

УДК 621-039-542

EDN [SGGJPX](#)

Объектно-ориентированная модель вентильного электропривода

И.А. Шураков^{1*}, С.И. Охапкин¹, С.А. Юдин¹, Ю.Г. Пономарев¹, С.А. Мокрушин²

¹Вятский государственный университет, ул. Московская 36, Киров, 610000, Россия

²Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе 11, Москва, 125080, Россия

*E-mail: usr10365@vyatsu.ru

Аннотация. В статье рассмотрен актуальный вопрос о построении объектно-ориентированной модели электропривода на базе вентильного двигателя, дающее более детальное представление электрических, электромагнитных и механических процессов электрической машины. В качестве объекта проектирования рассмотрен вентильный электропривод с трапецеидальной противо-ЭДС на базе микросхемы MC33035P. В работе представлено математическое описание, описывающее процессы электрической машины. Объектно-ориентированная модель разработана в программном пакете Simulink среды MATLAB. Основным результатом является демонстрация структуры модели электропривода, позволяющая проводить исследования и испытания режимов работы вентильного двигателя. Предложенная модель прошла верификацию данных с использованием результатов натурального испытания моделируемого вентильного двигателя на базе микросхемы MC33035P. Представленная объектно-ориентированная модель позволяет снимать величины токов и напряжений в любых точках статорной цепи, величины ЭДС, электромагнитного момента, а также позволяет оценить влияние каждой фазы на формирование электромагнитного момента в любой момент времени, что является существенным преимуществом разработанной модели ВД. Исследовательские и испытательные математические модели активно используются в ходе проектирования электроприводов современного машиностроения, что значительно снижает временные и материальные затраты производства.

Ключевые слова: электропривод, математическая модель, вентильный двигатель, Simulink, MC33035P.

Object-oriented model of a valve electric drive

I.A. Shurakov^{1*}, S.I. Okhapkin¹, S.A. Yudin¹, Yu.G. Ponomarev, S.A. Mokrushin²

¹Vyatka State University, 36 Moskovskaya str., Kirov, 610000, Russia

²Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), 11 Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russia

*E-mail: usr10365@vyatsu.ru

Abstract The paper considers the topical issue of constructing an object-oriented model of an electric drive based on a valve motor, which gives a more detailed representation of the electrical, electromagnetic and mechanical processes of an electric machine. A valve electric drive with a trapezoidal back-EMF based on the MC33035R chip is considered as an object of design. The paper presents a mathematical description describing the processes of an electric machine. The object-oriented model is developed in the Simulink software package of the MATLAB environment. The main result is a demonstration of the structure of the electric drive model, which allows for research and testing of valve motor operating modes. The proposed model has passed data verification using the results of a full-scale test of a simulated valve motor based on the MC33035R chip. The presented object-oriented model allows you to remove the values of currents and voltages at any point in the stator circuit, the EMF value, the electromagnetic moment, and also allows you to evaluate the influence of each phase on the formation of the electromagnetic moment at any time, which is a significant advantage of the developed high-voltage model. Research and testing mathematical models are actively used in the design of electric drives in modern mechanical engineering, which significantly reduces the time and material costs of production.

Keywords: electric drive, mathematical model, valve motor, Simulink, MC33035P.

1. Введение

В ходе разработки системы управления электропривода важно иметь достоверный инструмент, позволяющий оценить характеристики системы и поведение её в различных условиях эксплуатации на этапе проектирования. с данной задачей справляется программный пакет Simulink среды MATLAB [1,2].

В ходе разработки системы управления вентильным электроприводом (ВД) с трапецеидальной противо-ЭДС (далее ЭДС) выявлено, что пакет Simscape (SimPowerSystems) имеет два готовых решения по моделированию ВД [4]. Данные решения позволяют получить достоверные результаты моделирования, однако использование готового решения ограничивает глубину отражения процессов, протекающих в ВД в связи невозможности «взглянуть» внутрь электродвигателя.

Таким образом данная статья посвящена разработке объектно-ориентированной модели вентильного электропривода с трапецеидальной ЭДС в программном пакете Simulink, отражающая электрические, электромагнитные и механические процессы.

2. Математическое описание.

Вентильный двигатель с трапецеидальной ЭДС представляет собой трехфазную электрическую машину, ротор которой выполнен на постоянных магнитах. При вращении ротора в обмотках статора формируется ЭДС, имеющая периодическую функцию с трапецеидальной формой, называемой трапецеидальным синусом (рисунок 1). Описание процессов преобразований строится на анализе схемы замещения статорной цепи электрической машины [3] рисунок 2).

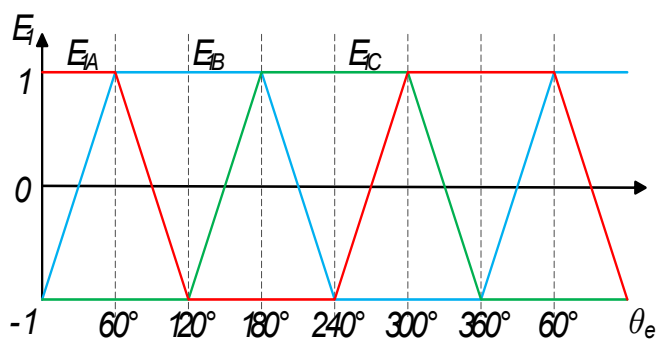


Рисунок 1. Форма сигналов противо-ЭДС электрического угла поворота ВД.

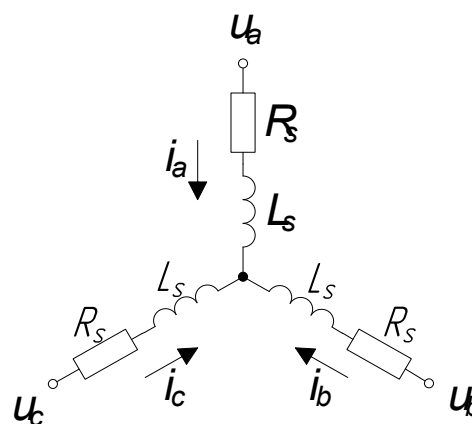


Рисунок 2. Схема замещения статорной цепи ВД.

Таким образом математическая модель ВД описывает система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_a = R_s i_a + L_{ss} \frac{di_a}{dt} - e_a; \\ u_b = R_s i_b + L_{ss} \frac{di_b}{dt} - e_b; \\ u_c = R_s i_c + L_{ss} \frac{di_c}{dt} - e_c; \\ e_a = \psi_m p_n \omega_r e_{1a}; \\ e_b = \psi_m p_n \omega_r e_{1b}; \\ e_c = \psi_m p_n \omega_r e_{1c}; \\ M_r = \psi_m p_n (i_a e_{1a} + i_b e_{1b} + i_c e_{1c}); \\ \omega_r = \frac{1}{J_\Sigma} \int (M_r - M_c) dt. \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_a, u_b, u_c – напряжения фаз статорной цепи;
 R_s – активное сопротивление статора;
 i_a, i_b, i_c – токи фаз;
 L_{ss} – индуктивности фаз;
 e_a, e_b, e_c – ЭДС фаз двигателя;
 ψ_m – потокосцепление ротора;
 p_n – число пар полюсов электродвигателя;
 ω_r – скорость вращения ротора;
 e_{1a}, e_{1b}, e_{1c} – единичная форма ЭДС двигателя;
 J_Σ – суммарный момент инерции;
 M_r, M_c – момент ротора и момент сопротивления.

3. Разработка

В разработке использованы следующие исходные данные:

- электрическая машина FL86BLS58 (таблица 1);
- напряжение питания звена постоянного тока 48 В;
- система управления ВД микросхема MC33035;
- электронный коммутатор – 6 MOSFET ключей;
- приведенный момент инерции $1,6 \cdot 10^{-4}$ кг*м².

В качестве системы управления используется контроллер MC33035. Данная микросхема является бесщеточным контроллером двигателя постоянного тока, содержащий все активные функции, необходимые для реализации управления двигателем с разомкнутым контуром. Контроллер включает в себя декодера положения, формирующий правильную последовательность коммутации, источник питания ДПР, пилообразный генератор, защитные функции и регулятор скорости. Таким образом, функции микросхемы включают в себя прямое или обратное вращение, разрешение на запуск и динамическое торможение [6].

Таблица 1. Параметры электрической машина FL86BLS58.

Наименование	Величина
Напряжение питания, В	48
Число фаз	3
Количество полюсов	8
Номинальная скорость, об/мин	3000
Номинальный крутящий момент, Нм	0.31
Мощность, Вт	110
Максимальный крутящий момент, Нм	1.03
Максимальный ток, А	11
Сопротивление между линиями, Ом	0.98
Индуктивность между линиями, мГн	2.58
ЭДС обратной связи, В/1000об/мин	8.1
Момент инерции ротора, г*см ²	1.6

Разработанная модель системы управления вентильным электропривода представлена на рисунке 3. В представленной модели используется пакет Simulink и Simscape (SimPowerSystems). Данные системы исчисления позволяют использовать схему замещения электрической машины в явном виде, совмещая с механической частью механизма, а также системы вычисления и программирования Simulink [5].

В качестве питания используется источник постоянного напряжения DC Voltage source. К его концам подключается управляемый инвертор напряжения Inverter, представляющий собой трехфазную мостовую схемы на шести МОП-транзисторах. Инвертор, на основании сигналов от системы управления, формирует трехфазную сеть, к которой подключен исследуемая модель ВД.

Модель ВД, представленная на рисунке 4, представляет собой схему замещения электрической машины, совмещенную с вычислением ЭДС, согласно математическому описанию (1). Модель имеет четырехпроводное подключение к электрической части, выходной момент ротора и вход обратной связи по скорости ротора для вычисления ЭДС машины.

Представленная объектно-ориентированная модель позволяет снимать величины токов и напряжений в любых точках статорной цепи, величины ЭДС, электромагнитного момента, а также позволяет оценить влияние каждой фазы на формирование

электромагнитного момента в любой момент времени, что является существенным преимуществом разработанной модели ВД.

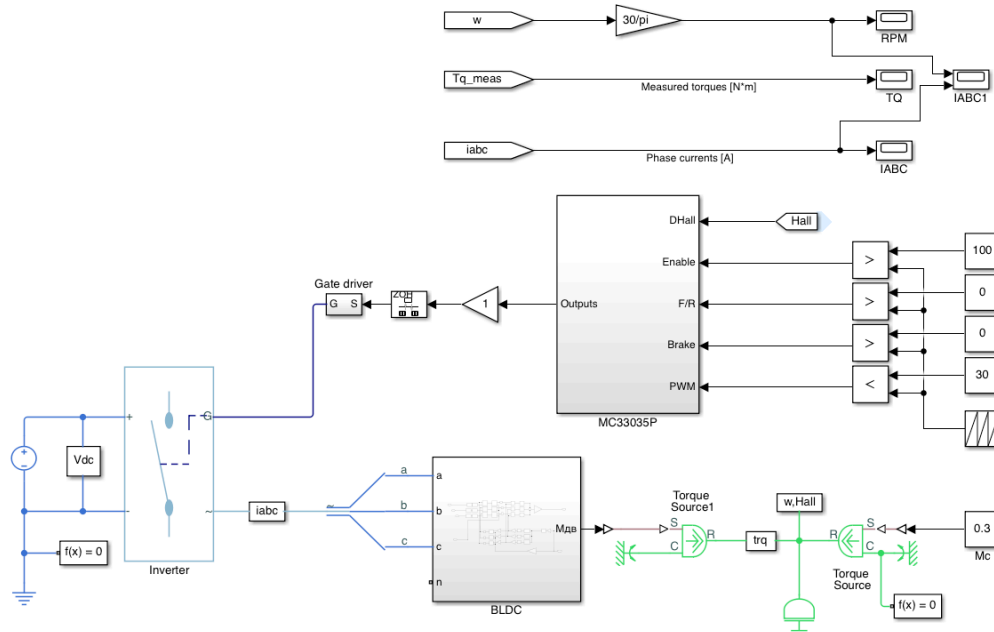


Рисунок 3. Объектно-ориентированная модель вентильного электропривода.

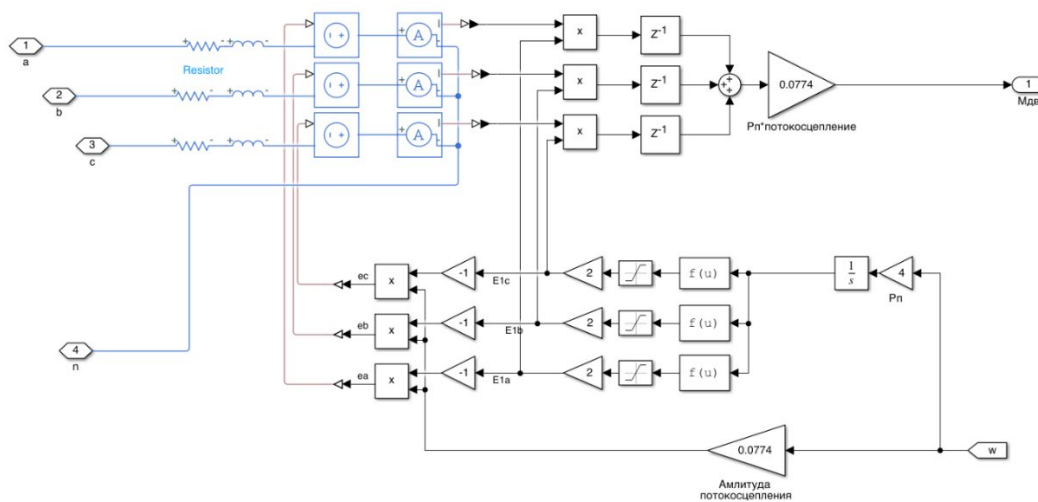


Рисунок 4. Субблок «BLDC» на основе схемы замещения.

Механическая часть электропривода состоит из маховика Inertia, формирующего эквивалентный приведенный момент инерции, двух управляемых источников механического момента Torque source, а также датчиков абсолютного положения и скорости Motion sensor, момента Torque sensor и ДПП (рисунок 5). Датчики абсолютного положения и скорости отражают объективные данные.

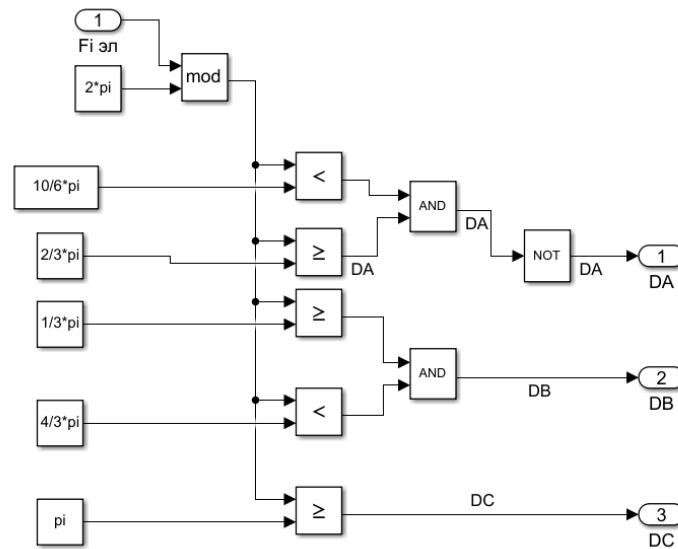


Рисунок 5. Субблок датчика положения ротора.

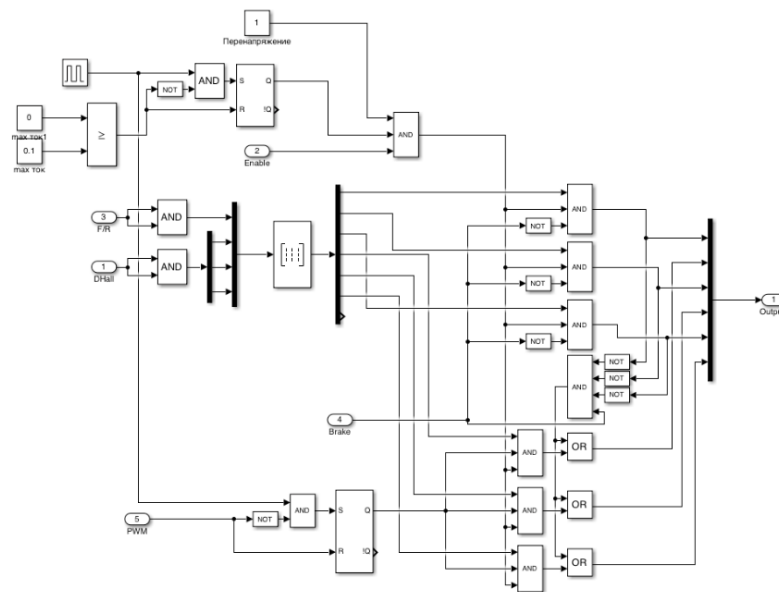


Рисунок 6. Субблок системы управления «MC33035P».

Система управления, формирующая управление ключами инвертора на основании информации от ДПР соответствует MC33035 [6] (Рисунок 6).

4. Верификация

Важнейшим показателем модели является соответствие полученных результатов с реальным объектом. На рисунках 7, 8 представлены временные диаграммы выходных величин при номинальном моменте сопротивления $M_c=0,3$ Нм.

Проведена серии опытов на виртуальном макете и реальном стенде с использованием идентичных элементов системы с использованием различных режимов работы микросхемы MC33035P. Результаты представлены в таблице 2.

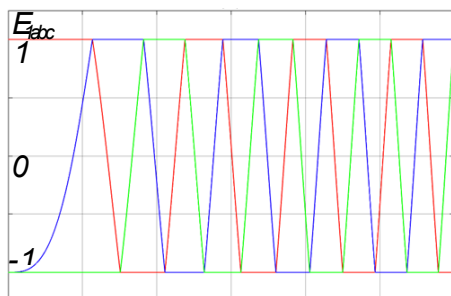


Рисунок 7. Формирование единичных сигналов противо-ЭДС.

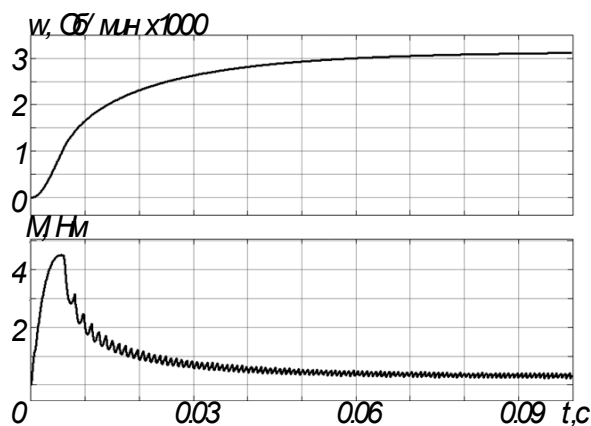


Рисунок 8. Осциллограммы скорости и момента от времени при полном управляющим воздействии и номинальном моментом сопротивления.

Таблица 2. Скорости результатов моделирования и макетного образца.

№	Enable, %	Brake, %	Скорость модель, об/мин	Скорость макет об/мин
1	100	100	3480	3420
2	90	100	2850	2550
3	80	100	2220	2220
4	70	100	1815	1800
5	60	100	1245	1200
6	50	100	675	675
7	100	90	3165	2850
8	100	80	2790	2490
9	100	70	2415	2190
10	100	60	2070	1875
11	100	50	1710	1575
12	100	40	1350	1140
13	100	30	975	840
14	100	20	615	600
15	100	10	255	300

5. Выводы

Таким образом в статье предложено корректное математическое описание вентильного двигателя, демонстрирующее электромеханические процессы.

Разработана объектно-ориентированная модель вентильного электропривода с трапецеидальной ЭДС, позволяющая оценивать процессы электродвигателя, а также данная модель позволяет изменять кривую ЭДС или электрическую цепь, что расширяет границы применения модели в исследовательской деятельности.

В последнем разделе статьи представлены результаты проведения верификации модели, что доказывает достоверность предложенного математического описания и созданной модели на её основе.

Список литературы

1. Шураков И.А. Проектирование математической модели электропривода на базе вентильного двигателя в среде Simulink / И.А. Шураков, Е.Н. Малышев, Ю.Г. Пономарев и др. // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023): Сборник материалов XXIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию ВятГУ. В 2-х томах, Киров, 12–22 июня 2023 года. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2023. – С. 98-101. – EDN WFHTEE.
2. Шураков И.А. Формирование предельных режимов вентильного электропривода / И.А. Шураков, Е.Н. Малышев, Ю.Г. Пономарев и др. // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023): Сборник материалов XXIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию ВятГУ. В 2-х томах, Киров, 12–22 июня 2023 года. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2023. – С. 93-97. – EDN YLRNUC.
3. Присмотров Н.И. Синхронные двигатели и электроприводы на их основе: учеб. пособие / Н. И. Присмотров, Ю. Г. Пономарев. – Киров: ВятГУ, 2019. – 236 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink+ CD. – 2013.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб.: КОРОНА принт. 2001.
6. Brushless DC Motor Controller [Электронный ресурс] URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc33035-d.pdf> (дата обращения: 31.03.2023).