

Богданов Андрей Николаевич

**Управление с прогнозированием в системах с малым числом
переменных состояния на примере систем электропривода**

Специальность 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы
(технические науки)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре электромеханики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: Анучин Алексей Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
зав.каф кафедрой Автоматизированного
Электропривода ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные

оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится « » 2022 г. в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.102 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, корпус В, ауд. В-308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МЭИ.102 к.т.н., доцент

(подпись)

Цырук С.А.

Актуальность проблемы. Системы управления с прогнозированием приобретают всё большую популярность в промышленности вместе с развитием вычислительных мощностей цифровых систем управления. Начало промышленного применения систем управления с прогнозированием началось с внедрением исследований проф. И. Хольца в тяговых электроприводах в середине 1980-х годов и разработки японскими учёными И. Такахаши и Т. Ногучи системы прямого управления моментом в то же время. Разработанные ими системы относятся к классу систем управления с прогнозированием с конечным набором управляющих воздействий, которые имеют такие недостатки, как шум широкого спектра из-за непостоянной частоты коммутации силовых ключей. Данные системы получили развитие и находят применение в промышленных преобразователях частоты. Кроме того, появились системы управления с прогнозированием, где была применена широтно-импульсная модуляция (ШИМ) напряжения питания электродвигателя, а задание вычислялось путём решения уравнений баланса напряжений. Однако такой подход имеет проблемы с расчётом управляющего воздействия для существенно нелинейных объектов (насыщение электродвигателя), в процессе выхода силового преобразователя на ограничение по напряжению и т.д. В настоящее время разрабатываются и методы градиентного спуска для быстрого поиска оптимального управляющего воздействия, но они требуют больших вычислительных ресурсов и иногда имеют существенную ошибку, если истинное решение было перепутано с локальным минимумом целевой функции.

С развитием микроконтроллеров помимо вычислительной мощности быстро растёт объем их памяти. Данное обстоятельство позволяет решить задачу управления с прогнозированием, используя заранее рассчитанные таблицы оптимального управления для всех возможных значений задания и комбинаций переменных состояния. Следует отметить, что такое управление с прогнозированием пока реализуемо не для всех типов электроприводов. Например, синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов имеет 2 тока статора, задания токов по двум осям, текущие угол положения ротора и скорость и, наконец, ограничение напряжения питания, что даёт 7 переменных состояния или управляющих воздействий и, соответственно, 7-мерный массив для описания всех возможных управляющих воздействий. Вместе с тем, данный подход вполне применим для двигателей постоянного тока и вентильно-индукторных электродвигателей, которые имеют существенно меньшее число переменных состояния.

Уже более 30 лет вентильно-индукторные электродвигатели (ВИД) привлекают внимание как учёного сообщества, так и промышленности. Основное преимущество данного электродвигателя в кажущейся простоте конструкции, однако ему присуще значительное количество недостатков. Так, конструкция требует точной центровки ротора относительно статора для исключения радиальных сил, разбивающих подшипники; нагрев ротора может приводить к уменьшению зазора и изменению характеристик электрической

машины, включая возможное зацепление ротора за статор; существенно большая стоимость силового преобразователя по сравнению с электроприводами переменного тока с разнополярным питанием; крайне узкая рабочая область выше номинальной скорости вращения в режиме прерывистых токов и относительно низкой пульсации момента, либо широкая область постоянства мощности в режиме непрерывного тока с чрезвычайно высокой пульсацией момента, пульсации момента при использовании традиционных для этого электродвигателя алгоритмов управления. Однако данный тип привода вполне может найти свои ниши. Например, в электроприводах малой мощности, где применение дискретных транзисторов позволяет создавать силовые преобразователи одинаковой стоимости с традиционными электроприводами. Или это может быть многофазный ВИД гребных винтов, где независимость фаз обеспечивает высокую надёжность электропривода, а работа в режиме ослабления поля не требуется.

Между тем, вопросы управления ВИД до сих пор остаются не полностью раскрытыми. Наиболее качественное формирование момента обеспечивают системы управления с прогнозированием, вычисляющие требуемое состояние силовых ключей инвертора по его математической модели. К недостатку данных методов следует отнести переменную частоту коммутации, свойственную системам с конечным набором управляющих воздействий, что не позволяет обеспечить звуковой комфорт и предсказуемые акустические характеристики, провести оптимизацию силового преобразователя по мощности ввиду постоянного изменения коммутационных потерь. Переход к широтно-импульсной модуляции управляющих воздействий возможен с применением метода прогнозирующего управления с уменьшенным шагом интегрирования, где задача управления решается несколько раз, а затем решения усредняются и усреднённое значение становится уставкой скважности управления широтно-импульсного генератора, однако данное решение требует значительных вычислительных ресурсов, чтобы усреднённое управляющее воздействие имело достаточную разрядность, и реализуемо только с применением относительно дорогих программируемых логических матриц, обеспечивающих высокую скорость и параллельность однотипных вычислений.

Исследованиям в области ВИД и законов управления посвящены труды С.А. Пахомина, М.Г. Бычкова, А.Б. Красовского, R. Krishnan, а в области систем управления ВИД с прогнозированием, включая методы с применением ШИМ, R. de Doncker, H. Peyrl, R. Kennel, А.С. Анучина и др.

При всём многообразии известных методов управления ВИД задача точного управления моментом с применением ШИМ при ограничении вычислительных ресурсов на уровне современных микроконтроллеров, таких как TMS320F28xxx, K1921BK01T и др., применяемых в общепромышленных преобразователях частоты, не решена. Вместе с тем практически отсутствующая магнитная связь между фазами и, как следствие, ограниченное число переменных состояния позволяют произвести поиск управляющих воздействий для всего набора входных переменных заранее, тем самым свести

алгоритм управления к извлечению данных из массива, что даёт возможность реализовать его на самых простых управляющих микроконтроллерах.

Объектом исследования является вентильно-индукторный электропривод с микроконтроллерным управлением, для которого реализуется система управления с прогнозированием и непрерывным управляющим воздействием и решаются сопутствующие вопросы идентификации параметров объекта и скорости и положения в режиме без датчика положения ротора.

Предметом исследования являются системы микроконтроллерного управления, реализующие управление с прогнозированием с непрерывным управляющим воздействием для вентильно-индукторного электропривода, методы идентификации параметров электродвигателя и методы идентификации скорости и углового положения без использования датчика положения ротора.

Целью диссертационной работы является развитие систем управления с прогнозированием с непрерывным управляющим воздействием для электроприводов с малым числом переменных состояния и задающих воздействий на примере задачи точной стабилизации момента вентильно-индукторного электродвигателя.

Задачи, решаемые в диссертации. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработка подхода к управлению с прогнозированием с непрерывным управляющим воздействием для электропривода постоянного тока путём предварительного расчёта полного набора управляющих воздействий для малого числа переменных состояния.
2. Разработка метода управления с прогнозированием для систем с малым числом переменных состояния на примере вентильно-индукторного электродвигателя;
3. Разработка метода онлайн идентификации поверхности намагничивания вентильно-индукторного двигателя в составе силового преобразователя в автоматическом режиме;
4. Разработка способа идентификации положения ротора вентильно-индукторного электродвигателя без применения датчика положения;

Научная новизна работы:

1. Разработана теоретическая основа реализации систем управления с прогнозированием для объектов с малым числом переменных состояния и задающих воздействий для обеспечения непрерывного сигнала управления.
2. Разработан метод управления с прогнозированием для вентильно-индукторного электропривода, обеспечивающий точное регулирование момента с широтно-импульсным формированием питающего напряжения.
3. Разработан метод автоматической идентификации поверхности намагничивания вентильно-индукторного двигателя в рабочем диапазоне углов проводимости и токов.
4. Разработан метод самосенсорной идентификации скорости и положения ротора двигателя, оценивающий невязку токов и функционирующий во всём

диапазоне скоростей вращения.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны подходы к построению систем управления с прогнозированием и непрерывным управляющим воздействием, которые в 10 раз и более снижают нагрузку на центральное процессорное устройство и могут быть реализованы с применением современных микроконтроллеров.
2. Предложенные подходы к построению систем управления верифицированы на примере электропривода постоянного тока и вентильно-индукторного электропривода с применением математического моделирования.
3. Система управления с прогнозированием и непрерывным управляющим воздействием позволяет снизить среднеквадратичное отклонение момента от заданного на 30% при той же частоте коммутации силовых ключей обеспечив предсказуемы акустические характеристики.
4. Разработанный метод самосенсорной идентификации положения ротора позволяет увеличить надёжность электропривода в целом за счёт исключения датчика положения ротора.
5. Разработанный метод идентификации поверхности намагничивания ВИД позволяет адаптировать работу системы управления при изменениях магнитной конфигурации электрической машины в процессе изменения её температуры.

Методы и средства исследования базируются на теории электрических цепей, теории электрических машин, теории автоматического управления, теории цифровой обработки сигналов, теории идентификации динамических систем. Математическое моделирование проводилось с использованием пакета MATLAB и моделей на языке Си. В процессе экспериментальных исследований применялись методы интерактивной отладки алгоритмов систем автоматического регулирования электроприводов с использованием контроллера на базе K1921BK01.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена результатами моделирования, публикациями в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, трудах международных научных конференций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях регионального, федерального и международного уровня: VI всероссийский конгресс молодых ученых ИТМО, XLVI научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО, международная научно-практическая конференция "Энергоэффективность энергетического оборудования" НМСУ "Горный", ежегодная отраслевая научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов 2016 ФГУП "Крыловский государственный научный центр", 55th International Universities Power Engineering Conference (**UPEC2020**), Torino, Italy, International Conference on Electrical Power Drive Systems **ICEPDS 2020** (г. Санкт-Петербург), 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (**RTUCON2020**), Riga, Latvia.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 13 статьях, 7 из которых в научных изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых журналов, 4 – в научных изданиях, включенных в реферативные базы данных Scopus и (или) Web of Science, 2 – в прочих зарубежных научных рецензируемых изданиях.

Личный вклад автора состоит в разработке методов управления с прогнозированием для объектов с малым числом переменных состояния и управляющих воздействий, в адаптации данного метода к вентильно-индукторному двигателю, в реализации моделей электропривода и системы управления, анализе результатов моделирования, в подготовке экспериментальной установки и проведении опытов по идентификации поверхностей моментов для исследуемого вентильно-индукторного электродвигателя.

Основные результаты работы:

1. Разработан подход к построению систем управления с прогнозированием и непрерывным управляющим воздействием для систем с малым числом переменных состояния и задающих воздействий, использующий память микроконтроллерной системы управления для хранения массивов предварительно рассчитанных управляющих воздействий, обеспечивающий в 10 и более раз снижение нагрузки на центральное процессорное устройство.
2. Реализованы и проверены на математических моделях системы управления для двух типов электроприводов — электропривода постоянного тока и вентильно-индукторного электропривода —, которые обеспечивают при в 10 раз меньших затратах на вычисления 30% снижения среднеквадратичного отклонения от заданного момента в сравнении с традиционным подходом управления с конечным набором управляющих воздействий при одинаковой частоте коммутации.
3. Разработан новый метод идентификации поверхности намагничивания ВИД в режиме реального времени в рабочем диапазоне изменения токов и интервалов проводимости фаз, что позволяет адаптировать работу системы управления при изменениях магнитной конфигурации электрической машины в процессе изменения её температуры.
4. Разработан новый метод идентификации скорости и положения ротора ВИД во всём диапазоне изменения скоростей вращения на базе анализа невязки заданных и измеренных токов на основе работы прогнозирующей модели.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, списка сокращений, принятых в работе, пяти глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 110 источников.

Основная часть работы изложена на 128 страницах. В работу включены 64 рисунка и 6 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, необходимые для достижения поставленной цели. Отражены научные результаты и положения, выносимые на защиту, а также практическая значимость результатов диссертационной работы.

В первой главе были рассмотрены типовые структуры при проектировании системы управления с прогнозирующими моделями, отмечены особенности проектирования и работы вентильно-индукторных двигателей (ВИД), описана структура, а также достоинства и недостатки данного типа двигателей.

Наиболее популярным является регулирование координат с использованием пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов в системе подчинённого регулирования, который используется в более чем 90% регулируемых электроприводов замкнутого типа. Метод релейного (или гистерезисного) управления является наиболее простой реализацией замкнутого контура управления. Его вариации нашли применение в электроприводах, использующих прямое управление моментом (DTC) и являются примером очень простой системы управления с прогнозированием. С развитием вычислительных способностей микропроцессоров были предложены новые методы управления силовыми преобразователями, такие как управление с применением нечеткой логики, нейронных сетей, управление с использованием скользящего режима, управление на основе прогнозирующих моделей. Наиболее привлекательным решением для управления силовыми электронными преобразователями является управление с прогнозированием, которое в настоящее время повсеместно реализовано в высоковольтных мощных электроприводах (например, фирмы ABB) для обеспечения наиболее качественной формы выходного тока при минимальной частоте коммутаций высоковольтных ключей. Вместе с тем, область реализации таких систем управления, которые выполняются на высокопроизводительных программируемых логических интегральных схемах, способных построить дерево прогноза на несколько эпох вперёд, с анализом более миллиона вариантов управления, пока ограничивается мощными электроприводами, где стоимость дорогой системы управления существенно ниже стоимости силовой электроники.

Управление с прогнозированием является методом управления, который вычисляет управляющее воздействие путем решения в каждый момент времени задачи оптимального управления в условиях конечного горизонта событий. Для этого управление с прогнозированием использует динамическую модель системы для прогнозирования будущего поведения объекта управления из текущего состояния для того, чтобы получить оптимальную последовательность управления. Одно из преимуществ управления с прогнозированием заключается в том, что нелинейности могут быть непосредственно включены в модель для прогнозирования.

Применительно к силовой электронике электроприводов классифицируют два больших подвида в методах управления с прогнозированием в зависимости от способа управления силовых ключей, и следовательно, в зависимости от типа оптимизационной задачи для вычисления оптимальных управляющих воздействий. Первый метод — управление с прогнозированием с использованием непрерывного управляющего воздействия (Continuous Control Set — CCS MPC), в рамках которого вычисляется непрерывный управляющий сигнал и затем используется ШИМ для получения требуемого выходного напряжения с помощью силового полупроводникового преобразователя. Второй метод — управление с прогнозированием с использованием конечного набора управляющих воздействий (Finite Control Set — FCS MPC) учитывает дискретный характер силового преобразователя для постановки оптимизационной задачи и воздействует на преобразователь дискретными уровнями.

Сделан вывод о том, что управление с прогнозированием с использованием конечного набора управляющих воздействий позволяет уменьшить пульсацию момента и сделать стратегию управления применимой для любого двигателя, однако недостатком данного способа управления является случайная частота коммутации инвертора и ошибка в сигнале задания момента или скорости, если используется короткий горизонт прогнозирования. В свою очередь управление с прогнозированием с использованием непрерывного управляющего воздействия позволяет избежать неопределенности в переключении силовых ключей инвертора.

Во второй главе диссертационного исследования был разработан метод управления с прогнозированием для систем с малым числом переменных состояния и управляющих воздействий на примере двигателя постоянного тока.

Целью управления является стабилизации момента, а также поиск минимума омических потерь. Предлагаемый метод использует задание крутящего момента и три переменных состояния — ток якоря, ток возбуждения и скорость электродвигателя. Эти четыре параметра используются для нахождения команд напряжения для якоря и обмотки возбуждения с использованием четырех- и двумерных массивов соответственно. Сигнал напряжения между точками массива следует интерполировать. Была выбрана билинейная интерполяция для управления обмоткой возбуждения и квадролинейная интерполяция для вычисления управляющего воздействия для якорной цепи.

Рассматриваемый двигатель постоянного тока имеет следующее математическое описание (11) и подключён согласно рисунку 1:

$$\left. \begin{aligned} v_a &= i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega K i_f, \\ v_f &= i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \\ M &= K i_f i_a. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v_a и v_f — напряжения якоря и обмотки возбуждения соответственно, i_a и i_f — протекающие токи, R_a и R_f — сопротивления обмоток, L_a и L_f — индуктивности обмоток, ω — скорость двигателя, а K — коэффициент магнитного потока / момента.

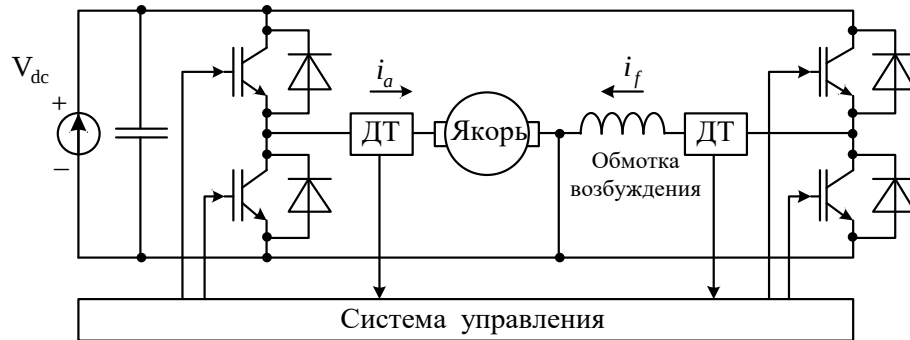


Рисунок 1 – Функциональная схема электропривода постоянного тока

Для заполнения элементов массивов используются целевые функции для якорной цепи и обмотки возбуждения:

$$g_a = \left| M_{ref} - \hat{M} \right| + \infty \left(\hat{i}_a > I_{a \max} \right), \quad (1)$$

$$g_f = \hat{i}_f^2 R_f + \frac{M_{ref}^2}{K^2 \hat{i}_f^2} R_a, \quad (2)$$

где I_{max} — ограничение тока инвертора, M_{ref} — задание момента.

Первоначально следует нормализовать входные переменные:

$$\left. \begin{aligned} M_{ref \, norm} &= \frac{M_{ref}}{M_{ref \, max}} L; \\ i_{f \, norm} &= \frac{i_f}{i_{f \, max}} N, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $M_{ref \, max}$ — максимально возможный заданный момент, $i_{f \, max}$ — максимально возможный ток обмотки возбуждения, L и N — константы, определяющие число элементов массива.

Опорные точки массива можно определить с помощью (9):

$$l = \left\lfloor M_{ref \, norm} \right\rfloor; n = \left\lfloor i_{f \, norm} \right\rfloor. \quad (3)$$

Теперь напряжение управления/питания обмотки возбуждения можно оценить с помощью билинейной интерполяции, которая поясняется на рисунке 2 и выражается как:

$$\left. \begin{aligned} v_{f M_{ref} norm}^n &= (v_{f l+1 n} - v_{f l n})(M_{ref} norm - l) + v_{f l n}; \\ v_{f M_{ref} norm}^{n+1} &= (v_{f l+1 n+1} - v_{f l n+1})(M_{ref} norm - l) + v_{f l n+1}; \\ v_{f M_{ref} norm}^{i_f norm} &= (v_{f M_{ref} norm}^{n+1} - v_{f M_{ref} norm}^n)(i_f norm - n) + v_{f M_{ref} norm}^n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

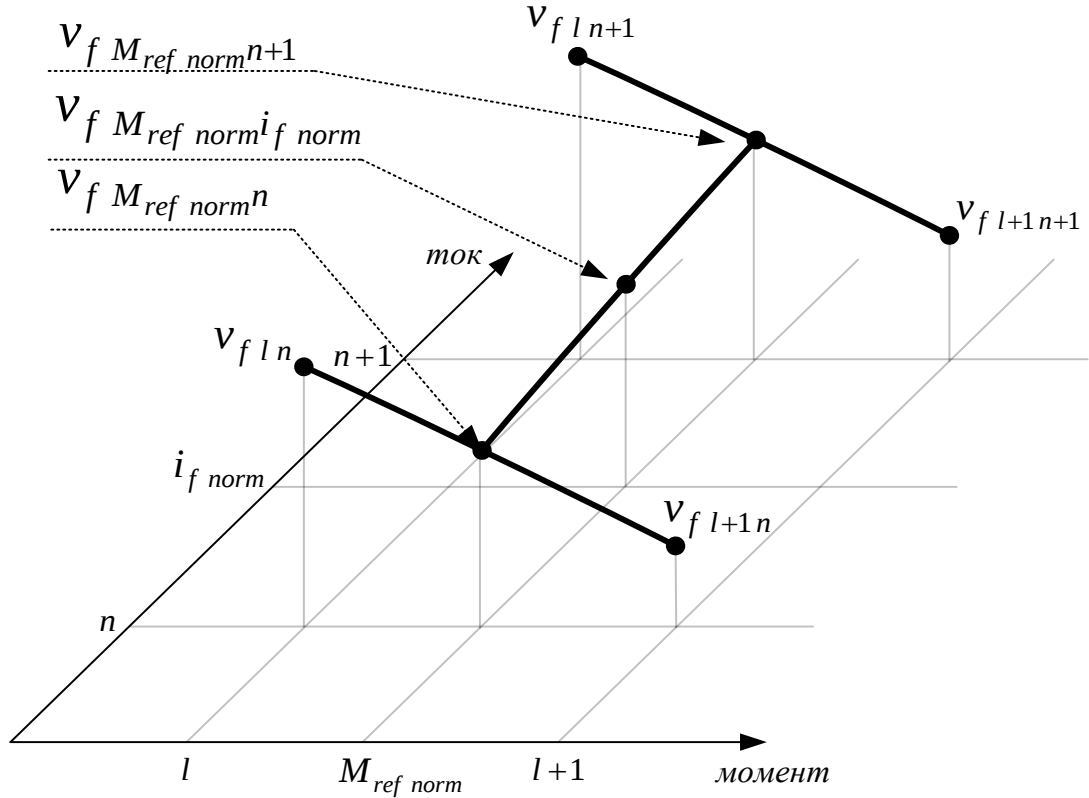
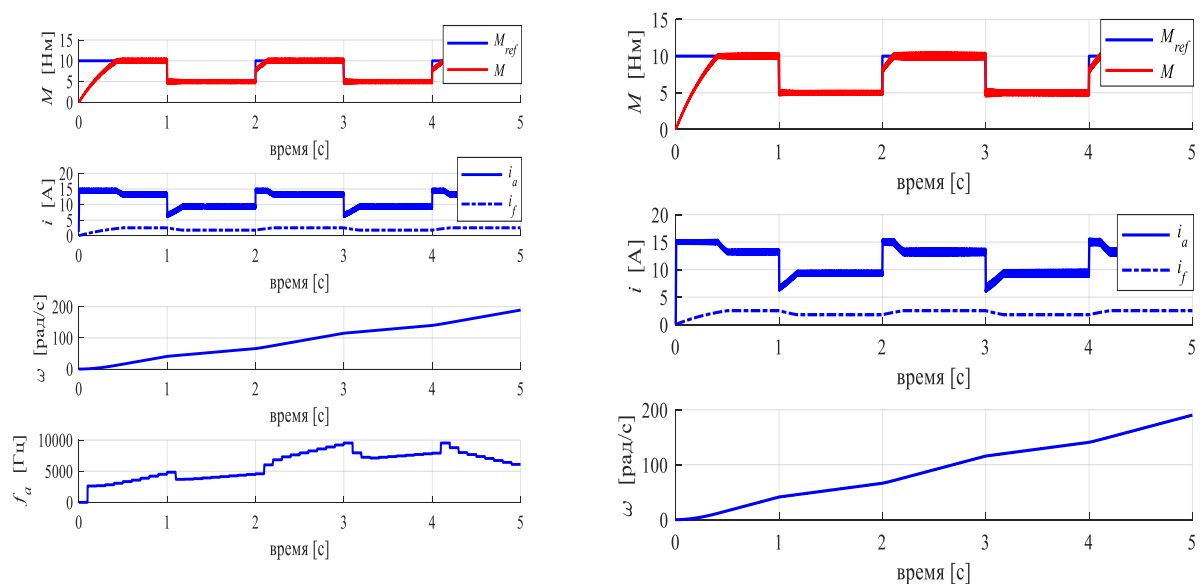


Рисунок 2 – Билинейная интерполяции данных двумерного массива для получения сигнала напряжения обмотки возбуждения.

Аналогичным образом, интерполируя данные четырёхмерного массива, вычисляется напряжение управления якоря, как функция задания момента, тока якоря, тока возбуждения и скорости.

Переходные процессы в системе управления с прогнозированием с использованием конечного набора управляющих воздействий показали эффективность использованных целевых функций. Система работает на частоте принятия решений 20 кГц с максимальной частотой переключения 10 кГц. Во время переходных процессов ток якоря быстро обеспечивает достижение заданного крутящий момент на валу, в то время как ток возбуждения относительно медленно переходит в точку минимальных омических потерь в двигателе. Если возбуждение двигателя небольшое и задание крутящего момента быстро растет, то ток якоря достигает своего предельного значения, на котором он ограничивается, и крутизна нарастания крутящего момента полностью зависит от скорости электромагнитных процессов в обмотке возбуждения, ограниченных ее относительно большой

постоянной времени и имеющимся напряжением в звене постоянного тока. Такая работа системы является компромиссом между скоростью отработки заданного момента и минимизацией потерь в электродвигателе. Система с предложенным алгоритмом управления с прогнозированием с использованием непрерывного управляющего воздействия реализует широтно-импульсное регулирование с частотой 5 кГц, что обеспечивает заданную частоту переключения силовых ключей. На рисунке 3 показана сравнительная работа двух систем регулирования. Частота коммутаций при использовании управления с прогнозированием с использованием конечного набора управляющих воздействий изменяется в широком диапазоне в зависимости от соотношения ЭДС двигателя, напряжения питания и задания момента/токов. В точках примерно одинаковых частот коммутаций среднеквадратичное отклонение реализации задания момента в предложенной системе управления с применением ШИМ получилось **на 30% меньше**.



а)

б)

Рисунок 3 – Переходные процессы в системе с (а) FCS MPC при ограничении частоты коммутаций 5 кГц, (б) CCS MPC при частоте ШИМ 5 кГц

Подробнее вопросы реализации систем управления с прогнозированием для систем с малым числом переменных состояния было решено рассмотреть на примере вентильно-индукторного электропривода.

В третьей главе рассмотрено математическое описание и традиционные системы управления ВИД, рассмотрен синтез предложенной системы управления с прогнозированием для систем с малым числом переменных состояния.

Базовая топология электропривода с ВИД представлена на рисунке 4. Статор двигателя содержит три фазы с концентрированными обмотками, расположенными на 6 зубьях статора. Ротор имеет четыре зуба, а

электрохимический коэффициент редукции равен 4. Силовой преобразователь представлен тремя несимметричными мостами, которые питают фазы двигателя однополярным током. Каждая фаза двигателя соединена с несимметричным мостом, как показано на рисунке 4.

При анализе публикаций в области точного управления моментом ВИД с использованием систем управления с прогнозированием было замечено, что на каждом электрическом обороте для одного и того же задания момента кривые токов фаз, обеспечивающие заданный момент, повторяются. Если, например, задаться целевой функцией, обеспечивающей реализацию заданного момента при условии минимума омических потерь, то можно вычислить поверхность заданий токов фаз в функции заданного момента и положения ротора, представленную на рисунке 5. Если задаться знанием желаемых токов при известном заданном моменте, то задача реализации этих токов может быть решена, если известна поверхность намагничивания ВИД в функции тока и положения ротора.

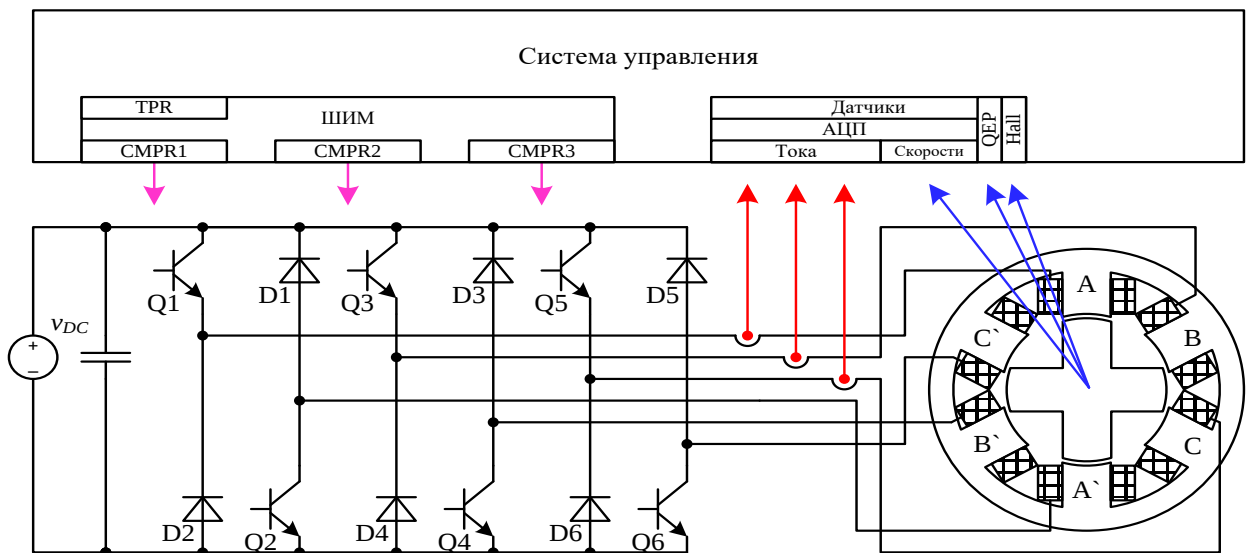


Рисунок 4 – Топология электропривода с ВИД

Уравнение баланса напряжений каждой фазы:

$$\frac{d\psi}{dt} = v - iR, \quad (5)$$

где: v – приложенное напряжение; i – текущий ток; R – активное сопротивление фазы; ψ – потокосцепление обмотки.

Электрические и электрохимические процессы в обмотках ВИД могут рассматриваться в каждой фазе обособленно от других фаз в связи с тем, что фазы имеют пренебрежимо малую магнитную связь друг с другом. Поэтому можно допустить, что потокосцепление зависит только от тока своей фазы и углового положения ротора.

Зная задание момента M_{ref} , задание тока для следующего периода ШИМ может быть взято из заранее рассчитанной в соответствии с целевой функцией таблицы и интерполирована с применением билинейной интерполяции:

$$i_{ref}[k+1] = f_{\text{current reference}}(\hat{\theta}[k+1], M_{ref}) \quad (6)$$

при рассчитанном прогнозе углового положения ротора

$$\hat{\theta}[k+1] = \theta[k] + \omega \cdot T_{PWM}, \quad (13)$$

где T_{PWM} — длительность периода ШИМ, $\theta[k]$ — текущее угловое положение ротора, ω — электрическая угловая частота вращения.

Поверхность намагничивания ВИД (зависимость потокосцепления от тока и положения) является нелинейной и может быть представлена в виде массива в функции двух переменных — тока и углового положения ротора. При этом значения между опорными точками массива можно вычислить с применением той же билинейной интерполяции:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\psi}[k] &= f_{\text{magnetization surface}}(\theta[k], i[k]); \\ \hat{\psi}[k+1] &= f_{\text{magnetization surface}}(\hat{\theta}[k+1], i_{ref}[k+1]). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Имеющиеся данные (текущее и прогнозируемое заданное значения тока, текущее и прогнозируемое значение потокосцепления и текущее и прогнозируемое значение углового положения ротора) могут быть использованы для решения уравнения равновесия фазы (6) для вычисления напряжения управления, как:

$$v = \frac{\hat{\psi}[k+1] - \hat{\psi}[k] - \frac{i[k] + i_{ref}[k+1]}{2} R \cdot T_{PWM}}{T_{PWM}}. \quad (8)$$

Таким образом, система управления «перемещается» вдоль поверхности намагничивания фазы двигателя из точки k в $k+1$, как показано на рисунке 6.

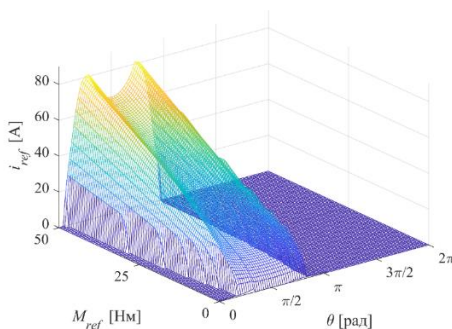


Рисунок 5 — Поверхность задания тока фазы А в функции заданного момента и углового положения ротора для условия постоянства момента на валу при минимуме потерь.

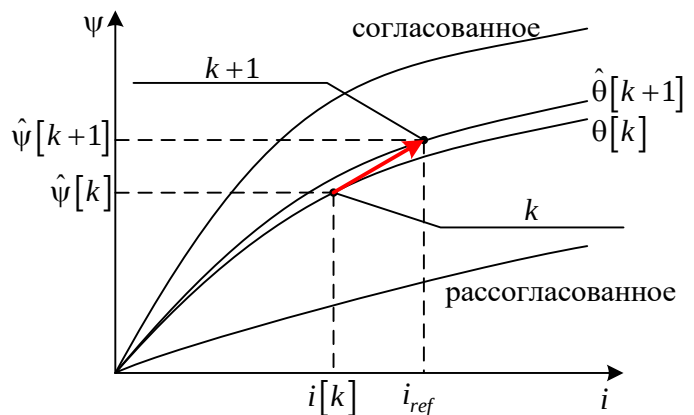


Рисунок 6 — Принцип регулирования тока в системе управления ВИД

Для вычисления опорных точек массива заданий тока необходимо провести предварительный расчёт поверхности момента, которую также можно представить в виде массива $N \cdot N$ точек. Момент можно оценить как производную от ко-энергии по углу. Интеграл ко-энергии может быть выражен суммой ряда для численной оценки с использованием метода Тастина как:

$$\Delta W'(i_{N_i}, \theta_{N_\theta}) = \int_0^{i_{N_i}} \psi(i, \theta_{N_\theta}) di \approx \sum_{n_i=2}^{N_i} \left(\frac{\psi[n_i - 1, N_\theta] + \psi[n_i, N_\theta]}{2} \right), \quad (9)$$

где i_{N_i} и θ_{N_θ} — ток и угол для N_i и N_θ точек в таблице поверхности намагничивания соответственно. Каждая точка на поверхности может быть оценена как разница между ко-энергиями на один шаг по часовой стрелке от текущего углового положения ротора и один шаг против часовой стрелки, разделенная на разность углов, используя следующее уравнение:

$$M[N_i, N_\theta] = \frac{\Delta W'(i, \theta)}{\Delta \theta} = \frac{\sum_{n_i=2}^{N_i} \left(\left(\frac{\psi[n_i - 1, N_\theta + 1] + \psi[n_i, N_\theta + 1]}{2} \right) \cdot \frac{I_{max}}{N} \right) - \sum_{n_i=1}^{N_i} \left(\left(\frac{\psi[n_i - 1, N_\theta - 1] + \psi[n_i, N_\theta - 1]}{2} \right) \cdot \frac{I_{max}}{N} \right)}{\left(2 \cdot \frac{2\pi}{N} \right)}, \quad (10)$$

Момент в каждой точке может быть создан бесконечным числом комбинаций фазных токов. Если желательны минимальные тепловые (омические) потери, то существует только одно решение для заданного момента и углового положения. Таким образом, необходимо рассчитать задание тока в каждой фазе в зависимости от задания момента и углового положения ротора.

В процессе вычисления опорных точек массива заданий токов ток фазы ВИД будет определяться с помощью интегрального регулятора момента с коэффициентом усиления k , как показано на рисунке 7. Регулятор момента изменяет ток фазы до тех пор, пока погрешность реализации момента не достигнет допустимого отклонения. После этого производится увеличение тока второй фазы, пока он не достигнет максимально допустимого значения. Регулятор момента продолжает свою работу все время, изменяя ток первой фазы и поддерживая их общий момент фаз А и С близким к заданному. По завершению алгоритма поиска на выходе вычислителя заданий токов оказывается значение токов задания для одной точки массива заданий токов в функции заданного момента и углового положения. Алгоритм необходимо повторить для каждой точки массива.

С точки зрения программной реализации система управления разделена на две части — автономный алгоритм инициализации системы управления, вычисляемый один раз в самом начале функционирования системы управления и алгоритм управления в реальном времени, вызываемый каждое прерывание ШИМ (рисунок 8) и реализующий предложенный метод управления с прогнозированием.

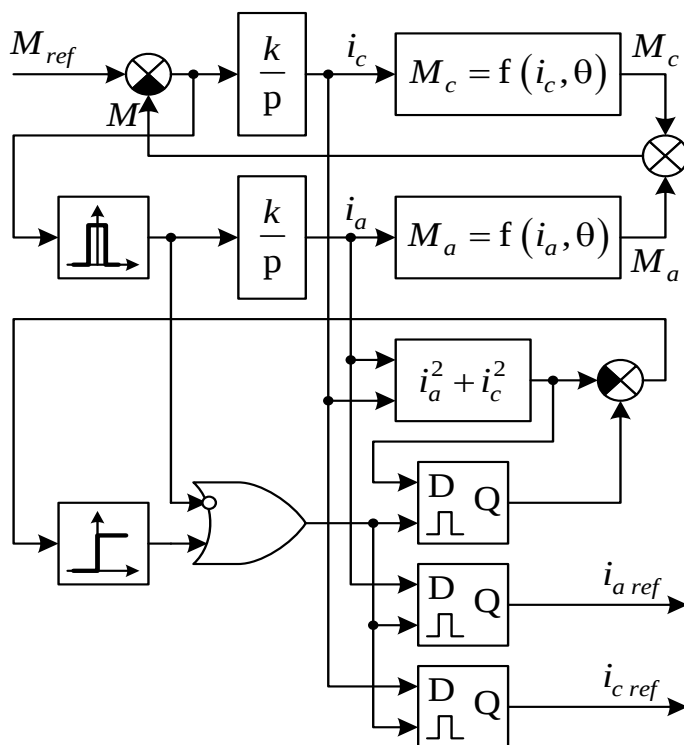


Рисунок 7 – Функциональная схема вычислителя заданий тока при заданном моменте для целевой функции с минимизацией омических потерь

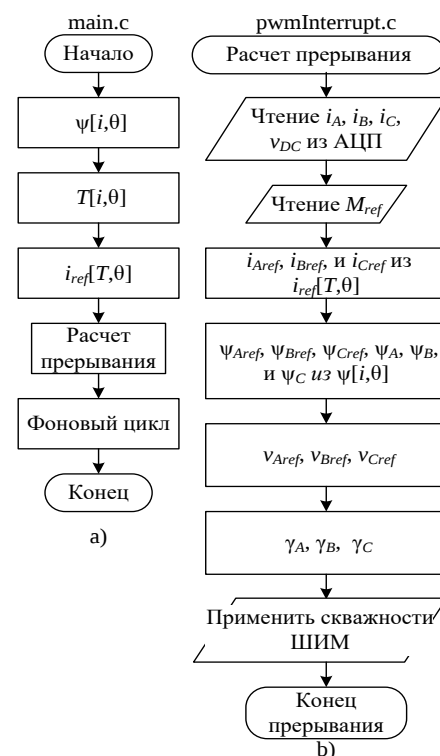


Рисунок 8 – Алгоритм системы управления

На рисунке 9 представлены графики работы предложенной системы управления для разных частот вращения при изменяющемся задании момента. График момента имеет видимую пульсацию вокруг задания в связи широтно-импульсным способом формирования напряжения инвертором, которую можно изменять, изменяя частоту ШИМ. С ростом электрической скорости ограничение напряжения звена постоянного тока силового преобразователя делает невозможным стабилизацию заданного тока, в связи с этим появляется пульсация развиваемого момента. Такое поведение естественно ВИД и может быть улучшено путем регулировки профиля задания тока относительно запаса напряжения. Время переходного процесса при изменении момента скачком ограничено напряжением питания и величиной фазной индуктивности.

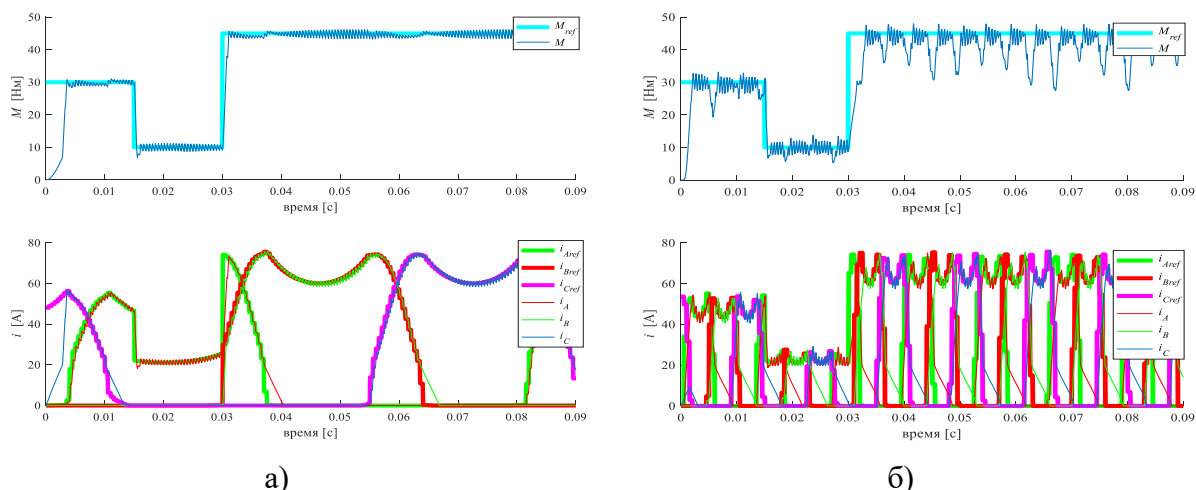


Рисунок 9 – Переходные процессы в ВИД при поддержании постоянной скорости: (а) 80 рад/с – при отсутствии ограничений по напряжению, (б) 480 рад/с – с ограничениями по напряжению

Применение предложенного метода обеспечивает самые низкие значения среднеквадратической ошибки отработки задания по моменту, сохраняя при этом низкие требования к вычислительным способностям системы управления приводом. По факту требуется лишь проведение двух операций с таблицами по измеренным токам, положению и заданию момента, реализация билинейной интерполяции, представляющей собой набор умножений и сложения, позволяющих вычислить задание напряжений инвертора за время не более 1–3 мкс на современном микроконтроллере, что составляет пренебрежимо малое время по сравнению с периодом ШИМ.

Время выполнения алгоритмов управления в тактах для управления с прогнозированием с конечным набором управляющих воздействий, управления с уменьшенным шагом интегрирования и предложенным методом представлены в таблице 1. Так метод, предложенный Н. Peyrl, выполняется за 19 мкс на микроконтроллере Cortex-M4F, работающем на частоте 100 МГц. Это позволяет реализовывать частоту принятия решений вплоть до 50 кГц. Метод управления с прогнозированием с уменьшенным шагом интегрирования требует использования более мощного микроконтроллера или программируемой логической матрицы и при достаточной разрядности выходного управляющего воздействия требует для расчёта алгоритма на том же Cortex-M4F уже 450 мкс, что ограничивает максимальную частоту ШИМ на уровне 2 кГц. При этом следует учитывать запаздывание всех расчётов по управлению на один такт. Предложенный способ оперирует таблицами и содержит минимум расчётов и логических операций, что позволяет выполнить алгоритм непосредственно перед началом следующего периода ШИМ за пренебрежимо малое время около 2 мкс, используя самые актуальные данные по измеренным токам и положению ротора.

Таблица 1. Время выполнения алгоритмов

Способ управления	Количество тактов	Микросекунд на частоте 100 МГц
Управление с прогнозированием с конечным числом управляющих воздействий	1915	19,15
Управление с прогнозированием с уменьшенным шагом интегрирования для 24-х шагов	44902	449,02
Управление с прогнозированием и табличным определением управляющего воздействия, предложенный в работе	206	2,06

Во четвёртой главе диссертационного исследования был разработан метод идентификации поверхности намагничивания вентильно-индукторного электродвигателя в автоматическом режиме. Для определения полной поверхности намагничивания ВИД необходимо использовать все возможные значения тока при всех угловых положениях, что невозможно выполнить в процессе работы электропривода. Предлагаемое решение корректирует поверхность намагничивания частично в рамках рабочей области и использует фильтр для исключения случайных помех в измерениях. Разработанный метод идентификации может работать параллельно с основной системой управления и производить подстройку параметров, например, при изменении воздушного зазора, вызванного взаимным изменением температуры статора относительно температуры ротора.

Во время работы, предложенная выше система управления с прогнозированием, стабилизирует задание тока с некоторой ошибкой, которая зависит от точности построения поверхности намагничивания. Если в таблице поверхности намагничивания опорные точки лежат ниже реальных для данного двигателя, то ток фаз в процессе регулирования не достигнет задания. Корректировка опорных точек поверхности намагничивания может проводиться на основе ошибки между заданным и достигнутым измеренным током. Если измеренный ток ниже заданного, это значит, что реальное потокоцепление в этой опорной точке поверхности больше, чем величина в таблице.

Коррекция должна проводиться для ближайшей точки двумерного массива, если расстояние меньше половины расстояния между двумя опорными точками. Это гарантирует, что затронута будет только одна точка. Для стабильной работы расстояние можно уменьшить ещё больше. Квадрат расстояния до опорной точки можно вычислить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} d_{00}^2 &= \left(\left\lfloor \frac{N}{2\pi} \theta \right\rfloor - \frac{N}{2\pi} \theta \right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\rfloor - \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right)^2; \\ d_{01}^2 &= \left(\left\lfloor \frac{N}{2\pi} \theta \right\rfloor - \frac{N}{2\pi} \theta \right)^2 + \left(\left\lceil \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\rceil - \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right)^2; \\ d_{10}^2 &= \left(\left\lceil \frac{N}{2\pi} \theta \right\rceil - \frac{N}{2\pi} \theta \right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\rfloor - \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right)^2; \\ d_{11}^2 &= \left(\left\lceil \frac{N}{2\pi} \theta \right\rceil - \frac{N}{2\pi} \theta \right)^2 + \left(\left\lceil \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\rceil - \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где: N — число точек в массиве; I_{max} — максимальный ток двигателя; θ — угловое положение ротора; i_{ref} — заданный ток.

Расстояния определяется как показано на рисунке 10. Квадраты расстояния используются, чтобы не вычислять операцию квадратного корня, которая обычно отнимает много процессорного времени.

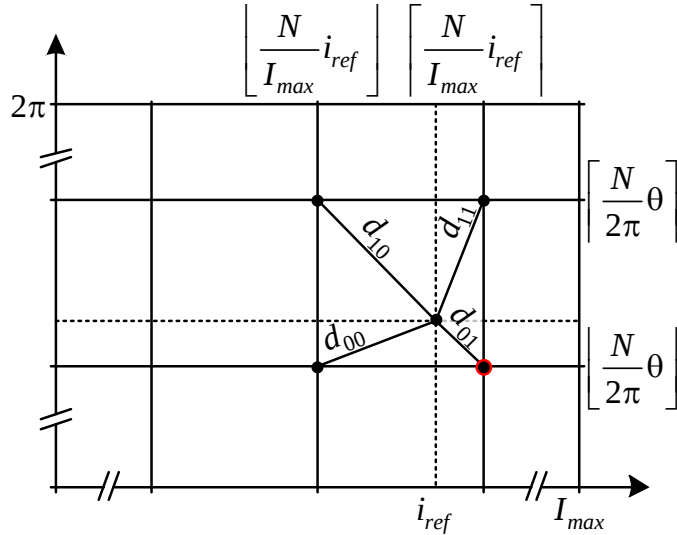


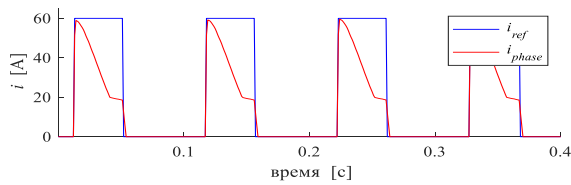
Рисунок 10 — Пояснение к вычислению дистанции до опорных точек

Если квадрат расстояния меньше определённой величины, к примеру 0,25, тогда соответствующая опорная точка в таблице должна быть скорректирована в соответствии с ошибкой в токе:

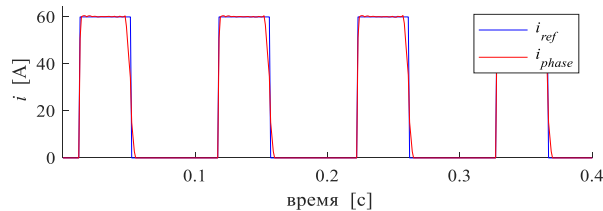
$$\left. \begin{aligned}
& \text{if } (d_{00}^2 < 0.25) \text{ then} \\
& \quad \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] = \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] + k(i_{ref} - i); \\
& \text{if } (d_{10}^2 < 0.25) \text{ then} \\
& \quad \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] = \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] + k(i_{ref} - i); \\
& \text{if } (d_{01}^2 < 0.25) \text{ then} \\
& \quad \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] = \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] + k(i_{ref} - i); \\
& \text{if } (d_{11}^2 < 0.25) \text{ then} \\
& \quad \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] = \Psi \left[\frac{N}{2\pi} \theta \left\| \frac{N}{I_{max}} i_{ref} \right\| \right] + k(i_{ref} - i),
\end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где: k — коэффициент постоянной времени фильтра.

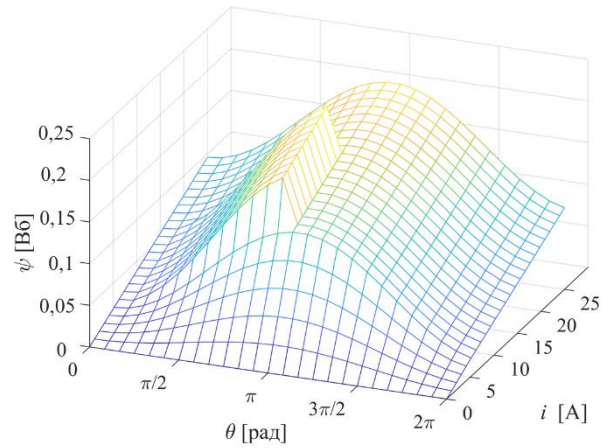
Результаты показали, что при первом запуске двигателя разница между поверхностью намагничивания модели двигателя и модели системы управления приводит к ошибке в токе, как показано на рисунке 11(а). Однако, спустя некоторое время, процедура онлайн идентификации скорректировала опорные точки массива потокосцепления, что привело к снижению ошибки регулирования, как показано на рисунке 11(б), а поверхность намагничивания была скорректирована в рабочей области токов и углов проводящего состояния фазы, как показано на рисунке 11(в).



а)



б)



в)

Рисунок 11 — (а) ошибка в регулировании тока фазы при неправильном задании поверхности намагничивания; (б) регулирование тока фазы после коррекции поверхности намагничивания; (в) скорректированная в рабочей области поверхность намагничивания

В пятой главе диссертационного исследования был разработан метод самосенсорной идентификации положения ротора вентильно-индукторного электродвигателя, использующий ошибку регулирования системы с прогнозированием. Показано, что любое несоответствие между фактическим положением и положением в системе управления приводит к ошибке в регулировании тока и момента.

Идентификацию положения и скорости предлагается делать по самосенсорному принципу, когда сама электрическая машина выступает датчиком положения ротора. Алгоритм самосенсорной идентификации анализирует заданные значения токов и фактические значения токов для каждой фазы. Первоначально производится проверка, что фаза двигателя включена, и производится сравнение фазного тока с нулем. Если фаза отключена, то невозможно извлечь информацию по положению и этот канал отключается переключателями, изображёнными на рисунке 12 слева. Если фаза включена, то ошибку фазного тока можно использовать для корректировки скорости ротора и оценки положения при условии, что скважность управления соответствующим полумостом не равна 100% или – 100%. Этот режим также игнорируется, что обеспечивается правыми переключателями рисунке 12, так как силовой преобразователь находится в насыщении, выдаёт максимальное или минимальное возможное напряжение и ошибка в токе связана именно с возникшей нелинейностью.

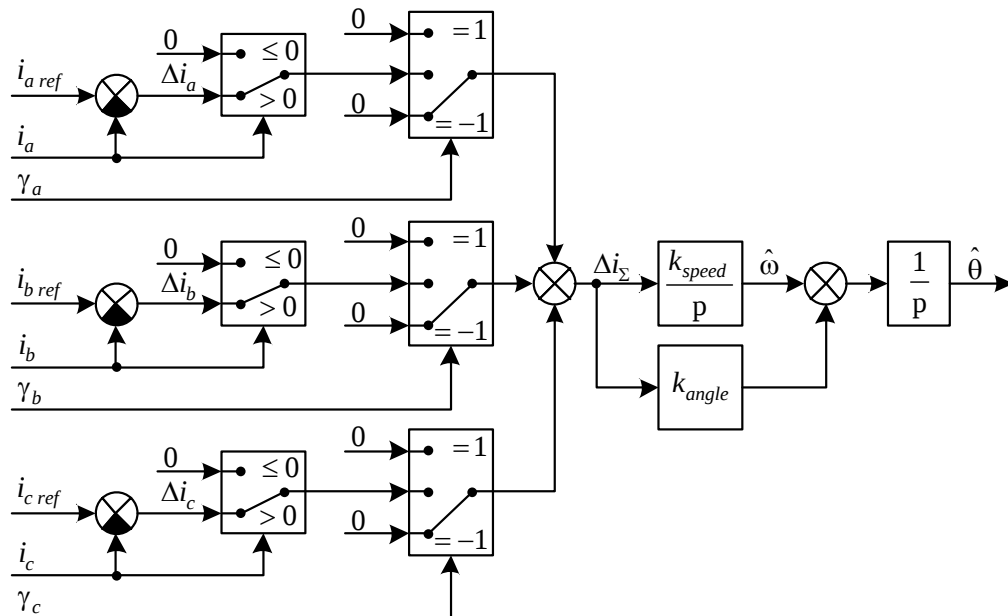


Рисунок 12 – Функциональная схема вычислителя скорости и положения для систем управления с прогнозированием

Полученная сумма ошибок по всем фазам используется для корректировки скорости с помощью ПИ-регулятора, который имеет два коэффициента усиления: k_{speed} и k_{angle} . Первый интегральный коэффициент влияет на оценку скорости. Второй пропорциональный коэффициент корректирует расчетную скорость для уменьшения угловой ошибки. Эти коэффициенты необходимо настроить экспериментально с учетом

погрешностей измерения тока, точности модели электропривода и механической инерции.

Результаты эксперимента приведены на рисунке 13. Первоначальная ошибка положения ротора была установлена на ноль, в то время как фактическая скорость была установлена на 85 рад/с, а скорость в системе управления была 80 рад/с. Угловое положение корректировалось сразу, а корректировка скорости производилась по интегральному каналу контроллера в течение нескольких периодов ШИМ.

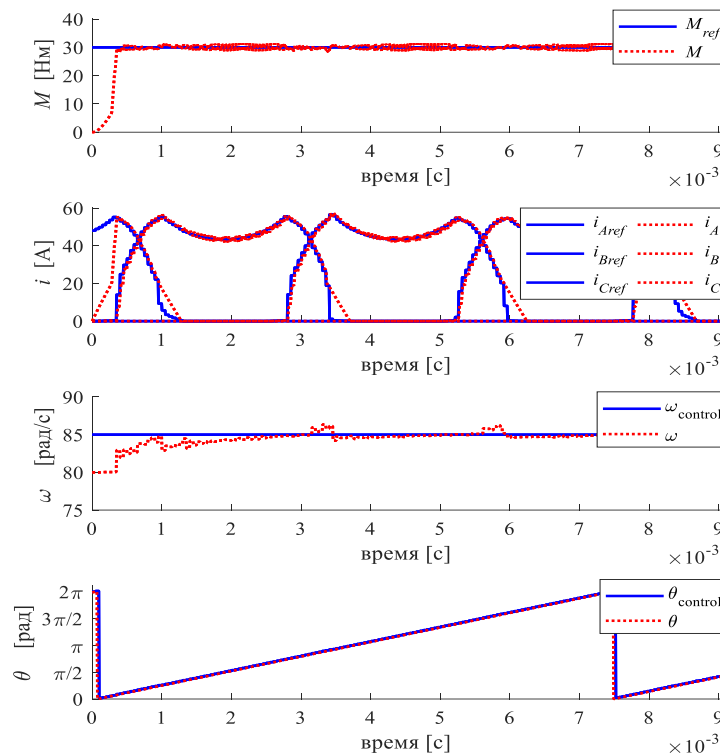


Рисунок 13 – Переходные процессы при реализации самосенсорной идентификации углового положения и скорости для режима постоянной скорости

Разработанный метод самосенсорной идентификации углового положения и скорости ротора ВИД обеспечивает быструю и точную оценку указанных величин при условии достаточно точного определения поверхности намагничивания электрической машины и ненулевом задании момента. Метод способен производить оценку углового положения на всех скоростях вращения, включая нулевую скорость, что является несомненным преимуществом метода по сравнению с методами, использующими для оценки противо-ЭДС электродвигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение задач идентификации, анализа и синтеза системы управления с прогнозированием с непрерывным управляющим воздействием применительно к вентильно-индукторному электроприводу и приводу постоянного тока. Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Показано, что объем памяти современных микроконтроллеров, применяемых в системах управления электроприводов, позволяет решать задачу управления с прогнозированием путём размещения в памяти предварительно рассчитанных управляющих воздействий для электроприводов с малым числом переменных состояния и задающих воздействий, исключая необходимость проведения данных вычислений в реальном времени и сводя задачу управления к выборке данных из массива.
2. Разработан метод управления с прогнозированием для систем с малым числом переменных состояния и управляющих воздействий на примере двигателя постоянного тока.
3. Разработан метод управления с прогнозированием для систем с ограниченным числом переменных состояния и широтно-импульсным формированием питающего напряжения на примере ВИД как нелинейного объекта управления.
4. Синтезирован метод идентификации параметров объекта управления за счёт анализа ошибки регулирования в системе управления с прогнозированием, который обеспечивает коррекцию поверхности намагничивания в узловых точках массива с поэтапным приближением к истинному значению в автоматическом режиме.
5. Разработан метод идентификации положения и скорости ротора электрической машины управления без применения инъекции или наблюдения ЭДС, основывающийся на анализе ошибки реализации заданий токов прогнозирующей системы управления, где невязка определяется в том числе ошибкой в оценке положения ротора ВИД.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых журналов:

1. Анучин А.С., Е.О. Столяров, Д.К. Сурнин, Г.Л., Демидова, А.Н. **Богданов, Ю.** Вагапов Идентификация карты намагничивания вентильно-индукторного электропривода в режиме реального времени» // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"- 2021. - №1. – С.69-75.
2. **Богданов А.Н.**, Ивановский А.И., Адамович П.В. Современные и перспективные алгоритмы управления гребными синхронными электродвигателями // Труды Крыловского государственного научного центра - 2017. - № 4(382). - С. 103-112
3. Стародед С.С., Ивановский А.И., **Богданов А.Н.** Исследование

адаптивного алгоритма параллельной работы двух стабилизаторов трехфазного напряжения // Морской вестник - 2017. - № 4(64). - С. 75

4. Вершинин В.И., **Богданов А.Н.** Построение гребного электропривода на базе вентильного двигателя с широтно-импульсной модуляцией // Морской вестник - 2015. - № 2(54). - С. 71

5. Емельянов А.П., Вершинин В.И., **Богданов А.Н.** Питание кораблей от береговой электросети // Морской вестник - 2015. - № 4(56). - С. 59-60

6. Вершинин В.И., Васильев Б.Ю., **Богданов А.Н.** Возможность использования принципов динамического торможения в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока судовых турбодвигателей // Морской вестник - 2015. - № 3(55). - С. 37-39

7. Вершинин В.И., **Богданов А.Н.** На пути к электродвижению // Морской вестник - 2014. - № 4(52). - С.

Публикации в научных изданиях, включенных в международные реферативные базы данных (Scopus и Web of Science):

8. Anuchin, A.; Demidova, G.L.; Hao, C.; Zharkov, A.; **Bogdanov, A.**; Šmídl, V. Continuous Control Set Model Predictive Control of a Switch Reluctance Drive Using Lookup Tables. *Energies* 2020, 13, 3317.

9. Alecksey Anuchin, Andrei **Bogdanov**, Galina Demidova, Evgeniy Stolyarov, Dimid Surnin, Yuriy Vagapov, "Online Magnetization Surface Identification for a Switched Reluctance Motor," 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2020)2020, pp. 1-5

10. Alecksey Anuchin, Dmitry Shpak, Anastasia Kotelnikova, Alexey Dmitriev, Andrei **Bogdanov** and Galina Demidova, "Encoderless Rotor Position Estimation of a Switched Reluctance Drive Operated under Model Predictive Control," 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2020, pp. 1-5

11. Alecksey Anuchin, Andrei **Bogdanov**, Galina Demidova, Dmitry Shpak, Ksenia Fedorova, Maria Gulyaeva, "Model Predictive Control of Direct Current Motor Utilizing Lookup Tables," 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS 2020), Saint Petersburg, 2020, pp. 1-4

Публикации в прочих научных изданиях:

12. Константинов К.В, **Богданов А.Н.**, Цариашвили А.А. Дорожная карта создания средневольтной электроэнергетической системы постоянного тока нового поколения // Сборник трудов Межотраслевой научно-практической конференции "Кораблестроение в XXI веке: состояние, проблемы, перспективы: ВОКОР-2019 - 2020.

13. **Богданов А.Н.**, Савастьянов М.М. Основные вопросы разработки ЕЭЭС на постоянном токе для Военно-Морского Флота // Сборник трудов Межотраслевой научно-практической конференции "Кораблестроение в XXI веке: состояние, проблемы, перспективы: ВОКОР-2018 - 2019.