

УДК 621.313

Юмагужин Надир Тагирович, магистрант,
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа,

Дырова Елена Владимировна, магистрант,
ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, г. Уфа

Султанова Залина Фаридовна, магистрант,
ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ, г. Уфа

**РЕАЛИЗАЦИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ПОСТОЯННОГО ТОКА (БДПТ) В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK
IMPLEMENTATION OF A BRUSHLESS DC MOTOR (BLDC)
IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT**

Аннотация: Работа посвящена разработке и анализу модели БДПТ в MATLAB/Simulink для оптимизации управления движением и энергопотребления автономных электрических платформ, включая агропромышленные роботизированные системы, с акцентом на адаптацию к непростым условиям работы.

Abstract: The work is devoted to the development and analysis of the BDPT model in MATLAB/Simulink for optimizing motion control and energy consumption of autonomous electric platforms, including agro-industrial robotic systems, with an emphasis on adaptation to difficult working conditions.

Ключевые слова: БДПТ, MATLAB, Simulink, автономные платформы, электрическая тяга, сельское хозяйство.

Keywords: BLDC, MATLAB, Simulink, autonomous platforms, electric traction, agriculture.

Введение. Бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ) активно применяются в современной технике благодаря высокой производительности, долговечности и минимальному износу, обусловленному отсутствием механического коммутатора [1]. Управление ими требует сложных алгоритмов с обратной связью по положению ротора. Моделирование в MATLAB/Simulink позволяет оптимизировать динамику работы двигателя и тестировать методы управления до их физического внедрения [2].

Цель и задачи. Создание и изучение математической модели бесколлекторного двигателя постоянного тока в MATLAB/Simulink с целью анализа его динамических свойств и совершенствования системы управления.

Основной материал статьи.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ) находят широкое применение в автономных самоходных платформах благодаря своей энергоэффективности, надежности и способности обеспечивать точное управление движением. Эти характеристики особенно важны для логистики, сельского хозяйства и промышленности, где требуются снижение затрат, увеличение автономности и работа в сложных условиях [3]. Использование БДПТ в аграрном секторе способствует цифровизации и развитию АПК [4, 5].

В отличие от асинхронных двигателей, в БДПТ магнитное поле ротора создается постоянными магнитами. Работа двигателя основана на взаимодействии магнитных полей статора и ротора. Для поддержания вращения ротора токи в обмотках статора коммутируются с помощью инвертора, управляемого сигналами датчиков положения, например, датчиков Холла.



Коммутация фаз предполагает переключение токов в обмотках статора для создания вращающегося магнитного поля. В БДПТ применяется шестиступенчатая коммутация, при которой каждая пара фаз активна в течение 60° электрических градусов. Отличительной чертой БДПТ является трапецеидальная форма ЭДС, в то время как у PMSM она синусоидальная.

Момент T_e генерируется за счет взаимодействия токов фаз с магнитным полем ротора. Его величина пропорциональна силе тока и зависит от угла между магнитными полями статора и ротора. Для построения математической модели используются уравнения, описывающие процессы электромеханического преобразования энергии:

$$V_a = R_s \cdot i_a + L_s \cdot \left(\frac{di_a}{dt}\right) + e_a, \text{ В} \quad (1)$$

- где: V_a – фазное напряжение, В;
- R_s – активное сопротивление обмотки, Ом;
- L_s – индуктивность обмотки, Гн;
- $e_a = k_e \omega f(\theta)$ – ЭДС вращения, В;
- k_e – константа ЭДС, В·с/рад;
- ω – угловая скорость, рад/с;
- θ – угол поворота ротора, рад.

Электромагнитный момент T_e генерируется взаимодействием токов фаз с магнитным полем ротора:

$$T_e = k_t \cdot \sum_{i=a,b,c} (i_i \cdot f(\theta_i)) \quad (2)$$

- где: k_t – константа момента, Н·м/А.
- Динамика ротора описывается уравнением:

$$J \cdot \left(\frac{d\omega}{dt}\right) = T_e - T_L - B \cdot \omega \quad (3)$$

- J – момент инерции ротора, кг·м²;
- T_L – внешний момент нагрузки, Н·м;
- B – коэффициент вязкого трения, Н·м·с/рад.

Для тестирования и настройки системы управления электроприводом требуется провести математическое моделирование его рабочих режимов. В качестве инструмента используется Simulink из пакета MATLAB. Для моделирования применяется стандартный блок Permanent Magnet Synchronous Machine из библиотеки Simscape Power Systems Library Simulink [6].

Визуальная математическая модель, построенная в программной среде Simulink представлена на рисунке 1.

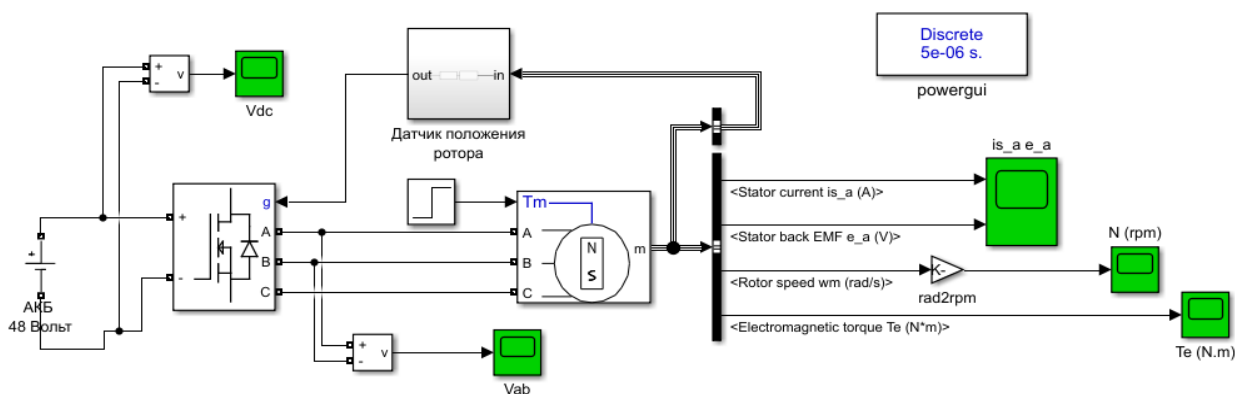


Рисунок 1 Визуальная математическая модель, построенная в программной среде Simulink



С помощью разработанной визуальной математической модели были протестированы режимы работы: запуск двигателя без нагрузки до 1060 об/мин и внезапное приложение механической нагрузки с моментом 2 Н·м через 0,1 секунды после старта. Результаты отражены на графиках: частота вращения (Рисунок 2), крутящий момент (Рисунок 3), ток и обратная ЭДС фазы А статора (Рисунок 4).

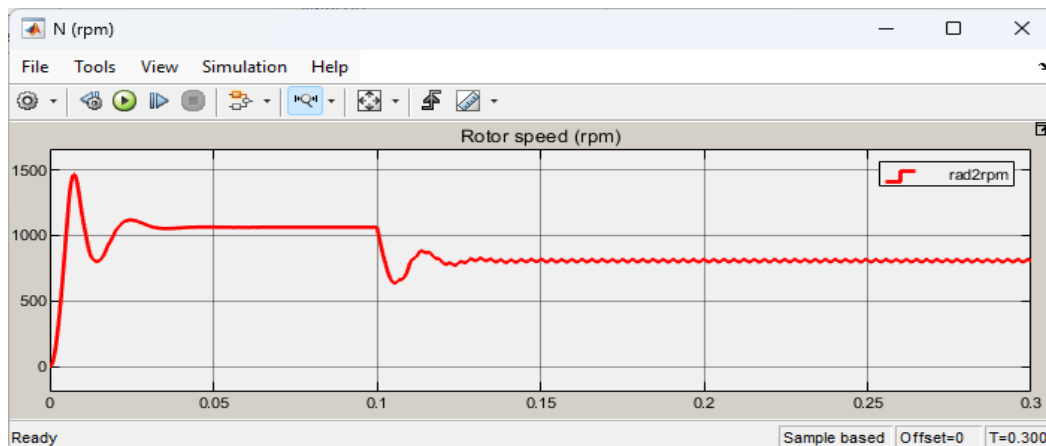


Рисунок 2 Частота вращения двигателя, об/мин

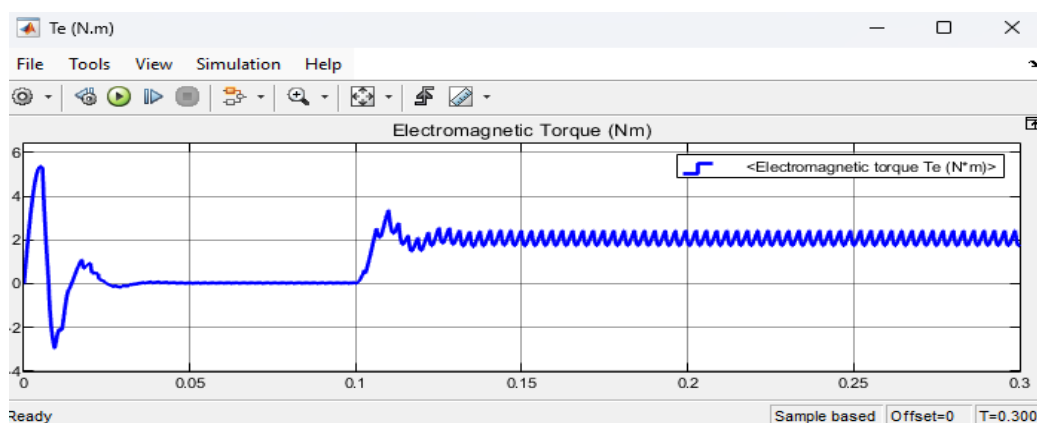


Рисунок 3 Электромагнитный момент двигателя, Н·м

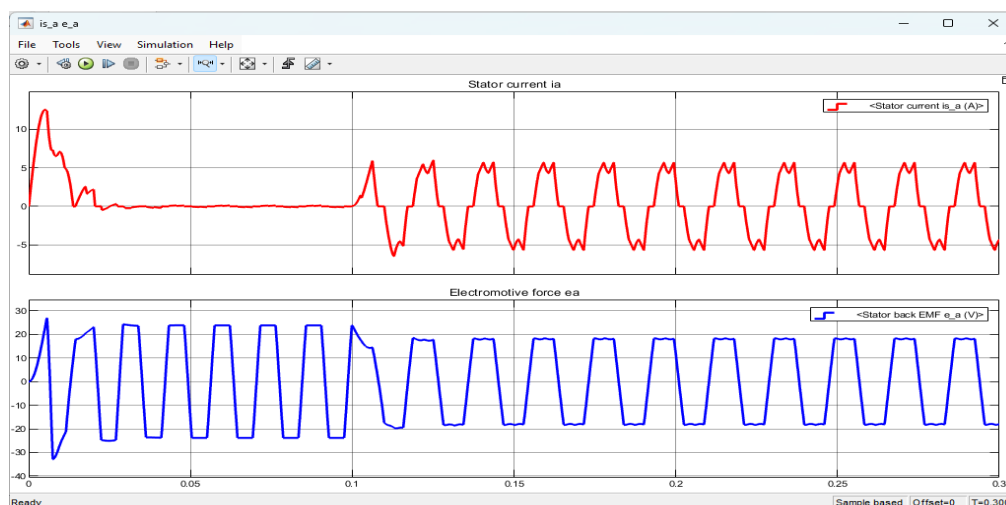


Рисунок 4 Ток и обратная ЭДС статора фазы А



Вывод:

Эксперименты подтвердили корректность работы предложенной системы.

Моделирование БДПТ в MATLAB/Simulink обеспечивает глубокий анализ его характеристик, оптимизацию параметров и разработку надежных алгоритмов управления, что критически важно для высокоточных и сложных систем.

Использование данной среды значительно ускоряет процесс моделирования и предоставляет данные, необходимые для последующего внедрения решений.

Список литературы:

1. Дырова, Е.В. Электропривод автономных мобильных транспортных средства на электрической тяге / Е.В. Дырова, З.Ф. Султанова, Д.Е. Валишин // Студент и аграрная наука: Материалы XVII Всероссийской студенческой конференции, Уфа, 1–2 марта 2023 года / Минсельхоз РФ, Минобрнауки РБ, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ – Уфа: Башкирский ГАУ, 2023.

2. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1 + Simulink 5 и MATLAB 7 + Simulink 6 в математике и математическом моделировании. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

3. Зиятдинов, Т.Р. Конструкция автономной самоходной платформой на электрической тяге и система управления батареей (BMS) / Т.Р. Зиятдинов, Л.Р. Низаметдинова, Д.Е. Валишин // Материалы XVII Всероссийской студенческой конференции, Уфа, 1–2 марта 2023 года / Минсельхоз РФ, Минобрнауки РБ, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2023.

4. Валишин, Д. Е. "Сельское хозяйство 4.0". "умные" технологии в сельском хозяйстве / Д. Е. Валишин, С. В. Акчурин // материалы международной научно-практической конференции в рамках 32-й Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2022». 23 марта 2022 г. Часть 2. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2022. – С. 201-204.

5. Харисов, Д. Д. Цифровые технологии в диагностике мобильных энергетических установок / Д. Д. Харисов, Б. А. Сахибгараев, Д. Е. Валишин // Наука молодых – инновационному развитию АПК: материалы XV Национальной научно-практической конференции молодых ученых. 16–17 ноября 2022 г. Часть 2. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2022. – С. 101-106.

6. Permanent Magnet Synchronous Machine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html>, 2025.

