

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет ИТМО»  
(Университет ИТМО)

Факультет систем управления и робототехники

Проект  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГУСЕНИЧНОГО ТС В СРЕДЕ PROJECT CHRONO

по дисциплине:  
Имитационное моделирование робототехнических систем

Студент:  
*Группа № R4134с*

*К.С. Хитушкин*

Предподаватель:  
*Ассистент ФСУиР*

*Е.А. Ракин*

Санкт-Петербург  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ .....	4
1.1 Выбор инструмента для моделирования .....	4
1.2 Описание целевого ТС .....	4
1.3 Разработка модели целевого ТС .....	6
1.3.1 Установка Project Chrono.....	6
1.3.2 Разработка и параметризация модели .....	6
1.3.3 Моделирование грунта .....	8
1.3.4 Проверка работы модели.....	9
1.3.5 Построение контроллера на примере PID регулятора ...	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	11

## ВВЕДЕНИЕ

Данная работа выполняется в рамках задачи разработки RTI-NMPC контроллера для целевого гусеничного робота «Объект 314», разрабатываемого командой **PVM**. Для тестирования и отладки контроллера необходимо создать модель робота в симуляторе, поддерживающем гусеничные машины.

### **Цель работы:**

Построить модель гусеничного транспортного средства в Project Chrono и подготовить рабочую симуляционную среду для проверки и отладки контроллеров управления.

### **Задачи:**

1. Установка Project Chrono и подготовка окружения.
2. Создание базовой модели робота и её параметризация.
3. Настройка гусеничного движителя и физических свойств поверхности.
4. Проверка работы управления и базовых манёвров.
5. Проведение симуляций и тестирование управления на примере PID-регулятора.

Исходный код: [https://github.com/KirillHit/object314\\_chrono](https://github.com/KirillHit/object314_chrono).

# 1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Выбор инструмента для моделирования

Большинство симуляторов, часто используемых в робототехнике, таких как Gazebo, Webots, Bullet и MuJoCo, не имеют прямой поддержки гусениц. Стандартным подходом для моделирования гусеничных транспортных средств в этих симуляторах является аппроксимация гусеницы несколькими близко расположенными колёсами. Однако данный подход не позволяет адекватно воспроизводить многие аспекты работы гусениц, такие как распределение усилий по ленте, сцепление с неровной или мягкой поверхностью, проскальзывание и деформации трака. Также, учитывая, что основные сценарии использования гусеничных ТС включают работу на сложных поверхностях (песок, снег, грязь), симулятор должен уметь моделировать взаимодействие с такими средами.

К симуляторам с поддержкой гусениц относятся некоторые коммерческие продукты, такие как RecurDyn и Altair HyperWorks. Однако их использование ограничено высокой стоимостью лицензий и сложностью интеграции с робототехническими системами. Существуют также модули для MATLAB и отдельные самостоятельные проекты, которые позволяют моделировать гусеницы, но обладают сильно ограниченным функционалом и производительностью.

Из этих решений выгодно выделяется *Project Chrono*, так как он сочетает открытый исходный код, зрелую кодовую базу с широким набором моделей гусениц, грунта и агрегатов, высокую производительность при моделировании множественных контактов, а также возможность интеграции с ROS. Поэтому для реализации модели было принято решение использовать именно Project Chrono.

## 1.2 Описание целевого ТС

Целевая платформа, для которой необходимо построить модель, представляет собой гусеничный коммунальный робот с дифференциальным приводом, изображённый на рисунке 1.

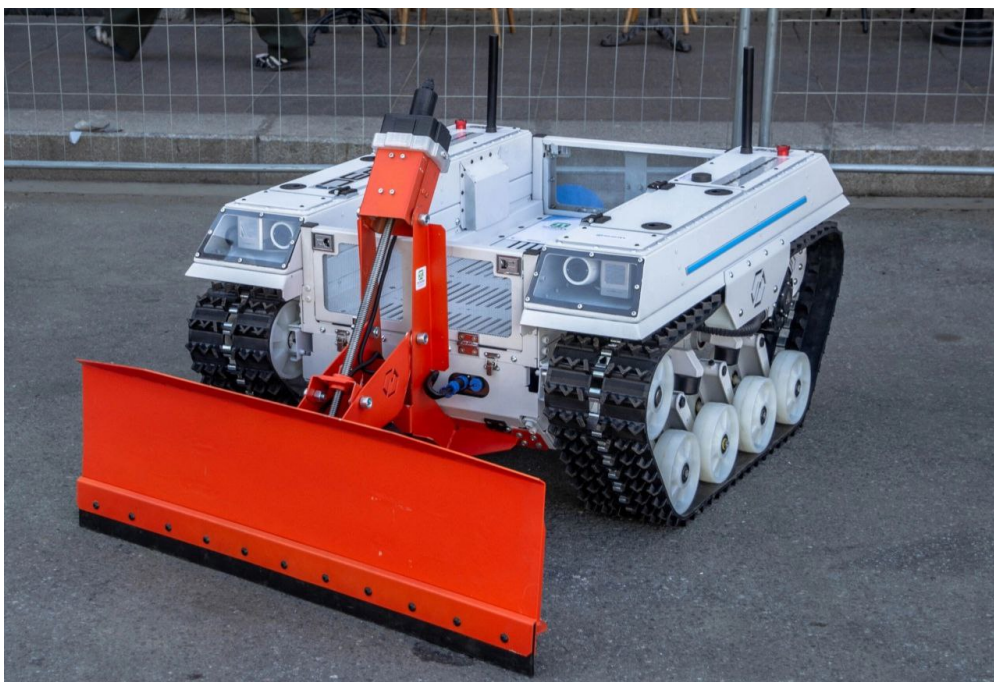


Рисунок 1 — Целевая гусеничная платформа

Основные компоненты платформы:

- *Привод*: две независимые гусеницы, каждая оснащена мотором *QSMotor 138 V1* с контроллером *Kelly KLS7230S*, обеспечивающим управление скоростью.
- *Сенсоры*:
  - Энкодеры на моторах.
  - GNSS RTK *Emlid Reach M2*.
  - IMU *MPU-9250*.
- *Дополнительные модули*: периферийные устройства и сенсоры, не задействованные напрямую в управлении движением.

Технические характеристики платформы:

- Длина: 1332 мм
- Ширина: 970 мм
- Высота: 550 мм
- Клиренс: 200 мм
- Снаряжённая масса: 300 кг
- Максимальная скорость: 20 км/ч

## 1.3 Разработка модели целевого ТС

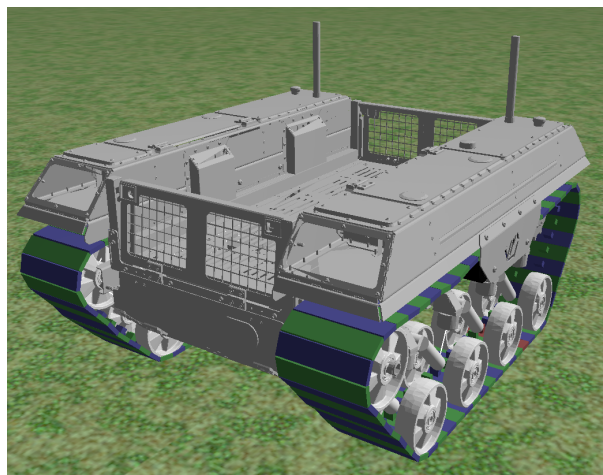
### 1.3.1 Установка Project Chrono

Существует возможность работы с Chrono через интерфейс Python (PyChrono), однако его функционал ограничен, поскольку некоторые зависимости и модули Chrono не могут быть упакованы в виде Python-библиотеки. В связи с этим было принято решение использовать полноценный C++ API, который обеспечивает доступ ко всем модулям симулятора и позволяет максимально эффективно использовать его возможности.

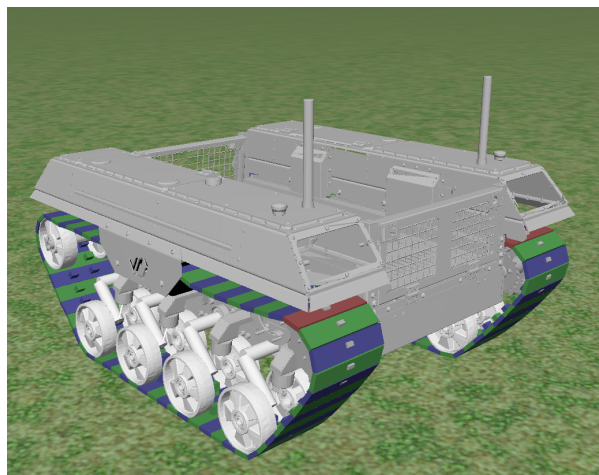
Основной способ установки Chrono – сборка из исходного кода. Такой подход позволяет включить все необходимые модули, включая поддержку гусеничных ТС, моделирование сложных поверхностей и грунта, интеграцию с ROS, сенсоры, различные решатели и т.д. Для обеспечения воспроизводимости сборка Chrono была произведена с использованием Docker.

### 1.3.2 Разработка и параметризация модели

Используя в качестве шаблона пример модели гусеничного БМП «Marder», была построена модель целевого ТС. Изображения построенной модели приведены на рисунке 2.



(а) Вид спереди



(б) Вид сзади

Рисунок 2 — Разработанная модель гусеничного робота «Объект 314»

## Моделирование шасси

Модель шасси была построена с учётом инерционных свойств всех элементов, были настроены моторы и тормоза. Изображение шасси представлено на рисунке 3. В состав шасси входят ведущие звездочки, один каток-натяжитель, четыре обычных катка, а также два поддерживающих ролика, что обеспечивает правильное натяжение и устойчивость гусеницы. Подвеска представлена упругими и демпфирующими элементами катков, закреплённых на рычагах, которые обеспечивают более равномерное распределение нагрузки.

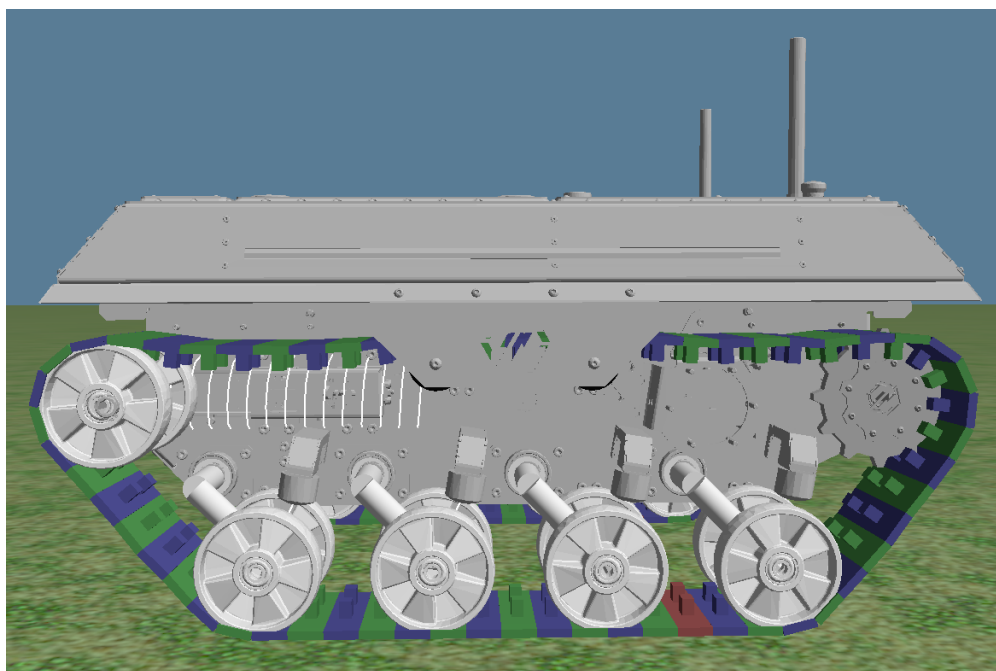


Рисунок 3 — Модель шасси целевого ТС

## Моделирование гусеницы

Гусеница была реализована с использованием схемы *single-pin*, где каждый трак соединён со следующим посредством одного шарнира. Этот подход обеспечивает реалистичное поведение гусеницы при относительно невысокой вычислительной сложности.

Кроме *single-pin* в Project Chrono существуют также следующие модели гусениц:

- *Double-pin* – траки соединяются двумя шарнирами.

- *Band-bushing* – представляет собой непрерывную ленту с упругими втулками, используется для более реалистичного моделирования резиновых гусениц.
- *Band-ANCF* – усовершенствованная непрерывная лента, реализованная с помощью ANCF-элементов, позволяет моделировать гибкие деформации трака.

Использование модели single-pin позволяет достаточно подробно имитировать поведение гусениц, при этом значительно ускоряя симуляцию. Для задачи тестирования контроллеров single-pin достаточно. В будущем возможен переход на модели, поддерживающие деформации.

Построенная модель гусеницы также включает направляющие пальцы, которые удерживают траки на ведущих звездочках и катках. При сильных нагрузках возможен сход гусеницы с шасси.

### 1.3.3 Моделирование грунта

Project Chrono поддерживает несколько моделей грунта, позволяющих адаптировать симуляцию под различные типы поверхностей:

- *Flat terrain* – плоская горизонтальная поверхность.
- *Rigid terrain* – жёсткий рельеф с произвольной геометрией.
- *CRG terrain* – дорожно-специфичный рельеф на основе OpenCRG.
- *Deformable SCM (Soil Contact Model)* – деформируемый грунт на основе полуэмпирической модели Беккера, допускает локальные провалы под колесами или гусеницами.
- *Granular terrain* – насыпной грунт, реализованный методом дискретных элементов (DEM), подходящий для моделирования песка или мелкого гравия.
- *Deformable FEA* – деформируемый грунт, смоделированный через конечные элементы ANCF, обеспечивает высокоточное воспроизведение деформаций и напряжений.

В данной работе реализована Flat terrain с препятствиями для тестирования работы подвески и SCM terrain. SCM позволяет моделировать деформацию грунта под нагрузкой траков, включая образование колеи, провалов



и уплотнение почвы, что позволяет реалистично воспроизводить поведение транспортного средства на мягкой поверхности. Демонстрация движения целевого ТС по поверхности SMC представлена на рисунке 4.

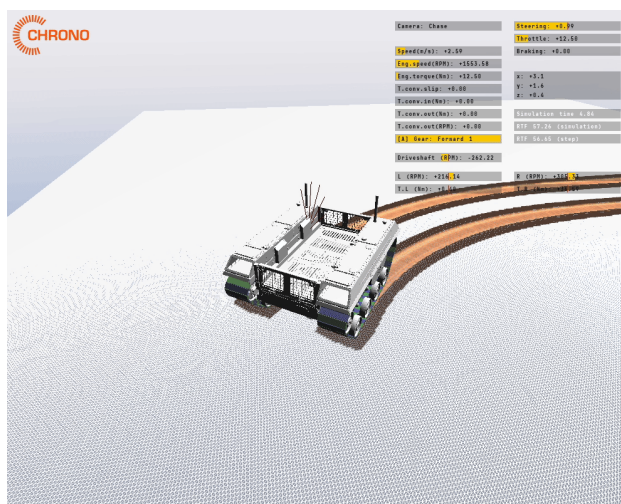


Рисунок 4 — Демонстрация движения целевого ТС по поверхности SMC

### 1.3.4 Проверка работы модели

Для проверки разработанной модели был подготовлен скрипт для ручного управления платформой, а также построена полоса препятствий, предназначенная для оценки работы подвески и общего динамического поведения ТС. Демонстрация прохождения роботом полосы препятствий представлена на рисунке 5.

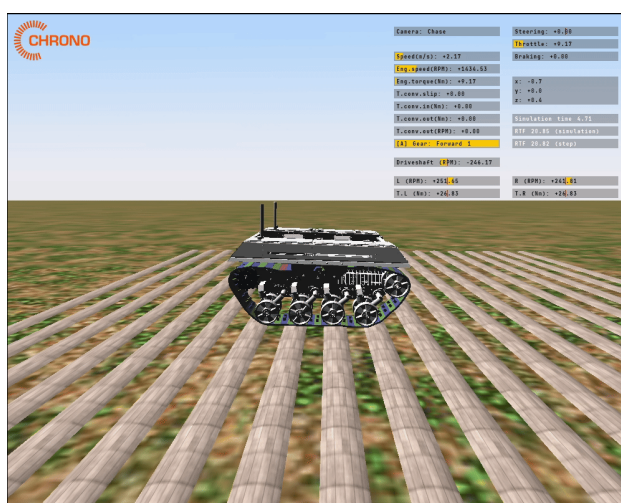


Рисунок 5 — Демонстрация прохождения роботом полосы препятствий

Полученная модель демонстрирует реалистичное поведение на различных неровностях. Для количественной оценки степени соответствия между результатами симуляции и поведением реального робота требуются дополнительные экспериментальные исследования исходной платформы.

### 1.3.5 Построение контроллера на примере PID регулятора

Для получения опыта реализации контроллеров в Chrono был реализован PID регулятор, поддерживающий заданную скорость движения ТС. На рисунке 6 представлена зависимость скорости платформы, управляемой PID регулятором, от времени.

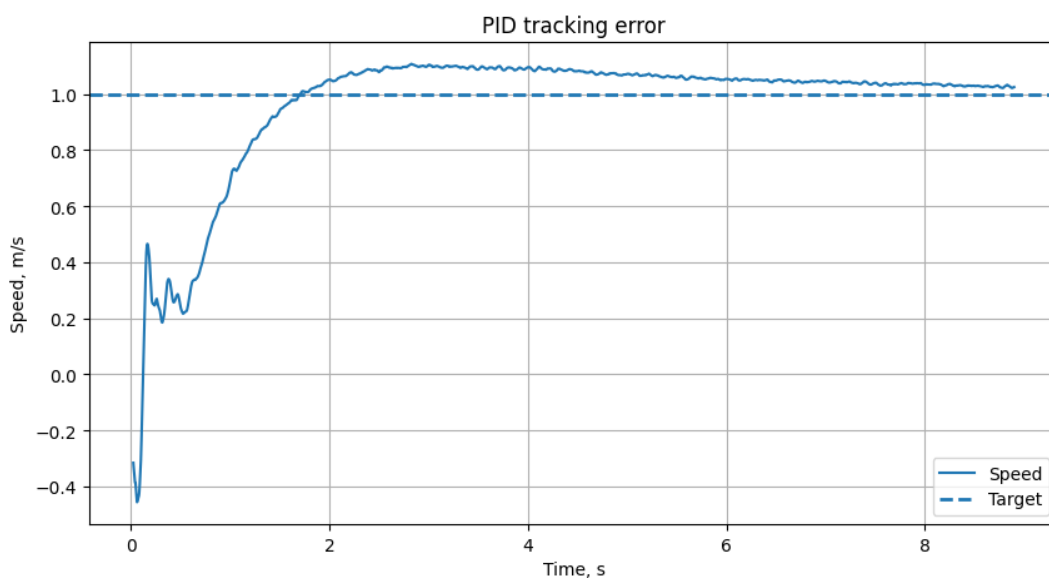


Рисунок 6 — Зависимость скорости платформы, управляемой PID регулятором, от времени

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была разработана модель гусеничного транспортного средства «Объект 314» в среде Project Chrono. Подготовлено программное окружение и выполнена сборка симулятора с использованием Docker. Построена модель шасси робота, включающая натяжители, подвеску, ведущие звездочки и гусеницы по схеме single-pin. Реализована поддержка различных типов поверхности, включая жёсткую опорную плоскость и деформируемый грунт SCM.

Проведена проверка динамики модели на полосе препятствий, подтверждающая корректность работы подвески и реалистичность динамического поведения платформы. Для демонстрации возможностей интеграции алгоритмов управления реализован PID-регулятор, обеспечивающий поддержание требуемой скорости движения.

Полученная симуляционная среда может использоваться как основа для дальнейших исследований и разработки методов управления, включая реализацию RTI-NMPC контроллера и тестирование более сложных сценариев движения. Модель обладает расширяемой архитектурой и может быть дополнена сенсорами, новыми моделями грунта, а также интегрирована с ROS2.