



Т.С. Ларькина^{1, 2}, П.В. Казаков², Д.Ю. Студнев²
¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»
 в г. Смоленске,
²Белорусско-Российский университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СОСТАВЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Исследование основано на построении математической модели ДПТ НВ с использованием основных уравнений электрической и механической частей (напряжения якоря, электромеханического момента, энергии). Моделирование осуществляется в среде Matlab Simulink. Анализ проводится по таким выходным характеристикам, как угловая скорость, ток якоря и электромагнитный момент. Получены переходные процессы и графические зависимости, наглядно демонстрирующие реакцию электропривода на различные типы нагрузок. Проведен сравнительный анализ эффективности тормозных режимов, выявлены их особенности и области целесообразного применения в контексте задач робототехнического комплекса, требующих точного позиционирования и управления движением.

Роботизированная система, робототехнический комплекс, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ), Matlab Simulink, тормозные режимы, динамическое торможение, противовключение, рекуперация, переходные процессы, точность позиционирования.

Matlab Simulink широко применяется в областях управления, цифровой обработки сигналов, связи и других областях, где важно анализировать и моделировать необходимые системы для соответствующих целей. Этот пакет программы обладает мощными возможностями для тестирования моделей, оптимизации параметров систем, а также для проведения различных инженерных проектов.

Данная статья посвящена изучению поведения двигателя постоянного тока, изменению его характеристик при разных воздействиях на него в составе робототехнического комплекса.

Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) широко применяются в промышленности, они обладают способностью обеспечивать стабильное управление скоростью и моментом. Моделирование данного типа двигателя позволяет упростить его изучение за счет того, что можно принять разные допущения и не учитывать некоторые факторы.

Данное изучение позволит нам получить имитационное поведение подобранных электродвигателей для рассматриваемой роботизированной системы, а именно: обеспечения точности перемещения по координатам, статическую ошибку – в зависимости от условий эксплуатации и введенных выше факторов.

Математическое описание модели ДПТ с НВ

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением описывается следующими основными уравнениями [1].

Уравнение напряжения якорной цепи:

$$U_a = E + I_a R_a, \quad (1)$$

где U_a – напряжение на якоре;

E – ЭДС якоря;

I_a – ток якоря;

R_a – сопротивления якорной цепи.

Механическое уравнение:

$$T_m - M_c = J \frac{dw}{dt}, \quad (2)$$

где T_m – электромагнитный момент;

M_c – момент нагрузки;

J – момент инерции ротора;

$\frac{dw}{dt}$ – угловая скорость ротора.

Энергетическое отношение:

$$P_m = M_m w, \quad (3)$$

$$P_{эл} = U_a I_a. \quad (4)$$

Уравнение возбуждения:

$$\Phi = k_f I_f, \quad (5)$$

где k_f – коэффициент пропорциональности;

I_f – ток возбуждения.

Номинальный коэффициент ЭДС:

$$C_{ном} = \frac{U_{яном} - I_{яном} R_a}{\omega_{ном}} \quad (6)$$

где $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вала двигателя;

R_a – сопротивление якорной цепи двигателя.

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \eta_{ном}}{30}. \quad (7)$$

Данные математические уравнения описывают физические процессы в электродвигателе постоянного тока, используемые в дальнейшем для электропривода и изучения поведения при реализуемых на его основе тормозных режимов (таких как динамическое торможение, торможение противовключением, торможение

с возвратом энергии в сеть), настройки полученной системы для точного перемещения по поверхности и скорости выполнения команд.

Моделирование ДПТ с НВ в среде Matlab Simulink. Выбор эффективного метода тормозного режима

Модель, представленная на рисунке 1, необходима для выбора более эффективного метода тормозного режима. Выбор будет осуществляться по самым главным выходным характеристикам двигателя, таким как: угловая скорость, ток якоря, ток возбуждения и электромеханический момент [2].

В модели (рис. 1) представлен ДПТ с НВ, в которой реализуется динамическое торможение, рекуперация и режим противовключения (тормозные режимы), также осуществляется управление на примере перехода от обычной подачи сигнала к ступенчатому сигналу.

В данной модели, как и в роботизированной системе, использованы электродвигатели малой мощности с малым развиваемым моментом с учетом использования редуктора с переменным передаточным отношением [3–5].

В таблице представлены данные по принципу работы, назначению и особенностям каждого исследуемого тормозного режима.

Использование электродвигателя малой мощности обусловлено необходимостью в точном передвижении без использования дополнительных тормозных элементов и других систем торможения, а также необходимостью долгой автономности и отсутствия потребности в высокой развиваемой скорости из-за специфики установленного оборудования в системе.

В результате моделирования данной схемы получены графические показатели изменения введенных ранее исследуемых характеристик электродвигателя при появлении изучаемых типов нагрузок на данную систему: моментальной и ступенчатой [4, 5].

Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3 при постоянной нагрузке и при ступенчатой нагрузке соответственно.

Изучение данных графиков позволяет увидеть значимую разность двух типов нагрузок, которые могут встречаться при эксплуатации двигателя во многих роботизированных системах.

Важность данных характеристик взаимообусловлена необходимостью анализа двух типов нагрузок, поскольку это типовые виды нагрузок, которые чаще всего встречаются при моделировании движения систем.

Рассмотрение данных видов нагрузок обусловлено тем, что исследуемый робототехнический комплекс при перемещении по различным типам и формам поверхностей претерпевает изменение видов нагрузки во время прохождения препятствий.

Проведенное исследование, основанное на математическом моделировании в среде Matlab Simulink, позволило всесторонне проанализировать работу двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в составе робототехнического комплекса.

В ходе работы были достигнуты следующие ключевые результаты:

1. Разработана и реализована адекватная модель ДПТ НВ, которая позволяет исследовать динамические характеристики двигателя при различных эксплуатационных условиях, в том числе при смене режимов работы и типов нагрузки.

2. Проведен сравнительный анализ тормозных режимов (динамического торможения, противовключения и рекуперации).

3. Исследовано влияние характера нагрузки на работу привода. Моделирование показало существенную разницу в переходных процессах при моментальном и ступенчатом приложении нагрузки, что соответствует реальным условиям эксплуатации робота при преодолении препятствий и изменении траектории.

4. Сделан практический вывод о применимости полученных результатов для проектирования систем управления робототехническими комплексами. Показано, что для обеспечения точности позиционирования, минимизации статической ошибки и повышения энергоавтономности необходимо учитывать специфику нагрузок и целенаправленно выбирать тормозной режим, адекватный текущей задаче.

Установлено, что выбор оптимального тормозного режима и учет характера нагрузки (моментальная или ступенчатая) являются критически важными для обеспечения точности перемещения, минимизации статической ошибки и повышения энергоэффективности робототехнического комплекса. Модель, разработанная в Matlab Simulink, доказала свою адекватность и является эффективным инструментом для предварительного анализа и настройки систем электропривода роботов.

Таким образом, разработанная модель и проведенные на ее основе исследования являются эффективным инструментом для инженерного анализа, оптимизации параметров и повышения эффективности систем электропривода робототехнических комплексов.

Таблица

Характеристический анализ моментальной нагрузки в сравнении со ступенчатой

Режим	Принцип работы	Назначение	Особенности
Противовключение	Изменение направления напряжения якоря	Быстрое торможение и реверсивное	Высокий тормозной ток, требующий ограничения
Рекуперация	Преобразование механической энергии в электрическую	Возврат энергии в сеть или накопитель	Энергия возвращается в сеть, эффективно при высоких скоростях
Динамическое торможение	Подключение тормозного резистора	Быстрое торможение	Энергия рассеивается в виде тепла, эффективно при любых скоростях

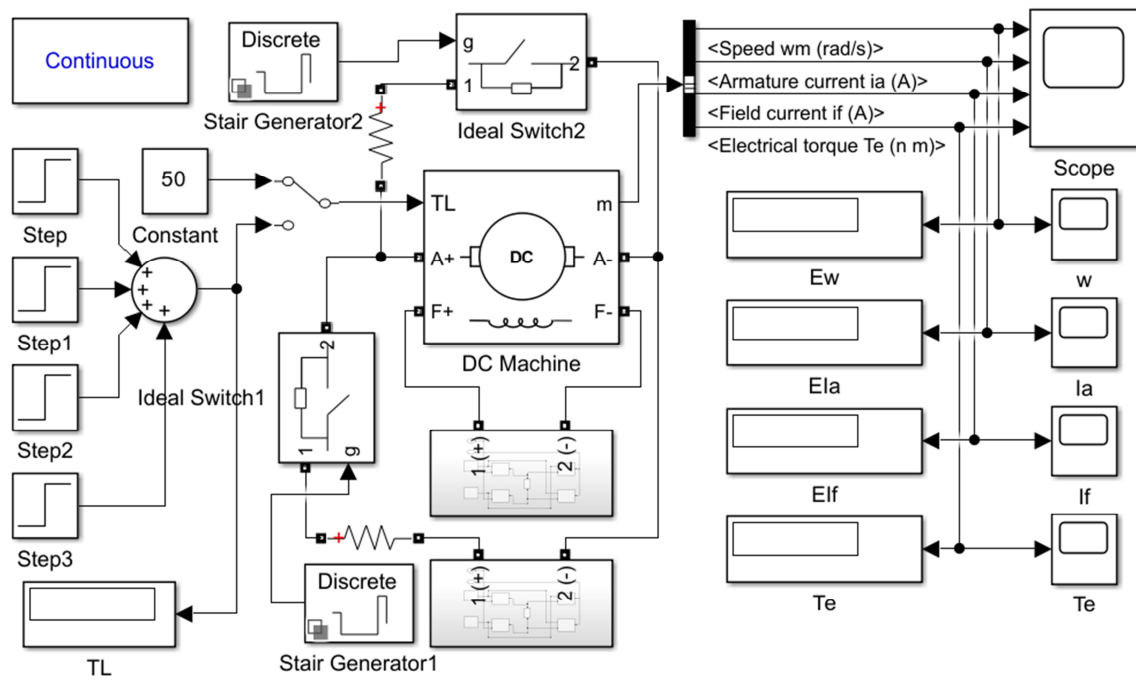


Рис. 1. Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в среде $\square/\square b \square Si \square/\square li \square k$

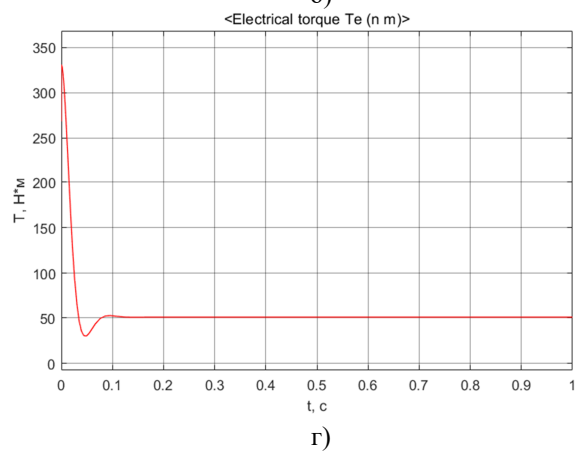
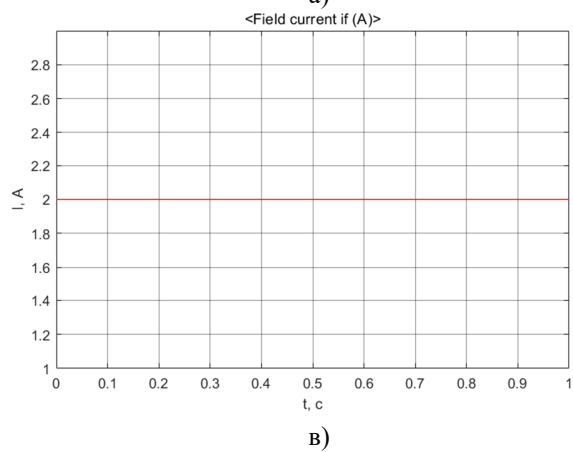
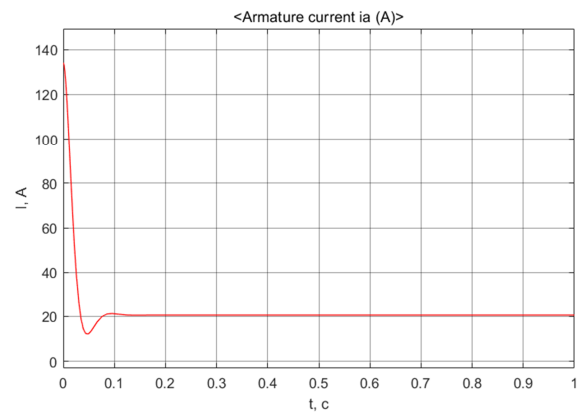
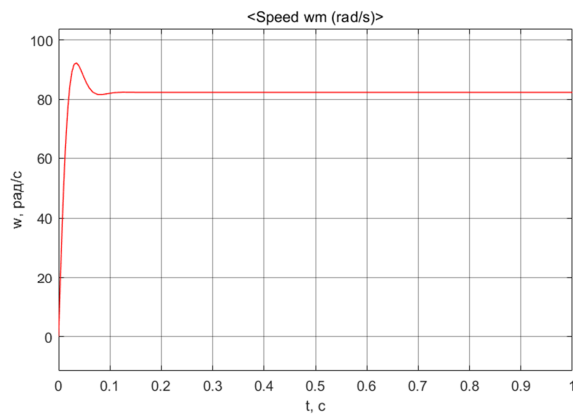


Рис. 2. Графики переходных процессов двигателя при постоянной нагрузке:
а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения; г) момент

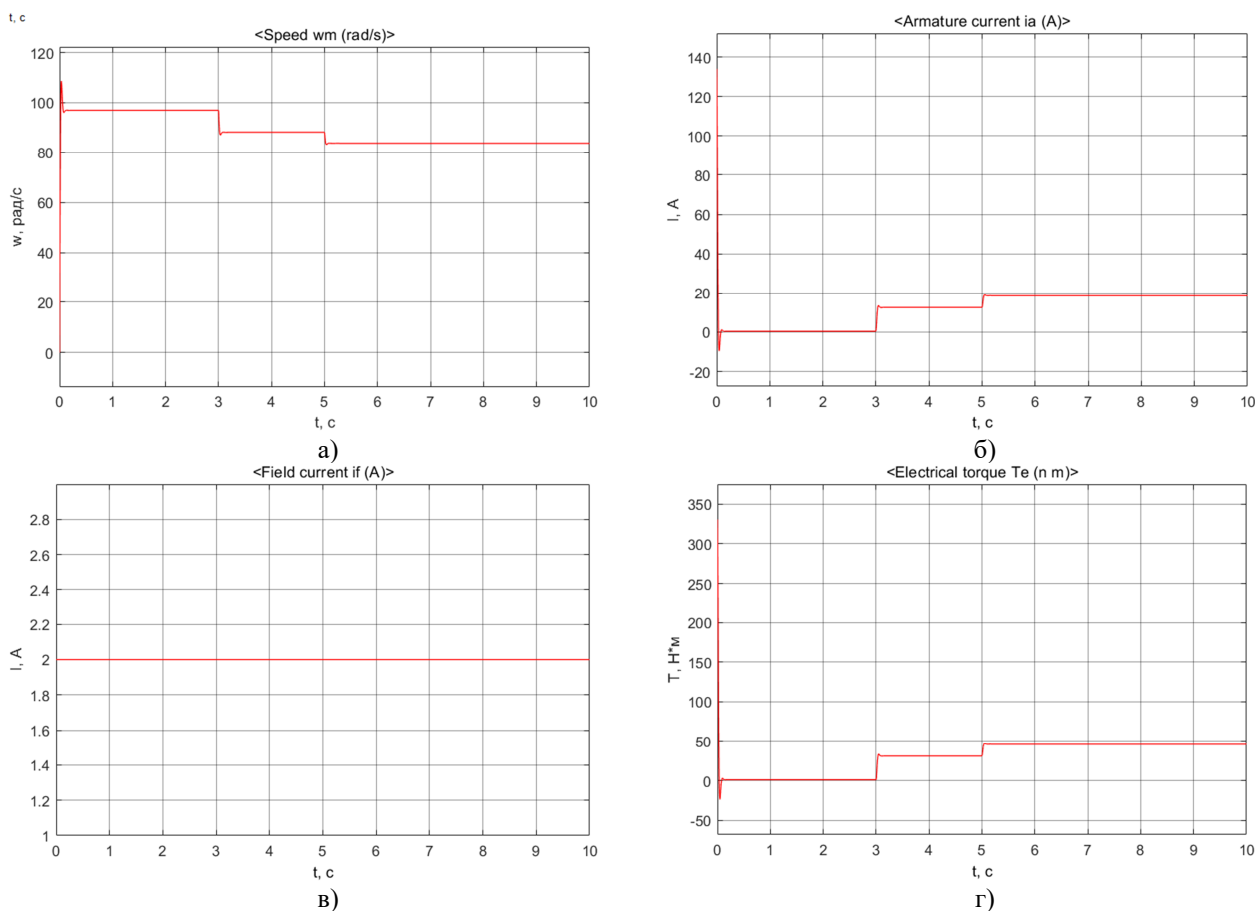


Рис. 3. Графики переходных процессов двигателя при ступенчатой нагрузке:
а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения; г) момент

Литература

1. Проектирование электропривода постоянного тока с цифровой системой управления : учебное пособие / М. А. Авербух, А. Н. Семернин, А. С. Солдатенков, Г. А. Фальков. – Белгород : БГТУ имени В. Г. Шухова, 2021. – 118 с.
2. Моделирование и управление движением роботов: учебно-методическое пособие / Д. Н. Захаров, Д. М. Куровский, Е. А. Ракшин [и др.]. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2023. – 84 с.

3. Борисов, М. М. Имитационное моделирование мехатронных систем : учебно-методическое пособие / М. М. Борисов, А. А. Колюбин. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2020. – 103 с.

4. Тугашова, Л. Г. Моделирование объектов управления в MatLab / Л. Г. Тугашова, А. В. Затонский. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 144 с.

5. Бильфельд, Н. В. Моделирование динамики систем автоматизации в MATLAB : учебное пособие / Н. В. Бильфельд, Ю. И. Володина. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 148 с.

T.S. Larkina¹, P.V. Kazakov², D.Yu. Studnev²
¹National Research University «MPEI», Smolensk,
²Belarusian-Russian University

MODELING AND ANALYZING OPERATION OF SEPARATELY EXCITED DC MOTOR UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS AS PART OF ROBOTIC SYSTEM IN MATLAB SIMULINK

The study is based on constructing a mathematical model of the SEDC motor using the fundamental equations of the electrical and mechanical components (armature voltage, electromechanical torque, and energy). The simulation is performed in Matlab Simulink. The analysis is based on output characteristics such as angular velocity, armature current, and electromagnetic torque. The simulation resulted in transient processes and graphical dependencies clearly demonstrating the electric drive's response to various types of loads. A comparative analysis of the effectiveness of braking modes was conducted, identifying their specific features and areas of appropriate application in the context of robotic system tasks requiring precise positioning and motion control.

Robotic system, robotic system, separately excited DC motor (SEDC), Matlab Simulink, braking modes, dynamic braking, counter-connection, recuperation, transient processes, positioning accuracy.