

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.316.71

СИДОРОВ
Даниил

Алгоритмы управления синхронными двигателями с возбуждением от
постоянных магнитов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0612-03 Системы управления информацией

Научный руководитель
МАРКОВ Александр
Владимирович
кандидат технических наук,
доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

Большинство окружающих нас материальных вещей выполнены с применением станков и специального оборудования, так или иначе имеющих в своей конструкции электроприводы различной степени сложности. Так, в сферах зеленой ветроэнергетики, лифтового оборудования, сельского хозяйства, станкостроения и других используются крупногабаритные синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов, требующие высокую точность изготовления роторов. Такие большие детали обрабатываются на дорогостоящих крупногабаритных универсальных станках с ЧПУ с рабочим окном 2,5 метра и более, что зачастую оказывается нерационально.

Эффективным решением проблемы высокой стоимости изготовления подобных роторов выступает специализированный четырехкоординатный фрезерный станок для расточки крупногабаритных роторов синхронных тихоходных электродвигателей (ФС).

Учитывая, что электродвигатели составляют значительную часть промышленного электропотребления, создание энергоэффективных систем управления электродвигателями становится все более приоритетной задачей для промышленности.

Повышение точности регулирования скорости ведет к более рациональному расходу режущего инструмента, повышению точности изготовления детали, снижению нагрузки механической конструкции ФС и его износа; повышение быстродействия приводов ФС влечет за собой сокращение времени на выполнение металлообрабатывающих операций и, соответственно, повышение производительности, что позволяет оператору ФС за установленную заработную плату выпускать большее количество изделий.

Целью данной работы является разработка алгоритма системы векторного управления позиционными синхронными электродвигателями с возбуждением от постоянных магнитов, используемыми в приводах специализированного четырехкоординатного фрезерного станка, снижающей потери на нагрев и намагничивание, тем самым повышая КПД электродвигателей, позволяющей повысить точность регулирования скорости, а также обеспечивающей быструю реакцию на изменение нагрузки.

Для достижения поставленной цели в диссертации выполнены следующие задачи:

1. Анализ предметной области и постановка технических требований, предъявляемых к разрабатываемой системе.

2. Необходимые измерения и расчеты параметров электродвигателей фрезерного станка.

3. Синтез и анализ векторной системы подчиненного регулирования электроприводами специализированного фрезерного станка.

4. Сравнительный анализ векторной и скалярной систем подчиненного регулирования электроприводами специализированного фрезерного станка.

5. Программная реализация алгоритма векторного управления электроприводами специализированного фрезерного станка на основе микроконтроллера STM32H743ZG.

В качестве упрощения синтеза синтез системы векторного управления позиционного электропривода осуществлен в два этапа. На первом этапе, описываемом в третьей главе, синтез позиционной САУ выполняется для ОУ в виде ДПТ НВ, поскольку его математическая модель является более простой по сравнению с моделью СДПМ и может быть легко налажена в среде MATLAB Simulink.

С учетом полученных результатов синтеза и анализа особенностей позиционной САУ ДПТ НВ, построенной методом подчиненного регулирования, на втором этапе, описываемом в четвертой главе, производится синтез векторной позиционной САУ для более сложной модели ОУ в виде синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). В качестве модели СДПМ используется модель «Permanent Magnet Synchronous Machine» из библиотеки Simscape Electrical.

Связь данных двух САУ постоянного и переменного токов вытекает из единого для них физического явления – электромагнитного преобразования энергии, описанного законом электромагнитной индукции Майклом Фарадеем в 1831 году.

Объектом исследования является система управления электродвигателем переменного тока.

Предметом исследования является алгоритм векторного управления синхронным электродвигателем с возбуждением от постоянных магнитов, используемого в приводах специализированного четырехкоординатного фрезерного станка.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Тема диссертационной работы соответствует следующим научным программам: пункту 2 приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2026–2030 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №135 от 1 апреля 2025 г. «Инновационные технологии в промышленности», а именно «технологии и оборудование (техника) в металлургии, машиностроении, станко- и приборостроении»; научно-исследовательской работе ГБ №21-2015, а именно этапу с 03.01.2025 по 31.12.2025 гг. «Моделирование систем управления на базе современных программируемых логических контроллеров», выполняемой на кафедре «Системы управления» учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является разработка алгоритма системы векторного управления позиционными синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов, используемыми в приводах специализированного четырехкоординатного фрезерного станка, снижающей потери на нагрев и намагничивание, тем самым повышая КПД электродвигателей, позволяющей повысить точность регулирования скорости, а также обеспечивающей быструю реакцию на изменение нагрузки.

Для достижения поставленной цели в диссертации выполнены следующие задачи:

1. Анализ предметной области и постановка технических требований, предъявляемых к разрабатываемой системе.
2. Необходимые измерения и расчеты параметров электродвигателей фрезерного станка.
3. Синтез и анализ векторной и скалярной систем подчиненного регулирования электроприводами специализированного фрезерного станка.
4. Сравнительный анализ векторной и скалярной систем подчиненного регулирования электроприводами специализированного фрезерного станка.
5. Программная реализация алгоритма векторного управления электроприводами специализированного фрезерного станка на основе микроконтроллера STM32H743ZG.

Личный вклад соискателя

Соискателем выполнены все изложенные в работе результаты и положения. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем и сотрудниками кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Апробация результатов диссертации

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, а также материалы, полученные в ходе исследования темы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- «международной научно-технической конференции ITS 2023» (Минск: БГУИР, 2023) [1–А];
- «60-й научно-технической конференции учащихся, студентов и магистрантов» (Минск: БГУИР, 2024) [2–А];
- «международной научно-технической конференции ITS 2024» (Минск: БГУИР, 2024) [3–А];
- «61-й научно-технической конференции учащихся, студентов и магистрантов» (Минск: БГУИР, 2025) [4–А], доклад отмечен почетной грамотой.

Материалы опубликованы в виде тезисов и статей в материалах к перечисленным выше конференциям. Получен диплом II-й степени на конкурсе студенческих работ БГУИР 2023 года. Имеется справка о внедрении НИР в учебный процесс, в частности результаты НИР внедрены в курс лабораторных работ по дисциплине «Теория автоматического управления» для специальностей 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» и 6-05-0611-08 «Киберфизические системы» всех форм обучения.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части, заключения, библиографического списка, двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 82 страницы, из них 77 формул, 31 рисунок, список использованных библиографических источников (23 наименования), список публикаций автора (10 наименований), 2 приложения.

Проверка на уникальность

Проведена экспертиза диссертации Сидорова Даниила «Алгоритмы управления синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов» на корректность использования заимствованных материалов с применением сетевого ресурса «Антиплагиат» в режиме «FULL» (адрес доступа: <https://antiplagiat.ru>) в on-line режиме 12.06.2025 г. В результате анализа диссертационной работы установлено, что уровень оригинальности составляет 84,97 %, при этом значительная часть совпадений (7,46 %) приходится на источники, ранее опубликованные самим автором.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены проблемы необходимости высокоточных методов обработки материалов и компонентов, особенно в области машиностроения, станкостроения и энергетики. Важнейшую роль в этих процессах играют электроприводы, которые обеспечивают управление механическими системами с высокой степенью точности. В частности, крупногабаритные синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов активно применяются в лифтовом оборудовании, ветроэнергетике и других высокотехнологичных отраслях. Производство роторов для таких двигателей требует высокой точности обработки, однако традиционные универсальные станки с числовым программным управлением (ЧПУ), имеющие рабочее окно 2,5 метра и более, часто оказываются нерациональными с точки зрения затрат и эффективности.

Возрастающий спрос на энергоэффективные и высокоточные технологии обработки материалов подчеркивает необходимость разработки специализированных станков и систем управления электроприводами, оптимизированных под конкретные задачи. В особенности, в диссертации приведено описание специализированного четырехкоординатного фрезерного станка (ФС), предназначенного для расточки роторов крупных синхронных электродвигателей. Оптимизация системы управления таким станком позволяет не только повысить точность обработки, но и существенно снизить затраты на производство, уменьшить износ оборудования и повысить общую производительность.

Данная магистерская диссертация посвящена исследованию методов управления синхронными электродвигателями с возбуждением от постоянных магнитов, применяемыми в позиционных приводах специализированного фрезерного станка. Работа направлена на разработку алгоритма векторной системы управления, способной минимизировать потери на нагрев и намагничивание, повысить коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателей, а также обеспечить точность регулирования скорости и быструю реакцию на изменение нагрузки.

В общей характеристике работы показана связь работы с приоритетными направлениями научных исследований, цель и задачи исследования, личный вклад соискателя ученой степени, апробация результатов диссертации.

В первой главе магистерской диссертации описаны объект управления в виде специализированного фрезерного станка (ФС) и его текущая трехконтурная

позиционная скалярная САУ, в позиционных приводах которого находятся объекты управления – синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Рассматриваются недостатки скалярной САУ, формируются требования к синтезируемой векторной САУ.

Во второй главе проводятся измерения параметров ЭД в виде коэффициента машины по моменту, сопротивления и индуктивности фаз; проводятся расчеты электромагнитной и электромеханической постоянных времени для упрощенной и векторной структурных схем, объектом управления в которых являются ДПТ НВ и СДПМ соответственно.

Третья глава посвящена синтезу упрощенной трехконтурной позиционной структурной схеме электропривода ФС, в качестве объекта управления (ОУ) которого выступает двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ); производится учет ЭДС вращения электродвигателя (ЭД), синтез и анализ контуров управления тока, скорости и положения, приводятся математические модели ДПТ НВ и задатчика интенсивности.

В четвертой главе синтезируется трехконтурная позиционная векторная структурная схема ЭП ФС, в качестве ОУ которого выступает СДПМ; приводятся математическая модель СДПМ и системы координат, используемые при ее описании; приводится выражение, показывающее отличия структуры СДПМ от ДПТ НВ; описывается реализация ШИМ управляющего сигнала напряжения; приводится алгоритм трехконтурной позиционной векторной САУ СДПМ; производится сравнение синтезированной трехконтурной позиционной векторной САУ СДПМ с текущей трехконтурной позиционной скалярной САУ СДПМ на основании описания текущей САУ в первой главе магистерской диссертации.

В пятой главе выполнена программная реализация алгоритма векторного управления электроприводами специализированного фрезерного станка на основе микроконтроллера STM32H743ZG.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы был проведен анализ существующей трехконтурной позиционной скалярной САУ электроприводов специализированного четырехкоординатного фрезерного станка для расточки крупногабаритных роторов синхронных тихоходных электродвигателей, в ходе которого были сформированы требования и задачи к синтезу трехконтурной позиционной векторной САУ ФС, главными из которых являются: быстрая реакция на изменение нагрузки, более эффективное энергопотребление, большой диапазон и высокая точность регулирования скорости.

Для выполнения поставленных задач были проведены необходимые измерения и расчеты параметров СДПМ, применяемого в качестве привода исполнительного механизма координатных осей фрезерного станка с ЧПУ, исследован математический аппарат ДПТ НВ и систем подчиненного регулирования. Далее был проведен синтез трехконтурной позиционной структурной САУ ДПТ НВ с учетом ЭДС вращения ЭД и с настройкой контуров тока и скорости на модульный и симметричный оптимумы соответственно, показатели качества которых удовлетворяют практическим требованиям к системе. Также была приведена математическая модель задатчика интенсивности.

В процессе исследования математической модели синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов было получено соответствие, отображающее сходство и различие структур ДПТ НВ и СДПМ, которое необходимо учитывать при преимущественности использования методов синтеза регуляторов тока и расчета их параметров. Была приведена математическая модель СДПМ и системы координат, используемые при ее описании.

С учетом полученных результатов синтеза и анализа особенностей позиционной САУ ДПТ НВ был произведен синтез векторной позиционной САУ для более сложной модели ОУ в виде СДПМ. В качестве модели двигателя на постоянных магнитах была использована стандартная модель синхронного двигателя «Permanent Magnet Synchronous Machine» из библиотеки Simscape Electrical. Питающее напряжение двигателя формировалось автономным инвертором напряжения с использованием пространственно-векторной ШИМ.

В результате проведенной работы по синтезу и анализу трехконтурной позиционной векторной САУ СДПМ в аналогичных условиях получены более быстрые с меньшим перерегулированием ПП при меньших фазных токах электромашины.

В процессе сравнения трехконтурных позиционных существующей

скалярной и синтезированной векторной САУ ЭП ФС получено, что в типовом режиме работы при трапецеидальном графике задания скорости векторная САУ демонстрирует на **15%** более высокую энергетическую эффективность по сравнению со скалярной САУ.

В диссертационной работе была модернизирована существующая трехконтурная позиционная САУ электроприводов специализированного четырехкоординатного фрезерного станка в среде STM32CubeIDE на базе микроконтроллера STM32H743ZG на языке C++.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1–А. Сидоров, Д. Способ упреждающего токоограничения электромашины / Сидоров, Д., Марков А.В. // Information Technologies and Systems 2023 (ITS 2023): материалы международной научной конференции, Минск, 22 ноября 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2023. – С. 35–36.

2–А. Сидоров, Д. Анализ качества прогнозирования сигналов в дискретных системах управления / Д. Сидоров // Информационные технологии и управление: материалы 60-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2024 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2024. – С. 14–15.

3–А. Сидоров, Д. Применение пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции в автономных инверторах напряжения / Д. Сидоров // Information Technologies and Systems 2024 (ITS 2024): материалы международной научной конференции, Минск, 20 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2024. – С. 31.

4–А. Сидоров, Д. Сравнительный анализ скалярной и векторной систем управления синхронным электродвигателем / Д. Сидоров // Информационные технологии и управление: материалы 61-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 21-25 апреля 2025 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2025. – В печати.

5–А. Сидоров, Д. Модифицированный алгоритм сжатия данных / Д. Сидоров, Л. В. Митьковец, А. Б. Гуринович // Information Technologies and Systems 2021 (ITS 2021): материалы международной научной конференции, Минск, 24 ноября 2021 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2021. – С. 140–141.

6–А. Сидоров, Д. Модифицированный алгоритм сжатия данных / Д. Сидоров, Л. В. Митьковец // Информационные технологии и управление: материалы 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 19-23 апреля 2021 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2021. – С. 161.

7–A. Sidorov D. JBE. Concept and application / D. Sidorov, L. Mitskovets, A. Gourinovich // PROFESSIONAL STUDIES: Theory and Practice. – 2021. – №9 (24). – P.75–80.

8–A. Sidorov D. JBE. Concept and application / D. Sidorov, Mitskovets L, A. Gourinovich // Verslas, naujos technologijos ir išmani visuomenė: tarptautinės studentų mokslinės praktinės konferencijos medžiaga, Šiauliai, 2021 m. gegužės 6 d. / Šiaulių Valstybinė Kolegija. – Šiauliai, 2021. – P. 133–139.

9–А. Сидоров, Д. Процесс разработки разведывательных беспилотных летательных аппаратов / Д. Сидоров // Информационные технологии и управление: материалы 58-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 18-22 апреля 2022 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2022. – С. 123.

10–А. Сидоров, Д. Построение системы передачи данных беспилотных летательных аппаратов / Д. Сидоров // Information Technologies and Systems 2022 (ITS 2022): материалы международной научной конференции, Минск, 23 ноября 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2022. – С. 113–114.