

УДК 62-519
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-80-91>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Система управления помехоустойчивым электронным регулятором оборотов бесщеточного электродвигателя беспилотного воздушного судна

М.В. Паринов[®],
А.Н. Юров,
Я.В. Скитский

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 394006 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: parmax@mail.ru

Резюме

Цели. Высокая востребованность и эффективность беспилотных воздушных судов делают актуальным производство их компонентов, одним из которых является регулятор скорости вращения бесщеточного электродвигателя винтомоторной группы. Однако российская промышленность в настоящее время не производит их серийно. Для запуска производства необходимо разработать методики и алгоритмы управления для аппаратной и программной частей устройств данного типа, а также формализовать критерии выбора основных компонентов. Целью работы является создание методики программного управления электродвигателем, включающее структурные схемы, инвариантные алгоритмы и методики расчетного выбора параметров основного микроконтроллера регулятора оборотов.

Методы. Использованы методы алгоритмизации, экспертных оценок, линейных вычислительных процессов и экспериментальных исследований.

Результаты. Представлены теоретические основы управления электродвигателями винтомоторной группы. Предложены структурная схема реализации регулятора, методики коммутации обмоток при управлении с трапецеидальным сигналом, представлены осциллограммы сигналов. На базе теоретических изысканий разработан инвариантный алгоритмический аппарат построения программного обеспечения для различных типов микроконтроллеров. Представлены блок-схемы основных модулей программного средства: алгоритмов событийной коммутации и основного бесконечного цикла микроконтроллера. Формализованы требования к микроконтроллерам для создания различных типов регуляторов оборотов, представленные в виде набора математических выражений. Они позволяют выполнить расчет количества необходимых периферийных устройств и портов микроконтроллера согласно требованиям к регулятору, а также вычислительной мощности используемого ядра.

Выводы. Экспериментальные исследования показали достоверность представленных теоретических изысканий. Полученные результаты могут быть использованы для подбора оптимальной элементной базы и разработки программного обеспечения для регуляторов скорости вращения электродвигателей винтомоторной группы беспилотных воздушных судов.

Ключевые слова: регулятор скорости вращения электродвигателя, алгоритмы, бесщеточный электродвигатель, беспилотное воздушное судно, помехоустойчивые решения, программное управление, микроконтроллер

• Поступила: 30.11.2023 • Доработана: 04.12.2023 • Принята к опубликованию: 15.12.2023

Для цитирования: Паринов М.В., Юров А.Н., Скитский Я.В. Система управления помехоустойчивым электронным регулятором оборотов бесщеточного электродвигателя беспилотного воздушного судна. *Russ. Technol. J.* 2024; 12(1):80–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-80-91>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Control system for noise-resistant electronic speed controller of a brushless electric motor for an unmanned aerial vehicle

Maksim V. Parinov[@],
Aleksey N. Yurov,
Yaroslav V. Skitskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, 394006 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: parmax@mail.ru

Abstract

Objectives. The high demand for unmanned aircraft and their efficiency makes the production of their components a matter of relevance. One of these components is the speed controller of the brushless electric motor of the propeller motor group. At the current time, Russian industry, however, does not mass-produce them. In order to start production, control methods and algorithms for the hardware and software parts of devices of this type are needed. Criteria for selecting the main components also need to be formalized. The aim of this work is to develop a method for the software control of electric motors. This includes block diagrams and invariant algorithms and methods for the calculated selection of parameters of the main microcontroller of the electronic speed controller.

Methods. Methods of algorithmization, expert assessments, linear computational processes and experimental studies were used.

Results. The paper presents the theoretical basis for controlling the required motors. It proposes a block diagram of the implementation of the controller, and a technique for switching windings when controlling with a trapezoidal signal is proposed. Examples are given in the form of an oscillogram. Based on theoretical research, an invariant algorithmic apparatus was developed for building software for various types of microcontrollers. Block diagrams of all the main modules of the software are also presented. The main ones include: the event switching algorithm; and the main endless loop of the microcontroller. The requirements for microcontrollers to create the various types of speed controllers are formalized herein and presented in the form of a set of mathematical expressions. They enable the number of required peripheral devices and microcontroller ports to be calculated according to the requirements for the microcontroller, as well as the computing power of the core used.

Conclusions. Experimental studies show the reliability of the theoretical research presented herein. The results obtained can be used to select the optimal element base and develop software for speed controllers of electric motors of the propellers of unmanned aircraft.

Keywords: electric speed controller, algorithms, brushless direct current motor, unmanned aerial vehicle, noise-resistant solutions, software control, microcontroller

• Submitted: 30.11.2023 • Revised: 04.12.2023 • Accepted: 15.12.2023

For citation: Parinov M.V., Yurov A.N., Skitskiy Ya.V. Control system for noise-resistant electronic speed controller of a brushless electric motor for an unmanned aerial vehicle. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):80–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-80-91>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство легких беспилотных воздушных судов (БВС) использует электрические двигатели винтомоторной группы (ВМГ) [1, 2]. Также намечена тенденция перехода на электрическую тягу для летательных аппаратов (ЛА) более крупных размеров.

В основном электрические БВС используют бесщеточные трехфазные электродвигатели [3]. Управление их скоростью вращения осуществляется коммутацией фаз и изменением протекающих в обмотках токов. Для синхронизации процесса коммутации с вращением ротора необходимо определять положение постоянных магнитов относительно обмоток. Это возможно осуществить при помощи встроенных в электродвигатель датчиков [4]. Такой подход дает хорошие результаты, однако несколько сложен и дорог в использовании. Поэтому наибольшее распространение получил подход, использующий для определения момента коммутации обратную электродвижущую силу (ЭДС), измеренную на неподключенной в текущий момент фазе [5, 6].

Подавляющее большинство применяемых бесщеточных двигателей легких БВС не имеют встроенных датчиков. Для управления ими используются электронные регуляторы, именуемые в англоязычных источниках ESC (electric speed controller). Общепринятая архитектура легкого БВС [7] предполагает типовые интерфейсы подключения стандартизованных компонентов изделия. В частности, основными и обязательными для ESC являются интерфейс подключения обмоток электродвигателя (3 фазных линии) и интерфейс управления (цифровой или с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ)). Также электронный регулятор обычно имеет один или несколько выходов сигналов телеметрии.

Сейчас на российском рынке представлена широкая номенклатура ESC, закрывающая практически полностью имеющиеся потребности. Однако все известные авторам решения являются зарубежными. Их программное обеспечение (ПО) и техническая документация отсутствуют в открытом доступе. Таким образом, из-за зависимости от иностранных

поставок возникает проблема производства новых устройств с расширенной функциональностью, что противоречит политике технологического суверенитета.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения обозначенной проблемы необходимо создание методики, обеспечивающей разработку и изготовление регуляторов скорости вращения электродвигателей ВМГ легких БВС. Задача состоит из двух элементов: методики разработки аппаратной части (схемотехнического решения) и методики программного управления. В рамках данной статьи разработана вторая из них.

В процессе разработки методики программного управления необходимо выбрать принципы построения регулятора, разработать основные принципы и алгоритмы будущего ПО. Дополнительной задачей является разработка методики выбора параметров микроконтроллера согласно заданным характеристикам регулятора.

Основными элементами, влияющими на помехоустойчивость создаваемого устройства, являются кабельные линии интерфейса управления, телеметрии, протоколы, используемые для передачи данных, выбор компонентной базы и конструкция печатной платы. К данной работе относятся только протоколы цифровых интерфейсов. Их выбор значительно влияет на помехоустойчивость системы [8]. Однако при разработке регулятора ESC мы ограничены типовым перечнем протоколов, поддерживаемым классическими полетными контроллерами. Разработка дополнительных протоколов управления и телеметрии возможна только в совокупности со специализированным полетным контроллером.

Методика программного управления регулятором скорости вращения легкого БВС может предполагать два пути развития: полная программная реализация алгоритмов управления и управление с использованием специализированных контроллеров высокой степени интеграции. Первый вариант включает аппаратную часть, где микроконтроллер или программируемая логическая интегральная схема [9] непосредственно управляет драйвером полетных транзисторов коммутации фаз. Второй вариант использует связь из микроконтроллера общего

назначения и специализированного контроллера управления бесщеточным мотором^{1, 2}.

Использование специализированных контроллеров бесщеточных двигателей позволяет значительно упростить разработку ПО для регулятора, т.к. все алгоритмы реализованы в данном изделии. Также упрощается схемотехническое решение. Однако к недостаткам этого подхода относятся повышенная стоимость, увеличенный размер регулятора и отсутствие необходимых российских контроллеров управления бесщеточными электродвигателями.

По результатам анализа сформируем список требований, которым должна отвечать система управления:

- управление трехфазным бесщеточным мотором без датчиков (на основании измерения обратной ЭДС);
- полностью программный режим управления без использования специализированных промежуточных контроллеров;
- поддерживать ШИМ-сигнал управления;
- поддерживать цифровые протоколы управления: Dshot³, Proshot⁴, Multishot⁵;
- поддерживать цифровые протоколы телеметрии: KISS⁶, Dshot;
- поддерживать аналоговый выход индикации суммарного тока;
- возможность реализации на российской элементной базе;
- возможность реализации устройств управления для одного или четырех электродвигателей.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОМ БЕСЩЕТОЧНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ БВС

Решаемая задача включает три этапа: разработка алгоритмов и методов управления вращением электродвигателя, разработка алгоритмов и методов

обработки команд управления и разработка алгоритмов и методов формирования данных телеметрии. Второй и третий пункт вариативны. Их реализация зависит от конкретных протоколов, описание которых представлено в открытом доступе⁷. Поэтому основное внимание будет уделено первому этапу.

Общие принципы и модели программного управления электродвигателями БВС посредством электронных регуляторов скорости известны [10]. Однако поставленная задача является более узкой и специфической. Для ее решения необходимо рассмотреть принципы управления используемыми электродвигателями.

В легких и средних БВС с электрической ВМГ наибольшее распространение получили бесщеточные электродвигатели с сосредоточенными обмотками и ротором с постоянными магнитами. Их доля превышает 90% для ЛА весом до 5 кг по причине низкой стоимости и простоты в использовании. Такие двигатели в русскоязычных источниках часто именуются вентильными двигателями, в англоязычной литературе обычно используется термин BLDC-мотор (brushless direct current) [11].

BLDC-электродвигатели БВС обычно питаются трапецеидальным напряжением, что определяет некоторые недостатки: пульсации крутящего момента, генерация импульсных помех, повышенная шумность, небольшое снижение коэффициента полезного действия (КПД). Они могут быть частично устранены путем использования других методов управления (например, при использовании синусоидального напряжения). Однако применение данного подхода не оправдано по причине значительного повышения сложности и стоимости БВС. Пульсации крутящего момента и некоторое снижение КПД не критичны для ВМГ легкого БВС. Шум винтов значительно превосходит шум электродвигателей. Импульсные помехи подавляются аппаратной фильтрацией и специализированными программными методами.

Структурная схема аппаратно-программной системы управления BLDC-электродвигателем БВС с учетом рассмотренных данных представлена на рис. 1.

Микроконтроллер (micro controller unit, MCU) формирует управляющий сигнал драйверам (driver, DRV) полевых транзисторов коммутации обмоток электродвигателя. Формирование сигналов управления осуществляется программно на основании команд полетного контроллера и данных обратной связи. Обратная связь состоит из фильтра низких частот и компаратора. Фильтр нижних частот обеспечивает

¹ A4960: Sensorless BLDC Motor Driver. <https://www.allegromicro.com/en/products/motor-drivers/bldc-drivers/a4960>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

² MOTIX™ BLDC Motor Control Ics. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/motor-control-ics/bldc-motor-control-ics/>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

³ DSHOT – the missing Handbook. <https://brushlesswhoop.com/dshot-and-bidirectional-dshot/>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

⁴ Proshot – A new ESC protocol. <https://oscarliang.com/proshot-esc-protocol/>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

⁵ What is Oneshot and Multishot in ESC. <https://robu.in/what-is-oneshot-and-multishot-in-esc-difference-between-oneshot-and-multishot-esc-esc-calibration-protocol/>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

⁶ KISS ESC 32-bit series onewire telemetry protocol. <https://www.rcgroups.com/forums/showatt.php?attachementid=8524039&d=1450424877>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

⁷ Abdelrahman H. *Software Integration of Electronic Speed Controller (ESC) for an Unmanned Aerial Robot*: Bachelor Thesis. University of Twente. 2021. 23 p. <https://essay.utwente.nl/87630/>. Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

фильтрацию импульсных помех при переключении шагов электродвигателя и устранение составляющей ШИМ-сигнала. Компаратор используется для определения порога обратной ЭДС, при котором запускается подпрограмма перехода на следующий шаг.

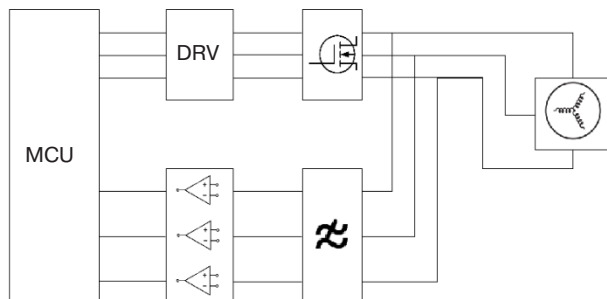


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программной системы управления регулятором

На рис. 2 показан упрощенный вид сигналов на фазах электродвигателя при использовании выбранной методики управления. Рисунок соответствует BLDC-мотору с одной парой полюсов и отображает один оборот. Сплошной линией показано идеальное изменение напряжения на каждой из фаз в течение одного оборота. Например, на фазу А при значении угла до 120° подается напряжение положительной полярности, от 120° до 180° фаза А отключена, от 180° до 300° она питается напряжением отрицательной полярности.

Штриховая линия показывает обратную ЭДС, форма которой близка к трапеции. При подаче на обмотку питающего напряжения значение обратной ЭДС равняется ему. При отключении обмотки оно формируется в результате генерации. Конструктивные особенности электродвигателя требуют выполнять переход на следующий шаг в момент, когда обратная ЭДС пересекает нулевую отметку [12].

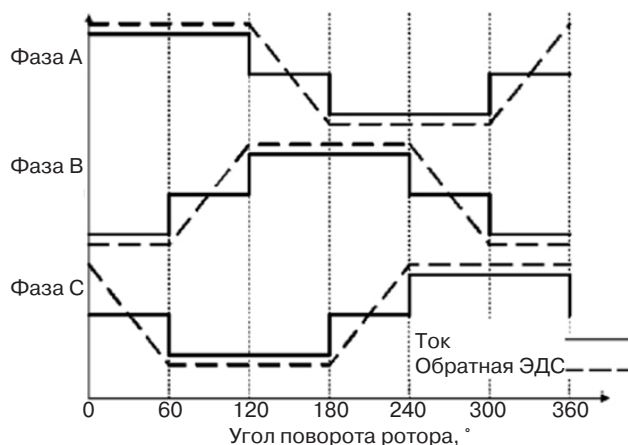


Рис. 2. Упрощенный вид сигналов на фазах электродвигателя при использовании выбранной методики управления

Таким образом, управление на основе обратной ЭДС позволяет получить синхронную работу машины, но не определяет скорость вращения. Число оборотов двигателя в минуту определяется приложенным напряжением и рассчитывается по формуле:

$$N = UK_V k_{rm}, \quad (1)$$

где U – напряжение на обмотках, В; K_V – коэффициент оборотов, B^{-1} (показывает, на каких оборотах мотор будет генерировать обратную ЭДС 1В); k_{rm} – коэффициент, учитывающий особенности фактической электромашин (rm – real machine).

При этом частота вращения электродвигателя может быть выражена через частоту коммутаций и параметры электромашин:

$$N = \frac{n_{zc}}{6n_p}, \quad (2)$$

где n_{zc} – число пересечений нулевой отметки обратной ЭДС; n_p – количество пар полюсов электродвигателя.

Однако переход на следующий шаг определяется обратной ЭДС, поэтому число оборотов первоначально зависит от напряжения и конструкции двигателя. Конструкция, соответственно, определяет коэффициент оборотов K_V .

Значение результирующего напряжения на обмотках обычно изменяется посредством ШИМ-регулирующего. В создаваемой разработке планируется аналогичный способ управления скоростью вращения.

На рис. 3 показана осциллограмма BLDC-мотора БВС в процессе работы. Сигналы по фазам близки к теоретическим данным, приведенным на рис. 2. В момент активного состояния фаз на рисунке можно наблюдать сигнал ШИМ.

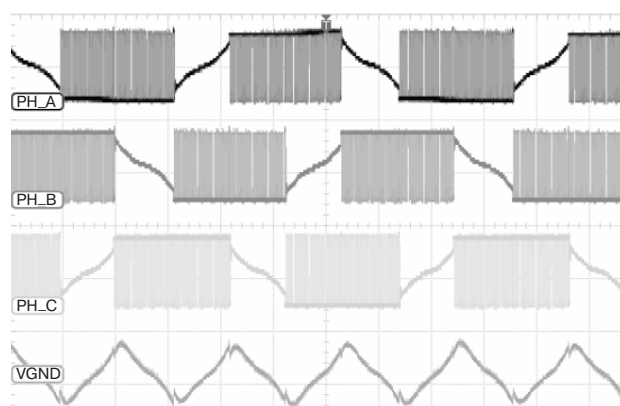


Рис. 3. Осциллограммы работающего BLDC-электродвигателя ВМГ БВС. VGND – Virtual Ground, напряжение на виртуальной земле

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

На основании теоретических изысканий формулируем методику и алгоритмы управления. В качестве средства программного управления выбран микроконтроллер. Современные микроконтроллеры достаточной мощности обычно используют архитектуру с программной абстракцией аппаратного уровня [13, 14].

Данный подход формирует структуру программного средства, в которой разделяются поддержка аппаратных средств микроконтроллера и основной код, определяющий функциональность.

На рис. 4 показан алгоритм стартового модуля предложенной системы управления. После запуска программы выполняются функции инициализации драйверов устройств: портов ввода-вывода, таймеров, аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и других. Далее начинается выполнение основного блока. В нем располагается бесконечный цикл микроконтроллера. В нормальном режиме выход из данного блока невозможен. Поэтому обработчик ошибок в конце блок-схемы может выполняться только при аварийном завершении основного блока. Функции инициализации драйверов и основной блок также имеют встроенные обработчики ошибок. Их функциональность определяется типом ошибки и местом ее возникновения.

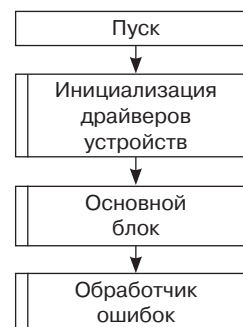


Рис. 4. Алгоритм стартового модуля

На рис. 5 показана блок-схема алгоритма основного модуля. Он будет реализован в виде отдельного файла. Выбранная архитектура повышает безопасность и подчеркивает абстракцию аппаратных средств от программной реализации.

Работа основного модуля начинается с инициализации и калибровки устройств. Здесь выполняется калибровка АЦП с его последующим запуском, запуск таймеров и DMA-контроллеров (direct memory access) в заданном режиме, конфигурирование портов общего назначения и прерываний, а также настройка и запуск других устройств. Блок звуковой и световой сигнализации используется для оповещения пользователя об успешном начале работы устройства. Далее запускается

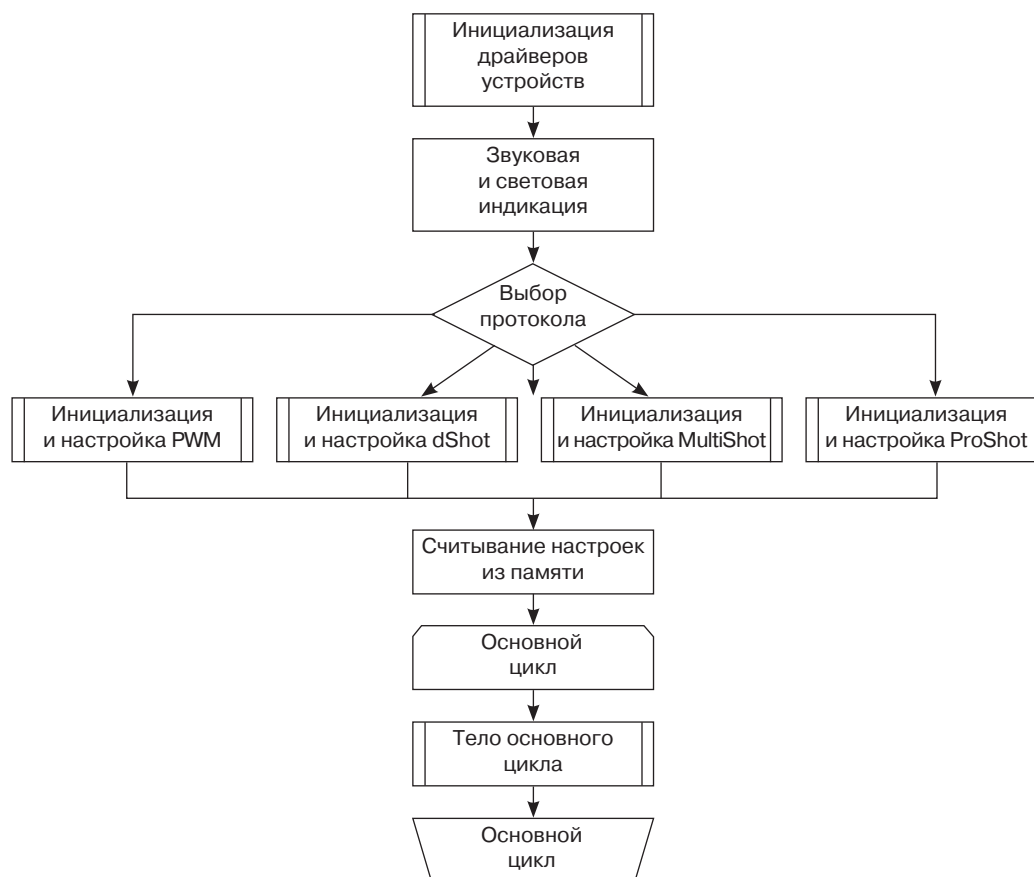


Рис. 5. Алгоритм основного модуля

алгоритм определения управляющего протокола. Поддерживаемые стандарты указаны в разделе «Постановка задачи».

Перед запуском основного цикла считываются настройки. Во флеш-памяти сохраняются приоритетный протокол управления и направление вращения, а также параметры нормализации команд управления (при необходимости).

Основной цикл является бесконечным циклом микроконтроллера. В нем выполняется программный код, показанный на рис. 6. Однако данный функционал не относится к основным задачам управления электродвигателем, т.к. они вызываются не периодически во времени, а согласно аппаратным прерываниям устройства.



Рис. 6. Алгоритм основного цикла программы

В основном цикле выполняется непрерывный расчет текущей частоты вращения и отслеживание команды реверса. При ее поступлении выполняются индикация, запись состояния в память, остановка двигателя и установка флага реверса для функции коммутации.

Также в основном цикле выполняется считывание заданной скорости вращения посредством обработки данных одного из выбранных протоколов управления. При отличии текущей и заданной скорости выполняется настройка ШИМ-управления напряжением фаз с целью корректировки частоты вращения.

Текущая скорость вращения определяется посредством измерения частоты срабатывания прерываний, соответствующих пересечению нулевого значения обратной ЭДС. Функции обработки данных прерываний вызывают программный блок коммутирования обмоток.

Коммутация выполняется согласно последовательности, указанной в таблице. В ней отображена последовательность процессов, показанных на рис. 2.

Таблица. Порядок коммутации фаз А, В, С

Номер шага	0	1	2	3	4	5
Высокий уровень	А	В	В	С	С	А
Фаза отключена	В	А	С	В	А	С
Низкий уровень	С	С	А	А	В	В

Блок-схема алгоритма коммутации показана на рис. 7. Необходимо отметить, что фаза, для которой выполняется та или иная операция, представленная в алгоритме, на каждом шаге коммутации разная. Порядок чередования фаз указан в таблице и на рис. 2.

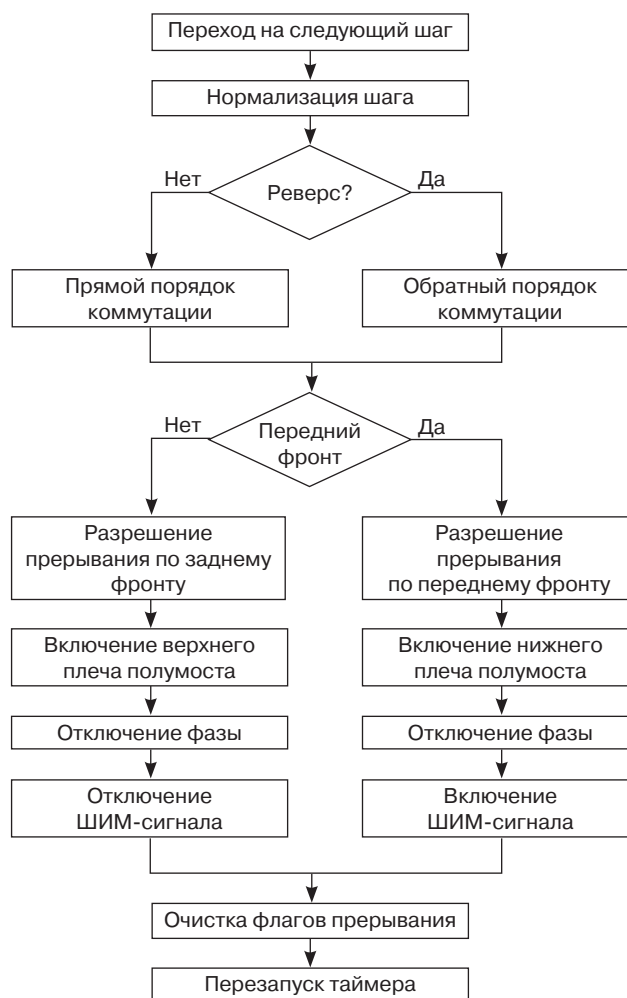


Рис. 7. Алгоритм коммутации обмоток (фаз) электродвигателя

Процесс коммутации циклический. Он начинается с перехода на следующий шаг. Далее выполняется нормализация шага (приведение номера шага к значению от 0 до 5). В зависимости от состояния флага реверса выполняется коммутация в прямой или обратной последовательности.

Функция управления коммутацией содержит две ветви, соответствующие прерываниям по переднему и заднему фронтам. При срабатывании прерывания по переднему фронту устанавливается разрешение соответствующего прерывания, включение нижнего ключа полумоста управления фазой, отключение соответствующей фазы, включение контроллера DMA, генерирующего ШИМ-сигнал управления напряжением фазы двигателя. При прерывании по заднему фронту последовательность операций обратна.

По завершению любой из веток оператора ветвления выполняется очистка флагов прерывания. Далее перезапускается таймер, отвечающий за старт двигателя.

Фактическая разработка имеет значительное количество дополнительных программных блоков, например, работа с телеметрией, обработка ошибок и т.д. Однако объем текущей работы не позволяет их представить.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРИМЕНЯЕМЫМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРАМ

Для создания предложенной системы управления необходимо выбрать микроконтроллер. Разработка является инвариантной и поэтому нуждается в общих критериях выбора элементной базы.

Используемый микроконтроллер должен обладать необходимым количеством устройств и портов, а также соответствовать требованиям производительности. Далее представим набор выражений, описывающих требования к портам и устройствам.

Количество каналов таймеров n_{tch} определяется следующей формулой:

$$n_{tch} = 4n_{mot}, \quad (3)$$

где n_{mot} – количество двигателей, управляемых регулятором.

На каждый из двигателей необходимо иметь 3 выхода ШИМ-сигнала для управления напряжением на обмотке. В современных микроконтроллерах данный функционал относится к таймерам. Дополнительный канал таймера используется для интерпретации протоколов управления.

Количество портов общего назначения n_{Gpio} определяется выражением:

$$n_{Gpio} = 2 + 3n_{mot} + n_{resGpio}, \quad (4)$$

где $n_{resGpio}$ – число резервных портов общего назначения, индекс Gpio означает General purpose input output.

Два порта общего назначения используются для управления индикатором и задания реверса. На каждый двигатель необходимо иметь 3 порта общего назначения для отключения фаз: по одному на каждую фазу. Также предполагается заложить несколько портов для потенциального расширения функциональности устройства.

Количество линий прерываний n_{int} рассчитывается из расчета по одному прерыванию на каждую фазу каждого двигателя по следующей формуле:

$$n_{int} = 3n_{mot}. \quad (5)$$

Также необходимо учесть не менее двух линий для программирования микроконтроллера, двух линий питания, аналоговых входов для измерения тока и напряжения батареи, выхода АЦП для вывода аналоговой телеметрии. Исходя из этого, рассчитаем общее количество выводов микроконтроллера n_{pin} :

$$n_{pin} = 9 + n_{tch} + n_{Gpio} + n_{int} + n_{res}, \quad (6)$$

где n_{res} – число дополнительных резервных выводов микроконтроллера.

Данное выражение можно представить через количество двигателей:

$$n_{pin} = 9 + 10n_{mot} + n_{resCom}, \quad (7)$$

при этом в качестве резервного слагаемого учитывается общий резерв n_{resCom} , включая резерв портов общего назначения.

Для выбора, удовлетворяющего условиям микроконтроллера, необходимо корректно определить параметры быстродействия вычислительного ядра и периферийных устройств.

Минимальные требования к частоте ШИМ для таймеров определяются следующей формулой:

$$f_{pwm} = 3Nn_p k_{pwm}, \quad (8)$$

где k_{pwm} – коэффициент, определяющий частотные параметры ШИМ.

Постоянный коэффициент 3 соответствует трем положительным импульсам управления на каждый оборот при одной паре полюсов постоянных магнитов, k_{pwm} определяет количество импульсов ШИМ на один импульс управления. Рекомендуемое значение $k_{pwm} \geq 10$.

Также можно выразить величину f_{pwm} через параметры применяемых электродвигателей ЛА:

$$f_{\text{pwm}} = 3UK_{\text{V}}k_{\text{rm}}n_{\text{p}}k_{\text{pwm}}. \quad (9)$$

Для линий прерываний предъявляются требования к минимальной частоте реагирования на события:

$$f_{\text{int}} = 2Nn_{\text{p}}. \quad (10)$$

Постоянный коэффициент 2 объясняется двумя переходами через нулевую отметку обратной ЭДС за цикл при одной паре магнитных полюсов электродвигателя. Аналогично выражению (9) представим выражение (10) через параметры электродвигателей:

$$f_{\text{int}} = 2UK_{\text{V}}k_{\text{rm}}n_{\text{p}}. \quad (11)$$

Определим требования к быстродействию микроконтроллера. Для этого необходимо суммировать вычислительные мощности, требуемые для отдельных модулей.

Для программного кода, выполняемого в теле бесконечного цикла микроконтроллера, требуемая вычислительная производительность P_{mc} определяется формулой:

$$P_{\text{mc}} = f_{\text{mc}}n_{\text{mcInst}}, \quad (12)$$

где f_{mc} – частота повторения бесконечного цикла, n_{mcInst} – среднее число инструкций за один шаг цикла.

Основной объем вычислений выполняется в обработчиках прерываний. Выражения (13) и (14) позволяют рассчитать для них необходимую вычислительную мощность:

$$P_{\text{int}} = 6n_{\text{mot}}n_{\text{p}}Nn_{\text{intInst}}, \quad (13)$$

$$P_{\text{int}} = 6n_{\text{mot}}n_{\text{p}}UK_{\text{V}}k_{\text{rm}}n_{\text{intInst}}, \quad (14)$$

где n_{intInst} – число инструкций для обработки тела прерывания (цикла коммутации).

Постоянный коэффициент 6 объясняется двумя срабатываниями прерывания для каждой из трех фаз за один цикл для двигателя с одной парой полюсов.

Суммарная вычислительная мощность для применяемого микроконтроллера P_{Σ} определяется формулой:

$$P_{\Sigma} = f_{\text{mc}}n_{\text{mcInst}} + 6n_{\text{mot}}n_{\text{p}}UK_{\text{V}}k_{\text{rm}}n_{\text{intInst}} + P_{\text{add}} + P_{\text{res}}, \quad (15)$$

где P_{add} – вычислительная мощность дополнительных модулей, P_{res} – резерв вычислительной мощности.

Резерв вычислительной мощности должен быть не менее 30% от суммарного значения. Для регуляторов при малом количестве электродвигателей рекомендуется увеличение данного значения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно предложенной методике были выбраны микроконтроллеры для построения регуляторов для одного и четырех электродвигателей. Для первого из них были определены следующие минимальные требования: не менее 22 выводов, включая 3 линии ШИМ и 3 линии прерываний. Для микроконтроллера регулятора для четырех двигателей соответствующие параметры составили: 55 выводов, 12 линий ШИМ, 12 линий прерываний.

Разработанный прототип программного продукта, базирующийся на рассмотренных алгоритмах, требует расчетную вычислительную производительность не более 20 DMIPS⁸ для регулятора одного двигателя и 75 DMIPS для четырехмоторного регулятора. Следовательно, рекомендуется использовать микроконтроллеры с производительностью не менее 30 и 100 DMIPS соответственно.

При выборе микроконтроллера также необходимо учитывать его доступность, сложность ведения разработки и электрические параметры, которые не рассматриваются в данной работе. При комплексном совмещении требований для построения первого прототипа регулятора одного двигателя был использован микроконтроллер STM32F103C8T6 производства STMicroelectronics, Швейцария.

Максимальная производительность данного изделия составляет 90 DMIPS, что в несколько раз превышает потребности вычислительной мощности. Требования к периферийным устройствам и их количеству аналогично покрываются принятым устройством. При условии его низкой стоимости и широкой доступности данный выбор можно считать оптимальным. Однако STM32F103C8T6 относится к санкционным продуктам недружественных стран. Поэтому мы рассмотрели альтернативные решения.

Для одномоторного регулятора был выбран микроконтроллер 1921BK035⁹ производства АО «НИИЭТ»¹⁰. Устройство выполнено на 32-раз-

⁸ Dhrystone MIPS – стандарт для сравнения производительности микроконтроллеров. [Dhrystone MIPS – standard for comparing microcontroller performance.]

⁹ 1921BK035: микроконтроллер с уменьшенными габаритными размерами с функциями по управлению электроприводом. <https://niiet.ru/product/1921%D0%B2%D0%BA035>. Дата обращения 27.10.2023. [1921BK035: microcontroller with reduced overall dimensions with functions for electric drive control (in Russ.). <https://niiet.ru/product/1921%D0%B2%D0%BA035>. Accessed October 27, 2023.]

¹⁰ <https://niiet.ru/> (in Russ.). Дата обращения 27.10.2023. / Accessed October 27, 2023.

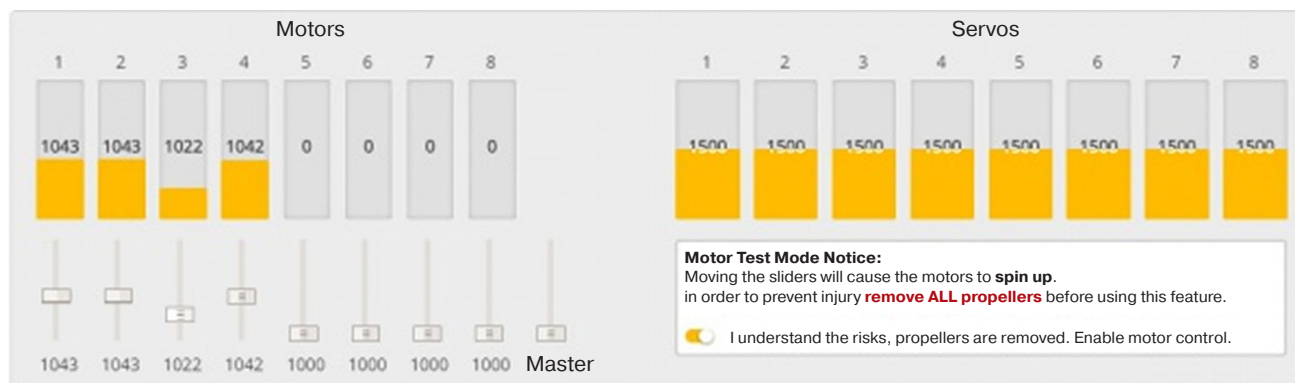


Рис. 8. Управление моторами в BetaFlight

рядном RISC-ядре (reduced instruction set computer), имеет производительность до 100 DMIPS и обладает всеми необходимыми устройствами с требуемыми параметрами. Данный микроконтроллер теоретически позволяет создать регулятор для 2 двигателей.

Регулятор скорости вращения для четырех двигателей предлагается построить на микроконтроллере K1921BK02T того же самого производителя. Устройство имеет параметры, значительно превышающие необходимые (более 200 DMIPS, 144 вывода суммарно).

Собранный на STM32F103C8T6 прототип регулятора был подвергнут испытаниям. Для управления регулятором использовались цифровые протоколы (Proshot, Dshot) и работа с ШИМ-сигналом. Управление выполнялось посредством полетного контроллера *SpeedyBee F4 V3*¹¹. На нем установлено ПО *BetaFlight*¹². Задание скорости вращения выполнялась с помощью встроенного конфигуратора (рис. 8). Панель Motors (моторы) предназначена для управления вращением моторов. Панель Servos (сервоприводы) предназначена для управления сервоприводами (не используются в данной работе). Переключатель с информационной табличкой в правой нижней части рисунка разрешает включение моторов. В сообщении предлагается подтвердить, что воздушные винты демонтированы и согласиться взять на себя риски при включении моторов.

Оценка работоспособности созданного ESC регулятора выполнялась посредством серии тестов. В качестве нагрузки использовался BLDC-мотор T-Motor Velox V2 V2207 1750K_v (Feiyang Technology, Китай) с установленным трехлопастным воздушным винтом (Gemfan, Китай) диаметром 5 дюймов и шагом 4 дюйма. Питание осуществлялось от батареи 4S напряжением 16.8 В (HRB, Китай).

Измерение скорости вращения выполнялось лазерным тахометром МЕГЕОН™ 18005 (МЕГЕОН, Россия). Сравнение измеренных результатов с заданными значениями показало разницу менее 5%.

При работе двигателя в циклах по 10 мин нагрев его корпуса не превысил 70 °С, а температура полупроводниковых компонентов регулятора ESC была менее 80 °С. Отсутствовали нехарактерные для испытываемого объекта звуки и прочие проявления.

Полученные осциллограммы сигналов фаз созданного прототипа регулятора показаны на рис. 9. Они свидетельствуют о корректной работе изделия. Однако отмечены незначительные задержки коммутации обмоток. В дальнейшем их планируется устранить путем внесения изменений в реализацию алгоритма процесса коммутации.

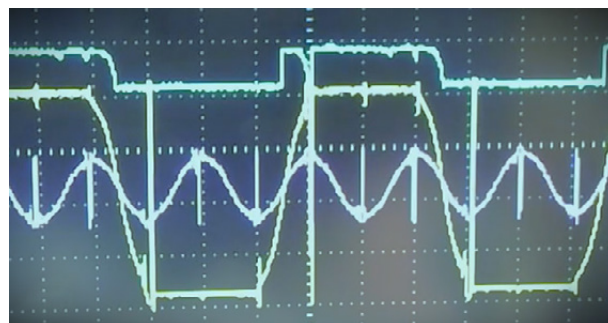


Рис. 9. Осциллограммы, полученные в процессе испытаний

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для разработки собственного ПО для регуляторов BLDC-моторов БВС предложены инвариантные методики и алгоритмы. Они базируются на теоретических основах программного управления данным типом электродвигателей.

Разработана методика определения необходимых параметров микроконтроллера для построения регулятора с требуемыми характеристиками. Она позволяет избежать ошибок и оптимизировать выбор микроконтроллера.

¹¹ SpeedyBee. <https://www.speedybee.com/speedybee-f405-v3-bls-50a-30x30-fc-esc-stack/>. Дата обращения 13.10.2023. / Accessed October 13, 2023.

¹² Betaflight. <https://www.betaflight.com>. Дата обращения 13.10.2023. / Accessed October 13, 2023.

Представленные результаты были протестированы. Методика и алгоритмы легли в основу разработки ПО для прототипа регулятора вращения для одного двигателя ВМГ БВС. По результатам испытаний сделано положительное заключение о работоспособности созданного решения и решено продолжить его разработку. Основное направление – улучшение ПО, построенного на базе рассмотренных в работе алгоритмов.

В процессе испытаний подтверждена корректность методики выбора микроконтроллера по заданным характеристикам. Расчетные характеристики периферийных устройств полностью соответствуют рабочим. Расчетные значения вычислительной мощности отличаются от рабочих на 10–15% в большую сторону. На основании полученных результатов можно сделать положительное заключение о представленной методике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment (project No. FZGM-2023-0011).

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уразбахтин Р.Р. Двигатели для беспилотных летательных аппаратов. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;2(56):142–144. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.56.100>
2. Янтураев М.Ю., Меднов А.А. Электродвигатели летательных аппаратов. В сб.: *Актуальные вопросы энергетики в АПК: материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет; 2021. С. 106–113.
3. Yuzawa N., Sakai K. A Permanent Magnet Motor Capable of Pole Changing for Variable Speed Drive. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2013. P. 1127–1132. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754392>
4. Никитин А.О., Петрова А.Р., Петров Р.В. Магнитоэлектрическая система управления оборотами бесколлекторного электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов. *Вестник Новгородского государственного университета*. 2017;7(105):26–31.
5. Пенкин В.Т., Сухов Д.В., Шевцов Д.А., Шишов Д.М. Бездатчиковый регулятор бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами на роторе. *Практическая силовая электроника*. 2014;3(55):46–51.
6. Wen J.-S., Wang C.-H., Chang Y.-D., Teng C.-C. Intelligent Control of High-Speed Sensorless Brushless DC Motor for Intelligent Automobiles. In: *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE/SMC)*. 2008. P. 3394–3398. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811822>
7. Шгаев Д.В. Анализ технологии управления беспилотными летательными аппаратами. *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. 2019;11(2):113–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologii-upravleniya-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami>
8. Башкиров А.В., Остроумов И.В., Свиридова И.В. Основы помехоустойчивого кодирования, основные преимущества и недостатки алгоритмов декодирования. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012;8(2):20–22.
9. Ильюшин С.А., Шаронов А.А., Киселев В.В. Разработка блока управления электродвигателем типа BLDC на базе ПЛИС. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2015;13(9):51–55.
10. Слепцов В.В., Афонин В.Л., Аблаева А.Е., Динь Б.Ф. Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Russian Technological Journal*. 2021;9(6):26–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>
11. Калачёв Ю.Н. *SimInTech: моделирование в электроприводе*. М.: ДМК Пресс; 2019. 98 с. ISBN 978-5-97060-766-4
12. Janpan I., Chaisricharoen R., Boonyanant P. Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode. *Procedia Engineering*. 2012;32:279–285. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1268>
13. Yiu J. *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. London: Newnes; 2013. 864 p.
14. Pakdel M. *Advanced Programming with STM32 Microcontrollers*. Limbricht: Elektor; 2020. 216 p.

REFERENCES

1. Urazbakhtin R.R. Engines for unmanned aerial vehicles. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = Int. Res. J.* 2017;2(56):142–144 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.56.100>

2. Yanturaev M.Yu., Mednov A.A. Electric motors of aircraft. In: *Elektrodivigateli letatel'nykh apparatov. Aktual'nye voprosy energetiki v APK: materialy vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii (Current Issues of Energy in the Agro-Industrial Complex: Materials of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference)*. Blagoveshchensk: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi agrarnyi universitet; 2021. P. 106–113 (in Russ.).
3. Yuzawa N., Sakai K. A Permanent Magnet Motor Capable of Pole Changing for Variable Speed Drive. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2013. P. 1127–1132. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754392>
4. Nikitin A.O., Petrova A.R., Petrov R.V. Magnetoelectric control system of the brushless motor revs for drones. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University*. 2017;7(105):26–31 (in Russ.).
5. Penkin V.T., Sukhov D.V., Shevtsov D.A., Shishov D.M. Sensorless controller of BLDC motors with permanent magnets. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika*. 2014;3(55):46–51 (in Russ.).
6. Wen J.-S., Wang C.-H., Chang Y.-D., Teng C.-C. Intelligent Control of High-Speed Sensorless Brushless DC Motor for Intelligent Automobiles. In: *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE/SMC)*. 2008. P. 3394–3398. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811822>
7. Shtaev D.V. Analysis of control technology of unmanned aerial vehicles. *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa = The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2019;2(11):113–119 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologii-upravleniya-bespilotnymi-letatel'nymi-apparatami>
8. Bashkurov A.V., Ostroumov I.V., Sviridova I.V. Fundamentals of Error-Correcting Coding, Key Advantages, and Disadvantages of Decoding Algorithms. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012;8(2):20–22 (in Russ.).
9. Il'ushin S.A., Sharonov A.A., Kiselev V.V. Development of the control unit of the BLDC motor on the base of the programmable logic device. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = J. Information-Measuring and Control Systems*. 2015;12(9):51–55 (in Russ.).
10. Sleptsov V.V., Afonin V.L., Ablaeva A.E., Dinh B. Development of an information measuring and control system for a quadcopter. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):26–36 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>
11. Kalachev Yu.N. *SimInTech: modelirovanie v elektroprivode (SimInTech: Modeling in Electric Drives)*. Moscow: DMK Press; 2019. 98 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-766-4
12. Janpan I., Chairsrichaen R., Boonyanant P. Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode. *Procedia Engineering*. 2012;32:279–285. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1268>
13. Yiu J. *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. London: Newnes; 2013. 864 p.
14. Pakdel M. *Advanced Programming with STM32 Microcontrollers*. Limbricht: Elektor; 2020. 216 p.

Об авторах

Паринов Максим Викторович, к.т.н., доцент, кафедра компьютерных интеллектуальных технологий проектирования ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (34006, Россия, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84). E-mail: parmax@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 6411-5587, <https://orcid.org/0000-0002-7427-5475>

Юров Алексей Николаевич, к.т.н., доцент, кафедра компьютерных интеллектуальных технологий проектирования ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (34006, Россия, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84). E-mail: yurovalex@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 5828-0075, <https://orcid.org/0009-0007-9320-7519>

Скитский Ярослав Витальевич, аспирант, кафедра конструирования и проектирования радиоаппаратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (34006, Россия, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84). E-mail: nauchrab@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5547-1940>

About the authors

Maksim V. Parinov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer-assisted Intelligent Design Technologies, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya ul., Voronezh, 394006 Russia). E-mail: parmax@mail.ru. RSCI SPIN-code 6411-5587, <https://orcid.org/0000-0002-7427-5475>

Aleksey N. Yurov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer-assisted Intelligent Design Technologies, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya ul., Voronezh, 394006 Russia). E-mail: yurovalex@mail.ru. RSCI SPIN-code 5828-0075, <https://orcid.org/0009-0007-9320-7519>

Yaroslav V. Skitskiy, Postgraduate Student, Department of Radio Apparatus Design and Engineering, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya ul., Voronezh, 394006 Russia). E-mail: nauchrab@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5547-1940>