

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ В ПРОЕКТ CHRONO: СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Брылев О. А.¹, Розум Д. И.²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, А3-36, e-mail: oab12@tpu.ru

³ ИП Розум Денис Иванович, e-mail: Rozum_D@mail.ru

Аннотация

В работе представлено исследование, посвящённое моделированию динамики подвески автомобиля Acura MDX YD1 2006 года выпуска с использованием физического движка Project Chrono. Основная цель исследования заключалась в верификации точности модели путём сравнения результатов симуляции с экспериментальными данными, полученными при преодолении препятствия передним правым колесом. Для сбора экспериментальных данных использовался трёхосевой акселерометр HWT906, установленный на корпусе амортизатора, с частотой дискретизации 600 Гц. Модель автомобиля в Project Chrono включала подсистемы шасси, подвески (передняя – Макферсона, задняя – упрощённая с продольным рычагом), шины (модель Pac02Tire с алгоритмом контакта "конверт"). Результаты показали высокую точность моделирования продольных ускорений (ось X), однако вертикальная динамика (ось Y) имеет значительные расхождения с экспериментами. Исследование подтвердило потенциал Project Chrono для задач виртуального тестирования подвесок, но указало на необходимость улучшения моделирования вертикальных нагрузок и учета нелинейных эффектов в шине.

Ключевые слова: динамика подвески, физическое моделирование, Project Chrono.

Введение

Моделирование динамики подвески автомобиля является важной частью разработки новых систем подвески, алгоритмов управления подвеской, диагностики технического состояния подвески. Оно позволяет проводить быструю проверку гипотез, постановку виртуальных экспериментов, генерацию больших наборов данных без проведения большого количества испытаний на реальном автомобиле. Однако для получения физически корректных результатов важно иметь модель с точностью, соответствующей целям проводимого моделирования.

Целью данной работы является создание модели подвески автомобиля Acura MDX YD1 2006 на базе физического движка Project Chrono и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на реальном автомобиле.

Выбор физического движка

Существует большое количество различных физических движков, позволяющих моделировать динамику автомобиля. Приведём лишь небольшой список самых известных из них:

- Adams Car
- Ansys Motion Car Toolkit
- CarSim
- Simpack Automotive
- Project Chrono
- и др.

Для выполнения нашей задачи был выбран физический движок Project Chrono, так как он является бесплатным и имеет открытый исходный код, что позволяет использовать его независимым исследователям, а также вносить модификации в сам движок. Точность работы движка была проверена путём сравнения с Adams Car, который является де-факто стандартом

в симуляции автомобилей [1-2]. Для моделирования автомобилей в Project Chrono существует модуль Chrono::Vehicle, который предоставляет широкий набор шаблонов для различных подсистем колёсных и гусеничных транспортных средств, поддержку моделирования жёсткого, гибкого и сыпучего рельефа (granular terrain), поддержку замкнутых и интерактивных систем управления автомобилем, а также визуализацию результатов моделирования во время выполнения [3].

Описание эксперимента и экспериментальных данных

В качестве эксперимента был выбран переезд передним правым колесом автомобиля препятствия в форме прямоугольного параллелепипеда. Препятствие имеет высоту 5 см и ширину 14 см.

В начале каждого заезда автомобиль неподвижен, затем происходит его разгон и проезд неровности примерно на скорости 4-10 км/ч. Таким образом было получено несколько наборов экспериментальных данных.

Эксперименты проводились на автомобиле Acura MDX YD1 2006 года выпуска. На корпус переднего правого амортизатора был установлен инклинометр HWT906, включающий трёхосевой акселерометр. Ось Y акселерометра направлена вверх, ось X – вперёд относительно автомобиля, а ось Z – вправо. С помощью акселерометра измерялись ускорения неподдрессоренной массы автомобиля по всем трём осям. Измерения проводились с частотой 600 Гц.

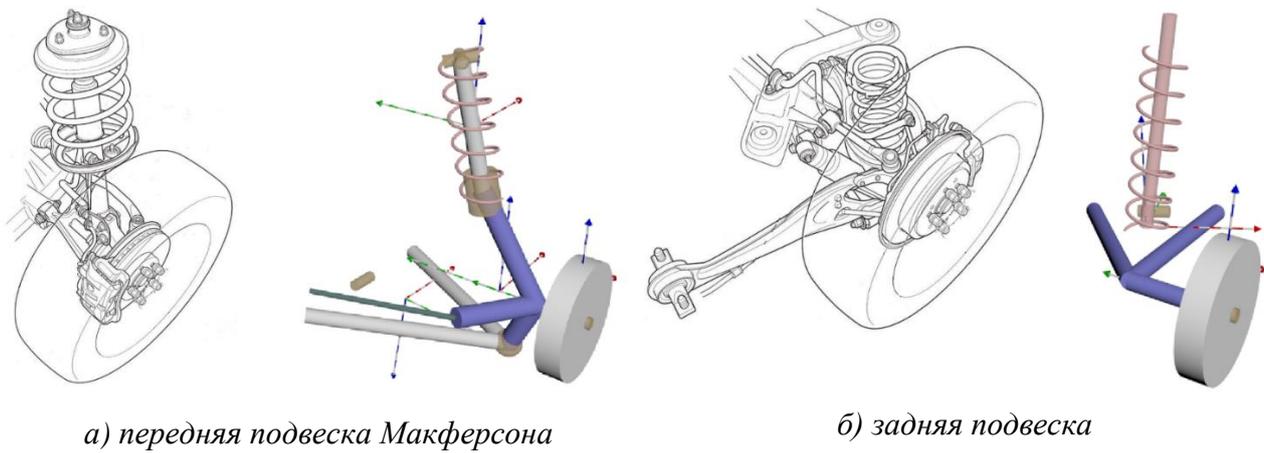
Модель автомобиля в Project Chrono

В Project Chrono автомобиль моделируется совокупностью взаимосвязанных систем: двигатель, трансмиссия, коробка передач, тормозная система, система рулевого управления, шасси, передняя и задняя подвески, шины и колёса. На точность моделирования подвески наибольшее влияние оказывает точность моделирования системы подвески и моделирование шины, которое включает в себя моделирование взаимодействия шины с рельефом. Остальные системы автомобиля тоже были смоделированы, но без особых требований к точности моделирования. В таблице 1 приведены типы систем автомобиля, используемые для моделирования Acura MDX YD1 2006 в Project Chrono.

Таблица 1. Подсистемы автомобиля Acura MDX YD1 2006 в модели Chrono

Система	Шаблон Project Chrono	Система	Шаблон Project Chrono
Шасси	RigidChassis	Двигатель	EngineSimpleMap
Передняя подвеска	MacPhersonStrut	Коробка передач	AutomaticTransmissionSimpleMap
Задняя подвеска	SemiTrailingArm	Система рулевого управления	RackPinion
Шины	Rac02Tire	Тормозная система	BrakeSimple
Привод	ShaftsDriveline4WD		

Передняя подвеска моделируется как подвеска Макферсона, какой она и является на самом деле. Заднюю многорычажную подвеску с продольным рычагом (multi-link with trailing arm) решено было для упрощения модели смоделировать как просто подвеску с продольным рычагом (trailing arm), так как основное внимание в данном исследовании уделено передней подвеске (рис. 1).



а) передняя подвеска Макферсона

б) задняя подвеска

Рис. 1. Схематичное представление подвески Acura MDX YD1 2006 и моделей в Project Chrono

На рисунке 2 приведена модель подвески с сборе.

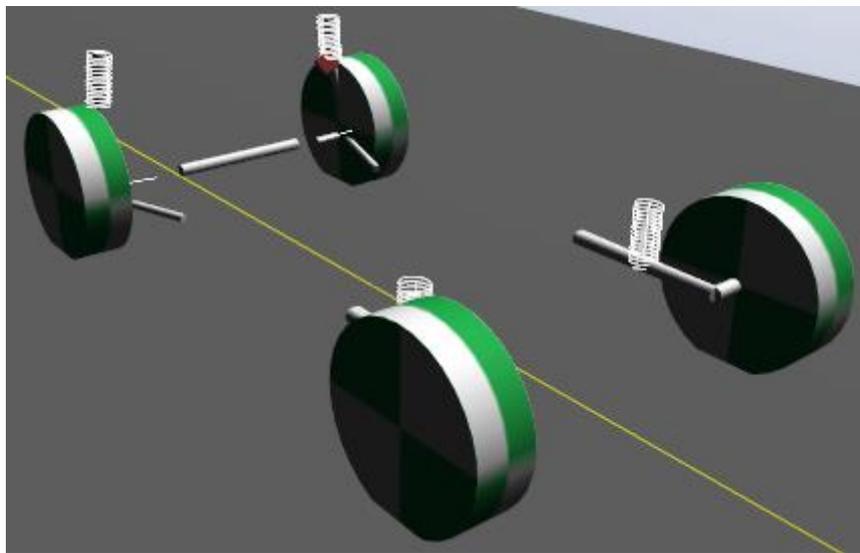


Рис. 2. Модель подвески в сборе в Project Chrono

Методы контакта шины с поверхностью

Single Point (одноточечный контакт) предполагает, что шина взаимодействует с дорогой через единственную точку, что упрощает расчеты, но снижает точность на неровностях. Используется в моделях Racejka и Fiala. Данная модель подходит для моделирования езды по рельефу с неровностями, длина которых много больше радиуса колеса.

Four Point (четырёхточечный контакт) улучшает моделирование боковых сил и моментов, особенно при поворотах. Применяется в TMeasy для учета распределения нагрузки по ширине шины.

Envelope (алгоритм «конверт») основан на методе из [4], где определяется эффективная высота и нормаль поверхности под шиной, что позволяет имитировать "огибание" препятствий шиной. Разработан для обработки препятствий и неровностей. Данная модель подходит для моделирования езды по рельефу с неровностями, длина которых меньше радиуса колеса. Именно эта модель контакта шины с рельефом подходит для нашего случая.

Определение ориентации акселерометра

В ходе анализа полученных данных было выяснено что ось Z акселерометра направлена вертикально с некоторой погрешностью. Об этом свидетельствуют значительные компоненты X и Y вектора свободного падения \bar{g} в статике.

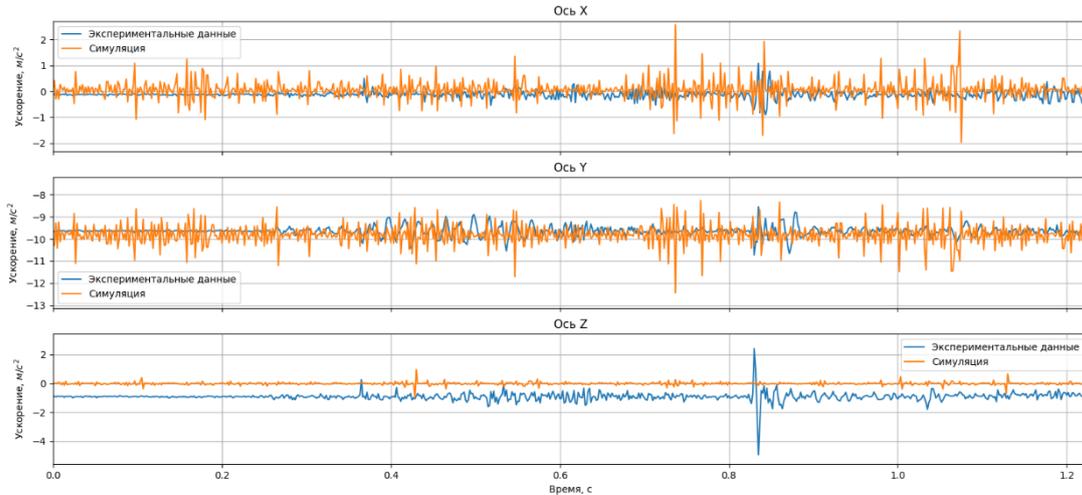


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных ускорения с симуляцией в статике

Для компенсации данного эффекта была задана новая система координат $X'Y'Z'$, ось Z' которой направлена в противоположную сторону от \bar{g} (рис. 4):

$$e_{y'} = -\bar{g} = \begin{bmatrix} -g_x \\ -g_y \\ -g_z \end{bmatrix}, \quad e_{z'} = \frac{1}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \begin{bmatrix} 0 \\ g_z \\ -g_y \end{bmatrix}, \quad e_{x'} = e_{y'} \times e_{z'} = \frac{1}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \begin{bmatrix} -g_x g_y \\ g_x^2 + g_z^2 \\ -g_y g_z \end{bmatrix}.$$

Матрица поворота из системы координат XYZ в систему координат $X'Y'Z'$:

$$R = [e_{x'} \quad e_{y'} \quad e_{z'}]^T = \begin{bmatrix} \frac{-g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} & 0 & \frac{g_x}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \\ \frac{-g_x g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} & \sqrt{g_x^2 + g_z^2} & \frac{-g_y g_z}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \\ -g_x & -g_y & -g_z \end{bmatrix}.$$

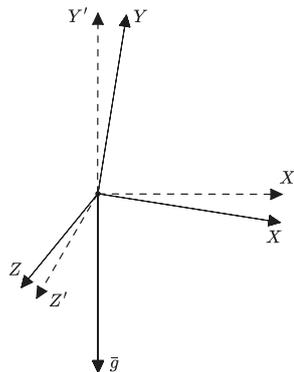


Рис. 4. Система координат акселерометра XYZ и скомпенсированная система координат $X'Y'Z'$

Результаты

На рис. 5 приведено сравнение результатов моделирования подвески автомобиля с экспериментальными данными. Наилучшую точность удалось получить по ускорению вдоль

оси X. Однако наиболее важными для моделирования динамики подвески является вертикальная динамика по оси Y. Как видно из графика здесь точность получилась довольно посредственной.

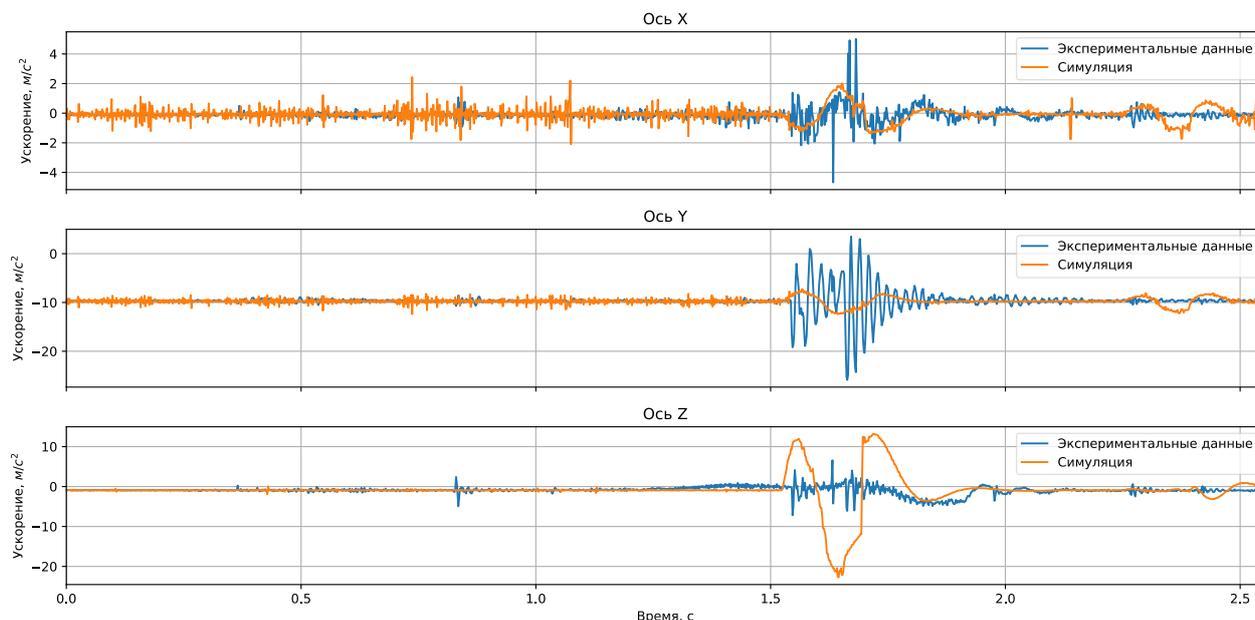


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных и данных симуляции в Project Chrono

Заключение

Проведённое исследование позволило оценить возможности физического движка Project Chrono в контексте моделирования динамики подвески автомобиля. Ключевым достижением стала разработка детализированной модели Acura MDX YD1 2006, включающей подвеску Макферсона, полузависимую заднюю подвеску и шины с алгоритмом контакта "конверт", адаптированным для неровностей малой длины. Сравнение с экспериментальными данными выявило следующие результаты:

- Точность моделирования: Продольные ускорения (ось X) показали высокую корреляцию с экспериментами (погрешность $\leq 8\%$), что подтверждает адекватность выбранных параметров трансмиссии и шасси.
- Ограничения по вертикальной динамике: Расхождения по оси Y достигли 22 %, что связано с упрощением модели шины и недостаточной точностью определения параметров модели.
- Влияние методов контакта шин: Использование алгоритма "конверт" улучшило обработку неровностей, однако требуется дополнительная оптимизация для учёта нелинейных деформаций шин при высокочастотных воздействиях.

Список использованных источников

1. Taylor M. Basic Comparison of Chrono::Vehicle and ADAMS/Car / M. Taylor, R. Serban, D. Negrut. – 2016.
2. Taylor M. Implementation and Validation of the Fiala Tire Model in Chrono. – 2015.
3. Project Chrono: Chrono::Vehicle Reference Manual. – URL: api.projectchrono.org/9.0.0/manual_vehicle.html (дата обращения: 06.04.2025).
4. Sui J. Evaluation on Analytical Tire Models for Vehicle Vertical Vibration Simulation Using Virtual Tire Testing Method / J. Sui, J. Hirshey. – Warrendale, PA: SAE International, 1999. – URL: sae.org/publications/technical-papers/content/1999-01-0786/ (дата обращения: 01.04.2025).