

У ДК 621.313.13

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1112.html>

ПОДБОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЛАТЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Д.А. Маслов**maslovdanil.1@yandex.ru***МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*

В условиях активного развития робототехники и необходимости обеспечения технологического суверенитета особую актуальность приобретает разработка эффективных систем управления бесколлекторными двигателями, которые служат ключевыми компонентами современных робототехнических систем. В статье проведен анализ алгоритмов управления BLDC-двигателями, включая трапецеидальную и векторную коммутацию, с акцентом на их преимущества, недостатки и области применения. Рассмотрены математические основы преобразований Кларка и Парка, необходимых для реализации векторной коммутации, а также требования к вычислительным ресурсам микроконтроллеров. Особое внимание уделено проблеме импортозамещения: предложен обзор отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) для создания управляющих плат, включая микроконтроллеры (например, MIK32 Amur) и возможные аналоги зарубежных драйверов MOSFET-транзисторов. Выявлены ключевые проблемы, такие как отсутствие отечественных высокочастотных MOSFET-транзисторов и специализированных драйверов, что сдерживает развитие автономных робототехнических систем. Предложены практические решения для реализации алгоритмов управления на отечественных компонентах и подчеркнута необходимость развития отечественной ЭКБ для достижения технологической независимости. Результаты исследования могут быть полезны разработчикам робототехнических систем, инженерам-электронщикам и специалистам в области автоматизированного управления.

Ключевые слова: BLDC-двигатели, векторное управление, трапецеидальная коммутация, преобразования Кларка и Парка, отечественная электронная компонентная база, импортозамещение, микроконтроллеры, робототехника

Введение. В условиях стремительного развития робототехнических систем и искусственного интеллекта обеспечение технологического суверенитета и лидерства в данной области становится одной из ключевых задач. Для поддержания конкурентоспособности необходимо создавать более эффективные, точные и автономные робототехнические системы, способные решать сложные задачи в промышленности, медицине и сервисе. Одним из ключевых элементов, определяющих производительность и надежность роботов, служат электродвигатели. Благодаря высокой энергоэффективности, долговечности и точности управления особое место среди них занимают бесколлекторные двигатели (BLDC — Brushless DC motor).

BLDC-двигатели обладают высокой удельной мощностью, низким уровнем шума и минимально подвержены износу, что делает их идеальными для применения в мобильной робототехнике, манипуляторах и автоматизированных системах. Их способность работать в широком диапазоне скоростей с точным позиционированием открывает новые возможности для создания динамичных и отзывчивых систем. Чтобы обеспечить работу таких двигателей, необходимы сложные алгоритмы управления, для реализации которых требуются микроконтроллеры, драйверы MOSFET-транзисторов и датчики для поддержания обратной связи.

В данной статье рассмотрены алгоритмы управления BLDC-двигателями и возможности использования отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) в управляющих платах.

Трапецеидальный алгоритм управления. В управлении бесколлекторными двигателями применяются три основных метода коммутации, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и недостатки: трапецеидальная (Trap), синусоидальная (Sin) и векторная (FOC — Field Oriented Control) коммутация. Метод трапецеидальной коммутации удобен для простых систем, не предъявляющих высоких требований к плавности вращения и точности момента [1]. Данный алгоритм основывается на таблице переключений фаз, представленной на рис. 1. В данном алгоритме обозначение «Z» соответствует состоянию высокого сопротивления фазы, при котором соответствующая фаза двигателя отключена от источника питания и находится в свободном состоянии. Символы «+» и «-» обозначают подключение фазы соответственно к положительной и отрицательной шинам питания.

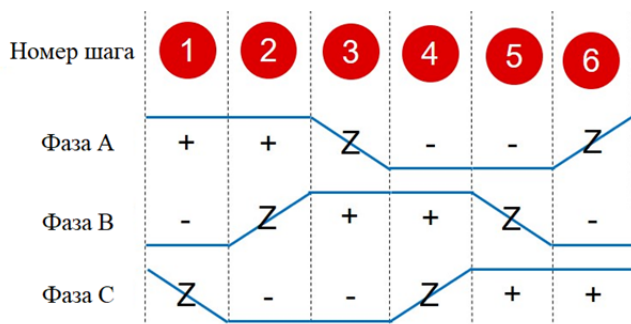


Рис. 1. Таблица переключения фаз

Моменты переключения между фазами определяются тремя датчиками Холла, энкодером или измерением напряжения аналого-цифрового преобра-

зователя (АЦП) микроконтроллера на обмотке свободной фазы двигателя. Схема работы алгоритма трапецеидальной коммутации для реализации управления скоростью BLDC-двигателя приведена на рис. 2.

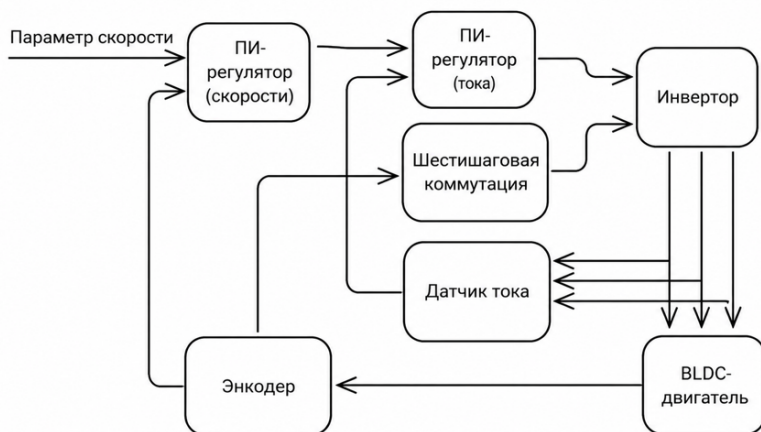


Рис. 2. Схема алгоритма Trap

Для реализации этого алгоритма не нужны большие вычислительные мощности микроконтроллера, поскольку алгоритм просто выполняет функции коммутатора, вовремя переключая фазы мотора по прерыванию от датчиков. На схеме выделяются четыре основных узла. Первый основан на получении обратной связи это энкодер и датчик токов фаз двигателя. На основе данной информации узел, представляющий собой пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор скорости и тока, вычисляет значения ошибки и регулирует выставленные параметры [2]. Узел шестишаговой коммутации задает текущее положение фаз двигателя, а инвертер превращает управляющие значения в напряжение работы двигателя. Алгоритм строится на прерываниях микроконтроллера и почти не задействует основное ядро. Основная вычислительная мощность тратится на определение времени коммутации фаз, которая зависит от оборотов двигателя. Основные параметры для расчета:

- скорость вращения N , об/мин (RPM);
- количество пар полюсов ротора P ;
- механическая скорость ω_m , рад/с;
- электрическая скорость ω_e , рад/с.

Формулы для расчета имеют следующий вид:

- механическая скорость

$$\omega_m = \frac{2\pi N}{60};$$

– электрическая скорость

$$\omega_э = \omega_m P;$$

– период электрического оборота

$$T_э = \frac{2\pi}{\omega_э} = \frac{60}{NP};$$

– время одного шага коммутации

$$T_{\text{шага}} = \frac{T_э}{6} = \frac{10}{NP}.$$

При использовании датчиков Холла время шага коммутации определяется их сигналами, что снижает необходимость в повышении вычислительных мощностей контроллера. Расчетное время помогает настроить параметры таймеров широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигнала и позволяет предсказать время следующего переключения для плавной работы двигателя. Например, для вращения двигателя со скоростью 3000 об/мин и 12 пар полюсов магнитов время переключения фаз составляет примерно 0,3 мс, поэтому достижения оптимального напряжения частота ШИМ микроконтроллера должна быть не менее 10 кГц, а частота таймера для коммутации фаз — не менее 10...50 кГц. ПИ-регулятор должен срабатывать при каждом подсчете времени шага коммутации, благодаря чему возможно регулирование момента силы двигателя [3].

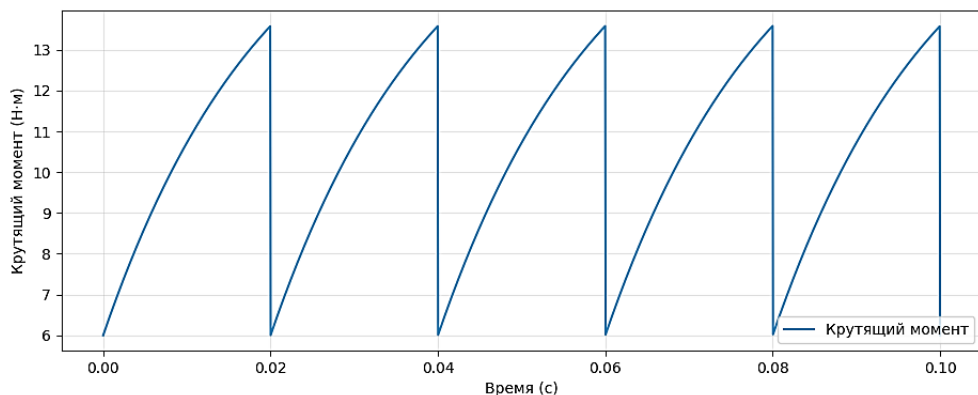


Рис. 3. Зависимость крутящего момента двигателя от времени

Основной проблемой данного метода являются «биения» ротора из-за скачков тока вследствие особенностей работы алгоритма. На рис. 3 показано изменение значения крутящего момента двигателя от времени. Из-за резкого переключения фаз сила тока на катушках резко изменяет свои значения, что не позволяет двигателю работать с точным значением крутящего момента. Поэтому данный метод вращения двигателя подходит для задач, где точность не слишком важна, например привод для робособаки или электромотоцикла.

Векторный алгоритм управления. Коммутация FOC представляет собой более продвинутый алгоритм управления коммутацией фаз BLDC-двигателей, основанный на управлении крутящего момента двигателя с выделением квадратурной и прямой частей крутящего момента и сохранением между вектором магнитного поля ротора и статора угла 90° для достижения максимального крутящего момента. На рис. 4 показано, как должны быть расположены векторы электрического и магнитного поля для максимальной эффективности работы двигателя [4].

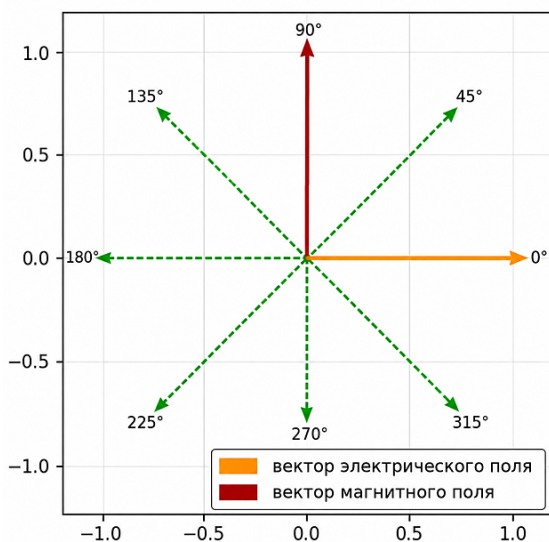


Рис. 4. Выделение векторов крутящего момента

Алгоритм основан на том, что момент вращения двигателя становится максимальным при отклонении вектора напряженности магнитного поля ротора на 90° относительно вектора напряженности поля статора. Поэтому основная задача алгоритма — поддерживать модуль квадратурного вектор равным единице, а модуль прямой составляющей — равным нулю (рис. 5).

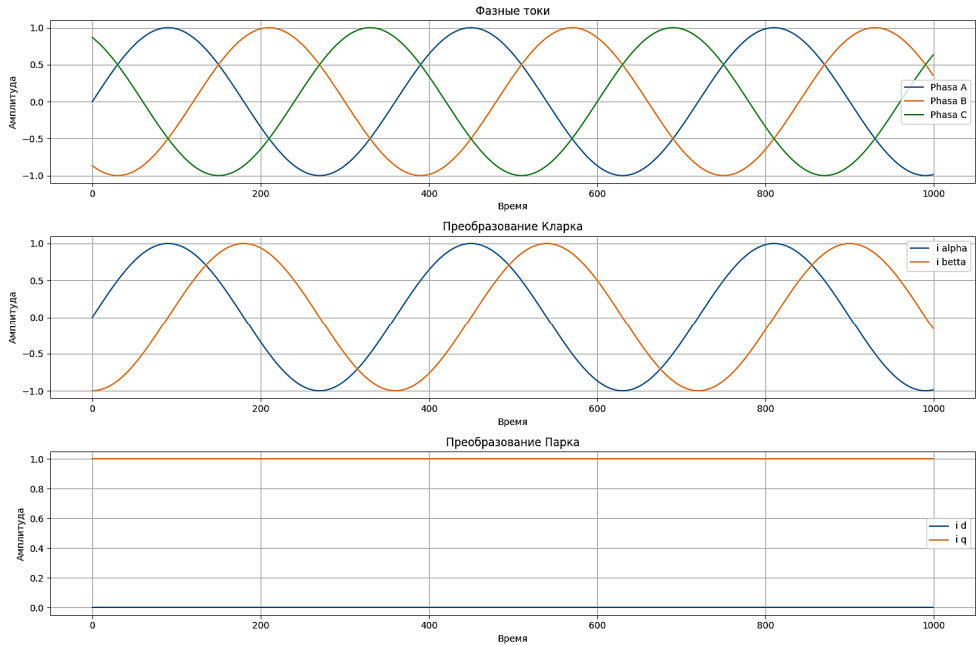


Рис. 5. Алгоритм перехода от трех векторов к двум константам

Поддержание возможно благодаря ПИ-регулятору тока, представленному на общей схеме (рис. 6). Благодаря применению математических формул трансформации Парка и Кларка возможен переход от трех векторов тока к двум векторам, система координат которых вращается вокруг них. Преобразования позволяют микроконтроллеру проще обрабатывать информацию и выполнять сложение векторов [5].

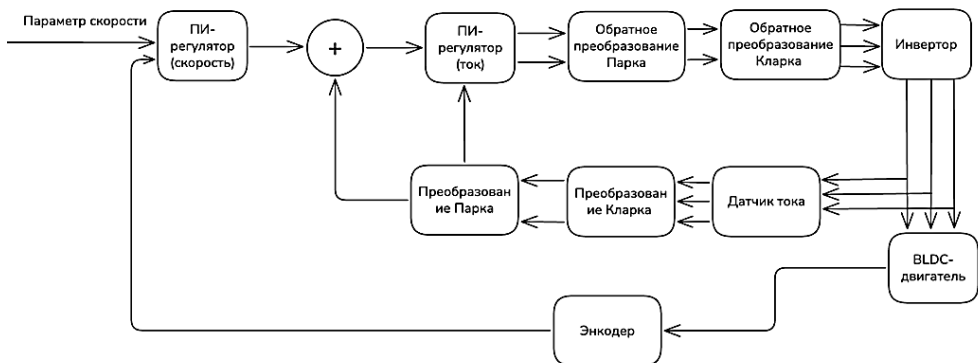


Рис. 6. Структурная схема алгоритма FOC

Набор инструментов, используемых для реализации алгоритма:

- микроконтроллер STM32F303,
- драйвер MOSFET транзисторов DRV8302,
- двигатель IPower 2-3s,
- магнитный энкодер AS5600;

i_a, i_b, i_c — фазные токи в трехфазной системе (статор);

i_α, i_β — токи в неподвижной системе координат Кларка;

i_d, i_q — токи во вращающейся системе координат Парка;

θ_e — электрический угол между нолем и осью d .

Для работы алгоритма FOC требуется выделить ток с обмоток двигателя с помощью двухканального 12-битного АЦП микроконтроллера или отдельной микросхемы.[6] После выделения токов двух фаз третью фазу тока определяют с помощью закона Кирхгофа:

$$i_c = -(i_a + i_b).$$

Преобразование Кларка имеет вид

$$(i_\alpha i_\beta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}.$$

Преобразования Парка

$$(i_d i_q) = \begin{pmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{pmatrix} (i_\alpha i_\beta).$$

Благодаря этим математическим преобразованиям появляется возможность манипулировать только одним параметром i_q , параметр i_d останется равным нулю.

Далее по схеме реализуется ПИ-регулирование токов из-за потерь на катушках и инерционности всей системы. Значения коэффициентов регулирования подбирают экспериментальным путем [7]. После возвращаются к трехфазной системе через обратное преобразование Парка и Кларка. Код на языке C для микроконтроллера STM32 представлен на рис. 7.

Обратное преобразование Парка имеет вид

$$(i_\alpha i_\beta) = \begin{pmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{pmatrix} (i_d i_q).$$

Обратное преобразование Кларка

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} (i_\alpha i_\beta).$$

Далее переменные i_a , i_b , i_c переводят в ШИМ-сигнал и получают на выходе драйвера цифровую синусоиду, показанную на рис. 8, которая после RC-фильтра станет чистой синусоидой [8]. Принципиальная электрическая схема регулятора представлена на рис. 9 [9].

```
void foc_direct()
{
    angle_electric_deg = get_angle()*7;
    angle_electric_rad = angle_electric_deg*M_PI/180.0;

    alpha = (id * cosf(angle_electric_rad)) - (iq * sinf(angle_electric_rad));
    betta = (id * sinf(angle_electric_rad)) + (iq * cosf(angle_electric_rad));

    phasa_A = alpha;
    phasa_B = (-0.5 * alpha) + (sqrt(3)/2 * betta);
    phasa_C = (-0.5 * alpha) - (sqrt(3)/2 * betta);

    phasa_A = phasa_A * 0.5 + 0.5;
    phasa_B = phasa_B * 0.5 + 0.5;
    phasa_C = phasa_C * 0.5 + 0.5;

    TIM1->CCR1 = TIM1->ARR*phasa_A;
    TIM1->CCR2 = TIM1->ARR*phasa_B;
    TIM1->CCR3 = TIM1->ARR*phasa_C;
}
```

Рис. 7. Обратные преобразования Парка и Кларка на языке C

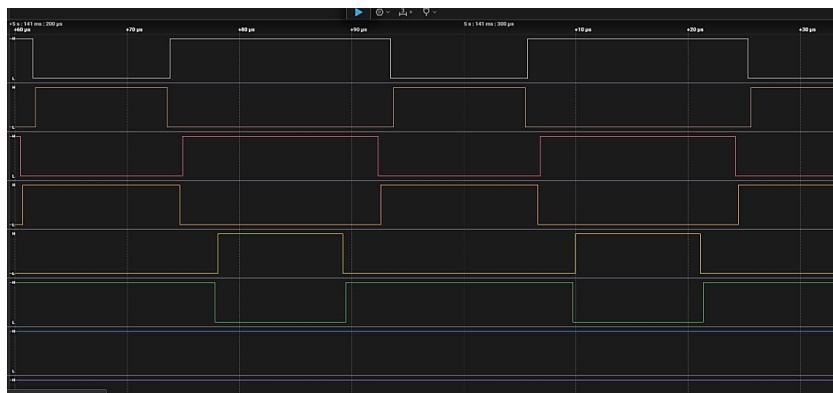


Рис. 8. ШИМ-сигнал на выходе инвертора

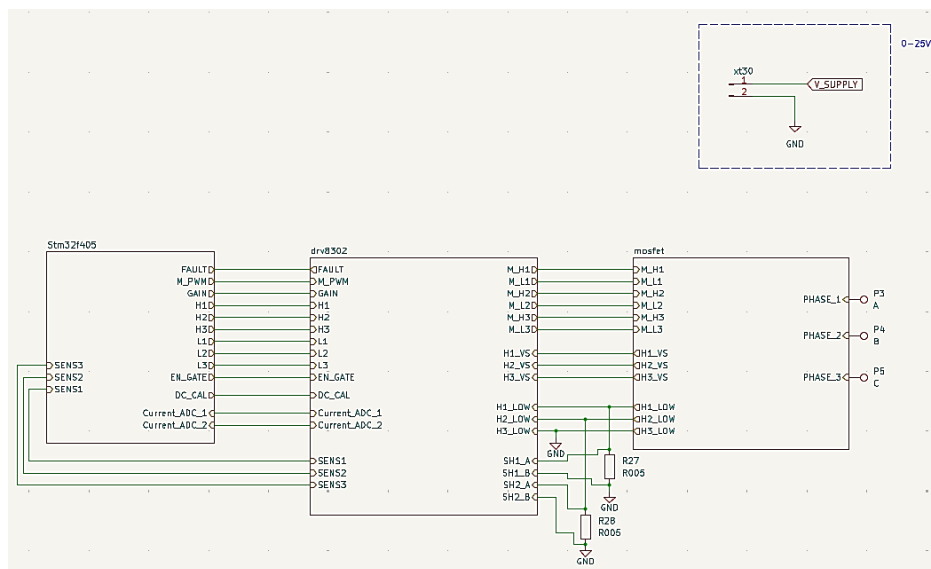


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема регулятора

Заключение. Реализация трапецеидальной коммутации возможна на самых простых микроконтроллерах типа STM32f103 или ATMEGA328P. Частота процессора данных контроллеров превышает 1 МГц, у них на борту есть несколько интерфейсов для связи с внешним АЦП или встроенный АЦП, способный генерировать ШИМ-сигнал частотой выше 10 кГц.

Среди доступных отечественных микроконтроллеров МК32 Amur хорошо подходит для реализации как трапецеидального алгоритма, так и FOC. Этот микроконтроллер имеет 12-битный АЦП, опорную частоту до 32 МГц, интерфейсы UART, I2C и SPI, 16-битный таймер для генерации ШИМ-сигнала. Для управления транзисторами необходим драйвер, который сможет обеспечить время задержки, чтобы транзисторные сборки не сгорали от одновременного включения, и установить оптимальное напряжение на затворе транзистора.

На текущий момент ни одна российская компания не выпускает аналоги иностранных драйверов транзисторов. За основу разработки отечественных драйверов можно взять драйверы компании Texas Instrument DRV830x и DRV831x. Также на рынке нет доступных высокочастотных отечественных MOSFET-транзисторов.

Отсутствие отечественных компонентов на рынке тормозит развитие отечественных разработок в сфере робототехники. Появление отечественных компонентов для робототехнических систем при условии наличия разработ-

чиков поможет создать синергетический эффект в развитии отрасли, поскольку скорость разработки ЭКБ при условии запросов разработчиков вырастает экспоненциально. Это уже доказал американский рынок, оставаясь лидером не только по выпуску ЭКБ, но и в области создания готовых решений в робототехнике.

Литература

- [1] Постолаки Е.С., Масанов Д.В. Анализ векторного управления (FOC) для BLDC. *Применение ИИ в промышленности. Науч. конф. с междунар. уч. в рамках деловой программы междунар. выставки «ИНЛЕГМАШ 2025»*: сб. ст. Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2025, с. 144–148.
- [2] Prayogo R.C., Triwiyatno A., Riyadi M.A. Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2622, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2622/1/012025>
- [3] Rau D., Vrsansky T. Sensorless field-oriented control inverter of BLDC motor for copter. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, vol. 74, no. 3, pp. 210–217. <https://doi.org/10.2478/jee-2023-0027>
- [4] Самар Д.Е., Егоров В.А. Экспериментальное исследование алгоритма работы драйвера BLDC электродвигателя. *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. V Всерос. нац. науч. конф. молодых ученых: сб. тр.* Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2022, с. 75–77.
- [5] До Ч.Т., Фам Х.Ч. Моделирование и управление двигателем BLDC — реализация MATLAB/SIMULINK. *Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник)*, 2023, № 4, с. 34–40.
- [6] Тимофеев Е.С. Разработка электрической схемы драйвера BLDC-двигателя. *Вестник науки*, 2025, № 6, с. 1370–1387.
- [7] Дьячков Ю.Е. Разработка прототипа платы управления BLDC мотора. *Наука России. IV Всерос. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Пенза, Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025, с. 43–48.
- [8] Poudel Ya.K., Bhandari P. Control of the BLDC motor using ant colony optimization algorithm for tuning PID parameters. *Archives of advanced engineering science*. Nepal, 2023, vol. 2(2). <https://doi.org/10.47852/bonviewAAES32021184>
- [9] Hassan E., Ali I., Mohammed K.H. Experimental study of f2833x/Texas ins. for constructing speed controller on a synchronous motor based on SVPWM method. *Engineering and technology journal*, 2022, vol. 2, pp. 301–310. <https://doi.org/10.30684/ETJ.V40I2.2171>

Поступила в редакцию 17.11.2025

Маслов Данил Александрович — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Маслов Д.А. Подбор отечественных электронных компонентов для создания платы управления бесколлекторным двигателем. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 03 (104). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1112.html>

SELECTION OF DOMESTIC ELECTRONIC COMPONENTS FOR CREATING A CONTROL BOARD FOR A BRUSHLESS MOTOR

D.A. Maslov

maslovdanil.1@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

In the context of active development of robotics and the need to ensure technological sovereignty, the development of efficient control systems for brushless dc motors (BLDC), which are key components of modern robotic systems, is of particular relevance. The article analyzes BLDC motor control algorithms, including trapezoidal (Trap) and vector (FOC) commutation, with an emphasis on their advantages, disadvantages and areas of application. The mathematical foundations of Clarke and Park transformations necessary for the implementation of FOC, as well as the requirements for the computing resources of microcontrollers are considered. Particular attention is paid to the problem of import substitution: an overview of the domestic electronic component base (ECB) for creating control boards, including microcontrollers (for example, MIK32 Amur) and possible analogues of foreign MOSFET transistor drivers is proposed. Key problems are identified, such as the lack of domestic high-frequency MOSFET transistors and specialized drivers, which hinders the development of autonomous robotic systems. The article offers practical solutions for implementing control algorithms on domestic components and emphasizes the need to develop domestic ECB to achieve technological independence. The results of the study can be useful for developers of robotic systems, electronic engineers and specialists in the field of automated control.

Keywords: BLDC motors, vector control (FOC), trapezoidal commutation, Clarke and Park transforms, domestic electronic component base, import substitution, microcontrollers, robotics

Received 17.11.2025

Maslov D.A. — Student of Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Maslov D.A. Selection of domestic electronic components for creating a control board for a brushless motor. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 03 (104). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1112.html>