

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет  
**«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)**  
Кафедра систем автоматического управления

**Курсовая работа**  
по дисциплине  
**«Электроприводные системы подвижных объектов»**

Студент группы 9492

Викторов А.Д.

Преподаватель

Гаврилов С.В.

Санкт-Петербург

2024

# Введение

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) востребованы в различных областях индустрии и бытовых приложений благодаря своей высокой энергоэффективности, компактности и надёжности. Они находят применение в таких сферах, как промышленное оборудование, системы автоматизации, транспорт, бытовая техника и альтернативная энергетика. Особенности конструкции, включающие использование постоянных магнитов на роторе, позволяют значительно снизить потери энергии, повысить плотность мощности и улучшить эксплуатационные характеристики.

В современных условиях возрастающего спроса на энергоэффективные решения, СДПМ играют ключевую роль в обеспечении экологически чистых технологий. Это обуславливает необходимость разработки и совершенствования систем управления, способных обеспечивать высокую точность регулирования, минимизацию энергопотребления и надёжную эксплуатацию оборудования.

Данная курсовая работа посвящена разработке и настройке системы управления для электропривода с синхронным двигателем на постоянных магнитах. В рамках исследования рассматриваются теоретические основы работы таких двигателей, выбираются оптимальные методы управления и моделируются алгоритмы для достижения максимальной эффективности работы системы.

## Постановка задачи

1. Исследование теоретических основ работы синхронного двигателя с постоянными магнитами.
2. Выбор архитектуры системы управления.

3. Моделирование и проверка алгоритмов управления.
4. Реализация системы в области программно-аппаратной части.

## Теоретическая часть

### Принцип работы СДПМ

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) включают ротор, основанный на постоянных магнитах, и статор, содержащий обмотки, в которых генерируется магнитное поле. Основным принципом работы этих двигателей заключается во взаимодействии магнитного поля ротора с вращающимся полем статора, что приводит к созданию крутящего момента и вращению ротора с синхронной скоростью.

### Уравнения электромагнитных процессов

Основные уравнения, описывающие работу СДПМ, можно выразить следующим образом:

Уравнения напряжений в обмотках статора:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q, \quad u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d, \quad (1)$$

где  $u_d, u_q$  — составляющие напряжения в  $d$ - и  $q$ -осях;  $R_s$  — сопротивление обмоток статора;  $i_d, i_q$  — составляющие тока в  $d$ - и  $q$ -осях;  $\psi_d, \psi_q$  — потокосцепления;  $\omega$  — угловая скорость вращения.

Уравнения потокосцеплений:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m, \quad \psi_q = L_q i_q, \quad (2)$$

где  $L_d, L_q$  — индуктивности в  $d$ - и  $q$ -осях;  $\psi_m$  — потокосцепление от постоянных магнитов.

Электромагнитный момент:

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d), \quad (3)$$

где  $T_e$  — электромагнитный момент;  $p$  — число пар полюсов.

Механическое уравнение движения ротора:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B\omega, \quad (4)$$

где  $J$  — момент инерции ротора;  $T_L$  — нагрузочный момент;  $B$  — коэффициент вязкого трения.

### Пояснение к уравнениям

Уравнения напряжений описывают динамику токов в обмотках статора в зависимости от приложенного напряжения и параметров двигателя. Уравнения потокосцеплений связывают токи с магнитным потоком, включая вклад постоянных магнитов на роторе. Уравнение электромагнитного момента показывает, как взаимодействие токов и потокосцеплений формирует вращающий момент. Механическое уравнение описывает движение ротора под воздействием моментов.

Эти уравнения являются основой для разработки систем управления, таких как векторное управление и управление с ориентацией на поле (FOC).

Также важно отметить, что синхронные двигатели с постоянными магнитами обладают высокой точностью и стабильностью работы благодаря отсутствию скольжения, что делает их незаменимыми в системах, требующих высокой точности позиционирования. Включение блока управления позволяет регулировать частоту и амплитуду питающего напряжения для достижения оптимальной работы двигателя.

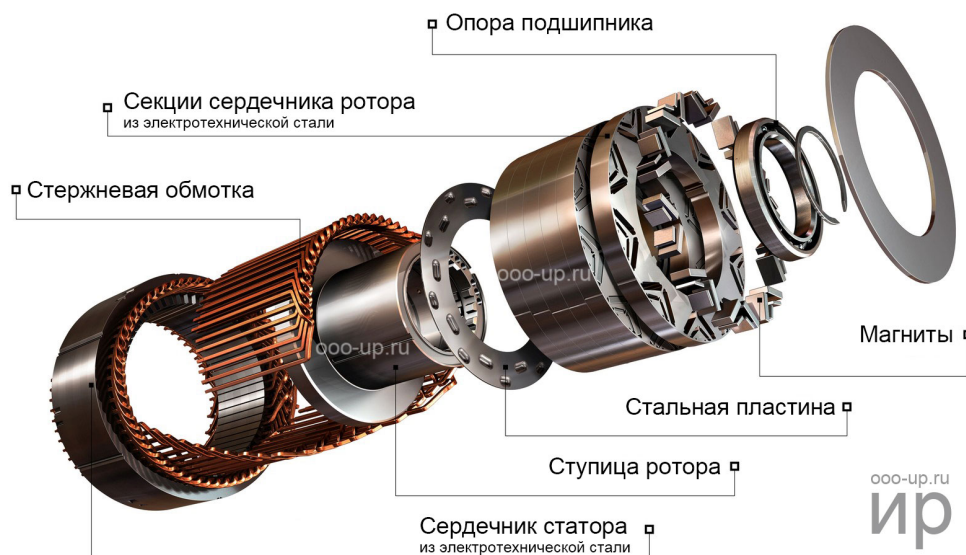


Рис. 1: Структура статора и ротора СДПМ

## Преимущества и области применения

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) имеют широкий спектр преимуществ, которые делают их привлекательными для использования в различных отраслях. Одним из основных достоинств является высокая энергоэффективность, достигаемая благодаря минимальным потерям на возбуждение. Конструкция с постоянными магнитами обеспечивает также компактность и высокую плотность мощности, что критически важно в условиях ограниченного пространства.

Особое внимание следует уделить применению СДПМ в области робототехники. В современных робототехнических системах такие двигатели используются для обеспечения прецизионного управления движением, особенно в манипуляторах, автоматических транспортных средствах и других мобильных роботах. Высокая точность работы двигателей позволяет значительно улучшить точность позиционирования, что особенно важно для выполнения сложных операций, таких как сборка, сварка или работа в условиях, где требуется минимальный допуск.

Кроме того, СДПМ находят широкое применение в электромобилях и беспилотных летательных аппаратах, где компактность и энергоэф-

фективность играют ключевую роль. Например, использование таких двигателей позволяет увеличить запас хода транспортных средств за счёт более эффективного использования энергии аккумуляторов. Также в промышленных системах автоматизации СДПМ обеспечивают точное выполнение операций при минимальном энергопотреблении.



Рис. 2: Применение СДПМ в робототехнике

## Разработка системы управления

### Выбор методов управления

Для управления синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) используется несколько методов, каждый из которых имеет свои особенности и область применения. Ниже представлены основные подходы к управлению:

### Скалярное управление

Скалярное управление, также известное как управление по  $U/f$ , является наиболее простым методом. В основе лежит поддержание постоян-

ного соотношения между напряжением и частотой питания двигателя, что позволяет управлять скоростью вращения ротора. Этот метод предполагает регулирование входного напряжения и частоты таким образом, чтобы величина магнитного потока в двигателе оставалась постоянной. Преимущества скалярного управления включают простоту реализации и невысокую стоимость. Однако этот метод обладает рядом ограничений, таких как снижение точности управления при низких скоростях.

## Основные уравнения скалярного управления

Соотношение между напряжением и частотой:

$$\frac{U}{f} = \text{const}, \quad (5)$$

где  $U$  — амплитуда входного напряжения,  $f$  — частота питания двигателя.

Момент двигателя:

$$T_e \propto \frac{U^2}{f^2}, \quad (6)$$

где  $T_e$  — электромагнитный момент двигателя. Это уравнение показывает, что при увеличении частоты необходимо пропорционально увеличивать напряжение, чтобы сохранить стабильный момент.

Уравнение магнитного потока:

$$\psi \propto \frac{U}{f}, \quad (7)$$

где  $\psi$  — потокосцепление. Для поддержания оптимального магнитного потока важно сохранять соотношение  $U/f$  неизменным.

## Алгоритм реализации

Скалярное управление обычно реализуется следующим образом:

1. Определяется требуемая скорость вращения ротора.

2. Рассчитывается соответствующая частота питания двигателя.
3. Вычисляется необходимое напряжение с учётом постоянного соотношения  $U/f$ .
4. Формируется сигнал для инвертора, который обеспечивает подачу рассчитанных напряжения и частоты.

## Преимущества и недостатки

Преимущества скалярного управления:

- Простота реализации.
- Низкая стоимость оборудования.
- Подходит для приложений с невысокими требованиями к точности управления.

Недостатки:

- Снижение эффективности при низких скоростях.
- Ограниченные возможности динамического управления.
- Необходимость использования внешних датчиков для компенсации неустойчивости.

Скалярное управление часто используется в системах, где требования к точности невысоки, например, в насосах, вентиляторах и других установках с постоянной нагрузкой. Однако в системах, требующих высокой точности и быстродействия, предпочтение отдают более сложным методам, таким как векторное управление или управление с ориентацией на поле (FOC).



## Векторное управление

Векторное управление (Field-Oriented Control, FOC) является одним из самых популярных и эффективных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. Этот подход позволяет управлять электромагнитным моментом двигателя независимо от магнитного потока, что обеспечивает высокую точность и динамичность системы.

### Принципы работы векторного управления

Основная идея векторного управления заключается в преобразовании трёхфазной системы координат статора в двухфазную систему координат  $dq$ , которая вращается синхронно с магнитным полем ротора. Это позволяет разделить токи статора на две компоненты:

- $i_d$  — составляющая тока, ответственная за создание магнитного потока.
- $i_q$  — составляющая тока, отвечающая за создание электромагнитного момента.

### Основные уравнения векторного управления

Уравнения преобразования в систему координат  $dq$ :

$$i_d = \frac{2}{3} \left( i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \right), \quad (8)$$

$$i_q = \frac{2}{3} \left( 0 + \frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \right), \quad (9)$$

где  $i_a, i_b, i_c$  — токи фаз статора.

Электромагнитный момент двигателя:

$$T_e = \frac{3}{2}p\psi i_q, \quad (10)$$

где  $p$  — число пар полюсов,  $\psi$  — потокосцепление ротора.

Управляющие напряжения в системе координат  $dq$ :

$$v_d = R_s i_d - \omega \psi + L_d \frac{di_d}{dt}, \quad (11)$$

$$v_q = R_s i_q + \omega L_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt}, \quad (12)$$

где  $R_s$  — сопротивление обмотки статора,  $L_d$ ,  $L_q$  — индуктивности по осям  $d$  и  $q$ ,  $\omega$  — угловая скорость.

## Алгоритм реализации

Измерение токов фаз статора ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ).

Преобразование токов в систему координат  $dq$ .

Вычисление требуемых значений  $i_d$  и  $i_q$  в зависимости от заданного момента и потока.

Расчёт управляющих напряжений  $v_d$  и  $v_q$  с использованием регуляторов ПИД.

Обратное преобразование из координат  $dq$  в трёхфазную систему для подачи сигналов на инвертор.

## Преимущества и недостатки

Преимущества:

- Высокая точность управления моментом и скоростью.
- Хорошая динамическая характеристика.
- Оптимизация энергопотребления.

Недостатки:

- Сложность реализации.
- Высокие требования к вычислительным ресурсам контроллера.

- Необходимость точного определения параметров двигателя.

Векторное управление является стандартом для высокоточных и динамичных приложений, таких как робототехника, электромобили и авиационные системы.

## Управление с ориентацией на поле (FOC)

Управление с ориентацией на поле (Field-Oriented Control, FOC) является разновидностью векторного управления, которое обеспечивает независимое регулирование магнитного потока и электромагнитного момента двигателя. Этот метод позволяет достичь высокой точности управления и оптимального использования энергии.

### Основные уравнения FOC

Компоненты токов в системе координат  $dq$ :

$$i_d = \frac{2}{3} \left( i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \right), \quad (13)$$

$$i_q = \frac{2}{3} \left( 0 + \frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \right). \quad (14)$$

Управление потоком и моментом через токи:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m, \quad (15)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi i_q, \quad (16)$$

где  $\psi_m$  — потокосцепление ротора из-за постоянных магнитов.

Уравнения для расчёта напряжений:

$$v_d = R_s i_d - \omega \psi_q + L_d \frac{di_d}{dt}, \quad (17)$$

$$v_q = R_s i_q + \omega \psi_d + L_q \frac{di_q}{dt}. \quad (18)$$

## Алгоритм реализации

Измерение токов фаз статора.

Преобразование токов в систему координат  $dq$ .

Регулирование компонент  $i_d$  и  $i_q$

## Моделирование системы управления

На рисунке 3 представлена система управления СДПМ построенная согласно описанным выше алгоритмам управления.

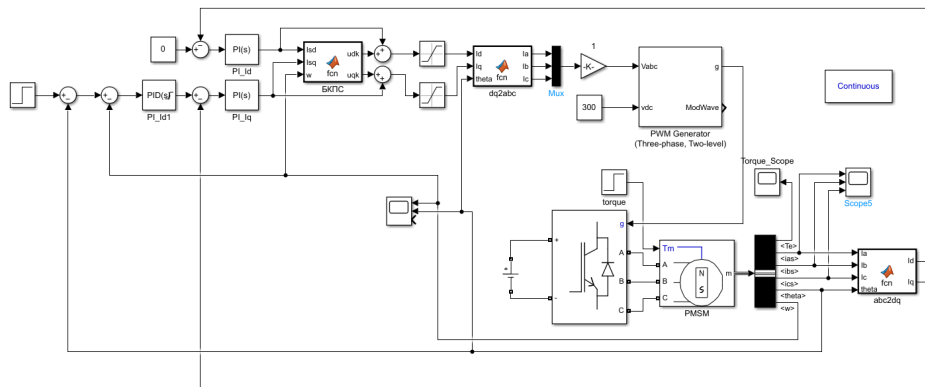


Рис. 3: Система управления СДПМ

На рисунке 4 представлены графики токов СДПМ при моделировании с построенной системой управления.

На рисунке 5 представлены графики изменения угла ротора СДПМ и задание на угол поворота при моделировании с построенной системой управления. Само собой не стояло цели подобрать коэффициенты всех регуляторов для того, чтобы двигатель моментально отрабатывал все задания, но проведенное моделирование показывает, что цель - построить систему управления СДПМ достигнута

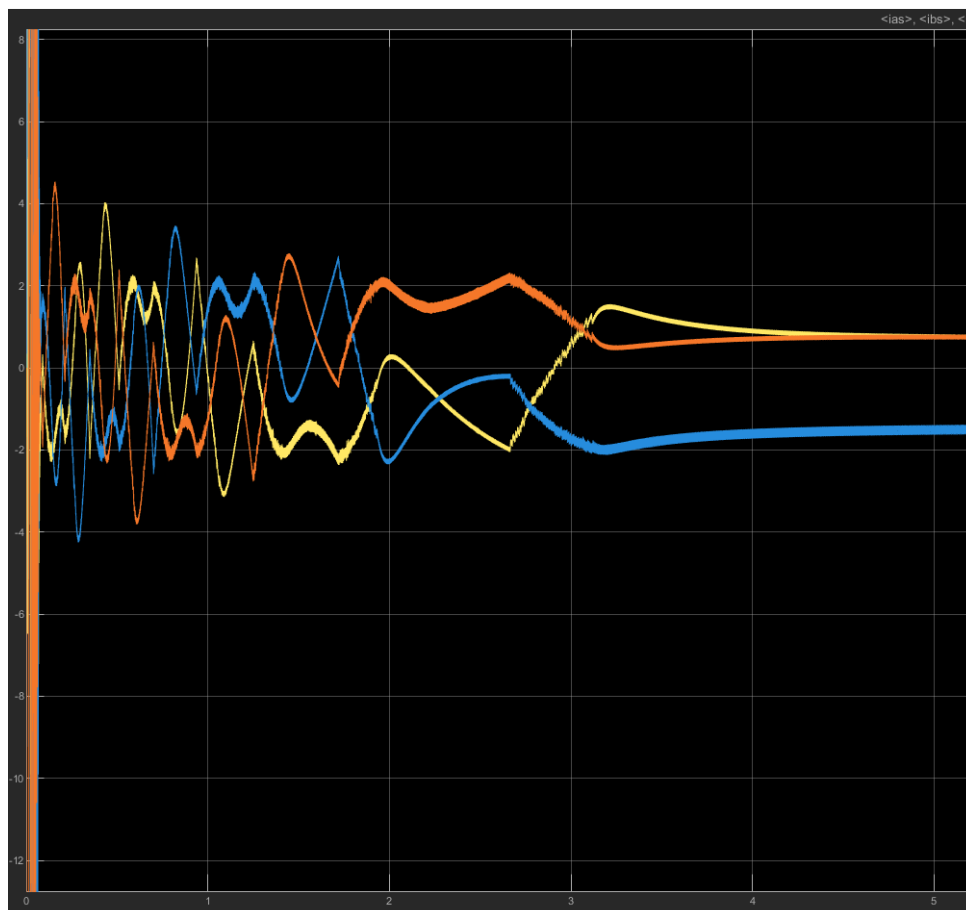


Рис. 4: График токов фаз СДПМ при моделировании

## Выводы

В ходе выполнения курсовой работы была выполнена разработка системы управления электроприводом с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ). Рассмотрены теоретические основы работы СДПМ, проведён анализ существующих методов управления, а также детально изучены их принципы работы и области применения. На основе проведённого анализа сформированы следующие выводы:

Актуальность использования СДПМ СДПМ являются одним из наиболее перспективных типов электродвигателей благодаря высокой энергоэффективности, надёжности и компактным размерам. Эти преимущества делают их оптимальным выбором для применения в робототехнике, транспортных системах, промышленных установках и других областях.

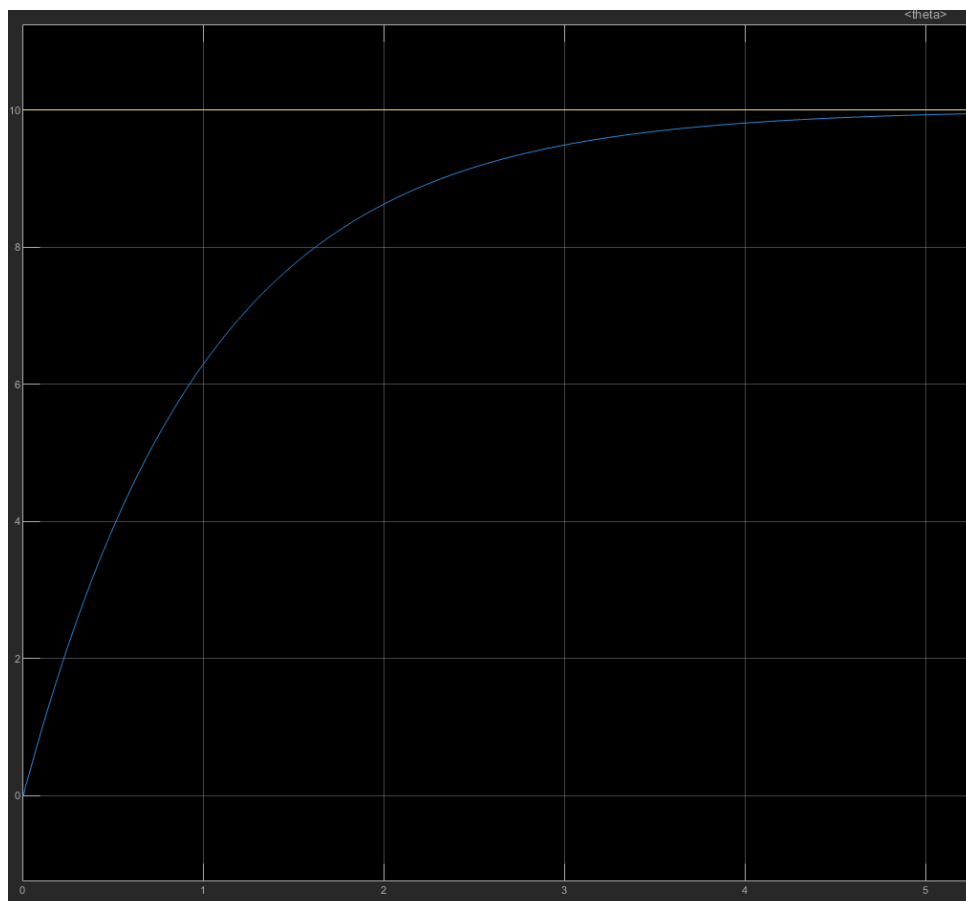


Рис. 5: График токов фаз СДПМ при моделировании

Разнообразие методов управления Рассмотрены три основных метода управления: скалярное управление, векторное управление и управление с ориентацией на поле.

Скалярное управление характеризуется простотой реализации, но ограничено в точности и динамических возможностях. Векторное управление обеспечивает независимое управление моментом и магнитным потоком, что делает его подходящим для высокоточных приложений. Управление с ориентацией на поле (FOC) демонстрирует максимальную эффективность благодаря оптимизации работы двигателя при разных нагрузках. Применение методов управления Для выбора метода управления необходимо учитывать требования к точности, динамике и эффективности системы. Для робототехники и других высокотехнологичных приложений наиболее предпочтительны методы векторного управления и управления

с ориентацией на поле, так как они обеспечивают высокую точность и быстроедействие.

Математическое описание работы СДПМ Разработаны математические модели, описывающие работу двигателя и методы управления. Они позволяют моделировать и оптимизировать процессы управления, что критически важно для сложных приложений, таких как робототехника и автоматизированные системы.

Практическая значимость работы Результаты данной работы могут быть использованы для разработки систем управления СДПМ в различных областях промышленности и техники. Модели и алгоритмы, рассмотренные в работе, обеспечивают основу для внедрения энергоэффективных и высокоточных решений.

**Резюмируя**, проведённое исследование подтвердило, что грамотный выбор и настройка методов управления являются ключевыми факторами, обеспечивающими успешное применение СДПМ в современном инженерном мире. Это позволяет достигать высокой эффективности, точности и надёжности электроприводов, что открывает новые горизонты для их использования в самых передовых технологиях.