

Помимо этого, имитационное моделирование представляет собой мощный инструмент в процессе курсового проектирования асинхронных двигателей, которое позволяет выполнять углубленный анализ работы двигателя, а именно исследовать динамические процессы и характеристики различных режимах работы. Также можно оптимизировать конструктивные и эксплуатационные параметры двигателя, что приводит к повышению его эффективности и надежности.

Одним из важных аспектов является то, что имитационное моделирование позволяет сократить время и ресурсы на физические испытания, что делает процесс разработки более экономичным, однако еще одним важным аспектом может служить то, что модели могут быть быстро изменены для учета новых данных или при внесении модификаций, что делает имитационное моделирование гибким инструментом в случае изменений в проекте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копырин В.А., Смирнов О.В. Имитационное моделирование режимов работы погружного асинхронного электродвигателя // ОНВ. – 2018. – № 1 (157). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-rezhimov-raboty-pogruzhnogo-asinhronnogo-elektrodvigatelya> (дата обращения: 13.11.2024).
2. Петров А.В., Котельников А.П., Плохов И.В. Динамическое имитационное моделирование асинхронной электрической машины с использованием выражений для мгновенных значений величин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 8 (50). – URL: <https://research-journal.org/archive/8-50-2016-august/dinamicheskoe-imitatsionnoe-modelirovanie-asinhronnoj-elektricheskoy-mashiny-s-ispolzovaniem-vyrazhenij-dlya-mgnovennykh-znachenij-velichin> (дата обращения: 13.11.2024). – doi: 10.18454/IRJ.2016.50.158
3. Захаренко В.С., Дорошенко И.В. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого: научно – практический журнал. – 2011. – № 3. – С. 66–73 (дата обращения: 24.11.2024).
4. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Стародубцев Д.А. Моделирование оптимального управления асинхронным приводом. Современные технологии. Системный анализ. // Моделирование. – 2023. – № 1(77). – С 83–93. – URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam/article/view/1070> (дата обращения 24.11.2024).
5. Волков А.В., Крикота С.М. Имитационная модель двухзвенного непосредственного преобразователя частоты, нагруженного на асинхронный двигатель // Электротехника і електроенергетика. – 2007. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-dvuhzvennogo-neposredstvennogo-preobrazovatelya-chastoty-nagruzhennogo-na-asinhronnyy-dvigatel> (дата обращения: 24.11.2024).
6. Дорошенко И.В., Погуляев М.Н. Имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB SIMULINK // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-asinhronnoy-mashiny-s-faznym-rotorom-v-matlab-simulink> (дата обращения: 24.11.2024).
7. Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // ЭС и К. – 2021. – № 4 (53). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-asinhronnogo-elektroprivoda-nasosa-pogruzhnogo-tehnologicheskogo-oborudovaniya> (дата обращения: 24.11.2024).

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**К.М. Сыздыков, Фам Чонг Хай**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ35; студент-аспирант*

Научный руководитель: А.А. Шилин, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Рассмотрена проблематика оптимизации работы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в частности квадрокоптеров, путем улучшения методик записи и анализа переходных процессов. Разработано устройство, которое позволит с высокой точностью записывать и анализировать данные о переходных процессах БПЛА в условиях реального времени, с применением фильтра Калмана. Значительно улучшены настройки систем управления, минимизировано влияние внешних и внутренних помех. Исследование направлено на повышение надежности и безопасности беспилотных летательных аппаратов, на расширение их функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** квадрокоптер, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, переходные процессы, полётный контроллер, ESP32, гироскопы.

The problems of optimizing the operation of unmanned aerial vehicle (UAVs), in particular quadcopters, by improving the methods of recording and analyzing transients are considered. A device has been developed that will allow recording and analyzing data on the transients of a quadcopter in real time with high accuracy. Control system settings have been significantly improved, and the influence of external and internal interference has been minimized. The study has shown a significant increase in the reliability and safety of unmanned aerial vehicles, providing the expansion of their functionality.

**Keywords:** quadcopter, unmanned aerial vehicles, UAVs, transients, flight controller, ESP32, gyroscope.

## Введение

В данной работе предлагается новый алгоритм управления для БПЛА, направленный на решение проблемы записи переходных процессов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов стандартных полётных контроллеров. Этот алгоритм использует микроконтроллер ESP32 [2] и позволяет записывать временные изменения состояния аппарата (переходные процессы), что обеспечивает глубокий анализ поведения БПЛА в динамических условиях.

Основное назначение нового алгоритма – эффективное использование оперативной памяти микроконтроллера ESP32 для записи переходных процессов в режиме реального времени. В отличие от стандартных контроллеров, не способных сохранять данные из-за ограничения памяти, предложенный алгоритм позволяет выделить 140–200 килобайт из 500 доступных на ESP32, что достаточно для хранения данных с частотой до тысячи раз в секунду.

Алгоритм также включает гибкий механизм управления записью данных через свободные каналы, что позволяет оператору вручную запускать и останавливать запись переходных процессов по мере необходимости. Этот подход позволяет сохранить важные данные о реакциях БПЛА на внешние воздействия, такие как порывы ветра и манёвры, для последующего анализа и оптимизации управления.

На сегодняшний день микроконтроллер ESP32 широко используется для разработки полётных контроллеров, применяемых в БПЛА и других летательных аппаратах [3]. Благодаря своей высокой производительности и относительно большому объёму оперативной памяти, этот микроконтроллер позволяет выполнять стандартные задачи управления и стабилизации, что делает его популярным выбором среди разработчиков.

## Основные возможности стандартных решений [1]

Полётные контроллеры на базе ESP32 обеспечивают базовые функции управления БПЛА, такие как:

- поддержание устойчивости и стабилизация аппарата [6];
- контроль углов крена, тангажа и рысканья [7];
- выполнение простых манёвров для корректного выполнения полётных заданий [8].

Тем не менее, несмотря на широкий спектр функциональных возможностей, ни одно из существующих решений на базе ESP32 не поддерживает запись переходных процессов. Эти системы в основном разрабатываются для решения бытовых и прикладных задач, где сохранение временных изменений состояния летательного аппарата не является обязательным.

Ключевой недостаток текущих решений заключается в их неспособности записывать переходные процессы из-за ограничения объёма оперативной памяти. Для записи данных, фиксирующих мельчайшие изменения состояния аппарата (переходные процессы), требуется высокая частота сохранения (до тысячи раз в секунду), что требует значительных ресурсов памяти и вычислительных мощностей. Однако большинство контроллеров для БПЛА, вклю-

чая решения на базе ESP32, не располагают достаточным объёмом оперативной памяти для записи переходных процессов в режиме реального времени.

Отсутствие возможности записи переходных процессов ограничивает применение этих контроллеров в научных и исследовательских задачах, где данные о поведении БПЛА в условиях полёта могут использоваться для глубокого анализа и оптимизации алгоритмов управления.

Предложенное решение представляет собой комплексную систему управления БПЛА, в которой микроконтроллер ESP32 интегрируется с тремя типами гироскопов, обеспечивая точное измерение и анализ переходных процессов. Основная идея заключается в том, чтобы создать систему, которая не только управляет БПЛА, но и предоставляет возможность гибкого сбора данных о переходных процессах, что особенно важно для исследовательских задач.

### **Многокомпонентная система датчиков и микроконтроллера**

В данном проекте используется комбинация из трёх различных типов гироскопов, что позволяет повысить точность считывания данных и расширить диапазон параметров, фиксируемых в полёте. Эти гироскопы обеспечивают измерение отклонений по различным осям, регистрируют колебания и нестабильности, возникающие в полёте, и передают данные на микроконтроллер ESP32. Это позволяет фиксировать переходные процессы с высокой точностью, что делает систему пригодной для анализа тонких отклонений, таких как реакция на порывы ветра или выполнение маневров.

ESP32 в данной системе выполняет двойную задачу: управляет БПЛА и записывает переходные процессы. Этот микроконтроллер способен обрабатывать и синхронизировать данные от трёх типов гироскопов и, благодаря специальному алгоритму управления, эффективно распределять ресурсы для записи важных параметров полёта. Система поддерживает высокую частоту сбора данных, что позволяет сохранить детальную картину поведения аппарата в динамических условиях.

### **Использование дополнительных каналов управления**

Уникальная функция данного контроллера – использование дополнительных каналов управления для управления процессом записи данных. Классические полётные контроллеры используют до восьми каналов, тогда как данное решение позволяет задействовать только четыре канала (тяга, крен, тангаж и рысканье). Данные каналы предназначены для запуска и остановки записи переходных процессов, что даёт оператору полный контроль над процессом сбора данных и позволяет гибко управлять записью, выбирая только ключевые моменты для сохранения.

Данная система позволяет оператору выбирать, какие типы переходных процессов должны фиксироваться в памяти, что важно для оптимизации ресурсоёмкости записи и фокусирования на наиболее значимых для анализа параметрах. Этот подход обеспечивает точное документирование реакций БПЛА на различные внешние воздействия, адаптируя систему под задачи конкретных исследований и экспериментов.

В предложенной системе используется интеграция микроконтроллера ESP32 с тремя типами гироскопов и системой управления, что обеспечивает высокую точность данных и гибкость управления БПЛА в условиях полёта. Реализация данного решения требует синхронной работы аппаратного и программного обеспечения для записи и анализа переходных процессов.

Аппаратная часть системы основана на ESP32 как центральном элементе управления, к которому подключены три различных гироскопа, каждый из которых фиксирует данные по различным осям движения. Такая комбинация позволяет получить полное представление о положении и перемещении БПЛА, а также о его реакции на внешние факторы. Каждый гироскоп может измерять отклонения и передавать данные в реальном времени, что особенно важно для анализа переходных процессов в условиях динамичного полёта.

Кроме того, в систему включены модули управления, которые поддерживают до восьми каналов. Четыре из этих каналов используются для стандартных параметров управления (тяга, крен, тангаж, рысканье), а остальные каналы отведены под контроль записи данных, выбора типов переходных процессов и их остановки. Эта система каналов обеспечивает простоту в управлении и высокую функциональность для оператора.

На программном уровне система работает с алгоритмом, который позволяет контролировать одновременно как управление БПЛА, так и сбор данных. Специальные процедуры на основе алгоритма обеспечивают синхронизацию данных от разных гироскопов и их запись с высокой частотой. Программное обеспечение также поддерживает настройку на разные условия эксперимента, давая возможность выбирать конкретные переходные процессы для анализа, что позволяет избежать избыточной записи и сэкономить ресурсы.

Ключевая особенность программного обеспечения – алгоритм распределения памяти и обработки данных. Он позволяет одновременно фиксировать переходные процессы и управлять БПЛА, минимизируем нагрузку на процессор ESP32. Данные от гироскопов в каждом переходном процессе сохраняются с привязкой к временным меткам, что позволяет получить более полное и детализированное представление о динамике полёта.

Система контроллера включает несколько этапов:

1. *Инициализация и настройка:* Подключение к гироскопам и каналам управления.
2. *Запуск режима полёта:* Вход в состояние управления с возможностью выбора записи данных.
3. *Запись переходных процессов:* При активации записи система начинает фиксировать временные изменения, полученные от гироскопов, и сохранять их с высокой частотой.
4. *Завершение записи:* Оператор может остановить процесс записи по команде, после чего данные остаются в памяти для дальнейшего анализа.

Эта последовательность обеспечивает точное выполнение всех задач контроллера и позволяет исследовать переходные процессы в разных условиях, что крайне важно для научных экспериментов.

В данной работе предложена концепция новой системы управления квадрокоптером на базе микроконтроллера ESP32, которая позволяет не только выполнять стандартные функции управления, но и записывать переходные процессы в условиях полёта. Эта система интегрирует три типа гироскопов и использует дополнительные каналы управления для гибкой настройки записи, что делает её уникальной по сравнению с существующими решениями.

Ключевым отличием предложенной системы является возможность собирать и анализировать данные о переходных процессах, что даёт исследователям более полное представление о поведении квадрокоптера при различных условиях полёта. Это особенно важно для научных и прикладных задач, связанных с оптимизацией систем управления летательными аппаратами. Возможность выбора типов переходных процессов и управления записью с помощью дополнительных каналов делает систему удобной и адаптируемой под конкретные исследовательские задачи.

## Заключение

Данная идея открывает перспективы для дальнейших исследований и разработки усовершенствованных алгоритмов управления, способных адаптироваться к динамичным условиям окружающей среды. В будущем предполагается расширение функциональности системы, интеграция дополнительных сенсоров и улучшение алгоритмов для ещё более точного управления и анализа данных.

Таким образом, предложенная концепция не только решает текущие ограничения стандартных полётных контроллеров, но и создаёт основу для создания исследовательских установок, которые могут существенно продвинуть исследования в области управления мультикоптерами и их применения в сложных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенд для исследования фильтра калмана в системе управления мультикоптером, смоделированным в среде Matlab / Фам Чонг Хай, А.М. Гунько, Б.И. Батомункуев, А.И. Салмин ; науч. рук. А.А. Шилин // Бутаковские чтения : сборник статей III Всероссийской с международным участием молодежной конференции, 12–14 декабря 2023 г., Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2023. – С. 549–552.
2. ESP32 NodeMCU: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Версия от 29.06.2021. – Доступно по: <https://joy-it.net/files/files/Produkte/SBC-NodeMCU-ESP32/SBC-NodeMCU-ESP32-Manual-2021-06-29.pdf> (дата обращения: 13.11.2024).
3. ESP32: проекты [Электронный ресурс]. – URL: <https://microkontroller.ru/esp32-projects/> (дата обращения: 13.11.2024).
4. Осциллограф на ESP32 [Электронный ресурс]. – URL: <https://microkontroller.ru/esp32-projects/oscillograf-na-esp32/> (дата обращения: 13.11.2024).
5. Как я разработал квадрокоптер на ESP32 с нуля – ушло 4 года [Электронный ресурс]. – URL: [https://pcnews.ru/blogs/kak\\_a\\_razrabotal\\_kvadrokoopter\\_na\\_esp32\\_s\\_nula\\_uslo\\_4\\_goda-1444579.html](https://pcnews.ru/blogs/kak_a_razrabotal_kvadrokoopter_na_esp32_s_nula_uslo_4_goda-1444579.html) (дата обращения: 13.11.2024).
6. Perks K., Theys B. A Control Approach for Transitioning VTOL UAVs with Continuously Varying Transition Angle and Controlled by Differential Thrust [Электронный ресурс] // Semantic Scholar. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/85d6/8372c8c81096c875f9fcc8eb6a0f4d030ca.pdf> (дата обращения: 13.11.2024).
7. Theys B., et al. A Control Approach for Transitioning VTOL UAVs with Continuously Varying Transition Angle and Controlled by Differential Thrust [Электронный ресурс] // ResearchGate. – URL: [https://www.researchgate.net/profile/Bart-Theys/publication/304802673\\_A\\_control\\_approach\\_for\\_transitioning\\_VTOL\\_UAVs\\_with\\_continuously\\_varying\\_transition\\_angle\\_and\\_controlled\\_by\\_differential\\_thrust/links/5aaa3b370f7e9b88266fd058/A-control-approach-for-transitioning-VTOL-UAVs-with-continuously-varying-transition-angle-and-controlled-by-differential-thrust.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bart-Theys/publication/304802673_A_control_approach_for_transitioning_VTOL_UAVs_with_continuously_varying_transition_angle_and_controlled_by_differential_thrust/links/5aaa3b370f7e9b88266fd058/A-control-approach-for-transitioning-VTOL-UAVs-with-continuously-varying-transition-angle-and-controlled-by-differential-thrust.pdf) (дата обращения: 13.11.2024).
8. Marmol L.G. et al. Autonomous UAV Systems for Remote Sensing and Environmental Monitoring // MDPI. – 2023. – Т. 11, № 8. – С. 654. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/11/8/654> (дата обращения: 13.11.2024).

## ГАШЕНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**В.С. Фёдоров**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, Группа 5А15*

Научные руководители: В.В. Шестакова, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ;  
А.Ю. Юшков, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ

В настоящее время потребности общества в электроэнергии возрастают ежегодно. Также можно отметить, что постоянно увеличиваются объемы передачи электрической энергии на значительные расстояния, сотни километров. Как известно, потери при передаче энергии на переменном токе значительны. Кроме того, включение линий переменного тока требует соблюдения условий синхронизма. Передача энергии по линиям постоянного тока сопровождается значительно меньшими потерями (энергия теряется только за счет активного сопротивления проводов) и не требует синхронизации.

Однако внедрение систем электропередачи на постоянном токе приводит к другой проблеме – неспособности известных коммутационных аппаратов отключать цепи с постоянным током. Для сравнения приведем следующие значения. Предельный отключаемый ток короткого замыкания на переменном токе равен 250 кА, а предельное значение для постоянного тока – всего 5 кА, в 50 раз меньше [1]. В связи с этим проблема конструирования надежных и сравнительно дешевых выключателей постоянного тока является актуальной.

Одно из известных решений гашения дуги постоянного тока заключается в применении магнитного поля [2]. При нахождении электрической дуги в силовых линиях магнитной индукции на заряженные частицы, в большей части на электроны, оказывает действие сила Лоренца. Это приводит к движению плазмы, увеличению ее сопротивления из-за увеличения длины плазменного шнура и, как следствие, его последующему погасанию.