



Решение задач общего  
машиностроения в  
программном комплексе

**У**ниверсальный **М**еханизм

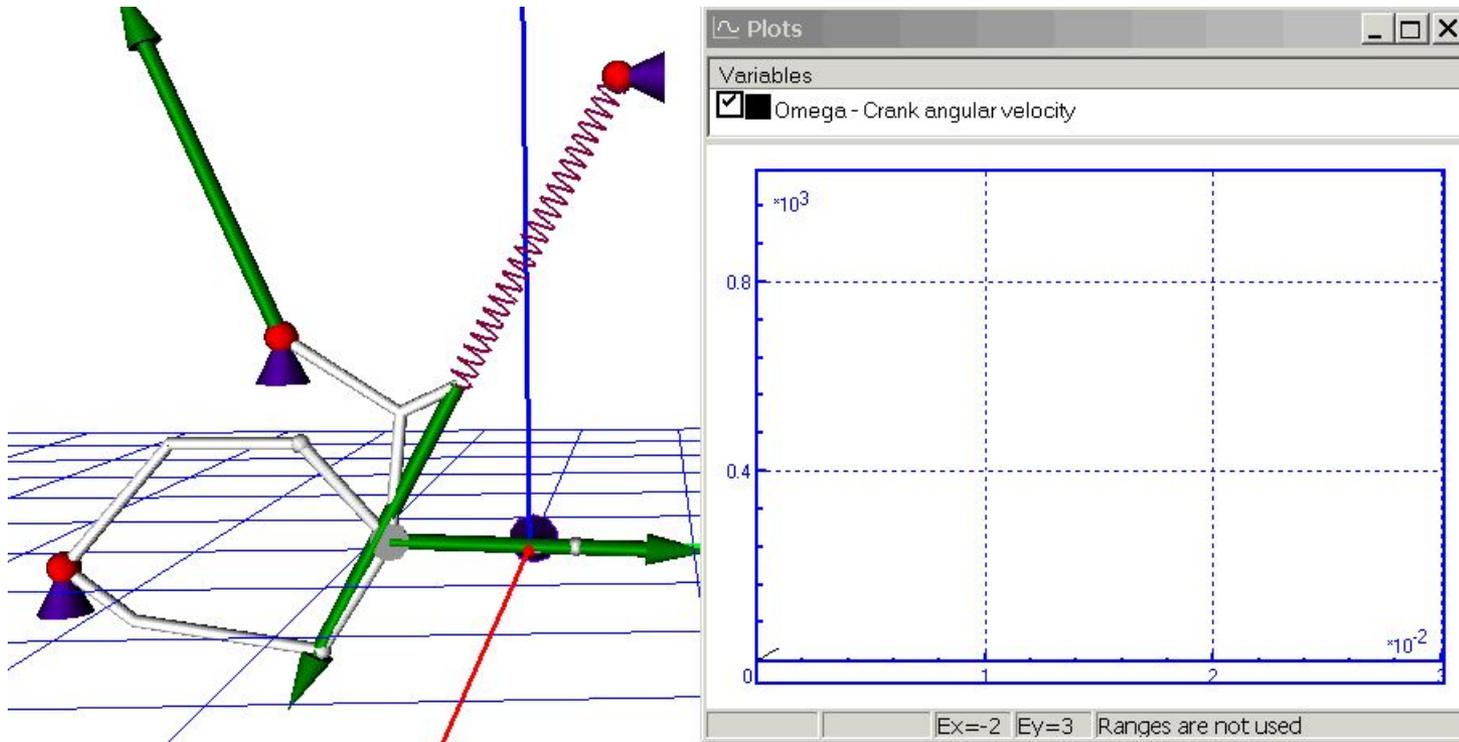
[www.umlab.ru](http://www.umlab.ru)

[um@umlab.ru](mailto:um@umlab.ru)

Все анимации, иллюстрации, результаты моделирования, приведенные в данной презентации, выполнены с использованием моделей и стандартных инструментов программного комплекса «Универсальный механизм»

- Примеры моделирования
- Механическая система как объект моделирования
- Создание моделей
- Анализ динамики моделей
- Верификация программного комплекса

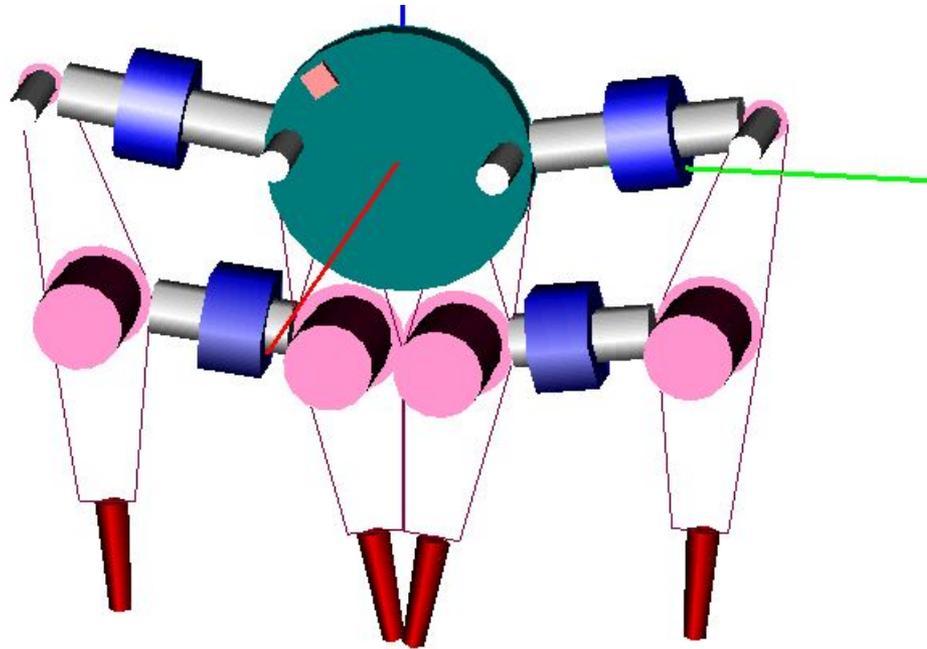
## Плоские механизмы



Тестовая задача для программ моделирования динамики систем с замкнутыми кинематическими цепями.

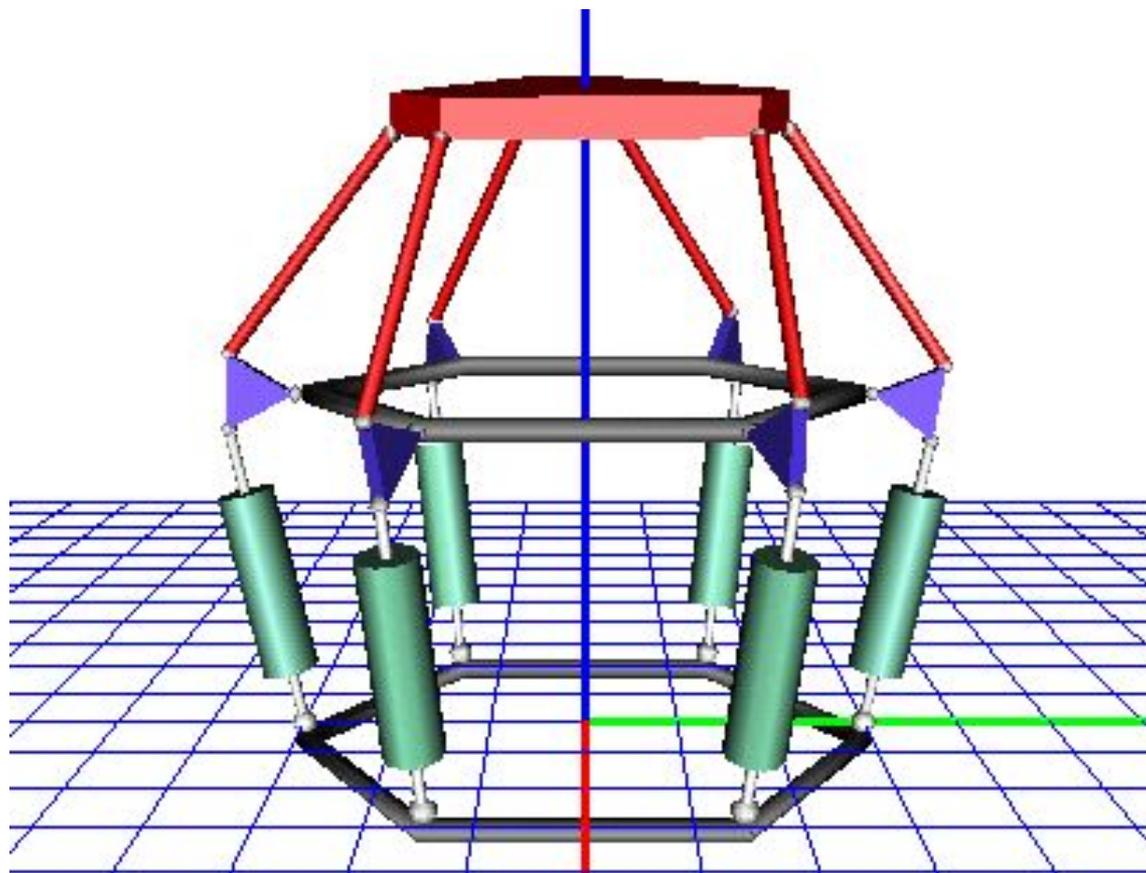
Источник: Schiehlen W. (Ed.) Multibody Systems Handbook. Berlin,...: Springer Verlag, 1990.

## Плоские механизмы



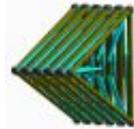
Механизм виброуплотнения  
железнодорожного балласта

## Пространственные механизмы



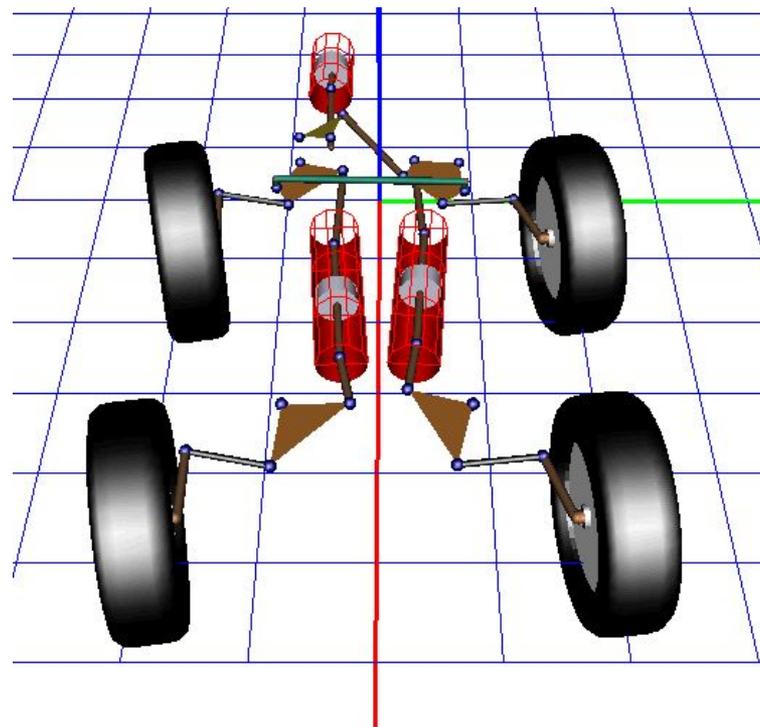
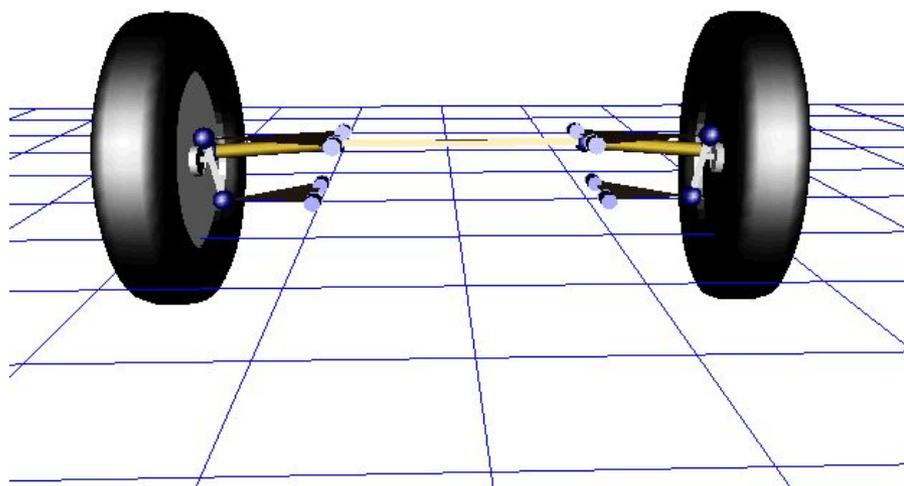
Динамическая платформа

## Пространственные механизмы

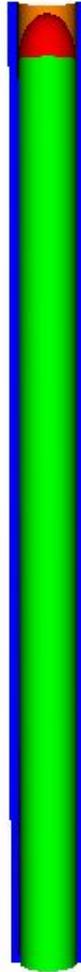


Самораспаковывающаяся космическая ферма

## Пространственные механизмы



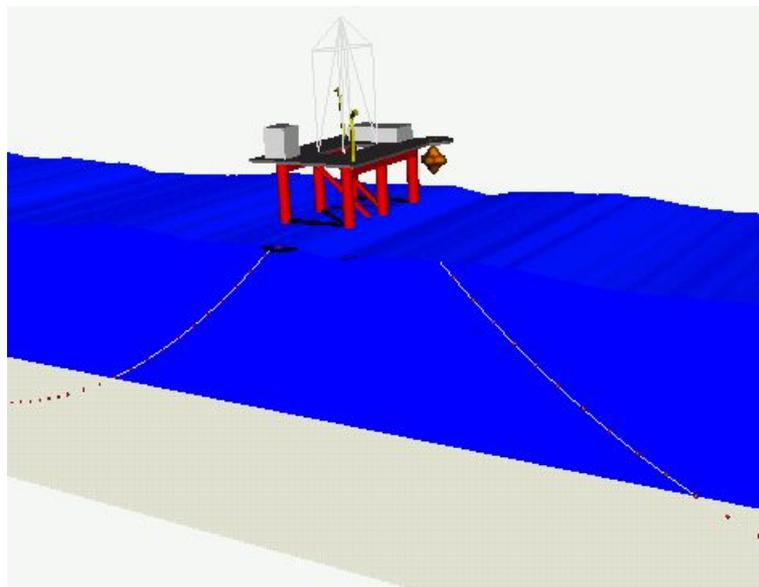
Кинематика подвески автомобилей

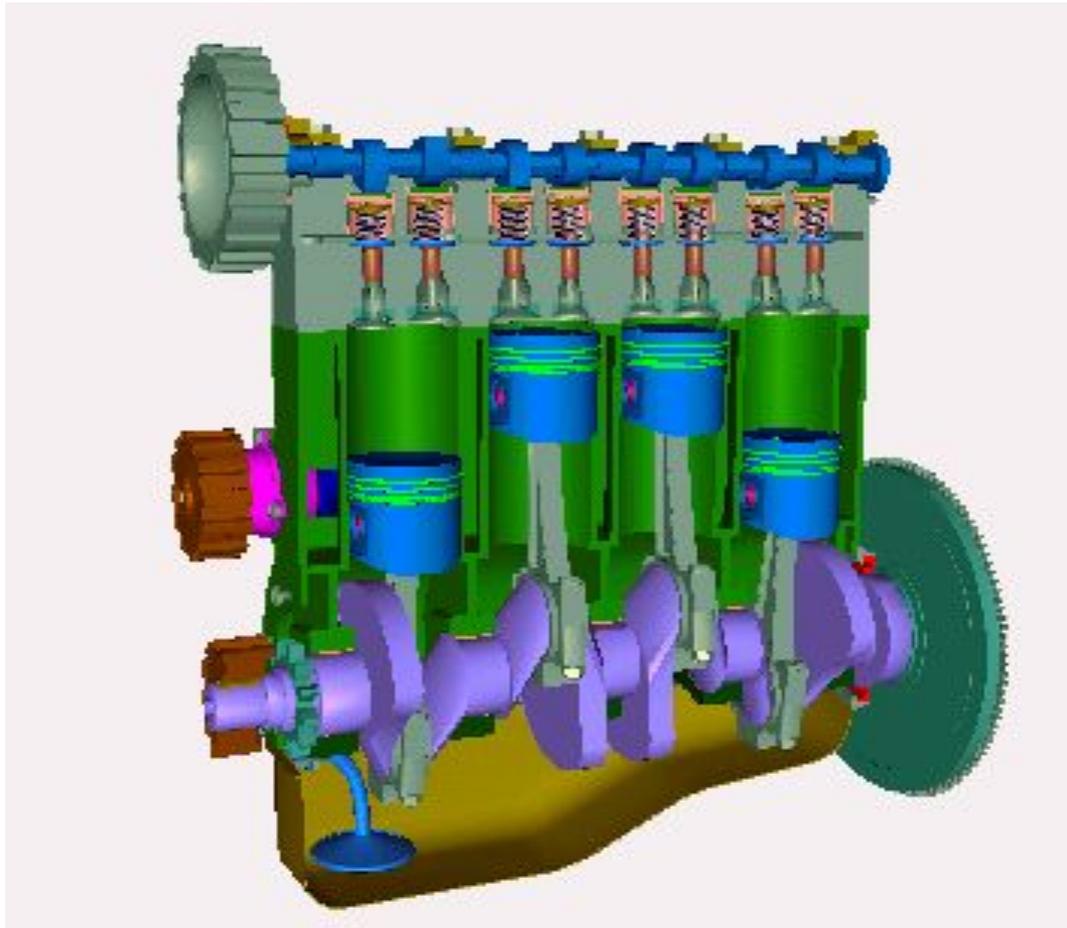


ЦКБ «Новатор», Екатеринбург

## Моделирование динамики плавучей нефтяной платформы с учетом гидродинамических сил

Автор: Dr.-Ing. U. Wilke (TUHH, Germany)



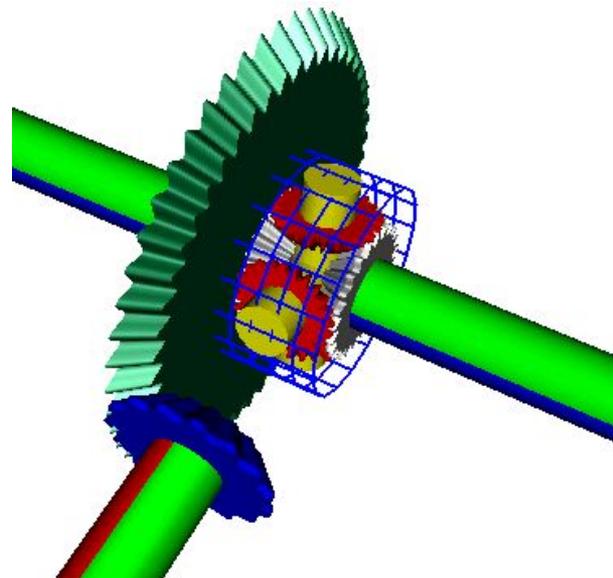
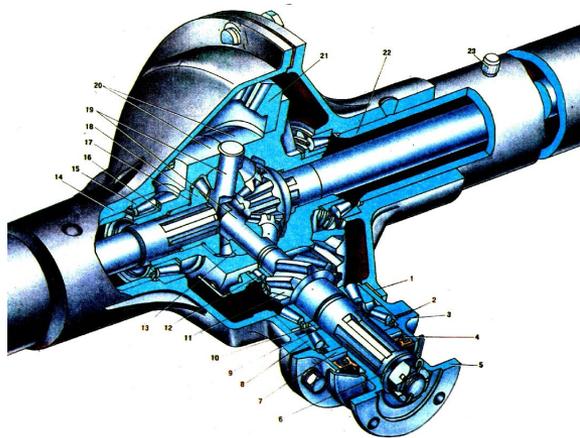


# Динамика автомобиля УАЗ на ухабе

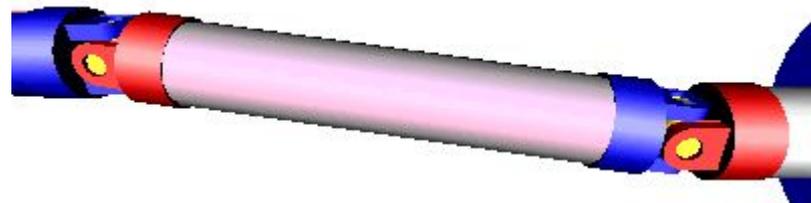
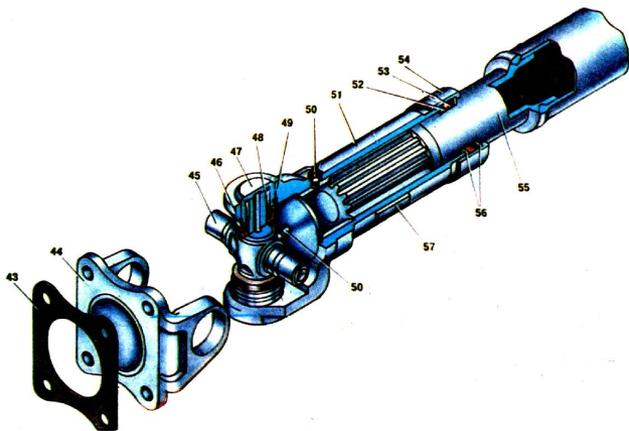
---



## Дифференциал



## Карданный вал

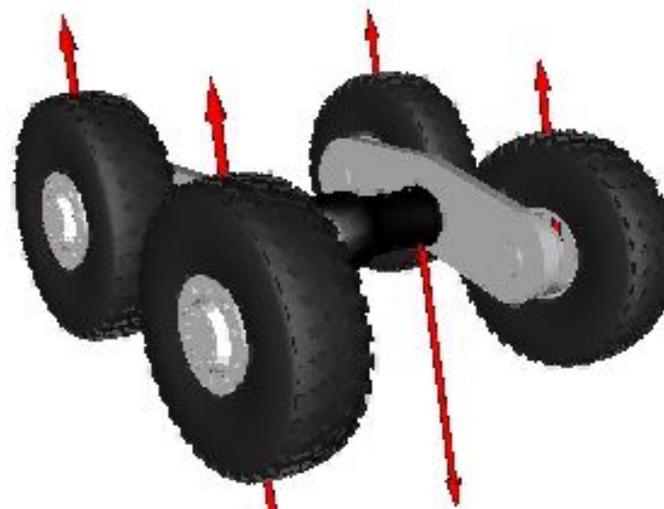


# Грейдер ГС 18-05



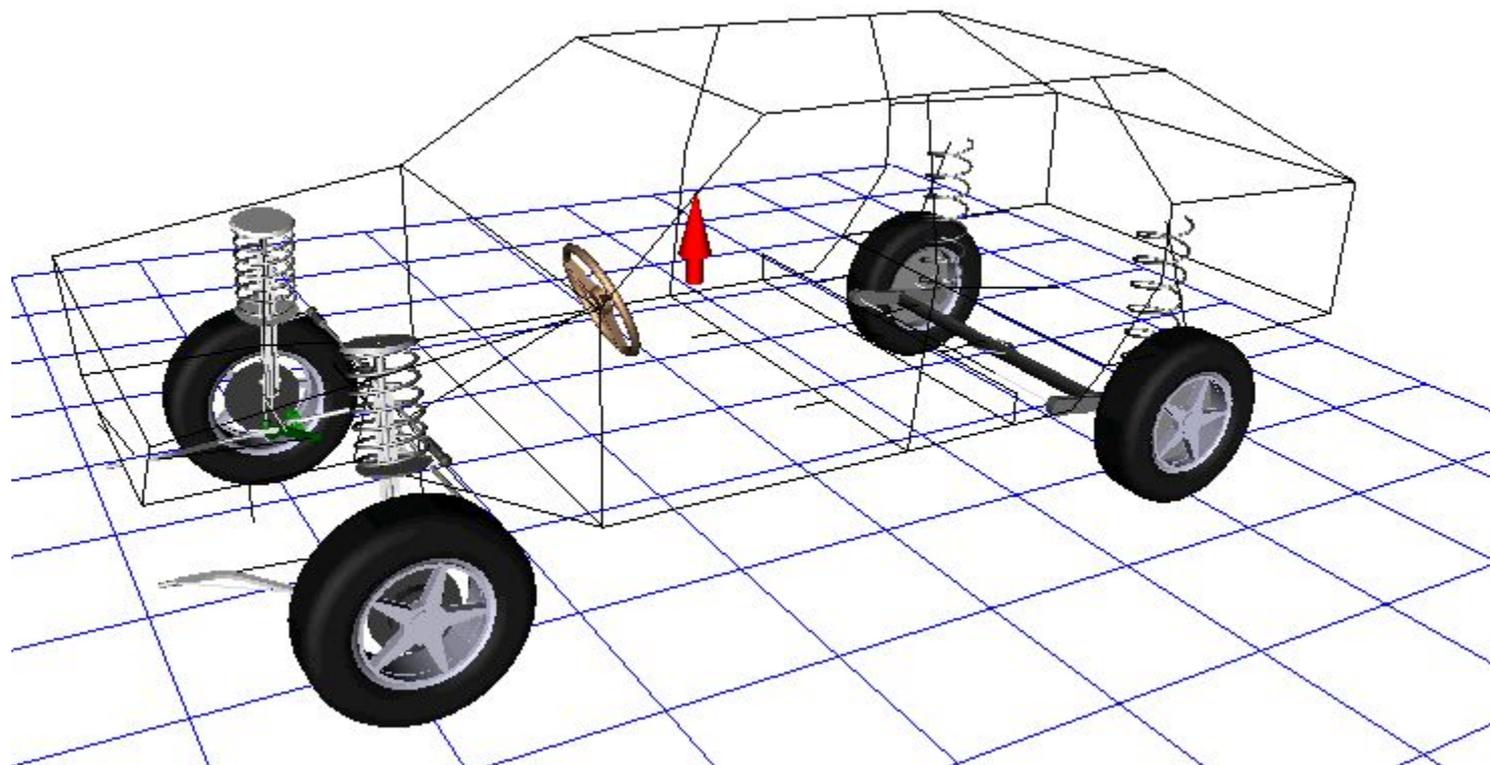
Грейдер ГС 18-05 производства  
ОАО «Брянский арсенал».

Скорость движения: 40 км/ч  
Покрытие: асфальт в  
удовлетворительном состоянии



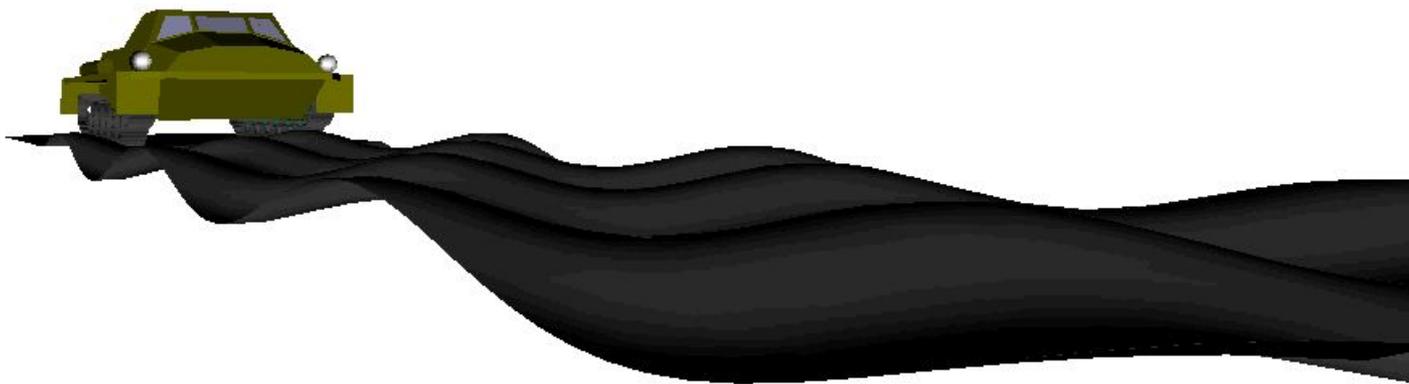
Автор: Говоров В.В., БГТУ

## Тест «вертикальная прокачка»



# Моделирование гусеничных экипажей

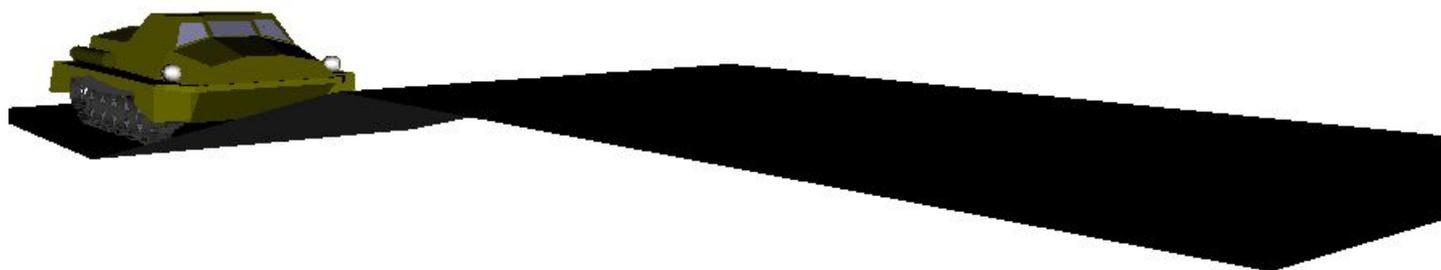
---



Результаты моделирования

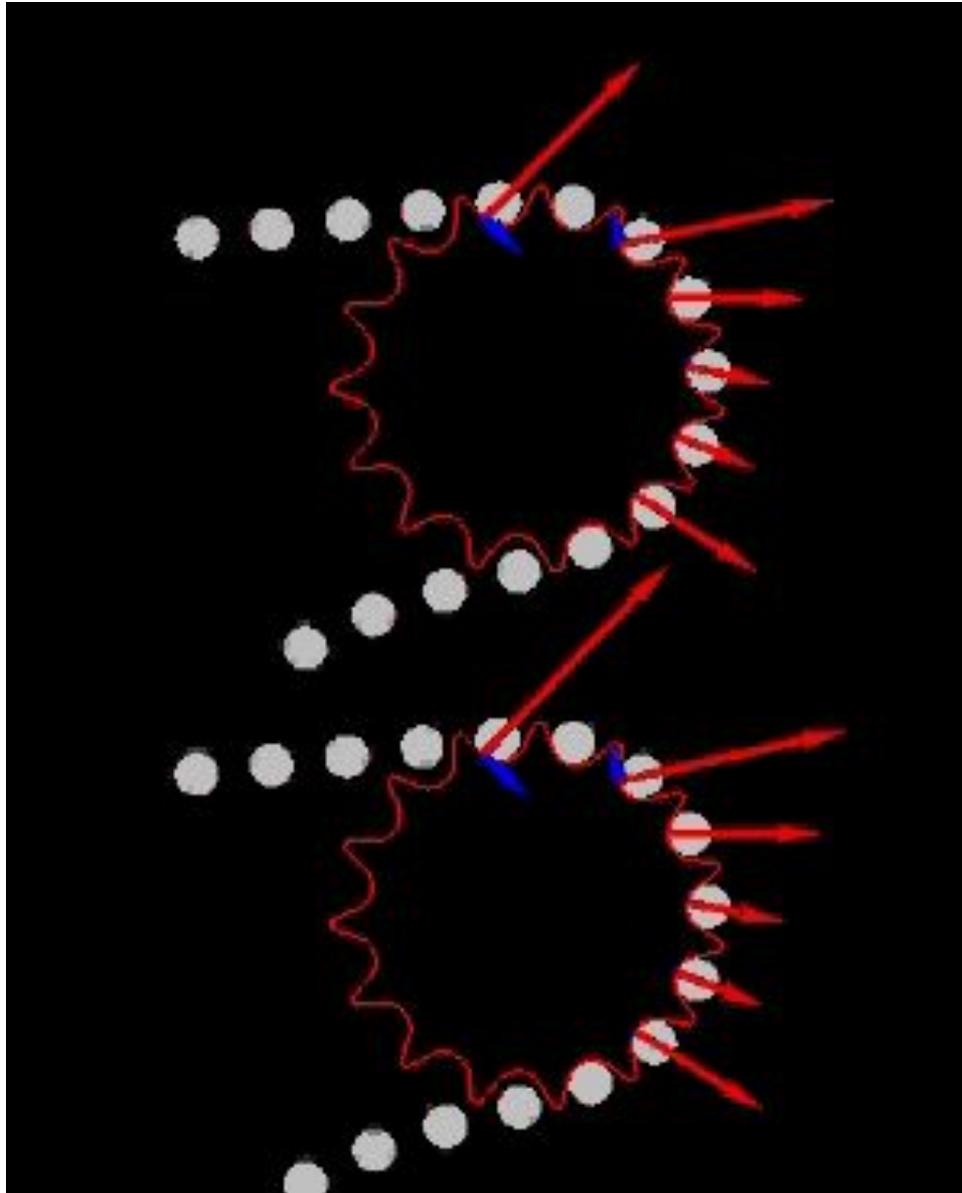
# Моделирование гусеничных экипажей

---



Результаты моделирования

# Взаимодействие гусеницы и звездочки

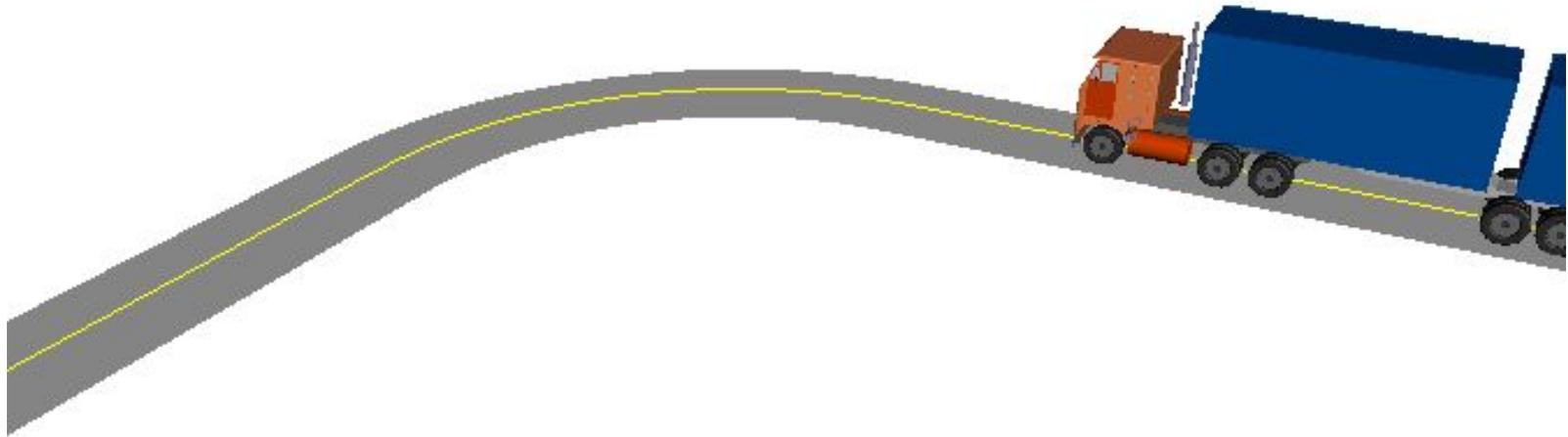


# Грузовик с прицепом

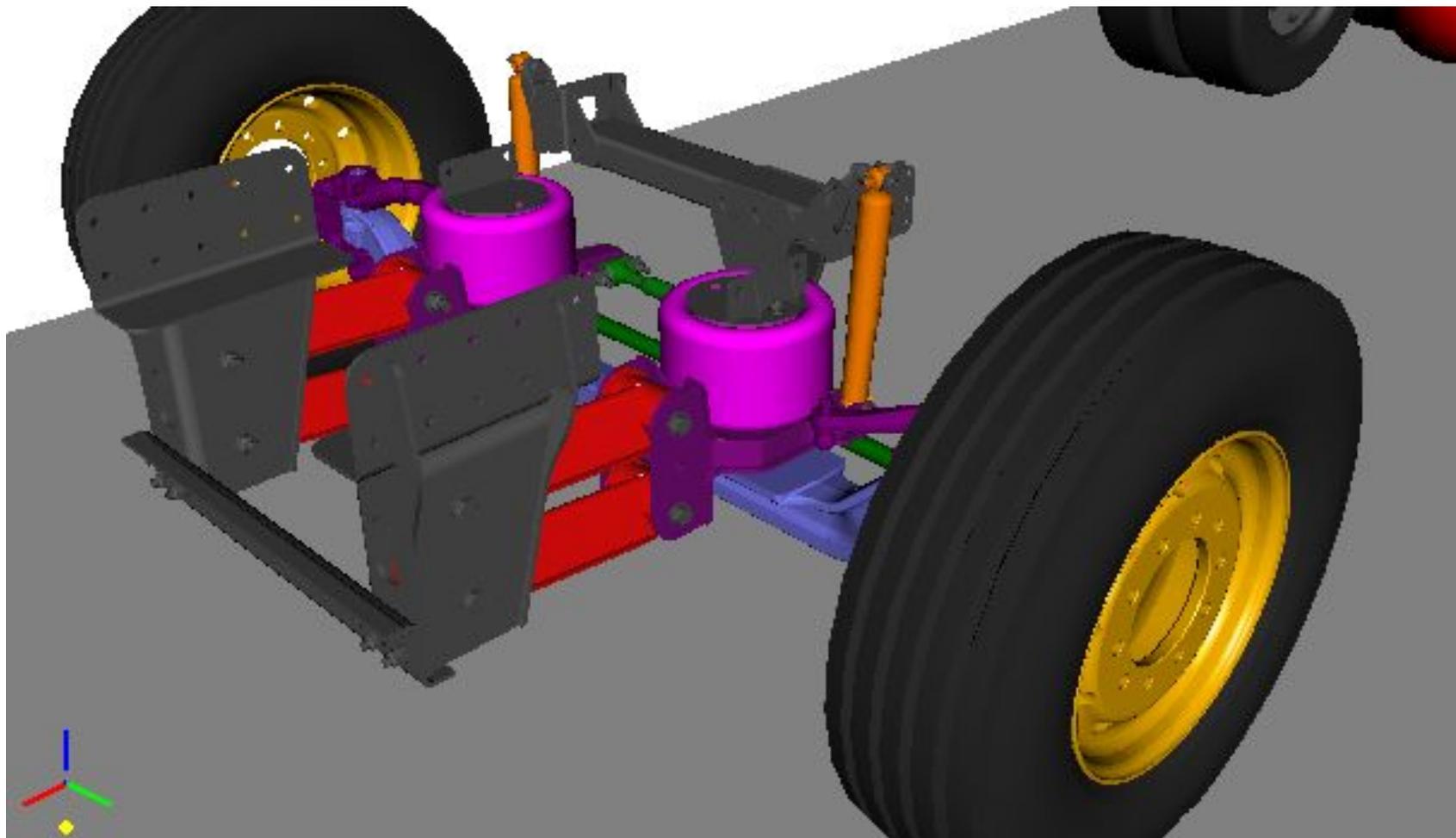
---



Смена полосы движения,  $V=88$  км/ч



Поворот на  $90^\circ$ ,  $V=10$  км/ч, радиус дуги 11,25 м

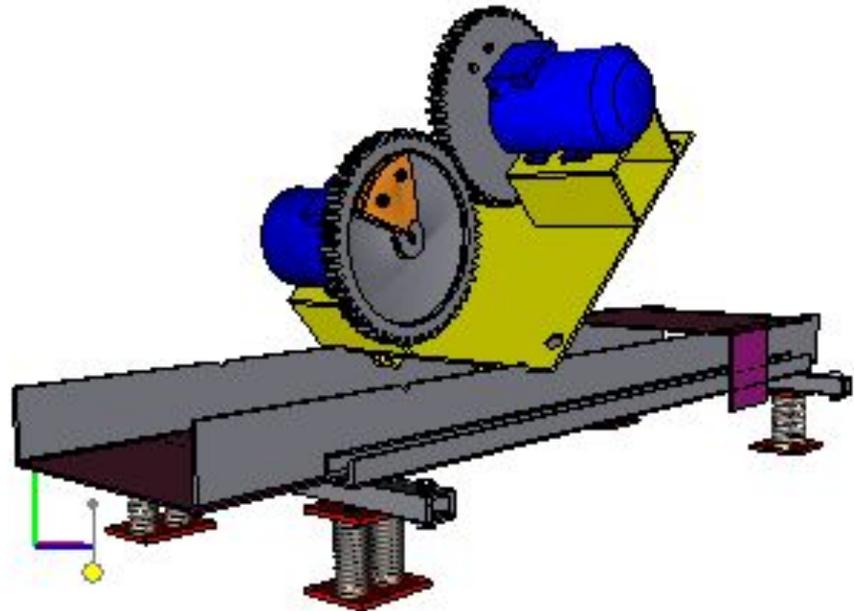


Бульжное покрытие,  $V=100$  км/ч.

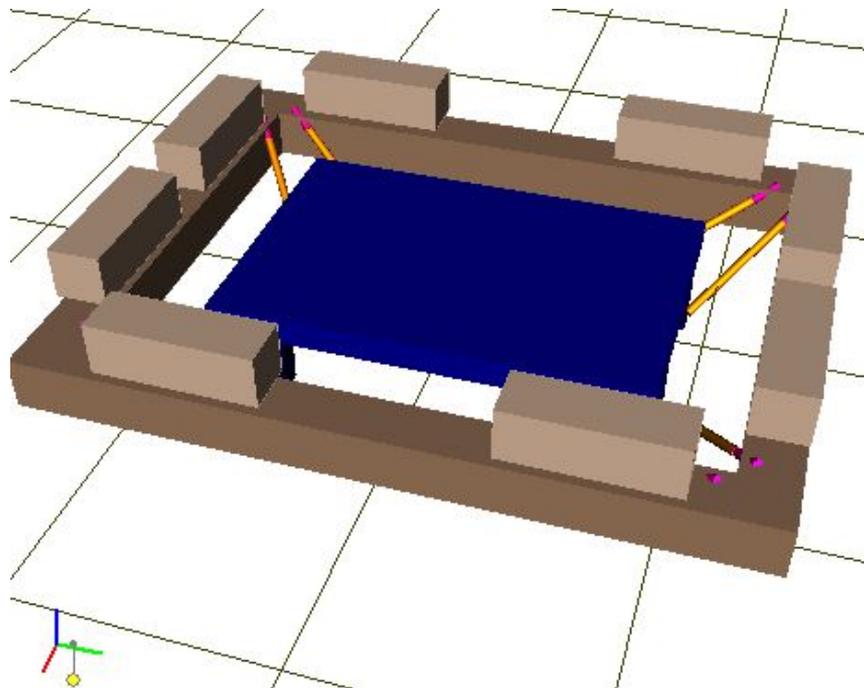
## Электростальский завод тяжелого машиностроения



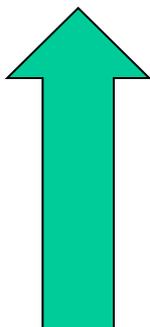
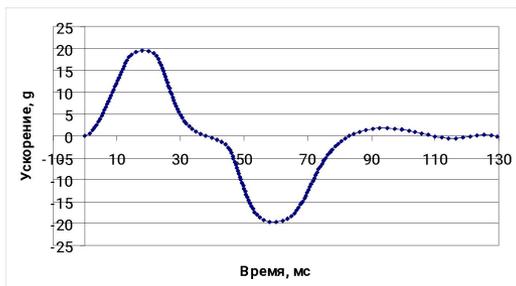
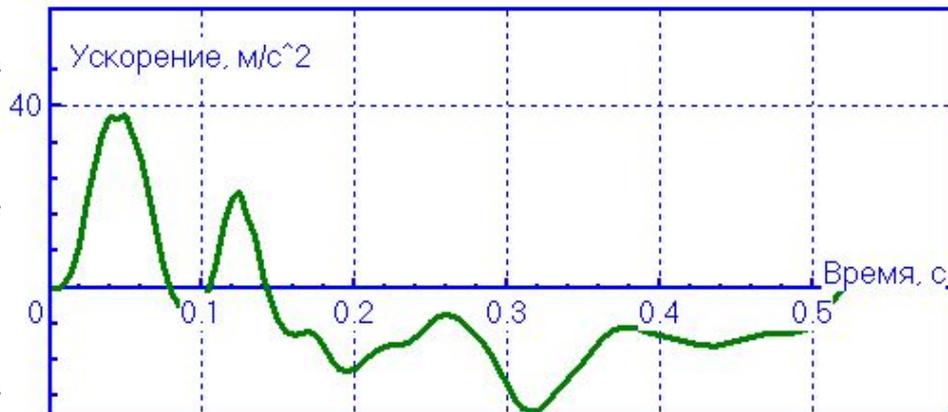
Макет грохота



Модель макета грохота. Трехмерная модель в КОМПАС-3D предоставлена ЭЗТМ.



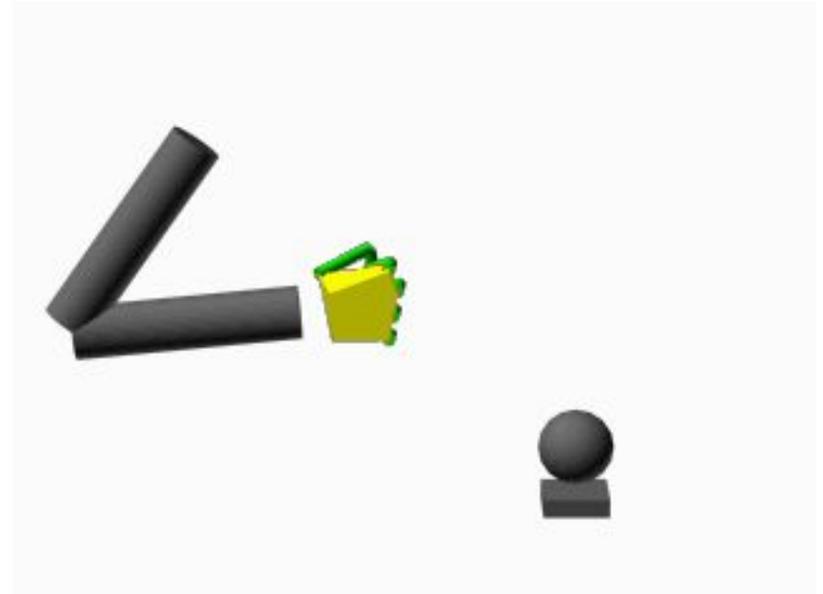
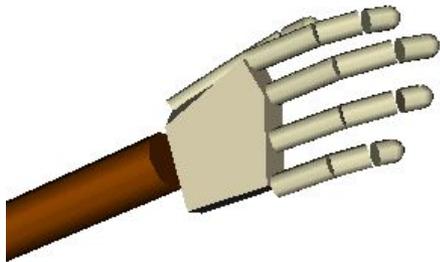
Максимальные ускорения в эксперименте: 4g



Запатентованная тросовая система виброзащиты, НИИ Автоматической Аппаратуры, Москва, 2007 г.

Кинематическое возбуждение из эксперимента

## Манипулятор «Рука»



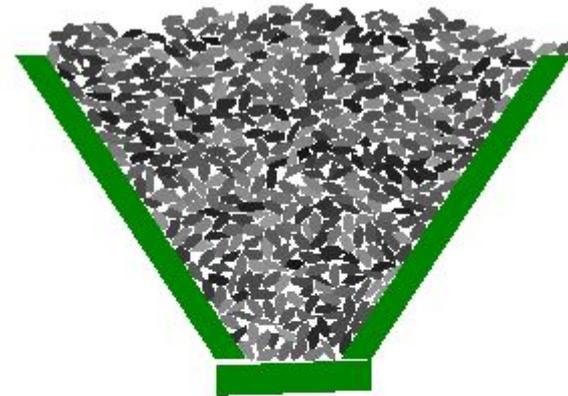
Разработчик: к.ф.-м.н. Селенский Е.Е.

# Плоская модель гранулярной среды

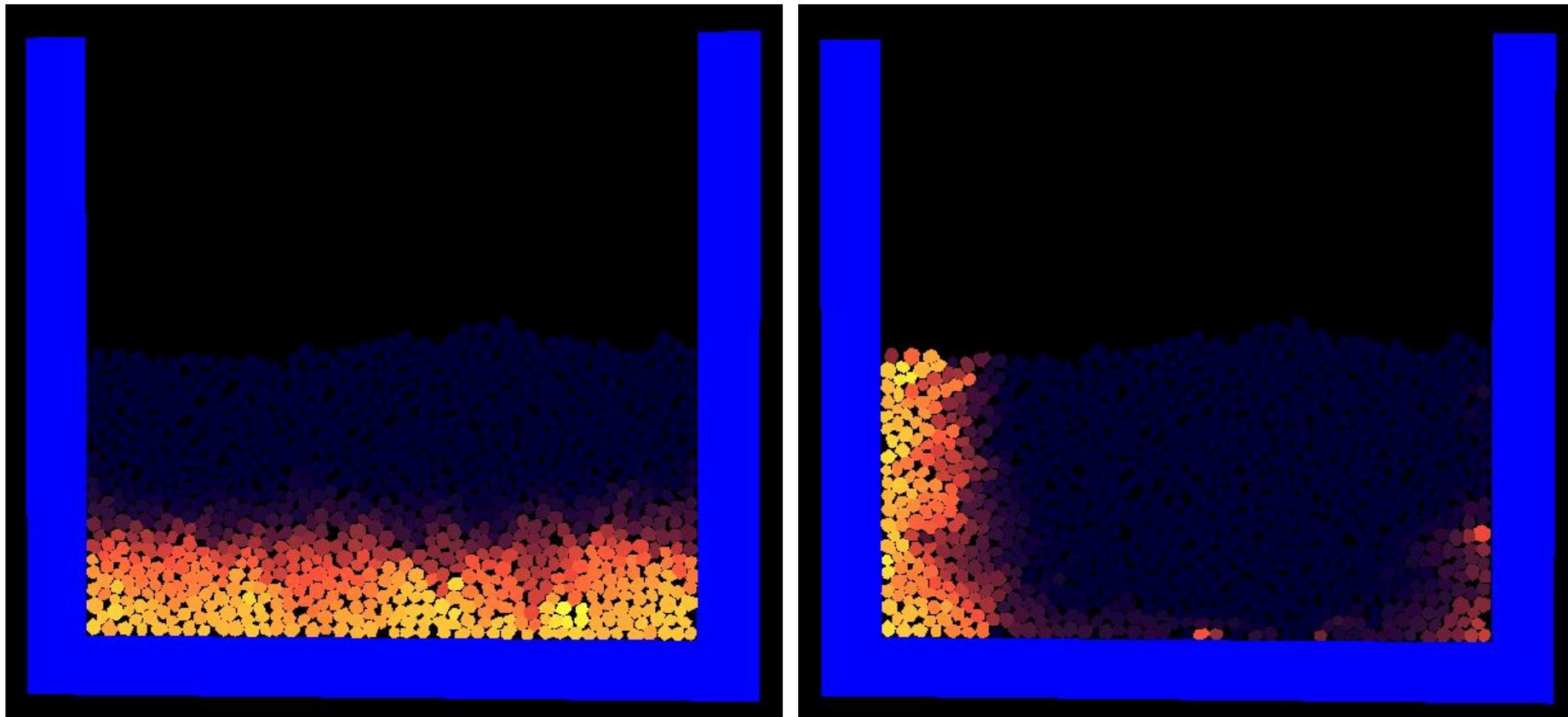
Моделирование гранулярной среды включает:

- создание частиц с учетом статистики;
- заполнение заданного объема;
- уплотнение.

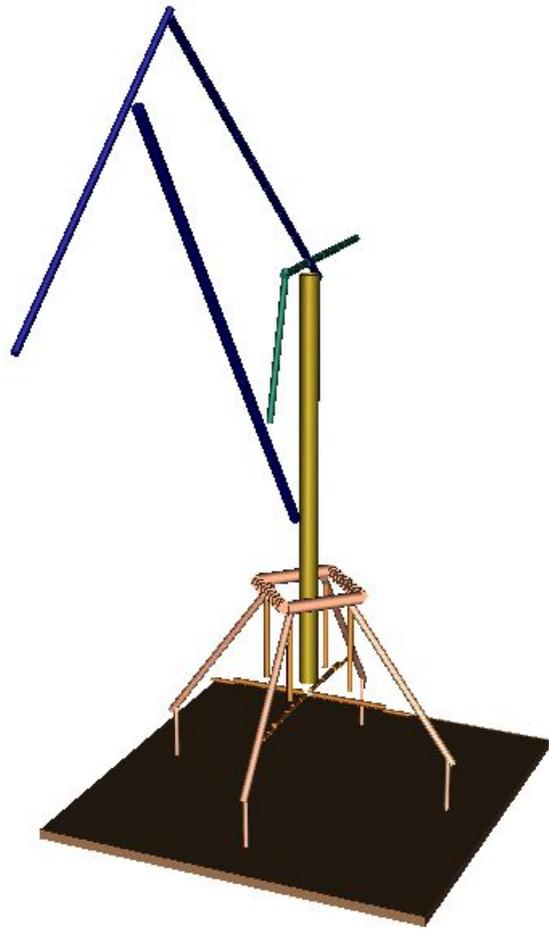
Разгрузка хоппера



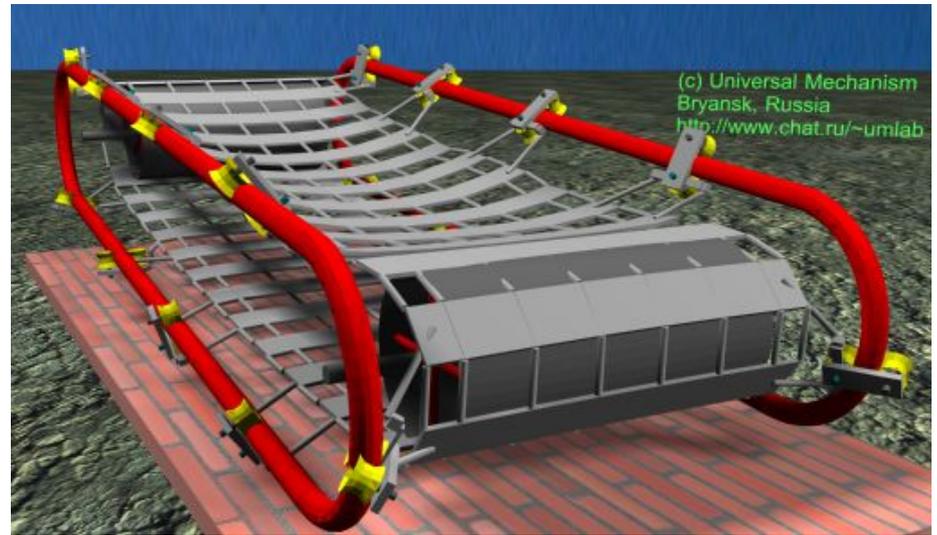
## Виброуплотнение



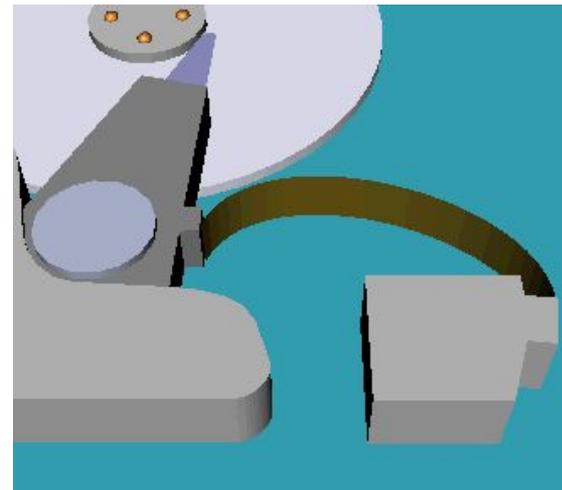
# Моделирование упругих тел



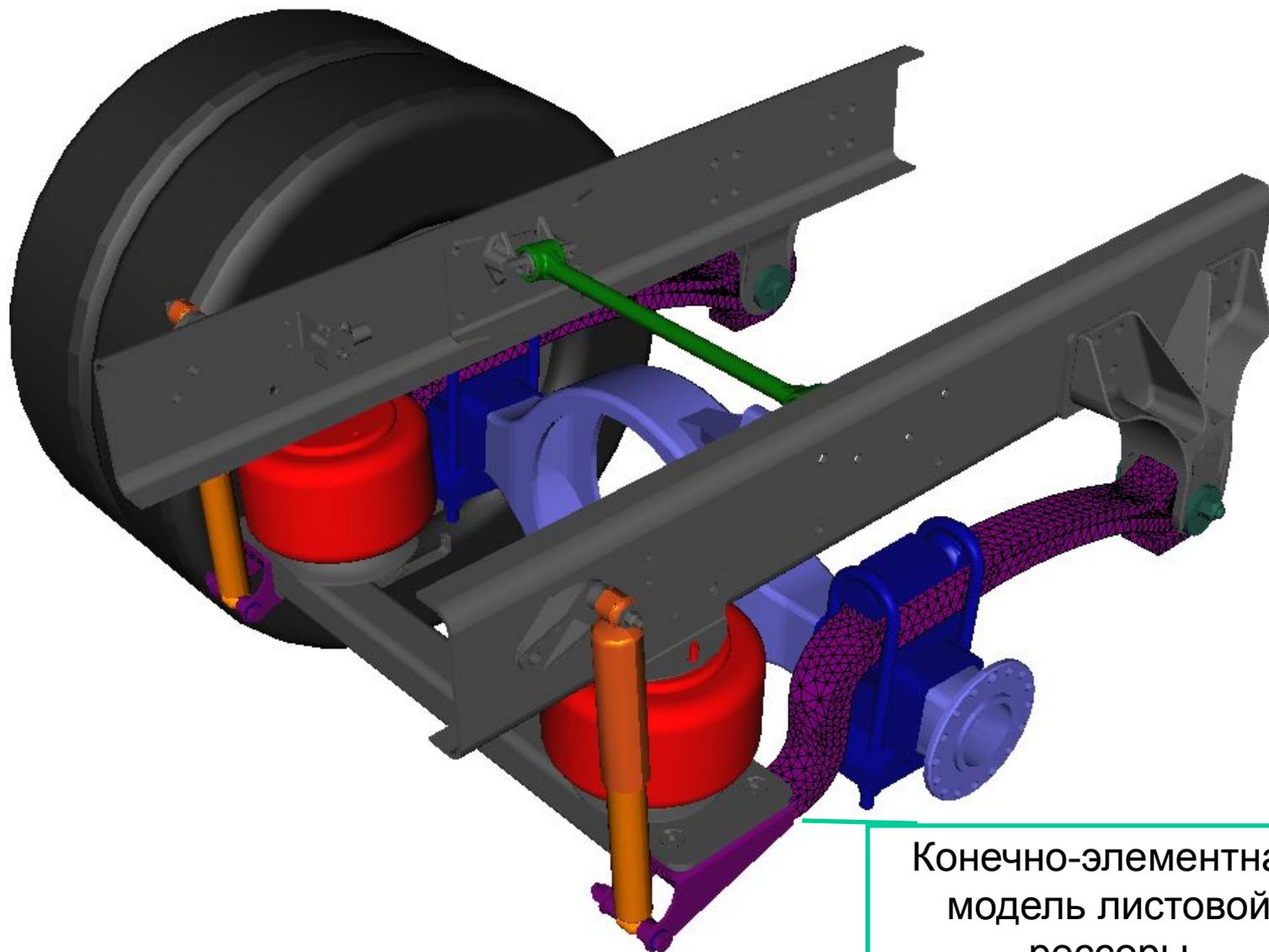
Портовый кран: первая  
собственная форма  
Более 200 твердых тел



Ленточный конвейер  
(202 тела, 495 степеней свободы)



Динамика упругого кабеля



Конечно-элементная  
модель листовой  
рессоры

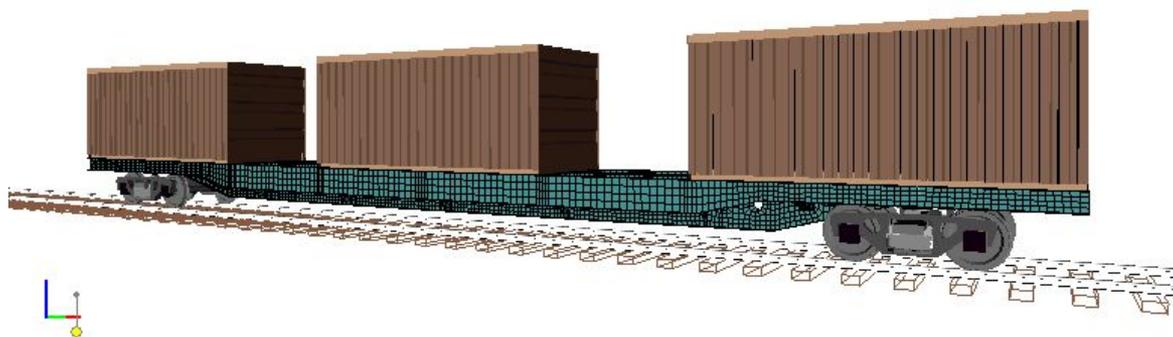
По заказу Hendrickson Pacific Ltd.

## Моделирование гибридных систем (систем твёрдых и упругих тел)

Импорт динамических и статических форм из МКЭ-программ  
(ANSYS, MSC.NASTRAN)



## Моделирование гибридных систем Импорт динамических и статических форм из МКЭ-программ (ANSYS, MSC.NASTRAN)



- Примеры моделирования
- Механическая система как объект моделирования
- Создание моделей
- Анализ динамики моделей
- Верификация программного комплекса

# Порядок создания и исследования модели

1

Исходная механическая система

2

Формирование исходных данных и концепции модели

3

Формирование кинематической схемы модели

4

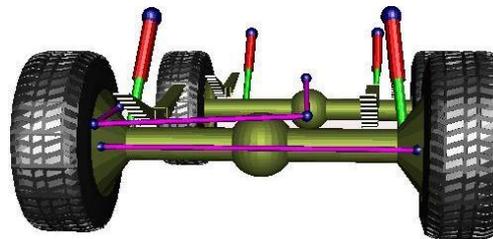
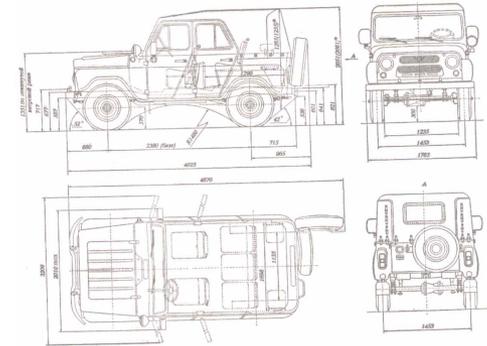
Формирование динамической схемы модели

5

Автоматический вывод уравнений движения

6

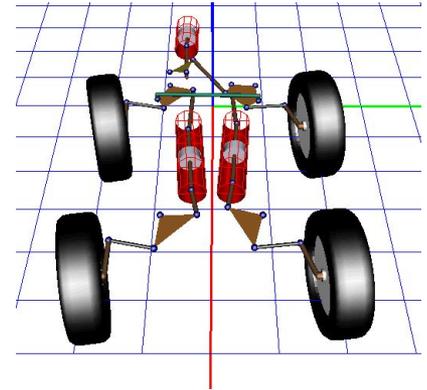
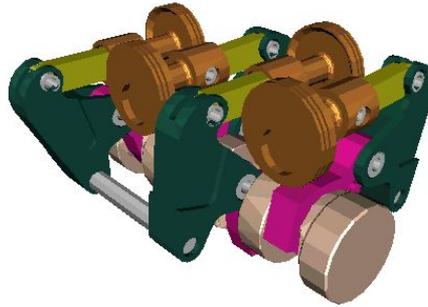
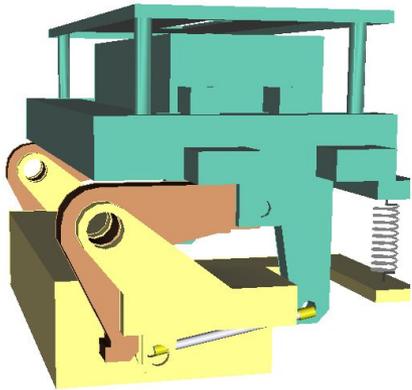
Исследование динамики модели



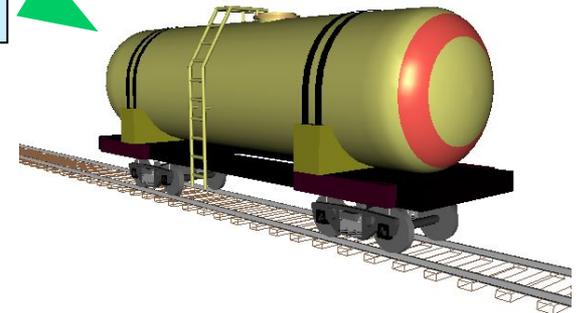
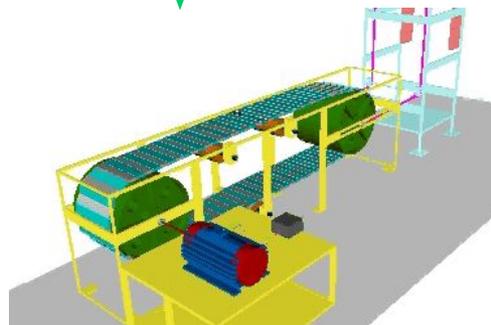
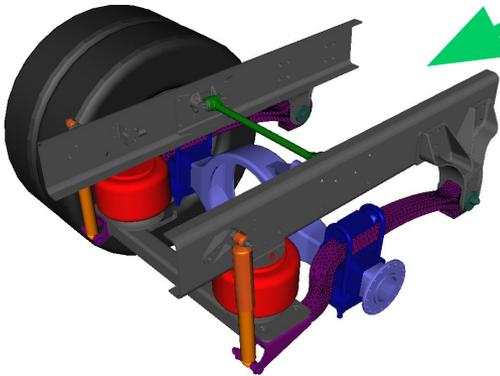
$$M(q)\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q(q, \dot{q}, t)$$



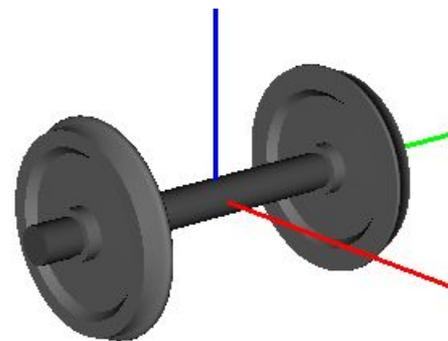
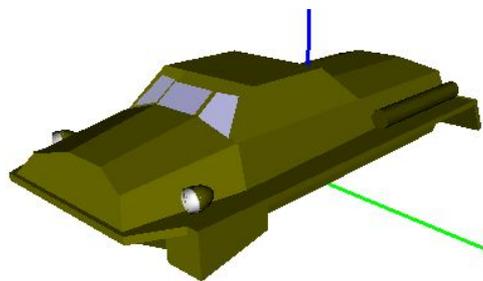
# Механическая система как объект моделирования



Тела  
+  
Шарниры  
+  
Силовые элементы

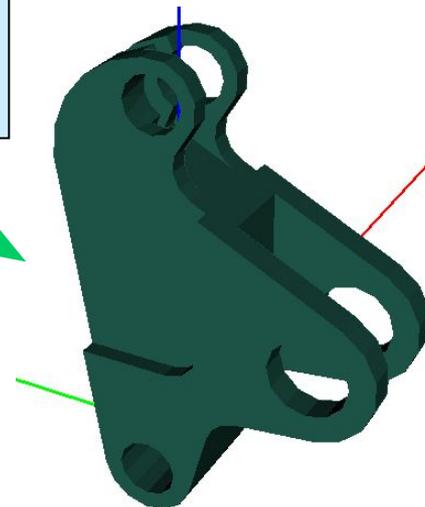
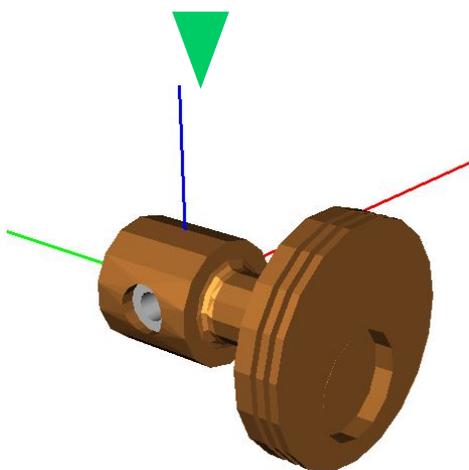
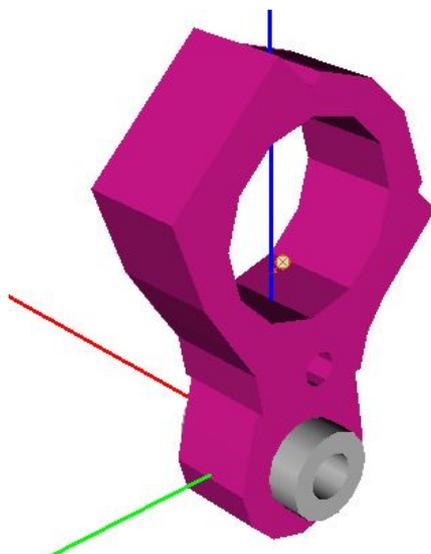


# Твердые тела



Твердые тела:

- Графический образ
- Инерционные параметры

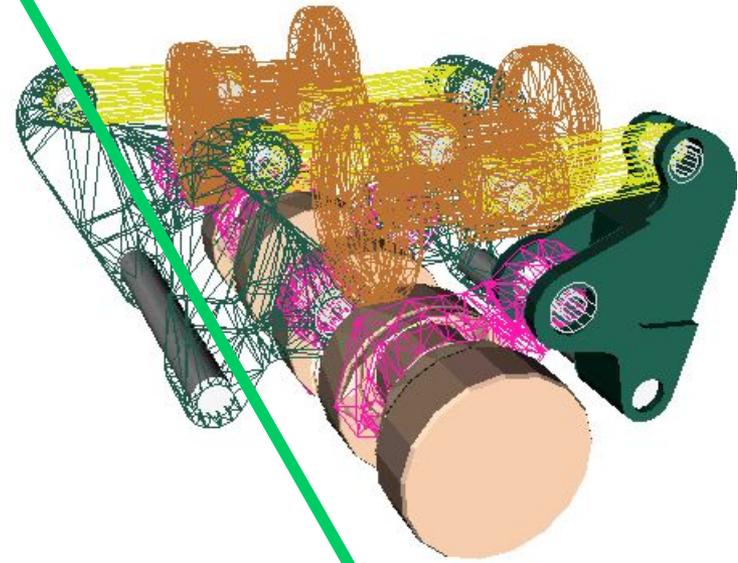
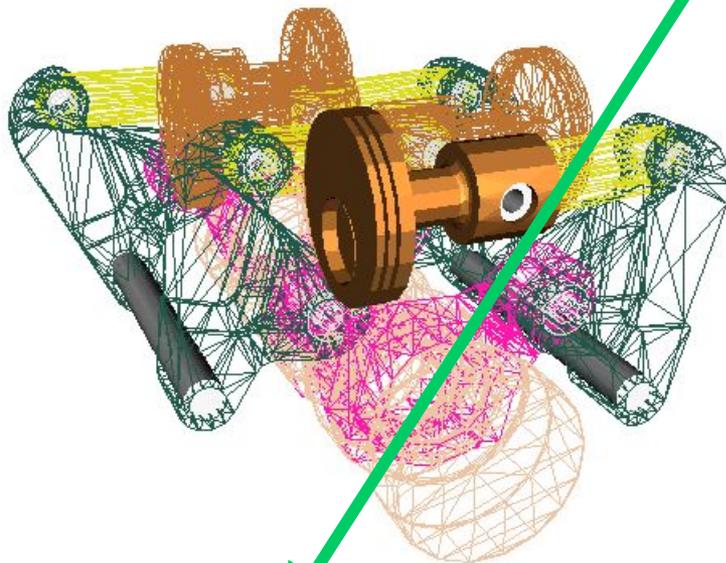


# Шарниры

Шарниры

Поступательный

Вращательный

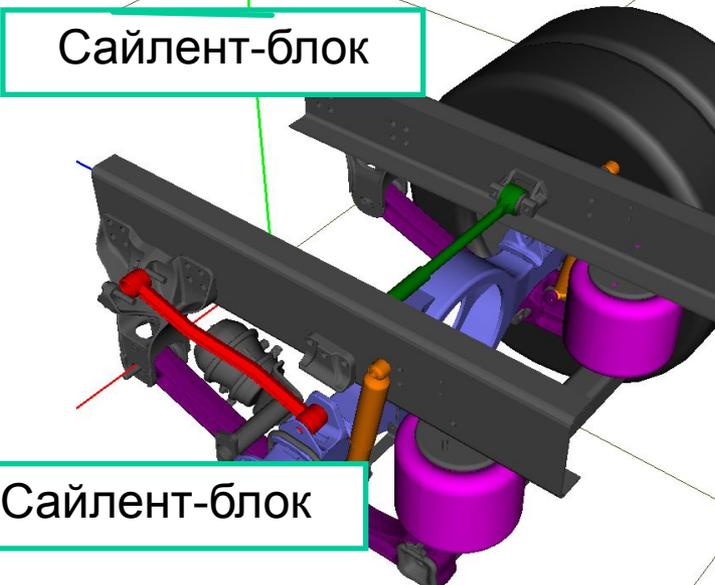


2 - 6 степеней  
свободы

Стержень

Кватернионный

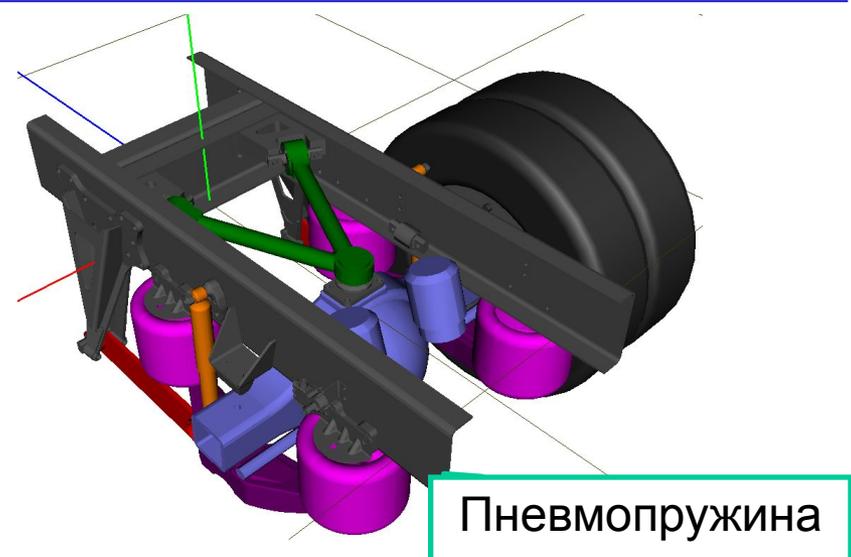
# Силовые элементы



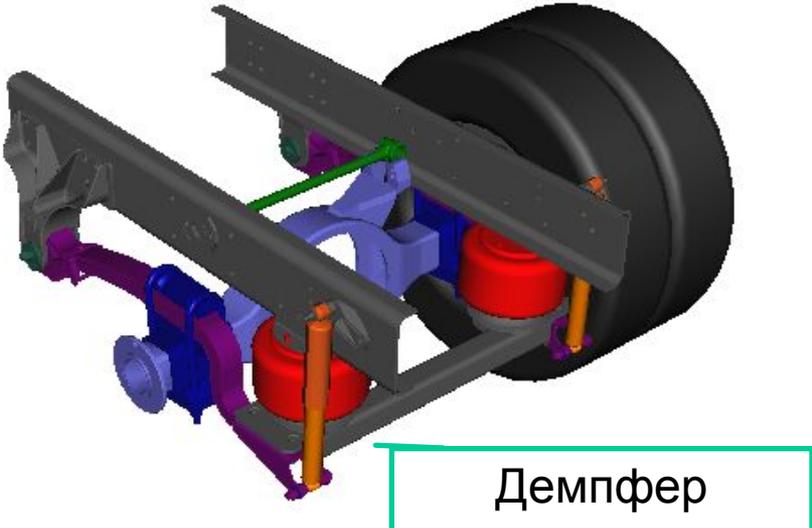
Сайлент-блок



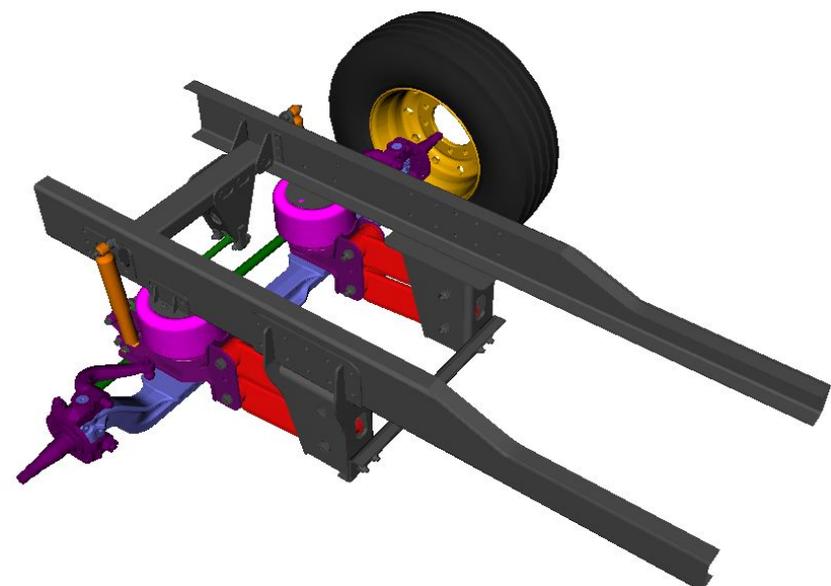
Сайлент-блок



Пневмопружина



Демпфер

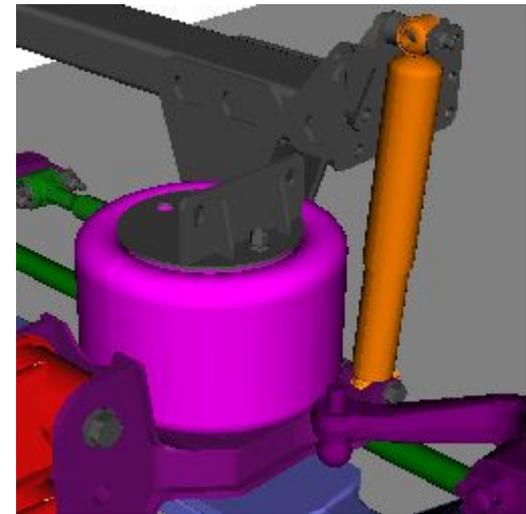
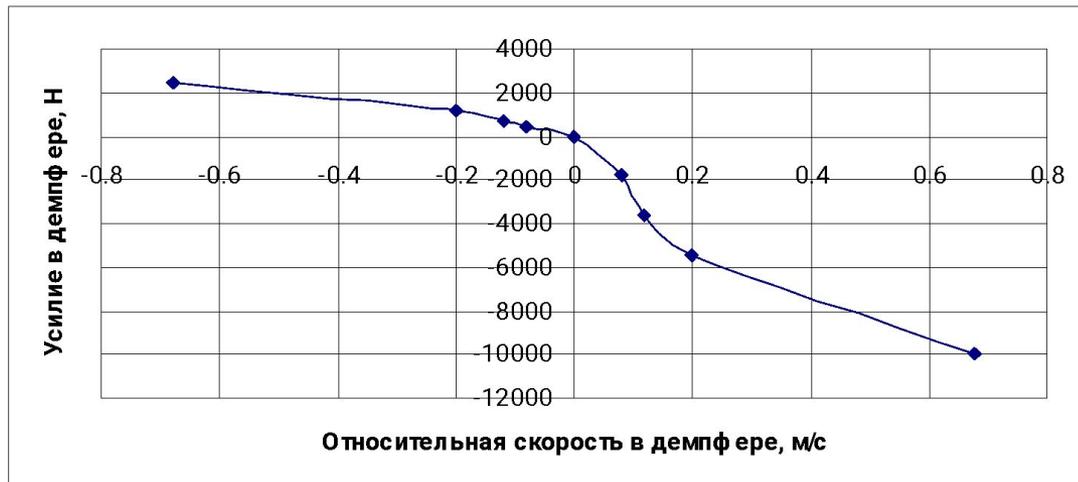


По заказу Hendrickson Pacific Ltd.

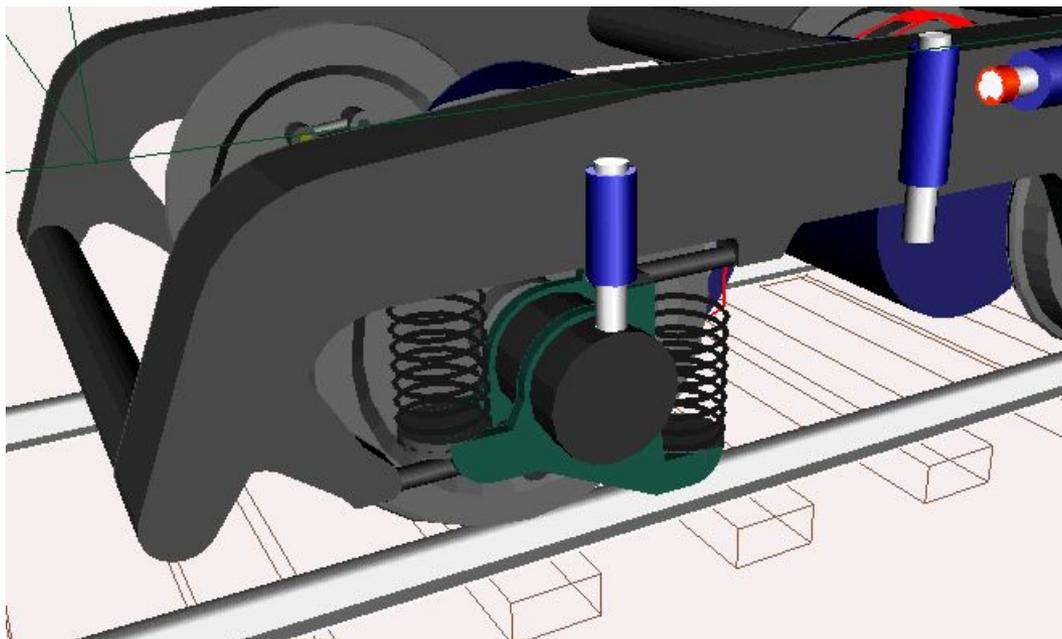
## Пневмопружины



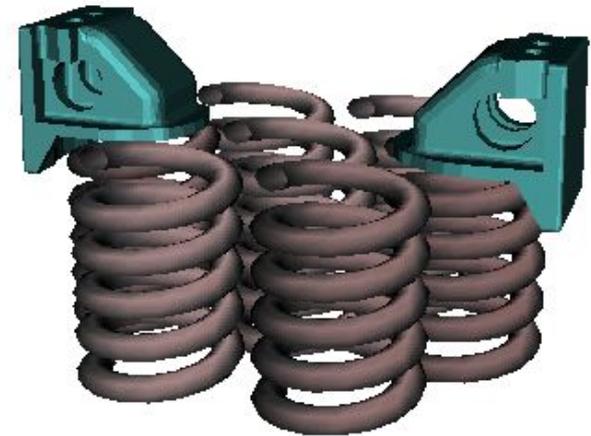
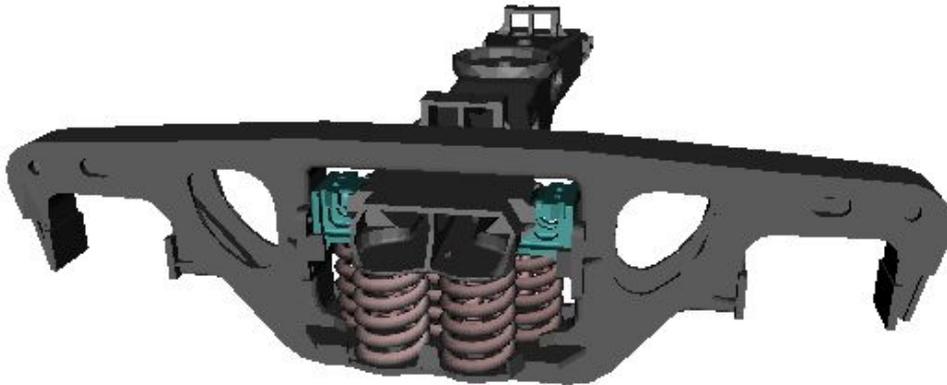
## Демферы



Линейный силовой элемент: пружины  
Биполярный силовой элемент: демпферы, тяги и т.д.



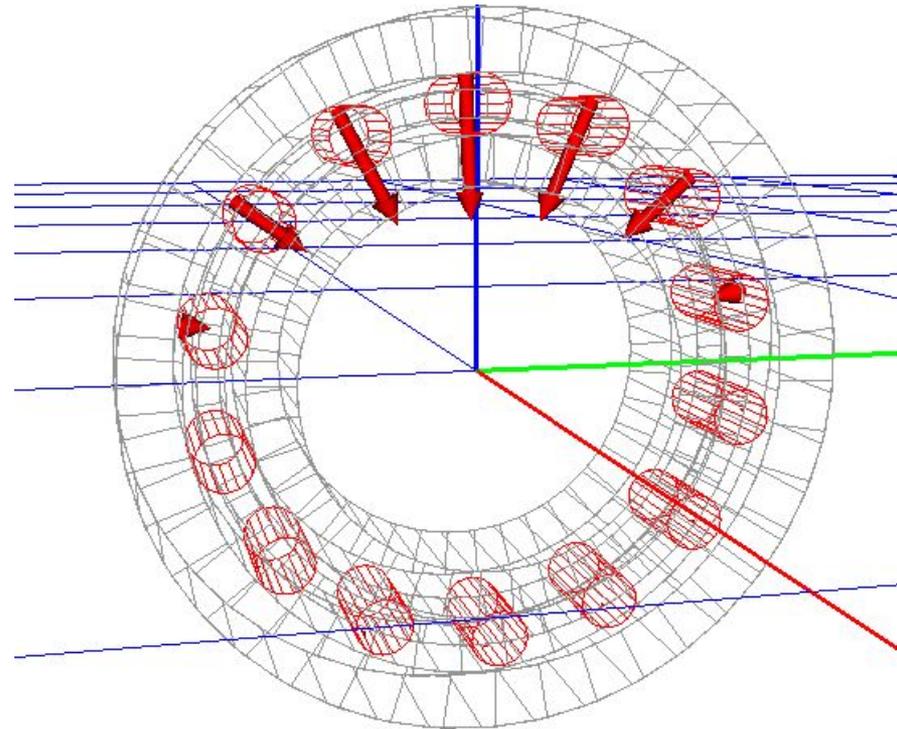
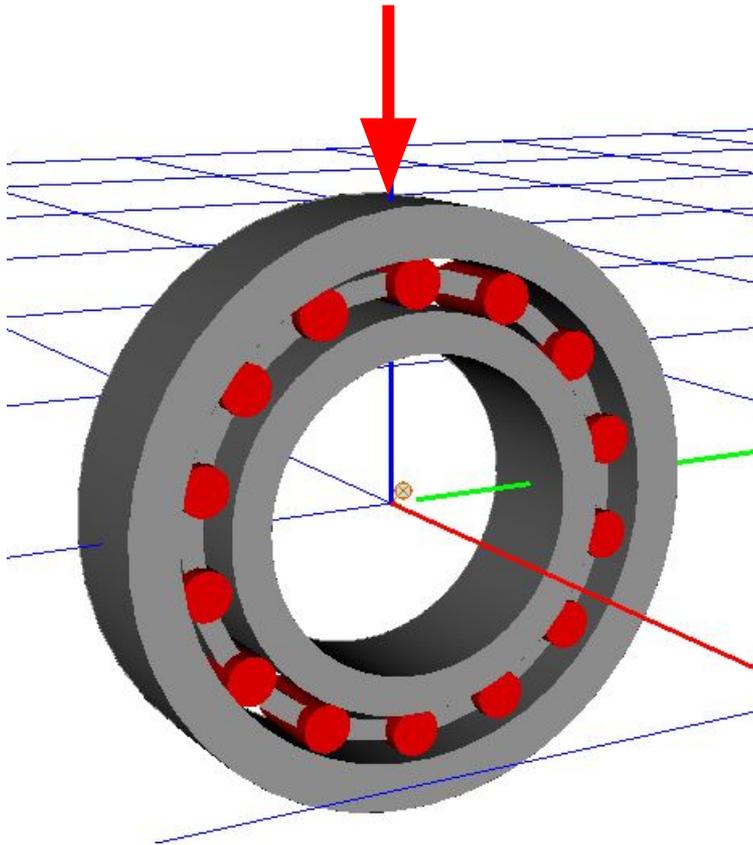
Контактные силы:  
точка – плоскость, точка – Z-поверхность



Система фрикционного гашения трехэлементной тележки моделируется контактным взаимодействием между клиньями и надрессорной балкой и клиньями и боковой рамой

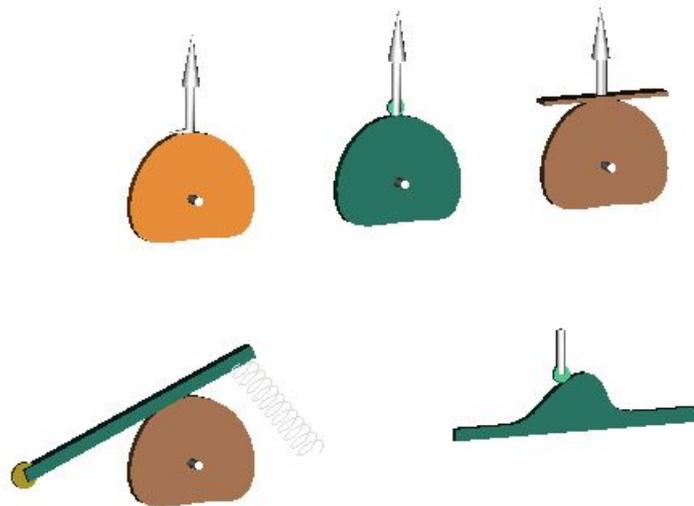
# Контактные силы

Контактные силы: Окружность – Плоскость,  
Окружность – Z-поверхность, Окружность – Цилиндр



Корпус подшипника под вертикальной нагрузкой

## Специальные контактные силы: кулачки



Доступные типы кулачков

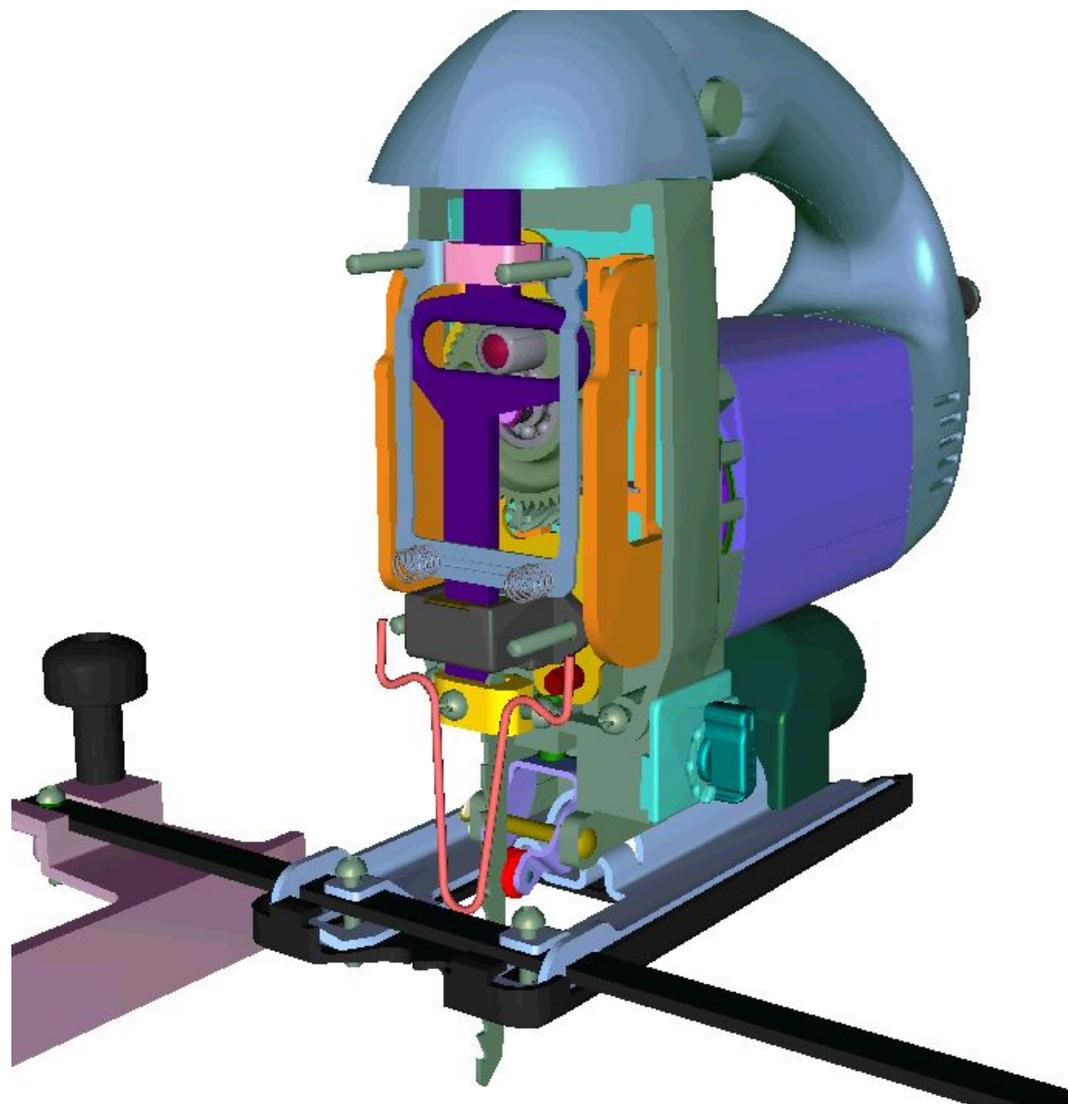
# Интерфейс «Компас 3D – Универсальный механизм»

The screenshot displays the KOMPAS-3D V7 Plus software interface. The main window shows a 3D model of a mechanism with a blue and orange color scheme. The interface includes a menu bar (Файл, Редактор, Вид, Операции, Спецификация, Сервис, Окно, Справка, Библиотеки), a toolbar, and a main workspace. A panel on the left shows a tree view of the model's structure, including components like Шатун, Цилиндр, Втулка, and Шарниры. A central panel displays simulation parameters: "Время моделирования" (100.000), "Шаг представления результатов" (0.001), and "Погрешность" (1E-6). Below this, a "Графики" (Graphs) window shows a plot of a variable over time, with a y-axis labeled  $\times 10^4$  and x-axis values 0, 0.4, and 0.8. A table below the graph lists kinematic data for various joints:

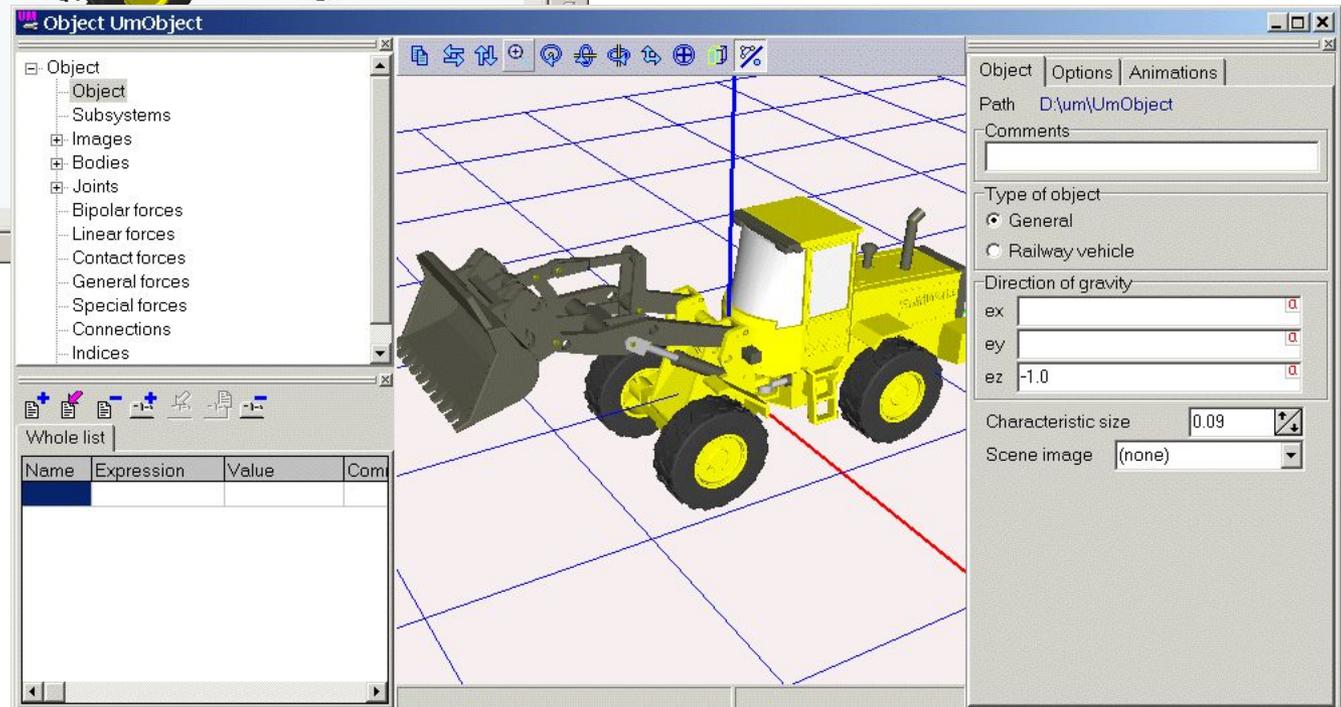
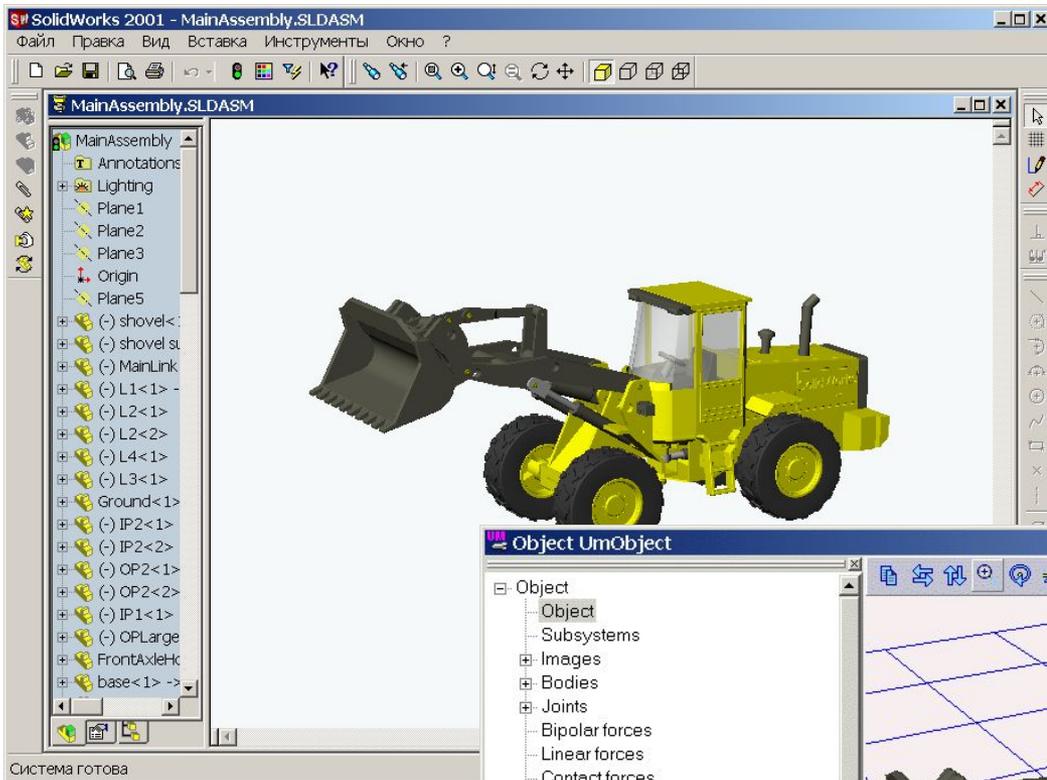
Переменная	Шарнир	Тип данных	Координат
Кинематика	jШатун->Щека пре	x	9 Transl.
Реакция	jЩека левая->Щек	v	5 Rotat.
Координата	jПоршень->Цилин	a	6 Transl.
	jЩека правая->Ци		
	jВтулка->Щека пр		

At the bottom, a "Менеджер библиотек" (Library Manager) window shows options for "Динамика с УМ" (Dynamics with UM), "Динамический объект" (Dynamic object), and "Экспорт графики в УМ" (Export graph to UM). An "Анимационное окно" (Animation window) is also visible, showing a 3D model of the mechanism in a different configuration.

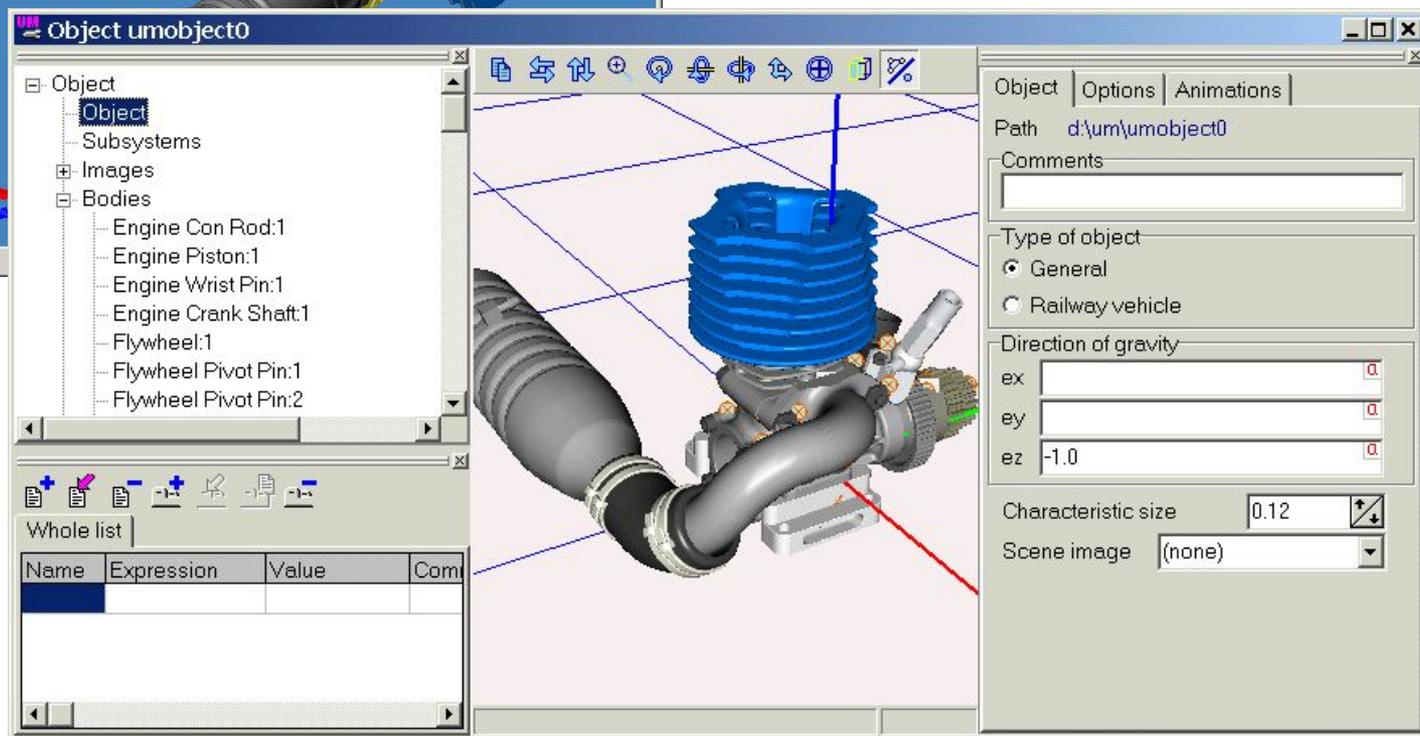
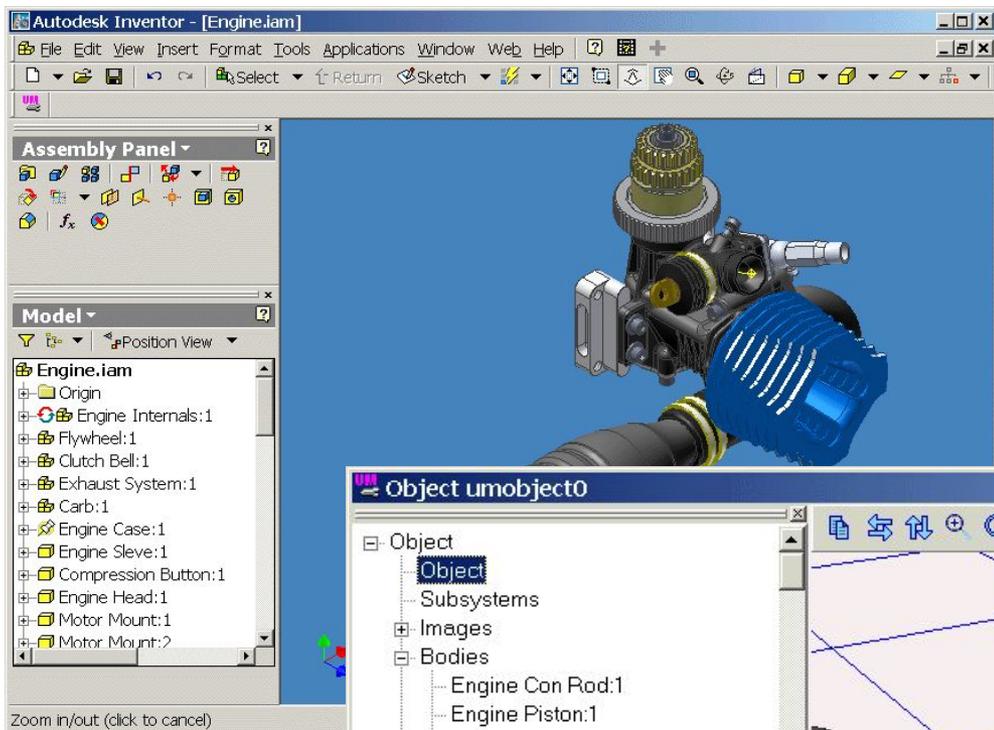
Лобзик  
Динамическая  
библиотека для САПР  
КОМПАС  
«Универсальный  
Механизм - Express»



# Интерфейс «SolidWorks – Универсальный механизм»



# Интерфейс «Autodesk Inventor – Универсальный механизм»



## Пример 1. Стабилизация перевернутого маятника

Задача: управляя силой  $F$  стабилизировать перевернутый маятник в вертикальном положении

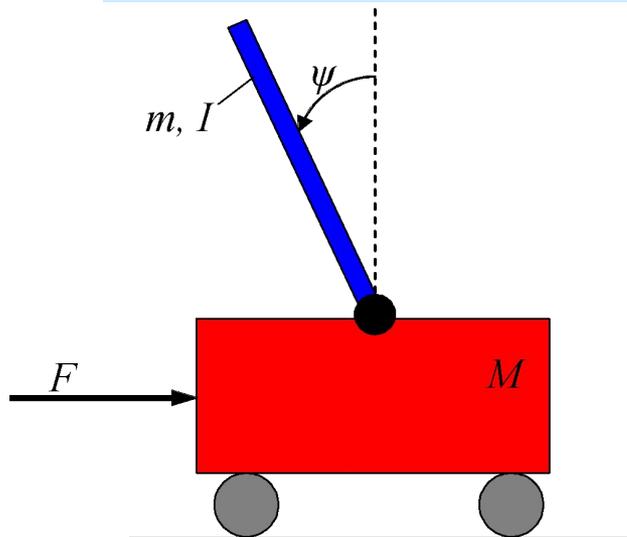


Схема модели

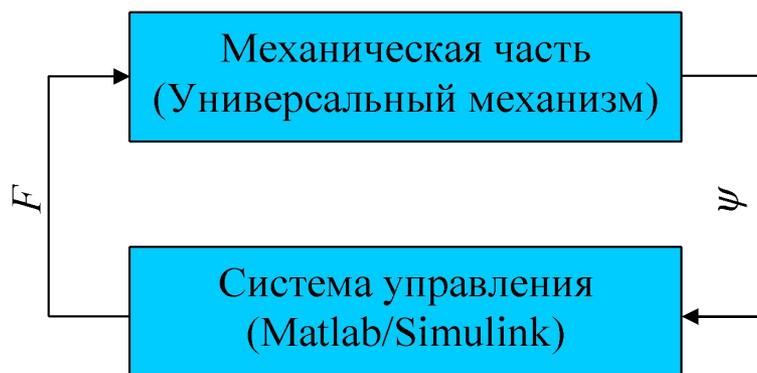
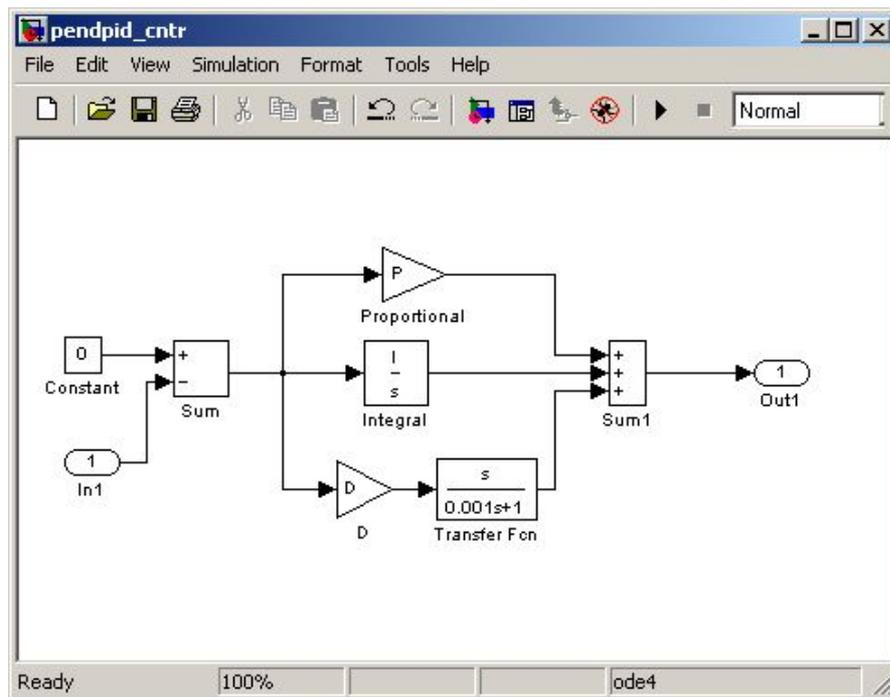
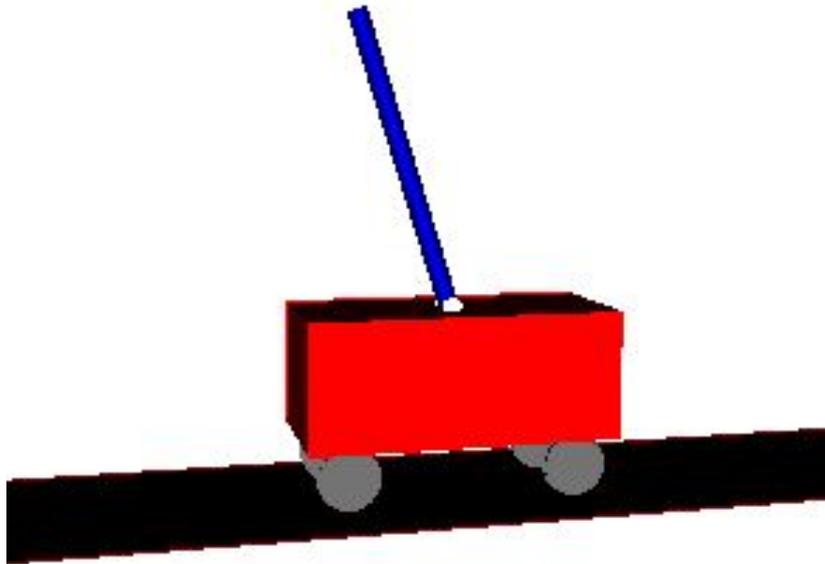


Схема передачи данных

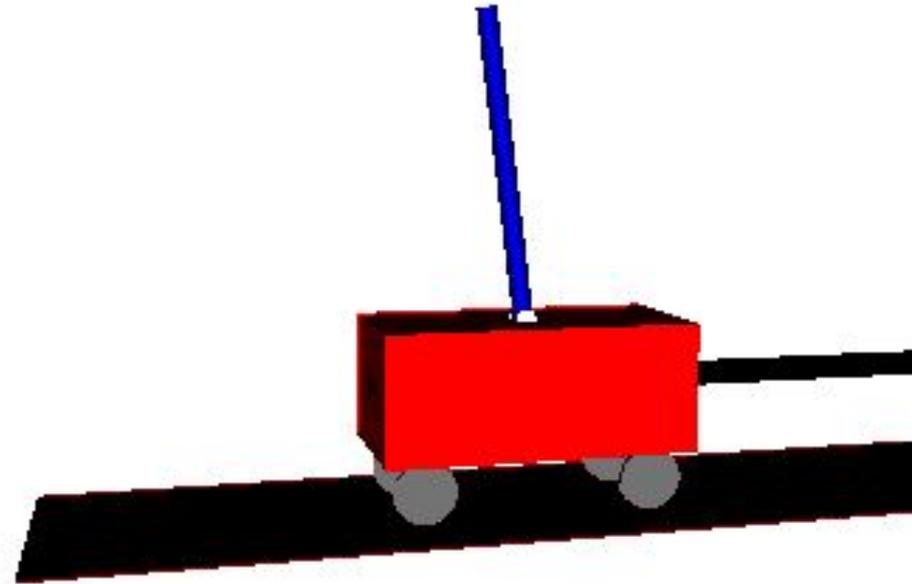


Модель системы управления в Matlab/Simulink

## Пример 1. Результаты моделирования

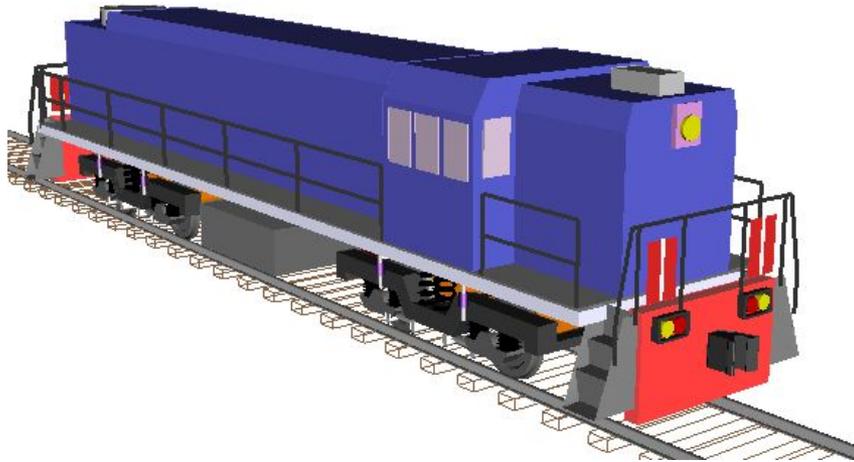


Неуправляемое движение

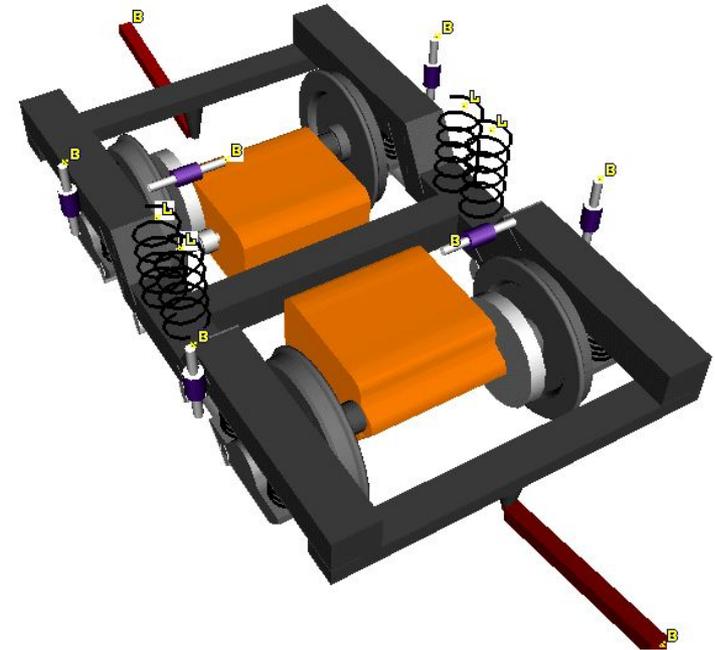


Управляемое движение

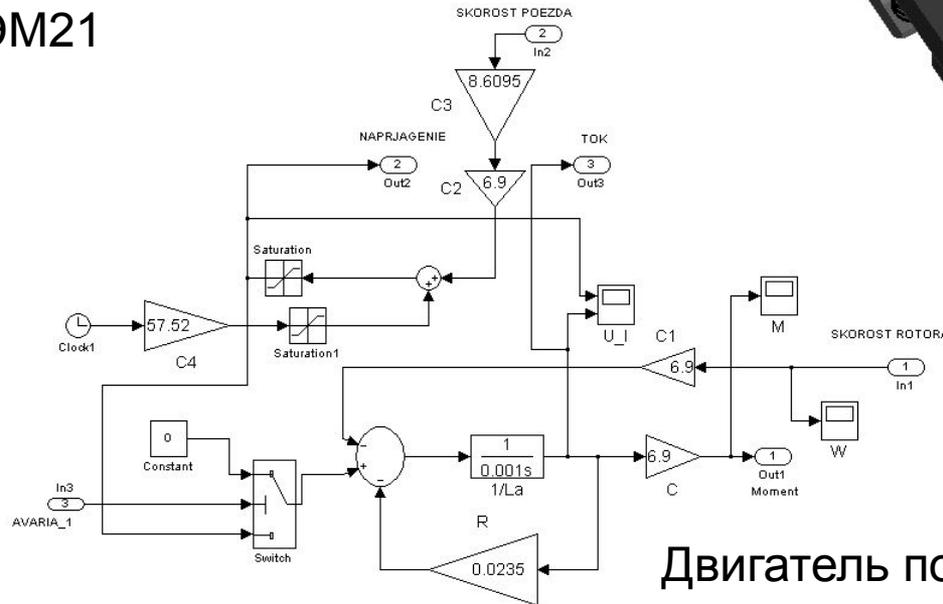
## Пример 2. Тяговый привод маневрового локомотива



Локомотив ТЭМ21



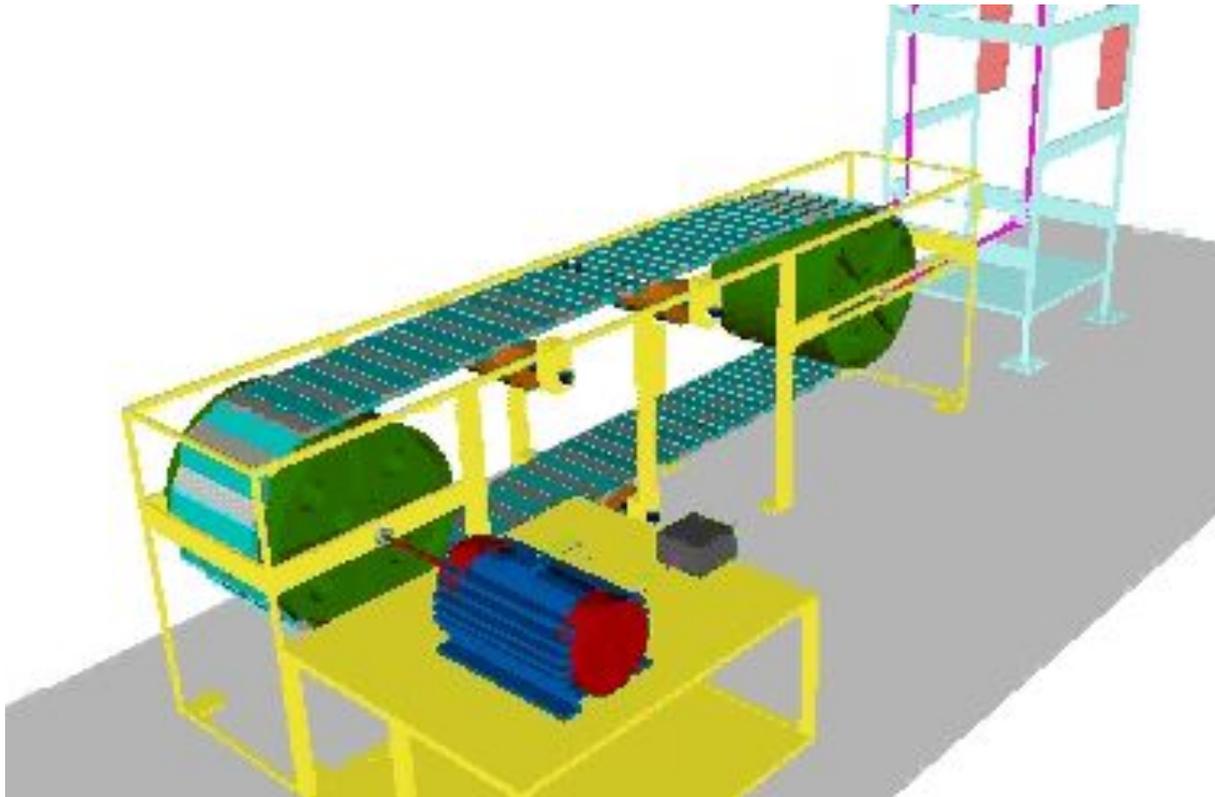
Тележка



Двигатель постоянного тока

## Пример 3. Электропривод конвейера

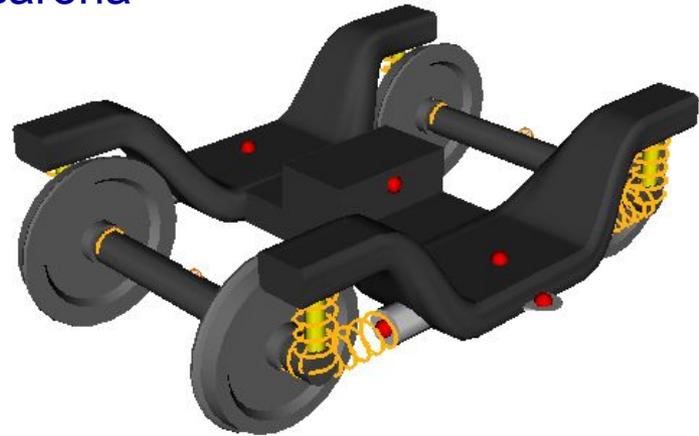
Автор – инж. Мясников А.А., каф. ПТМ, БГТУ



Плоская модель конвейера. Модель асинхронного двигателя импортирована из Matlab/Simulink.

Цель работы: исследование процесса пуска конвейера, оптимизация системы управления асинхронным двигателем

Модель пассажирского вагона



В центральную ступень подвески пассажирского вагона добавлен управляемый силовой элемент. Модель системы управления реализована в Matlab/Simulink.

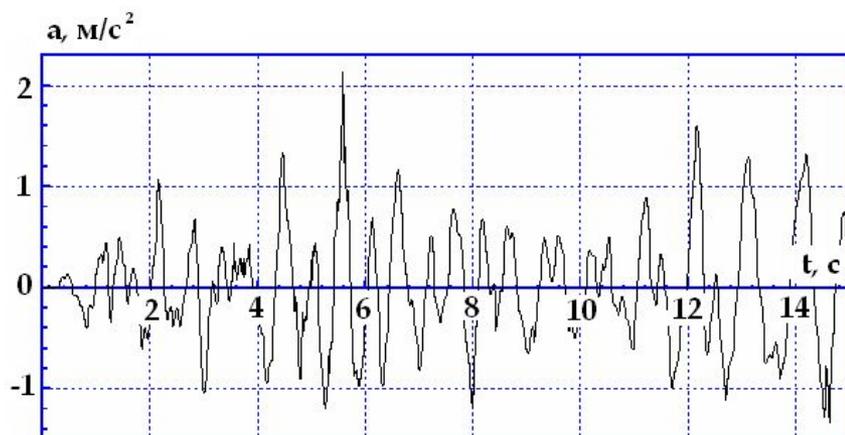
Разработал к.т.н. Буйвал А.К.

Схема передачи данных

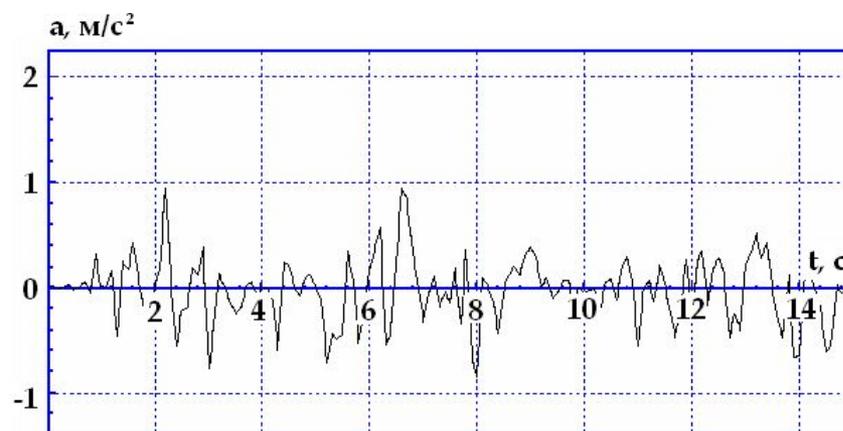


## Ускорения пола кузова

Неуправляемая система



Управляемая система



- Примеры моделирования
- Механическая система как объект моделирования
- Создание моделей
- Анализ динамики моделей
- Верификация программного комплекса

# Создание моделей: Модуль ввода

Список элементов

Список идентификаторов

Инспектор данных

Имя	Выражение	Значение	Ко
v0	20		
rpincouplir	0.06		
r1pincoupl	0.055		
lrod	3.07961		
cLocking	1.00000E+0005		

Шарнирные точки	
Truck	
-7.55	-0.6
Dolly	
0.7	0.426
0.7	

Вид программы описания моделей

## Автоматический синтез уравнений движения

Вывод уравнений в символьной форме и использованием встроенной системы компьютерной алгебры

Численно-итерационный метод

```
.....  
_Frc_Vctr[1] := _ap[3]*_ix+_ap[3]*_mass*_c2*  
_c3*_length*_length+_ap[3]*_mass*_c3*_length  
*_length-_ap[3]*_mass*_length*_length*  
_s2*_s3+_ap[3]*_mass*_length*_length-0.1634*  
_ap[3]*_mass*_c2*_c3*_length-0.1634*_ap[3]*  
_mass*_c3*_length+0.1634*  
_ap[3]*_mass*_length*_s2*_s3-0.3268*  
_ap[3]*_mass*_length+0.02669956*_ap[3]*_mass  
+2*_ap[2]*_ix+_ap[2]*_mass*_c2*_c3*  
_length*_length+2*_ap[2]*_mass*_c3*_length*  
_length+2*_ap[2]*_mass*_c2*_length  
*_length-_ap[2]*_mass*_length*_length*_s2*_s3  
.....
```

Элементы уравнений движения синтезируются на каждом шаге численного интегрирования

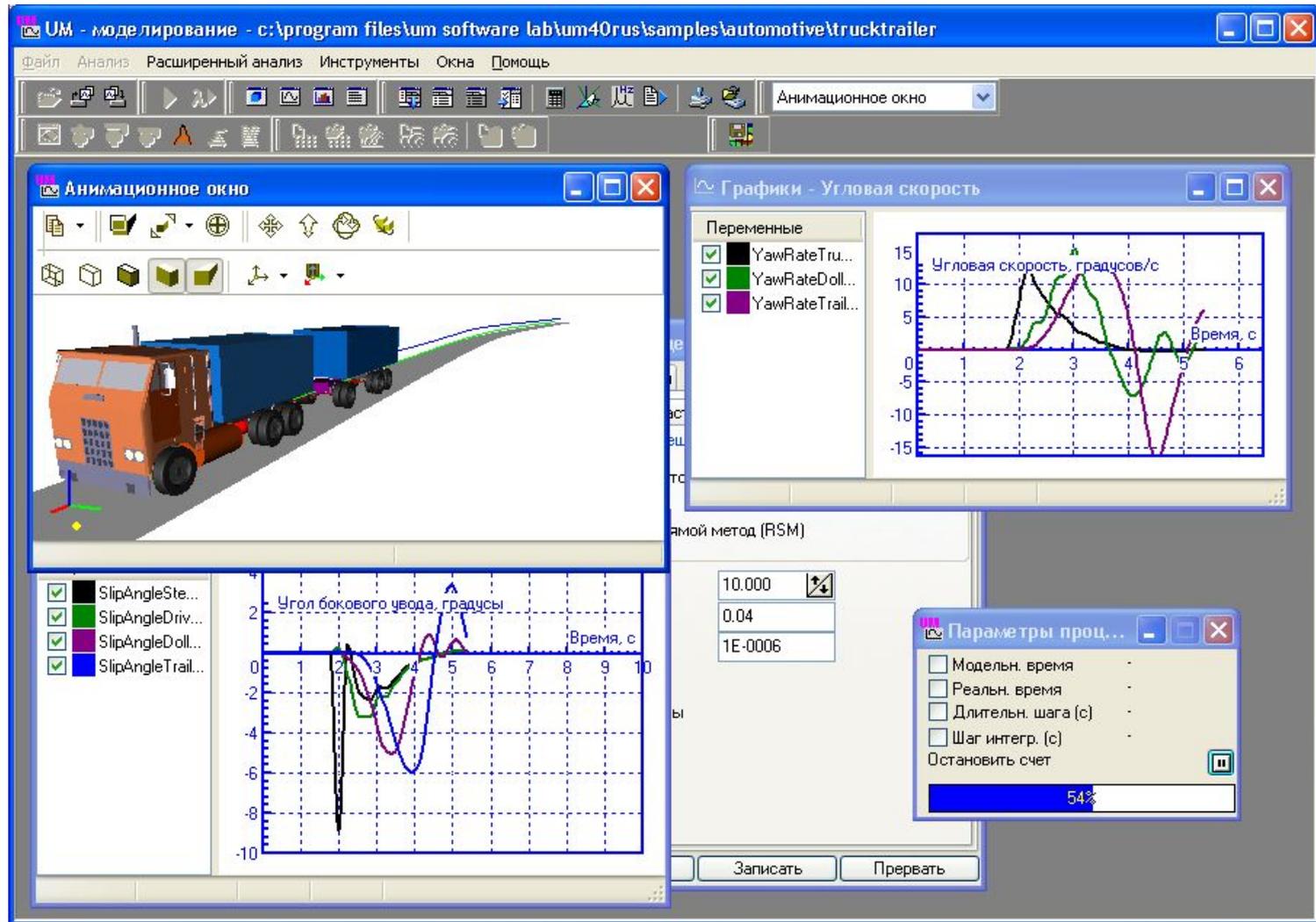
✓ Более широкие возможности

✓ Быстрота численного моделирования

Синтез уравнений движения в символьной форме и последующая компиляция в DLL – это одна из причин того, что УМ быстрее аналогов

- Примеры моделирования
- Механическая система как объект моделирования
- Создание моделей
- Анализ динамики моделей
- Верификация программного комплекса

# Анализ динамики моделей

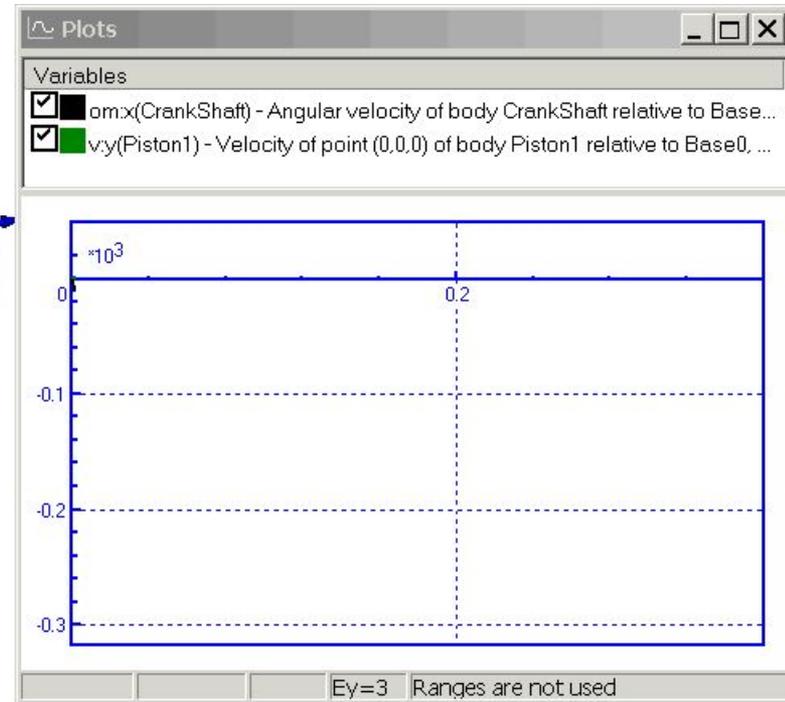
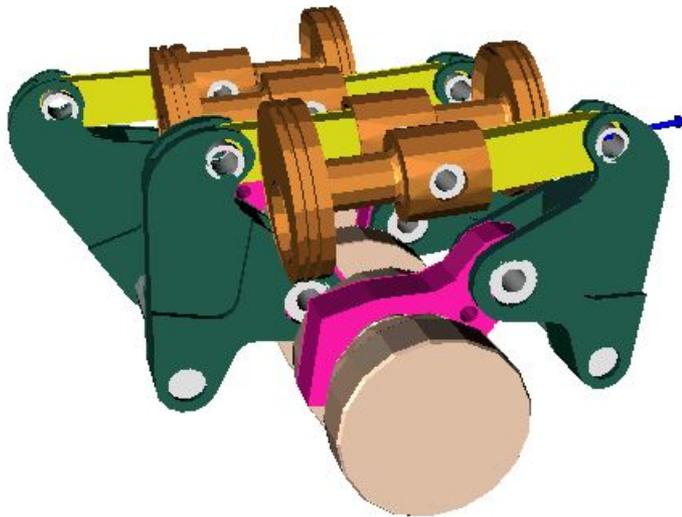


Вид программы моделирования

✓ Любое число анимационных и графических окон

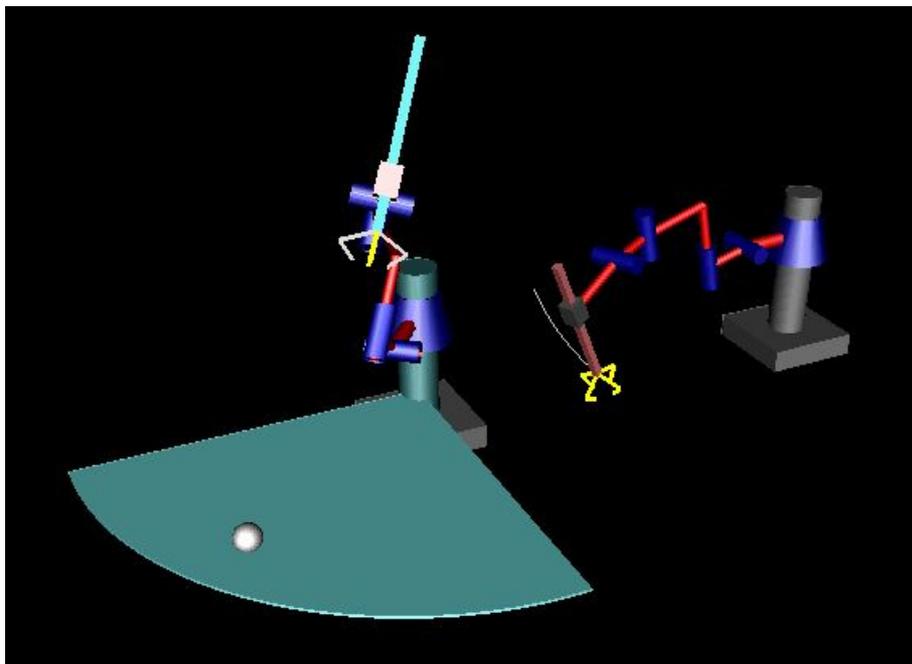
## Непосредственное представление результатов

- 3D анимация движения системы;
- 3D анимация векторов (силы, скорости, ускорения и т.д.);
- 3D анимация траекторий;
- графики (координаты, скорости, ускорения, активные силы и т.д.)



Двигатель: прямая задача динамики

## Решение прямой и обратной задачи кинематики

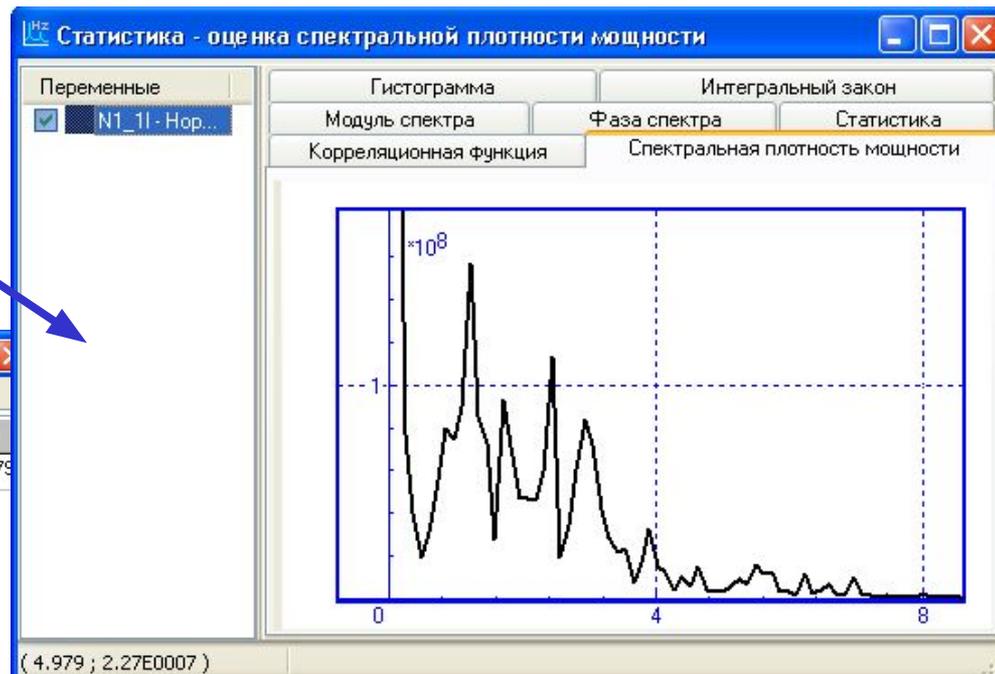
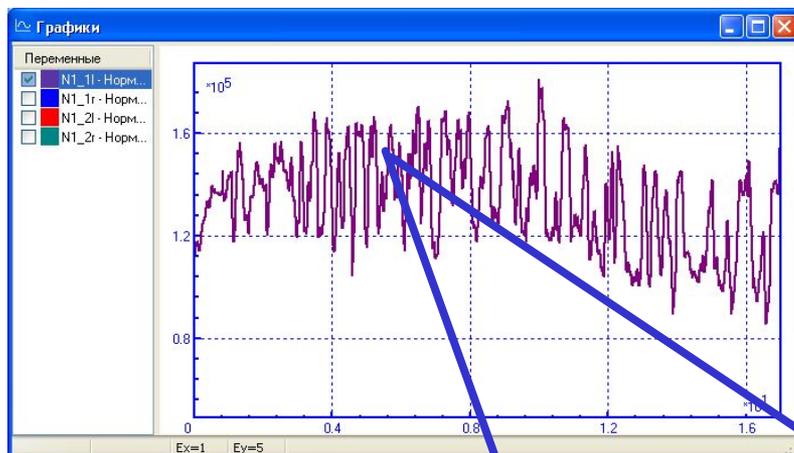


Анимация движения и траекторий

## Анализ переменных (динамических показателей)

Каждая переменная может быть обработана с помощью

- Табличного процессора
- Статистического анализатора



Процессор переменных

Табличный процессор | Преобразование переменных

	Ampl	Integral	LastOrdinate	Max	Mean
N1_11 - Норм...	47635.984	2270981.5	151645.19	181018.38	133579

Integral

LastOrdinate

Max

MaxAbs

Max\_Min

Max\_Min\_2

Mean

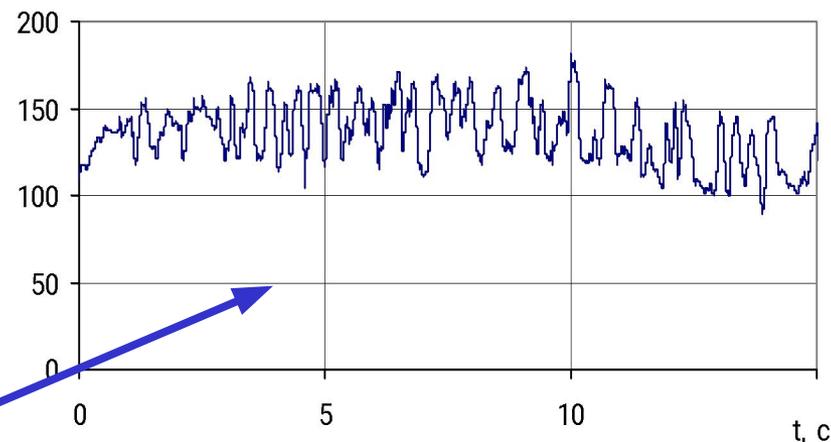
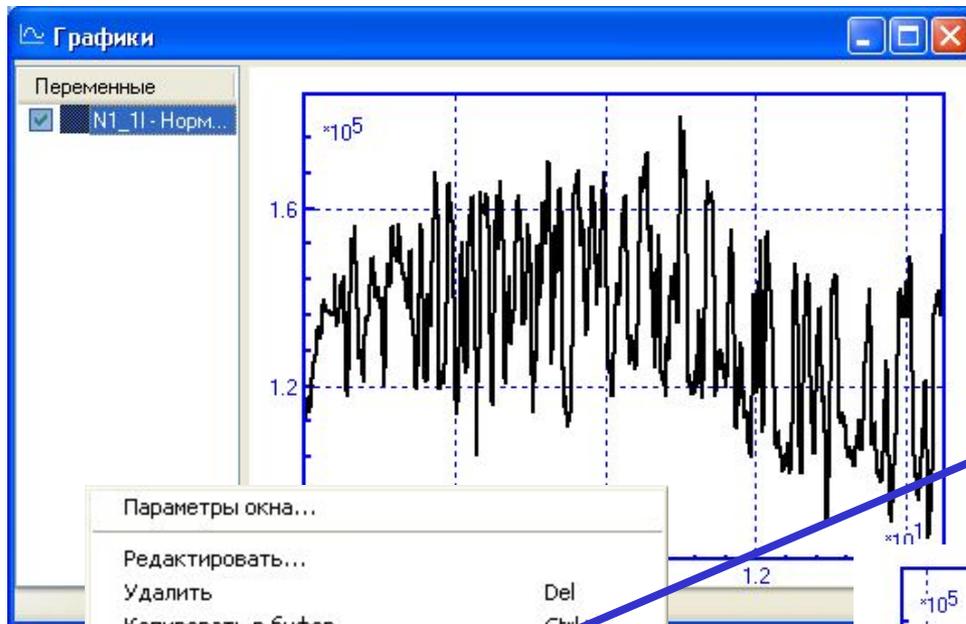
Mean\_plus\_3RMS

Min

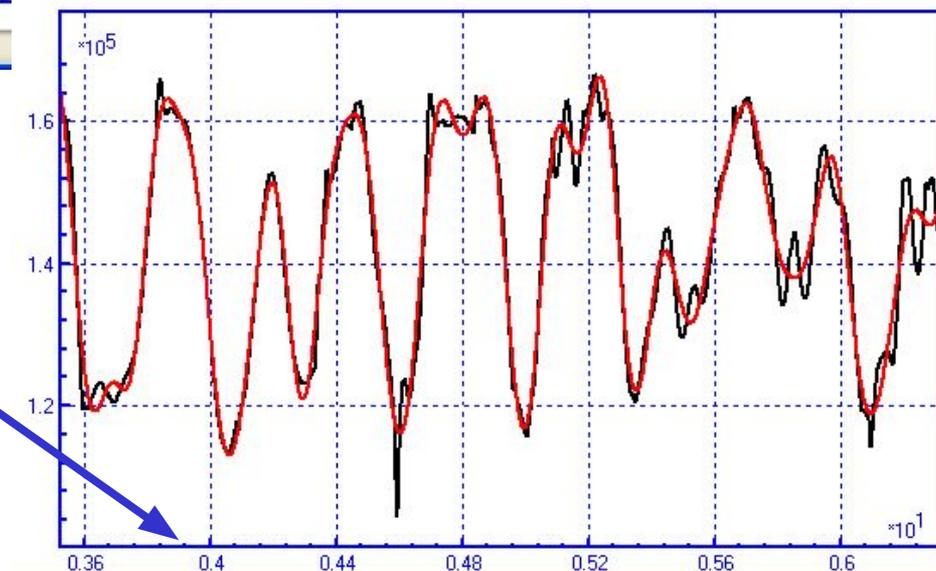
MinAbs

RMS

# Инструменты моделирования



- Параметры окна...
- Редактировать...
- Удалить Del
- Копировать в буфер Ctrl+C
- Копировать в активную книгу MS Excel Ctrl+E
- Фильтровать переменные Ctrl+F**
- Скопировать как статические Ctrl+S
- Сохранить в текстовый файл... Ctrl+T
- Сохранить в файл переменных... Ctrl+V
- Прочитать из текстового файла...
- Отложить переменную по абсциссе
- Отложить "время" по абсциссе
- Удалить все Ctrl+Del
- Выделить все Ctrl+A
- Скрыть/Показать ▶
- Положение ▶

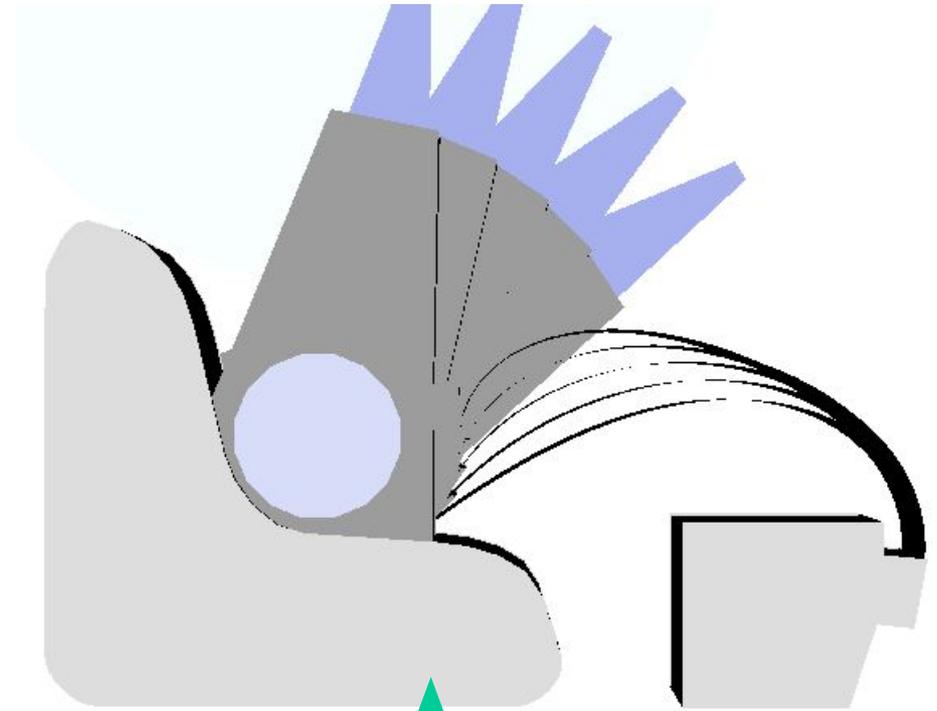
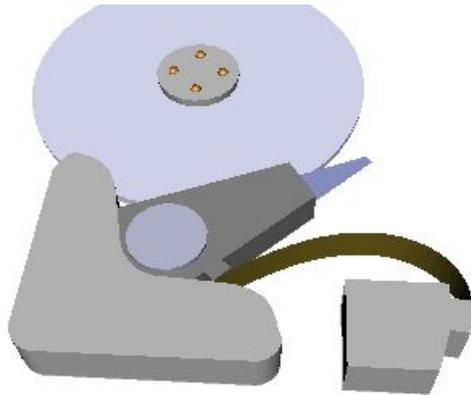


Исходный

Отфильтрованный

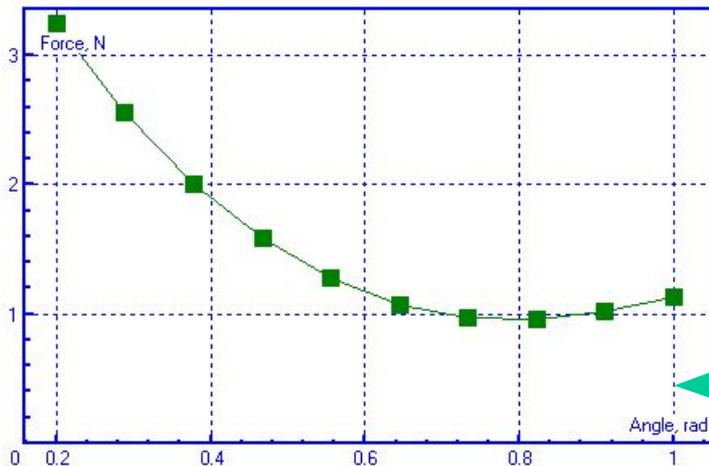
# Положение равновесия

## Динамика жесткого диска

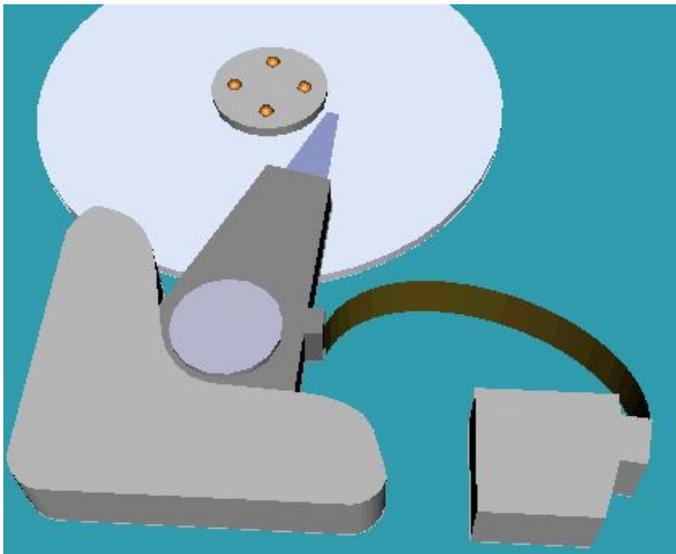
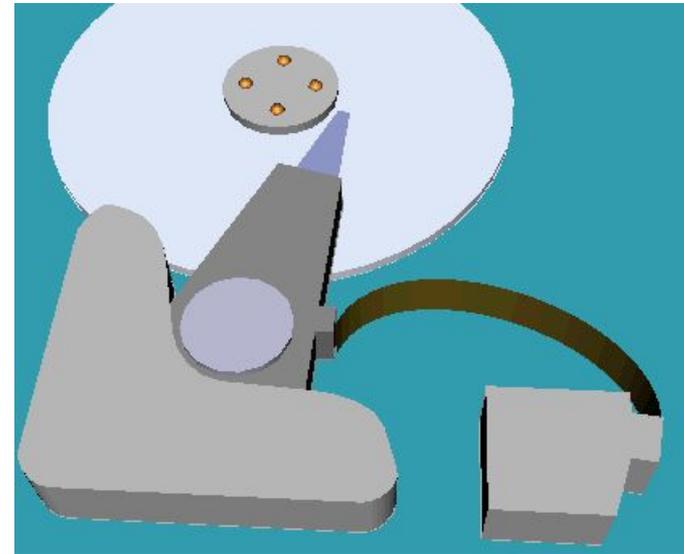
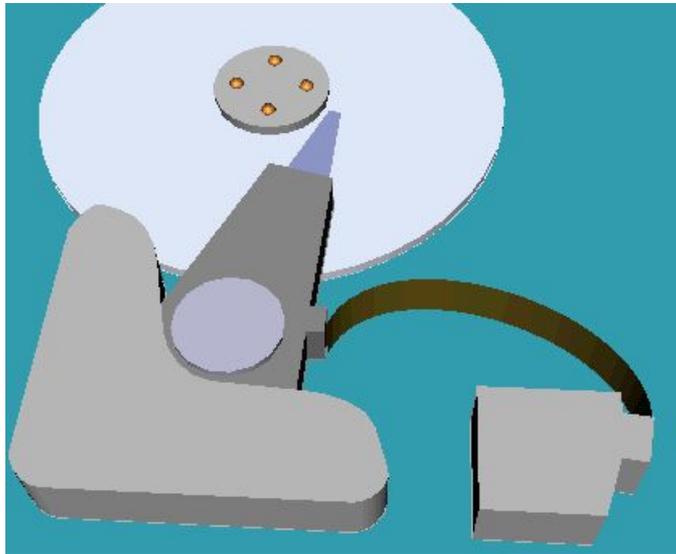


Положение равновесия  
кабеля в зависимости от  
положения головки

Силы, действующие на головку  
жесткого диска со стороны кабеля



# Линейный анализ



Формы свободных колебаний

# Собственные формы и частоты колебаний



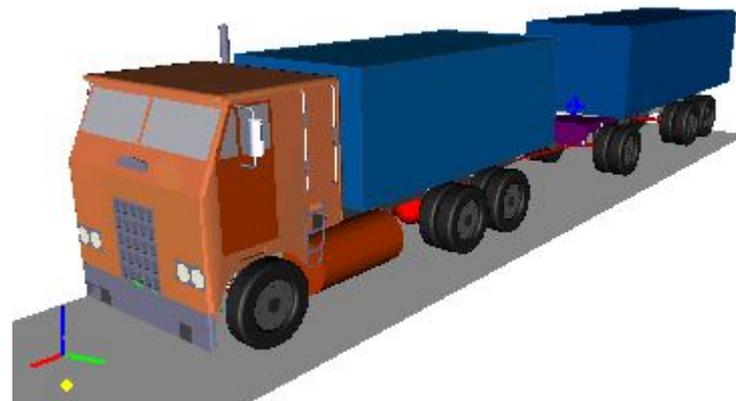
0,40 Гц



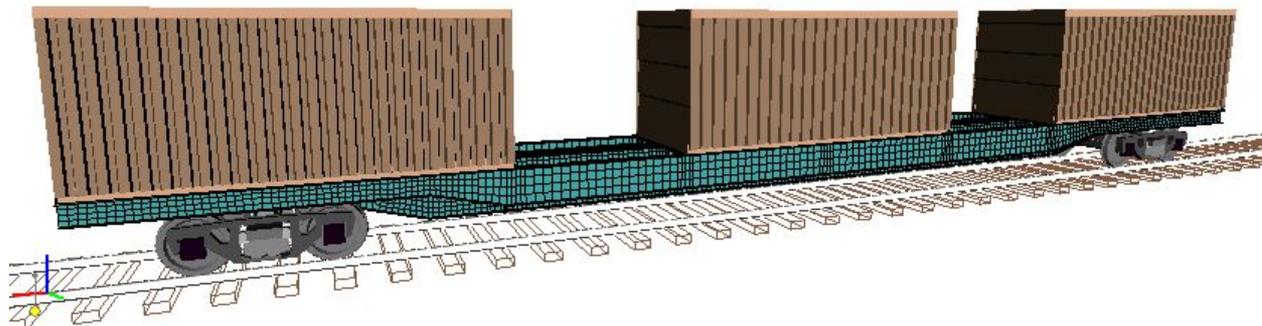
0,82 Гц



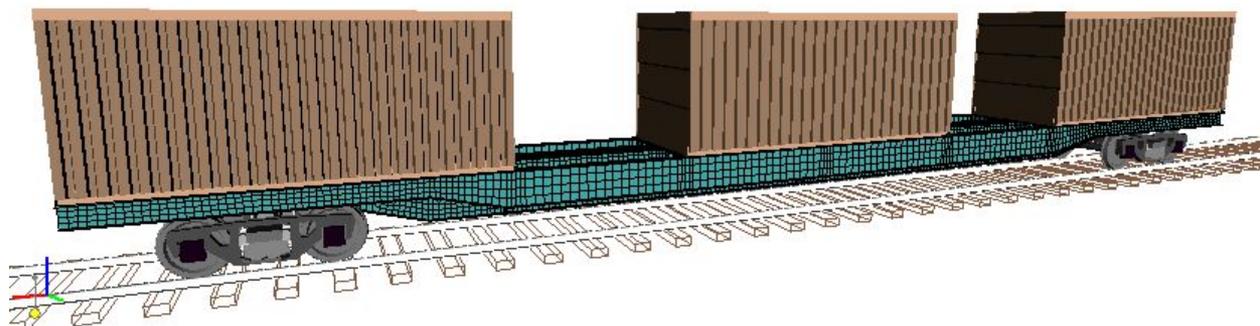
1,10 Гц



1,39 Гц



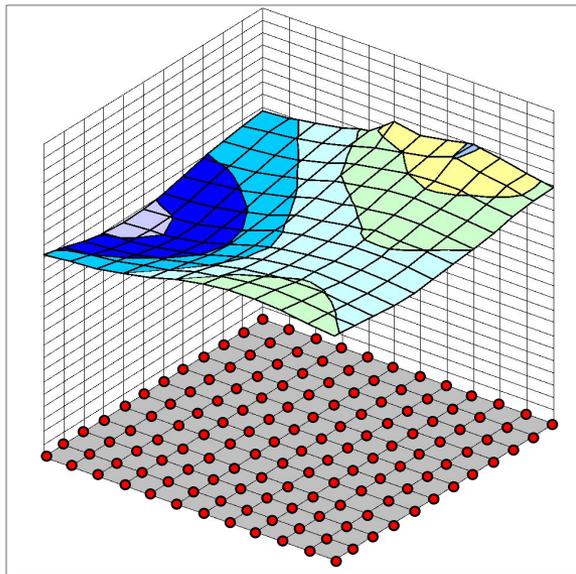
Собственная форма колебаний платформы с частотой 3,57 Гц



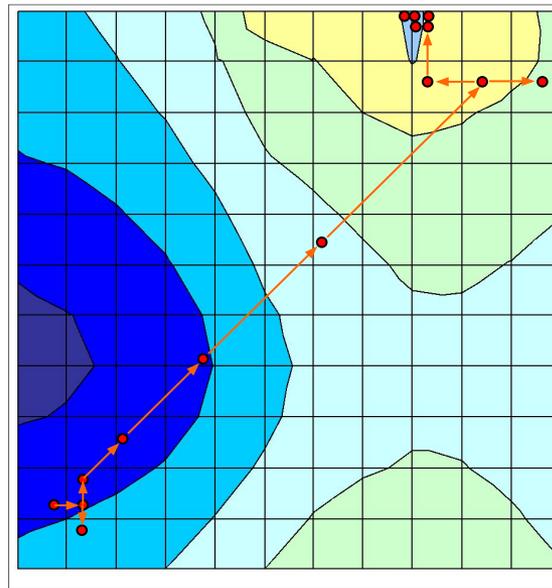
Собственная форма колебаний платформы с частотой 4,55 Гц

Для расширенного анализа динамики механической системы и оптимизации ее параметров доступны следующие инструменты: сканирование, оптимизация, аппроксимация

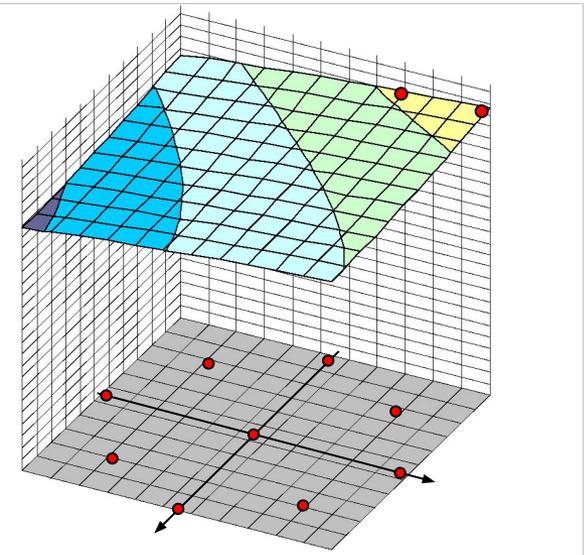
Сканирование



Оптимизация

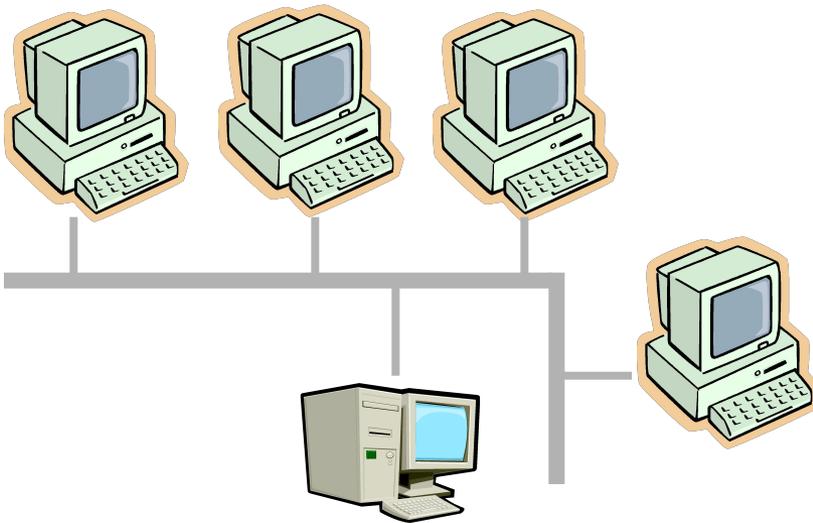


Аппроксимация



# Служба распределенных вычислений

Программный комплекс «Универсальный механизм» + модуль оптимизации + служба распределенных вычислений



UM сервер кластера

Пуск  
Стоп  
0 программ

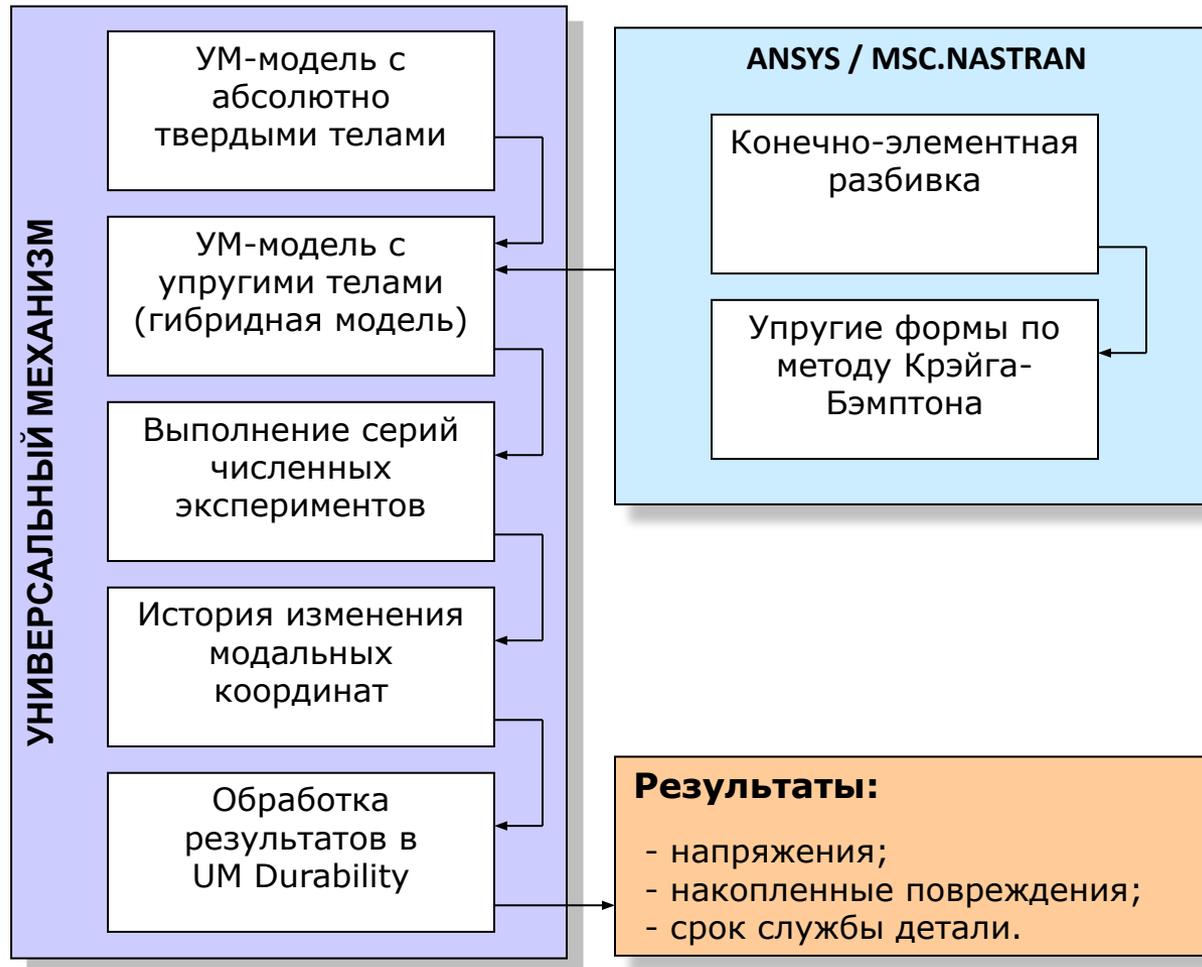
Клиент	Статус	Выполнено заданий	Прогресс
<input checked="" type="checkbox"/> CHEBYSHEV	обработка	15	57%
<input checked="" type="checkbox"/> LOCALHOST	обработка	15	14%
<input type="checkbox"/> ROVERBOOK	?	0	0
<input type="checkbox"/> SUVOROV	?	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> ZHUKOVSKY	обработка	7	89%
<input type="checkbox"/> RAYLEIGH	?	0	0
<input type="checkbox"/> LOCOVICH	?	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> EULER	обработка	19	25%

Отчет:

```
EULER : готов
EULER : отправка задачи #52 : OK
LOCALHOST : получение результата #50 : OK
LOCALHOST : готов
LOCALHOST : отправка задачи #53 : OK
CHEBYSHEV : получение результата #49 : OK
CHEBYSHEV : готов
CHEBYSHEV : отправка задачи #54 : OK
```

Выполнение больших «промышленных» расчетов,  
сканирование по многим параметрам, гигабайты данных,  
сутки расчетов

## Схема работы модуля



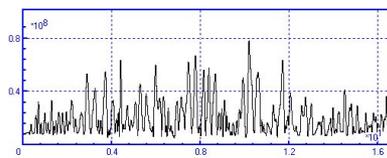
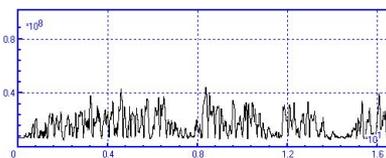
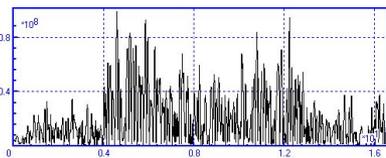
# Долговечность: анализ эксплуатационной нагруженности

Выделение частных режимов эксплуатации



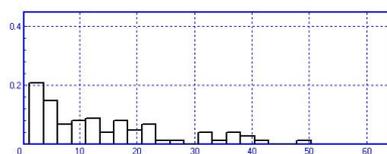
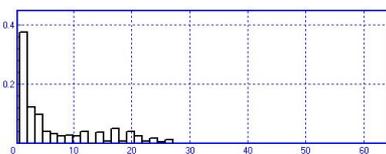
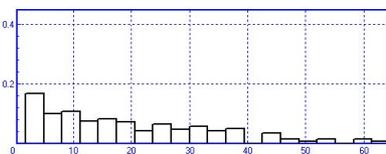
Режимы эксплуатации

Создание моделей и проведение численных экспериментов (средствами UM FEM и UM Optimization)



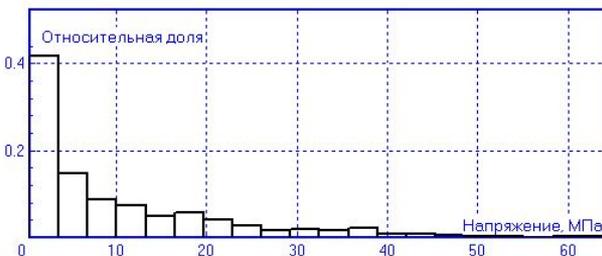
Реализации напряжений

Анализ динамической нагруженности для частных режимов эксплуатации



Частные блоки нагружения

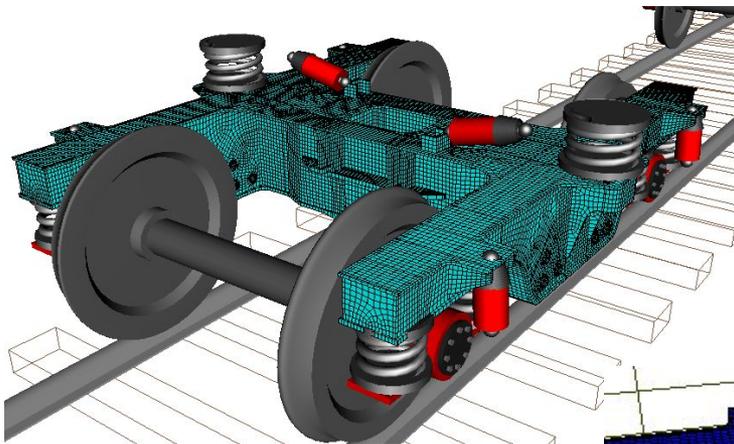
Расчет эксплуатационной нагруженности



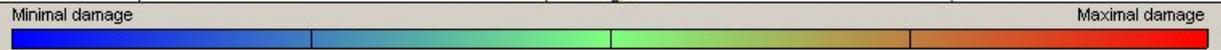
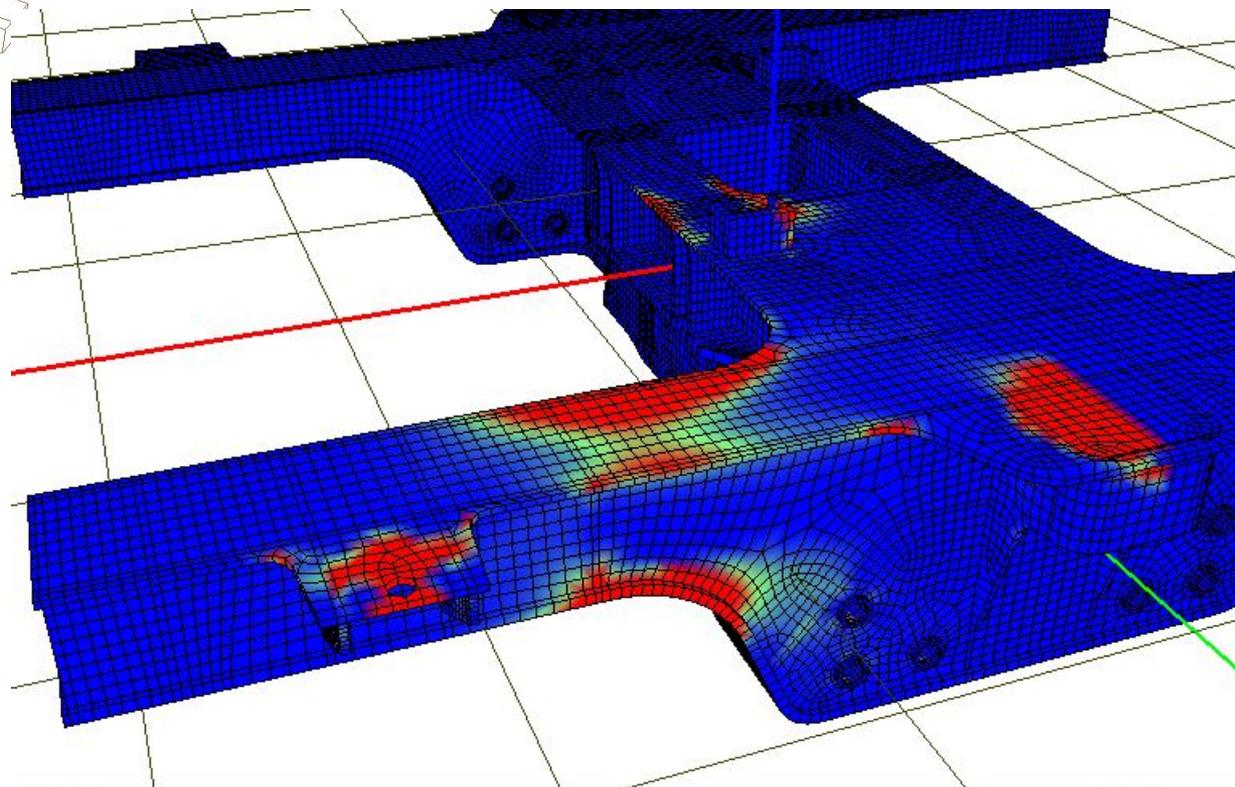
Смешанный блок нагружения

# Результаты расчета долговечности: рама тележки локомотива

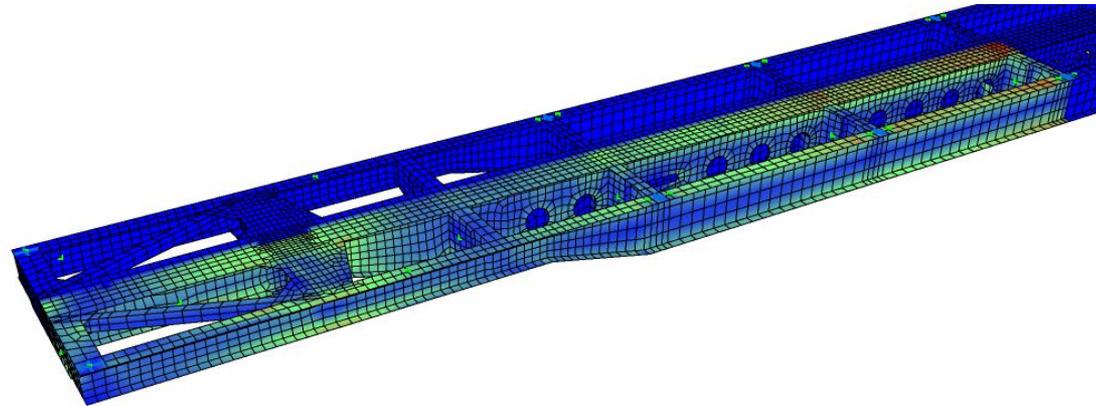
Рама тележки локомотива, VOSSLOH, Испания



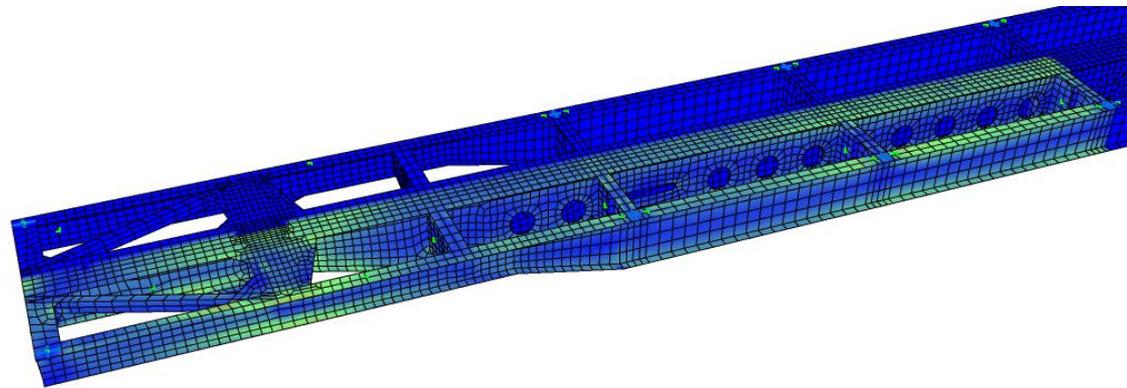
Накопленные  
усталостные  
повреждения



# Результаты расчета долговечности: рама платформы



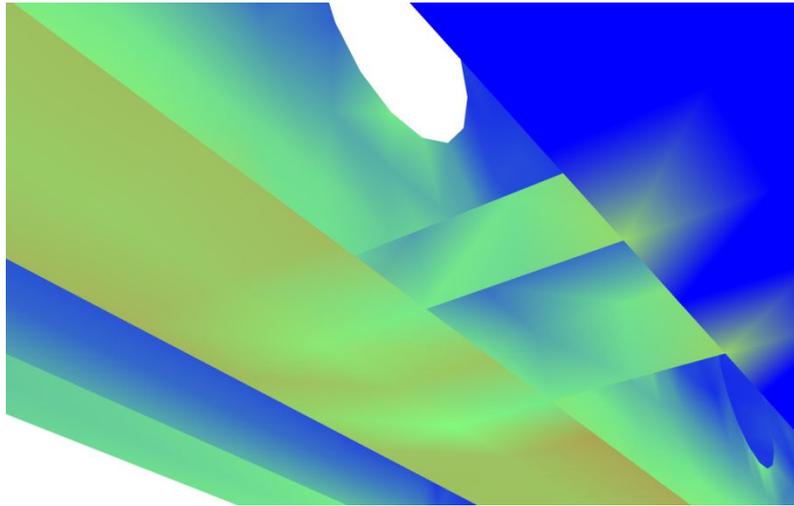
Распределение максимальных динамических напряжений, МПа



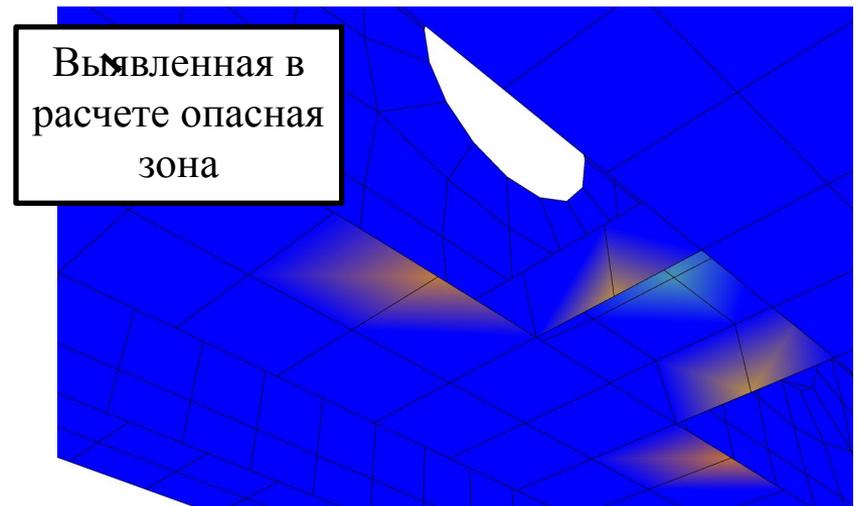
Распределение максимальных амплитуд динамических напряжений, МПа

# Долговечность: сравнение с экспериментом

## Результаты расчета



Распределение максимальных амплитуд



Выявленная в  
расчете опасная  
зона

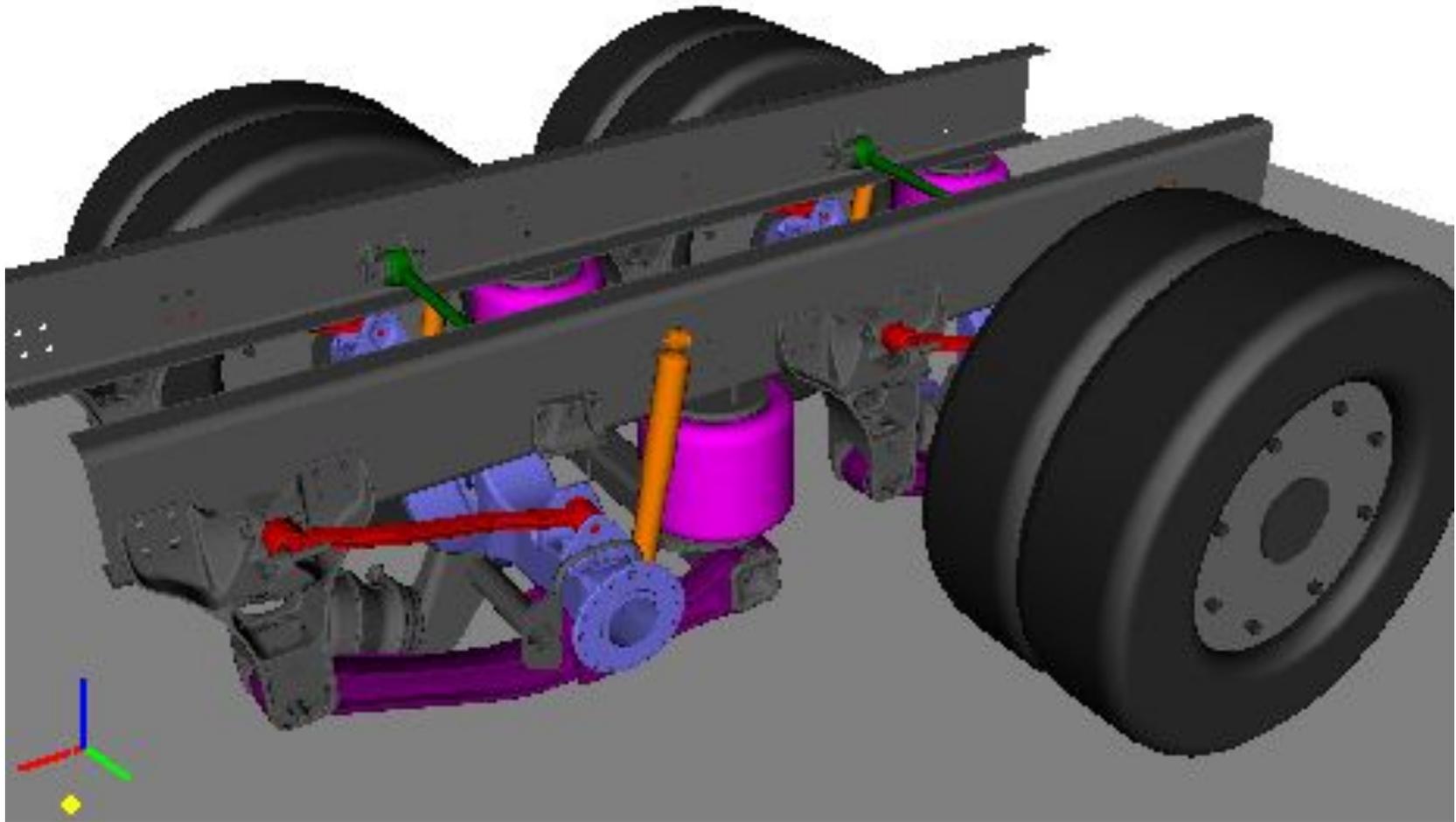
Приведенные эквивалентные амплитуды

Рама контейнеровоза: сравнение  
с экспериментом



Трещина в раме  
по результатам  
стендовых  
испытаний

Картина разрушения



Движение по булыжному покрытию,  $V=100$  км/ч.

## Модели шин

Магическая  
формула  
Пасейки

Модель  
Fiala

Табличные и  
эксперименталь-  
ные зависимости

## Неровности дорожного полотна

Поточечное  
задание профиля  
для промеренных  
участков

Неровности,  
заданные  
аналитическими  
функциями

Синтез  
неровностей по  
спектральной  
плотности и  
библиотека  
спектров дорог с  
различным  
покрытием

## Маневры с замкнутым контуром системы управления

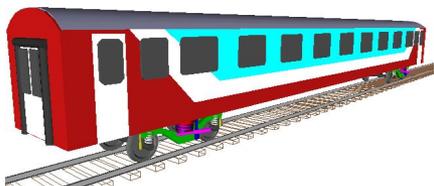
Траектория движения  
+  
Модель водителя  
(модель МакАдама, с предвиденьем 2-го порядка)



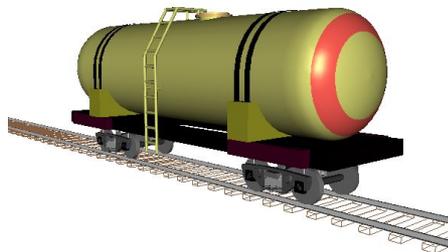
# Железнодорожный модуль

Модуль моделирования железнодорожных экипажей:  
более 30 моделей

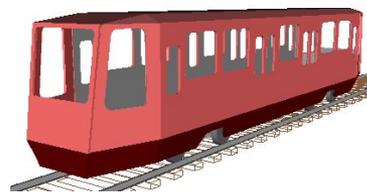
Пассажирский вагон



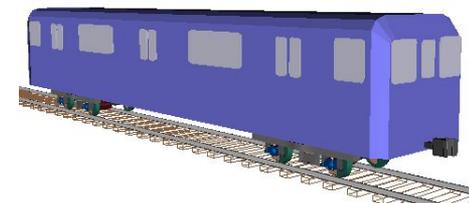
Цистерна



Трамвай



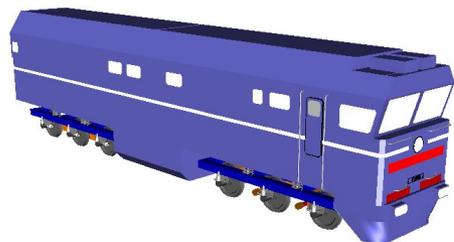
Вагон метро



Электровоз

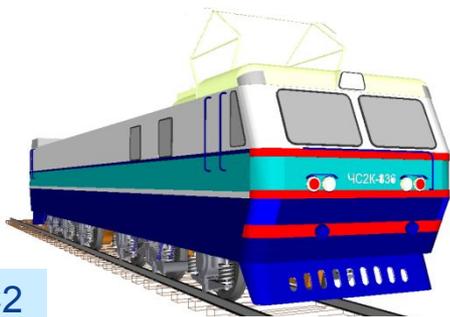


Тепловоз

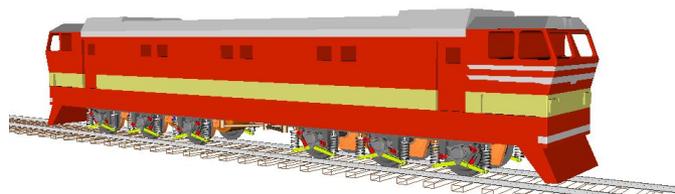


# Железнодорожные экипажи: база моделей локомотивов России

В 2006 г. совместно с ВНИКТИ МПС разработаны 17 моделей локомотивов. Таким образом, создана база компьютерных моделей, не имеющая аналогов в мире.



ЧС2



ЧС4



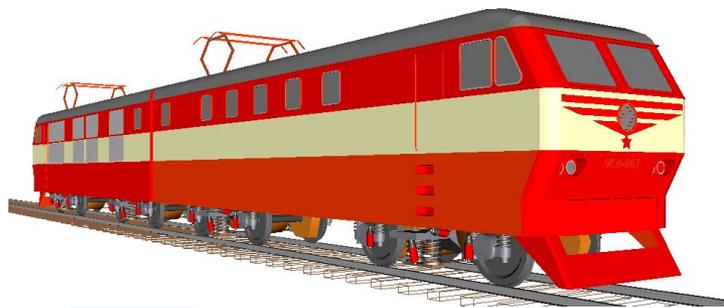
ЧМЭ3



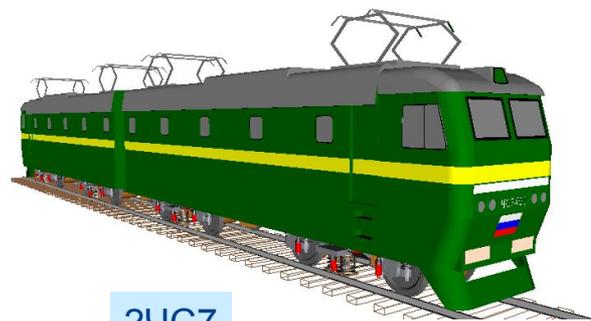
2ЧС8



ЧС200

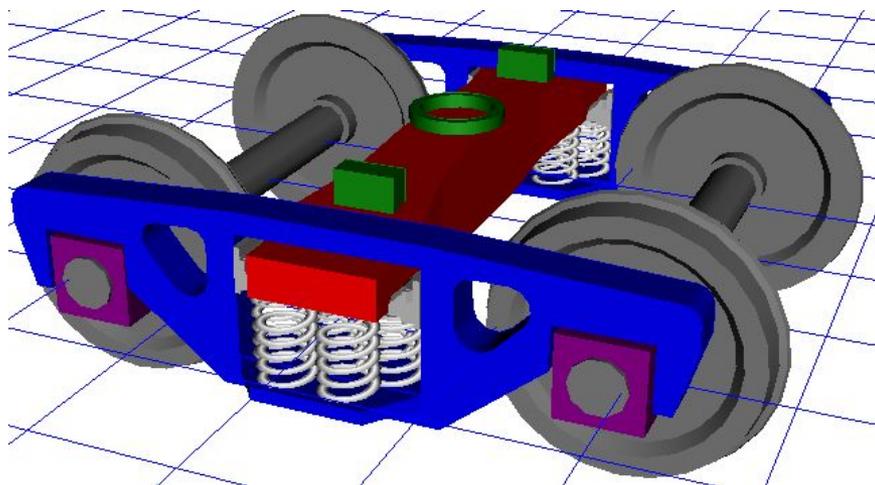
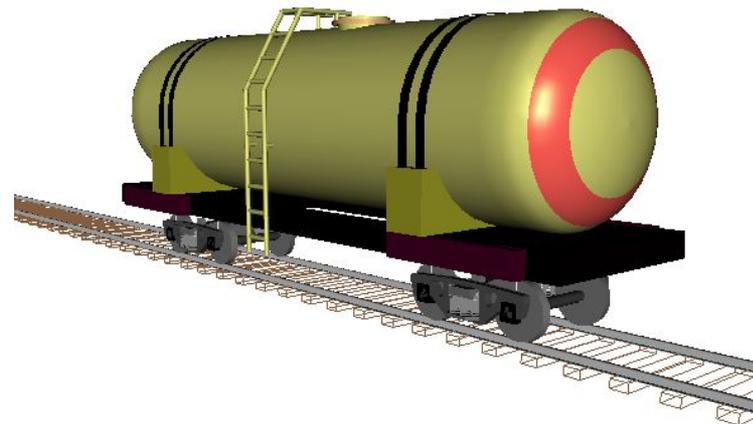
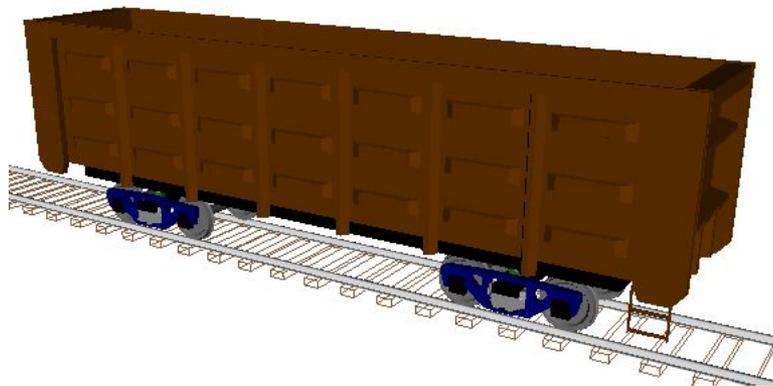


ЧС6

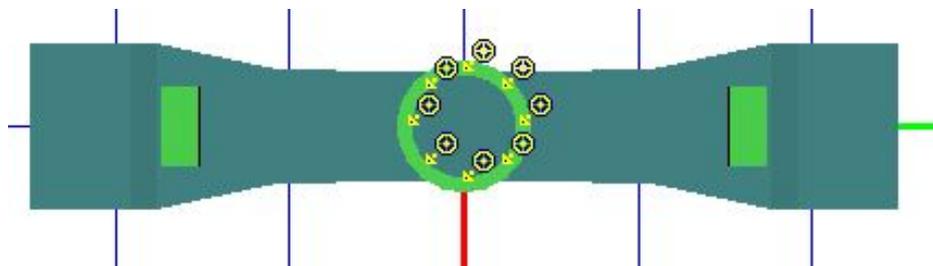


2ЧС7

## Модель грузового вагона

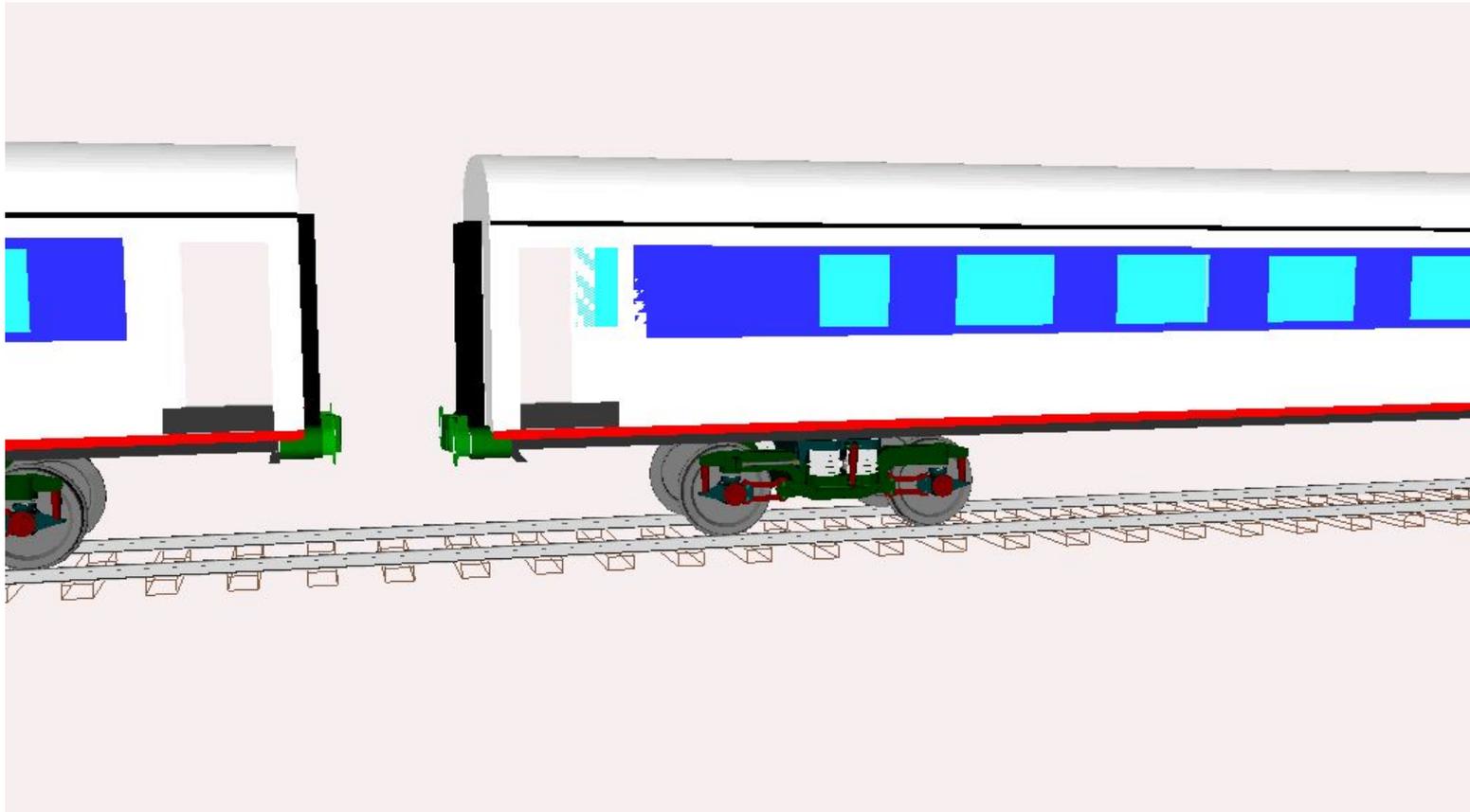


Трехэлементная тележка (18-100, 18-578 и др.)



Контактные точки на пятнике

## Соударение вагонов



- Примеры моделирования
- Механическая система как объект моделирования
- Создание моделей
- Анализ динамики моделей
- Верификация программного комплекса

# Грузовые автомобили



NATIONAL ROAD TRANSPORT COMMISSION

Национальная комиссия по  
автомобильному транспорту Австралии



Модель2: Автопоезд



Модель 1: Грузовик с прицепом

- ADAMS CAR
- UMTRI's Yaw/Roll
- AUTOSIM

- Универсальный Механизм



Смена полосы движения, 88км/ч

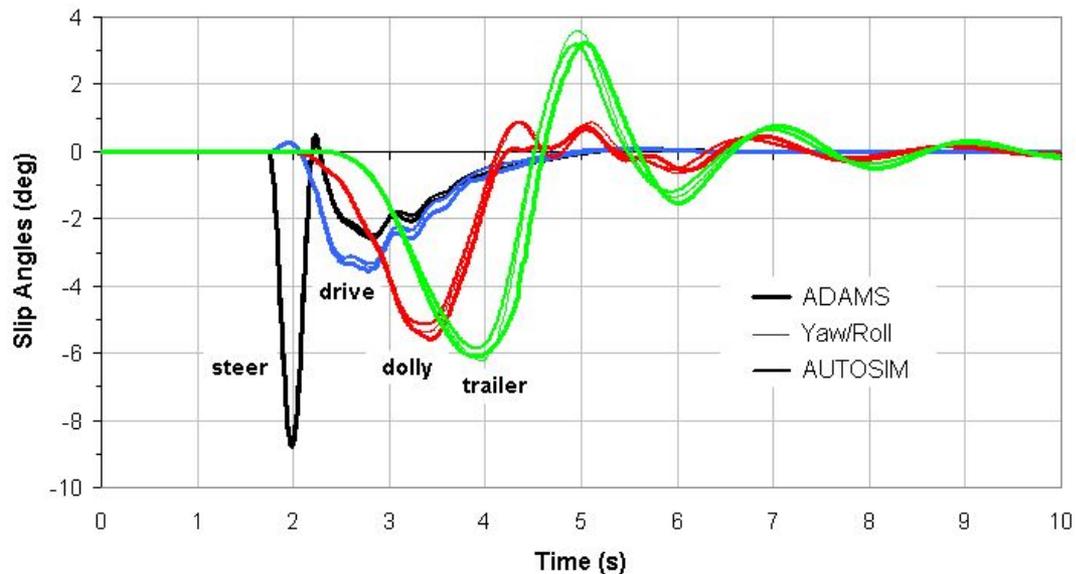
# Результаты моделирования: рывок руля

Угол бокового  
увода, град.

ADAMS

Yaw/Roll

AUTOSIM



UM



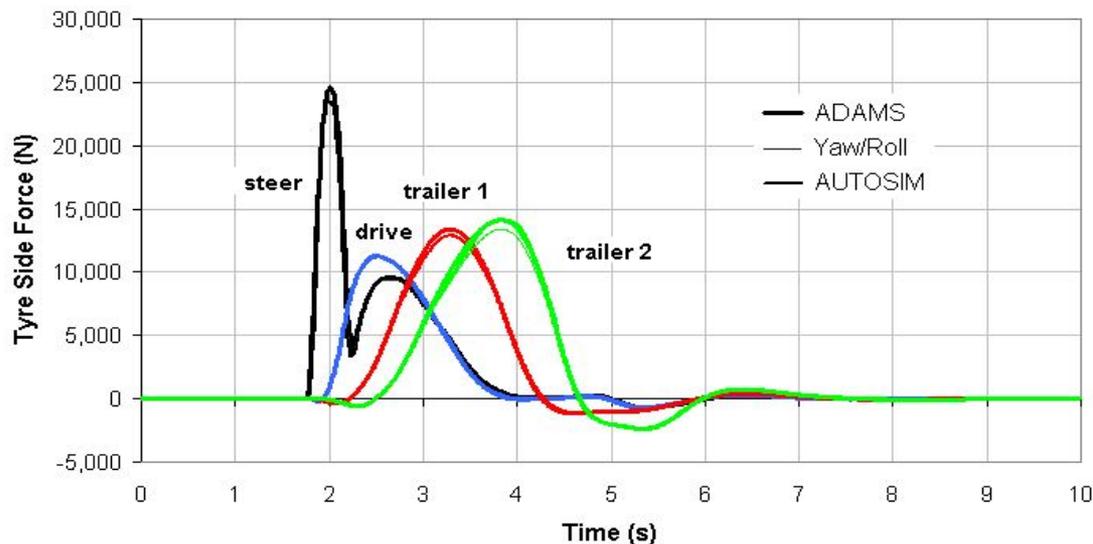
# Результаты моделирования: рывок руля

Поперечные силы  
в шинах, Н

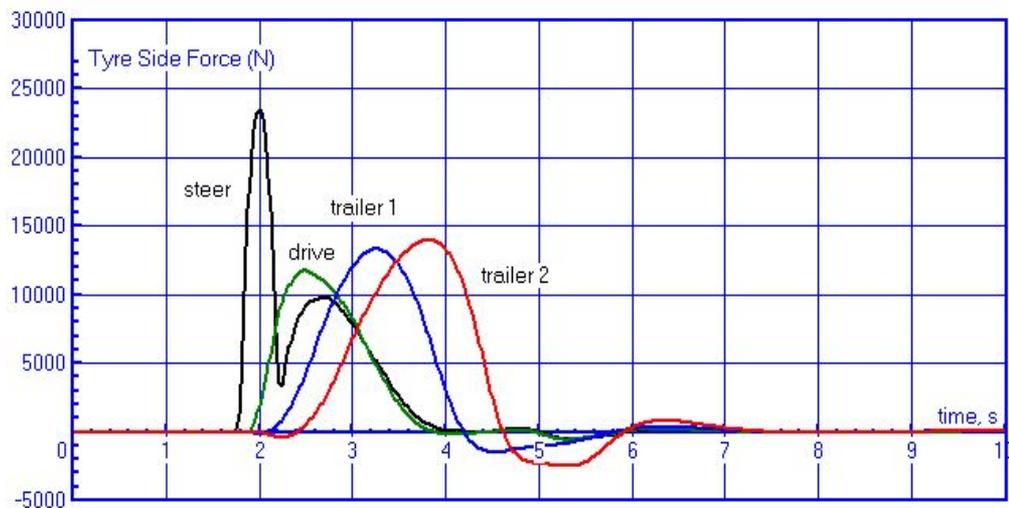
ADAMS

Yaw/Roll

AUTOSIM

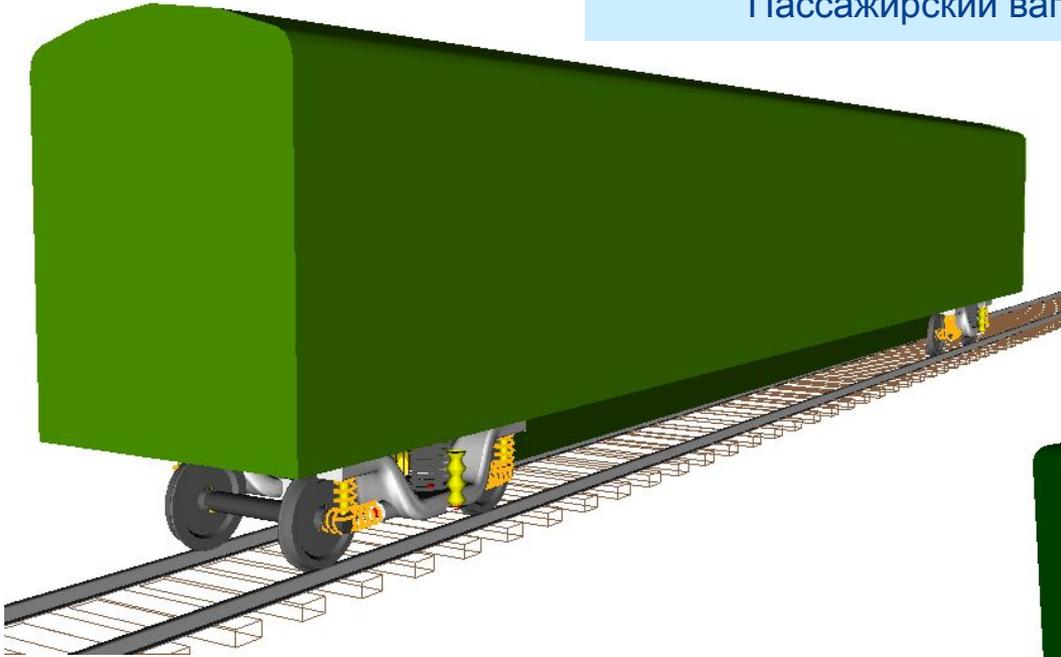


UM

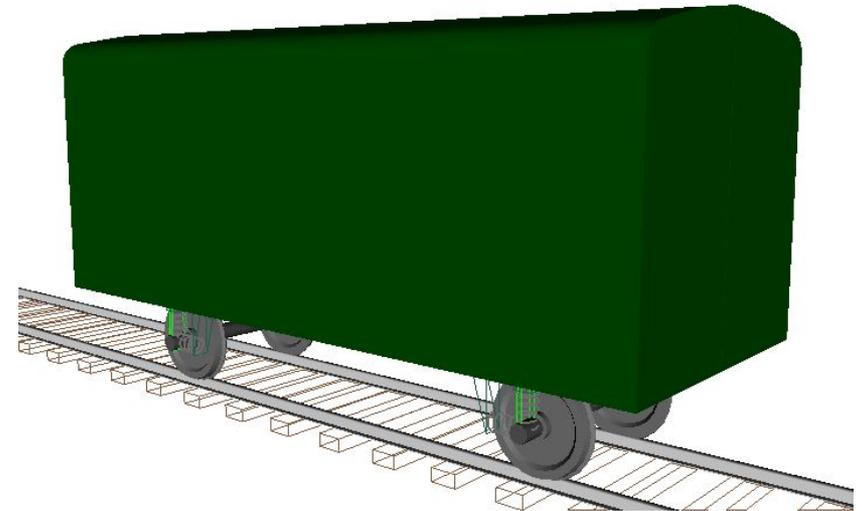


# Железнодорожные экипажи: Манчестерские тесты

Манчестерский тест – Экипаж 1:  
Пассажирский вагон



Manchester Metropolitan University  
Rail Technology Unit

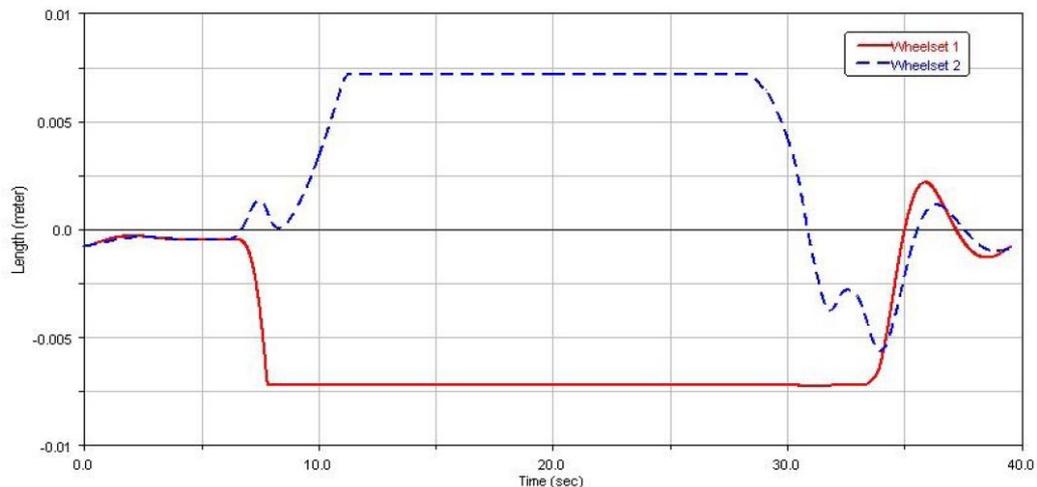


Манчестерский тест – Экипаж 2:  
Грузовой вагон

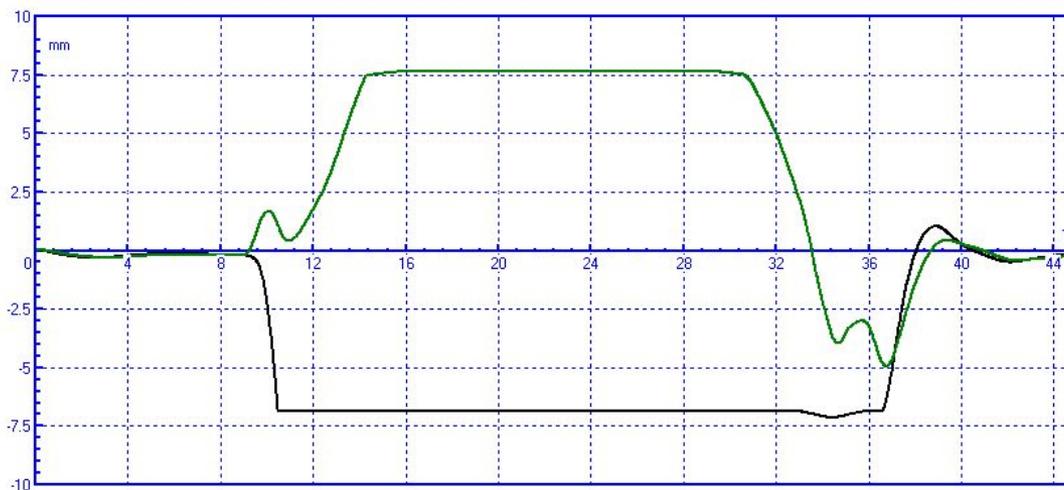
# Манчестерские тесты: сравнение результатов

Экипаж 1, Путь 1

Поперечное смещение колесных пар 1, 2



ADAMS/Rail

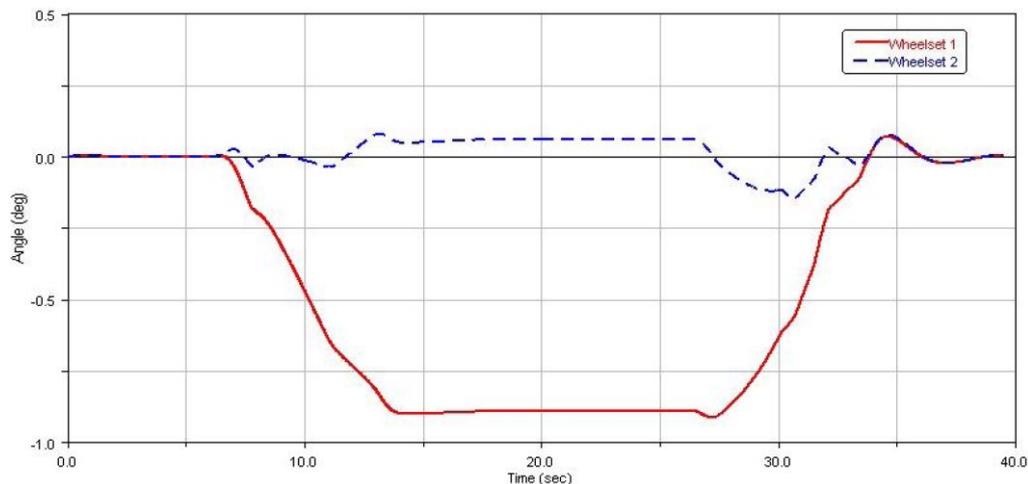


UM

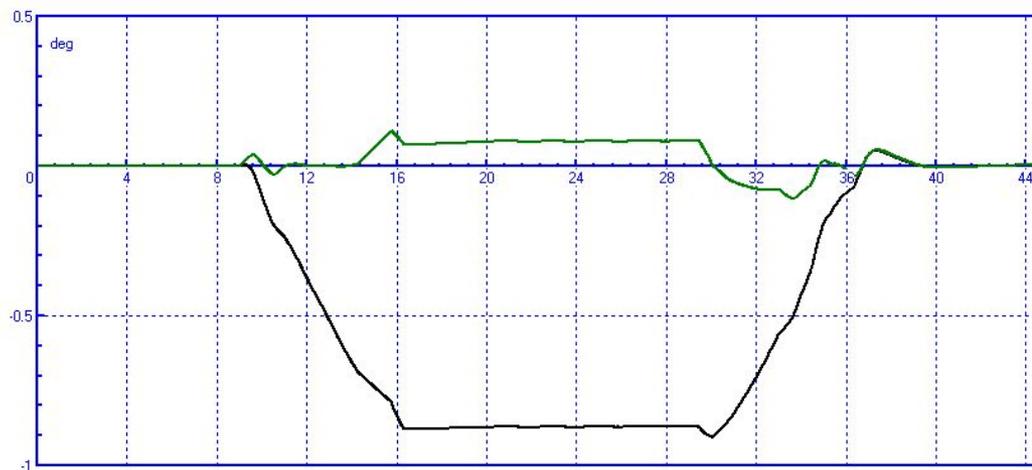
# Манчестерские тесты: сравнение результатов

Экипаж 1, Путь 1

Угол виляния колесных пар 1, 2



ADAMS/Rail

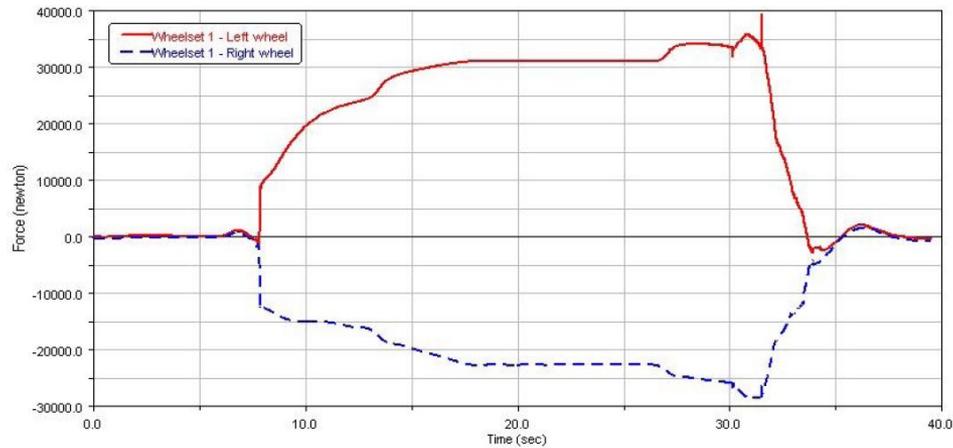


UM

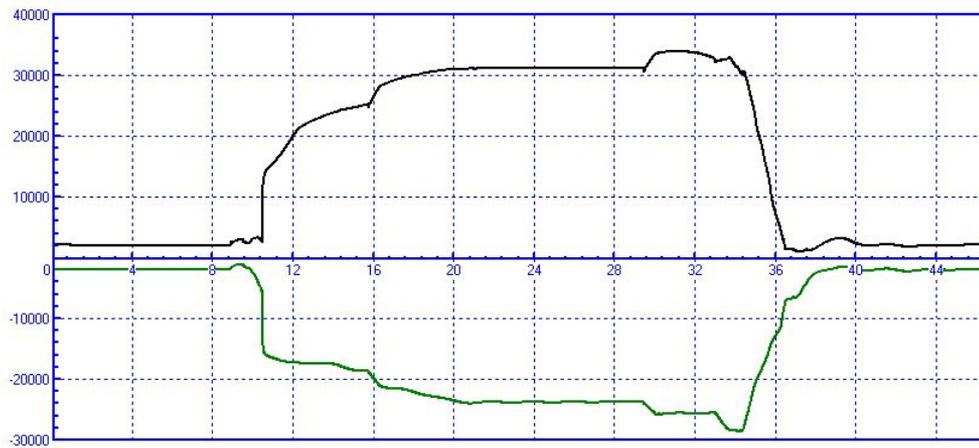
# Манчестерские тесты: сравнение результатов

Экипаж 1, Путь 1

Направляющие силы на колесной паре 1



ADAMS/Rail



UM

# Сравнение с экспериментами



Сакало  
Владимир  
Иванович, д.т.  
н., БГТУ,  
Брянск

- В работах В.И. Сакало и В.С. Коссова рассматривается динамика локомотива ТЭ116 и отмечается, что «достигнута удовлетворительная сходимость теоретических и экспериментальных значений всех рассматриваемых показателей, в том числе рамных сил. Расхождение результатов моделирования и эксперимента для прямых и кривых участков пути не превышает **15%**.»



Павлюков  
Александр  
Эдуардович, д.  
т.н., УрГУПС,  
Екатеринбург

- В работе А.Э. Павлюкова и др. проводились эксперименты с грузовой тележкой типа 18-100. Отмечается сходимость результатов в пределах **10%**.



Дмитrochenко  
Олег  
Николаевич, к.  
ф.-м.н., МГУ,  
Москва

- В работе О.Н. Дмитrochenко рассматривается тонкий упругий стержень. С целью достоверного определения положений равновесия, собственных частот и форм колебаний были проведены стендовые эксперименты. Сравнение результатов численных и стендовых экспериментов показало, что первые собственные частоты колебаний балки совпадают с точностью **1-2%**.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

[www.umlab.ru](http://www.umlab.ru)

[um@umlab.ru](mailto:um@umlab.ru)