

УДК 631.37

М.В. Паринов, А.В. Сергеев, Д.В. Васильченко

Схемотехнические решения помехоустойчивого регулятора оборотов бесщеточного электродвигателя беспилотного воздушного судна

Работа посвящена особенностям разработки схемотехнических решений помехоустойчивых регуляторов оборотов бесщеточных электродвигателей для беспилотных воздушных судов. В ней проанализированы особенности эксплуатации, на основании которых сформулированы технические требования для целого класса устройств. В процессе анализа состояния вопроса сделан вывод о высокой актуальности развития решения с полным программным управлением. Представлены основные принципы управления бесщеточным электродвигателем, рекомендуемые для построения регулятора. В качестве практического решения разработаны структурная и принципиальная схемы с описанием работы основных элементов. В заключении статьи рассмотрены практические результаты испытания данного регулятора. Даны их оценка на текущем этапе, пути улучшения и развития в ближайшей перспективе.

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

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-105-110

В настоящее время большинство беспилотных воздушных судов (БВС) используют электрическую силовую установку. Исключением являются крупные летательные аппараты. Однако и для них намечена тенденция перехода на электрическую тягу.

подавляющее большинство электрических БВС оснащаются бесколлекторными трехфазными электродвигателями. Это объясняется их высоким КПД, долговечностью, надежностью и размерами, что недостижимо для коллекторных электромашин [1]. Однако рассматриваемые электродвигатели имеют некоторые недостатки. К основным из них относятся относительно высокая стоимость и необходимость использования сложной электронной системы управления.

Для управления трехфазными бесколлекторными электродвигателями (BLDC-моторами) используются типовые регуляторы скорости вращения. На практике для их обозначения используется аббревиатура ESC (Electric Speed Controller). Обычно ESC приобретаются в виде готовых электронных модулей.

В настоящее время на рынке РФ присутствует широкая номенклатура регуляторов, охватывающая все основные задачи беспилотной авиации. Однако все массовые изделия являются зарубежными, что часто приводит к проблемам при закупках и противоречит политике технологического суверенитета. Также при использовании готовых зарубежных модулей существенно снижаются возможности по расширению функциональности и внесению изменений в конструкцию.

Постановка задачи и анализ методов ее решения

Для формирования требований к разработке необходимо ограничить область применения БВС легкого типа с максимальной потребляемой мощностью каждого двигателя 1 кВт при питании от 6-ячейковой литиевой аккумуляторной батареи под управ-

лением классического полетного контроллера (используется программное обеспечение на основе ArduPilot [2], INAV [3], BetaFlight [4], PX4 [5] и др.).

Разрабатываемое решение должно быть универсальным, позволяя создать широкое множество устройств, и отвечать следующим основным требованиям: совместимость с классическими полетными контроллерами; возможность создания версий с повышенной устойчивостью к электромагнитным помехам; наличие средств телеметрии, включая передачу значений суммарного потребляемого тока, напряжения на батарее, скорости вращения вала электродвигателя.

Известно несколько методик управления BLDC-моторами. В стандартном двигательном режиме могут использоваться системы управления с датчиками [6], а также без датчиков на основе вычисления обратной ЭДС [7, 8]. Для рассматриваемых задач подходит только второй вариант, так как двигатели БВС, соответствующие требованиям, не имеют датчиков положения вала.

Для реализации регулятора управления скоростью вращения BLDC-мотора без датчиков необходимо аппаратно-программное решение. Уровень программной автоматизации может существенно отличаться в зависимости от принятой методики реализации. Логика управления коммутацией силовыми ключами [9] может быть реализована аппаратно посредством специальных драйверов высокой степени интеграции или может быть выполнена программно, при этом аппаратная часть отвечает только за включение и выключение силовых ключей. Программное обеспечение обычно реализуется на микроконтроллере. Однако существуют альтернативные варианты. Например, в [10] представлен регулятор BLDC-мотора на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Реализуемое решение должно обладать низкой стоимостью и возможностью крупносерийного про-

изводства. Поэтому с учетом особенностей управления для реализации программной части выбран микроконтроллер. Независимо от принятой методики построения регулятора на микроконтроллере необходимо реализовать программное обеспечение для обработки входных данных со стороны полетного контроллера, обеспечить передачу телеметрии и организовать взаимодействие с драйверами силовых ключей.

Для передачи команд от полетного контроллера регулятору ESC может использоваться широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [11] или один из специализированных протоколов [12], большинство из которых являются цифровыми. Как показывают исследования [13], для создания помехозащищенных регуляторов скорости вращения первоочередной задачей является защита цепей передачи команд от электромагнитных помех, а также использование надежного протокола данных. Управление посредством ШИМ-сигнала не подходит для этих целей.

Аналоговая передача телеметрии подвержена помехам и не позволяет передать достаточное количество параметров для типовых полетных контроллеров, которые обычно имеют только аналоговый вход датчика суммарного тока. Проблема решается использованием цифровых протоколов. Например, KISS [14], который позволяет передавать до 8 параметров одновременно.

Таким образом, в создаваемом решении реализация цифровых протоколов управления и телеметрии необходима. Однако отказ от ШИМ- и аналоговых сигналов не рекомендован, чтобы обеспечить совместимость со старыми полетными контроллерами.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод о необходимости решения двух крупных задач в процессе реализации ESC-регулятора: разработка прототипа схмотехнического решения и разработка алгоритмов и программ для микроконтроллера. В рамках данной работы будет реализована первая из них.

В основу разработки положены изложенные выше требования, теоретические основы BLDC-моторов и накопленный опыт родственных проектов.

Разработка схмотехнического решения

Авторами данной работы предложено решение, имеющее следующие отличительные черты: поддержка помехозащищенных протоколов управления и телеметрии, обеспечение корректной работы двигателей на высоких оборотах (до 120 000 мин⁻¹), простота, компактность, низкая стоимость. Требуемые протоколы перечислены в предыдущем разделе. Представленные в источниках [15–17] не удовлетворяют данным требованиям, а также ряду других пунктов технического задания.

На рис. 1 показана структурная схема ESC-регулятора БВС. Ее отличительной особенностью является отсутствие специализированного контроллера.



Рис. 1. Структурная схема регулятора на классическом микроконтроллере

Функция низкоуровневого управления электродвигателем (коммутации обмоток) в данном решении возложена на соответствующее программное обеспечение микроконтроллера. Его объем занимает основную часть программы, а потребление вычислительных ресурсов – 70–80% от общего объема.

Для управления силовыми ключами дополнительно применяется модуль драйверов. Для программного определения момента коммутации используется детектор перехода через нулевое значение обратной ЭДС.

На рис. 2 представлены сигналы при трапецидальном управлении BLDC-мотором. Порядок ком-

мутации представлен в нижней части рисунка. Из него следует, что средний потребляемый ток от батареи делится на три фазы, каждая из которых коммутируется двумя плечами полумоста. Таким образом, интегральный ток каждого транзистора равен 1/6 от паспортного потребляемого, а пиковый – 1/2.

Землей, которая показана на рисунке, является средняя точка обмоток электродвигателя. На большинстве моделей она не выведена. Поэтому для обратной связи используется искусственная средняя точка, которая в иностранной литературе именуется виртуальной землей (virtual ground). Для ее реализации используются три резистора равного сопротивле-

ния, включенные звездой. Сигнал со средней точки данной схемы используется для эмуляции средней точки обмоток электродвигателя.

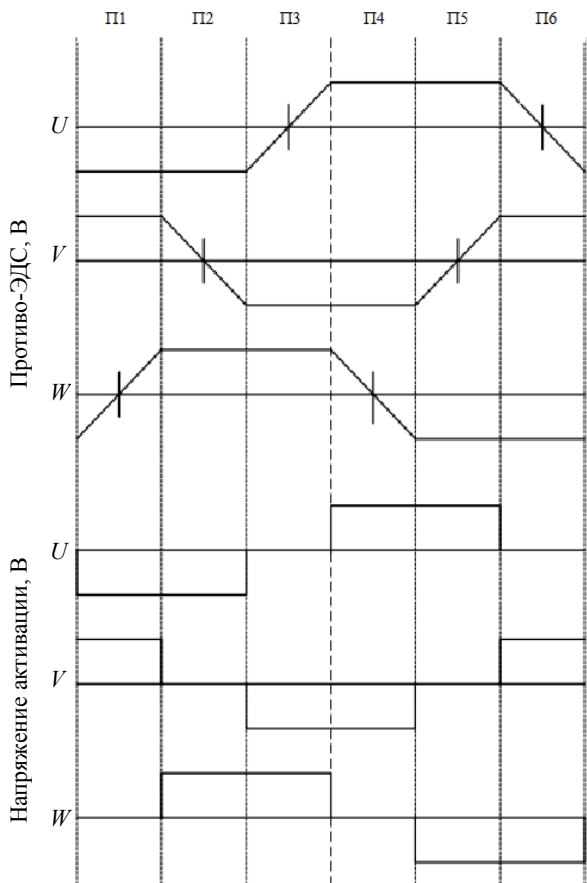


Рис. 2. Принцип управления

Для управления скоростью вращения реализуется изменение напряжения на фазах электродвигателя посредством ШИМ. Рекомендуемая кратность модуляции – не менее 5.

Крутизну фронтов напряжения на обмотках необходимо учитывать при расчете реальной мощности электродвигателя. При частотах коммутации более 50 кГц данный параметр оказывает существенное влияние на механические параметры устройства для большинства комбинаций двигатель – регулятор.

При выборе частоты ШИМ следует учитывать тепловую энергию включения / отключения и отвод мощности от кристалла с учетом температурного сопротивления всех элементов конструкции. Необходимо не только предотвратить температурное разрушение, но и обеспечить работу транзистора в температурном режиме, допускающем расчётные ток и напряжение.

На рис. 3 представлена принципиальная схема разработанного устройства. Для коммутации обмоток BLDC-мотора предлагается классическая трехфазная мостовая схема. Транзисторы VT1–VT6 – полевые с изолированным затвором. Максимальный ток исток-сток при нормальной работе возникает при максимальном напряжении на фазе; режим электродинамического торможения для БВС не предусмотрен.

D4 – микроконтроллер STM32F103C8T6. Помехоустойчивость управления устройством реализуется программно посредством реализации специализированных цифровых протоколов; данные передаются посредством линии MOT_IN. Также данная линия допускает управление посредством ШИМ-сигнала для совместимости с устаревшими полетными контроллерами. В этом случае для реверсирования вращения используется линия MOT_REV.

SWCLK и SWDIO – стандартный интерфейс для программирования микроконтроллера и отладки.

TEL_OUT – обеспечивает вывод помехоустойчивой цифровой телеметрии. В текущей версии она реализуется протоколом KISS [14]. Также для совместимости параметры работы передаются в виде аналоговых сигналов: CUR_OUT передают значение общего потребляемого тока. В нашем решении данный сигнал снимается с выхода цифроаналогового преобразователя (ЦАП) микроконтроллера. Это позволяет повысить помехоустойчивость посредством цифровой обработки сигналов, получаемых с измерительного усилителя.

Микроконтроллер получает данные о значении суммарного потребляемого тока через вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) CS, к которому подключен измерительный усилитель. Аналогично выполняется измерение напряжения батареи: линия VBAT+ подключена к делителю напряжения на резисторах R6, R7.

Для связи с каждым драйвером D5–D7 полевого транзистора используются 2 линии: выход ШИМ-сигнала заполнения импульсов включения фазы и цифровая линия команды блокировки двух ключей полумоста одновременно, которая используется для гарантированного предотвращения короткого замыкания и выхода из строя полевых транзисторов в случае рассинхронизации выполнения программных процедур. Драйверы полевых транзисторов используют бутстрепный конденсатор и диод.

При использовании управления BLDC-мотором без датчиков необходимо отслеживать обратную ЭДС по каждой фазе для реализации трапецеидального управления BLDC-мотором. Упрощенный вид сигналов управления показан на рис. 2. Точный момент коммутации задается обратной связью, указывающей позицию ротора. В текущей схеме реализуется метод определения нулевого значения обратной ЭДС, которая возникает на отключенной в текущий момент времени обмотке (оба транзистора полумоста закрыты).

Для этого используется узел на встроенном компараторе D8. На резисторах R12–R17 собраны три делителя напряжения для каждой из фаз. Сигналы с них передаются на неинвертирующие входы компараторов. Резисторы R9–R11 образуют виртуальную среднюю точку электродвигателя (виртуальную землю), которая подключается к инвертирующим входам компаратора. Выходы компаратора соединены с цифровыми входами микроконтроллера. По изменению их уровня определяется переход обратной ЭДС через нулевую точку.

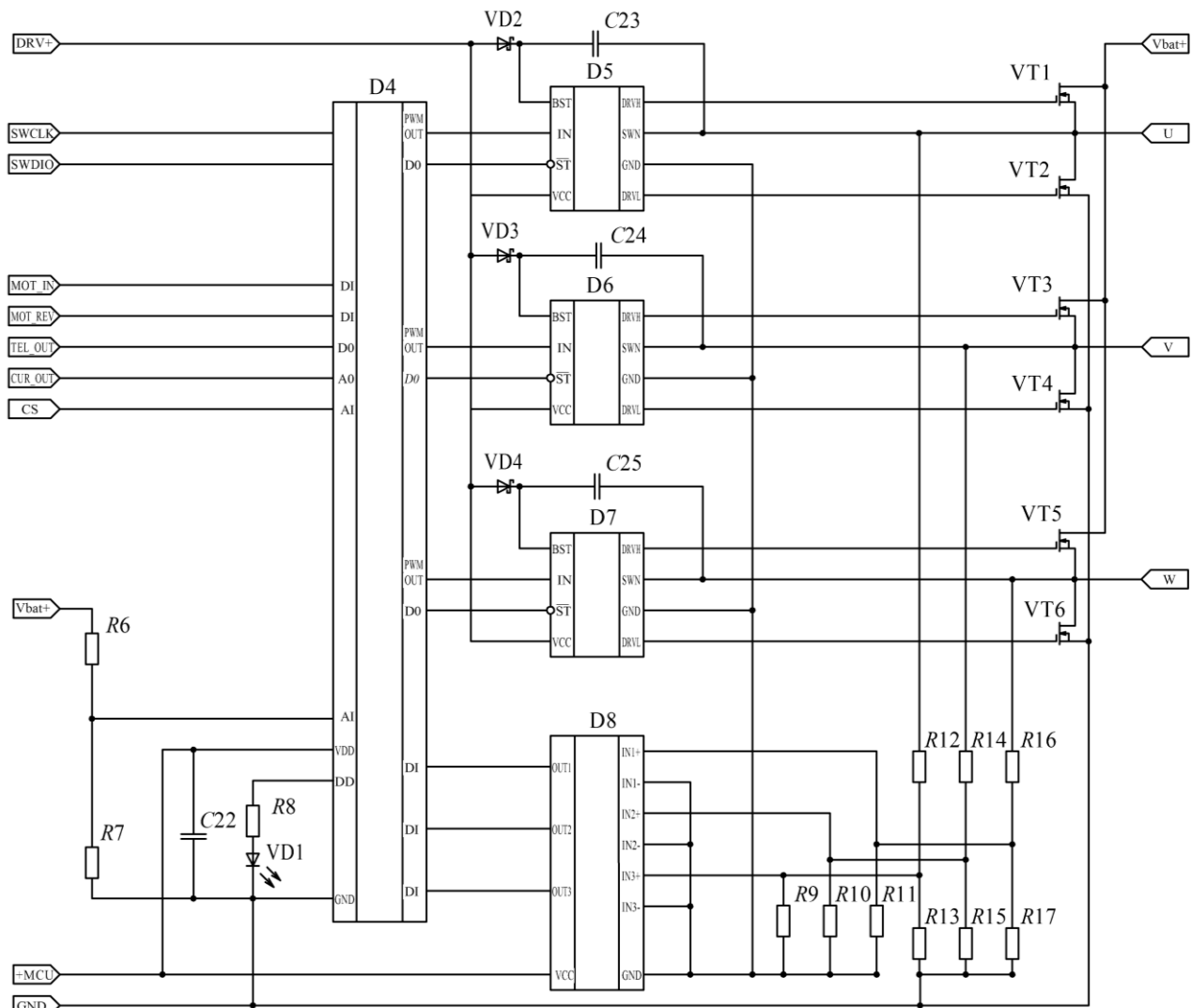


Рис. 3. Принципиальная схема регулятора с полным программным управлением

Экспериментальное макетирование

Регулятор, выполненный согласно рис. 3, был реализован в виде одноканального решения (для управления одним электродвигателем). В тестовом экземпляре использовались детали импортного производства. В качестве микроконтроллера применялся STM32F103C8T6, в качестве драйверов – ADP3120.

Для управления регулятором реализованы цифровые протоколы (Proshot, Dshot) и работа с ШИМ-сигналом. Управление выполнялось посредством полетного контроллера SpeedyBee F4 V3. На нем установлено программное обеспечение BetaFlight [4].

Целью эксперимента являлась проверка работоспособности изделия. Первая часть включает проверку возможности обеспечить вращение электродвигателя без его перегрева и нехарактерных вибраций. Вторая – исследование соответствия реальной скорости вращения заданному значению. Третья – порядок и своевременность коммутации обмоток.

Тестирование созданного ESC-регулятора выполнялось посредством серии тестов. В качестве нагрузки использовался BLDC-мотор T-Motor Velox

V2 V2207 1750kv с установленным трехлопастным воздушным винтом диаметром 5 дюймов и шагом 4 дюйма. Питание осуществлялось от батареи 4S напряжением 16,8 В.

Измерение скорости оборотов выполнялось лазерным тахометром МЕГЕОН 18005. 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 не характерные для испытуемого объекта вибрации, звуки.

Полученные осциллограммы с созданного регулятора показаны на рис. 4.

Сигнал, показанный в верхней части экрана, соответствует обратной ЭДС. Сигнал в нижней части экрана – напряжению на фазе электродвигателя. Сигнал в средней части – напряжению на средней точке двигателя. Сигнал в верхней части – выходу компаратора, соответствующему данной фазе. Осциллограмма показывает, что определение перехода через

нулевую отметку происходит своевременно: переключение высокого и низкого уровня выхода компаратора происходит строго между минимальным и максимальным уровнем сигнала на данной фазе. Форма сигналов и тайминги соответствуют выбранному трапецеидальному методу регулирования: измеренный сигнал напряжения на фазе приближен к теоретическому, показанному на рис. 2.

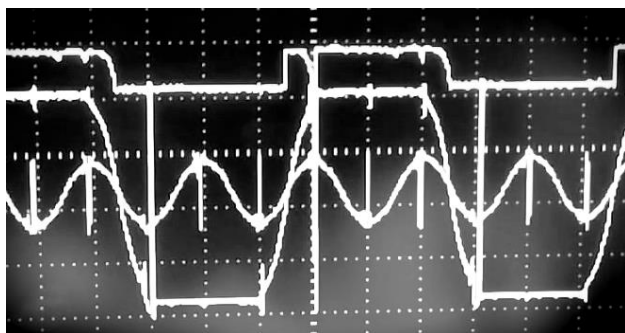


Рис. 4. Оциллограммы сигналов на входах микроконтроллера, фазах электродвигателя и земле компаратора относительно общей земли схемы

Это говорит о корректной работе изделия. Однако отмечены незначительные задержки коммутации обмоток.

Заключение

Было предложено схемотехническое решение ESC легких БВС, разработаны структурная и принципиальная схемы. Они отличаются от известных аналогов возможностью простого сопряжения с типовыми полетными контроллерами, наличием помехоустойчивых интерфейсов, возможностью работать в режимах, соответствующих легким БВС, включая скоростные аппараты мультироторного типа. Структурная схема является инвариантной и может быть использована для построения широкого модельного ряда устройств на отечественной и импортной элементной базе.

На основе решения с полным программным управлением создан прототип регулятора. По результатам его испытаний сделан вывод о качестве предложенного схемотехнического решения, что подтверждается работоспособностью созданного регулятора.

Литература

1. Уразбахтин Р.Р. Двигатели для беспилотных летательных аппаратов // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2017. – № 2. – С. 142–144.
2. Ardupilot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ardupilot.org> (дата обращения: 13.10.2023).
3. iNAV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/iNAVFlight/inav>, свободный (дата обращения: 13.10.2023).
4. Betaflight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.betaflight.com>, свободный (дата обращения: 13.10.2023).
5. PX4 Autopilot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.px4.io>, свободный (дата обращения: 13.10.2023).
6. Никитин А.О. Магнитоэлектрическая система управления оборотами бесколлекторного электродвигателя

для беспилотных летательных аппаратов / А.О. Никитин, А.Р. Петрова, Р.В. Петров // *Вестник Новгородского государственного университета*. – 2017. – № 7. – С. 26–31.

7. Бездатчиковый регулятор бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами на роторе / В.Т. Пенкин, Д.В. Сухов, Д.А. Шевцов, Д.М. Шишов // *Практическая силовая электроника*. – 2014. – № 3 (55). – С. 46–51.

8. Intelligent Control of High-Speed Sensorless Brushless DC Motor for Intelligent Automobiles. / Jung-Sheng Wen, Chi-Hsu Wang, Ying-De Chang, Ching-Cheng Teng // *IEEE/SMC*. – 2008. – P. 3394–3398.

9. 6-шаговая коммутация BLDC-моторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/745372/>, свободный (дата обращения: 13.10.2023).

10. Ильюшин С.А. Разработка блока управления электродвигателем типа BLDC на базе ПЛИС / С.А. Ильюшин, А.А. Шаронов, В.В. Киселев // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2015. – Т. 13, № 9. – С. 51–55.

11. Использование бесколлекторных двигателей в качестве исполнительных приводов с высокой точностью позиционирования / О.О. Соломин, С.В. Рослов, С.В. Козелетов, М.С. Храмынин // *Наука и военная безопасность*. – 2020. – № 1 (20). – С. 27–33.

12. Чипизубов А.М. Методы связи ESC-регуляторов оборотов современных потребительских дронов гражданского назначения / А.М. Чипизубов, В.В. Солецкий, Р.В. Шибек // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: матер. V Всерос. национальной науч. конф. молодых учёных*. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2022. – Т. 1, № 1. – С. 334–336.

13. Исследование влияния импульсных помех на работу бесколлекторного двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/stc_spb/articles/755814/ (дата обращения: 13.10.2023).

14. KISS ESC 32-bit series onewire telemetry protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rcgroups.com/forums/showatt.php?attachmentid=8524039&d=1450424877> (дата обращения: 13.10.2023).

15. VESC – Open Source ESC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vedder.se/2015/01/vesc-open-source-esc/>, свободный (дата обращения: 01.12.2023).

16. BlueESC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/bluerobotics/BlueESC>, свободный (дата обращения: 01.12.2023).

17. MY OPEN SOURCE ESC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://electronoobs.com/eng_arduino_tut91.php, свободный (дата обращения: 01.12.2023).

Паринов Максим Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных интеллектуальных технологий проектирования Воронежского государственного технического университета 20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 34006
Тел.: +7 (473-2) 43-77-29
Эл. почта: parmax@mail.ru

Сергеев Александр Викторович

Канд. физмат. наук, нач. управления науки и инновации, Воронежского государственного технического университета 20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 34006
Тел.: +7 (473-2) 43-77-29
Эл. почта: parmax@mail.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович

Аспирант каф. конструирования и проектирования радиоаппаратуры Воронежского государственного технического университета
20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 34006
Тел.: +7 (473-2) 43-77-29
Эл. почта: shadow951@bk.ru

Parinov M.V., Sergeev A.V., Vasilchenko D.V.

Circuit solutions for an interference-resistant electronic speed controller of a brushless electric motor for an unmanned aircraft

The article is devoted to the features of the circuit solutions development for noise-resistant electronic speed controllers of brushless electric motors for unmanned aircraft. It analyzes the operating features, that allowed to formulate the technical requirements for a whole class of devices. When analyzing the state-of-the-art, it was concluded that the development of a solution with full program control is highly relevant. The basic principles for controlling a brushless electric motor, recommended for constructing a regulator, are presented. As a practical solution, a structural and circuit diagram has been developed describing the operation of the main elements. In the conclusion, the practical results of testing this regulator are considered. The assessment at the current stage is provided, as well as the ways to improve and develop the regulator in the near future.

Keywords: electronic speed controller, BLDC motor, unmanned aircraft, interference-resistant solutions, software control, microcontroller.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-105-110

References

1. Urazbahtin R.R. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, [Engines for unmanned aerial vehicles]. 2017, no 2, pp. 142–144 (in Russ.).
2. Ardupilot. Available at: <https://www.ardupilot.org>, free (Accessed: October 13, 2023).
3. INAV. Available at: <https://github.com/iNavFlight/inav>, free. (Accessed: October 13, 2023).
4. Betaflight. Available at: <https://www.betaflight.com>, free (Accessed: October 13, 2023).
5. PX4 Autopilot. Available at: <https://www.px4.io>, free (Accessed: October 13, 2023).
6. Nikitin A.O., Petrova A.R., Petrov R.V. [Magnetolectric]. *Vestnik Novgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2017, no. 7, pp. 26–31 (in Russ.).
7. Penkin V.T., Suhov D.V., SHEVCOV D.A., SHISHOV D.M. [Sensorless controller of BLDC motor with permanent magnets]. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika*, 2014, no. 3 (55), pp. 46–51 (in Russ.).
8. Jung-Sheng Wen, Chi-Hsu Wang, Ying-De Chang, Ching-Cheng Teng. Intelligent Control of High-Speed Sensorless Brushless DC Motor for Intelligent Automobiles. *IEEE/SMC*, 2008, pp. 3394–3398.
9. 6-shagovaya kommutatsiya BLDC motorov. Available at: <https://habr.com/ru/articles/745372/>, free (Accessed: October 13, 2023).
10. Il'yushin, 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*, 2015, no. 9, T. 13, pp. 51–55 (in Russ.).

11. Solomin O.O., Roslov S.V., Kozeletov S.V., Hramihin M.S. [Use of brushless motors as actuators with high positioning accuracy]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*, 2020, no. 1(20), pp. 27–33 (in Russ.).

12. Chipizubov A.M., Soleckij V.V., Shibeko R.V. *Metody svyazi ESC-regulyatorov oborotov sovremennykh potrebitel'skikh dronov grazhdanskogo naznacheniya* [Methods of ESC RPM Regulators Communication in Modern Civil Consumer Drones]. *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: Materialy P'atoi Vse-rossijskoj nacional'noj nauchnoj konferencii molodykh uchyonnykh* [Youth and Science: Current Issues in Fundamental and Applied Research: Proceedings of the Fifth All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists]. *Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skij-na-Amure Gosudarstvennyj Universitet*, 2022, pp. 334–336 (in Russ.).

13. Issledovanie vliyaniya impul'snykh pomekh na rabotu beskollektornogo dvigatelya. Available at: https://habr.com/ru/companies/stc_spb/articles/755814/, free (Accessed: October 13, 2023).

14. KISS ESC 32-bit series onewire telemetry protocol. Available at: <https://www.rcgroups.com/forums/showatt.php?attachmentid=8524039&d=1450424877>, free (Accessed: October 13, 2023).

15. VESC – Open Source ESC. Available at: <https://vedder.se/2015/01/vesc-open-source-esc/>, free (Accessed: December 1, 2023).

16. BlueESC. Available at: <https://github.com/bluerobotics/BlueESC>, free (Accessed: December 1, 2023).

17. MY OPEN SOURCE ESC. Available at: https://electronoobs.com/eng_arduino_tut91.php, free (Accessed: December 1, 2023).

Maksim V. Parinov

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor
Department of Intelligent Computer Technologies
for Design Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006
Phone: +7(473-2) 43-77-29
Email: parmax@mail.ru

Aleksander V. Sergeev

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,
Head of the Research and Innovation Administration,
Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006
Phone: +7(473-2) 43-77-29
Email: asergeev@cchgeu.ru

Dmitriy V. Vasilchenko

Postgraduate student, Department of Design and Engineering
of Radio Equipment, Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006
Phone: +7(473-2) 43-77-29
Email: shadow951@bk.ru