



Павловский В.Е., Огольцов В.Н.,
Огольцов Н.С.

Система управления
нижнего уровня для
автомобиля с механической
трансмиссией

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Павловский В.Е., Огольцов В.Н., Огольцов Н.С. Система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 103. 28 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-103>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

В.Е.Павловский, В.Н.Огольцов, Н.С.Огольцов

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НИЖНЕГО УРОВНЯ
ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ**

Москва, 2013 г.

УДК 531.1

В.Е.Павловский, В.Н.Огольцов, Н.С.Огольцов

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН (ИПМ)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НИЖНЕГО УРОВНЯ ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

АННОТАЦИЯ

Описаны численные динамические модели автомобиля с механической трансмиссией, аппаратно-программные модули компьютерного управления автомобилем на нижнем уровне, результаты экспериментов.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-08-01118.

Ключевые слова и выражения: автономный автомобиль

V.E.Pavlovsky, V.N.Ogoltsov, N.S.Ogoltsov

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS (KIAM)

LOW LEVEL CONTROL SYSTEM FOR THE CAR WITH MECHANICAL TRANSMISSION

SUMMARY

Numerical dynamic models of a car with mechanical transmission and hardware and software modules developed for its low-level control system with the results of appropriate experiments are described.

This work is supported by a grant of the Russian Fund for Basic Research 13-08-01118.

Key words and phrases: the autonomous car

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение	3
2. Роботизированный автомобиль	5
3. Динамическая модель механической трансмиссии автомобиля	7
4. Моделирование динамики автомобиля	11
5. Устройства управления	11
6. Синтез контроллера трансмиссии	14
7. Общая структура и реализация СНУ трансмиссии	16
8. Эксперимент	23
9. Заключение	26
10. Литература	27
11. Приложение	28

1. Введение

В настоящее время актуальной является задача создания автономных транспортных средств – автономных автомобилей. Такие транспортные средства призваны снизить и оптимизировать загруженность дорог, заменить человека в опасных для жизни условиях, увеличить доступность автомобилей для людей с ограниченными физическими возможностями.

Еще в 1939 году Норман Бел, при поддержке компании General Motors, на выставке Futurama представил “автомобиль будущего”, полностью управляемый дистанционно. Такие автомобили должны были ездить по специально оборудованным полосам и полностью управляться автоматикой без человеческого вмешательства. И хотя авторы именно так представляли себе Нью-Йорк всего-то через 20 лет, задача создания полностью автономного транспортного средства для езды по дорогам общего пользования не решена до сих пор.

Серьезные научные исследования в этой сфере начались примерно в 80-х годах прошлого века. Среди них прежде всего необходимо отметить два проекта – основоположники направления развития автономных автомобилей в Европе и США:

- В Германии команда Bundeswehr University Munich, под руководством Эрнста Дикманнса, оборудовала фургон Mercedes-Benz системой компьютерного зрения. В ходе экспериментов автомобиль достиг скорости 100 км/ч на пустых улицах города.
- В США объединенная команда из нескольких институтов (Carnegie Mellon University, Environmental Research Institute of Michigan, SRI) создала Autonomous Land Vehicle (ALV, автономное наземное транспортное средство). ALV был снабжен лазерным дальномером, системой компьютерного зрения и автономной роботизированной системой управления, способной управлять автомобилем на скорости до 30 км/ч. Данный проект проходил при спонсорстве агентства Министерства Обороны США DARPA.

Разработки Дикманнса продемонстрировали надежность созданных систем автономного управления на трассах общественного пользования при наличии реального транспортного потока, в 1995 году он проехал на автономной машине свыше 1758 км из Баварии в Данию, лишь по-минимуму вмешиваясь в управление. Эта поездка явилась важнейшим событием в истории создания автономных автомобилей. Идеи аппаратного и программного обеспечения Дикманнса были скопированы для других исследовательских проектов, промышленных (Daimler-Benz) и теоретических (Мюнхенским техническим университетом). На Рис. 1.1 показан один из автономных автомобилей Дикманнса – автомобиль VaMoRs.

Заметим, эта разработка дала начало проекту EUREKA Prometheus (PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety - программа для обеспечения высшей эффективности и беспрецедентной безопасности дорожного движения в Европе, 1987-1995).



Рис. 1.1. VaMoRs

С тех пор множество компаний и лабораторий по всему миру присоединилось к разработке беспилотного автомобиля [1-4]. В настоящее время в этом вопросе сильно продвинулась компания Google, реализовав проект автоматического автомобиля Google Car [2]. Один из автомобилей этого проекта (Toyota Prius) показан на Рис. 1.2. Google принимала активное участие в легализации беспилотных автомобилей на дорогах общего пользования США (Невада – март, Флорида – апрель, Калифорния – сентябрь 2012, см. [13]).

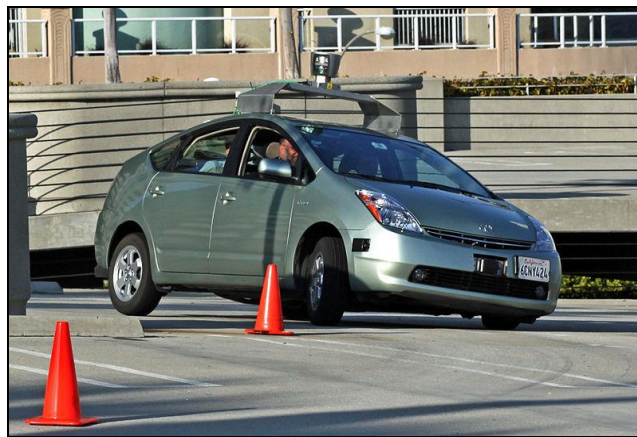


Рис. 1.2. Toyota Prius в проекте Google Car

Отметим среди таких проектов еще два. Проект PATH California [3], проводимый Институтом изучения транспортных систем Университета Беркли в Калифорнии в сотрудничестве с Департаментом Транспорта Калифорнии, в настоящее время проект имеет весьма широкую программу по управлению транспортом, по безопасности и т.п. А также проект итальянской компании Vislab (при университете г. Пармы) [4], в котором было выполнено создание автоматических электрических автомобилей на базе минифургонів Electric Porter Piaggio и проведен дальний тур этих автомобилей Италия-Китай в "почти автоматическом режиме" (в первом автомобиле находился водитель). В этом пробеге автокараван прошел через Россию в 2010 г.

Традиционно системы такого автомобиля можно разбить на два больших класса: системы управления нижнего уровня (модификации подвергаются различные агрегаты автомобиля) и верхнего уровня, основная задача которых – частичное или полное исполнение функций водителя.

Системы управления нижнего уровня (в число которых входят, например, круиз-контроль, роботизированная трансмиссия, система противодействия заносу, антиблокировочная система) давно вышли за стены исследовательских лабораторий и устанавливаются практически на любом современном автомобиле.

В то же время среди задач высокоуровневых систем, отвечающих за частичное или полное управление автомобилем (система автоматической парковки, следования за впереди идущим автомобилем, планирования и исполнения маршрута), еще очень много нерешенных.

Несмотря на то что классы этих систем выполняют принципиально разные задачи, они преследуют одни и те же основные цели:

- повышение эффективности использования ресурсов (загруженность дорог, человеческое время, энергетические ресурсы);
- снижение нагрузки на водителя и перехват части выполняемых им функций;
- уменьшение количества возникающих на дороге аварийных ситуаций и ДТП.

В настоящее время ежегодно проводится множество исследовательских соревнований среди команд, занимающихся созданием беспилотных автомобилей, что еще раз подчеркивает значимость проблемы. Одними из наиболее известных в данной области являются DARPA Grand Challenge (управление автомобилем по пересеченной местности в пустыне, 2004 и 2005 гг.) и DARPA Urban Challenge (беспилотный автомобиль для езды в городе, 2007 г.).

Последние три года аналогичные соревнования проводятся и в России [1]. Появляются публикации по созданию систем автоматизации для автомобиля, см., например, [11,12].

Настоящая работа является расширением и продолжением публикации [5] и описывает численную Simulink-модель и аппаратно-программный комплекс системы управления автомобилем, разработанные в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН.

2. Роботизированный автомобиль

Общая структура автомобиля как автоматически управляемого транспортного средства может быть представлена в виде схемы, изображенной ниже на Рис. 2.1, в блоках СЧУ и СВУ приведены примеры систем этих классов.



Рис. 2.1. Структура управляемого автомобиля

Настоящая работа относится к первому этапу создания такого автомобиля, на котором автоматизируются системы управления нижнего уровня. В работе рассматриваются трансмиссия автомобиля, рулевое управление и тормозная система и создание их роботизированных аналогов.

При создании прототипа роботизированного автомобиля было принято решение использовать серийный автомобиль ВАЗ-21214 «Нива» с бензиновым двигателем объемом 1.7 л типа «моновпрыск». Автомобиль оснащен 5-ступенчатой коробкой переключения передач и 2-ступенчатой раздаточной коробкой. Дифференциал при экспериментах был заблокирован (данное допущение сделано в целях упрощения динамической модели).

Выбор автомобиля с механической коробкой переключения передач (КПП) обусловлен следующими причинами:

- синтезированный алгоритм и устройства управления механической трансмиссией автомобиля предоставляют возможность построения серийного агрегата, относящегося к классу роботизированных КПП;
- существуют определенные сферы применения транспортных средств, где установка автоматических или роботизированных КПП невозможна по тем или иным причинам (сниженная ремонтпригодность, высокие требования к нагрузкам на трансмиссию);
- решение задачи управления автомобилем с механической КПП позволяет создавать специально оборудованные автомобили для управления инвалидами или обучения вождению;
- использование автомобиля с заводской автоматической или роботизированной КПП добавляет лишние временные задержки, ухудшая реакцию всей системы, а также трудно поддается теоретическому анализу ввиду закрытости конкретных алгоритмов, используемых производителями АКПП.

3. Динамическая модель механической трансмиссии автомобиля

Для изучения проблемы управления автомобилем с механической трансмиссией была разработана динамическая модель в среде MATLAB\Simulink с использованием библиотеки компонентов SimScape. Для задания характеристик модели использовались технические характеристики автомобиля ВАЗ-21214 «Нива» [6-7]. С помощью этой модели были решены следующие задачи:

- моделирование и исследование динамики автомобиля при заданном векторе управления трансмиссией;
- подбор параметров отдельных узлов для достижения заданных характеристик устройств управления;
- синтез алгоритмов контроллера трансмиссии.

Общая схема динамической модели автомобиля с механической трансмиссией представлена на Рис. 3.1 (обозначения здесь и далее даны в нотации Simulink) и состоит из следующих блоков:

- двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- механизм сцепления;
- первичный вал;
- коробка переключения передач (КПП);
- вторичный вал;
- раздаточная коробка;
- колесные оси (включая тормозные механизмы);
- привод тормозной системы;
- корпус и колеса автомобиля.

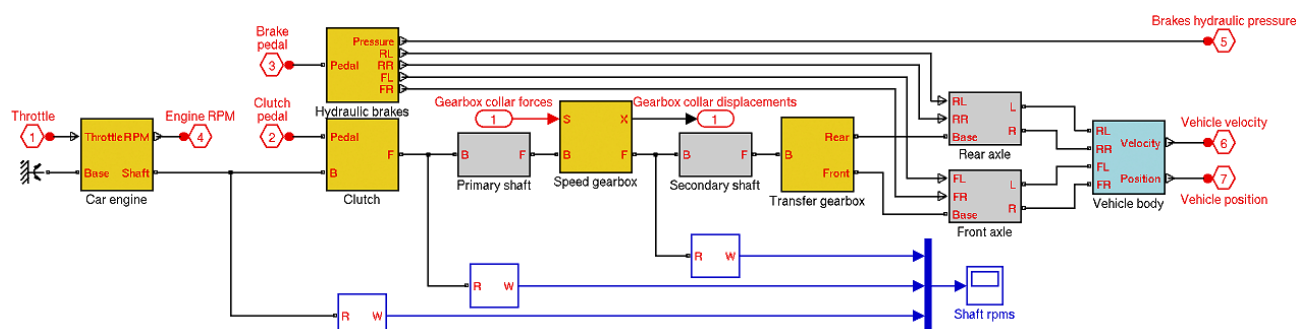


Рис. 3.1. Схема полной динамической модели

Модель имеет 4 входа (сигналы управления):

- положение дроссельной заслонки;
- усилие на педаль сцепления;
- усилие на педаль тормоза;
- вектор значений внешних сил (управляющего воздействия) на муфты синхронизаторов КПП.

На выходе модели имеются:

- значение скорости вращения коленчатого вала двигателя;

- давление в тормозной системе;
- смещение муфт синхронизаторов КПП вдоль вторичного вала;
- скорость и положение автомобиля.

Для наблюдения за поведением модели также строятся следующие графики, не представленные в виде измеряемых величин на выходе модели:

- совместный график скоростей вращения (об/мин) коленчатого вала двигателя, а также первичного и вторичного валов;
- нормальная сила, действующая на диск сцепления;
- проскальзывание колес автомобиля по контактной поверхности.

Рассмотрим кратко наиболее важные компоненты модели.

Двигатель внутреннего сгорания

Модель двигателя внутреннего сгорания (Рис. 3.2) состоит из трех функциональных блоков:

- компонент SimDriveline Generic Engine (параметры заданы на основе экспериментальных данных крутящего момента двигателя ВАЗ 21213 «Нива» объемом 1.7 л [6,7]);
- датчик скорости вращения выходного вала двигателя;
- контроллер оборотов холостого хода.

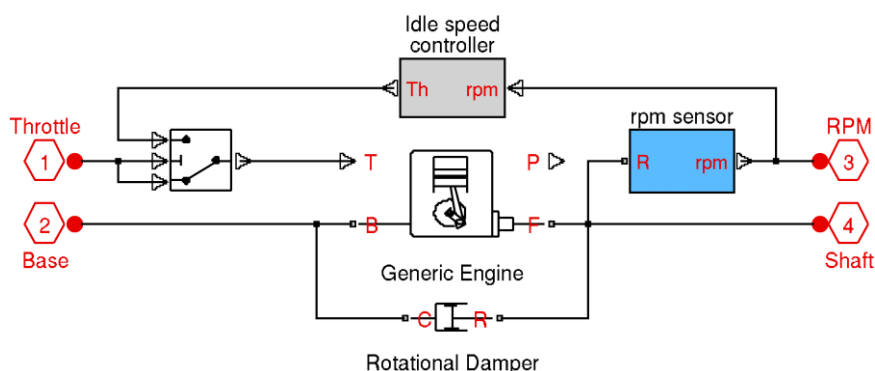


Рис. 3.2. Модель двигателя внутреннего сгорания

Механизм сцепления

Модель сцепления (Рис. 3.3) также состоит из трех блоков:

- механизм привода сцепления (педаль сцепления и возвратная пружина педали, гидравлическая передача, вилка выключения сцепления и возвратная пружина вилки);
- центральная нажимная диафрагменная пружина;
- механизм дискового сцепления.

Центральная нажимная диафрагменная пружина моделируется в виде пружины, сила упругости которой линейно пропорциональна деформации. В будущем планируется провести уточнение модели пружины в соответствии с моделью Belleville на основе данных [8-9].

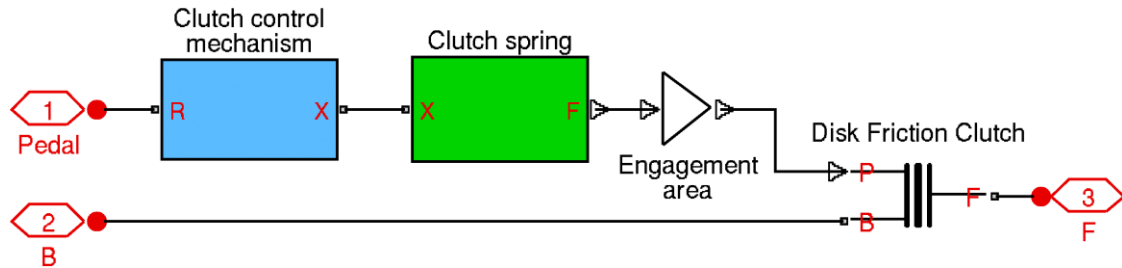


Рис. 3.3. Модель сцепления

Механическая коробка переключения передач

На Рис. 3.4 представлена схема модели коробки переключения передач, являющейся одной из центральных компонент трансмиссии. Прототипом для данной модели является КПП автомобиля ВАЗ 21214 «Нива» с небольшими упрощениями, а именно:

- отсутствует задняя передача;
- каждый синхронизатор отвечает за включение ровно одной передачи (в действительности каждый синхронизатор контролирует пару передач);
- управление синхронизатором задается в виде модуля внешней силы, действующей на муфту синхронизатора параллельно вторичному валу КПП.

Заметим, что наличие задней передачи фактически не является необходимым для синтеза алгоритмов контроллера в силу двух факторов:

- передаточные числа первой и задней передач практически совпадают, в силу чего алгоритм управления автомобилем на задней передаче может быть получен из алгоритма управления на первой передаче;
- дополнительным условием для включения задней передачи является полная остановка автомобиля (в силу отсутствия соответствующего синхронизатора), что не является важным фактором для синтеза алгоритмов управления.

Наиболее важным компонентом модели КПП является блок синхронизатора [9], т.к. он отвечает за переходные процессы при переключении передач, поскольку включение передачи на реальном автомобиле никогда не происходит мгновенно и зависит от скоростей вращения входного и выходного валов КПП, а также от подаваемого управления, попытка включения передачи при отпущенном сцеплении является ошибочной ситуацией и должна быть соответствующе отображена в модели.

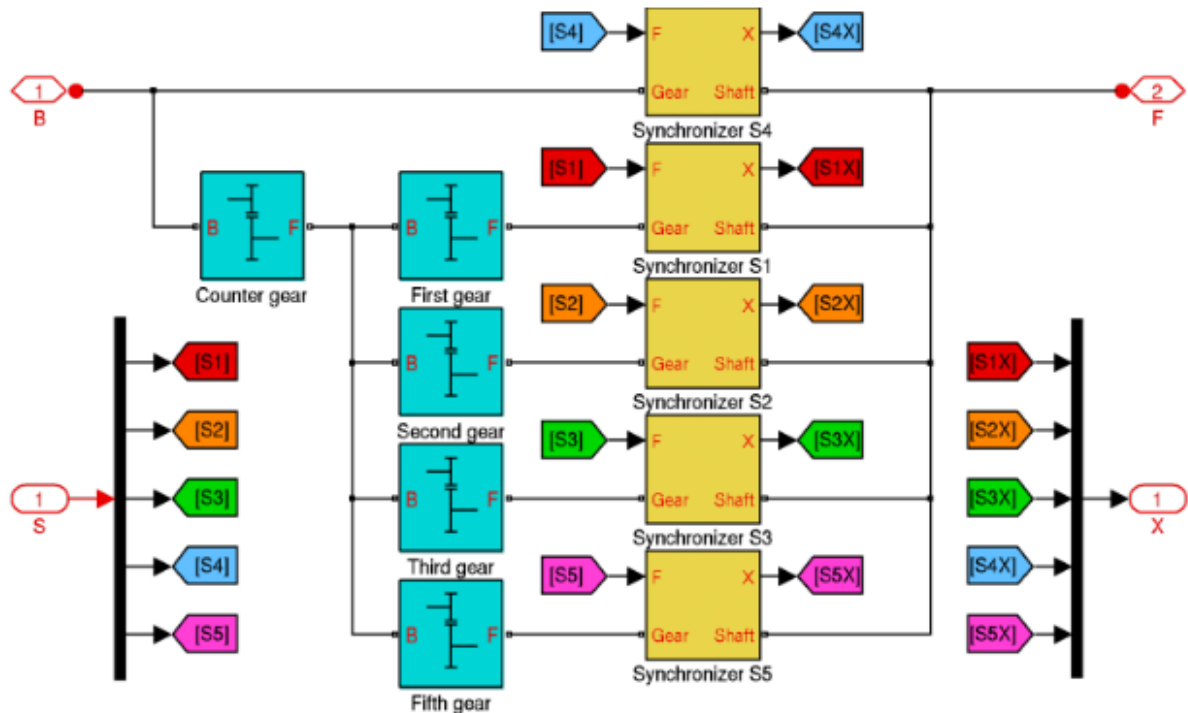


Рис. 3.4. Коробка переключения передач

Корпус и колеса автомобиля

Для создания этого блока были использованы стандартные компоненты SimDriveline Vehicle Body и Tire (Magic Formula). Первый отвечает за расчет прижимной силы, действующей со стороны подвески на колеса, а также скорости автомобиля в зависимости от силы трения между колесами автомобиля и контактной поверхностью. Второй компонент моделирует упругое колесо автомобиля и вычисляет значение силы трения (Рис. 3.5).

В данном компоненте возможно задание условий внешней среды, а именно скорости встречного ветра и угла наклона контактной поверхности к горизонту.

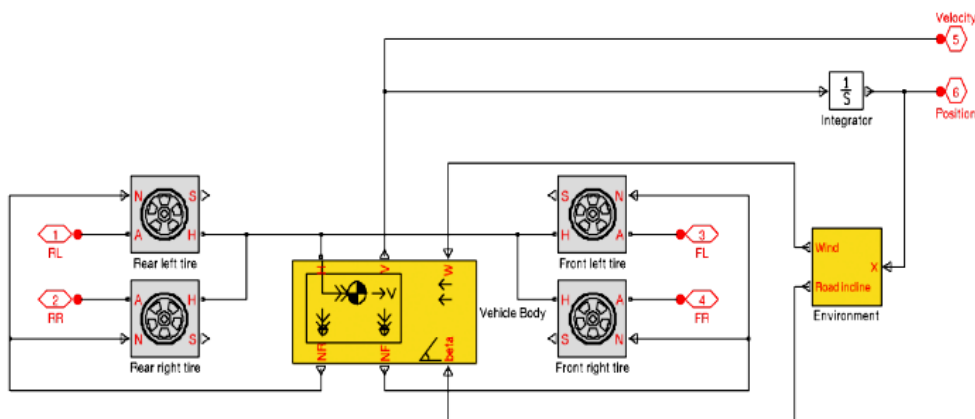


Рис. 3.5. Корпус и колеса автомобиля

4. Моделирование динамики автомобиля

Модель автомобиля, представленная на Рис. 3.1, была оформлена в виде Simulink-подсистемы. На вход модели подается заданное заранее управление как функции времени, выходные сигналы модели выводятся на соответствующие графики. Полученная структура (схема представлена на Рис. 4.1) была использована для верификации модели и подбора параметров реальных устройств управления трансмиссией.

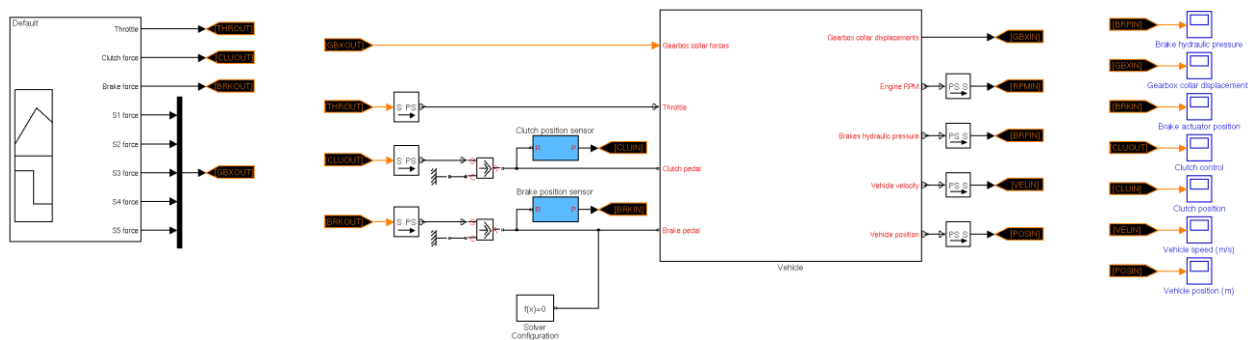


Рис. 4.1. Модель автомобиля с ручным управлением

Управление моделью задается в виде графиков сигналов в компоненте Simulink Signal Builder. Пример такого управления, реализующего плавный старт автомобиля и разгон с переходом на II передачу, представлен ниже на Рис. 5.1. Графики функций задают, соответственно:

- положение дроссельной заслонки;
- усилие на педаль сцепления;
- усилие на педаль тормоза;
- усилие на муфту синхронизатора I-й передачи;
- усилие на муфту синхронизатора II-й передачи.

По результатам моделирования могут быть построены графики состояния автомобиля (например, Рис. 5.2, Рис. 5.3 и Рис. 5.4). Данный подход к работе с динамической моделью использовался при верификации модели и подборе ее характеристик для соответствия реальному автомобилю.

5. Устройства управления

Для корректной работы роботизированной трансмиссии необходимо дополнительно обеспечить работу приводов следующих агрегатов автомобиля:

- двигатель внутреннего сгорания (управление скоростью вращения выходного вала путем регулирования подачи топлива);
- сцепление (позиционное управление);
- коробка переключения передач (выбор и включение требуемой передачи, информация о текущем положении муфт синхронизаторов).

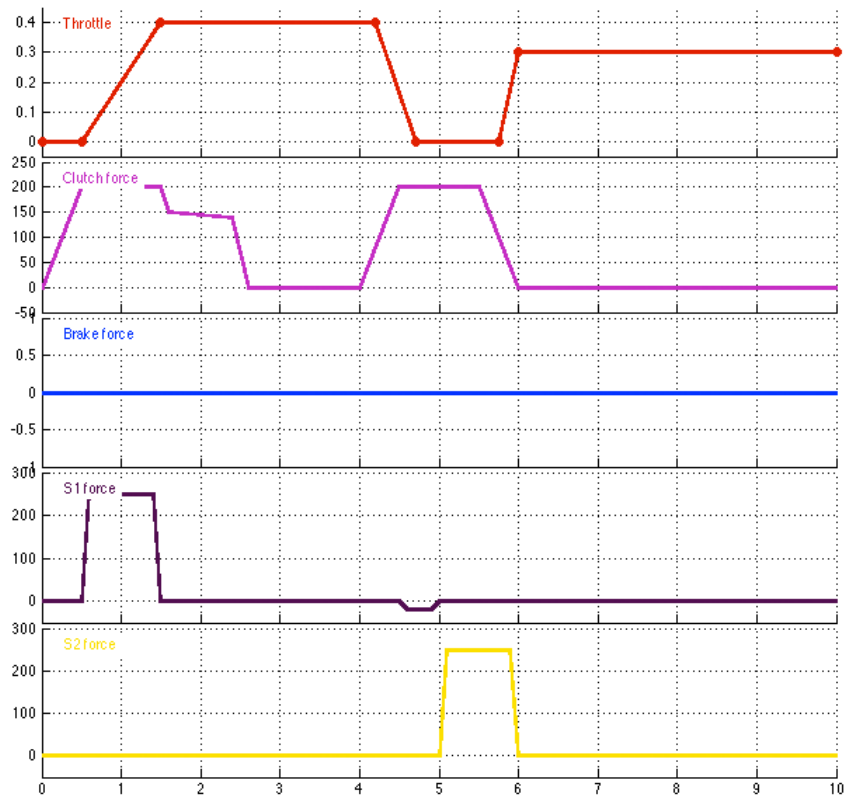


Рис. 5.1. Вектор воздействий на систему при ручном управлении

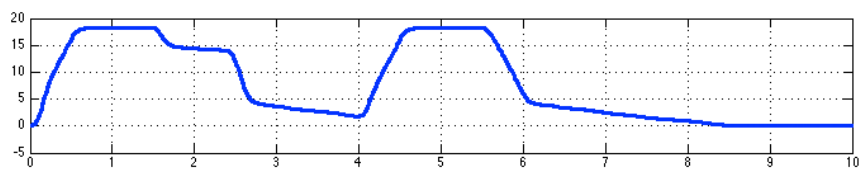


Рис. 5.2. Смещение педали сцепления при ручном управлении (см)

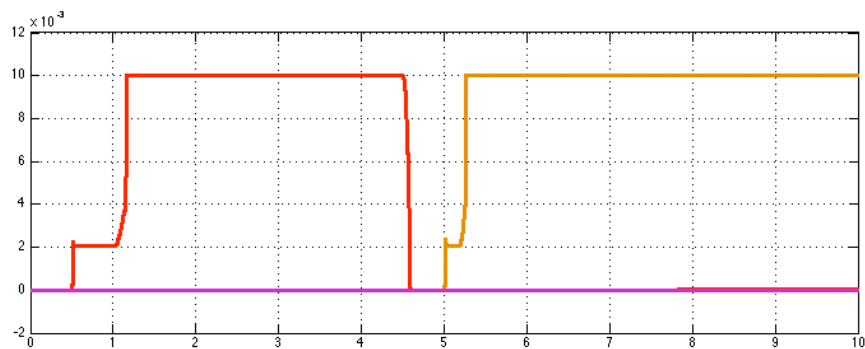


Рис. 5.3. Смещение муфт синхронизаторов КПП вдоль вторичного вала при ручном управлении (мм)

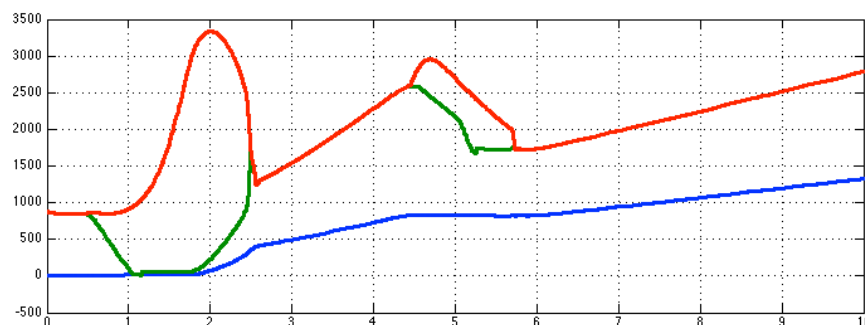


Рис. 5.4. Скорости вращения (об/мин) при ручном управлении: выходной вал двигателя (красный), первичный (зеленый) и вторичный (синий) валы

Регулятор оборотов двигателя

Для управления двигателем был разработан регулятор оборотов, модель которого представлена на Рис. 5.5. На вход регулятора подается 3 величины: текущее значение оборотов двигателя, целевое значение оборотов двигателя, максимальная мощность двигателя, которая при этом может быть задействована.

Центральным компонентом данного устройства является ПИД-регулятор, входом которого является разница между целевым и текущим значениями оборотов двигателя, а выходом – значение угла дроссельной заслонки.

В экспериментальном образце для управления заслонкой был использован шаговый двигатель, поэтому, исходя из параметров данного двигателя, в модели ограничена скорость изменения выходного сигнала регулятора.

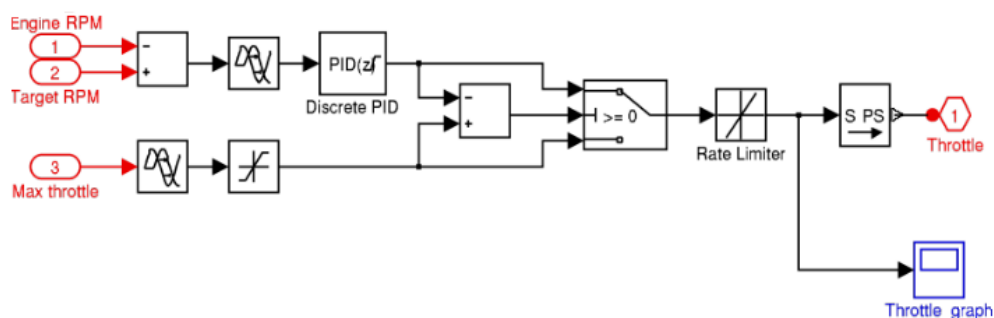


Рис. 5.5. Регулятор оборотов двигателя

Привод педали сцепления

Для управления сцеплением (Рис. 5.6) была разработана механическая платформа, состоящая из двигателя постоянного тока, ременной передачи и пары винт-гайка. Модель управления данной платформой представлена на рисунке. Педаль сцепления с помощью троса крепится к блоку, передвигающемуся вдоль винта червячной передачи. При натяжении троса происходит нажатие педали сцепления, при ослаблении – педаль возвращается в исходное положение под действием возвратных механизмов сцепления. В качестве управления задается целевое положение педали сцепления, реализуемое с помощью ПИД-регулятора в контроллере привода.

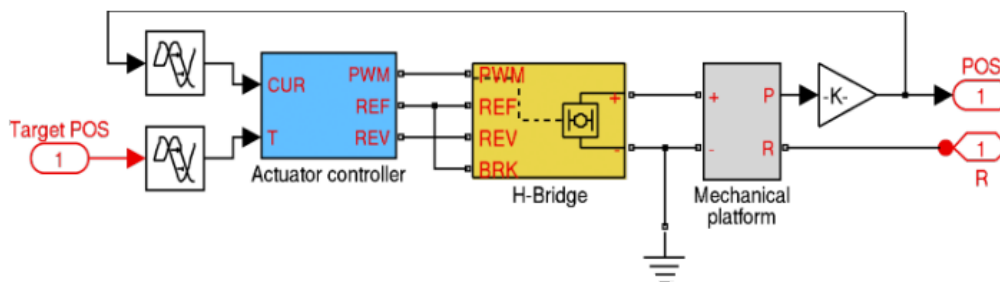


Рис. 5.6. Привод педали сцепления

Коробка переключения передач

В данный момент механизм управления КПП находится в стадии проектирования, поэтому в модели управление происходит с помощью значений внешних сил, действующих на муфты синхронизаторов вдоль вторичного вала, а в качестве обратной связи получается точное значение смещения муфт синхронизаторов. При работе с экспериментальным прототипом при переключении передач было принято решение реализовать следующий сценарий:

- контроллер трансмиссии нажимает педаль сцепления;
- на экран компьютера пилота выводится номер передачи, которую необходимо включить;
- пилот вручную переключает и подтверждает включение заданной передачи;
- контроллер трансмиссии отпускает педаль сцепления.

6. Синтез контроллера трансмиссии

Для синтеза контроллера трансмиссии были произведены следующие дополнения в модели с ручным управлением (Рис. 6.1):

- были установлены устройства управления, описанные в предыдущем разделе;
- создан (в виде MATLAB-функции) блок контроллера, работающий с частотой 100 Гц (пересчет управляющего сигнала каждые 10 мс): на вход контроллера подается информация о текущем состоянии автомобиля, а на выходе получают сигналы для устройств управления;
- на передачу сигналов между всеми устройствами добавлена постоянная задержка 10 мс, что примерно соответствует задержке сигнала в экспериментах;
- управление контроллеру задается с помощью блока Signal Builder двумя параметрами: требуемая скорость автомобиля и ограничение используемой мощности двигателя.

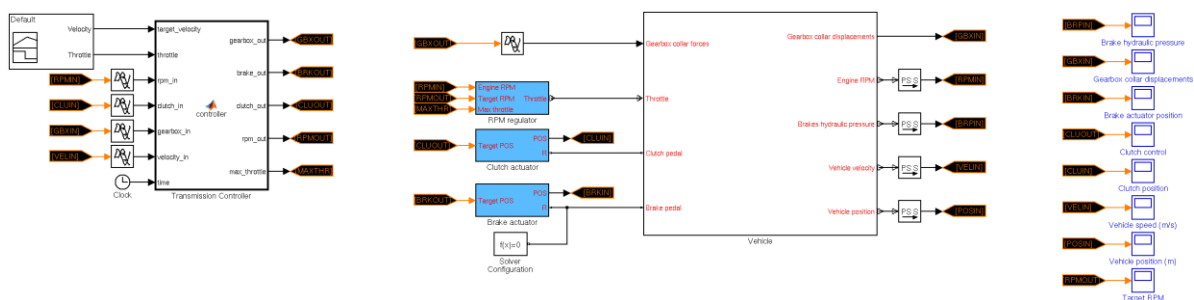


Рис. 6.1. Модель автомобиля с роботизированным контроллером трансмиссии

Расширенная модель проверялась в серии модельных экспериментов. В качестве примера работы синтезированного алгоритма контроллера приведем следующий сценарий:

- в начальный момент времени автомобиль находится в состоянии покоя, а скорость вращения выходного вала двигателя составляет 800 об/мин;
- контроллеру дано задание разгонять автомобиль до 15 м/с, открывая дроссельную заслонку не более чем на 35%.

Результаты моделирования этого сценария представлены на Рис. 6.2, Рис. 6.3, Рис. 6.4 и Рис. 6.5.

Сценарий работы контроллера при моделировании следующий:

- в начальный момент времени контроллер трансмиссии дает команду выжать педаль сцепления;
- при достаточно нажатой педали сцепления, контроллер запускает процесс включения первой передачи, оказывая усилие на соответствующий синхронизатор КПП;
- когда смещение муфты синхронизатора вдоль вала достигает определенного значения, передача считается включенной, а контроллер трансмиссии начинает отпускать педаль сцепления, учитывая при этом падение оборотов двигателя (нельзя дать автомобилю «заглохнуть»);
- после того как педаль была отпущена, а автомобиль тронулся с места, контроллер разгоняет автомобиль, не превышая значения оборотов двигателя в 3000 об/мин;
- при достижении 3000 об/мин, контроллер выключает первую передачу, параллельно выжимая педаль сцепления;
- при выжатой педали сцепления включается вторая передача, а затем происходит отпускание педали;
- процесс переключения передачи и разгона повторяется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая скорость автомобиля.

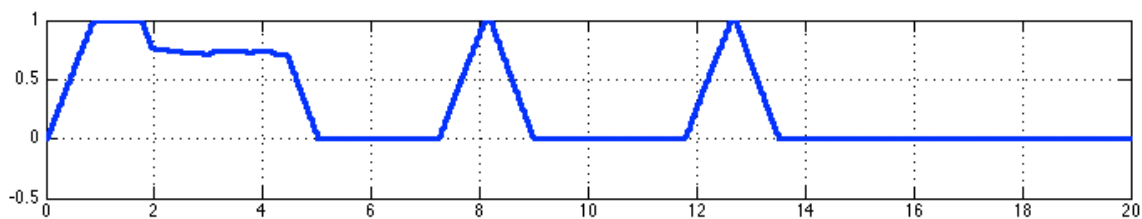


Рис. 6.2. Смещение педали сцепления при автоматическом управлении

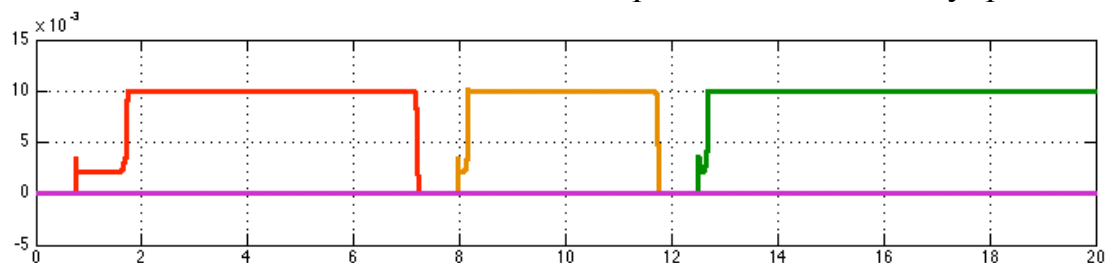


Рис. 6.3. Смещение муфт синхронизаторов I (красный), II (желтый) и III (зеленый) передач при автоматическом управлении

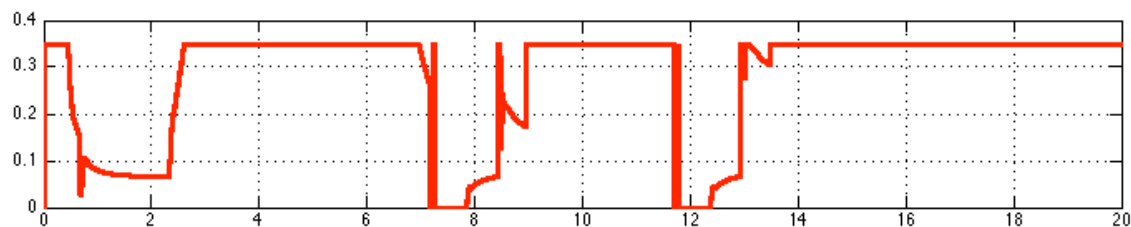


Рис. 6.4. Положение дроссельной заслонки при автоматическом управлении

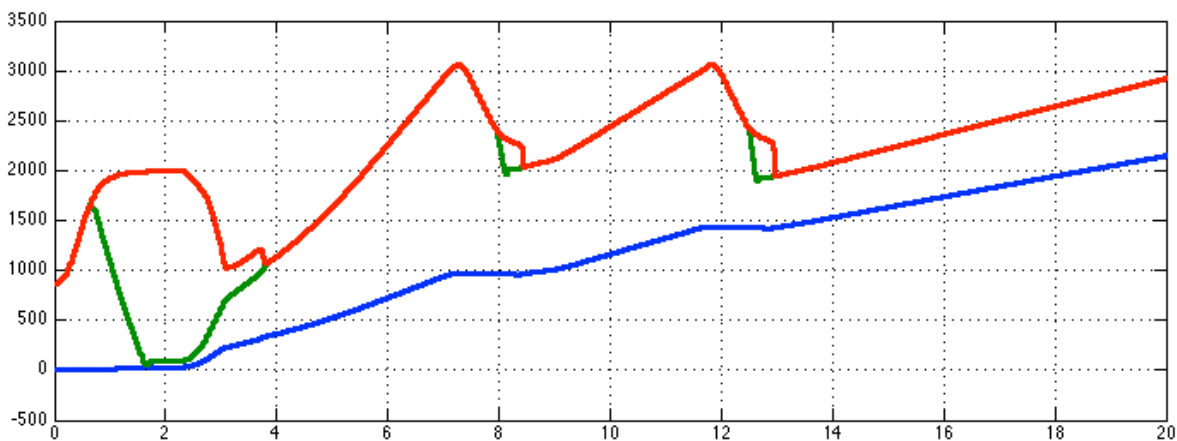


Рис. 6.5. Скорости вращения (об/мин) при автоматическом управлении: выходной вал двигателя (красный), первичный (зеленый) и вторичный (синий) валы

7. Общая структура и реализация СНУ трансмиссии

Выше описана разработанная компьютерная динамическая модель автомобиля с механической трансмиссией, описывающая движение транспортного средства по прямой, взаимодействие между частями которой (включая датчики обратной связи и управление) можно представить в виде логической схемы, изображенной на Рис. 7.1.

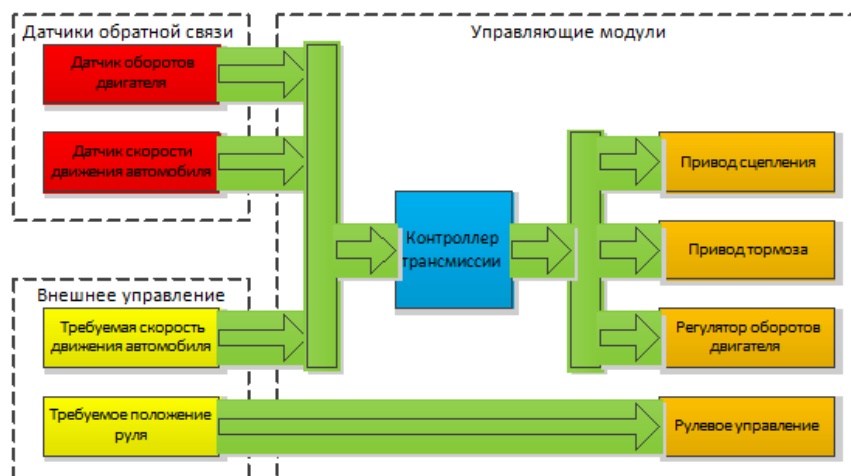


Рис. 7.1. Логическая схема взаимодействия между частями модели

На основе анализа построенной динамической модели и конструкции автомобиля ВА3-21215 «Нива» были спроектированы устройства, необходимые для реализации управления автомобилем с помощью разработанного алгоритма контроллера трансмиссии (Табл.1). Опишем внутреннее устройство и принцип работы каждого устройства.

Таблица 1

Агрегаты системы управления нижнего уровня

Название агрегата	Датчики обратной связи	Управляющее воздействие
Регулятор оборотов двигателя	Датчик положения коленчатого вала двигателя	Положение дроссельной заслонки
Привод сцепления	Датчик положения педали сцепления	Положение педали сцепления
Привод тормоза	Датчик положения педали тормоза; датчик давления в тормозной системе (не реализовано в рамках текущего прототипа)	Положение педали тормоза
Привод рулевого управления	Датчик поворота руля	Поворот руля
Датчик скорости	Датчик скорости	Отсутствует

Программный фильтр/дифференциатор

Алгоритмы работы многих устройств управления требуют фильтрации входного сигнала с внешнего датчика (ввиду особенностей конструкции датчиков и для уменьшения влияния помех) или получения его первой производной (для подачи на вход ПИД-регулятора). Для этого используется простой дискретный алгоритм, изображенный схематично на Рис. 7.2.

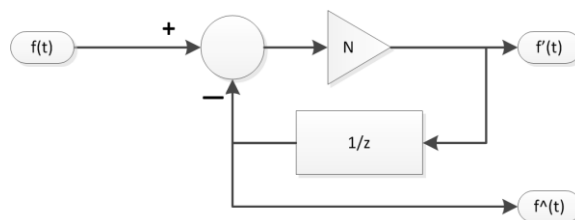


Рис. 7.2. Схема простого дискретного алгоритма фильтрации и вычисления производной

Работа данного алгоритма описывается следующими формулами:

$$x'(n) = N \times (x(n) - \bar{x}(n-1))$$

$$\bar{x}(n) = \bar{x}(n-1) + x'(n) \times (t(n) - t(n-1)) \quad ,$$

где $x(n)$ – значение входной функции в момент времени n , $t(n)$ – время в секундах в момент времени n , $\bar{x}(n)$ – значение фильтрованной функции, $x'(n)$ – значение первой производной, число N называется коэффициентом фильтрации.

Регулятор оборотов двигателя

Во время работы контроллер трансмиссии вычисляет, исходя из целевой скорости движения автомобиля и выбранной передачи, необходимую скорость вращения выходного вала двигателя, которая передается на вход контроллера регулятора оборотов двигателя. Текущее, вычисленное на основе показания датчика положения коленчатого вала двигателя, и целевое значения оборотов двигателя подаются на вход ПИД-регулятора. Выход ПИД-регулятора используется для вычисления управления шаговым двигателем (Рис. 7.3).

Шаговый двигатель, установленный на платформе регулятора, при вращении натягивает или отпускает металлический трос, второй конец которого закреплен на дроссельной заслонке, регулирующей поток воздуха, поступающего в камеры сгорания (Рис. 7.4). При запуске регулятор, используя оптронный датчик 5, выставляет двигатель в «нулевое» положение, в котором трос должен быть натянут, а сама заслонка закрыта.

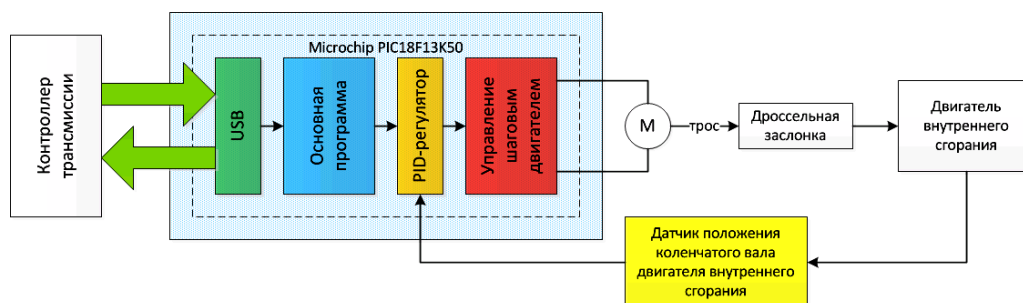


Рис. 7.3. Логическая схема контроллера регулятора оборотов двигателя

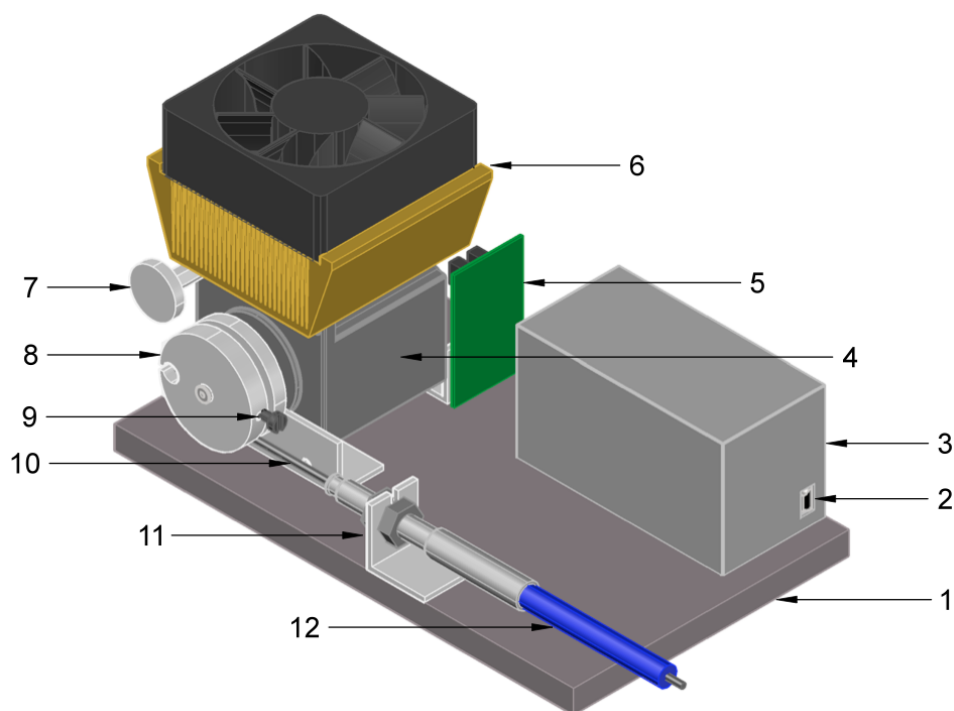


Рис. 7.4. Изометрическая модель регулятора оборотов двигателя:

- 1) платформа для крепления элементов, 2) USB-порт для подключения к компьютеру, 3) контроллер, 4) шаговый двигатель, 5) оптронный датчик нулевого положения, 6) система охлаждения шагового двигателя, 7) механический ограничитель вращения вала двигателя, 8) шкив, 9) винт-ограничитель хода, 10) стальной трос, 11) крепление рубашки троса, 12) рубашка троса.

При работе регулятор использует стандартный электромагнитный импульсный датчик положения коленчатого вала для вычисления текущей скорости вращения двигателя. Импульсы данного датчика соответствуют «зубьям» или «выемкам» (в зависимости от конструкции) зубчатого шкива привода генератора, установленного на коленчатый вал [9]. Для синхронизации работы топливных форсунок служит двойной зуб, соответствующий верхней мертвой точке (ВМТ) положения вала.

Выход датчика подключается к одному из входов микропроцессора. Для уменьшения влияния помех во время прохождения зубца и обработки двойного зубца как одинарного после каждого получаемого микроконтроллером импульса вводится «слепой» временной промежуток, равный $1/3$ времени вращения вала между двумя зубцами, во время которого поступающие с датчика импульсы игнорируются (желтая зона на Рис. 7.5).

По прохождении этого периода обработка импульсов включается заново, а аппаратный таймер, используемый для измерения временных промежутков,

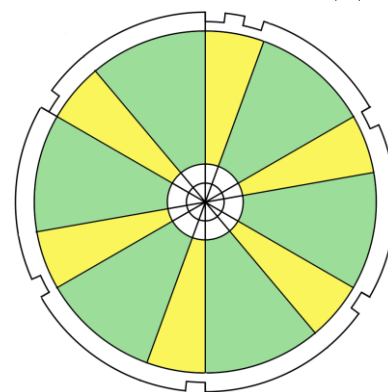


Рис. 7.5. Зубчатый шкив привода

обнуляется (зеленая зона). При этом при получении импульса значение таймера равно $2/3$ периода прохождения вала между зубьями. В используемом для эксперимента ВАЗ-21214 «Нива» зубчатый шкив имеет 6 зубьев, итоговая скорость вращения двигателя равна:

$$RPM = 60 \times \frac{\nu}{6 \times \frac{3}{2} \times n},$$

где n – значение таймера в момент получения импульса, ν – частота работы аппаратного таймера в герцах. Эксперименты показали подверженность полученной величины влиянию периодических помех (обусловлена неточностью изготовления шкива, см. Рис. 7.6), поэтому она проходит дискретную фильтрацию.

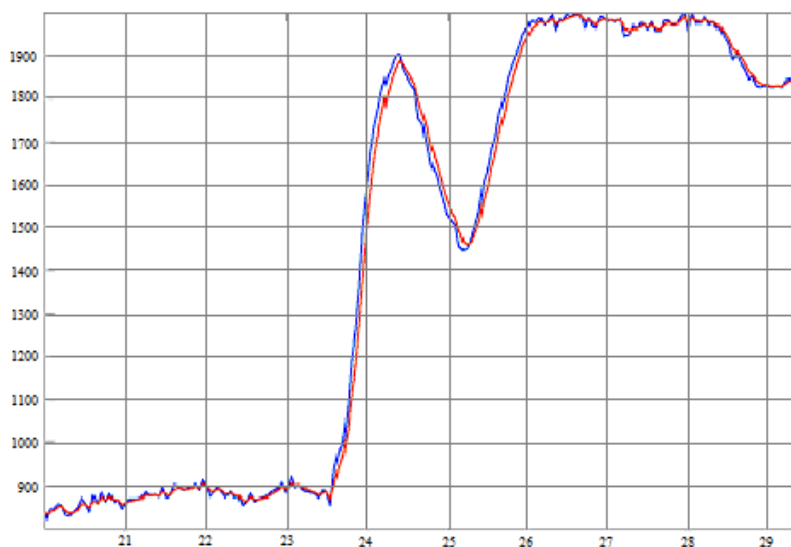


Рис. 7.6. Фильтрация скорости вращения двигателя, полученной с помощью датчика положения коленчатого вала

Датчик скорости

В качестве непосредственно датчика скорости было принято решение использовать стандартный импульсный датчик, устанавливаемый в раздаточной коробке (используется бортовым контроллером для управления системой впрыска, изменения параметров усилителя руля). Для вычисления скорости движения автомобиля по импульсам с датчика в контроллере используется такой же алгоритм, как и в регуляторе оборотов двигателя для вычисления скорости вращения коленчатого вала двигателя.

Педаль сцепления

Контроллер трансмиссии отвечает за переключение передач при движении автомобиля. При выходе текущего значения оборотов двигателя за пределы диапазона, соответствующего скорости автомобиля и выбранной передаче, требуется переключение передачи «вниз» или «вверх». Данное действие состоит из трех этапов: выжать педаль сцепления, переключить

скорость на коробке переключения передач, а затем отпустить сцепление, отслеживая обороты двигателя (при отпускании сцепления нельзя допустить падение оборотов ниже определенного уровня).

Таким образом, контроллер трансмиссии вычисляет требуемое положение педали сцепления исходя из выбранной передачи, текущее положения педали сцепления, скорость вращения коленчатого вала, и передает это значение на вход привода сцепления. Целевое и текущее, вычисленное по показаниям энкодера, значения положения педали сцепления подаются на вход ПИД-регулятора. Выходное значение ПИД-регулятора используется для формирования управления двигателем (Рис. 7.7).

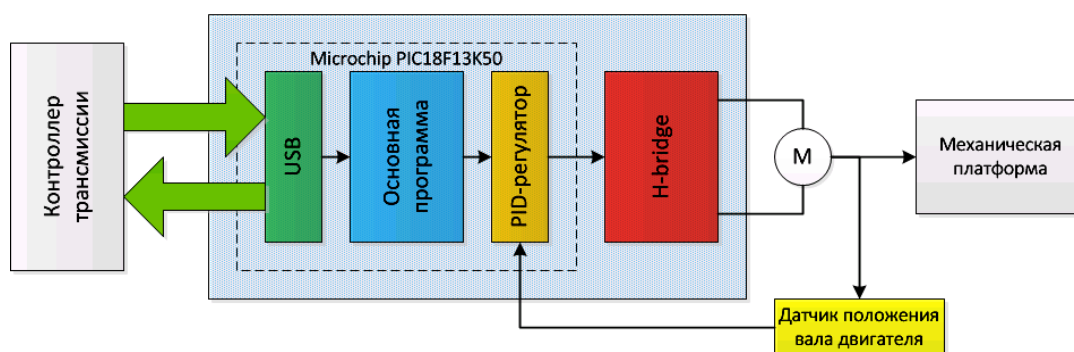


Рис. 7.7. Логическая схема привода сцепления

Для осуществления позиционного управления педалью сцепления было выбрано решение, при котором нажатие педали происходит вследствие натяжения металлического троса с помощью электродвигателя (Рис. 7.8). Основу конструкции составляет винтовая передача: вращение двигателя 3 с помощью ременной передачи 5 передается на винт 8. Вращение винта 8 приводит к движению гайки 10 вдоль направляющей 6, вследствие чего трос, закрепленный на педали сцепления, натягивается или отпускается.

Педаль тормоза

Конструкция привода тормоза полностью аналогична приводу сцепления. Однако в дальнейшем ее предполагается усовершенствовать, оснастив датчиком давления жидкости в тормозной системе. Показания датчика можно использовать в качестве обратной связи для построения алгоритма управления педалью тормоза с обратной связью по давлению, а также для обеспечения диагностики неисправностей.

Устройство приводов сцепления и тормоза приведено на Рис.7.8.

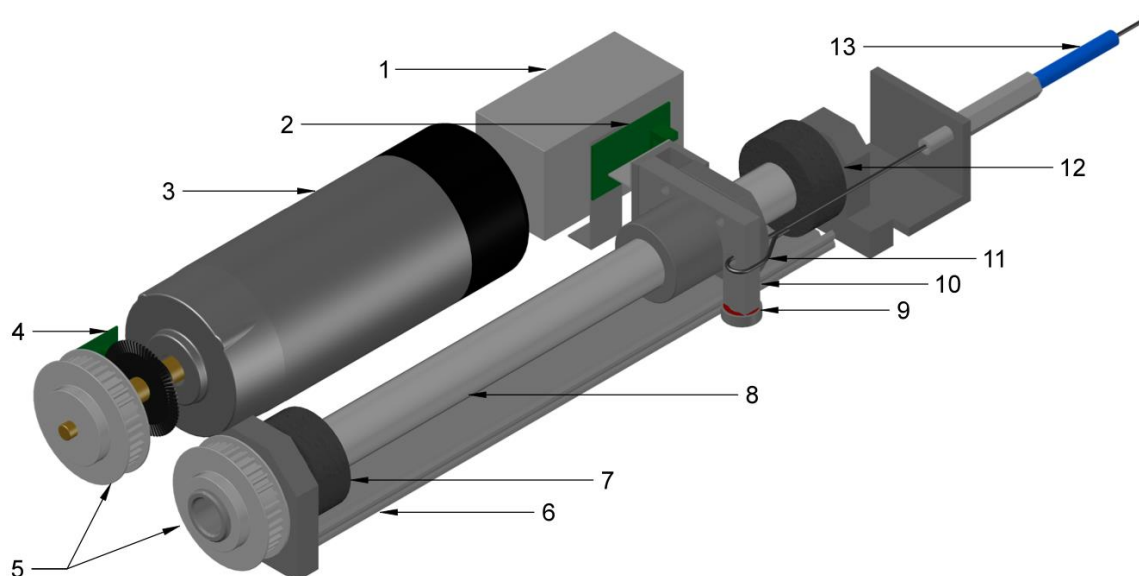


Рис. 7.8. Изометрическая модель привода сцепления:

- 1) контроллер, 2) датчик нулевого положения, 3) двигатель, 4) энкодер, 5) шкивы, 6) направляющая, 7) демпфер, 8) винт, 9) ролики, 10) гайка, 11) крепление троса, 12) демпфер, 13) рубашка троса.

Рулевое управление

По результатам анализа возможности конструирования и изготовления специализированного привода рулевого управления авторами было принято решение использовать существующие технические средства, а именно серийный электроусилитель руля (ЭУР) совместной разработки ОАО «АвтоВАЗ» и завода «Авиаагрегат» (Махачкала). Данный ЭУР устанавливается на серийный автомобиль ВАЗ-21214 «Нива» без дополнительных доработок и обладает высокими мощностными характеристиками, обеспечивая необходимое усилие на рулевой передаче.

Для реализации компьютерного управления встроенным в ЭУР электродвигателем штатный контроллер был заменен на контроллер собственной разработки, обеспечивающий подключение и управление через USB.

При движении автомобиля целевое положение руля передается на вход контроллера рулевого управления. Целевое и текущее значения положения руля подаются на вход ПИД-регулятора, выход которого идет на блок управления трехфазным двигателем, программа управления аналогична программе управления шаговым двигателем, используемой в регуляторе оборотов двигателя.

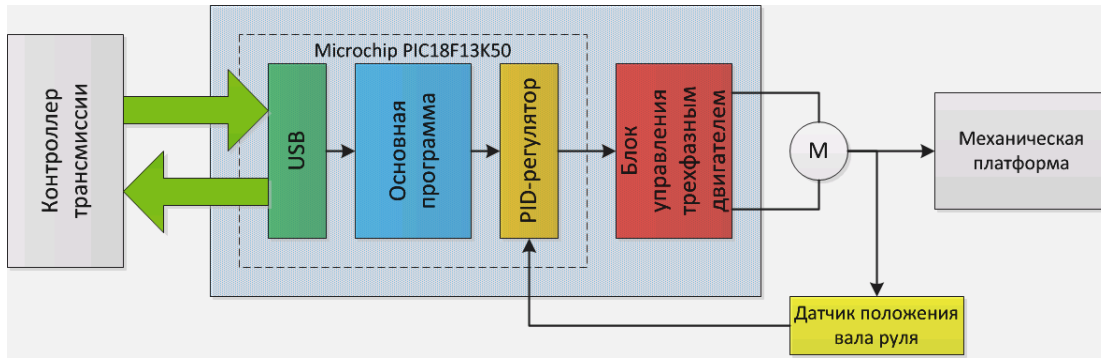


Рис. 7.9. Логическая схема рулевого управления

Коробка переключения передач

В настоящий момент управление КПП при работе с экспериментальным прототипом выполняется по следующему сценарию переключения передач:

1. контроллер трансмиссии принимает решение о переключении передачи;
2. контроллер трансмиссии выжимает педаль сцепления;
3. на экран компьютера пилота выводится номер передачи, которую необходимо включить в данный момент, и указание включить ее;
4. пилот вручную переключает и с помощью пользовательского интерфейса подтверждает включение заданной передачи;
5. контроллер трансмиссии отпускает педаль сцепления.

8. Эксперимент

Итак, по результатам моделирования (см. также [5]) были построены следующие устройства для управления автомобилем: автоматические регулятор оборотов двигателя автомобиля, приводы педалей сцепления и тормоза. Конструкция управляющих агрегатов подразумевает, что водитель-испытатель в любой момент времени может отключить установленные устройства управления, переведя автомобиль в режим ручного управления.

Для реализации алгоритма контроллера трансмиссии использовался специально разработанный пакет прикладного ПО, реализующий взаимодействие с устройствами управления по шине USB и устанавливаемый на ноутбук. На Рис. 8.1 приведен пример интерфейса в режиме управления одним устройством – регулятором оборотов двигателя внутреннего сгорания. С помощью данного интерфейса можно осуществлять как управление устройством (задание целевого значения оборотов двигателя автомобиля), так и настройку параметров ПИД-регулятора и актуатора.

На Рис. 8.2 представлен интерфейс управления автомобилем с механической трансмиссией. Оператор во время движения в реальном времени задает необходимые скорость движения автомобиля (*velocity*) и положение колеса рулевого управления (*steering*), а также максимальное значение положения дроссельной заслонки (*throttle*). При этом идет

отображение текущего значения выше перечисленных параметров, а также текущего и целевого (вычисленного контроллером трансмиссии) значений оборотов двигателя автомобиля. Также через интерфейс отображается передача, которую необходимо включить оператору для движения в данный момент. Во время движения идет запись данных обратной связи, получаемых с устройств управления, в файл для последующего анализа в среде MATLAB.

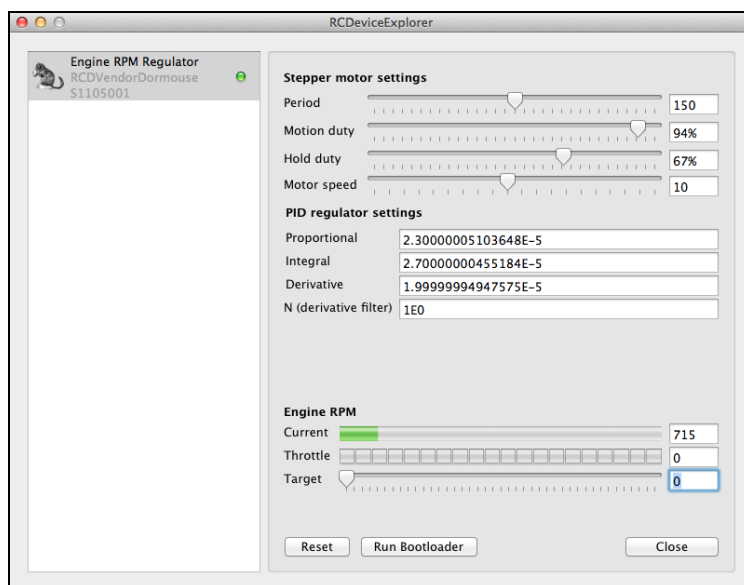


Рис. 8.1. Настройка и управление регулятором оборотов двигателя

На автомобиле были проверены алгоритмы плавного старта, разгона и торможения на первой передаче, а также переключения передач. Первые экспериментальные данные показали соответствие характеристик поведения управляющих устройств модельным.

В частности, на Рис. 8.3, Рис. 8.4 и Рис. 8.5 представлены графики состояния системы при отработке алгоритма контроллера в режиме плавного старта автомобиля с места. В момент получения указания "начать старт" (установление целевой скорости 1.5 м/с) контроллер трансмиссии устанавливает целевые обороты двигателя в 2000 об/мин и начинает плавно отпускать сцепление. При падении оборотов двигателя вследствие взаимодействия дисков сцепления контроллер уменьшает скорость отпускания педали или может чуть-чуть нажать ее обратно, в случае если есть риск того, что двигатель заглохнет. При достижении по датчику привода педалью сцепления положения 0.4 считается, что сцепление дисков произошло, и далее педаль просто отпускается. При этом целевые обороты двигателя устанавливаются в соответствии с необходимой скоростью движения автомобиля (в данном случае – около 1150 об/мин).

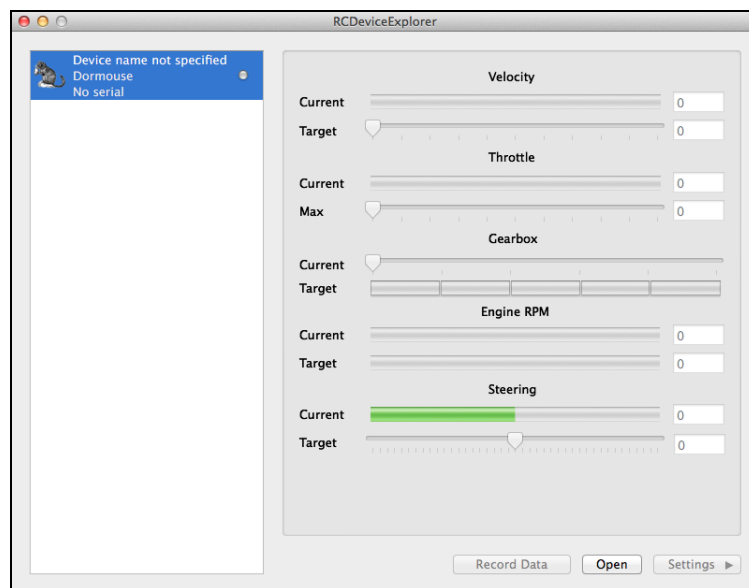


Рис. 8.2. Интерфейс управления автомобилем с механической трансмиссией

При переносе на реальный автомобиль алгоритм отпускания педали сцепления во время старта подвергся изменениям, что было обусловлено использованием в Simulink-модели упрощенной модели диафрагменной пружины. Используемая схема точнее описывает реальное устройство, и в дальнейшем предполагается использовать именно ее.

Несмотря на необходимость калибровки и тонкой настройки, алгоритмы контроллера трансмиссии и управляющих устройств, а также выстроенная схема взаимодействия между ними показали свою работоспособность на практике.

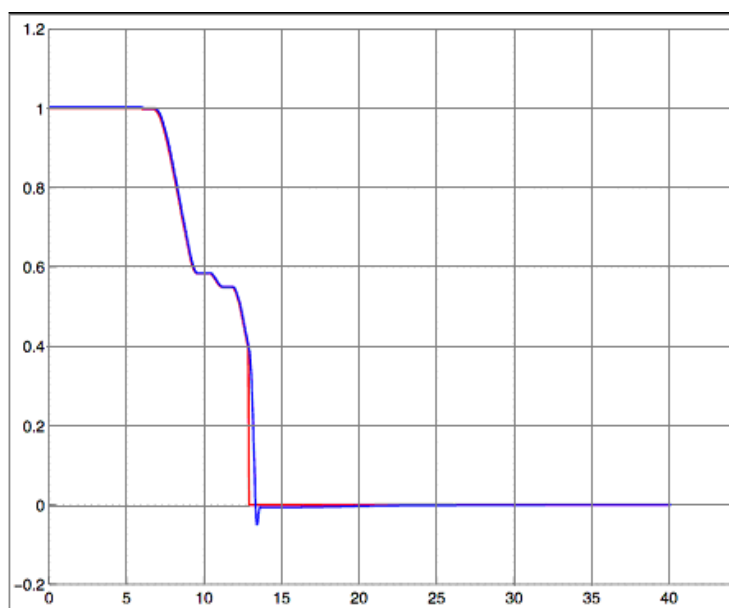


Рис. 8.3. Целевое (красный) и текущее (синий) положение педали сцепления

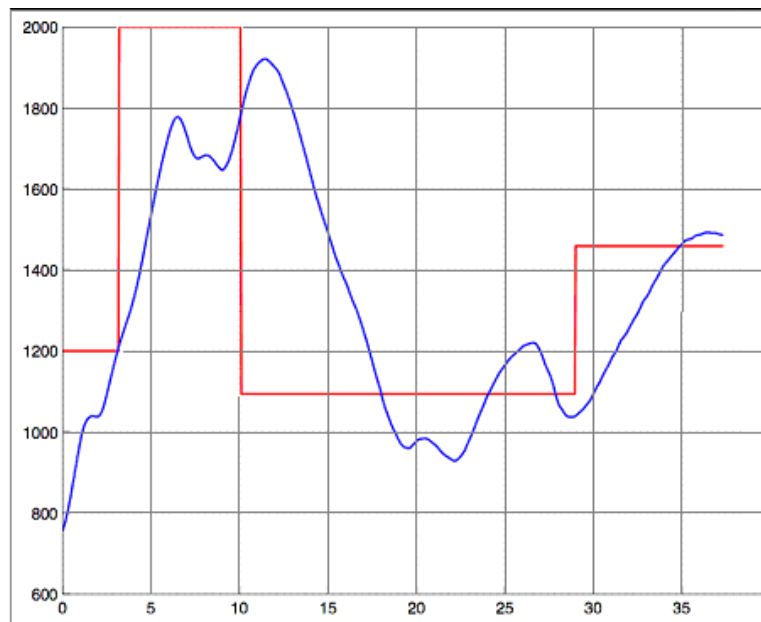


Рис. 8.4. Целевое (красный) и текущее (синий) значение оборотов двигателя

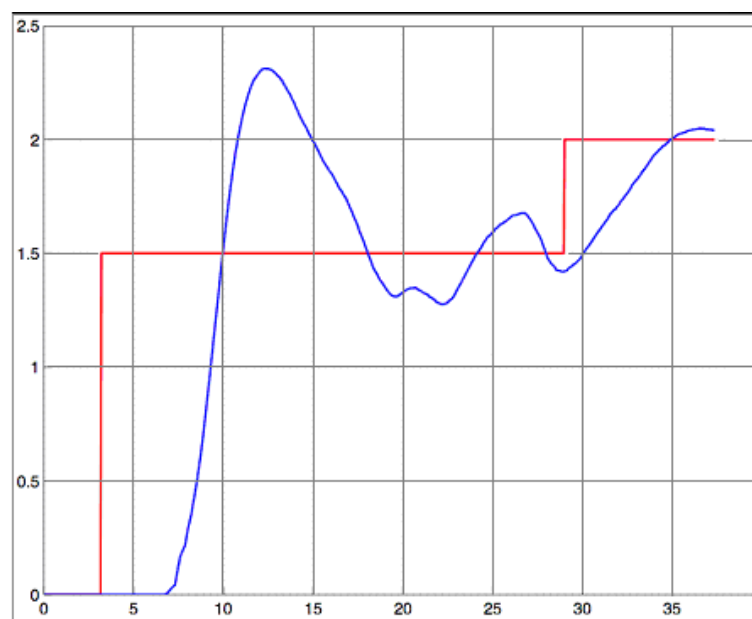


Рис. 8.5. Целевая (красный) и текущая (синий) скорость автомобиля

9. Заключение

В работе создана компьютерная динамическая модель автомобиля, позволяющая осуществлять достаточно точный анализ и синтез алгоритмов контроллера трансмиссии. На основе анализа этой модели были сконструированы, изготовлены и протестированы отдельные устройства управления автомобилем. Для управления этими устройствами и реализации алгоритма контроллера трансмиссии разработан пакет программного обеспечения, в состав которого входят библиотека взаимодействия с

устройствами управления через шину USB, алгоритм работы контроллера и графическая оболочка водителя-испытателя.

Для исследования задачи построения роботизированного автомобиля на их основе разработан и установлен в автомобиль программно-аппаратный комплекс управления. Основной вывод получен следующий: реализация на нем синтезированных с помощью предложенной в работе динамической модели алгоритмов управления показала высокую степень применимости модели для этого класса задач. Автомобиль под управлением созданных устройств и алгоритмов обеспечивает точности движения, практически аналогичные достижимым при управлении от человека. Динамика трогания и движения на низших передачах также сохраняется.

Методика построения программно-аппаратного комплекса управления позволяет с минимальными затратами адаптировать устройства управления под другие автомобили, в том числе оснащенные автоматической коробкой переключения передач.

10. Литература

1. Электронный ресурс: Соревнования автомобилей-роботов в России [Online]. URL: <http://habrahabr.ru/post/144515/>.
2. Электронный ресурс: <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/6420813>
3. Электронный ресурс: <http://www.path.berkeley.edu/>
4. Электронный ресурс: <http://vislab.it/vislab-events-2/>
5. В.Е.Павловский, В.Н.Огольцов Динамическая модель механической трансмиссии автомобиля // Спецтехника и связь. 2012. № 5-6. с. 27–36.
6. РЕМОНТ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВАЗ 21213, 21214 (Нива) [Online]. URL: <http://www.autopropect.ru/vaz/21213-niva/1-2-tekhnicheskie-kharakteristiki-avtomobilejj.html>.
7. Электронный ресурс: ООО “Мастер Мотор.” ВСХ двигателя ВАЗ-21213 1,7 л [Online]. URL: <http://www.mmotor.ru/cams/index.php?action=vsh&type=vaz&model=2101-2107&id=4>.
8. Vasca F. et al. Modeling torque transmissibility for automotive dry clutch engagement // 2008 Am. Control Conf. Ieee, 2008. № 1. P. 306–311.
9. Hillier V.A., Coombes P. Hillier’s Fundamentals of Motor Vehicle Technology. Nelson Thornes, 2004.
10. Электронный ресурс: Crankshaft Position Sensor [Online] // Wikipedia, Free Encycl. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Crankshaft_position_sensor.
11. Д.А.Козорез, Д.М.Кружков. Состав и структура автономных систем навигации и управления роботизированного прототипа автомобиля. // Спецтехника и Связь. 2012, №3, с.15-18.
12. В.П.Носков, И.В.Рубцов. Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов. // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2013. № 3(15).
13. Электронный ресурс: <http://techland.time.com/2012/05/08/googles-driverless-cars-now-officially-licensed-in-nevada/>

11. Приложение

Ниже приведены фотографии разработанного автомобиля с системой автоматизации СНУ трансмиссии (капот временно снят для облегчения доступа к агрегатам двигателя) и элементы системы – привод сцепления/тормоза на стенде и привод руля, смонтированный в автомобиле (на фото видны также приводы педалей).

