в продольном направлении. В случае UM частота кузова получена при закреплении колесных пар, а частоты тележек – как при закрепленных (первый вариант), так и при освобожденных колесных парах (точнее, первая колесная пара слабо упруго закреплена в продольном направлении) – второй вариант через косяную черту.

### 10.4.1.2. Указания пользователю

Для самостоятельного получения результатов, приведенных выше, выполните следующие действия.

1. Запустите модель вагона {um\_root}\samples\Rail vehicles\Manchester Benchmarks\Vehicle1 в программе моделирования **UM Simulation**.
2. Прочитайте конфигурацию **Файл | Прочитать конфигурацию | EigenValues** (рис.10.9). Эта операция соответствует чтению полной конфигурации модели: рабочий стол (файл *EigenValues.icf*), файл параметров *EigenValues.par*, файл конфигурации рельсового экипажа *EigenValues.rwc* и начальных условий *EigenValues.xv*.



Рис. 10.9. Чтение полной конфигурации модели

3. Перейдите в режим линейного анализа с помощью команды меню **Анализ | Линейный анализ**.
4. Перейдите на закладку *Частоты* окна *Линейный Анализ* и просмотрите полный список собственных частот модели (рис.10.10). Ряд нулевых значений (шестнадцать) соответствует дифференциальным уравнениям силовых элементов (по-

следовательное соединение пружины с линейным демпфированием, п.10.2.1) . Выделите мышкой одну из частот в списке и щелкните на кнопке **Показать** (рис.10.10), чтобы просмотреть собственную форму для данной частоты в анимационном окне (если нет открытого анимационного окна – откройте его). После этого выделение мышкой другой частоты в списке приведет к автоматической анимации соответствующей собственной формы.

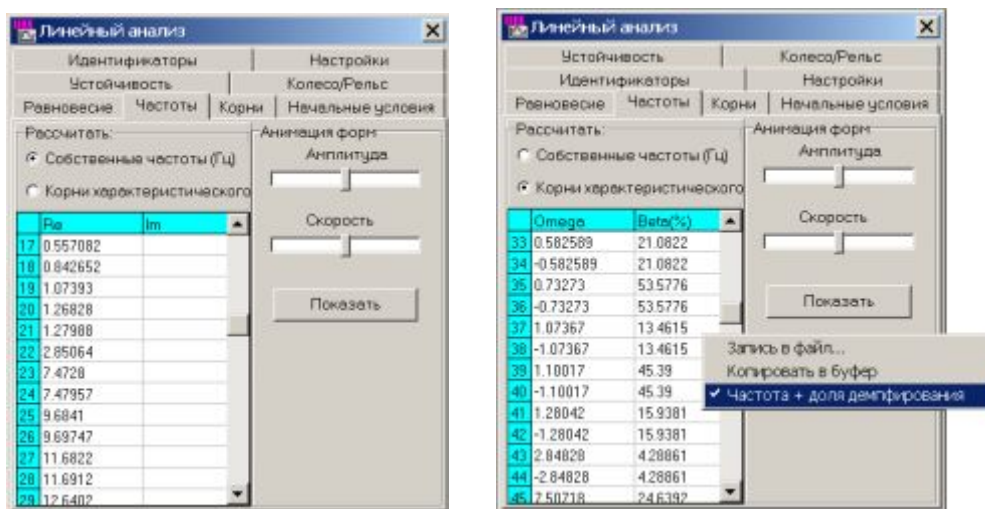


Рис. 10.10. Частоты и собственные значения

- Для расчета собственных значений (с учетом демпфирования) щелкните на опции **Корни характеристического уравнения** (рис.10.10). Появится список собственных значений с указанием действительной и мнимой частей (отсортированы по действительной части). Для того, чтобы получить тот же список, но с указанием частоты и доли демпфирования от критической, вызовите всплывающее меню (для этого надо щелкнуть правой кнопкой мыши в пределах списка) и выберите команду *Частота+доля демпфирования*. В этом случае собственные значения отсортированы по частотам. Анимация собственных векторов производится так же, как и в предыдущем пункте.

### 10.4.2. Тип пути 1

Исследуется движение вагона с постоянной скоростью в кривой с единичной вертикальной просадкой внутреннего рельса в конце кривой (п.10.2.4.1). По условиям тестирования следует получить установившиеся значения большого числа динамических показателей, представленные в п.10.4.2.1, а также графики зависимостей некоторых переменных вдоль пути (п.10.4.2.2).

#### 10.4.2.1. Табличные результаты

В таблицах приведены установившиеся значения кинематических и динамических характеристик движения экипажа в кривой постоянного радиуса, а также сравнение результатов с ADAMS/Rail и другими участниками тестирования.

Таблица 6

Поперечное смещение колесных пар и угол набегания

Переменная Колесная пара	UM	ADAMS/Rail	Другие участники тестирования
Поперечное смещение		мм	
КП1	-6.9	-7.2	-6.53÷-7.81

КП2	7.6	7.24	7.63÷8.04
КП3	-6.9	-7.19	-5.83÷-7.14
КП4	7.4	7.17	7÷7.39
Угол набегания	мрад		
КП1	-15.80	-15.52	-16.06÷-15.74
КП2	0.83	1.076	-0.83÷0.85
КП3	-14.13	-14.15	-14.18÷-13.79
КП4	2.49	2.44	2.42÷2.78

Таблица 7

Суммарные силы для колес

Переменная Колесная пара	UM	ADAMS/Rail	Другие участники тестирования
Продольная сила	кН		
<b>Левое колесо</b>			
КП1	2.08	3.10	2.35÷2.96
КП2	-15.97	-15.68	-16.89÷-15.68
КП3	0.91	1.902	0.877÷3.67
КП4	-17.47	-17.37	-18.39÷-16.80
<b>Правое колесо</b>			
КП1	-3.14	3.5	-3.81÷-3.07
КП2	15.68	-15.29	15.28÷16.56
КП3	-1.72	2.21	-2.29÷1.81
КП4	17.18	-12.76	16.51÷18.05
Поперечная сила			
<b>Левое колесо</b>			
КП1	32.17	-31.15	30.57÷32.67
КП2	1.52	-1.571	1.17÷1.54
КП3	19.86	-18.98	18.69÷20.73
КП4	4.13	-3.28	3.68÷4.24
<b>Правое колесо</b>			
КП1	-23.13	-22.65	-23.21÷-22.05
КП2	-21.86	-21.39	-22.24÷-21.12
КП3	-25.06	-24.6	-25.4÷-24.53
КП4	-10.82	-9.51	-10.19÷-9.86
Вертикальная сила			
<b>Левое колесо</b>			
КП1	-54.35	54.37	-55.42÷-53.74
КП2	-39.88	39.65	-41.05÷-39.74
КП3	-49.34	49.37	-50.89÷-49.11
КП4	-44.29	44.267	-45.33÷-44.08
<b>Правое колесо</b>			
КП1	-55.14	54.975	-55.53÷-54.50
КП2	-68.68	68.939	-69.40÷-63.78
КП3	-59.22	59.204	-59.53÷-57.98
КП4	-64.88	64.936	-65.38÷-63.73

Таблица 8

Контактные углы

Переменная Колесная пара	UM	ADAMS/Rail	Другие участники тестирования
Поверхность катания	мрад		
<b>Левое колесо</b>			
КП1	232	313.7	170.98÷-230.08
КП2	19.3	19.97	19.40÷22.05
КП3	232	315.9	170.23÷225.82
КП4	19.5	19.92	19.09÷21.06

<b>Правое колесо</b>			
КП1	19.7	18.86	-23.88÷-20.7
КП2	197.4	334	-207.71÷-177.8
КП3	20.2	18.94	-23.92÷-20.54
КП4	197.4	331.72	-207.71÷-177.0
<b>Гребень</b>	рад	рад	рад
КП1	1.117	1.12	1.116÷1.464
КП2	1.231	1.10	-1.225÷-1.205
КП3	1.117	1.12	1.109÷-1.125
КП4	1.231	1.10	-1.225÷-1.205

Таблица 9

Крипы и спин

Колесная пара	$\xi$ (e-3)	$\eta$ (e-3)	$\phi$
<b>Левое колесо</b>			
КП1	5.42	15.33	-0.503
КП2	14.37	-0.82	-0.049
КП3	4.20	13.73	-0.503
КП4	12.53	-2.47	-0.050
<b>Правое колесо</b>			
КП1	2.24	15.80	0.037
КП2	-1.65	-0.82	0.416
КП3	1.02	14.15	0.038
КП4	-3.49	-2.46	0.417
<b>Гребень</b>			
КП1(Л)	-12.11	41.32	-1.947
КП2(П)	-22.50	-2.69	2.033
КП3(Л)	-13.34	37.0	-1.950
КП4(П)	-24.38	-8.13	2.037

Таблица 10

Силы крипа

Переменная Колесная пара	UM	ADAMS/Rail	Другие участники тестирования
Продольная сила	кН		
<b>Левое колесо</b>			
КП1	-2.15	-1.55	-2.87÷-2.48
КП2	-15.97	-15.69	-16.89÷-15.68
КП3	-2.57	-1.63	-3.67÷-2.98
КП4	-17.47	-17.35	-18.40÷-16.80
<b>Правое колесо</b>			
КП1	-3.14	3.5	-3.81÷-3.07
КП2	7.80	-8.14	5.77÷7.15
КП3	-1.72	2.21	-2.29÷-1.65
КП4	12.31	-12.71	9.98÷10.84
<b>Гребень</b>			
КП1	4.22	4.65	-19.35÷-16.21
КП2	7.88	-8.83	1.35÷3.68
КП3	3.48	3.47	-13.40÷-10.55
КП4	4.87	-3.51	2.15÷4.11
Поперечная сила			
<b>Левое колесо</b>			
КП1	-6.5	7.34	-7.37÷-6.03
КП2	0.78	-0.80	0.39÷0.77
КП3	-9.11	10.09	-9.66÷-8.63
КП4	3.26	-2.43	2.81÷2.31
<b>Правое колесо</b>			

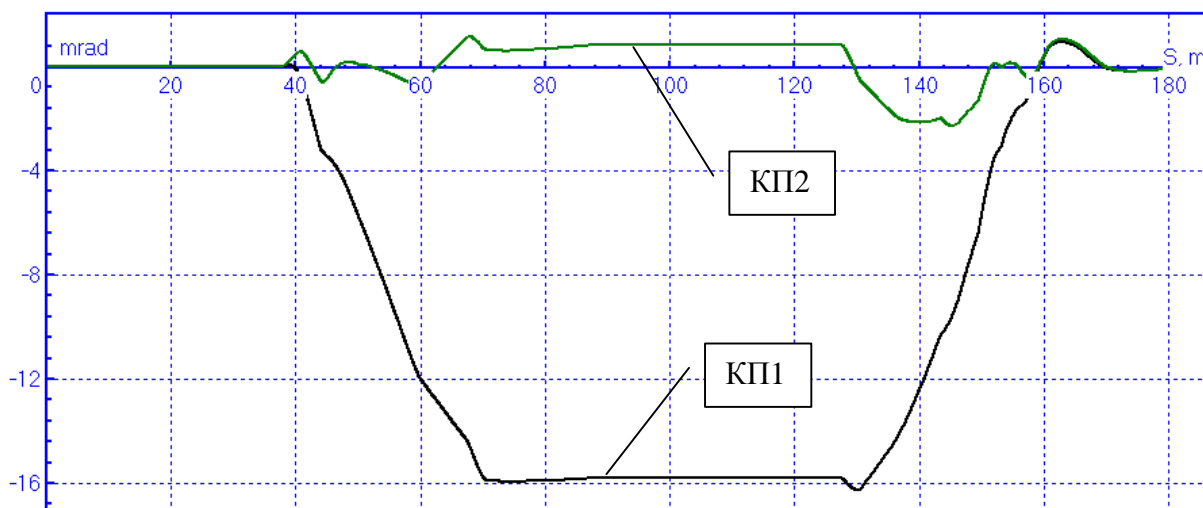
КП1	-22.04	-21.65	-22.05÷-20.93
КП2	8.59	15.39	10.82÷14.13
КП3	-23.86	-23.51	-24.04÷-23.30
КП4	-12.59	13.36	15.60÷17.85
<b>Гребень</b>			
КП1	-17.40	16.67	-19.35÷-16.21
КП2	2.67	3.06	1.35÷3.68
КП3	-11.57	10.43	-13.40÷-10.55
КП4	2.48	1.47	2.15÷4.11

Таблица 11

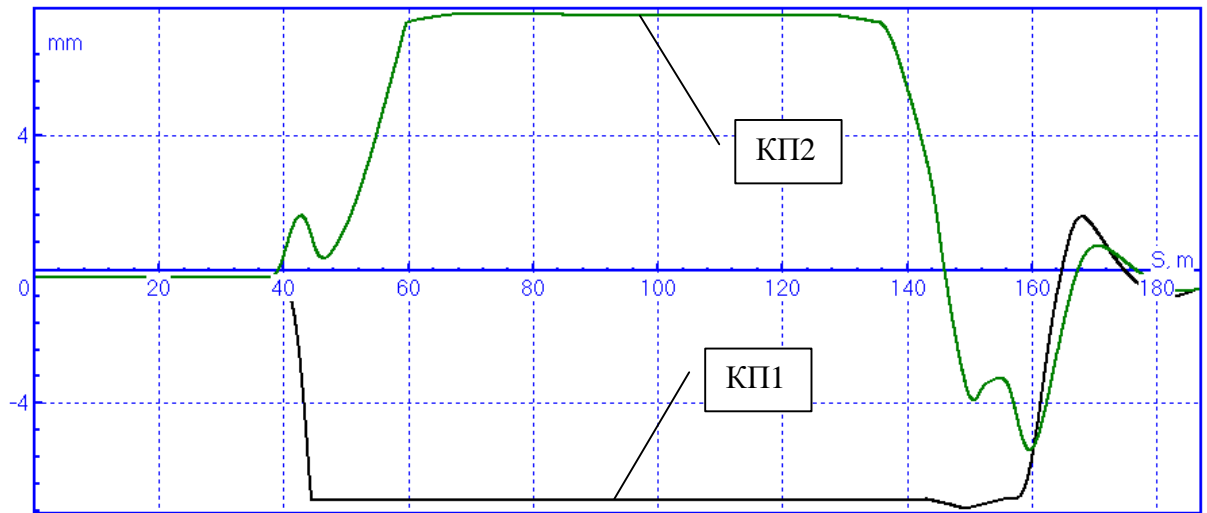
Нормальные силы

Переменная Колесная пара	UM	ADAMS/Rail	Другие участники тестирования
Нормальные силы	кН		
<b>Левое колесо</b>			
КП1	17.10	18.97	-20.09÷-17.01
КП2	39.91	39.67	-41.07÷-39.76
КП3	23.65	25.83	-26.13÷-22.87
КП4	44.37	44.32	-45.41÷-44.11
<b>Правое колесо</b>			
КП1	55.58	55.38	-55.98÷-54.27
КП2	58.66	46.03	-57.62÷-52.33
КП3	59.71	59.64	-60.04÷-58.55
КП4	56.61	47.80	-54.37÷-50.03
<b>Гребень</b>			
КП1	46.95	43.84	-48.75÷-44.52
КП2	20.87	25.33	-28.52÷-24.53
КП3	31.5	27.87	-34.49÷-29.42
КП4	13.68	9.93	-21.21÷-17.54

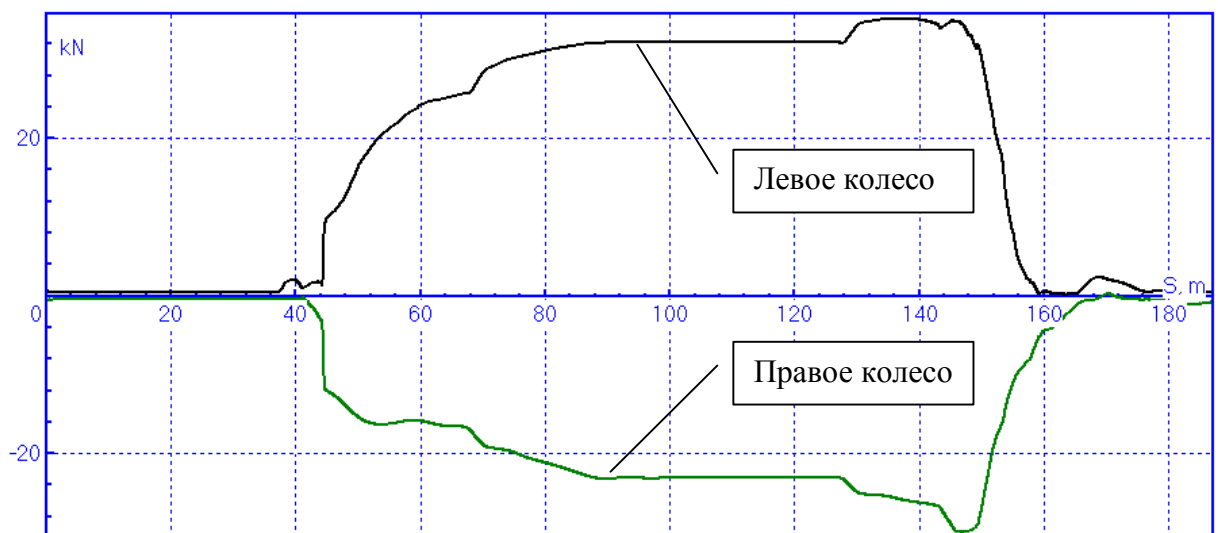
10.4.2.2. Графические результаты



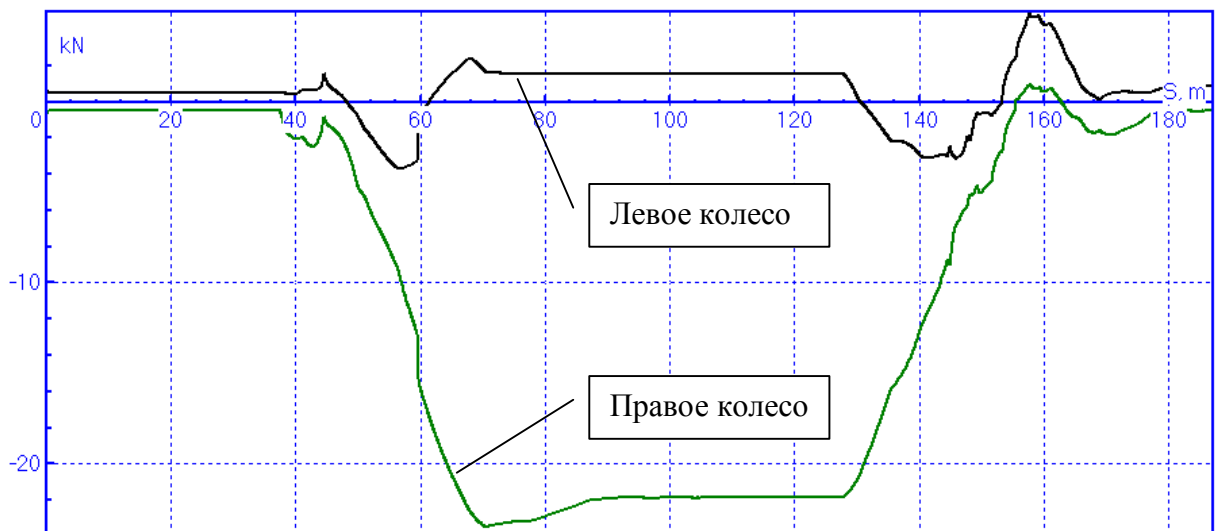
Углы набегания для первой и второй КП



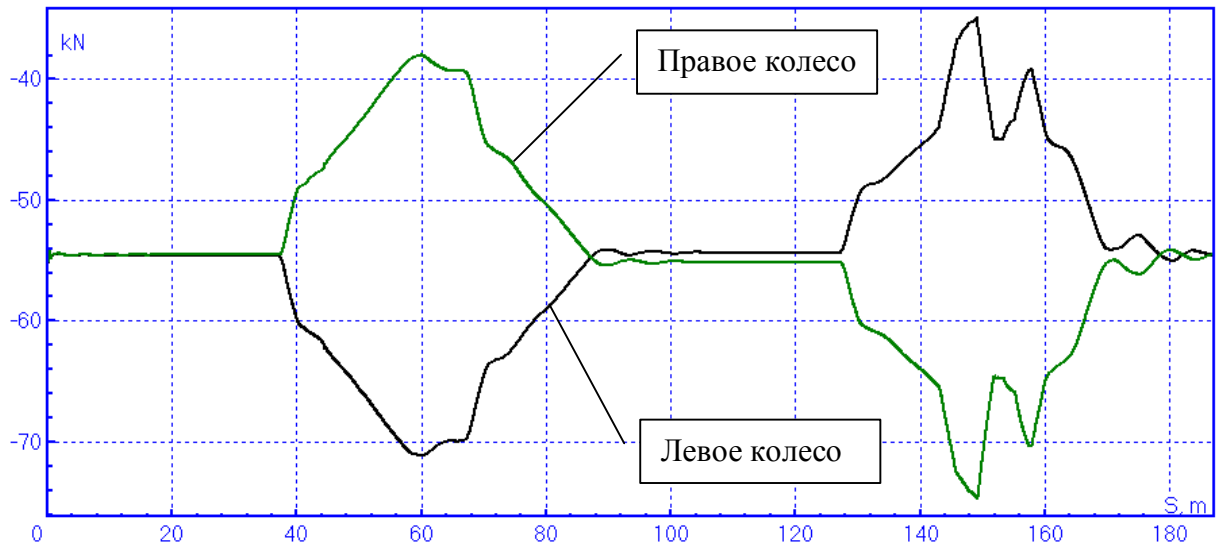
Поперечные смещения левых колес первой и второй КП относительно рельса



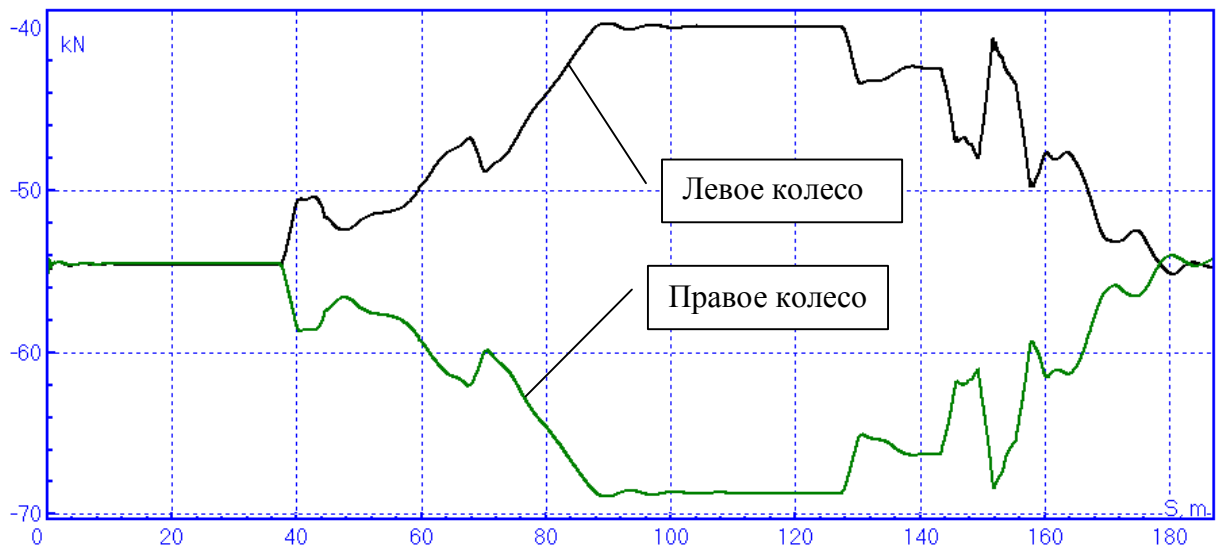
Суммарные поперечные силы для первой КП



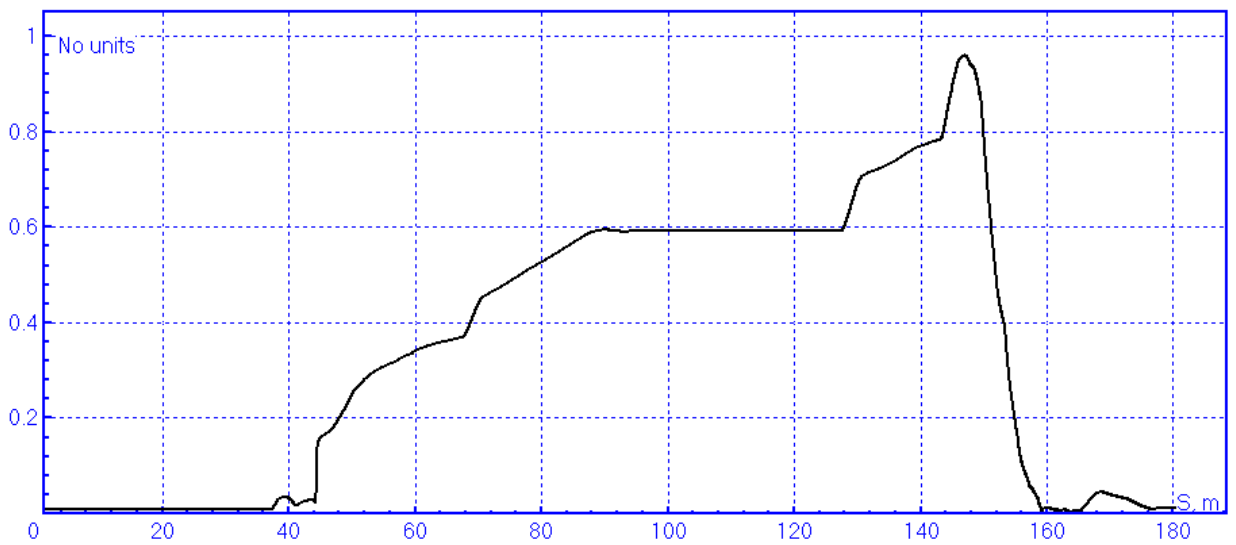
Суммарные поперечные силы для второй КП



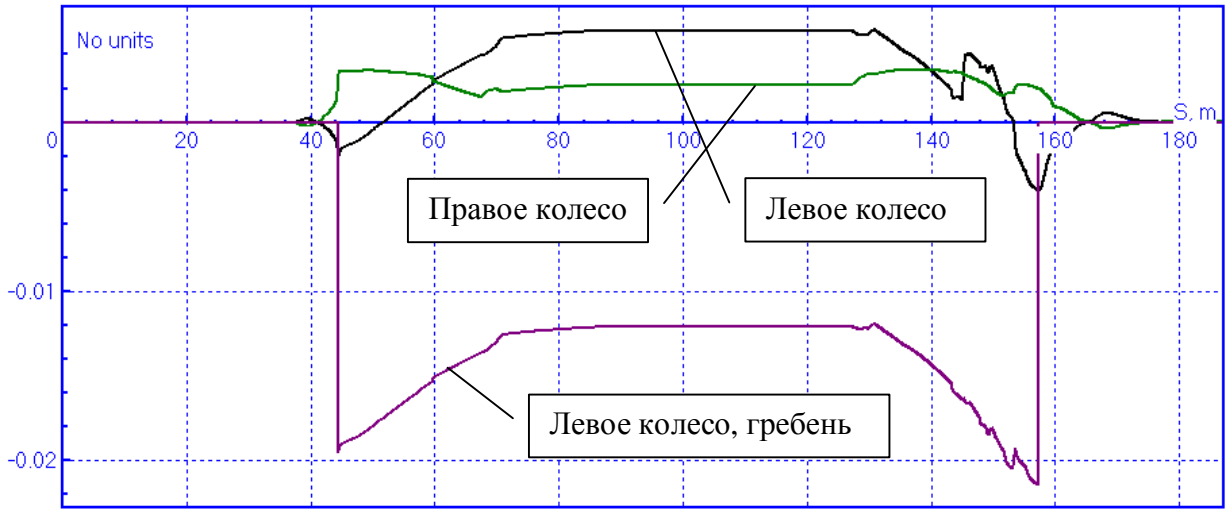
Суммарные вертикальные силы для первой КП



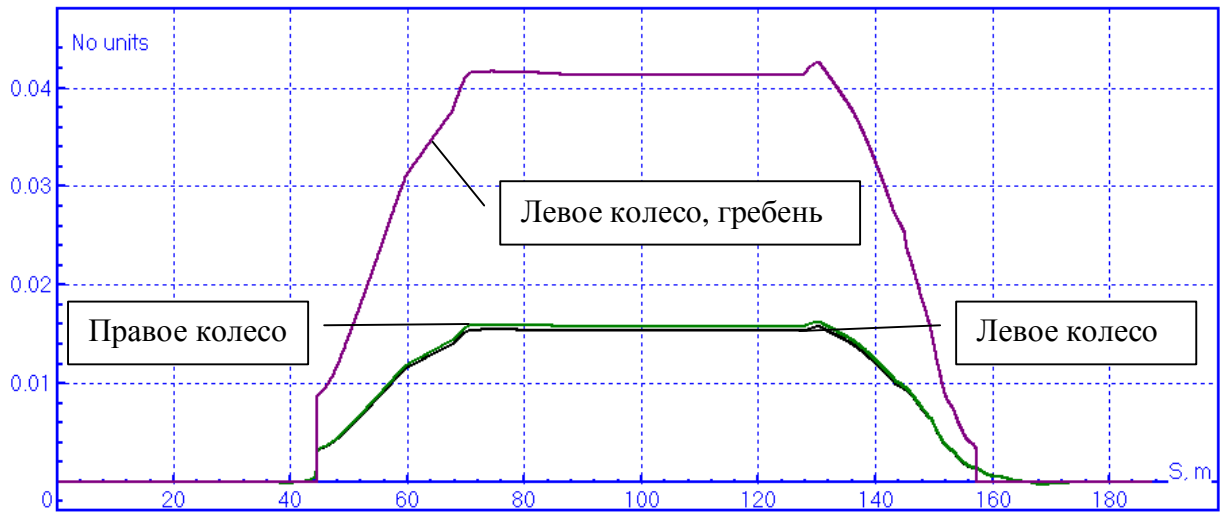
Суммарные вертикальные силы для второй КП



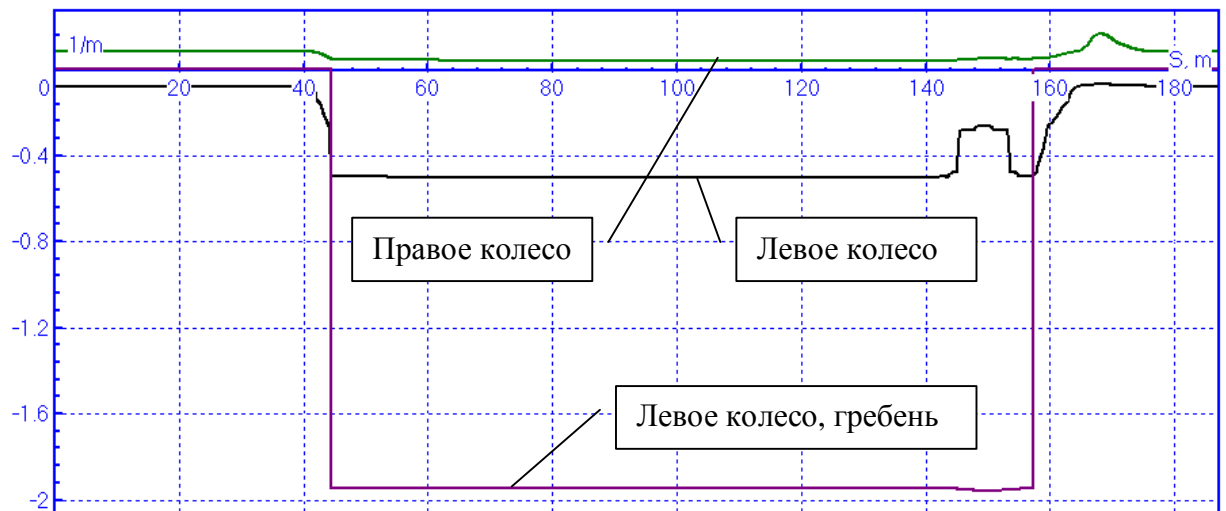
Отношение суммарной поперечной и вертикальной сил для набегающего колеса первой КП (коэффициент безопасности)



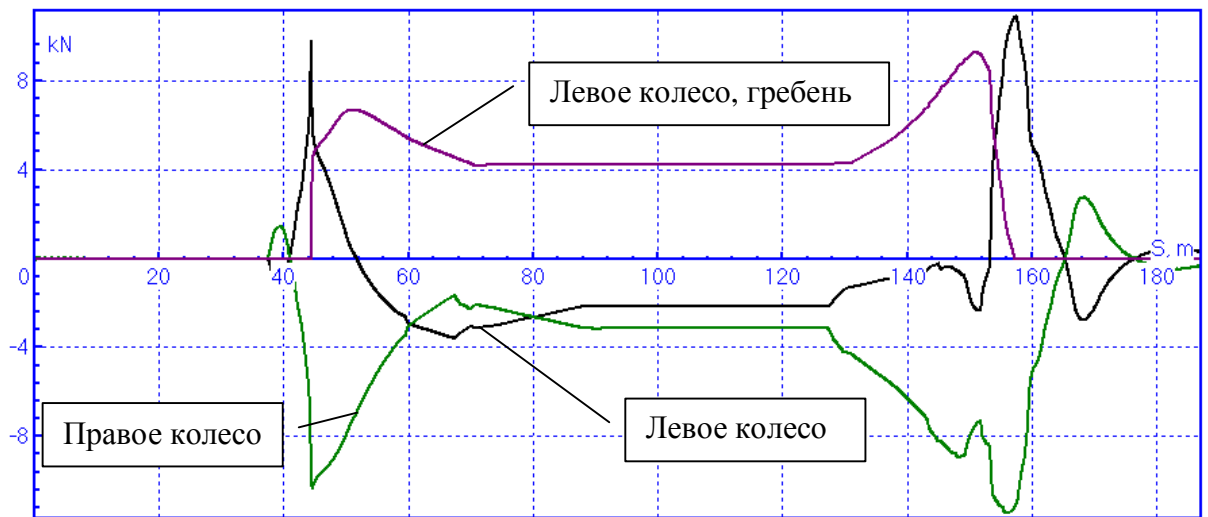
Продольные крены для первой КП



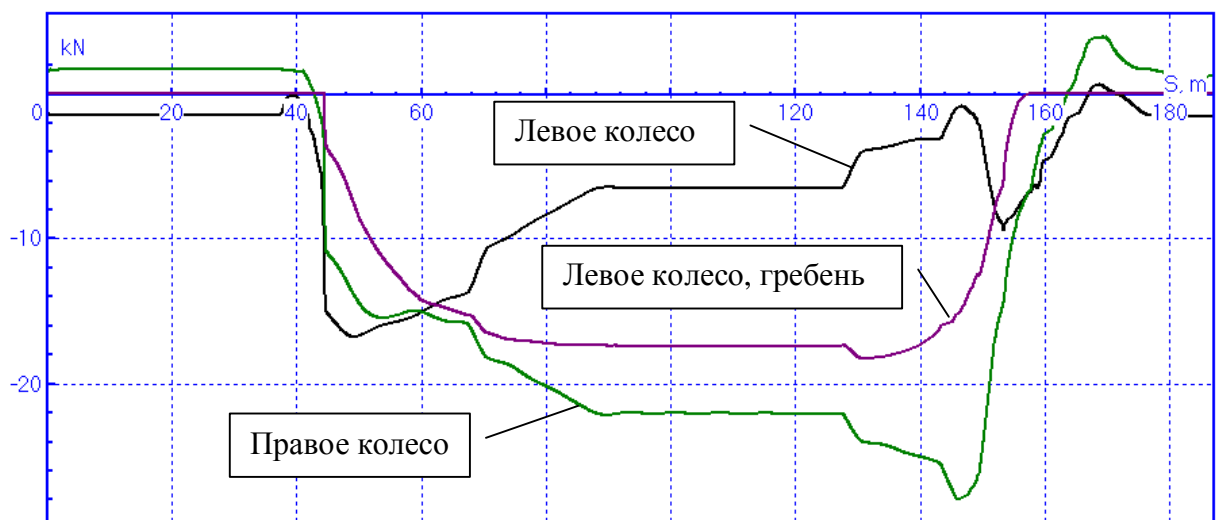
Поперечные крены для первой КП



Спины для первой КП



Продольные силы крива для первой КП



Поперечные силы крива для первой КП

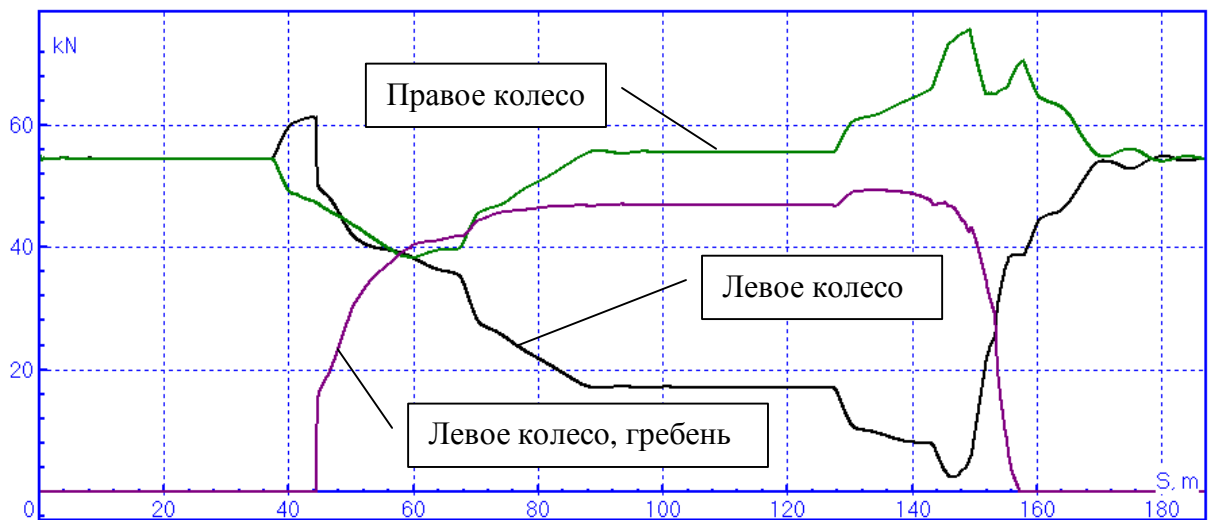



Рис. 10.11. Нормальные силы в контакте колесо/рельс для первой КП

### 10.4.2.3. Указания пользователю

Для того, чтобы получить приведенные выше результаты (пп. 10.4.2.1, 10.4.2.2) необходимы следующие действия.

1. Если модель не загружена, запустите модель вагона {um\_root}\samples\Rail vehicles\Manchester Benchmarks\Vehicle1 в программе моделирования **UM Simulation**.
2. Прочитайте конфигурацию **Файл | Прочитать конфигурацию | Case1** (рис.10.9). Эта операция соответствует чтению полной конфигурации модели: рабочий стол с окнами и графическими переменными в них (файл *Case1.icf*), файл параметров *Case1.par*, файл конфигурации рельсового экипажа *Case1.rwc* и начальных условий *Case1.xv*.
3. Перейдите в режим моделирования (пункт меню **Анализ | Моделирование**)
4. Загрузите список автоматически рассчитываемых переменных: перейдите на закладке *Переменные объекта* инспектора моделирования объекта и, щелкнув на кнопке , откройте файл переменных \vehicle1\case1.var. Появятся закладки со списками переменных (рис. 10.12) .

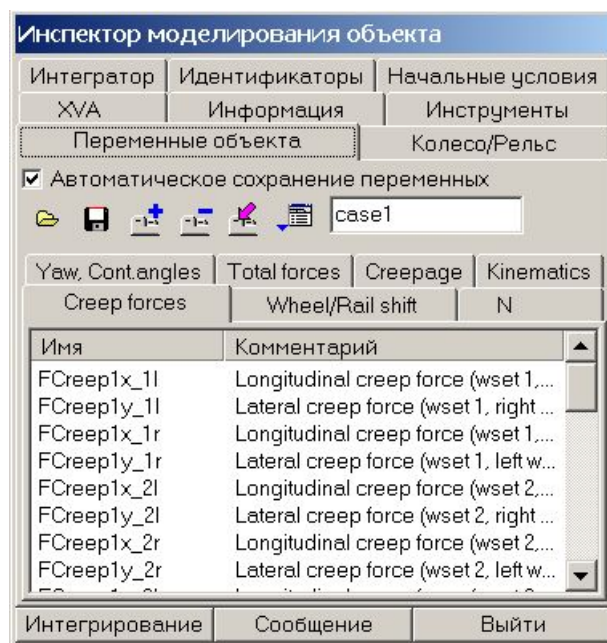



Рис. 10.12. Список автоматически рассчитываемых переменных

5. Запустите моделирование, щелкнув на кнопке *Интегрирование* инспектора (рис. 10.12) . В окне анимации контакта отображается установка колес и векторы контактных сил. В графических окнах строятся графики некоторых переменных. Обратите внимание, что анимация контактных взаимодействий в несколько раз замедляет процесс интегрирования, поэтому данные по времени ЦПУ в п.10.3 приведены для моделирования без анимации.
6. После окончания процесса интегрирования можно построить графики любых переменных, включенных в список автоматически рассчитываемых переменных. Если окна паузы на закрыто, то список находится на закладке *Переменные объекта* окна режима паузы, в противном случае – на одноименной закладке инспектора моделирования. Для построения графиков перейдите на эту закладку, далее выберите один из списков переменных, например, *N* (нормальные реакции в контакте колеса с рельсом). Откройте новое графическое окно, щелкнув на кнопке  панели инструментов или используя команду меню **Инструменты**

| **Графическое окно.** С помощью мыши перемещайте нужные переменные в графическое окно (рис.10.13, см. также рис.10.11) – технология “drag”.

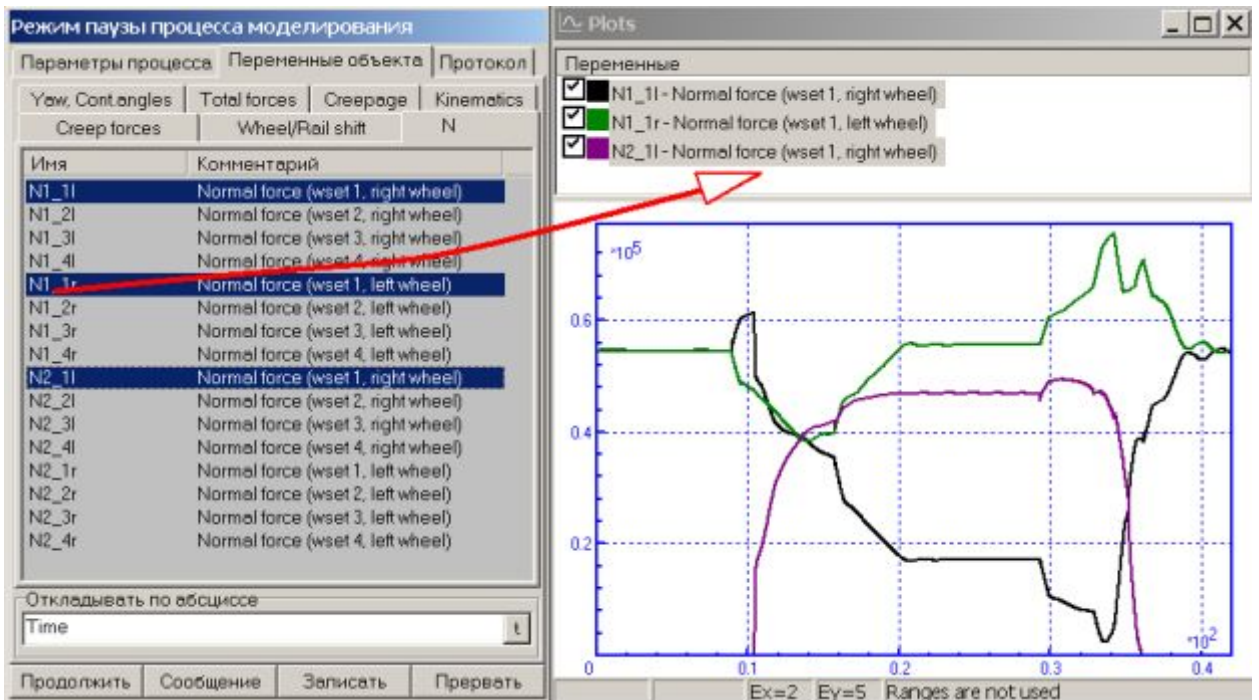


Рис. 10.13. Построение графиков рассчитанных переменных

Из списка в окно одновременно могут быть перенесены несколько графиков. Для этого одновременно с мышью стандартным образом используются клавиши *Shift* или *Ctrl*.

- Установившиеся значения переменных, представленные в таблицах п.10.4.2.1, могут быть “сколоты” непосредственно с графиков, но может быть использована и гораздо более эффективная технология. Для этого закройте окно паузы (если оно еще открыто). Если хотите сохранить рассчитанные только что переменные (их можно использовать в дальнейшем), то перейдите на закладку инспектора *Переменные объекта* и переименуйте каким-либо образом файл, в который будут записываться переменные (в верхнем поле на текущий момент содержится имя прочитанной конфигурации ). После этого на закладке *Интегратор* измените время моделирования на 28.5с (вместо 42с), рис.10.14. Обратите внимание, что в данном варианте, в отличие от остальных в данной главе, включено использование матриц Якоби. Это связано с тем, что при движении с малыми скоростями (в нашем случае 4.4 м/с) силы крипа, а вместе с ними и уравнения движения, являются жесткими, поэтому использованием матриц Якоби позволяет примерно вдвое ускорить процесс моделирования.

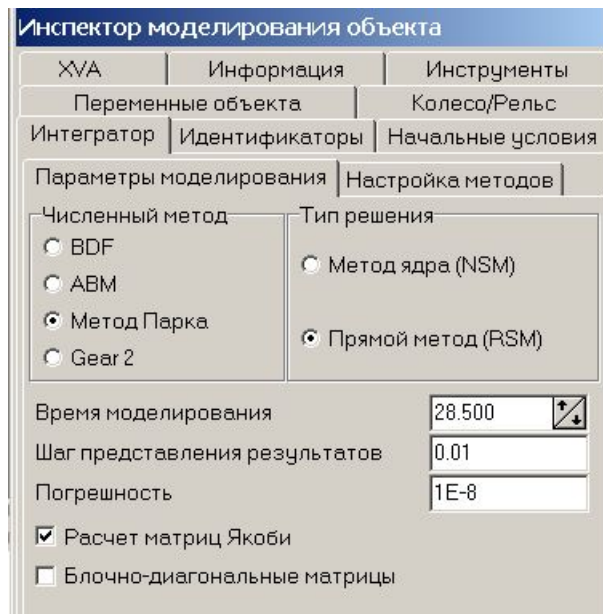



Рис. 10.14. Параметры интегратора

- После окончания расчета установившиеся значения переменных можно получить с использованием процессора переменных – инструмента для обработки переменных (расчета СКО, математических ожиданий, определения максимальных значений и т.д.). Используя кнопку  панели инструментов или команду меню **Инструменты | Табличный процессор**, откройте окно процессора, выберите функционал (обработчик) *LastOrdinate* (Последнее значение переменной) в левой части окна и перенесите в процессор нужные переменные из списка рассчитанных переменных (рис.10.15). Используйте всплывающее меню процессора для вызова полезных утилит (сортировка, удаление и т.д.).

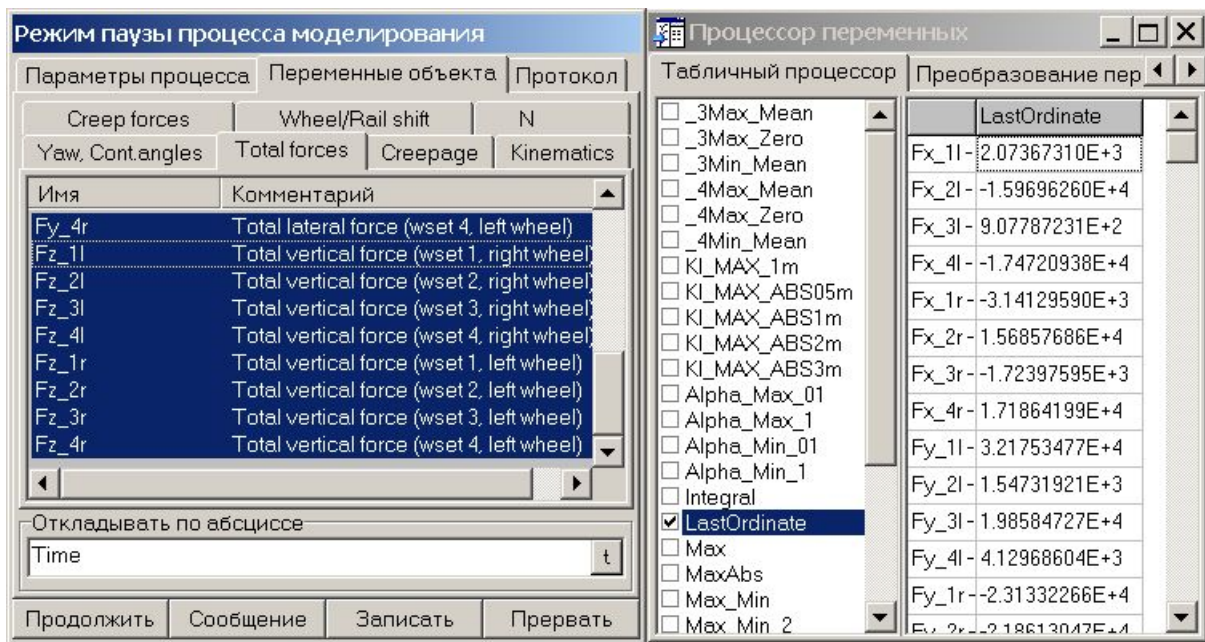


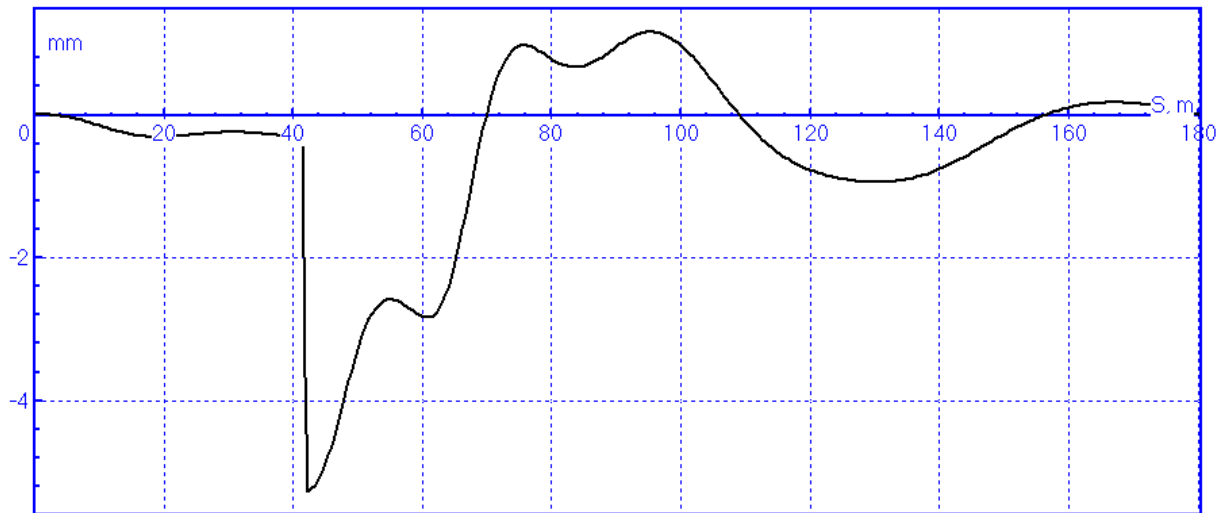
Рис. 10.15. Использование процессора переменных для определения установившихся значений переменных

### 10.4.3. Тип пути 2

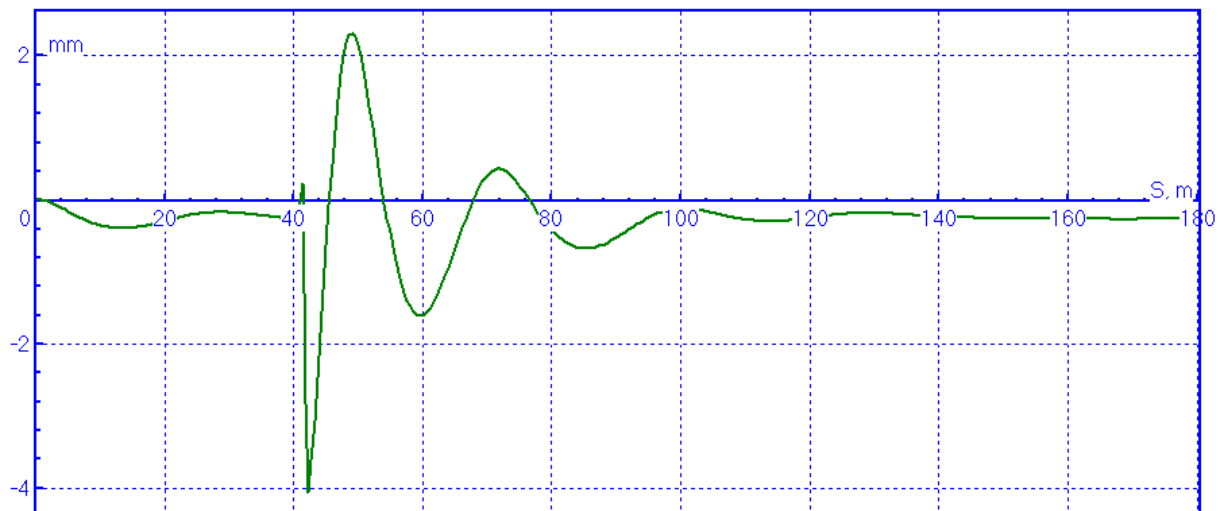
В данном разделе исследуются две проблемы. Во-первых, динамический отзыв единичного горизонтального сдвига путевой структуры на 5 мм – аналог анализа отзыва системы на ступенчатое возмущение (п.10.2.4.2). Во-вторых, расчет критической скорости экипажа, то есть скорости, при которой в системе возникают устойчивые колебания колесных пар (предельный цикл).

#### 10.4.3.1. Графические результаты

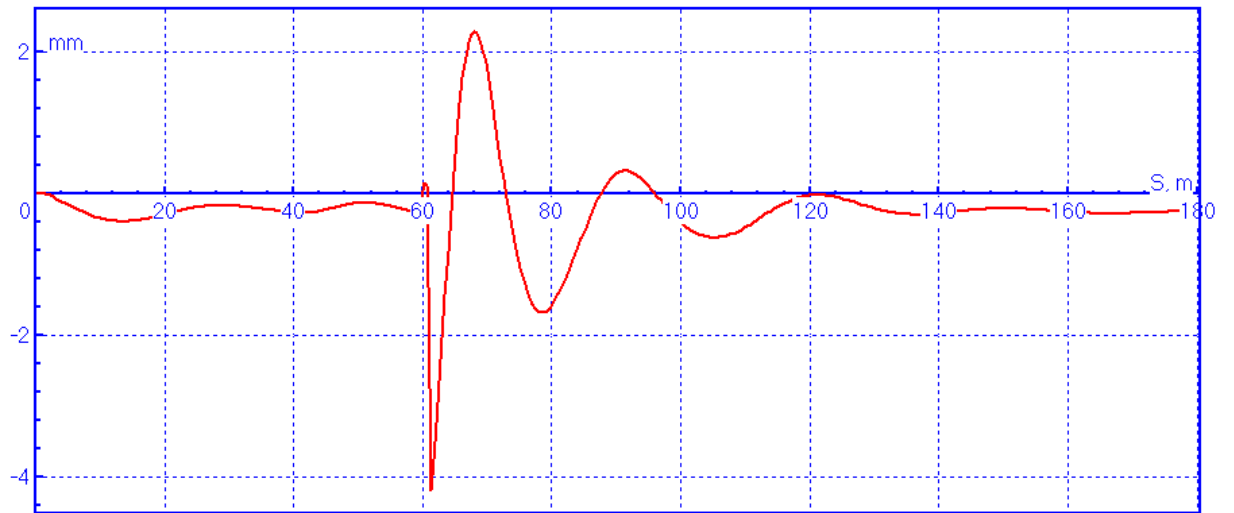
По условиям теста поперечные смещения всех тел должны быть построены в системе координат пути, то есть система координат смещается в поперечном направлении на 5мм вместе со средней линией пути. Скорость движения вагона – 45 м/с, время моделирования – 4с.



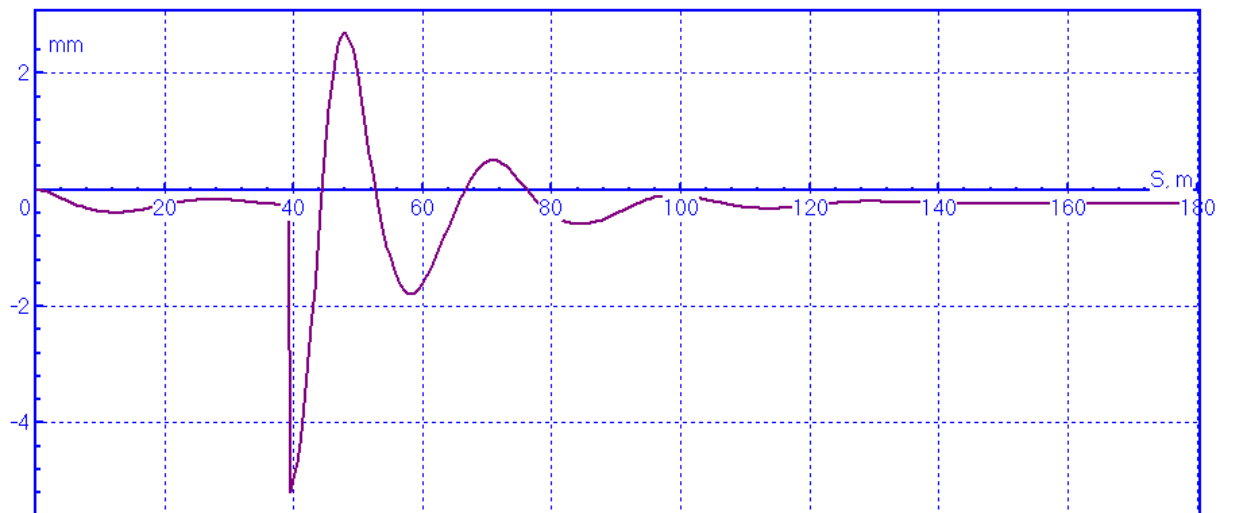
Поперечное смещение кузова,  $v = 45$  м/с



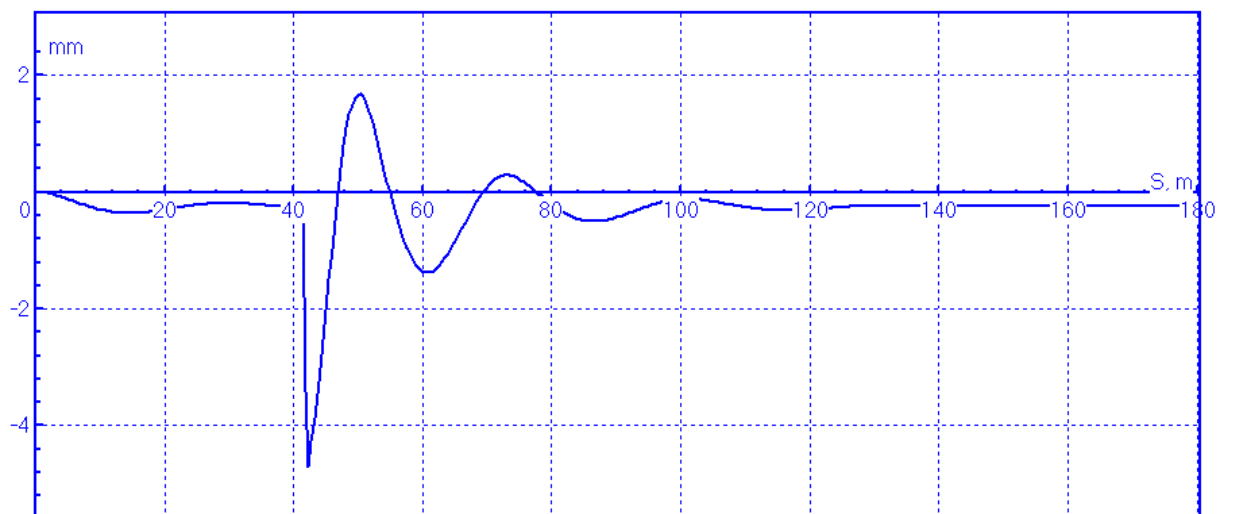
Поперечное смещение первой тележки,  $v = 45$  м/с



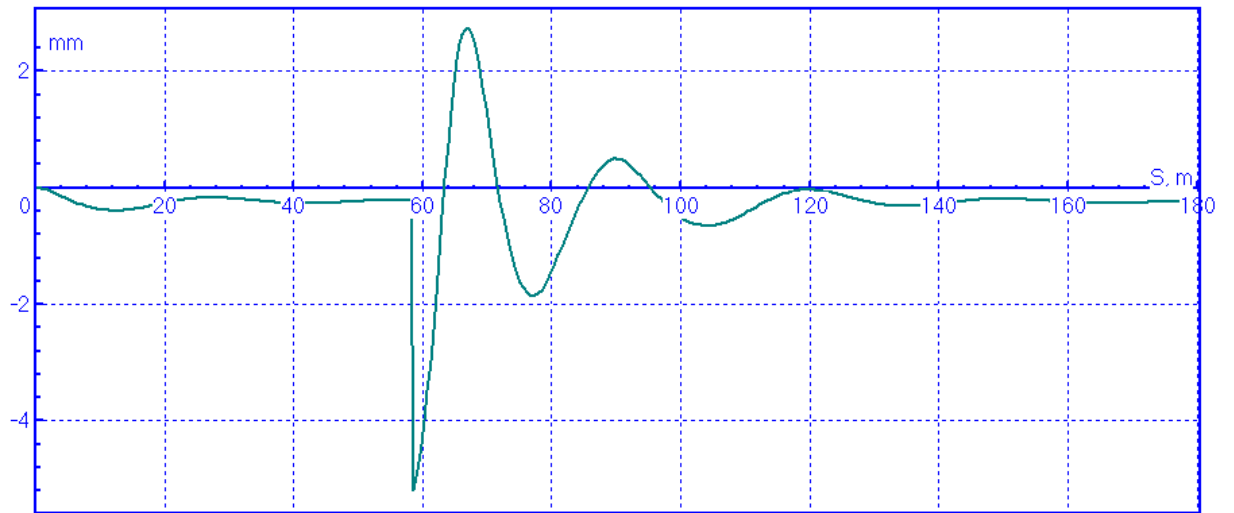
Поперечное смещение второй тележки,  $v = 45$  м/с



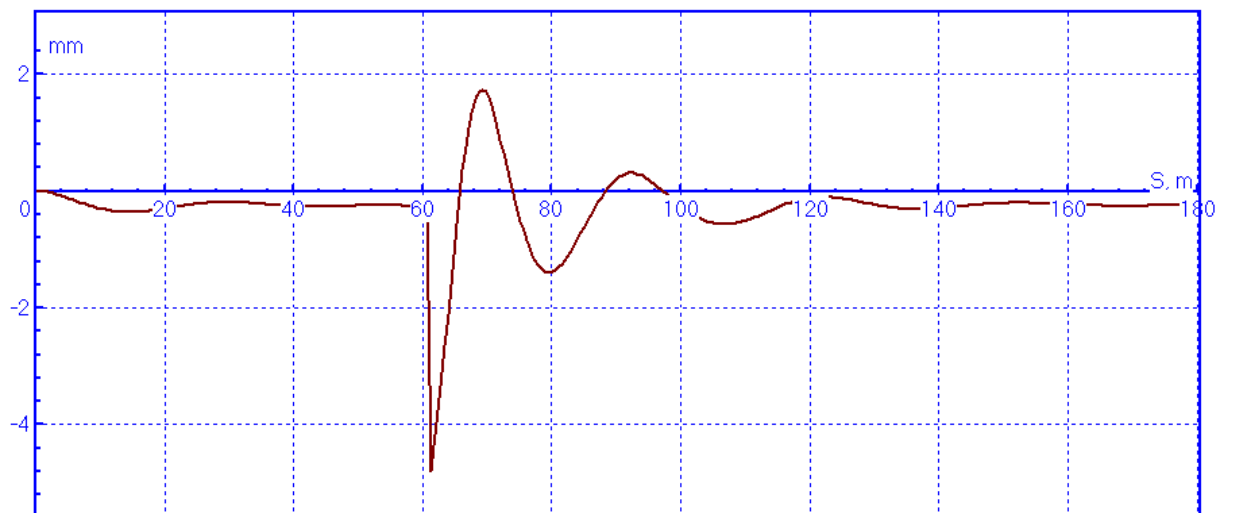
Поперечное смещение КП1,  $v = 45$  м/с



Поперечное смещение КП2,  $v = 45$  м/с

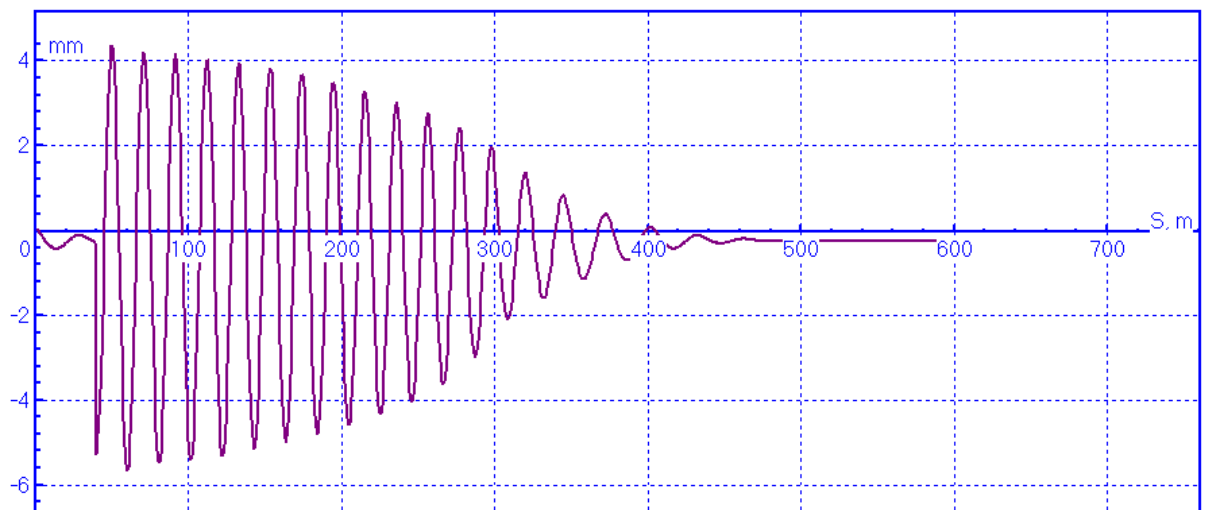


Поперечное смещение КПЗ,  $v = 45$  м/с

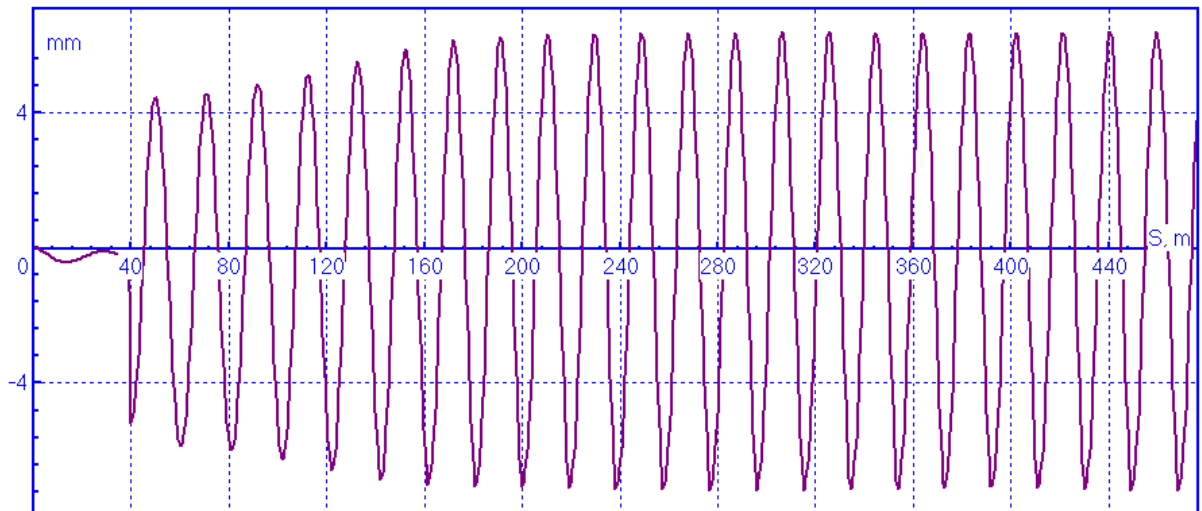


Поперечное смещение КП4,  $v = 45$  м/с

Следующие два графика получены для поперечного смещения первой колесной пары и указывают, что критическая скорость вагона равна 74 м/с.



Поперечное смещение КП1,  $v = 73$  м/с



Поперечное смещение КП1,  $v = 74\text{м/с}$ , частота виляния 3,9 Гц

### 10.4.3.2. Указания пользователю

Для повторения результатов предыдущего пункта выполните следующие действия.

1. Повторите подпункты 1-6 указаний, сформулированных в п. 10.4.2.3 с одним изменением – следует открыть конфигурацию *Case2*.
2. Выполните моделирование. Все переменные, необходимые для анализа первой части данного задания содержатся в автоматически открываемой графическом окне (рис.10.16). Включая и выключая галочки в левом столбце окна – в списке переменных, отображаемых в окне, можно просмотреть отдельные графики. Используйте также всплывающее меню для вызова полезных утилит для работы с графическими переменными.

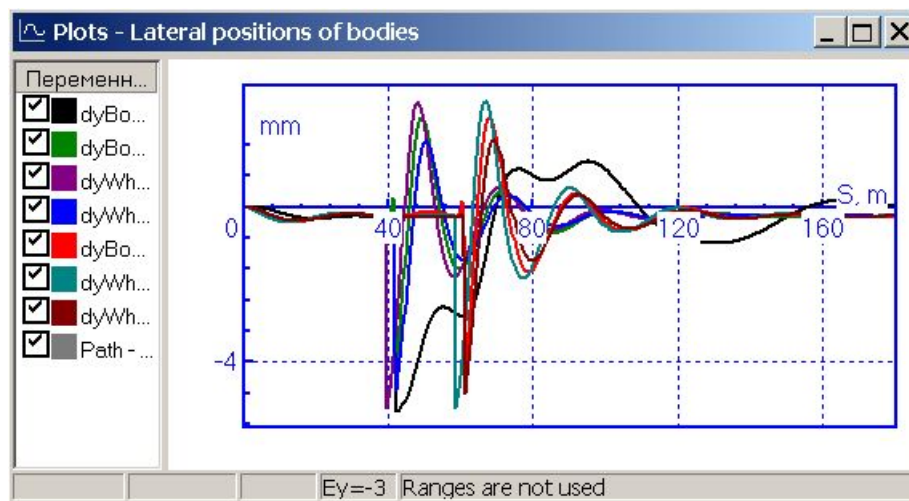


Рис. 10.16. Графические результаты – поперечное смещение тел модели относительно пути

3. Для расчета критической скорости
  - закройте окно паузы.
  - увеличьте время моделирования на закладке *Интегратор / Параметры интегрирования* инспектора моделирования до 6-10 с (рис. 10.14),
  - на закладке *Идентификаторы* инспектора моделирования (рис. 10.17) пошагово увеличивайте скорость (стандартный идентификатор начальной ско-

рости экипажа –  $v_0$ ) через 1 м/с, начиная с 70 м/с и повторяйте процесс моделирования с разными скоростями до тех пор, пока колебания колесной пары не перестанут быть затухающими.

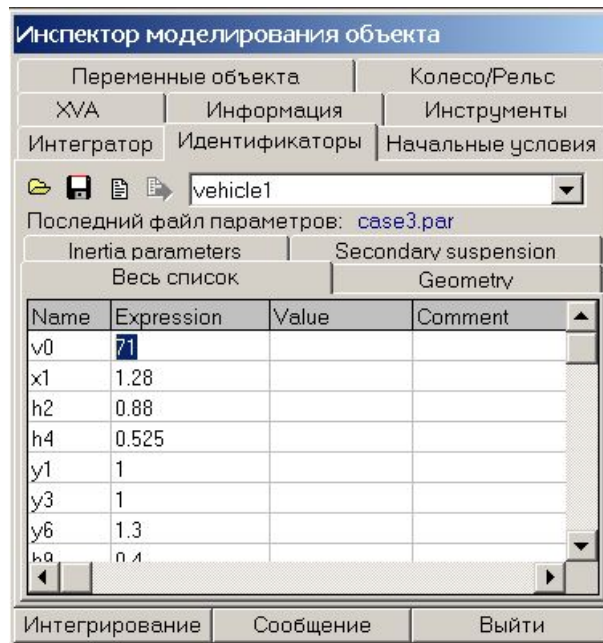
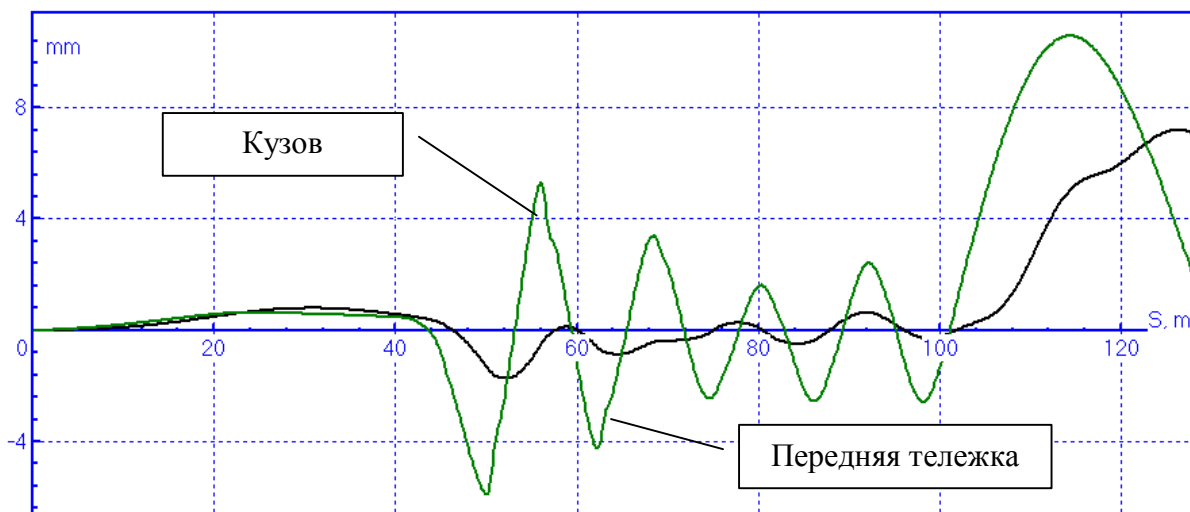


Рис. 10.17. Задание скорости экипажа

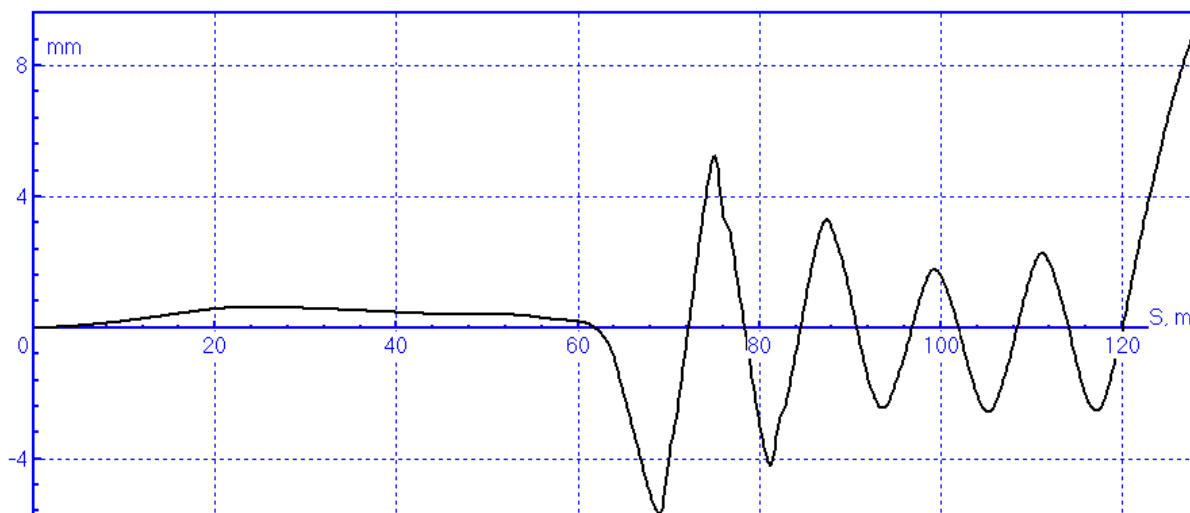
### 10.4.4. Тип пути 3

В данном разделе рассматривает движение экипажа по пути с большим уширением и большими симметричными горизонтальными неровностями синусоидальной формы (п. 10.2.4.3). Вагон движется с постоянной скоростью 22,5 м/с. Время моделирования 5,7 с. Исследуются поперечные смещения тел, в том числе выход колесных пар на двухточечный режим контакта, боковая качка кузова и рам, а также суммарные вертикальные и поперечные силы, действующие на колеса передней колесной пары со стороны рельса.

#### 10.4.4.1. Графические результаты



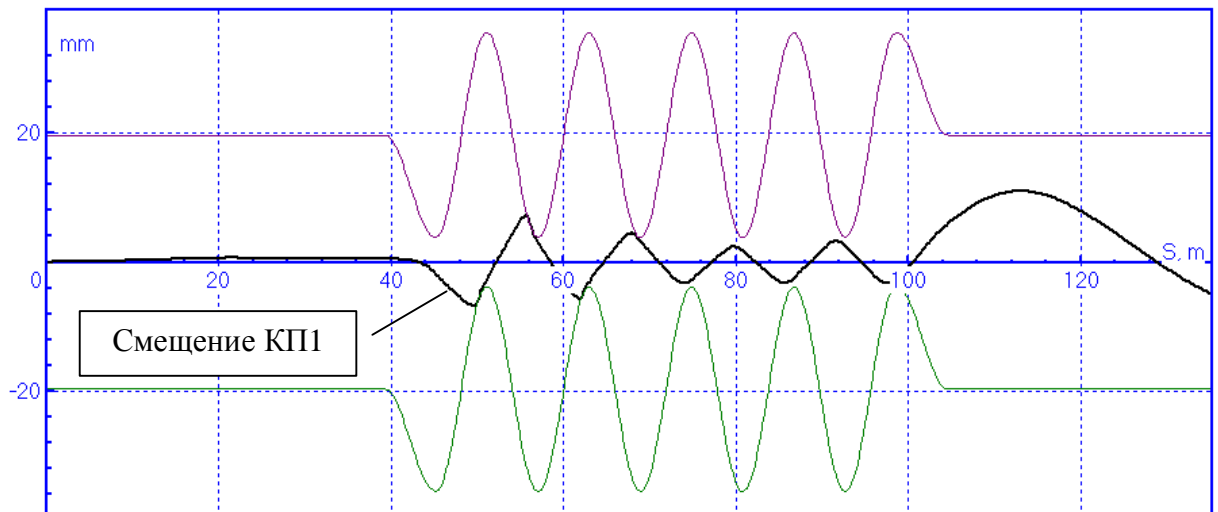
Поперечное смещение центров масс кузова и передней тележки



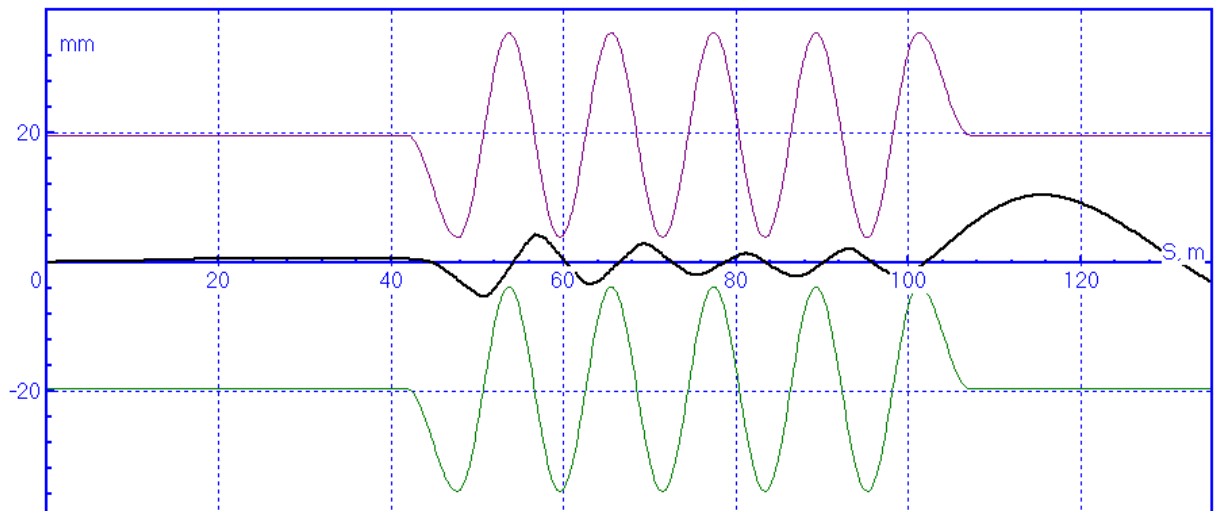
Поперечное смещение центра масс задней тележки

В соответствии с условиями теста графики поперечных смещений колесных пар должны сопровождаться графиками горизонтальных неровностей левого и правого рельсов, смещенных на величину зазора между гребнем и боковой поверхности рельса. Это дает возможность отчетливо увидеть области касания гребня боковой поверхности рельса (двухточечный контакт). Как видно из следующих четырех рисунков, первая и третья колесные пары по четыре раза приходят в двухточечный контакт (по два раза левое и правое

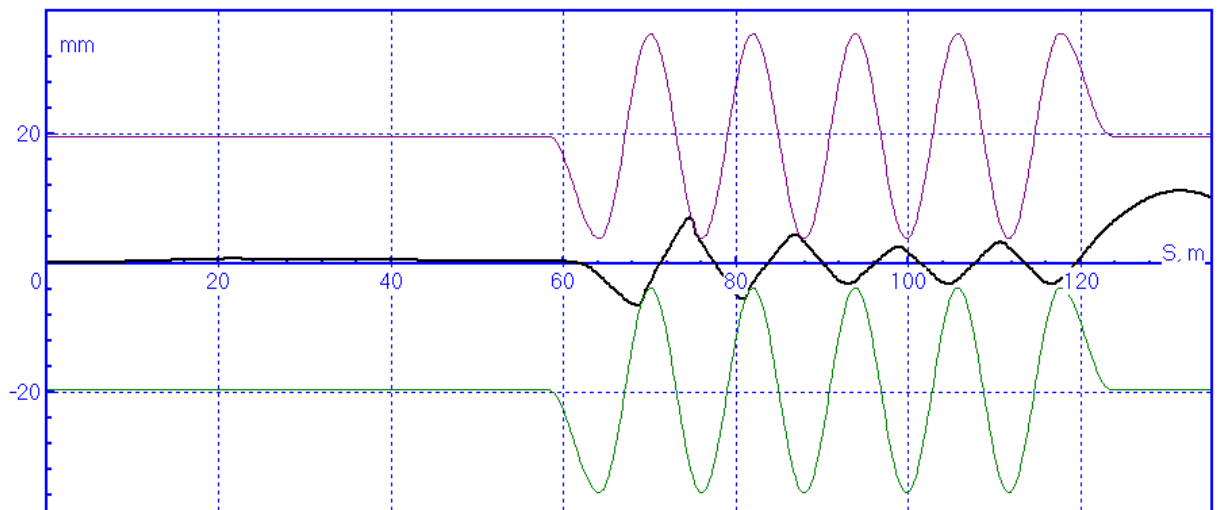
колеса), в то время как для второй и четвертой колесных пар двухточечный контакт отсутствует.



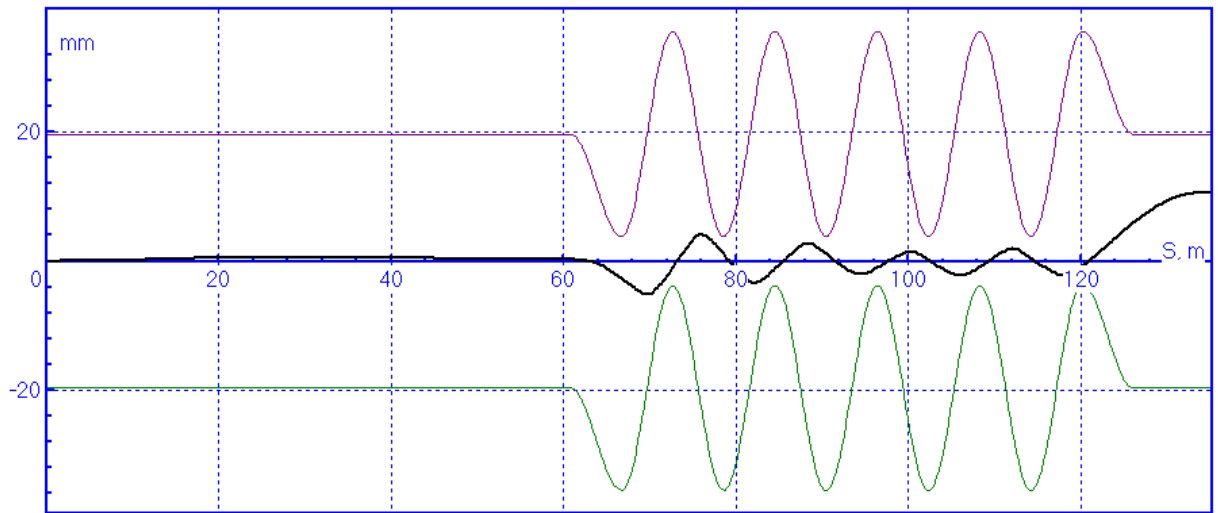
Поперечное смещение КП 1



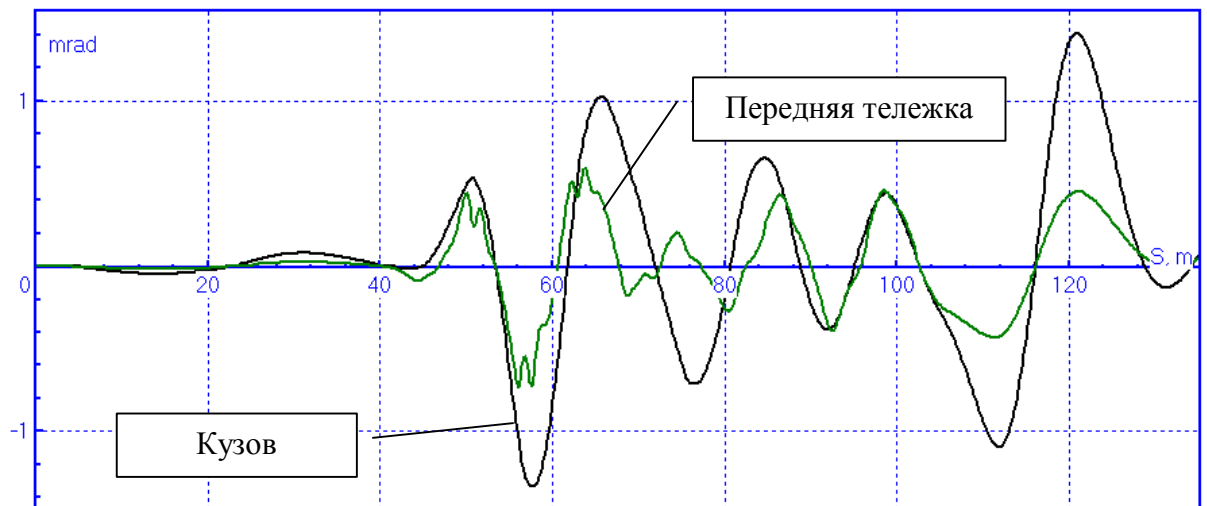
Поперечное смещение КП 2



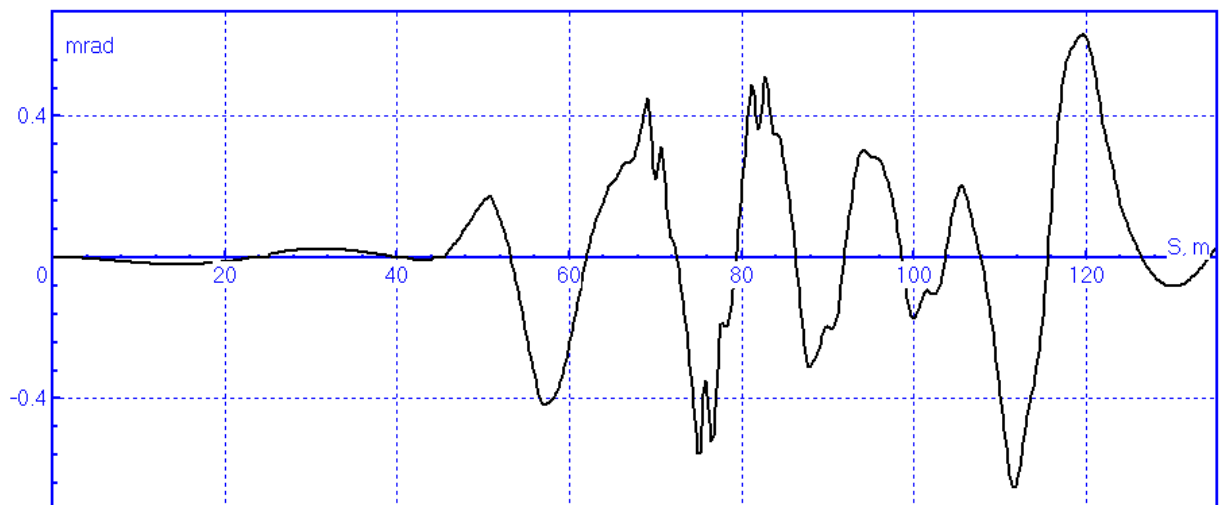
Поперечное смещение КП 3



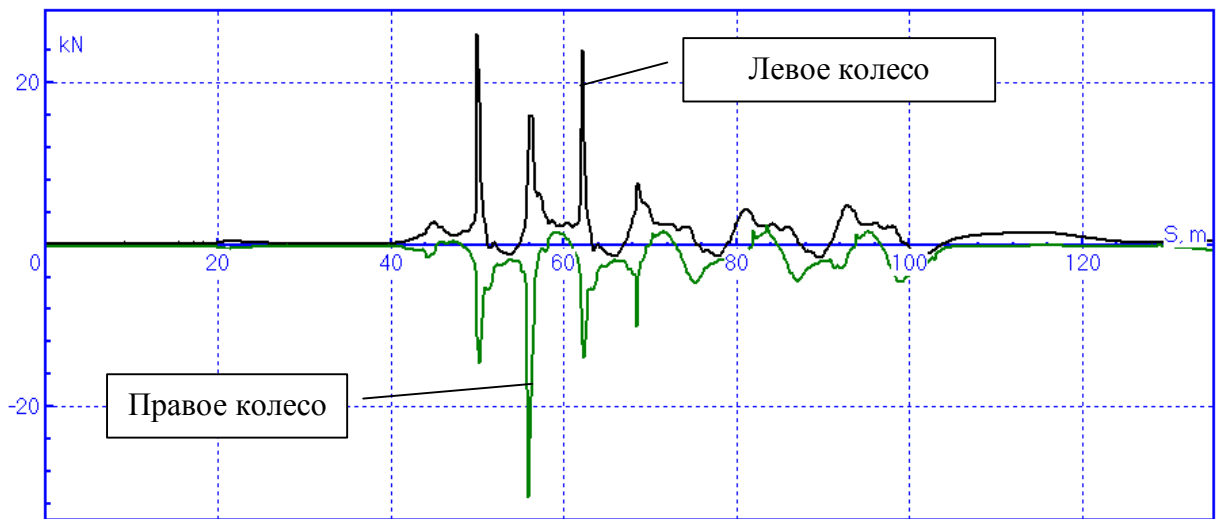
Поперечное смещение КП 4



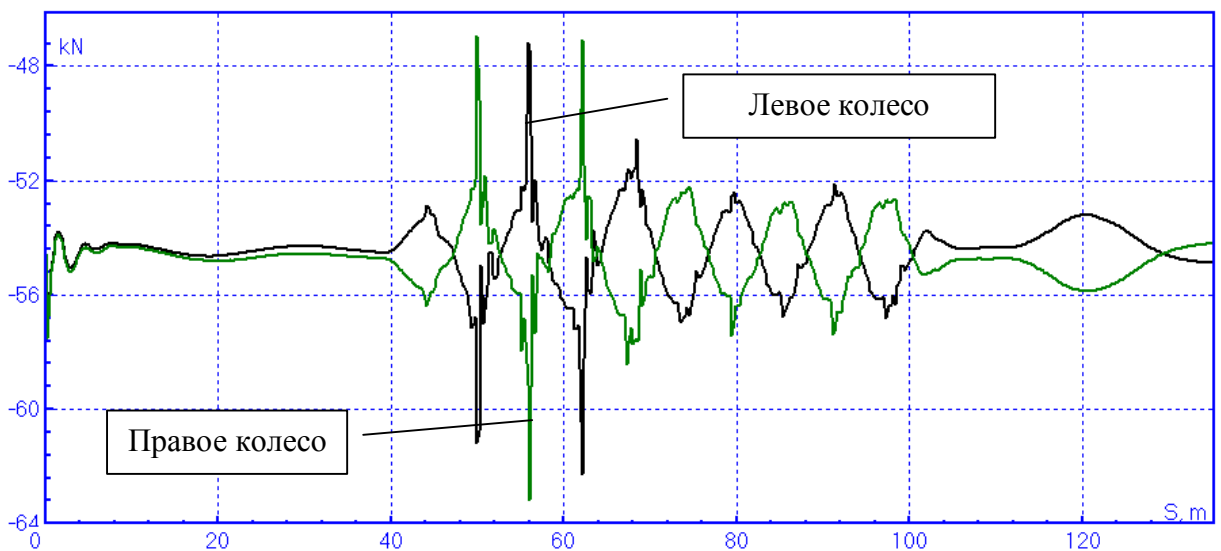
Боковая качка кузова и передней тележки



Боковая качка задней тележки



Боковые силы, КП 1



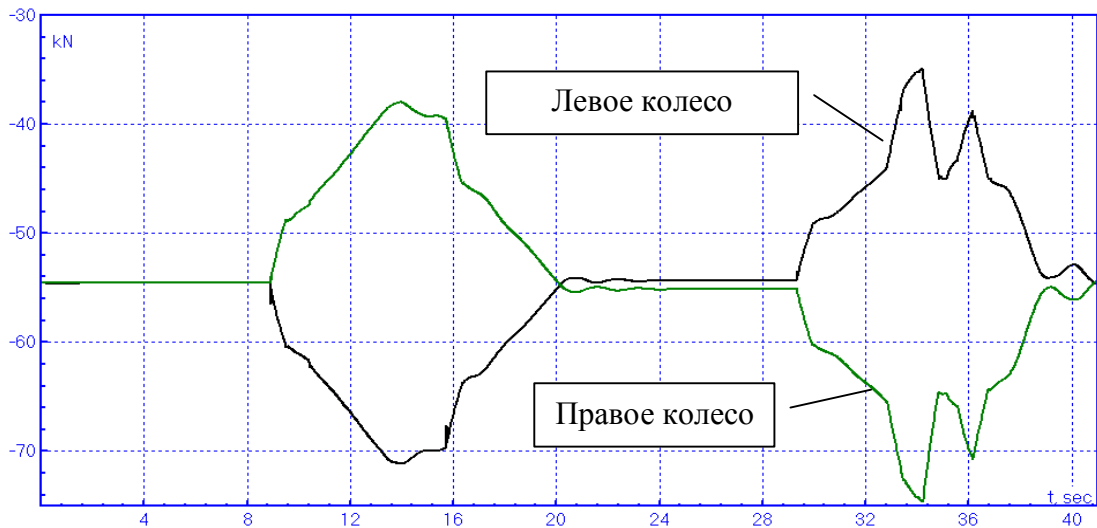
Вертикальные силы, КП 1

#### 10.4.4.2. Указания пользователю

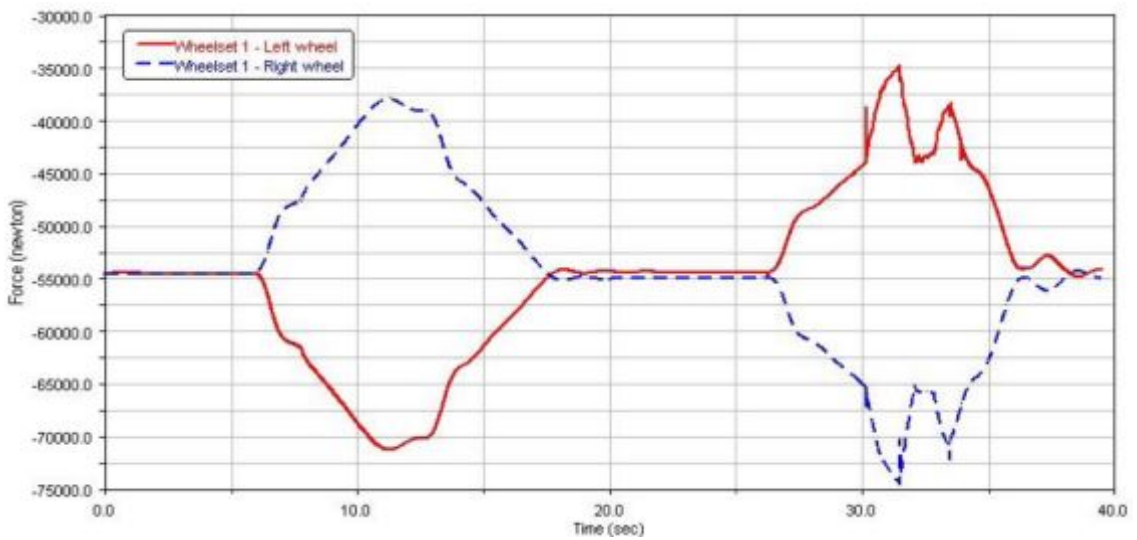
Для повторения результатов предыдущего пункта выполните подпункты 1-6 указаний, сформулированных в п. 10.4.2.3, со следующими изменениями – следует открыть конфигурацию *Case3*, а имя файла переменных – *Case3.var*.

#### 10.4.5. Сравнение графических результатов UM с результатами других участников теста

Как следует из рисунков, приведенных ниже, а также из сравнения остальных рисунков с данными, опубликованными в Интернете (п.10.1), результаты UM и ADAMS/Rail близки как с качественной, так и с количественной точки зрения. Различия между результатами тестов UM и SimPack более значительны, хотя и совпадают качественно.

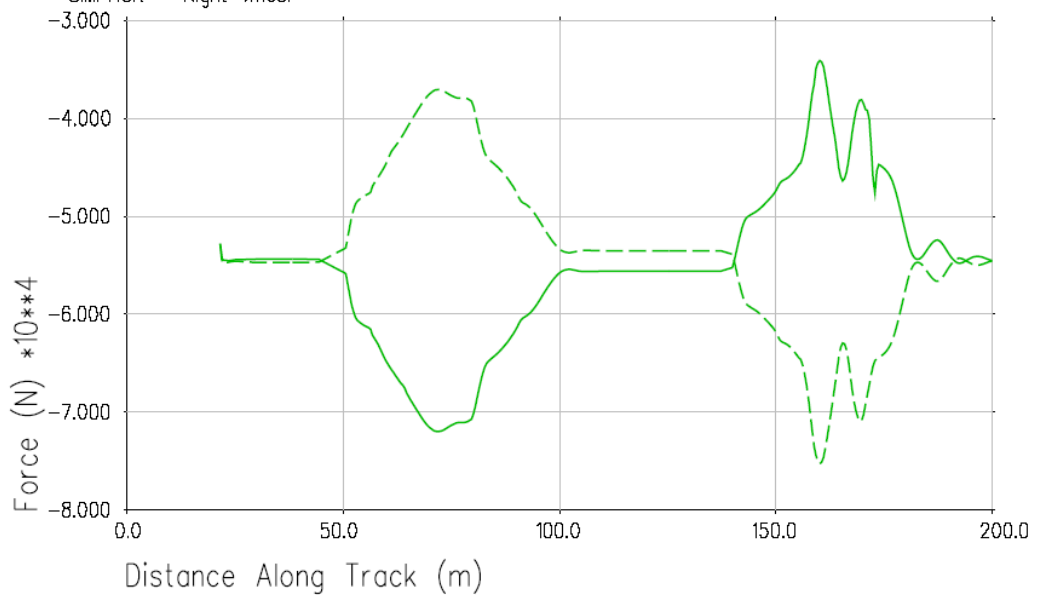


Суммарные вертикальные силы для первой КП, тип пути 1 (UM)



Суммарные вертикальные силы для первой КП, тип пути 1 (ADAMS/Rail)

— SIMPACK - Left Wheel  
 - - - SIMPACK - Right Wheel



Суммарные вертикальные силы для первой КП, тип пути 1 (SimPack)

## 10.5. Результаты моделирования экипажа 2

В данном разделе приведены результаты выполнения тестов для модели грузового двухосного экипажа. Описание модели *Vehicle2* приведено в п.10.2.2. Расчеты проведены для типов путевой структуры, рассмотренных в пп.10.2.4.2–10.2.4.4. Самостоятельного повторения приведенных ниже результатов пользователь должен руководствоваться аналогичными расчетами для экипажа 1 (пп. 10.4.1.2, 10.4.3.2, 10.4.4.2).

### 10.5.1. Собственные частоты

Поскольку модель экипажа включает фрикционные гасители, линеаризация которых в окрестности стационарного движения невозможна, для данной модели определены только собственные частоты, полученные при отключенных гасителях (точнее, при отключенных силовых элементах). Результаты при фиксированных колесных парах приведены в таблице.

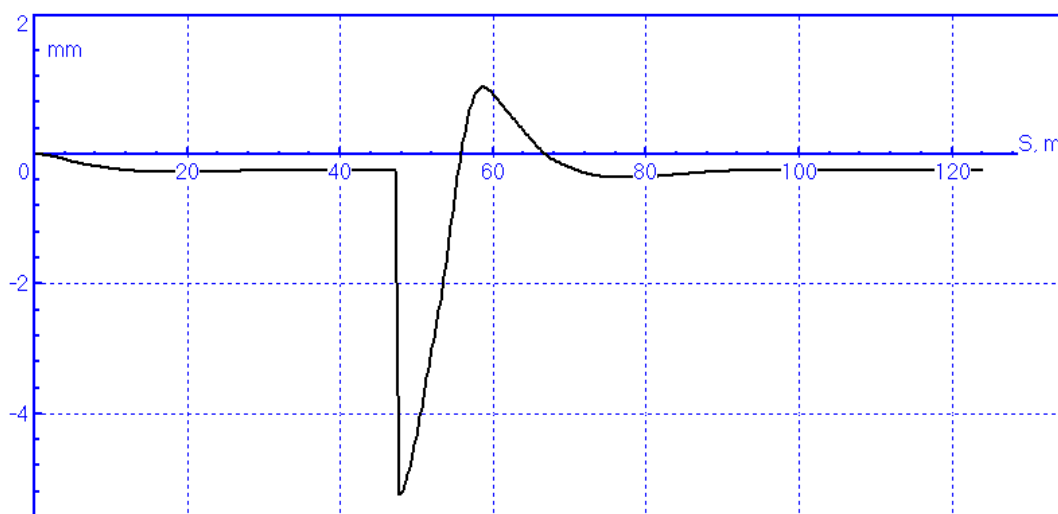
Для самостоятельного повторения этих результатов руководствуйтесь указаниями, сформулированными в п.10.4.1.2 с заменой модели *Vehicle1* на *Vehicle2*.

Таблица 12

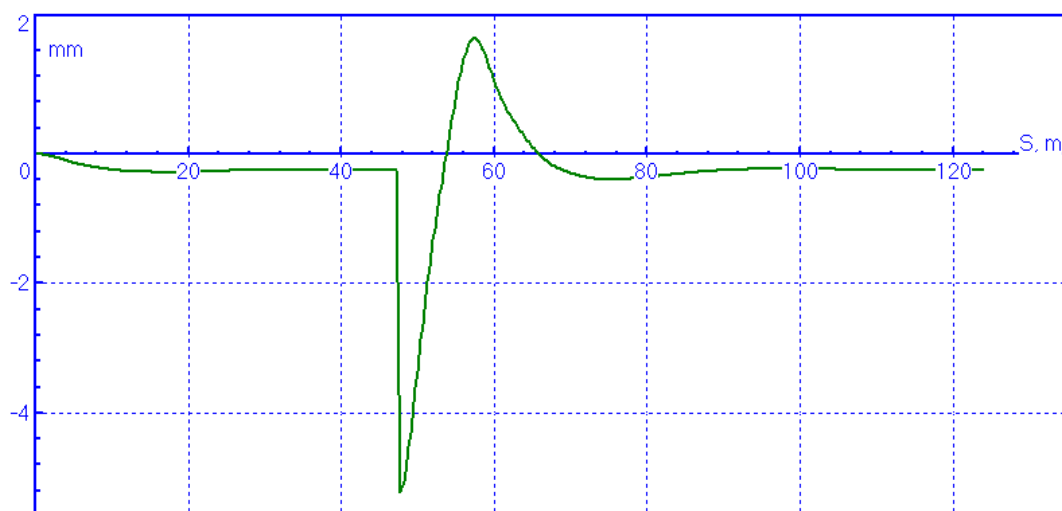
Собственные частоты кузова при фиксированных колесных парах

Форма колебаний	Частота (Гц)		
	UM	Adams/ Rail	Другие участники
Нижняя боковая качка	0.89	0.89	0.9÷1.1
Виляние	2.57	2.58	2.56÷2.8
Подпрыгивание	2.11	2.12	2.09÷2.3
Верхняя боковая качка	2.46	2.46	2.58÷2.9
Галопирование	2.01	2.02	2.09÷2.3
Подергивание	6.31	6.33	-

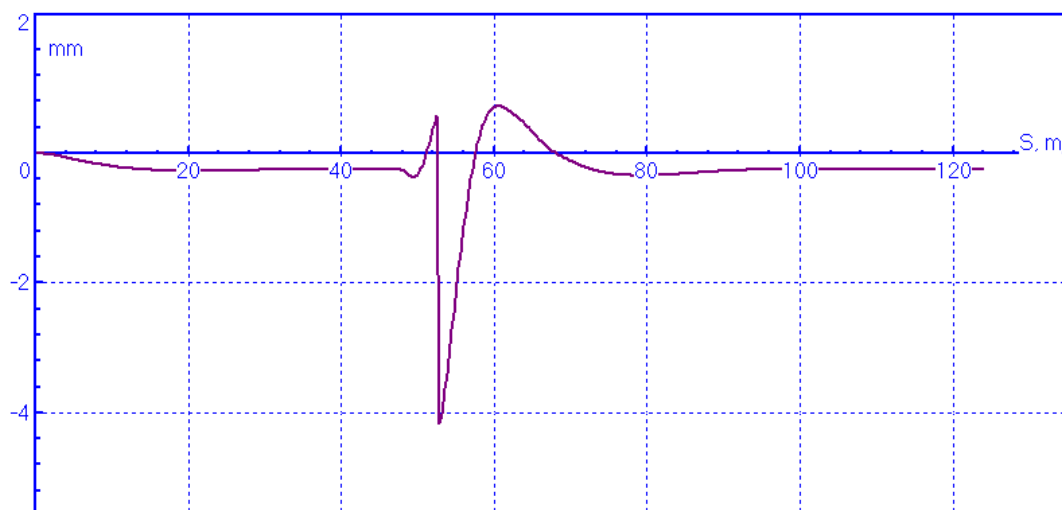
### 10.5.2. Тип пути 2



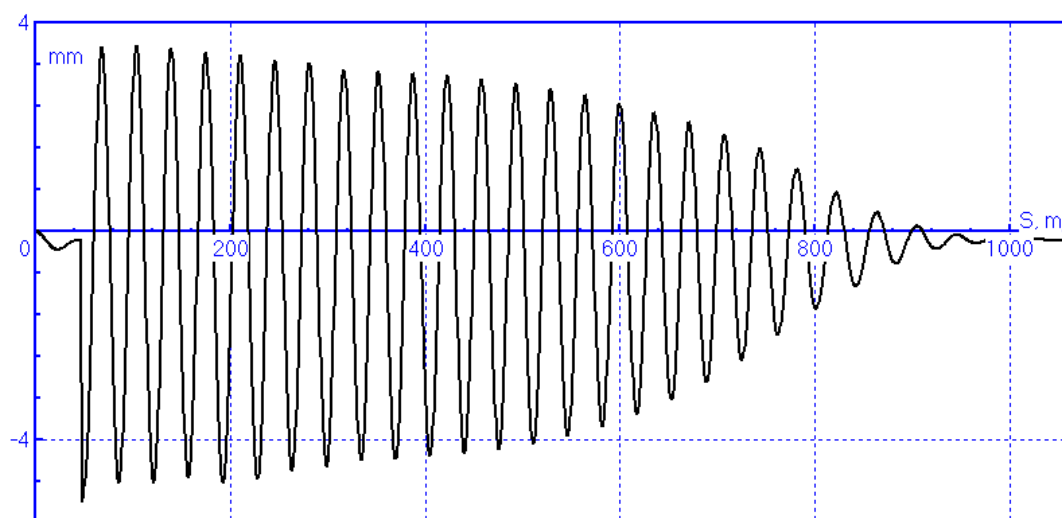
Поперечное смещение кузова



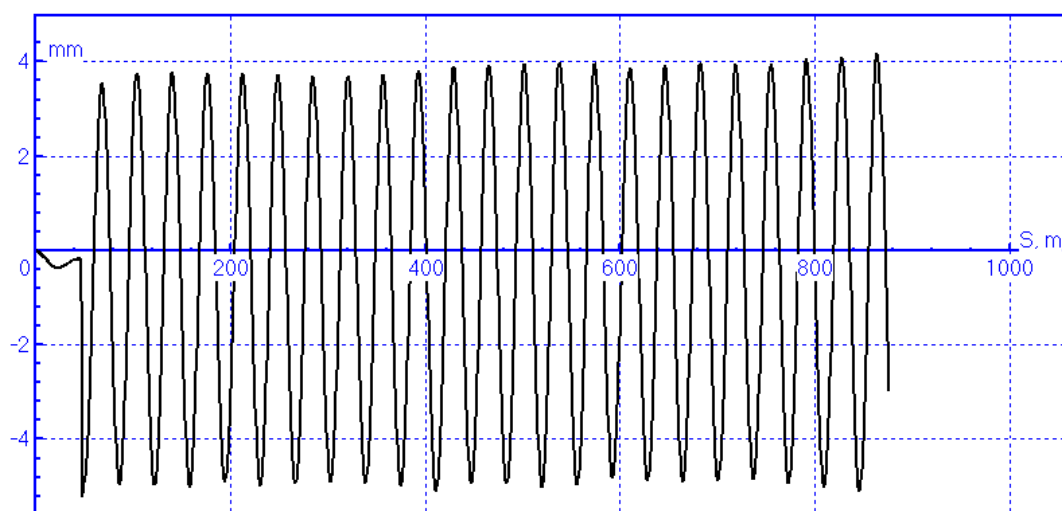
Поперечное смещение КП 1



Поперечное смещение КП 2

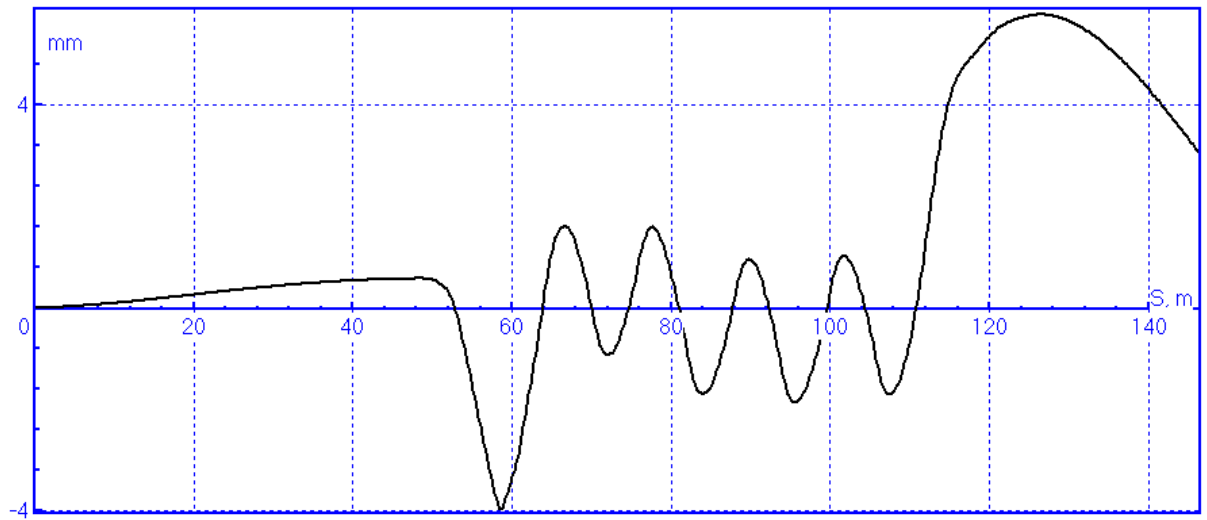


Поперечное смещение КП 1,  $v = 73$  м/с

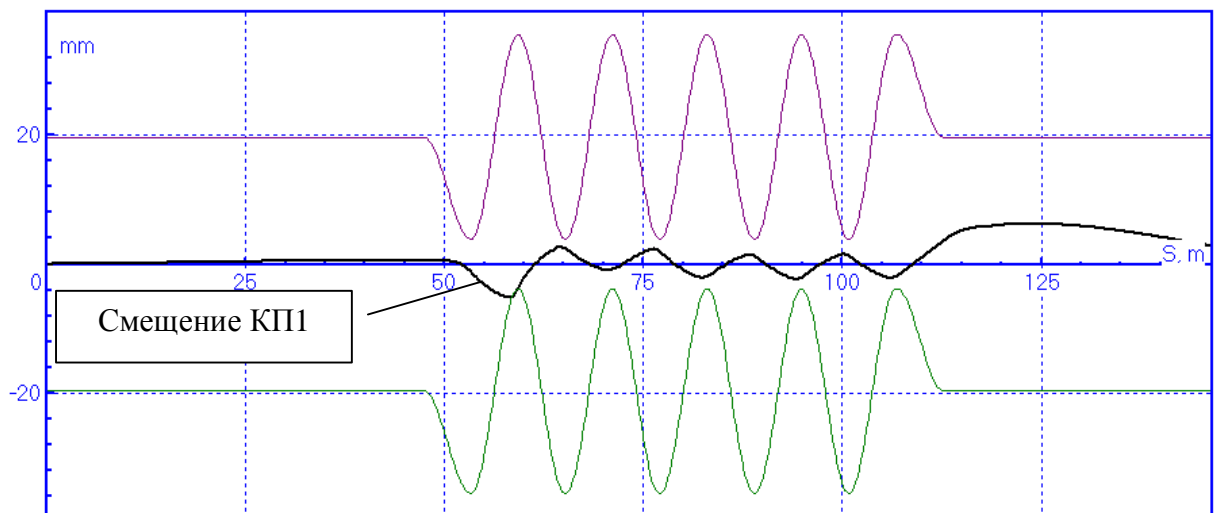


Поперечное смещение КП 1,  $v = 74$  м/с (критическая скорость), частота виляния 2,05 Гц

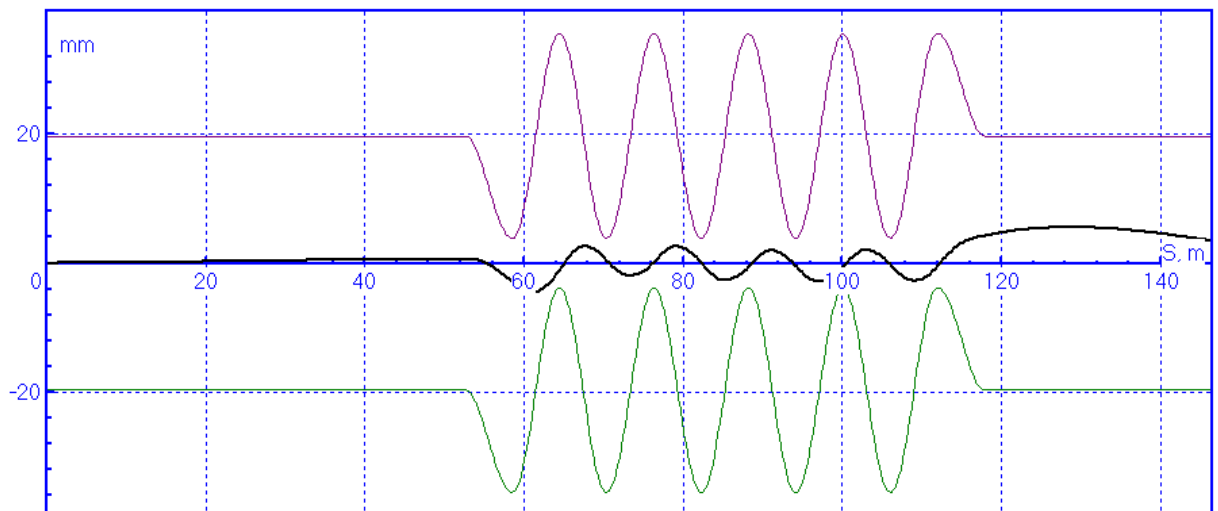
**10.5.3. Тип пути 3**



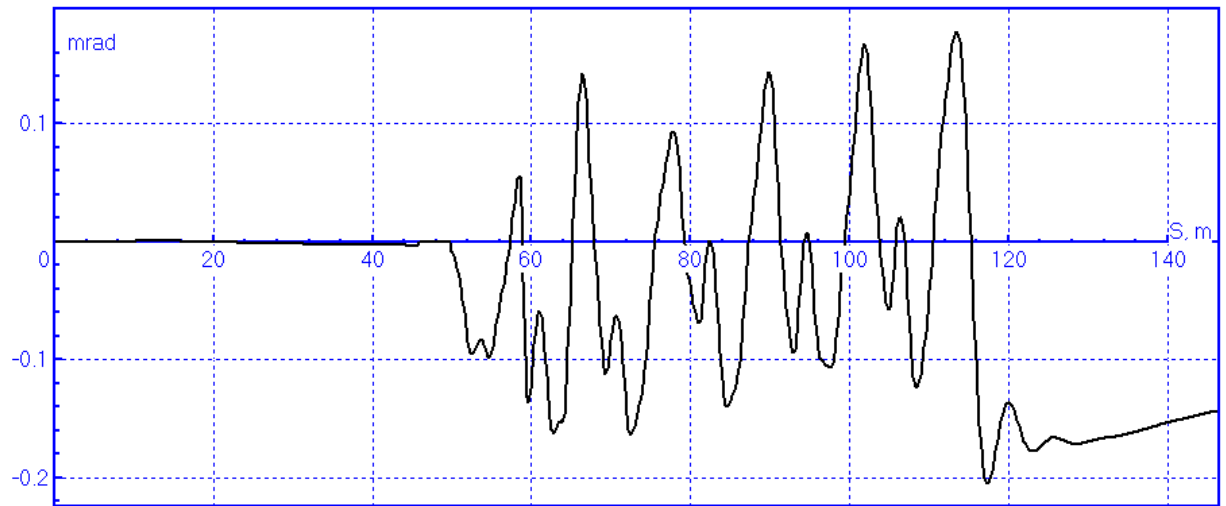
Поперечное смещение кузова



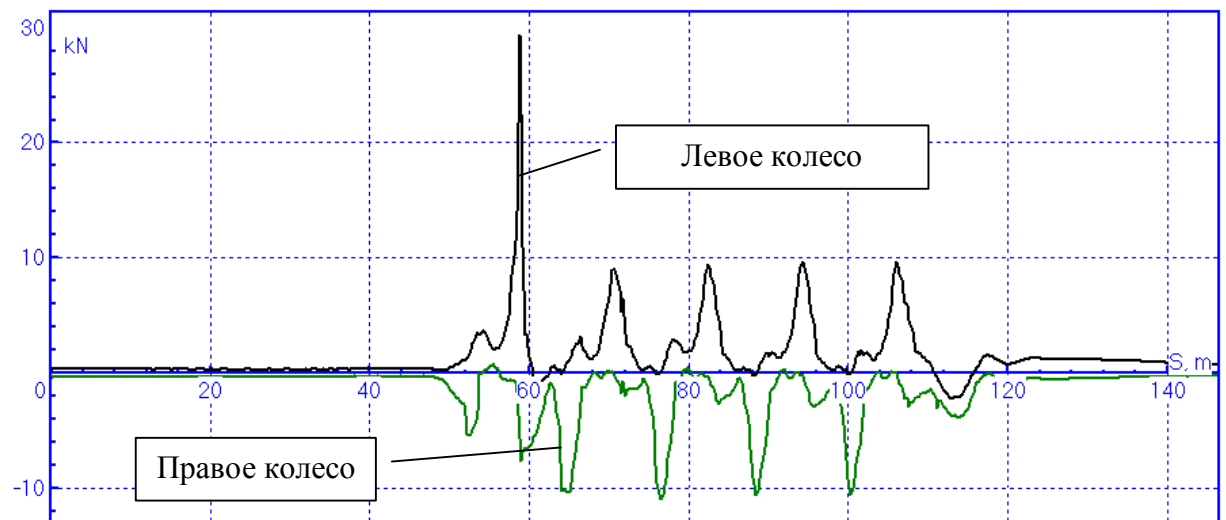
Поперечное смещение КП 1



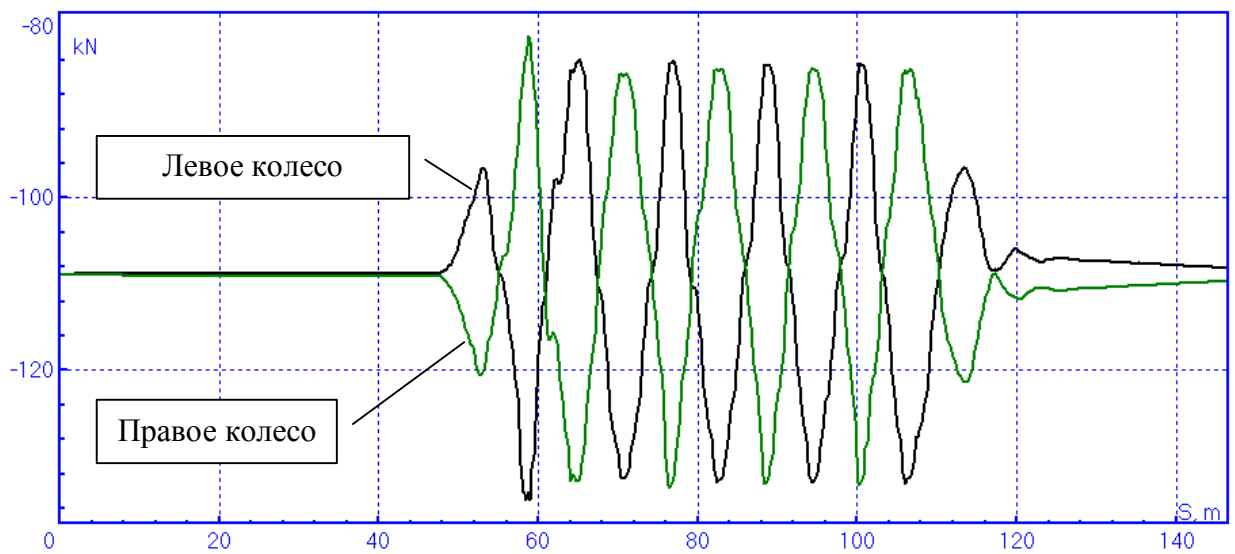
Поперечное смещение КП 2



Боковая качка кузова



Боковые силы для КП 1



Вертикальные силы для КП 1

**10.5.4. Тип пути 4**

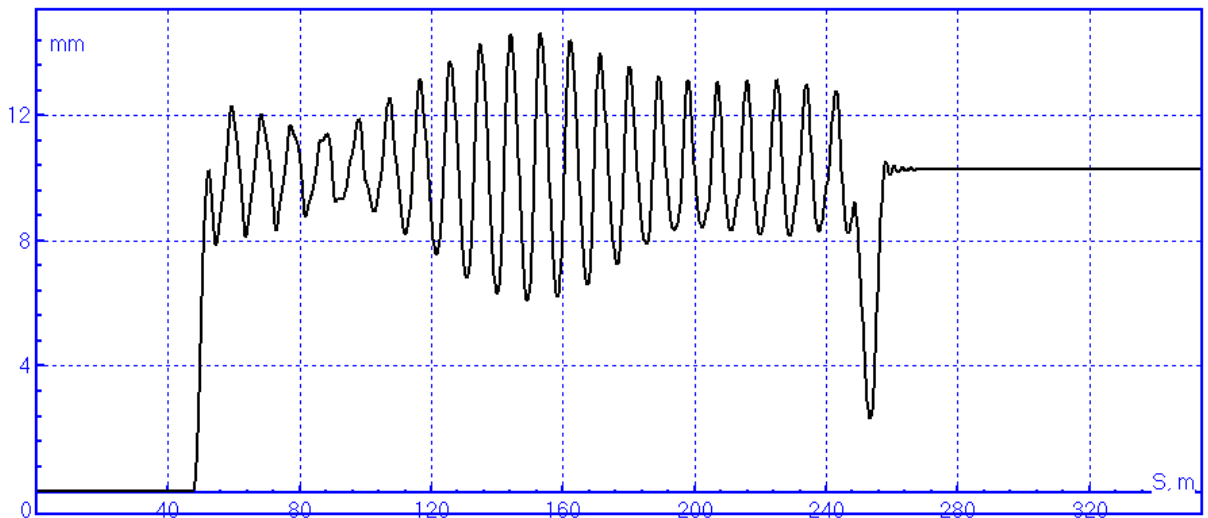
До 50 м (2,5 с) поддерживается постоянная скорость экипажа 20 м/с, затем с 50 м до 250 м с использованием пропорционального регулятора (сила приложена на уровне автосцепки) скорость примерно равномерно увеличивается с 20 до 24 м/с. Разгон происходит в течение 9,0909 с с ускорением 0,44 м/с<sup>2</sup>. Планируемая скорость:

$$v^* = \begin{cases} 20, & t < 2.5 \\ 20 + 0.44(t - 2.5), & t \in [2.5, 11.5909] \\ 24, & t > 11.5909 \end{cases}$$

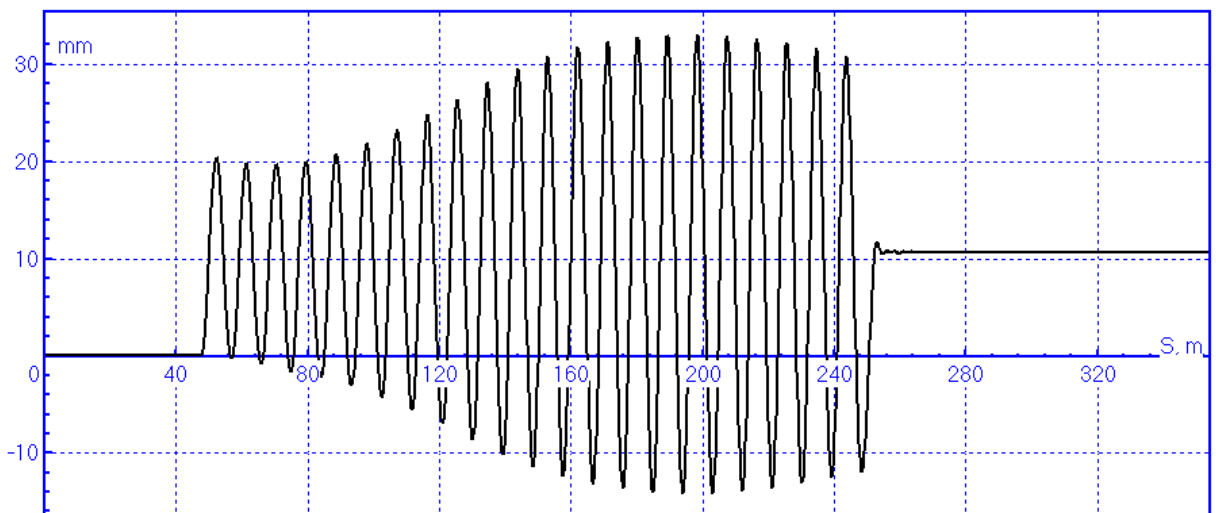
Коэффициент усиления в регуляторе скорости

$$F = -k_v(v - v^*)$$

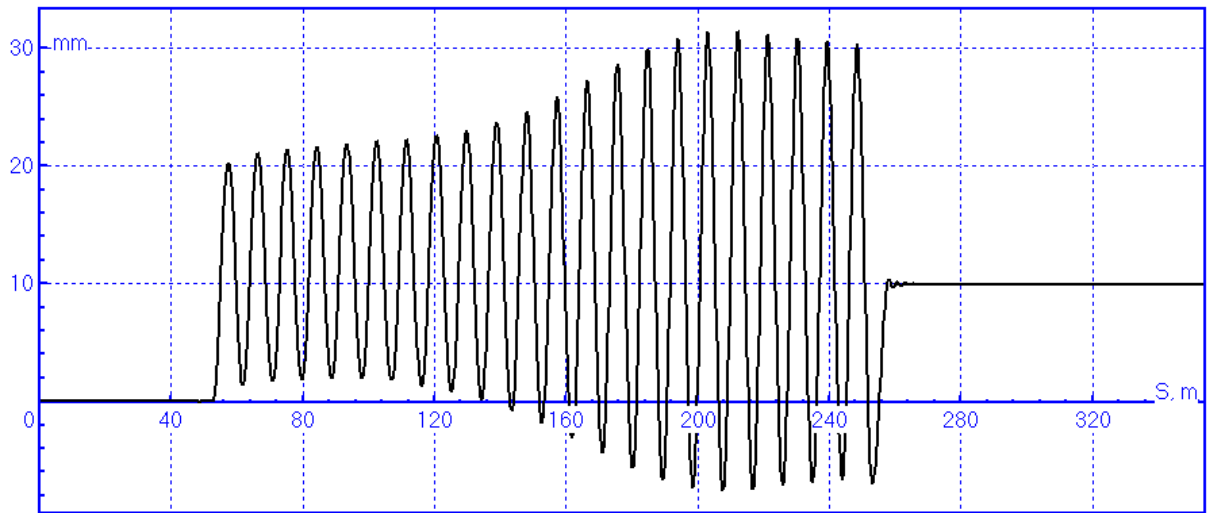
$k_v = 100$  кНс/м. Идентификатор для коэффициента усиления: *dpropul*.



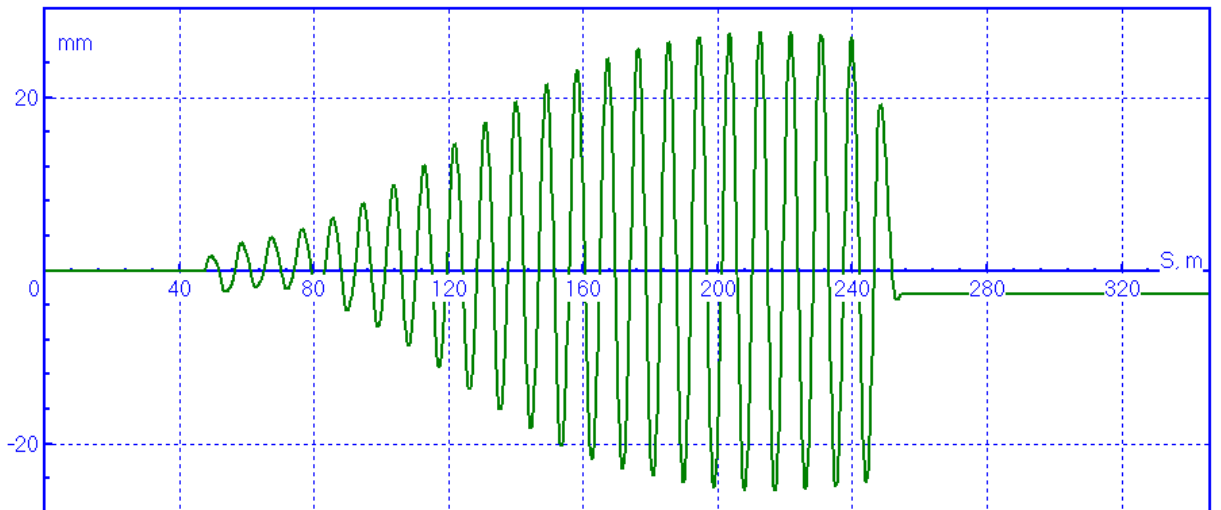
Вертикальное смещение центра кузова



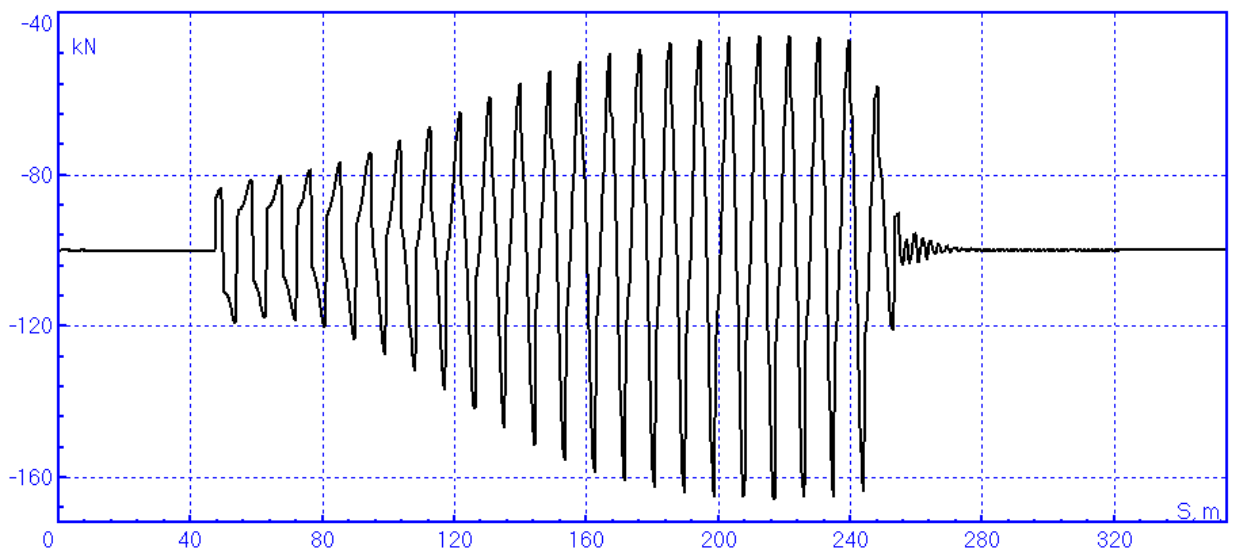
Вертикальное смещение кузова над передней колесной парой



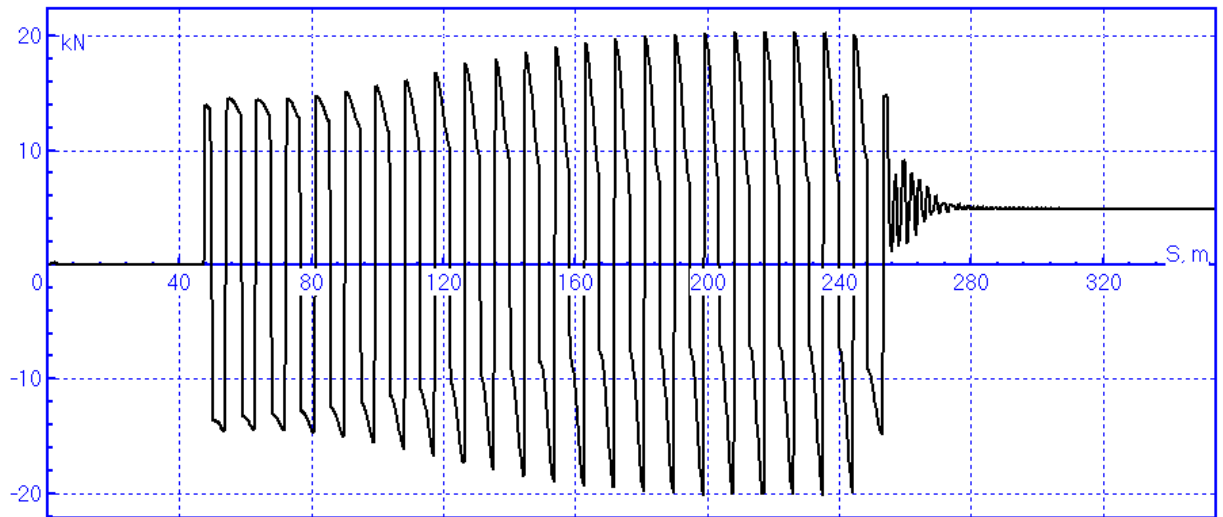
Вертикальное смещение кузова над задней колесной парой



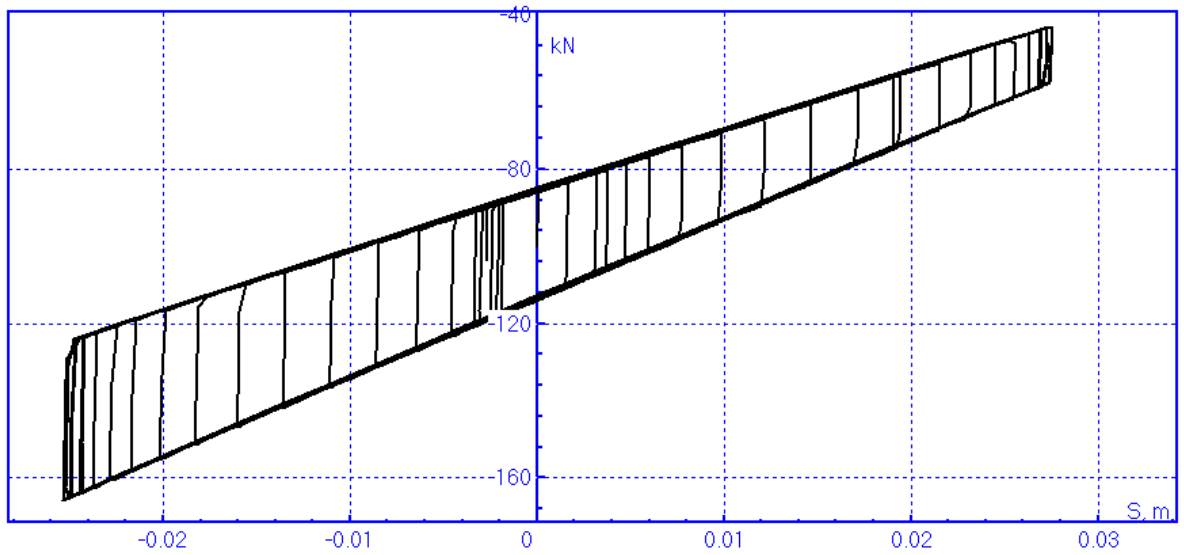
Вертикальное перемещение в левое передней подвеске



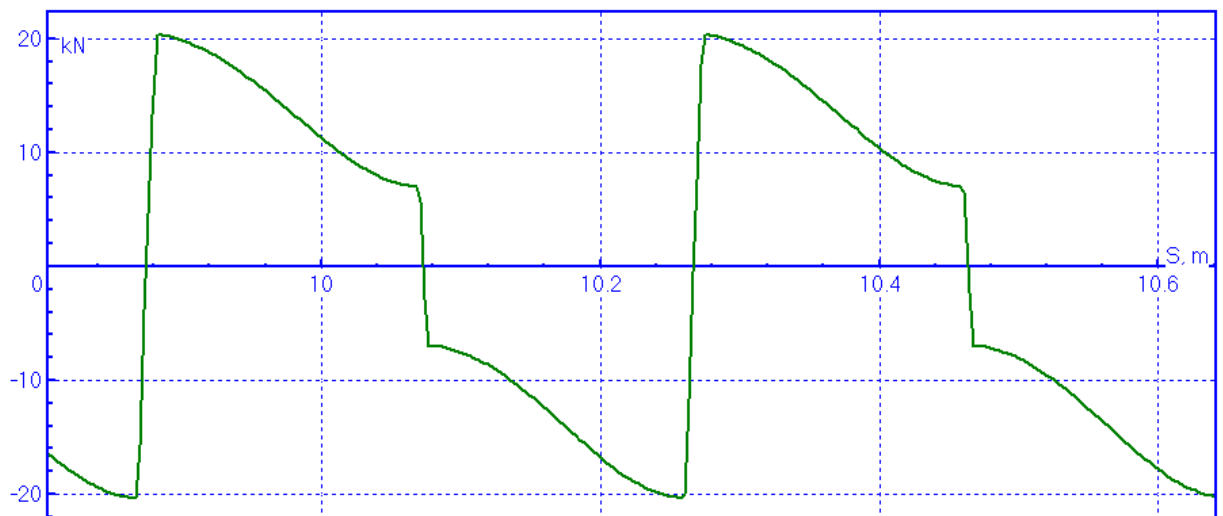
Суммарная вертикальная сила в передней левой подвеске



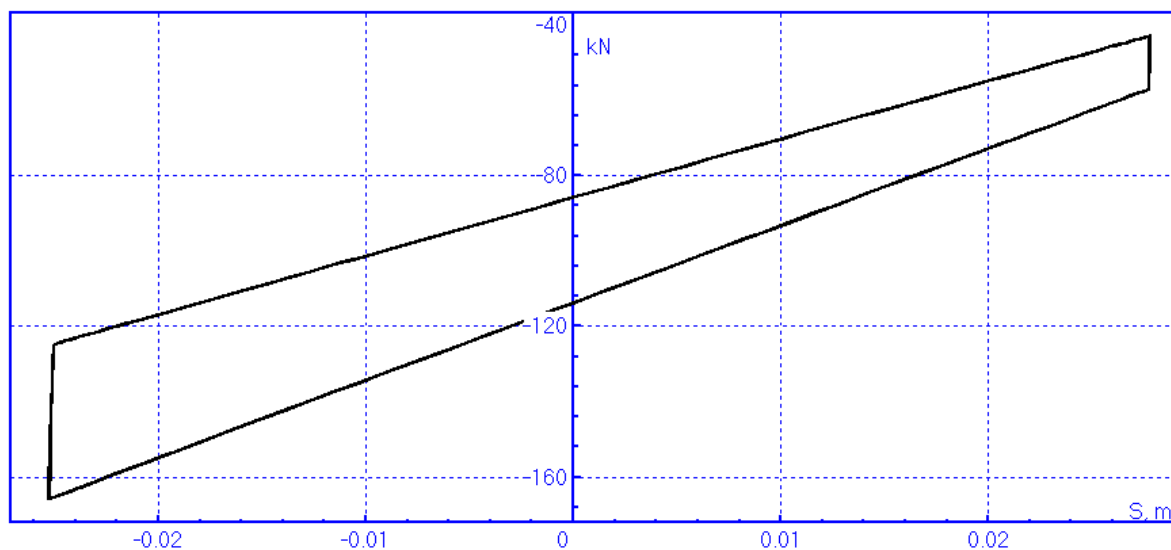
Сила трения в передней левой подвеске



Гистерезис: суммарная вертикальная сила в передней левой подвеске в зависимости от вертикального перемещения в подвеске



Два цикла силы трения в передней левой подвеске при максимальном нагружении



Два цикла гистерезиса при максимальном нагружении: суммарная вертикальная сила в передней левой подвеске в зависимости от вертикального перемещения в подвеске