УДК 004.94; 62-529.4; 621.9
DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.018

Технологические аспекты проектирования беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land и ArduPilot

М.В. Чугунов✉, И.Н. Полунина, А.Ю. Овчинников, А.С. Гариков, А.В. Осипов

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация

Резюме. На базе подходов, основанных на принципах системного инжиниринга, рассматриваются технологические аспекты проектирования прототипа электромобиля-беспилотника с комбинированной системой управления, которая предполагает возможность простого и безопасного переключения с ручного режима на дистанционный (по радиоканалу) или программный режим. Проектирование конструкции и физическая реализация ее основаны на рассмотрении взаимосвязанных технологий прототипирования, механической обработки, программирования. Проект реализован на базе конструктора Bigo.Land (в его механической и мехатронной части) и на базе ArduPilot/Pixhawk (в его программно-аппаратной части). Базовый состав Bigo.Land дополнен обгонной муфтой двунаправленного действия, которая наряду с программным обеспечением дает возможность пилоту при необходимости вмешиваться в процесс управления. Результатом работы является полнофункциональный прототип электромобиля-беспилотника, обладающий системой очувствления и функциями беспилотного управления и автономного поведения; а также его виртуальная (CAD/CAE) модель и программное обеспечение в виде прошивки полетного контроллера Ardupilot/Pixhawk, расширяющей и дополняющей штатный функционал базового программного обеспечения Ardupilot. Проект и полученные результаты могут быть полезны специалистам, разрабатывающим и эксплуатирующим беспилотную мобильную технику, а также учебным заведениям, реализующим педагогические технологии на базе проектного метода.

Ключевые слова: электромобиль-беспилотник, технологические аспекты проектирования, комбинированное управление, обгонная муфта двунаправленного действия, прототипирование, системный инжиниринг, проектный метод обучения.

Благодарности: авторы благодарят анонимных рецензентов и фонд Владимира Потанина, поддержавшего данный проект.

Для цитирования: Чугунов М.В., Полунина И.Н., Овчинников А.Ю., Гариков А.С., Осипов А.В. Технологические аспекты проектирования беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land и ArduPilot. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(3). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1983 DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.018

Technological aspects unmanned electric vehicle design based on the Bigo.Land set and ArduPilot

M.V. Chugunov✉, I.N. Polunina, A.Y. Ovchinnikov, A.S. Garikov, A.V. Osipov

National Research Mordovia State University, Republic of Mordovia, the Russian Federation

Abstract. Based on the system engineering principles, the technological aspects of designing a prototype electric vehicle with a combined control system are considered, which assumes the possibility of simple and safe switching from manual mode to remote (via radio channel) or software. The design and physical implementation of an object are based on consideration of prototyping, machining process, and programming technologies that are interrelated throughout the entire structure. The project is implemented on the basis of the Bigo.Land set (in its mechanical and mechatronic parts) and based on ArduPilot/Pixhawk (in its software and hardware parts). The basic set of Bigo.Land is complemented

by a two-way overrunning clutch, which, along with the software, allows the pilot to take part in the control process if necessary. The result of the work is a fully functional prototype of an electric vehicle with a sensing system and functions of unmanned control and autonomous behavior; as well as its virtual (CAD/CAE) model and software in the form of the Ardupilot/Pixhawk flight controller firmware, which extends and complements the standard functionality of the base Ardupilot software. The project and the results obtained can be useful to specialists developing and operating unmanned mobile vehicles, as well as educational institutions implementing pedagogical technologies based on the project learning method.

Keywords: unmanned electric vehicle, technological process aspects of design, combined control, two-way overrunning clutch, prototyping, system engineering, project-based learning.

Acknowledgements: The authors thank the anonymous reviewers, and also express their gratitude to the Vladimir Potanin Foundation, which supported this project.

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Ovchinnikov A.Yu., Garikov A.S., Osipov A.V. Technological aspects unmanned electric vehicle design based on the Bigo.Land set and ArduPilot. *Modeling, optimization and information technology.* 2025;13(3). (In Russ.). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1983 DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.018

Введение

Данная статья развивает опыт кафедр КТИ (конструкторско-технологической информатики) и ТМ (технологии машиностроения) Рузаевского института машиностроения в части разработки и реализации проектов беспилотных электромобилей [1, 2].

Рассматриваются технологические аспекты проектирования, связанные с программированием, моделированием, прототипированием и реализацией учебного процесса в техническом вузе. Эти технологии имеют непосредственное отношение как к компьютерному моделированию, так и к методам физической реализации проекта (натурному моделированию) в виде механической обработки и аддитивных технологий (3D-печати), а также к применению проектного метода в обучении.

Объект разработки представляет собой прототип электромобиля, обладающий функцией комбинированного управления, позволяющей сочетать ручное и телематическое управление движением. В частности, пилот электромобиля может в любое время вмешаться в процесс дистанционного или программного управления, что может быть полезно при всякого рода нештатных ситуациях.

Проект реализован в физической части на базе конструктора BigoLand, а в программно-аппаратной части – на платформе ArduPilot (Pixhawk)[1].

Ardupilot представляет собой весьма развитую программно-аппаратную платформу с открытым кодом и широко используется для разработки беспилотных роботизированных транспортных систем различного типа.

Усилия разработчиков Ardupilot направлены в основном на развитие и совершенствование функционала платформы, связанного с эффективностью методов и алгоритмов навигации робота, его автономного поведения, а также на решение задач, связанных с возможными нештатными ситуациями.

При этом требуется разработка программного обеспечения на основе открытого программного кода Ardupilot с последующей заменой штатной прошивки контроллера на пользовательскую. В этой части наиболее близкими к данной работе являются статьи [3, 4], в которых рассматриваются вопросы модификации штатной прошивки контроллера для реализации адаптивных методов управления, но без изменения архитектуры программного обеспечения Ardupilot [5, 6].

[1] ArduPilot. URL: https://ardupilot.org (дата обращения: 05.05.2025).

Технологические аспекты проектирования и реализации проекта для задач рассматриваемого класса связаны в основном с аддитивными технологиями (3D-печатью) [7] и методами механической обработки [8], что обусловлено оригинальностью геометрии деталей конструкции, в частности, требованиями, предъявляемыми к их габаритным размерам.

Междисциплинарная направленность используемых технологий и разнообразие методов моделирования дает основание рассматривать решаемые задачи как базовые для реализации проектного метода обучения со всеми его известными достоинствами: проблемность, командность, диалогичность, интегративность, контекстность [9, 10].

Материалы и методы

Работа выполнена на базе подходов, основанных на принципах системного инжиниринга, в рамках которого объект проектирования и методы реализации проекта рассматривается как единое целое во всех аспектах: конструкторском, функциональном, технологическом и образовательном [11].

В программно-аппаратной части базой проекта является платформа ArduPilot/Pixhawk 2.4.8/PX4/PX6C1. ArduPilot в отношении используемого нами контроллера поддерживается операционной системой Linux[2]. Данный факт накладывает на формирование среды разработки ряд дополнительных требований. В данном проекте эта среда формируется на базе дистрибутива Ubuntu[3] для WSL-2[4] и основана на архитектуре виртуализации Hyper-V[4] (Рисунок 1).

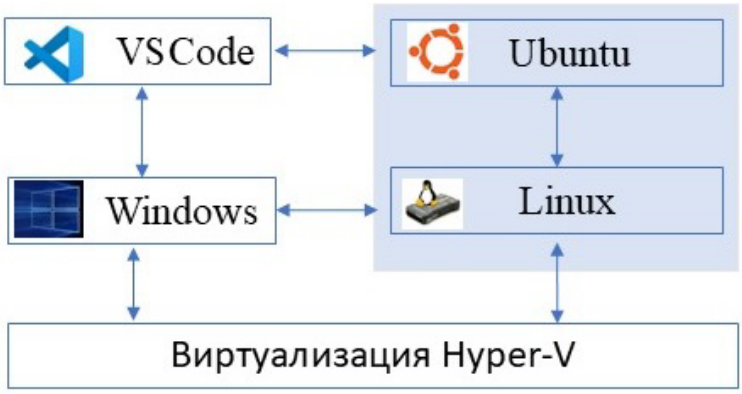


Рисунок 1 – Среда разработки
Figure 1 – Development environment

Последовательность действий для непосредственного формирования среды разработки приведена в файле, доступном по ссылке[5].

В данном проекте используется программное обеспечение Open Source репозитория GitHub Ardulilot, ветка Rover-4.5.7.

[2] Standardize, Abstract, Overcome: Exploring Variability in ArduPilot. DESOSA 2020. URL: https://desosa.nl/projects/ardupilot/2020/04/09/standardize-abstract-overcome-exploring-variability-in-ardupilot#fn:19 (дата обращения: 05.05.2025).
[3] Ubuntu on WSL. Windows Subsystem for Linux (WSL) | Ubuntu. URL: https://documentation.ubuntu.com/wsl/en/latest/ (дата обращения: 05.05.2025).
[4] Сравнение версий WSL. Microsoft Learn. URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/windows/wsl/compare-versions (дата обращения: 05.05.2025).
[5] Формирование среды разработки. VK WorkDisk. URL: https://cloud.mail.ru/public/GATf/GZEvXR9VW (дата обращения: 05.05.2025).

По ссылке[6] также доступен файл, в котором приведена последовательность действий по данному проекту для непосредственной установки программного обеспечения на локальный компьютер с последующей компиляцией, сборкой и загрузкой прошивки на плату.

На Рисунке 2 показана архитектура программного обеспечения, а на Рисунке 3 – структурно-функциональная электрическая схема.

Архитектура программного обеспечения Ardupilot в актуальной для наших задач части приведена на Рисунке 2 для режима управления Manual. Этот режим позволяет дистанционно управлять движением по радиоканалу, используя рулевые и газовые стики на пульте дистанционного управления.

Штатный вариант ручного управления BigoLand без функции дистанционного управления при помощи рулевого колеса (штурвала) и ручки газа самого электромобиля во избежание путаницы с терминологией ArduPilot будем называть PilotWheelDrive.

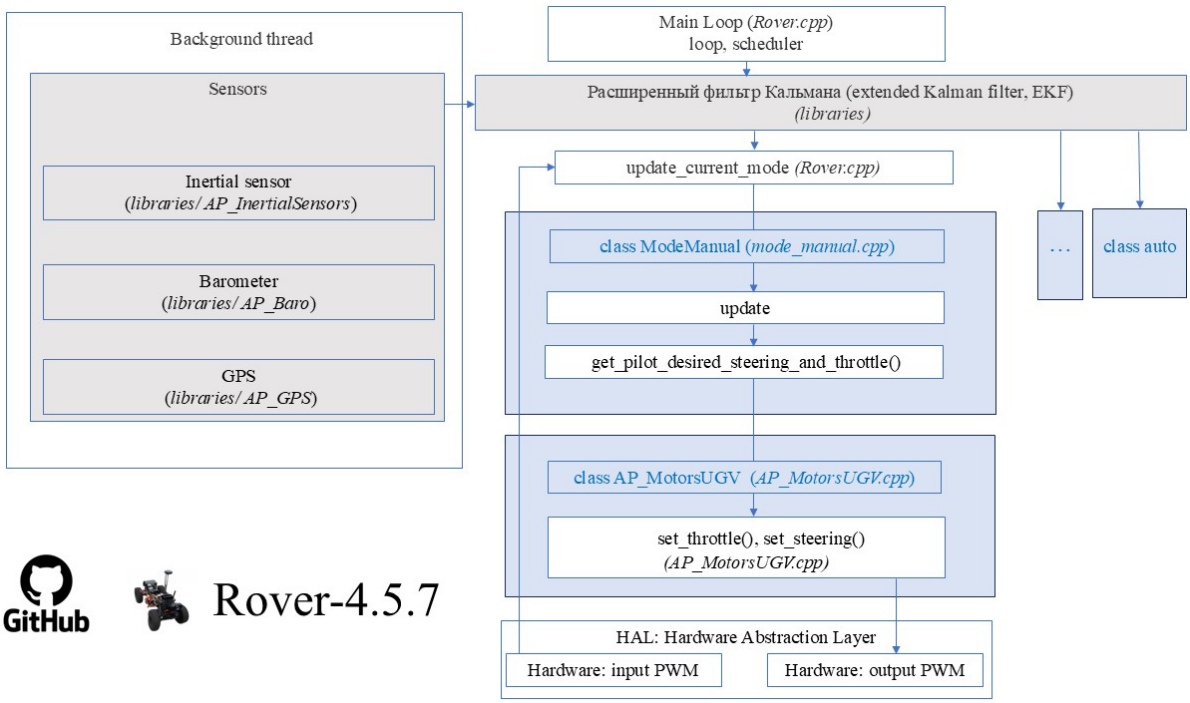


Рисунок 2 – Архитектура программного обеспечения проекта
Figure 2 – Project software architecture

Центральными в программном обеспечении Ardupilot являются функции организации бесконечного цикла по времени (loop), функции шедулера (scheduler), управляющего выполнением задач, а также фонового потока (background thread), обеспечивающего получение данных из системы очувствления (датчиков).

Расширенный фильтр Кальмана анализирует состояние системы на основе данных, полученных от датчиков.

Программное обеспечение построено на принципах объектно-ориентированного программирования. В актуальной для нас части базовым является класс **Rover**, содержащий все параметры и функции о состоянии и поведении транспортного средства рассматриваемого типа, а также класс **Mode**, описывающий режимы управления в целом. Класс **ModeManual** описывает ручной вариант управления по радиоканалу и является

[6] Настройка, компиляция и сборка. VK WorkDisk. URL: https://cloud.mail.ru/public/Stp2/wdB2y6vNc (дата обращения: 05.05.2025).

производным от **Mode**. При этом класс **ModeManual** объявлен дружественным классу **Rover.**

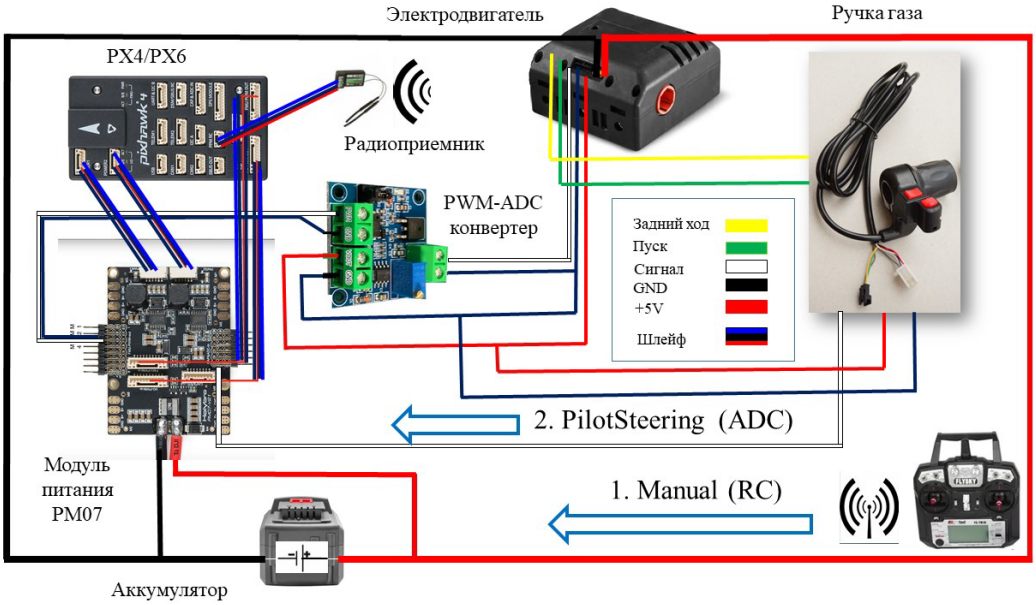


Рисунок 3 – Структурно-функциональная электрическая схема проекта
Figure 3 – Structural and functional electrical diagram of the project

Программное обеспечение построено на принципах объектно- ориентированного программирования. В актуальной для нас части базовым является класс **Rover**, содержащий все параметры и функции о состоянии и поведении транспортного средства рассматриваемого типа, а также класс **Mode**, описывающий режимы управления в целом. Класс **ModeManual** описывает ручной вариант управления по радиоканалу и является производным от **Mode**. При этом класс **ModeManual** объявлен дружественным классу **Rover.**

Движение в дистанционном (Manual) или программном (Auto) режиме управления для краткости будем называть еще телематическим режимом. В случае движения в телематическом режиме, но при разного рода нештатных ситуациях, или же просто по желанию пилота – он может вмешаться в управление, используя штатные устройства **BigoLand**: ручку газа и штурвал. Такой вариант управления условно в целом будем называть комбинированным.

Ручка газа BigoLand передает на контроллер мотора аналоговый сигнал, который мы переключаем на порт «CAP & ADC IN» Pixhawk PX4, PX6, или ADC6.6V для Pixhawk 2.4.8, конфигурируя ручку управления газом как аналоговый RangeFinder со следующими параметрами настройки:

RNGFND1_TYPE = 1 //(Аналоговый)

RNGFND1_PIN = 14 // (Второй пин 6.6V ADC)

Именно этот аналоговый сигнал впоследствии интерпретируется программным кодом как входной сигнал, определяющий заданный уровень газа.

Полный вариант файла параметров настройки контроллера по данному проекту доступен по ссылке[7].

Таким образом, ненулевой сигнал при малом повороте пилотом этой ручки служит триггером для переключения автопилота в режим PilotWheelDrive.

[7] Pixhawk_Param_17.04.25. VK WorkDisk. URL: https://cloud.mail.ru/public/cdy2/W93n2W8Ao (дата обращения: 05.05.2025).

При этом угол поворота вала сервомотора, управляющего рулевыми колесами, обнуляется, а фактический уровень газа соответствует установленному пилотом. Управление рулем (штурвалом) пилот может реализовать за счет функций обгонной муфты независимо от сервомотора. При полном отпускании ручки (сбросе газа) электромобиль возвращается в исходный телематический режим управления с актуальными на этот момент параметрами управления.

Для реализации комбинированного управления в программной части модифицированы следующие фрагменты кода.

В класс **Rover** и **RanfeFinder** добавлена переменная:

```
public:
float BigoLandThrottle=0.0;
```

В класс **Mode** добавлена функция, масштабирующая показания RangeFinder относительно допустимых значений газа:

```
public:
float BigoLandThrottleScale(float inp){return( ((inp-minInp)/inpRange)*MaxThrottle);
    // minInp -минимальное значение входного аналогового сигнала
    // inpRange – диапазон изменения входного аналогового сигнала
    // MaxThrottle – максимальное значение газа
    //
    };
```

Модифицированы функции update() классов **RangeFinder** и **ModeManual**:

```
void RangeFinder::update(void)
{
   for (uint8_t i=0; i<num_instances; i++) {
      if (drivers[i] != nullptr) {
         if ((Type)params[i].type.get() == Type::NONE) {
            // allow user to disable a rangefinder at runtime
                state[i].status = Status::NotConnected;

                state[i].range_valid_count = 0;

                continue;

            }

         drivers[i]->update();
      }
   }
// BigoLand
            BigoLandThrottle=state [0].distance_m;
#if HAL_LOGGING_ENABLED
   Log_RFND();
#endif
}

void ModeManual::update()
{
   float desired steering, desired throttle, desired lateral;
```

```
            get_pilot_desired_steering_and_throttle(desired_steering, desired_throttle);
            get_pilot_desired_lateral(desired_lateral);
            // apply manual steering expo
desired steering = 4500.0 * input_expo(desired steering / 4500, g2.manual_steering_expo);
            if(rover.BigoLandThrottle>0.00)
             {
             desired_steering=0.0;
             desired_throttle=BigoLandThrottleScale(rover.BigoLandThrottle);
             }

        static uint8_t counter = 0;
              counter++;
              if (counter > 50)
              {
              counter = 0;
        gcs().send_text(MAV_SEVERITY_CRITICAL, "BigoLandThrottle  = %5.3f\n
        desired_throttle = %5.3f\n
        desired_steering = %5.3f\n\n",
        rover.BigoLandThrottle,desired_throttle, desired_steering);
              }
            // copy RC scaled inputs to outputs
g2.motors.set_throttle(desired_throttle);
g2.motors.set_steering(desired_steering,(g2.manual_options&ManualOptions::
SPEED_SCALING));
        g2.motors.set_lateral(desired_lateral);
        }
```

Модифицирована функция read_rangefinder класса **Rover**:

```
        void Rover::read_rangefinders(void)
        {
           rangefinder.update();
           BigoLandTrottle= rangefinder. BigoLandTrottle;
        #if HAL_LOGGING_ENABLED
           Log_Write_Depth();
        #endif
        }
```

Синим цветом выделены добавленные или модифицированные строки кода.

При реализации проекта одной из важных составляющих являлось изготовление деталей и сборка обгонной муфты с заданными геометрическими и точностными характеристиками. Для этого использовалось оборудование с ЧПУ. Для уменьшения времени подготовки управляющей программы детали, а также анализа технологического процесса использовалась среда СПРУТКАМ.

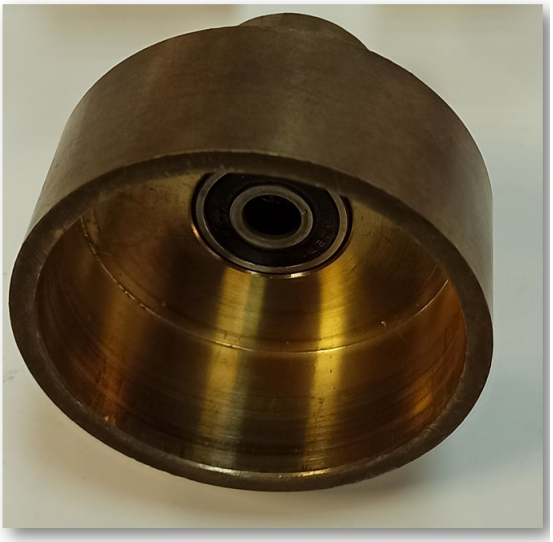
Технологические аспекты, связанные с механической обработкой, реализованы в среде СПРУТКАМ и проиллюстрированы на Рисунке 4 на примере детали «Полумуфта серво» [1].

1. Импорт 3D-модели

2. Формирование модели изготавливаемой детали, начальной заготовки и оснастки в корневом узле техпроцесса

3. Создание последовательности технологических операций, расчёт и назначение их параметров

4. Генерация управляющей программы



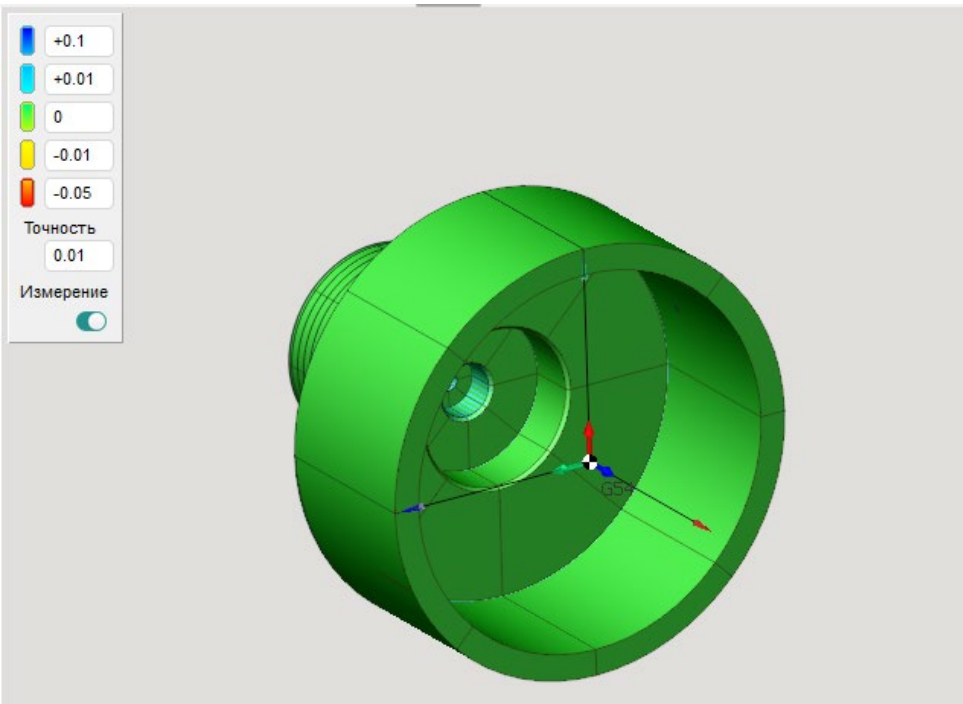


Рисунок 4 – Технологические аспекты в среде СПРУТКАМ
Figure 4 – Technological aspects in the SPRUTCAM environment

Текст программ для станка с ЧПУ приведен в файле, доступном по ссылке[8].

Технологические аспекты, связанные с 3D-печатью, реализованы в среде Cura и проиллюстрированы Рисунком 5 на примере детали «Кожух» [1].

[8] РМ. VK WorkDisk. URL: https://cloud.mail.ru/public/zcY3/RynxTccMB (дата обращения: 05.05.2025).

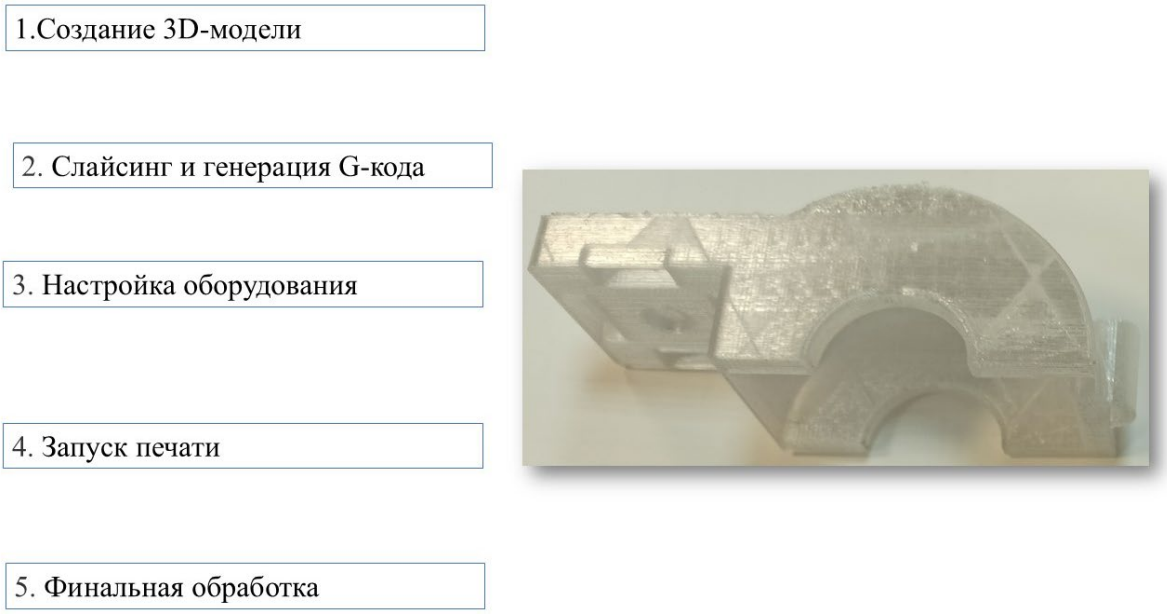


Рисунок 5 – Технологические аспекты в среде Cura
Figure 5 – Technological aspects in the Cura environment

Результаты

Результатом реализации проекта является полнофункциональный прототип электромобиля-беспилотника с комбинированной системой управления.

На Рисунке 6 показана обгонная муфта двунаправленного действия в собранном и разобранном варианте.

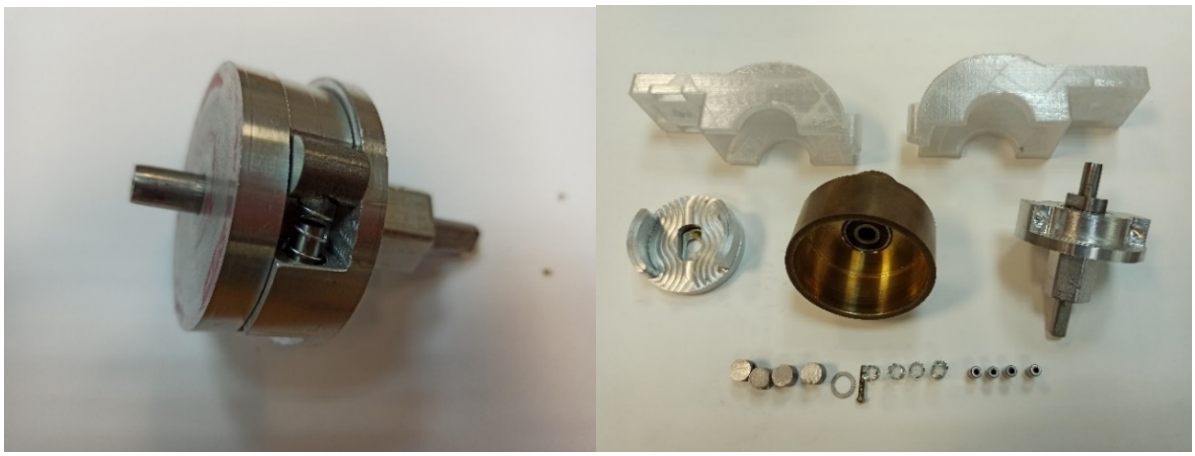


Рисунок 6 – Обгонная муфта двунаправленного действия
Figure 6 – Bidirectional overrunning clutch

Видеоролик[9] иллюстрируют процесс испытания электромобиля в комбинированном режиме управления с установленным на контроллер программным обеспечением.

[9] channel54608438. BigoLand. Видеохостинг RUTUBE. URL: https://rutube.ru/video/private/9cfa76100690bf68d88862ce71c9dcb3/?p=LF8PnOS0ZT3QRTV6qtQcxQ (дата обращения: 05.05.2025).

Обсуждение

Комбинированная система управления в ее механической, электромеханической (мехатронной) и программно-аппаратной части обеспечивает все требуемые статические, кинематические и динамические параметры и качественным образом повышает эффективность управления электромобилем.

В образовательной части данного проекта в полной мере проявили себя достоинства проектного метода обучения, особенно в части разработки натурных моделей конструкции. Предлагаемый студентам тест-драйв на спроектированном, собранном и запрограммированном ими электромобиле существенным образом приближает абстрактные CAD/CAE и программные модели проекта к действительной реальности и тем самым мотивирует учебную деятельность студентов.

Заключение

Реализованный проект прототипа электромобиля беспилотника полностью подтвердил изначально высказанную гипотезу об эффективности использования принципов системного инжиниринга в проектировании и проектного метода в обучении. Целостное рассмотрение объекта проектирования и методов реализации проекта, рассматриваемые во взаимосвязи как единое целое во всех основных аспектах: конструкторском, функциональном, технологическом и образовательном – позволили добиться как улучшения качественных характеристик результатов проектирования и сокращения времени реализации проекта, так и повышения результатов учебной деятельности студентов.

В образовательном аспекте системный подход позволяет связать педагогические и организационные условия, процессы и потоки данных, циркулирующие между этими процессами с собственно процессами проектирования, а также с соответствующими потоками данных, проявляющих себя в этих процессах [11].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Овчинников А.Ю. Прототип беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(2):186–203.
   Chugunov M.V., Polunina I.N., Ovchinnikov A.Y. Prototype of an Electric Vehicle Based on Bigo.Land. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(2):186–203. (In Russ.).
2. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Пьянзин А.М. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей. *Инженерные технологии и системы.* 2020;30(3):464–479. https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479
   Chugunov M.V., Polunina I.N., Pjanzin A.M. E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models. *Engineering Technologies and Systems.* 2020;30(3):464–479. (In Russ.). https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479
3. Sun D., Li P., Xia X., Liu D., Baldi S. MRS ArduPilot: An Adaptive ArduPilot Architecture Based on Model Reference Stabilization. In: *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 02–05 June 2024, Jeju Island, Republic of Korea*. IEEE; 2024. P. 2723–2728. https://doi.org/10.1109/IV55156.2024.10588730
4. Baldi S., Sun D., Xia X., Zhou G., Liu D. ArduPilot-Based Adaptive Autopilot: Architecture and Software-in-the-Loop Experiments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* 2022;58(5):4473–4485. https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3162179

5. Li P., Liu D., Xia X., Baldi S. Embedding Adaptive Features in the ArduPilot Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles. In: *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), 06–09 December 2022, Cancun, Mexico.* IEEE; 2022. P. 3773–3780. https://doi.org/10.1109/CDC51059.2022.9993292
6. Li P., Liu D., Xia X., Baldi S. ADArduPilot: An ArduPilot Compatible Adaptive Autopilot. *IFAC-PapersOnLine.* 2023;56(2):8097–8104. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.964
7. Liu T., Wang X., Zhou H., Che X., Liu H., Wang Q. Design and Control of a Two-Wheeled Self-Balancing Robot Made in 3D Printing. In: *2018 Chinese Automation Congress (CAC), 30 November – 02 December 2018, Xi'an, China*. IEEE; 2018. P. 1211–1216. https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623557
8. Серегин С.Г. Стандартные приемы программирования в генераторе постпроцессоров системы SprutCAM. *Аллея науки.* 2017;2(11):497–502.
Seregin S.G. Standard Programming Techniques in the Generator System SprutCAM Postprocessors. *Alleya nauki*. 2017;2(11):497–502. (In Russ.).
9. Lavado-Anguera S., Velasco-Quintana P.-J., Terrón-López M.-J. Project-Based Learning (PBL) as an Experiential Pedagogical Methodology in Engineering Education: A Review of the Literature. *Education Sciences.* 2024;14(6). https://doi.org/10.3390/educsci14060617
10. Hagedorn L., Riedelsheimer Th., Stark R. Project-Based Learning in Engineering Education – Developing Digital Twins in a Case Study. *Proceedings of the Design Society*. 2023;3:2975–2984. https://doi.org/10.1017/pds.2023.298
11. Чернякова Н.В. Особенности проектирования и реализации предметной подготовки в вузе на основе системного подхода. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2013;1(1). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/04/chernyakova_1_13_1.pdf
Chernyakova N.V. Features of the Design and Implementation of Substantive Training in College Based on System Approach. *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2013;1(1). (In Russ.). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/04/chernyakova_1_13_1.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Владимирович Чугунов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация.
e-mail: m.v.chugunov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5318-5684

Mikhail V. Chugunov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Chair of Design and Technology Informatics, National Research Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia, the Russian Federation.

Ирина Николаевна Полунина, кандидат педагогических наук, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация.
e-mail: my_pk@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1093-8401

Irina N. Polunina, Candidate of Pedagogic Sciences, Associate Professor of Chair of Design and Technology Informatics, National Research Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia, the Russian Federation.

Александр Юрьевич Овчинников, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация.
e-mail: ovchinnikov.alexander@rambler.ru
ORCID: 0000-0001-6796-1824

Alexander Yu. Ovchinnikov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technology, National Research Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia, the Russian Federation.

Анатолий Сергеевич Гариков, ассистент кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация.
e-mail: garikov.a@yandex.ru

Anatoly S. Garikov, Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, National Research Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia, the Russian Federation.

Артем Владимирович Осипов, ассистент кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация.
e-mail: osipov.a.v@yandex.ru

Artem V. Osipov, Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, National Research Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 03.07.2025; принята к публикации 14.07.2025.

The article was submitted 02.06.2025; approved after reviewing 03.07.2025; accepted for publication 14.07.2025.