

На правах рукописи



Чуприна Николай Валентинович

**СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ ТЯГОВОГО
СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛОКОМОТИВА С МИНИМИЗАЦИЕЙ
ТОКА ОБМОТКИ СТАТОРА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Пугачев Александр Анатольевич.

Официальные оппоненты: **Захаров Алексей Вадимович**, доктор технических наук, технический директор – руководитель направления расчетов ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром»;

Кулик Егор Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Автоматизированный электропривод» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита диссертации состоится 3 декабря 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.11 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.mii.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Одной из основных задач энергетической стратегии развития ОАО «РЖД» является значительное снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов. В качестве основного средства решения этой задачи выступает разработка энергетически эффективных тяговых электроприводов, применение которых позволяет не только реализовать требуемые тяговые характеристики, но и обеспечить высокую эффективность преобразования энергии в широком диапазоне изменения нагрузок и скоростей. Наиболее перспективным вариантом в данном направлении является применение синхронных двигателей с постоянными магнитами, которые позволяют развивать более высокие моменты, чем асинхронные двигатели, при схожих массогабаритных показателях, что является бесспорным преимуществом при их использовании в качестве тяговых двигателей. Первые примеры такого использования синхронных двигателей на железнодорожном транспорте показали их высокую эффективность. Особенности синхронных двигателей с постоянными магнитами таковы, что для их корректной работы необходимо применение полупроводникового преобразователя частоты, силовая часть которого, в общем случае, идентична силовой части электропривода с асинхронными двигателями, что позволяет использовать аналогичные технические решения, причем это касается не только силового канала, но и системы управления, т.к. конструкции статоров асинхронных и синхронных машин одинаковы. Наличие постоянных магнитов на роторе, создающих магнитный поток, вместо обмотки ротора обуславливает гораздо более высокий потенциал энергосбережения в широком диапазоне изменения частоты вращения и момента сопротивления за счет регулирования потокосцепления статора.

Основой для повышения эффективности преобразования энергии является правильный выбор значения потокосцепления статора, которое обеспечит выполнение требуемых показателей качества системы управления с минимально возможными потерями для данного режима работы.

Вышеизложенное обеспечивает актуальность выбранной темы диссертации и проведенных теоретических исследований.

Степень разработанности темы исследования.

В своей работе автор опирался на труды ученых в области электроприводов переменного тока – В. И. Аносова, А. С. Анучина, В. Я. Беспалова, И. Я. Браславского, А. Б. Виноградова, С. В. Власьевского, А. Н. Горожанкина, М. А. Григорьева, А. М. Евстафьева, А. А. Зарифьяна, А. В. Захарова, Ю. М. Инькова, В. И. Ключева, А. Е. Козярука, П. Г. Колпахчяна, И. П. Копылова, А. С. Космодамианского, М. П. Костенко, В. А. Кучумова,

В. В. Литовченко, В. Н. Мещерякова, В. А. Мищенко, Г. Б. Онищенко, П. Ю. Петрова, А. А. Пугачева, Н. А. Ротанова, В. В. Рудакова, А. Н. Савоськина, Г. А. Федяевой, Р. Т. Шрейнера, F. Blaschke, I. Boldea, C. Cavallaro, M. Depenbrock, J. Holtz, Y. Inoue, K. Kondo, W. Leonard, E. Levi, T. A. Lipo, K. Matsuoka, S. Morimoto, D. W. Novotny, M. Sanada, R. Schönfeld, I. Takahashi, J. Wang, и других ученых.

Целью диссертационного исследования является разработка и исследование системы прямого управления моментом, которая обеспечивает минимум тока обмотки статора синхронных двигателей с постоянными магнитами с различными типами магнитной системы ротора.

Достижение указанной цели определило следующие основные **задачи диссертации**:

- анализ технических характеристик, схемных и конструктивных решений тяговых электроприводов железнодорожного транспорта;
- разработка математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами, позволяющей оценивать эффективность преобразования энергии в широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения ротора;
- разработка математической модели системы прямого управления моментом для электроприводов переменного тока;
- исследование энергетических характеристик электроприводов, имеющих систему прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами;
- разработка лабораторного стенда и проведение экспериментальных исследований, подтверждающих адекватность разработанных математических моделей;
- вывод аналитических зависимостей задания на потокосцепление статора синхронных двигателей с постоянными магнитами, обеспечивающих минимум тока обмотки статора;
- разработка структурной схемы, алгоритмов работы и математического описания системы поиска минимума тока обмотки статора в составе системы прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Объект исследования – тяговый электропривод локомотива с системой прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Предмет исследования – энергетические характеристики тягового электропривода с системой прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Научная новизна заключается в следующем:

- разработана математическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в системе координат $d-q$ с учетом потерь мощности в магнитопроводе статора и постоянных магнитах, насыщения магнитопровода статора, температур обмотки и магнитопровода статора и постоянных магнитов;
- показано, что регулирование потокосцепления статора влияет на величину тока обмотки статора синхронных двигателей с постоянными магнитами, причем это влияние в наибольшей степени проявляется для двигателей, имеющих магнитную несимметрию;
- получены аналитические зависимости задания на потокосцепление статора от параметров эквивалентной схемы замещения синхронных двигателей с постоянными магнитами с различными типами магнитной системы ротора и их момента сопротивления, обеспечивающие минимум тока обмотки статора.
- разработаны структурная схема, алгоритмы работы и математическое описание систем прямого управления моментом синхронными двигателями с постоянными магнитами с поиском минимума тока обмотки статора.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложено расположение обмоток в системе координат $d-q$ синхронных двигателей с различными типами магнитной системы ротора, составлены эквивалентные схемы замещения, синтезированы дифференциальные уравнения синхронного двигателя с постоянными магнитами с учетом потерь мощности в магнитопроводе статора и постоянных магнитах, насыщения магнитопровода статора, температур обмотки и магнитопровода статора и постоянных магнитов, позволяющие оценивать эффективность преобразования энергии в широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения ротора;
- разработаны математические модели системы прямого управления моментом для электроприводов с асинхронным двигателем и синхронным двигателем с постоянными магнитами;
- разработан лабораторный стенд, позволяющий исследовать энергетические и механические характеристики электропривода с системой прямого управления моментом асинхронного двигателя;
- проведены исследования энергетических характеристик электроприводов с системой прямого управления моментом синхронных двигателей с постоянными магнитами, которые показали, что регулирование потокосцепления статора влияет на величину тока обмотки статора синхронных двигателей с постоянными магнитами, причем это влияние в наибольшей степени проявляется для двигателей с магнитной несимметрией;
- получены аналитические зависимости задания на потокосцепление статора синхронных двигателей с постоянными магнитами от параметров

эквивалентной схемы замещения и нагрузки, разработана математическая модель системы поиска минимума тока обмотки статора, применение которых позволяет реализовывать механические характеристики с минимально возможным током обмотки статора при текущем режиме работы без ухудшения показателей качества регулирования.

Методология и методы исследования.

Для достижения цели исследования и реализации поставленных задач использовались современные методы научного исследования, которые базируются на теоретической электротехнике, теории электропривода, теории электрических машин, теории автоматического управления, компьютерного и физического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в системе координат $d-q$ с учетом потерь мощности в магнитопроводе статора и постоянных магнитах, насыщения магнитопровода статора, температуры обмотки статора и постоянных магнитов;

- структурные схемы и математическое описание трех вариантов системы прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами: с двумя контурами регулирования потокосцепления статора и момента с таблицей переключений вектора напряжения; с одним контуром регулирования момента с пространственно-векторной модуляцией напряжения обмотки статора; с двумя контурами регулирования потокосцепления статора и момента с пространственно-векторной модуляцией напряжения обмотки статора;

- результаты исследований энергетических характеристик электропривода с системой прямого управления моментом синхронных двигателей с постоянными магнитами;

- аналитические зависимости задания на потокосцепление статора от параметров эквивалентной схемы замещения синхронных двигателей с постоянными магнитами с различными типами магнитной системы ротора и их момента сопротивления, обеспечивающие минимум тока обмотки статора.

- структурная схема, алгоритмы работы и математическое описание системы прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами с поиском минимума тока обмотки статора;

Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается обоснованностью используемых теоретических зависимостей и принятых допущений при анализе электромагнитных и электромеханических процессов, применением известных математических методов; подтверждается

согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Апробация результатов.

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались и получили одобрение на VI – VIII Международных научно-практических конференциях «Новые горизонты», Брянск, 2019 г., 2020 г., 2021 г.; III – V Международных научно-практических конференциях «САПР и моделирование в современной электронике», Брянск, 2019 г., 2020 г., 2021 г.; XIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», Оренбург, 2022 г.; – на заседаниях кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» ФГБОУ ВО «БГТУ» 2021 г., 2022 г., 2023 г., 2024 г.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 143 наименований, двух приложений и содержит 170 страниц основного текста, включая 84 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о структуре диссертации.

В **первом разделе** выполнен обзор основных направлений развития тягового электропривода железнодорожного транспорта; проведен анализ тяговых электроприводов с двигателями переменного тока, применяемых на железнодорожном подвижном составе; рассмотрен опыт практического использования синхронных двигателей для тяговых электроприводов на транспорте; проанализированы теоретические исследования и практические разработки в области систем управления электроприводов переменного тока.

Во **втором разделе** выполнена разработка математических моделей, описывающих преобразование энергии в электрических машинах переменного тока.

На основании общих положений теории преобразования энергии в электрических машинах переменного тока представлены фазные и координатные преобразования, позволяющие переходить от n -фазной электрической машины к двухфазной, вращающейся с произвольной частотой вращения, и наоборот с учетом несимметрии напряжения.

Проанализировано взаимное расположение обмоток в системе координат d - q для синхронных двигателей с различными типами возбуждений. В результате

для синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) без демпферной обмотки разработана эквивалентная схема замещения (рисунок 1).

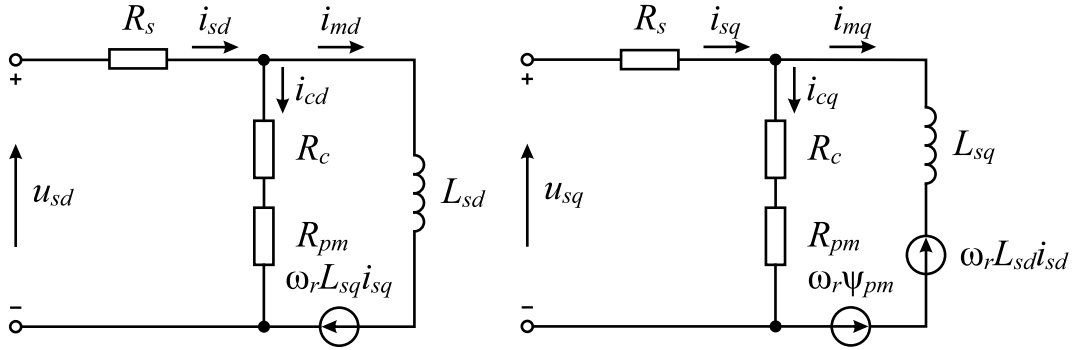


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения синхронного двигателя с постоянными магнитами с учетом потерь мощностей в магнитопроводе статора и в постоянных магнитах в системе координат d - q

Напряжения обмотки статора в системе координат d - q для эквивалентной схемы замещения, представленной на рисунке 1, можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{md} + \left(1 + \frac{R_s}{R_c + R_{pm}}\right) \left(L_{sd} \frac{di_{md}}{dt} - \omega_r \psi_{sq}\right), \\ u_{sq} &= R_s i_{mq} + \left(1 + \frac{R_s}{R_c + R_{pm}}\right) \left(L_{sq} \frac{di_{mq}}{dt} + \omega_r \psi_{sd}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

где u_{sd} и u_{sq} – напряжения обмотки статора по осям d и q соответственно; R_s – сопротивление обмотки статора; i_{md} и i_{mq} – составляющие тока намагничивания в магнитных ветвях по осям d и q соответственно; R_c и R_{pm} – эквивалентные сопротивления потерь мощностей в магнитопроводе статора и в постоянных магнитах соответственно; L_{sd} и L_{sq} – индуктивности обмотки статора по осям d и q соответственно; ω_r – электрическая частота вращения ротора; ψ_{sd} и ψ_{sq} – потокосцепление статора по осям d и q соответственно.

Потокасцепления статора в системе координат d - q для эквивалентной схемы замещения, представленной на рисунке 1, могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_{sd} i_{md} + \psi_{pm}, \\ \psi_{sq} &= L_{sq} i_{mq}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ψ_{pm} – потокосцепление постоянных магнитов (фиктивной обмотки).

Согласно первому закону Кирхгоффа уравнения токов для эквивалентной схемы замещения, представленной на рисунке 1, могут быть представлены так:

$$\begin{aligned} i_{md} &= i_{sd} - i_{cd}, \\ i_{mq} &= i_{sq} - i_{cq}, \end{aligned} \quad (3)$$

где i_{sd} и i_{sq} – токи обмотки статора по осям d и q соответственно; i_{cd} и i_{cq} – эквивалентные токи потерь мощностей в магнитопроводе статора и в постоянных магнитах по осям d и q соответственно.

Эквивалентные токи потерь мощностей в магнитопроводе статора и в постоянных магнитах i_{cd} и i_{cq} , представленные в (3), могут быть выражены так:

$$\begin{aligned} i_{cd} &= -\frac{\omega_r L_{sq} i_{mq}}{R_c + R_{pm}}, \\ i_{cq} &= \frac{\omega_r (\psi_{pm} + L_{sd} i_{md})}{R_c + R_{pm}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение электромагнитного момента имеет вид:

$$M = p_n (\psi_{pm} i_{mq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{md} i_{mq}). \quad (5)$$

где p_n – число пар полюсов.

Суммарные электромагнитные потери мощности в двигателе можно определить следующим образом:

$$P_\Sigma = P_m + P_c + P_{pm}, \quad (6)$$

где P_m – электрические потери мощности в меди обмотки статора; P_c – потери мощности в магнитопроводе статора; P_{pm} – потери мощности в постоянных магнитах (потери мощности в объеме постоянных магнитов из-за влияния вихревых токов).

Расчет электрических потерь мощности в меди обмотки статора синхронного двигателя с постоянными магнитами представлен ниже:

$$P_m = R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2). \quad (7)$$

С учетом (3) и (4) уравнение (7) в установившемся режиме принимает вид, представленный в (8).

$$P_m = R_s \left[\left(i_{md} - \frac{\omega_r L_{sq} i_{mq}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{mq} + \frac{\omega_r (\psi_{pm} + L_{sd} i_{md})}{R_c} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Потери мощности в магнитопроводе статора синхронного двигателя с постоянными магнитами возможно рассчитать согласно уравнению (9).

$$P_c = R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2). \quad (9)$$

С учетом (3), уравнение (9) в установившемся режиме примет следующий вид:

$$P_c = \left[\frac{(\omega_r L_{sq} i_{mq})^2}{R_c} + \frac{(\omega_r (\psi_{pm} + L_{sd} i_{md}))^2}{R_c} \right]. \quad (10)$$

Потери мощности в постоянных магнитах P_{pm} математически выглядят также, как и потери мощности в магнитопроводе статора P_c при условии, что в уравнениях (9) и (10) сопротивление R_c заменяется на сопротивление R_{pm} .

На основании научно-исследовательских работ, направленных на исследования насыщения магнитопровода статора электрических машин переменного тока, выполнен эмпирический учет линейной зависимости индуктивностей L_{sd} и L_{sq} от токов намагничивания i_{md} и i_{mq} соответственно для двигателей с магнитной симметрией ($L_{sd} = L_{sq}$):

$$\begin{aligned} L_{sd*} &= L_{sq*} = 1,1 \quad (i_{md*} < i_{md0*}; i_{mq*} < i_{mq0*}), \\ L_{sd*} &= -0,125i_{md*} + 1,125 \quad (i_{md*} > i_{md0*}), \\ L_{sq*} &= -0,125i_{mq*} + 1,125 \quad (i_{mq*} > i_{mq0*}), \end{aligned} \quad (11)$$

где * – относительное значение параметров; i_{md0} и i_{mq0} – токи, при которых индуктивности L_{sd} и L_{sq} соответственно остаются неизменными (в основном, при номинальной нагрузке они составляют $i_{md0} = 0 \dots 0,2i_{md}$, $i_{mq0} = 0 \dots 0,2i_{mq}$).

Эмпирический учет нелинейной зависимости индуктивности L_{sq} от тока намагничивания i_{mq} для двигателей с магнитной несимметрией ($L_{sd} < L_{sq}$) представлен в уравнении (12). При этом изменение индуктивности L_{sd} у таких двигателей происходит линейно, согласно уравнению (11).

$$\begin{aligned} L_{sq*} &= -0,6043i_{mq*}^5 + 1,8871i_{mq*}^4 - 1,6677i_{mq*}^3 + 0,1246i_{mq*}^2 + \\ &+ 0,0052i_{mq*} + 1,2498. \end{aligned} \quad (12)$$

Для эквивалентных схем замещения двигателей переменного тока и частоты тока обмотки статора f_s меньшей номинального значения, эмпирическая зависимость сопротивления R_c от нее имеет вид:

$$R_{c*} = 1,1198f_{s*}^5 - 3,3854f_{s*}^4 + 3,505f_{s*}^3 - 1,1146f_{s*}^2 + 0,6930f_{s*} + 0,182. \quad (13)$$

Для частоты тока обмотки статора f_s больше номинального значения эмпирическая зависимость сопротивления R_c от нее выражается так:

$$\begin{aligned} R_{c*} &= 0,1536f_{s*}^5 - 1,3854f_{s*}^4 + 5,1505f_{s*}^3 - 10,1021f_{s*}^2 + 11,0217f_{s*} - \\ &- 3,8384. \end{aligned} \quad (14)$$

Также во втором разделе приведена эквивалентная схема замещения и дифференциальные уравнения для асинхронного двигателя (АД с КЗ) с учетом потерь мощности в магнитопроводе, насыщения магнитопровода статора, эффекта вытеснения тока ротора; приведены уравнения для учета влияния температуры на различные узлы двигателей переменного тока.

Третий раздел посвящен разработке математического описания систем прямого управления моментом двигателями переменного тока. Приведены особенности реализации и математическое представление системы прямого управления моментом в зависимости от способа коммутации двухуровневого автономного инвертора напряжения.

На рисунке 2 представлена структура классической системы прямого управления моментом двигателем переменного тока с двумя контурами регулирования потокосцепления статора и момента. Коммутация силовых

ключей в данной системе управления происходит согласно таблице переключения, определяющей выбор пространственных векторов.

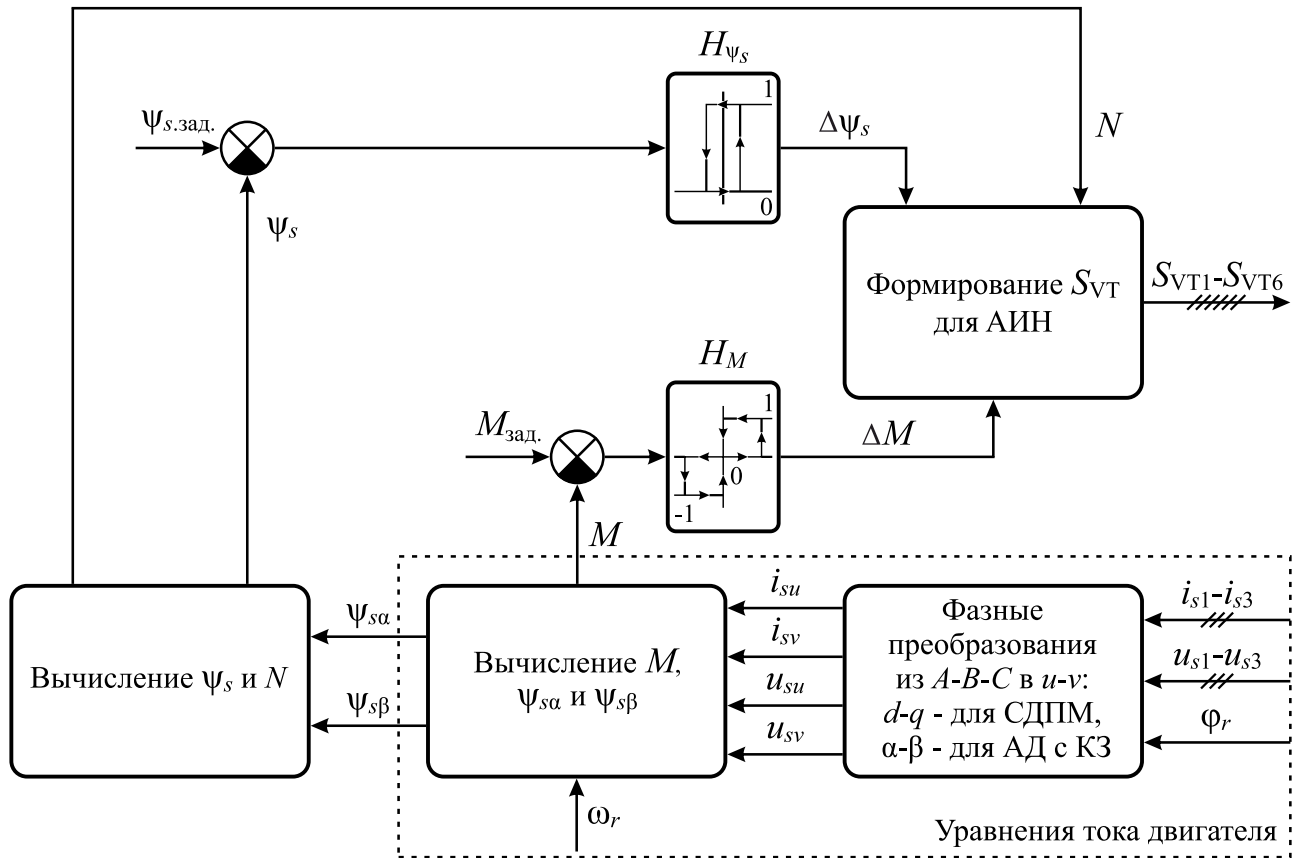


Рисунок 2 – Структура классической системы прямого управления моментом двигателем переменного тока ($S_{VT1} - S_{VT6}$ – управляющие сигналы силовыми ключами; H_{ψ_s} и H_M – ширина петли гистерезиса релейного регулятора потокосцепления статора и момента соответственно; N – номер сектора, в котором находится вектор потокосцепления статора ψ_s ; ϕ_r – электрическое угловое положение ротора)

Также разработаны структурные схемы и математическое описание для двух вариантов системы прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами: с одним контуром регулирования момента с пространственно-векторной модуляцией напряжения обмотки статора; с двумя контурами регулирования потокосцепления статора и момента с пространственно-векторной модуляцией напряжения обмотки статора.

Оценена возможность создания энергетически эффективных электроприводов за счет выбора задания на потокосцепление статора. Для компьютерного моделирования использованы два синхронных двигателя с постоянными магнитами ($L_{sd} = L_{sq}$ и $L_{sd} < L_{sq}$) мощностью 132 кВт. Некоторые результаты моделирования приведены на рисунке 3.

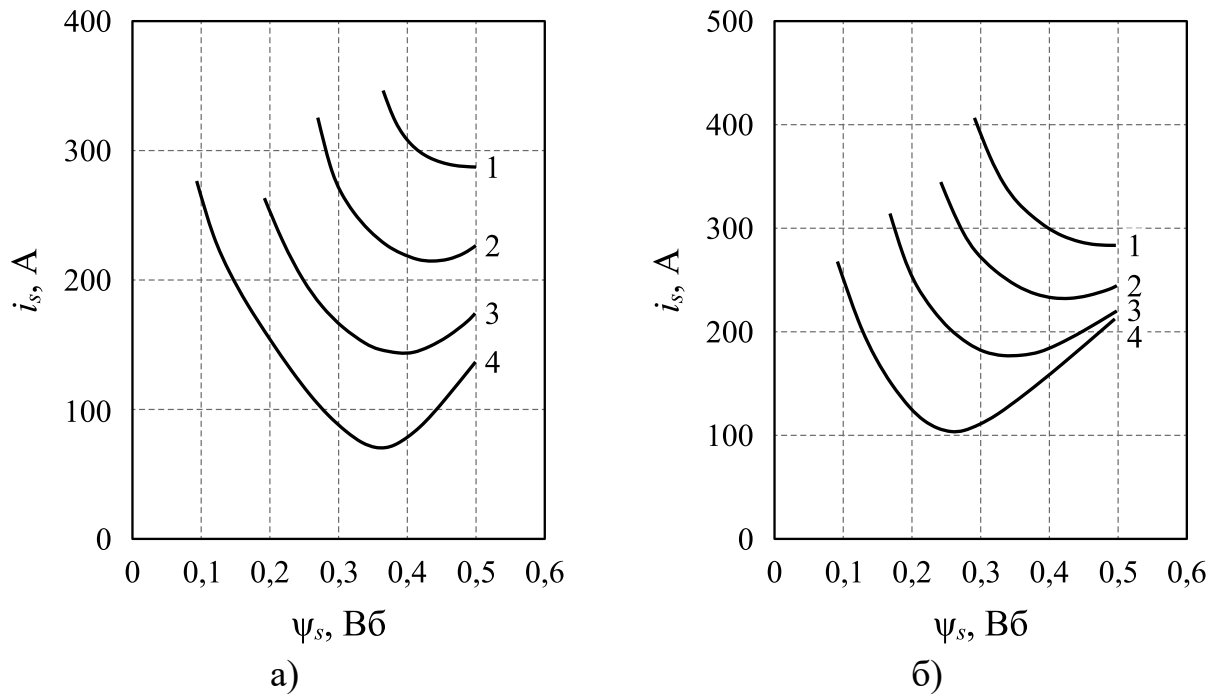


Рисунок 3 – Зависимости действующего значения тока обмотки статора i_s для двигателя с $L_{sd} = L_{sq}$ ($i_{s.n} = 286,3$ А) (а), для двигателя с $L_{sd} < L_{sq}$ ($i_{s.n} = 281,8$ А) (б), от потокосцепления статора ψ_s при частоте вращения $\omega = \omega_n$ (314 рад/с), температуре обмотки статора $\theta_s = 20$ °С, магнитопровода статора $\theta_c = 20$ °С, постоянных магнитов $\theta_{pm} = 20$ °С, при следующих моментах сопротивления: 1 – $M_c = M_n$, 2 – $M_c = 0,75M_n$, 3 – $M_c = 0,5M_n$, 4 – $M_c = 0,25M_n$

Анализ полученных результатов показывает, что в зоне постоянства момента ($\omega < \omega_n$) в различных режимах уменьшение тока обмотки статора может составить до 21,7% от номинального значения для двигателя с $L_{sd} = L_{sq}$ и 37,9% – для двигателя с $L_{sd} < L_{sq}$; уменьшение суммарных электромагнитных потерь мощности – до 31,5% от номинального значения для двигателя с $L_{sd} = L_{sq}$ и 48,7% – для двигателя с $L_{sd} < L_{sq}$ (номинальные суммарные электромагнитные потери мощности составляют $\Delta P_{\Sigma n} = 4$ кВт). Уменьшение потерь мощности приводит к снижению нагрева соответствующих узлов двигателя, что положительно сказывается на сроке службы изоляции и постоянных магнитов ротора.

Независимо от типа магнитной системы ротора синхронных двигателей ($L_{sd} = L_{sq}$ или $L_{sd} < L_{sq}$) влияние момента сопротивления на характер их зависимостей одинаково – снижение нагрузки вызывает соответствующее уменьшение потокосцепления статора, при котором достигается минимум тока обмотки статора и минимум суммарных электромагнитных потерь мощности двигателя. При номинальной нагрузке получен закономерный результат, когда режим минимума тока обмотки статора и суммарных электромагнитных потерь мощности двигателя обеспечивается номинальным значением потокосцепления

статора. Эти режимы имеют близкие значения потокосцепления статора (наибольшая разница потокосцеплений в этом режиме не превышает 10,6% в рассматриваемом диапазоне изменения варьируемых величин), что объясняется доминирующим влиянием электрических потерь мощности в меди обмотки статора на суммарные электромагнитные потери мощности. Аналогично объясняется одинаковый характер трех зависимостей от потокосцепления статора – тока обмотки статора, электрических потерь мощности в меди обмотки статора и суммарных электромагнитных потерь мощности.

Уменьшение потокосцепления статора при уменьшении момента сопротивления оказывает наибольший эффект уменьшения тока обмотки статора и потерь мощностей для синхронных двигателей с постоянными магнитами с $L_{sd} < L_{sq}$, причем для этого типа двигателей оптимальное значение потокосцепления статора меньше, чем для двигателей, имеющих $L_{sd} = L_{sq}$. Результаты моделирования также показали большую перегрузочную способность при пониженном потокосцеплении статора для двигателей с $L_{sd} < L_{sq}$. Эти закономерности связаны с меньшим номинальным значением потокосцепления постоянных магнитов, следовательно, для таких синхронных двигателей синтез энергетически эффективных систем управления наиболее критичен. Отметим, что именно синхронные двигатели с постоянными магнитами, имеющие $L_{sd} < L_{sq}$, рассматриваются как перспективный вариант для тяговых электроприводов, т.к. они лучше работают в зоне постоянства мощности за счет размагничивания магнитов и для производства их ротора требуется меньшее количество редкоземельных материалов.

Изменение частоты вращения, как и ожидалось, не оказывает существенного влияния на зависимости тока обмотки статора и электрических потерь мощности в меди обмотки статора от потокосцепления статора, но приводит к незначительному изменению суммарных электромагнитных потерь мощности за счет зависимости потерь мощности в магнитопроводе статора от частоты тока обмотки статора.

В результате исследования влияния температуры на характеристики электропривода установлено, что увеличение температуры обмотки и магнитов приводит к увеличению всех видов потерь мощности и тока обмотки статора, причем этот эффект в наибольшей степени проявляется для электрических потерь мощности в меди обмотки статора и суммарных электромагнитных потерь мощности. Для синхронных двигателей с $L_{sd} = L_{sq}$ повышение температуры приводит к смещению точки экстремума тока обмотки статора и потерь мощностей в сторону меньших значений потокосцепления статора, а для двигателей с $L_{sd} < L_{sq}$ изменение температуры не оказывает значительного влияния на значение потокосцепления статора, обеспечивающего минимум тока

обмотки статора и потерь мощностей. Следовательно, температура меди обмотки статора, магнитопровода статора и магнитов ротора оказывает гораздо большее влияние на определение значения потокосцепления статора, обеспечивающего режим минимума тока или потерь мощности, для двигателей с $L_{sd} = L_{sq}$.

Таким образом, эффект от регулирования потокосцепления статора при работе с пониженными нагрузками очевиден – это позволяет обеспечивать работу с максимальными значениями энергетических показателей качества при данных условиях работы, что улучшает не только технико-экономические, но и эксплуатационные характеристики. Основной задачей системы управления в таком случае является определение рационального с точки зрения энергетической эффективности значения потокосцепления статора и его регулирование без снижения качества переходных процессов. Учитывая близость режимов минимума тока обмотки статора и суммарных электромагнитных потерь мощности, в качестве показателя энергетической эффективности целесообразно выбрать ток обмотки статора в связи с наличием технических средств его непосредственного измерения.

Были получены аналогичные зависимости для двух двигателей в зоне постоянства мощности ($\omega > \omega_n$). Анализ полученных результатов показывает, что в зоне постоянства мощности при частотах вращения выше номинального значения у синхронного двигателя с постоянными магнитами, имеющего $L_{sd} = L_{sq}$, уменьшение тока обмотки статора может составить до 2,5% от номинального значения (при $\omega \leq 1,25\omega_n$), для двигателя с $L_{sd} < L_{sq}$ – до 18,7% (при $\omega \leq 1,5\omega_n$); уменьшение суммарных электромагнитных потерь мощности – до 5,5% от номинального значения для двигателя с $L_{sd} = L_{sq}$ и 23,2% – для двигателя с $L_{sd} < L_{sq}$.

Также в третьем разделе приведены энергетические характеристики электропривода с системой прямого управления моментом асинхронного двигателя, полученные на компьютерной модели и лабораторном стенде, разработанном с участием автора. Полученные результаты подтверждают адекватность разработанных математических моделей двигателей переменного тока и системы прямого управления моментом, а также выводов, касающихся зависимостей тока обмотки статора и электрических потерь мощности в меди обмотки статора от потокосцепления статора. Сравнивая целесообразность применения систем минимизации тока обмотки статора асинхронных и синхронных двигателей, следует признать меньшую эффективность использования таких систем для тяговых электроприводов с асинхронными двигателями, т.к. уменьшение тока обмотки статора происходит при малых нагрузках (близких к режиму холостого хода), его значение невелико по

отношению к номинальному значению тока обмотки статора (9,3% для нагрузки менее 20% от номинальной).

В четвертом разделе выполнено формирование задания на потокосцепление статора синхронных двигателей, обеспечивающего минимум тока обмотки статора.

При работе электропривода в зоне постоянства момента получены следующие аналитические зависимости задания на потокосцепление статора двигателя, обеспечивающего минимум тока обмотки статора при соответствующем задании на момент:

- для двигателя с $L_{sd} = L_{sq} = L_s$:

$$\psi_{s.зад.} = \sqrt{\psi_{pm}^2 + \left(\frac{M_{зад.} L_s}{p_n \psi_{pm}}\right)^2}. \quad (15)$$

- для двигателя с $L_{sd} < L_{sq}$:

$$\psi_{s.зад.} = \sqrt{\frac{(L_{sq} - L_{sd})^2 \psi_{pm}^2 b^2 - L_{sq}(L_{sq} + 2L_{sd}) \psi_{pm}^2 b + L_{sq}^2 \psi_{pm}^2}{(L_{sq} - L_{sd})^2}}, \quad (16)$$

где b – коэффициент, зависящий от параметров эквивалентной схемы замещения.

При работе электропривода в зоне постоянства мощности вычисление задания на потокосцепление статора для обоих типов двигателей вычисляется так:

$$\psi_{s.зад.} = \frac{U_{s.m}}{\omega_r}, \quad (17)$$

где $U_{s.m}$ – максимальное амплитудное значение фазного напряжения.

Системы управления, использующие зависимости (15) и (16), позволяют поддерживать минимальное значение тока обмотки статора для двигателей с магнитной симметрией и магнитной несимметрией. Однако эти системы имеют ряд недостатков. Во-первых, вычисление задания на потокосцепление статора зависит от типа магнитной системы ротора, т.е. каждая система управления не является универсальной, а подходит только для конкретного типа двигателя. Во-вторых, вычисление задания на потокосцепление статора построено на расчете параметров схемы замещения, которые в процессе работы из-за насыщения магнитопровода статора и нагрева различных узлов двигателя (меди обмотки статора, магнитопровода статора и магнитов ротора) изменяются в достаточно широком диапазоне, что может привести к существенной погрешности вычисления потокосцепления и отклонению от точки минимума тока.

Для адаптации системы управления к изменениям параметров схемы замещения и типа магнитной системы ротора разработан поисковый алгоритм

нахождения минимума тока обмотки статора. Для этого к заданию на потокосцепление статора, которое в первой зоне равняется своему номинальному значению, добавлен тестовый сигнал треугольной формы $\Delta\psi_{s.\text{тест.}}$ (рисунок 4):

$$\begin{aligned}\Delta\psi_{s.\text{тест.}} &= kt, t \in (0; T_T/2], \\ \Delta\psi_{s.\text{тест.}} &= kT_T - kt, t \in (T_T/2; T_T],\end{aligned}\quad (18)$$

где k – эмпирическая постоянная; T_T – период треугольного сигнала $\Delta\psi_{s.\text{тест.}}$;

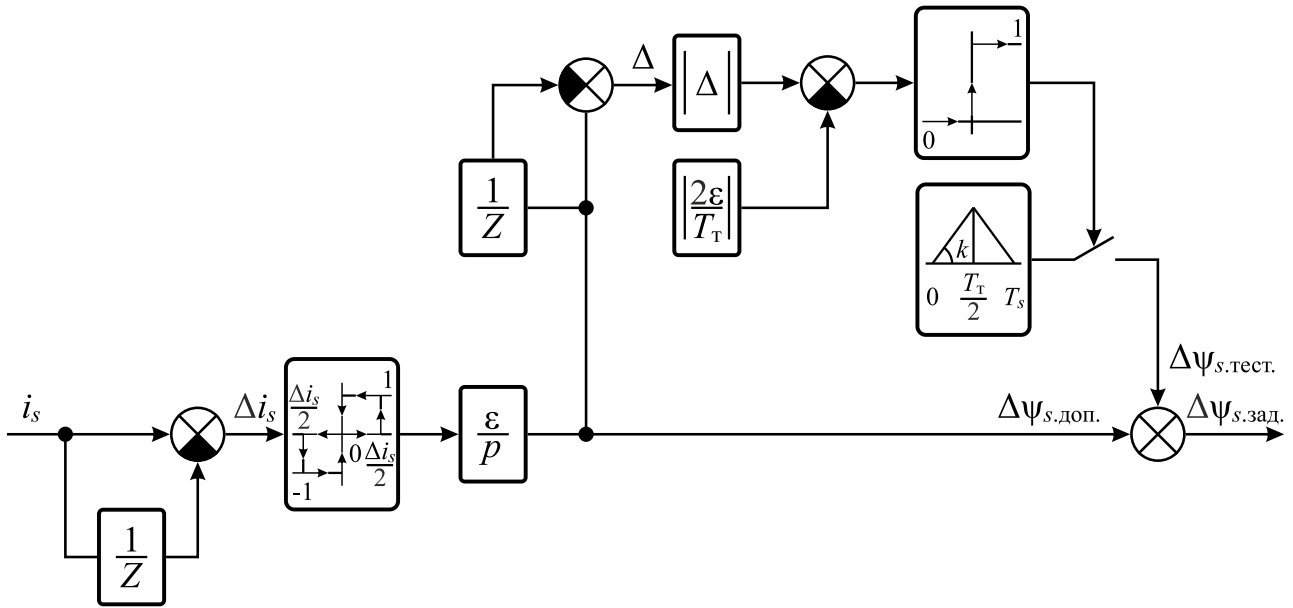


Рисунок 4 – Система поиска минимума тока обмотки статора двигателей переменного тока

В этом случае положение текущей точки на графике зависимости тока от потокосцепления относительно минимального значения тока можно определить в функции знака изменения тока, вызванного изменением потокосцепления треугольной формы $\Delta\psi_{s.\text{тест.}}$ в течение первого полупериода $T_T/2$. Для этого система поиска минимума тока обмотки статора осуществляет сравнение двух значений действующего тока в текущий и предыдущий моменты времени:

$$\Delta i_s = \Delta i_{s(T_T/2)} - \Delta i_{s(0)}. \quad (19)$$

Шаг дискретизации равняется половине периода сигнала $\Delta\psi_{s.\text{тест.}}$, а само сравнение происходит только для первого полупериода сигнала $\Delta\psi_{s.\text{тест.}}$, что позволяет определить изменение тока Δi_s при увеличении потокосцепления статора.

Алгоритм работы поисковой системы потокосцепления статора, обеспечивающей минимум тока обмотки статора двигателей переменного тока, представлен ниже:

- если происходит возрастание тока обмотки статора, т.е. текущее значение потокосцепления статора больше значения, обеспечивающего минимум тока, то для уменьшения тока обмотки статора необходимо уменьшить потокосцепление;

- если происходит уменьшение тока обмотки статора, т.е. текущее значение потокосцепления статора меньше значения, обеспечивающего минимум тока, то для уменьшения тока обмотки статора необходимо увеличивать потокосцепление;

- если ток обмотки статора постоянен, то значение потокосцепления статора, обеспечивающее минимум тока, определено и не нуждается в изменении.

Для обеспечения режима работы синхронного двигателя с постоянными магнитами, приближенного к режиму минимума тока обмотки статора, необходимо определить направление изменения задания на дополнительное потокосцепление $\Delta\psi_{s, \text{доп.}} = \varepsilon t$ (ε – коэффициент, определяющий темп изменения дополнительного потокосцепления) так:

- в случае увеличения тока обмотки статора задание дополнительного потокосцепления должно быть направлено на уменьшение задания потокосцепления статора следующим образом:

$$\Delta\psi_{s, \text{зад.}} = \Delta\psi_{s, \text{тест.}} - \Delta\psi_{s, \text{доп.}} = \Delta\psi_{s, \text{тест.}} - \varepsilon t; \quad (20)$$

- в случае уменьшения тока обмотки статора задание дополнительного потокосцепления должно быть направлено на увеличение задания потокосцепления статора следующим образом:

$$\Delta\psi_{s, \text{зад.}} = \Delta\psi_{s, \text{тест.}} + \Delta\psi_{s, \text{доп.}} = \Delta\psi_{s, \text{тест.}} + \varepsilon t. \quad (21)$$

Задание на суммарное значение потокосцепления статора, таким образом, является суммой двух составляющих, представленной в уравнении (22).

$$\Delta\psi_{s, \text{зад.}\Sigma} = \psi_{s, \text{зад.}} + \Delta\psi_{s, \text{зад.}}. \quad (22)$$

Для реализации определения знака разницы токов применено трехпозиционное реле с гистерезисом (рисунок 4). Наличие гистерезиса аналогично применению фильтра высокочастотных помех тока и обеспечивает нечувствительность системы к его случайным изменениям и колебаниям, вызванным работой автономного инвертора напряжения. Наличие нулевой позиции позволяет фиксировать оптимальное значение потокосцепления при его достижении.

Введение $\Delta\psi_{s, \text{тест.}}$ является возмущающим воздействием для электропривода, поэтому целесообразно применить отключение поиска при достижении минимума тока обмотки статора. Отключение сигнала $\Delta\psi_{s, \text{тест.}}$ происходит при неизменном в течении $4T_T$ значении $\Delta\psi_{s, \text{доп.}}$, включение сигнала

$\Delta\psi_{s,\text{тест.}}$ – при изменении значения $\Delta\psi_{s,\text{доп.}}$ за время $4T_T$ более, чем на $|2\varepsilon/T_T|$, что является признаком изменения условий работы электропривода.

Синтезированная система поиска минимума тока обмотки статора не меняет ни топологию, ни параметры системы прямого управления моментом, а является, по сути, блоком адаптации, обеспечивающим работу электропривода в режиме минимума тока обмотки статора.

Некоторые результаты моделирования электроприводов при неизменной частоте вращения для частоты коммутации силовых ключей $f_k = 1$ кГц приведены на рисунках 5 и 6. На рисунках 5 (а) и 6 (а) представлены результаты моделирования для системы поиска минимума тока обмотки статора, а на рисунках 5 (б) и 6 (б) – для аналитических зависимостей (15) и (16). Пуск электропривода производился при нагрузке $M_c = 0,25M_H$. Затем момент сопротивления ступенчато изменялся до значений $M_c = 0,5M_H$, $M_c = 0,75M_H$, $M_c = M_H$ в соответствующие моменты времени.

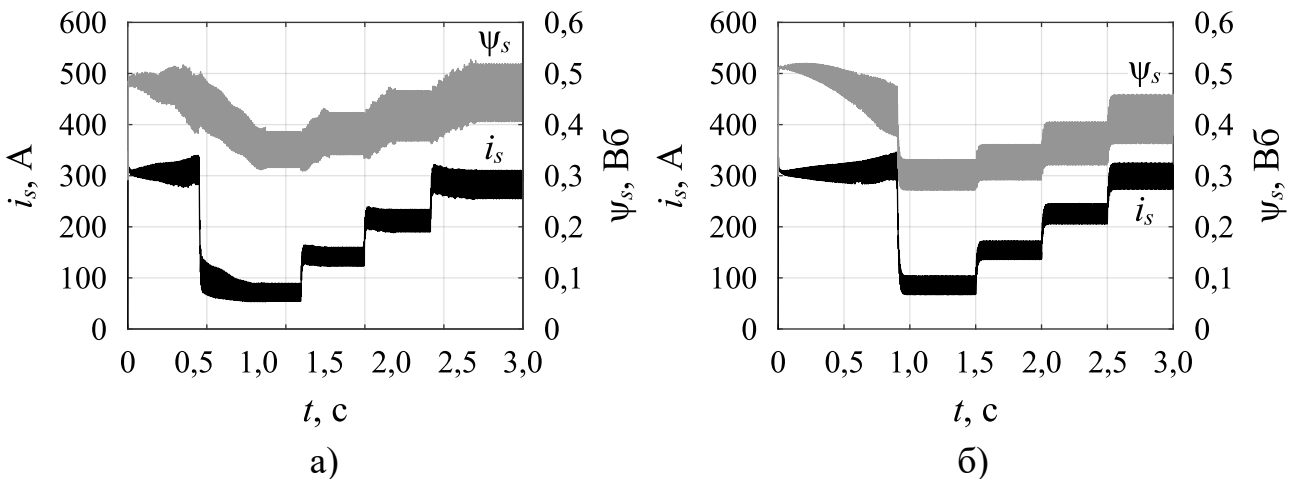


Рисунок 5 – Переходные процессы в электроприводе ($L_{sd} = L_{sq}$) с синтезированными системами управления при $f_k = 1$ кГц и $\omega = 314$ рад/с

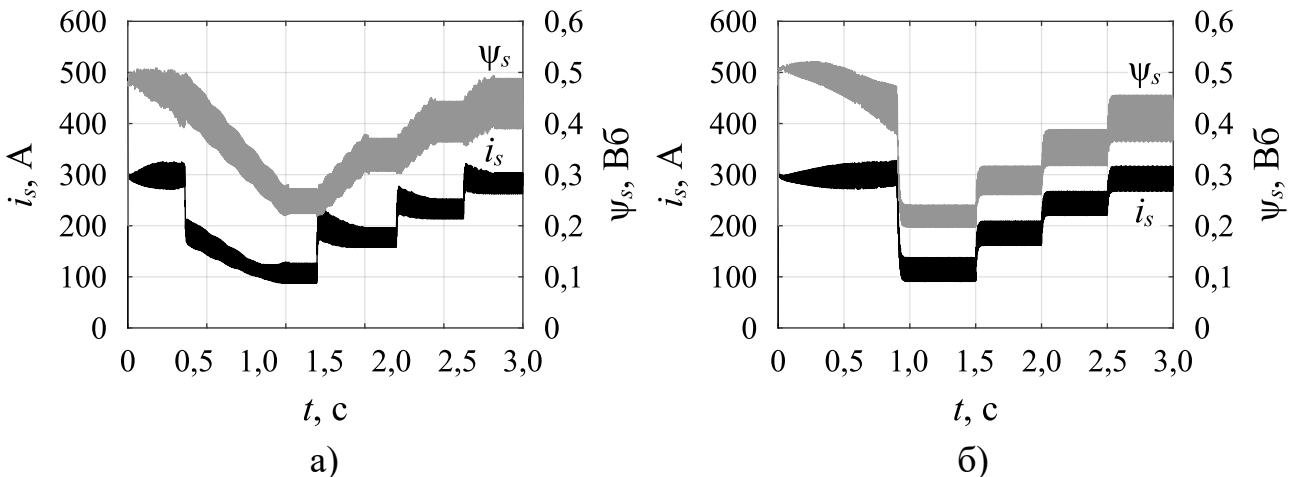


Рисунок 6 – Переходные процессы в электроприводе ($L_{sd} < L_{sq}$) с синтезированными системами управления при $f_k = 1$ кГц и $\omega = 314$ рад/с

Некоторые результаты моделирования электропривода ($L_{sd} < L_{sq}$) при неизменном моменте сопротивления для частоты коммутации силовых ключей $f_k = 2$ кГц приведены на рисунке 7. На рисунке 7 (а) представлены результаты моделирования для системы поиска минимума тока обмотки статора, а на рисунке 7 (б) – для аналитической зависимости (17). Пуск электропривода производился при частоте вращения $\omega = 0,5\omega_n$. Затем частота вращения линейно изменялась до значений $\omega = \omega_n$, $\omega = 1,5\omega_n$ в соответствующие моменты времени. В зоне постоянства мощности включается система поиска минимума тока.

Для электропривода с двигателем, имеющим $L_{sd} = L_{sq}$, результаты моделирования будут аналогичны рисунку 7.

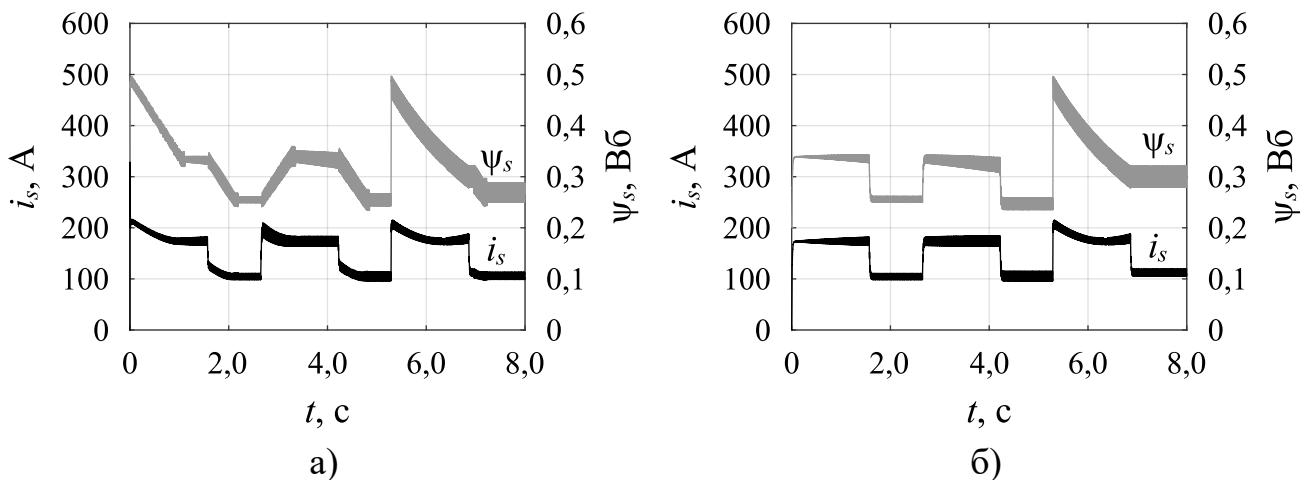


Рисунок 7 – Переходные процессы в электроприводе ($L_{sd} < L_{sq}$) с синтезированными системами управления при $f_k = 2$ кГц и $M_c = 0,25M_n$

Анализ электромеханических характеристик показывает, что применение синтезированных систем управления (формирования задания на потокосцепления статора) не повлияло на точность и быстродействие контуров регулирования частоты вращения и момента во всем диапазоне изменения частоты вращения и нагрузки, т.к. независимо от типа двигателя электропривод без изменений отрабатывает задание по частоте вращения и возмущения по моменту сопротивления. Введение дополнительной составляющей потокосцепления статора $\Delta\psi_{s, \text{тест.}}$ не оказывает существенного негативного влияния на механические характеристики электропривода за счет значительной инерции механической части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработке темы:

1. Проведен анализ основных направлений развития тягового электропривода железнодорожного транспорта, который показал, что дальнейшее совершенствование процессов электромеханического преобразования энергии с обеспечением требуемого качества в переходных и установившихся режимах возможно за счет применения синхронных двигателей с постоянными магнитами.

2. Разработаны эквивалентная схема замещения и дифференциальные уравнения синхронного двигателя с постоянными магнитами с учетом потерь мощности в магнитопроводе статора и постоянных магнитах, насыщения магнитопровода статора, температур обмотки и магнитопровода статора и постоянных магнитов.

3. Разработаны структурные схемы и математическое описание трех вариантов системы прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами: с двумя контурами регулирования потокосцепления статора и момента с таблицей переключений вектора напряжения; с одним контуром регулирования момента с пространственно-векторной модуляцией напряжения обмотки статора; с двумя контурами регулирования потокосцепления статора и момента с пространственно-векторной модуляцией напряжения обмотки статора.

4. Установлено, что в зоне постоянства момента уменьшение потокосцепления статора при уменьшении момента сопротивления оказывает наибольший эффект уменьшения тока обмотки статора и потерь мощностей для синхронных двигателей с постоянными магнитами с магнитной несимметрией, причем для этого типа двигателей оптимальное значение потокосцепления статора меньше, чем для двигателей, имеющих магнитную симметрию (уменьшение тока обмотки статора может составить до 21,7% от номинального значения для двигателя с магнитной симметрией и 37,9% – для двигателя с магнитной несимметрией; уменьшение суммарных электромагнитных потерь мощности – до 31,5% от номинального значения для двигателя с магнитной симметрией и 48,7% – для двигателя с магнитной несимметрией (номинальная мощность двигателей 132 кВт, номинальные потери составляют 4 кВт)).

5. Установлено, что в зоне постоянства мощности в широком диапазоне изменения частоты вращения минимум тока обмотки статора обеспечивается заданием на потокосцепления статора, реализующем предельную тяговую характеристику для установленной частоты вращения. Изменение потокосцепления статора при снижении нагрузки приводит к уменьшению тока обмотки статора для двигателей с магнитной симметрией при значениях частоты вращения $\omega \leq 1,25\omega_n$, для двигателей с магнитной несимметрией – $\omega \leq 1,5\omega_n$ (уменьшение тока обмотки статора может составить до 2,5% от номинального

значения для двигателя с магнитной симметрией и 18,7% – для двигателя с магнитной несимметрией; уменьшение потерь мощности – до 5,5% от номинального значения для двигателя с магнитной симметрией и 23,2% – для двигателя с магнитной несимметрией).

6. Установлено, что для синхронных двигателей с магнитной симметрией повышение температуры приводит к смещению точки экстремума тока обмотки статора и потерь мощностей в сторону меньших значений потокосцепления статора, а для двигателей с магнитной несимметрией изменение температуры не оказывает значительного влияния на значение потокосцепления статора, обеспечивающего минимум тока обмотки статора и потерь мощности.

7. Разработан лабораторный стенд для исследования процессов электромеханического преобразования энергии в электроприводе с классической системой прямого управления моментом асинхронного двигателя; установлено, что наибольший эффект от изменения потокосцепления статора асинхронного двигателя проявляется только при малых нагрузках, близких к режиму холостого хода (уменьшение тока статора по отношению к номинальному значению тока обмотки статора составляет 9,3% для нагрузки менее 20% от номинальной).

8. Получены аналитические зависимости задания на потокосцепление статора от параметров эквивалентной схемы замещения синхронного двигателя с постоянными магнитами с различными конструкциями ротора и его момента сопротивления, обеспечивающие минимум тока обмотки статора.

9. Разработаны структурная схема, алгоритмы работы и математическое описание системы прямого управления моментом синхронными двигателями с постоянными магнитами с поиском минимума тока обмотки статора; структурная схема, алгоритм и математическое описание не зависят от конструкции ротора.

10. Установлено, что применение синтезированных систем управления (формирования задания на потокосцепления статора) не повлияло на точность и быстродействие контуров регулирования частоты вращения. Точность поддержания тока в системе поиска минимума тока обмотки статора не зависит от частоты коммутации, параметров схем замещения, температуры и т.д. и остается примерно постоянной во всех рабочих диапазонах. Точность поддержания тока в системах формирования задания на потокосцепление статора по аналитическим выражениям понижается с уменьшением частоты коммутации, зависимость точности от значения момента сопротивления выражена слабо, несмотря на эффект насыщения.

11. Рекомендуется применять систему формирования задания на потокосцепление статора по аналитическим выражениям только в системе

прямого управления моментом, содержащей два контура регулирования потокосцепления статора и момента. Система поиска минимума тока обмотки статора может быть рекомендована для применения в различных вариантах реализации системы прямого управления моментом.

12. Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка возможности минимизации тока обмотки статора других двигателей переменного тока, не рассмотренных в диссертации (синхронных реактивных двигателей, вентильно-индукторных двигателей и др.) за счет изменения задания на потокосцепление статора аналитическим способом и при помощи системы поиска минимума тока обмотки статора в системе прямого управления моментом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) рецензируемые научные издания

1. Пугачев, А. А. Система прямого управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами с поиском минимума тока статора [Текст] / А. А. Пугачев, Н. В. Чуприна // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – № 1(67). – С. 46-55.

2. Чуприна, Н. В. Моделирование системы «синхронный генератор - преобразователь частоты - синхронный двигатель» [Текст] / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – № 3(21). – С. 89-96.

3. Пугачев, А. А. Моделирование динамических режимов работы электроприводов с системой векторного управления синхронным двигателем [Текст] / А. А. Пугачев, Н. В. Чуприна // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 3. – С. 100-113.

4. Чуприна, Н. В. Система прямого управления моментом тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами с минимизацией потерь мощности [Текст] / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // Интеллектуальная электротехника. – 2022. – № 4(20). – С. 22-37.

5. Чуприна, Н. В. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами [Текст] / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2(55). – С. 10-17.

6. Чуприна, Н. В. Моделирование электропривода переменного тока с алгоритмами пространственно-векторной модуляции [Текст] / Н. В. Чуприна, С. В. Седых, А. А. Пугачев, В. П. Маклаков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 1(15). – С. 80-88.

б) издания, включенные в международные базы цитирования (Scopus)

7. Inkov, Y. M. Formation of a Task of the Stator Flux Linkage of a Synchronous Motor with Permanent Magnets in a Direct Torque-Control System / Y. M. Inkov, A. S. Kosmodamiansky, A. A. Pugachev, N. V. Chuprina // Russian Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 94. – No. 9. – P. 645-649.

8. Inkov, Y.M., Comparative Assessment of Electric Drives with a Vector-Control System for Asynchronous Motors / Y. M Inkov, A. S. Kosmodamianskiy, A. A. Pugachev, T. N. Fadeykin, N. V. Chuprina // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93. – P. 570–575.

в) объекты интеллектуальной собственности

9. Патент на полезную модель № 210195 U1 Российская Федерация, МПК G01M 17/00. Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей: № 2021138435: заявл. 21.12.2021: опубл. 31.03.2022 / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, С. В. Седых; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет».

г) другие публикации

10. Чуприна, Н. В. Результаты сравнительной оценки тяговых электроприводов с синхронными и асинхронными двигателями [Текст] / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 25–27 октября 2022 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. – С. 337-341.

11. Чуприна, Н. В. Сравнительный анализ систем управления автономным инвертором напряжения для электроприводов переменного тока [Текст] / Н. В. Чуприна // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции, Брянск, 21–22 октября 2021 года. – Брянск: Новый формат, 2021. – С. 148-151.

12. Чуприна, Н. В. Анализ технических характеристик тяговых электроприводов подвижного состава [Текст] / Н. В. Чуприна // Новые горизонты: VIII научно-практическая конференция с международным участием. Сборник материалов и докладов, Брянск, 20 марта 2021 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. – С. 723-727.

13. Седых, С. В. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем и системой векторного управления в энергосберегающем режиме [Текст] / С. В. Седых, Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 октября

2020 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 181-184.

14. Чуприна, Н. В. Сравнительная оценка энергоэффективности систем управления автономным инвертором напряжения в составе электропривода переменного тока [Текст] / Н. В. Чуприна, С. В. Седых, А. А. Пугачев // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 октября 2020 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 208-211.

15. Седых, С. В. Идентификация параметров асинхронного двигателя посредством преобразователя частоты ACS850 [Текст] / С. В. Седых, Н. В. Чуприна // Новые горизонты: Материалы VII научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 20 марта 2020 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 543-547. 54

16. Чуприна, Н. В. Сравнительная оценка энергоэффективности электроприводов с асинхронными двигателями при различных законах управления [Текст] / Н. В. Чуприна, С. В. Седых, А. А. Пугачев // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Брянск, 24–25 октября 2019 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 132-135.

17. Чуприна, Н. В. Сравнение энергоэффективности частотных преобразователей, используемых в электроприводе тягового подвижного состава [Текст] / Н. В. Чуприна // Новые горизонты: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ, Брянск, 21 марта 2019 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 925-929.

Чуприна Николай Валентинович

СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛОКОМОТИВА С МИНИМИЗАЦИЕЙ ТОКА ОБМОТКИ СТАТОРА

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать «___» _____ 2024 г.	Формат бумаги 60X90/16
Усл. печ. л 1,5.	Тираж 80 экз. Заказ №

РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9