

Научная статья / Research Article

УДК 621.311

Н.М. Олиферович¹, Ш.А. Нурмонов²¹ *Белорусский государственный технологический университет, Минск, Белоруссия*² *Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Республика Узбекистан***ЦИФРОВОЕ ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ
И БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ**

Аннотация. В статье рассмотрена реализация цифрового векторного управления асинхронным электроприводом, направленного на повышение точности и быстродействия системы. Представлены математические модели, электрическая и функциональная схемы системы, методы управления, а также результаты моделирования в MATLAB/Simulink. Показана эффективность применения цифровых контроллеров на основе современных микропроцессоров и программных средств, обеспечивающих надёжное и гибкое управление параметрами электродвигателя в реальном времени.

Ключевые слова: цифровое управление, асинхронный электропривод, векторное управление, FOC, модель двигателя, Simulink, STM32, инвертор, быстродействие, ПИД-регулятор, наблюдатель MRAS

N. M. Oliferovich¹, Sh.A. Nurmonov²¹ *Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*² *Navoi State Mining and Technological University, Uzbekistan, Navoi***ASYNCHRONOUS MOTOR DIGITAL VECTOR CONTROL
WITH INCREASED ACCURACY AND SPEED**

Abstract. The article discusses the implementation of digital vector control of an asynchronous electric drive aimed at improving the accuracy and speed of the system. Mathematical models, electrical and functional diagrams of the system, control methods, and modeling results in MATLAB/Simulink are presented. The efficiency of using digital controllers based on modern microprocessors and software that provide reliable and flexible control of electric motor parameters in real time is shown.

Keywords: *digital control, asynchronous electric drive, vector control, FOC, engine model, torque, flux, Simulink, STM32, inverter, graphs, accuracy, speed, PID controller, MRAS observer*

Введение. Развитие технологий автоматизации и цифрового управления в промышленности предъявляет всё более жёсткие требования к точности, быстродействию и надёжности электроприводов. Асинхронные двигатели, несмотря на свои конструктивные и экономические преимущества, требуют внедрения сложных алгоритмов управления для эффективного функционирования в системах с переменной нагрузкой. Векторное управление (Field-Oriented Control, FOC) представляет собой перспективный метод, обеспечивающий независимое управление потоком и моментом электродвигателя, аналогично управлению в двигателях постоянного тока. В сочетании с цифровыми контроллерами и средствами моделирования (например MATLAB/Simulink) становится возможной реализация сложных алгоритмов управления в реальном времени [1–6].

Цель исследования – обоснование и разработка цифрового векторного управления асинхронным электроприводом с высокой точностью и быстродействием.

Методы управления. В настоящее время сформировалось два основных класса векторного управления: бессенсорное (без датчика скорости, в этом случае необходим датчик тока фаз двигателя) и с датчиком скорости. Первый позволяет реализовать большую точность управления, чем второй. Преимущества векторного управления – более высокая точность регулирования, практически безынерционное управление скоростью и моментом, быстрая реакция на изменения нагрузки, плавное, без рывков, вращение двигателя в области малых частот, более экономичный расход электроэнергии. Недостатки – большая вычислительная сложность, необходимость знания параметров двигателя, колебания скорости при постоянной нагрузке больше, чем при скалярном управлении [1–4].

Таким образом, использование векторного управления более выгодно. Возможно создание математической модели для решения задачи управления асинхронным двигателем. Модель асинхронного двигателя в координатах d-q позволяет описывать его электромагнитные процессы при различных режимах работы.

Уравнения в d-q системе:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_d}{dt} &= u_d - R_s i_d + \omega_r \frac{\psi_d d\psi_q}{dt} = \\ &= u_q - R_s i_q - \omega_r \psi_d.\end{aligned}$$

Электромагнитный момент определяется как

$$T_e = \frac{3}{2} \left[\frac{P}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right],$$

где u_d, u_q – напряжения в осях d и q; i_d, i_q – токи в осях d и q; ψ_d, ψ_q – потокосцепления в осях d и q; ω_r – угловая скорость ротора; R_s – активное сопротивление обмотки статора; P – количество полюсов двигателя.

Эти уравнения формируют основу для разработки цифровых регуляторов, реализующих управление токами и моментом двигателя в реальном времени.

Цифровая система управления состоит из нескольких функциональных блоков: аналого-цифровые преобразователи (АЦП) для измерения токов и напряжений; преобразования Кларка и Парка для перевода координат abc \rightarrow $\alpha\beta \rightarrow$ dq; ПИД-регуляторы тока и скорости; блок генерации ШИМ для формирования управляющих сигналов на инвертор; инвертор, подающий напряжение на статор двигателя.

Связь между компонентами осуществляется через внутренние шины микроконтроллера или внешние интерфейсы (SPI, UART, CAN). Алгоритмы реализуются в реальном времени с частотой дискретизации от 5 до 20 кГц. Электрическая схема включает источник постоянного напряжения (DC-Bus), трёхфазный инвертор на базе IGBT или MOSFET, асинхронный двигатель, измерительные преобразователи тока, цифровой контроллер (STM32, DSP C2000) и датчик положения ротора (энкодер или датчик Холла).

Структурная схема управления иллюстрирует поток данных от измерительных цепей к микроконтроллеру и далее – к блоку ШИМ, обеспечивая замкнутую систему управления. Алгоритмы цифрового управления можно реализовать посредством программирования. Цифровое управление FOC (векторное управление) включает в себя следующие этапы: измерение токов в двух фазах и восстановление тока третьей фазы, преобразование токов в систему координат dq (трансформация), управление токами i_d и i_q с помощью ПИД-регуляторов, вычисление напряжений u_d и u_q и обратное преобразование из dq \rightarrow $\alpha\beta \rightarrow$ abc, а также формирование PWM (широтно-импульсной модуляции) сигналов и управление ключами инвертора. Для оценки положения ротора используется либо датчик, либо модель оценки (observer) на основе метода MRAS (Model Reference Adaptive System).

Для оценки эффективности системы управления была построена модель в среде MATLAB/Simulink (рис. 1) [5, 6].

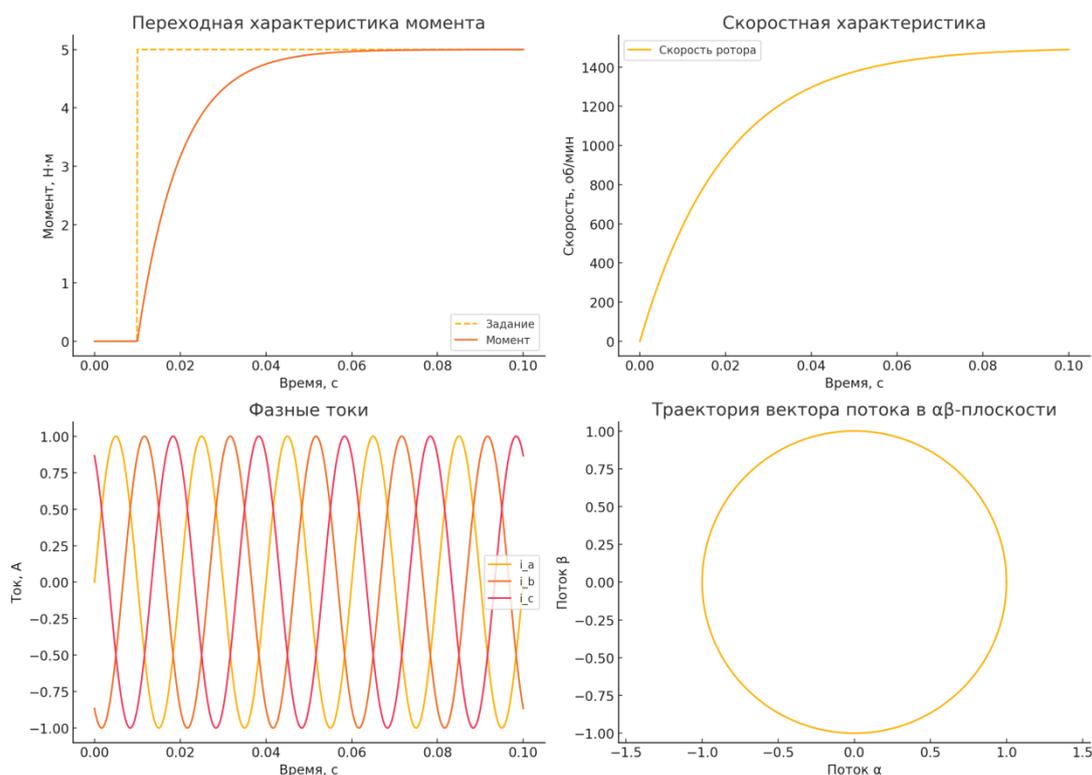


Рисунок 2 – Моделирование в среде MATLAB/Simulink.

На основании анализа полученных графических характеристик можно сделать вывод о корректной работе системы векторного управления асинхронным электроприводом. Изменение электромагнитного момента в переходных режимах происходит быстро и без значительных колебаний, что свидетельствует о высокой динамической устойчивости системы и адекватности применённого регулятора. Скоростная характеристика демонстрирует плавное нарастание частоты вращения до установившегося значения, что указывает на точность регулирования и эффективную компенсацию возмущений.

Анализ фазных токов показал, что они имеют близкую к идеальной синусоидальную форму, это подтверждает качественное формирование токов статора и минимальные гармонические искажения. Траектория вектора магнитного потока в $\alpha\beta$ -плоскости имеет практически круговую форму, что является признаком стабильного модуля потока и корректной реализации алгоритма ориентации по полю.

Таким образом, результаты моделирования и полученные характеристики подтверждают эффективность и устойчивость системы векторного управления асинхронным двигателем, обеспечивая высокие показатели динамики, точности и энергетической эффективности привода.

Заключение. Цифровое векторное управление на базе микроконтроллеров позволяет реализовать высокоточные и быстродействующие системы асинхронного электропривода. Благодаря использованию математических моделей и современных алгоритмов регулирования до-

стигается надёжное управление моментом и скоростью в широком диапазоне нагрузок. Система, построенная в среде MATLAB/Simulink и реализованная на STM32, демонстрирует высокую динамику и устойчивость. В дальнейшем планируется интеграция с сетевыми интерфейсами (EtherCAT, Modbus) и реализация энергосберегающих алгоритмов.

Список источников

1. Захаржевский О.А., Афонин В.В. Преобразования векторов в трехфазных машинах // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: XII Всерос. науч.-техн. конф.: мат-лы XII Всерос. науч.-техн. конф. / Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Саранск, 2015. С. 539–543.
2. Zakharzhevskii O.A., Afonin V.V. Amendments in Clarke's and Park's transformations according to the layout of three-phase stator windings // Научные труды SWorld. Т. 3, № 2. 2014. С. 34–38.
3. Захаржевский О.А., Афонин В.В. Уточнение модели асинхронной машины // Научные труды SWorld. Т. 8, № 2. 2013. С. 34–38.
4. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. СПб., 2002. 623 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 363 с.
6. Тюркин А.Г., Аббакумов А.А., Панкратов М.В. Моделирование искажений электроэнергетических сигналов в среде Simulink // Вычислительная техника в технологических процессах: сб. тр. III науч.-техн. конф. Одесса, 2014. С. 100–102.

References

1. Захаржевский О.А. Преобразования векторов в трехфазных машинах / О.А. Захаржевский, В.В. Афонин // В сб. XII Всерос. науч.-техн. конф. Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. - 2015. - С. 539-543.
2. Zakharzhevskii O.A. Amendments in Clarke's and Park's transformations according to the layout of three-phase stator windings / O.A. Zakharzhevskii, V.V. Afonin // Научные труды SWorld. - Т. 3. - № 2. - 2014. - С. 34-38.
3. Захаржевский О.А. Уточнение модели асинхронной машины / О.А. Захаржевский, В.В. Афонин // Научные труды SWorld. - Т. 8. - № 2. - 2013. - С. 34-38.
4. Усольцев. А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: уч. пособие / А.А. Усольцев. // СПб. - 2002. - 623 с.

5. Герман-Галкин. С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин// СПб.: КОРОНА-Век. - 2008. - 363 с.
6. Тюркин А.Г. Моделирование искажений электроэнергетических сигналов в среде Simulink / А.Г. Тюркин, А.А. Аббакумов, М.В. Панкратов // Сб. трудов III науч-техн. конф. «Вычислительная техника в технологических процессах» Одесса. - 2014. - С. 100-102.

Сведения об авторах:

Надежда Михайловна Олиферович – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники Белорусского государственного технологического университета

E-mail: oliferovich@belstu.by

Шохрухжон Акрам угли Нурмонов – магистр второго года обучения Навоийского государственного горно-технологического университета

E-mail: tovboyev70@mail.ru

Information about the authors:

Oliferovich Nadezhda Mikhailovna – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University

E-mail: oliferovich@belstu.by

Nurmonov Shokhrukhjon Akram ugli – second-year Master's degree