

УДК 621.313.8

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

<sup>1</sup>Лютаревич А.Г., <sup>1</sup>Долингер С.Ю., <sup>2</sup>Лохман Е.А., <sup>1</sup>Панкрац Т.В., <sup>1</sup>Жданова В.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск,

*e-mail: Veimertysya@mail.ru;*

<sup>2</sup>ООО «Институт Микроприбор», Омск

В данной статье рассмотрены вопросы моделирования и разработки системы управления электродвигателя с постоянными магнитами, проработаны алгоритмы работы блока управления: разработана управляющая программа и математическое обеспечение блока управления электродвигателя с постоянными магнитами, представлен макет блока управления, позволяющий оценить эффективность работы электродвигателя, а также массогабаритные показатели электропривода в целом.

**Ключевые слова:** электрический двигатель с постоянными магнитами, система управления

## DEVELOPMENT OF TORQUE VECTOR CONTROL SYSTEM OF PERMANENT MAGNET MOTOR

<sup>1</sup>Ljutarevich A.G., <sup>1</sup>Dolinger S.Y., <sup>2</sup>Lokhman E.A., <sup>1</sup>Pankrats T.V., <sup>1</sup>Zhdanova V.A.

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, *e-mail: Veimertysya@mail.ru;*

<sup>2</sup>«Micropribor Institut» Ltd., Omsk

The paper provides the subject matter of modeling and development of a permanent magnet electric motor control system. Algorithms of control unit operation are explored. A control program and a math ware of permanent magnet electric motor control unit are developed. A unit control breadboard being able to value the operation efficiency of an electric motor is presented. Electric driver mass-dimensional parameters are proposed.

**Keywords:** permanent magnets electric motor, control system

В системах управления моментными электродвигателями с постоянными магнитами широкое применение находят различные измерительные преобразователи угловых и линейных перемещений в электрический сигнал [1–4]. Зачастую к этим преобразователям предъявляются высокие точностные и эксплуатационные требования. Наибольшее распространение на практике получили индукционные преобразователи электромашинного типа с электрической редукцией. Они однозначно позволяют определить угол в пределах одного шага датчика. Таким образом, разработка новых элементов, повышение их точности и улучшение эксплуатационных характеристик являются наиболее актуальными задачами, а их наличие создает предпосылки для разработки современных прецизионных автоматических устройств.

### Моделирование системы управления в приложении Simulink программного комплекса MATLAB

В настоящее время в системах управления электродвигателей с постоянными магнитами используются векторные алгоритмы управления моментом и скоростью вращения. В качестве управляющих сиг-

налов на выходные переменные инвертора используются средние за период ШИМ значения фазных токов и напряжений двигателя, которые формируются во вращающейся декартовой системе координат ( $d, q$ ), ось абсцисс которой ( $d$ ) ориентирована по направлению продольной оси ротора. Значение тока якоря электродвигателя по поперечной оси  $q$ , пропорциональное электромагнитному моменту, задается с выхода регулятора скорости. Таким образом, в системе управления электродвигателя с постоянными магнитами реализуется известный принцип регулирования координат. Значение тока якоря по продольной оси  $d$  позволяет регулировать частоту вращения электродвигателя выше основной с постоянством мощности. В системах управления электродвигателями с постоянными магнитами зачастую используются довольно сложные законы управления током по продольной оси машины, каждый из них имеет достоинства и недостатки [1–7].

На рис. 1 представлена функциональная схема системы управления электродвигателя с постоянными магнитами с непосредственной ориентацией вращающейся системы координат по положению ротора двигателя [2–4].

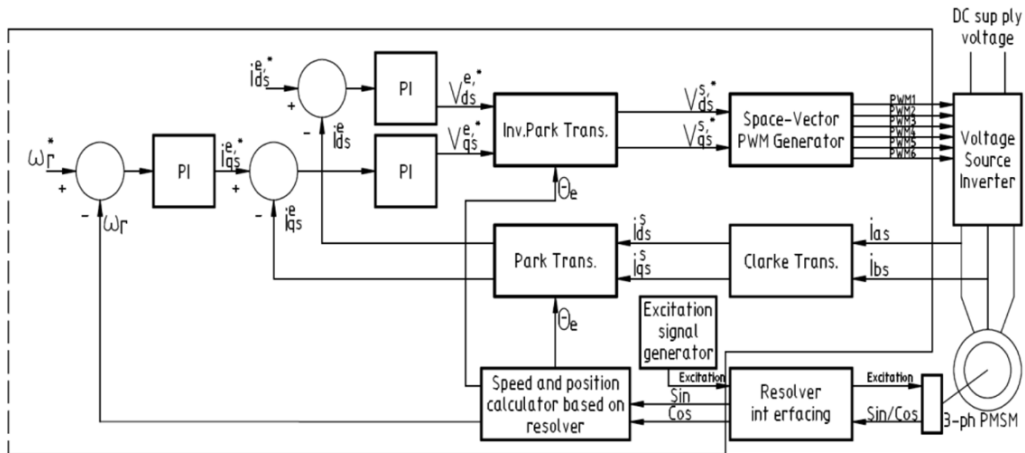


Рис. 1. Функциональная схема векторной системы управления электродвигателем с датчиком положения

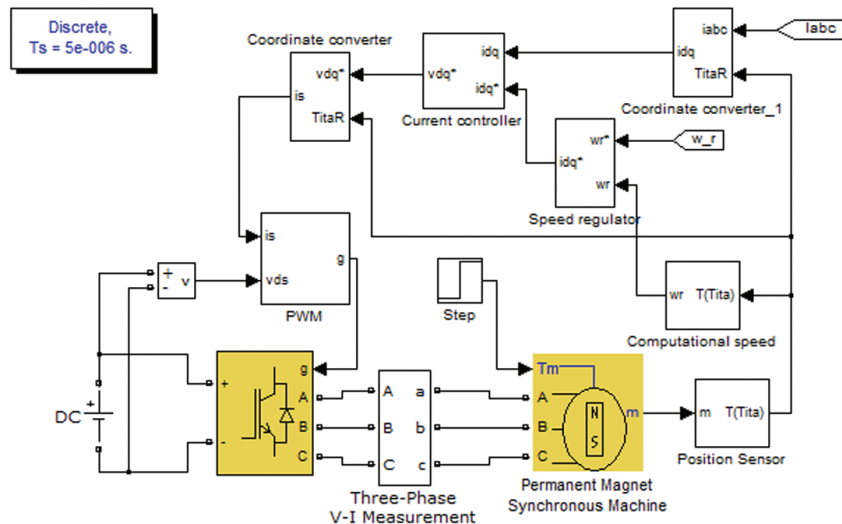


Рис. 2. Модель ВЭП переменного тока с датчиком положения ротора

При этом синусоидальная форма токов электродвигателя и компенсация пульсации момента позволит достичь максимальных диапазонов регулирования электропривода.

Для моделирования силовой части системы управления (управляемый инвертор) в приложении Simulink программного комплекса MATLAB воспользуемся стандартным блоком «Universal Bridge». Данный блок моделирует универсальный мост, позволяя выбирать количество плеч моста (от 1 до 3) и вид полупроводниковых приборов (полностью управляемые тиристоры, IGBT и MOSFET транзисторы, шунтированные обратными диодами, а так же идеальные ключи).

Модель ВЭП переменного тока с датчиком положения ротора, разработанная в приложении Simulink программного комплекса MATLAB, представлена на рис. 2. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4.

### Разработка управляющей программы

Следующим этапом разработаны и реализованы основные функциональные блоки алгоритма управления электроприводом. Векторная система управления электродвигателем с постоянными магнитами позволяет управлять вращающим моментом и потокосцеплением аналогично двигателю постоянного тока. Другими словами, вращающий момент и потокосцепление управ-

ляются независимо друг от друга. Датчик положения ротора необходим для преобразования переменных из неподвижной системы координат в синхронно вращающуюся систему координат. В результате этого преобразования (преобразование Парка),

ток по оси « $q$ » будет управлять вращающим моментом, а нулевое задание тока по оси « $d$ » обеспечивает минимизацию тока статора. Ключевую роль в данной системе управления выполняет датчик положения ротора (рис. 1).

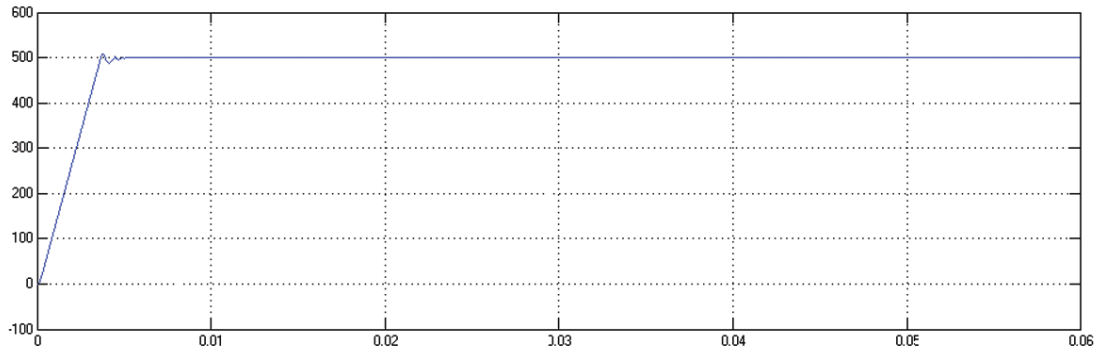


Рис. 3. Изменение угловой частоты  $\omega$  (рад/с)

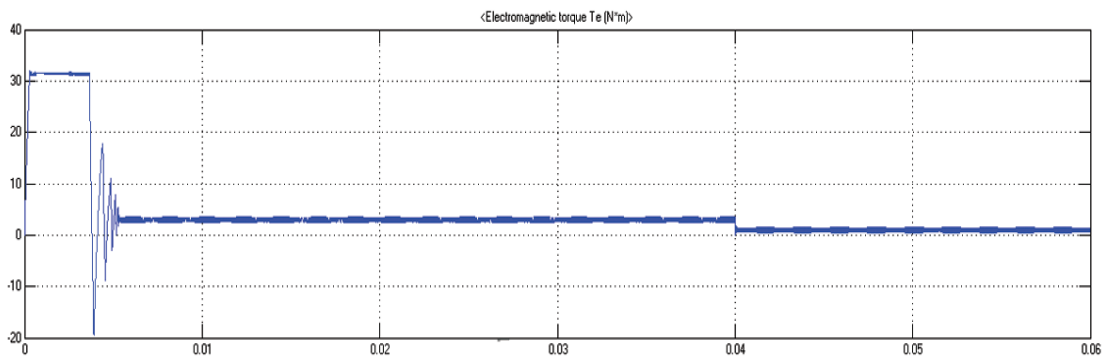


Рис. 4. Изменение электромагнитного момента  $T_e$  (Н·м)

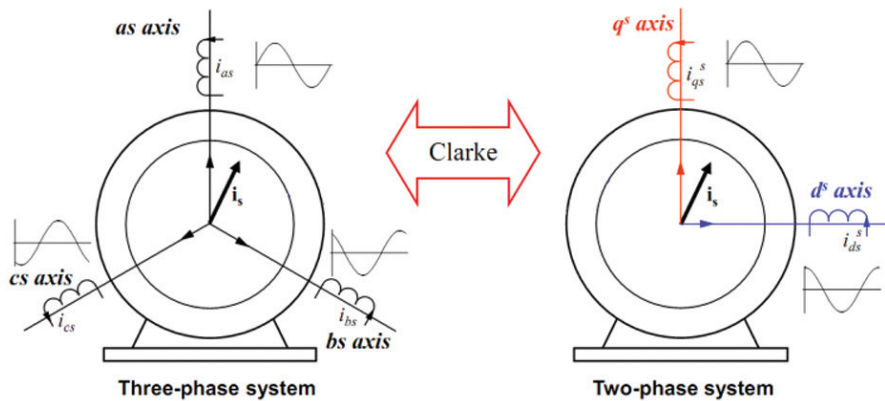


Рис. 5. Преобразование Кларка

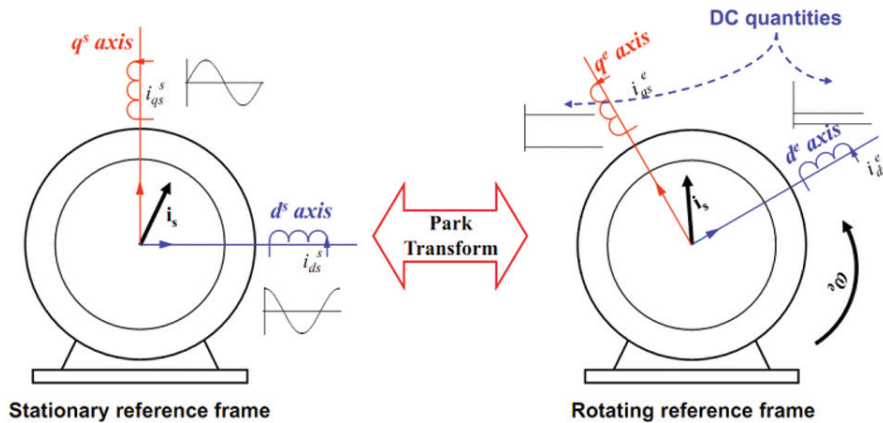


Рис. 6. Преобразование Парка

Рассмотрим основные функциональные блоки.

1. Преобразование Кларка (Clarke Transform) – предназначено для преобразования токов из трехфазной неподвижной системы координат в двухфазную неподвижную систему координат (рис. 5).

Данное преобразование описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} Id = Ia; \\ Iq = (2Ib + Ia) / \sqrt{3}. \end{cases}$$

2. Преобразование Парка (Park Transform) – предназначено для преобразования токов из двухфазной неподвижной системы координат во вращающуюся систему координат ориентированную по вектору потока сцепления ротора, где переменные преобразуются к системе постоянного тока (рис. 6).

Данное преобразование описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} ID = Id \times \cos \theta + Iq \times \sin \theta; \\ IQ = -Id \times \sin \theta + Iq \times \cos \theta. \end{cases}$$

3. Обратное преобразование Парка (Inverse Park Transform) – предназначено для преобразования постоянных токов из вращающейся системы координат в двухфазную неподвижную систему координат.

Данное преобразование описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} Id = ID \times \cos \theta - IQ \times \sin \theta; \\ Iq = ID \times \sin \theta + IQ \times \cos \theta. \end{cases}$$

4. Цифровой ПИД регулятор с компенсацией интегрального насыщения (PI) – предназначен для автоматического поддержания заданного значения переменных

(рис. 7). Может также использоваться для ПИ и ПД регулятора.

Алгоритм реализуется при помощи регулятора с передаточной функцией

$$W_p(p) = k_p + \frac{k_i}{p} + k_d p$$

5. Модуль пространственно-векторной широтно-импульсной (SV PWM) – предназначен формирования сигналов управления силовыми транзисторами инвертора. Выходное напряжение инвертора задается компонентами  $U_{\alpha}$  и  $U_{\beta}$ .

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix}.$$

### Изготовление макета блока управления

Регулятор, описанный выше, реализован и проверен в макете блока управления, выполненном на двух печатных платах (инвертора и контроллера) с применением поверхностного монтажа. Выбор элементной базы системы управления осуществлялся в соответствии с известными методиками [8].

Питание обмотки моментного двигателя переменного тока осуществляется трехфазно-симметричной системой токов (напряжений), при этом используется ставшая уже стандартной силовая схема преобразователя электрической энергии на базе транзисторного инвертора напряжения. Благодаря управлению транзисторами инвертора в режиме модифицированной синусоидальной или пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) обеспечивается близкая к синусоидальной форма токов.

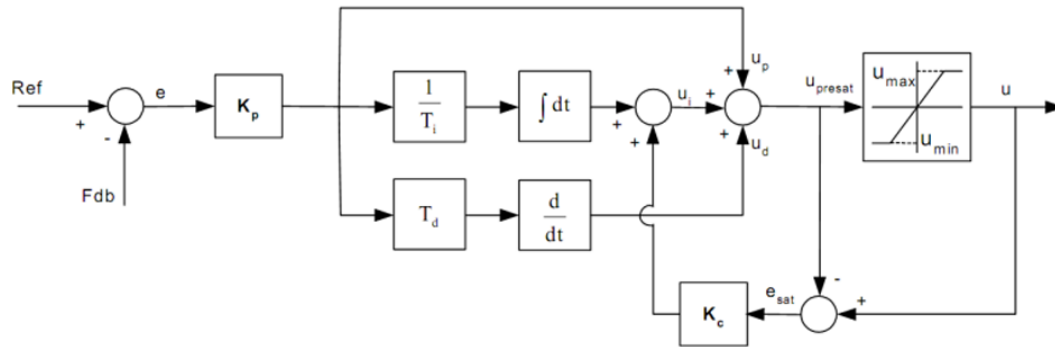


Рис. 7. Функциональная схема ПИД регулятора

Внешний вид макета блока управления представлен на рис. 8.

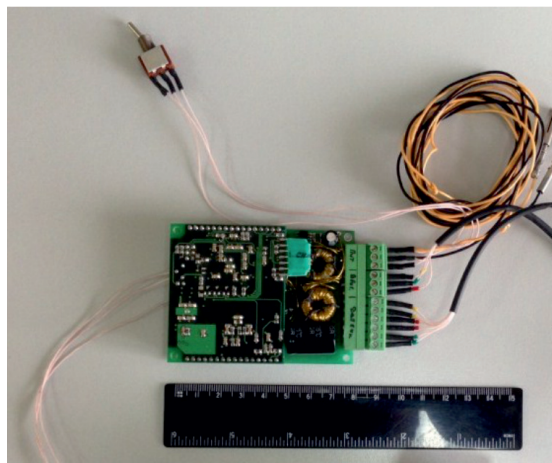


Рис. 8. Макет системы управления в сборе

### Заключение

В ходе выполнения научно-исследовательской работы создана модель двигателя с постоянными магнитами и его системы управления в приложении Simulink программного комплекса MATLAB. Результаты моделирования двигателя и системы управления подтверждают корректность работы предложенной функциональной схемы.

Проработаны алгоритмы работы блока управления: разработана управляющая программа, математическое обеспечение блока управления электрического двигателя.

Изготовлен макет блока управления, позволяющий оценить эффективность работы электродвигателя, а также массогабаритные показатели электропривода в целом.

Данные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (договор № 14. Z56.16.5570-МК).

### Список литературы

1. Ming-Shyan Wang, Ying-Shieh Kung, Nguyen Thi Hanh, Chia-Ming Chang, «Adaptive Low-speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motors», Electric Power Components and Systems, 2011, 39:6, 563-575, DOI: 10.1080/15325008.2010.528546.
2. C.-K. Lin T.-H. Liu C.-H. Lo, «Sensorless interior permanent magnet synchronous motor drive system with a wide adjustable speed range», IET Electric Power Applications, 2008, DOI: 10.1049/iet-epa:20080046.
3. Adamidis G., Koutsogiannis Z., Vagdati P. «Investigation of the Performance of a Variable-speed Drive Using Direct Torque Control with Space Vector Modulation», Electric Power Components and Systems, 2011, 39:12, 1227-1243, DOI: 10.1080/15325008.2011.567214.
4. Cheema M.A.M, Fletcher J.E. «Sensorless vector control of linear permanent magnet synchronous motor», ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, pp. 1098 – 1104, DOI: 10.1109/ECCE-Asia.2013.6579245.
5. Syed Abdul Rahman Kashif, Muhammad Asghar Saqib, «Sensorless Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Artificial Neural Network Based Estimator–An Application of the Four-Switch Three-Phase Inverter», Electric Power Components and Systems, 2014, 42:1, 1-12, DOI: 10.1080/15325008.2013.843102.
6. Gaolin Wang, Lizhi Qu, Hanlin Zhan, Jin Xu, Li Ding, Guoqiang Zhang, Dianguo Xu, «Self-Commissioning of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives at Standstill Considering Inverter Nonlinearities», Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 29, № 12, P. 6615-6627, Dec. 2014, DOI: 10.1109/TPEL.2014.2306734.
7. Guo-Ming Sung, Wei-Yu Wang & Hsiang-Yuan Hsieh, «Chip Implementation of Digital Scalar Space-vector Pulse Width Modulation for Induction Motor Drive», Electric Power Components and Systems, 2011, 39:16, 1733-1747, DOI: 10.1080/15325008.2011.615797.
8. Dolinger S.Y., Lyutarevich A.G., Osipov D.S. «Selecting parameters of power circuit of electric power quality assurance device», Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on. URL: ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7133660, DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147042.