

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Объект авторского права
УДК 621.31.83.52

**АЛЕКСАНДРОВСКИЙ
Сергей Владимирович**

**ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМЫЙ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
МЕХАНИЗМОВ С НЕЗАВИСИМЫМ ОТ СКОРОСТИ
СТАТИЧЕСКИМ МОМЕНТОМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Минск, 2024

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **ФИРАГО Бронислав Иосифович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **КУЗНЕЦОВ Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

МАЛАШИН Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация **Белорусский государственный технологический университет, кафедра «Автоматизация производственных процессов и электротехники» (г.Минск)**

Защита состоится 28 марта 2024 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций К 05.31.01 при учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (БГАТУ) по адресу: 220012, г. Минск, пр-т Независимости, 99, корп. 1, ауд. 317.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 99, корп. 1, Минск, 220012.
Телефон ученого секретаря: (8-017) 373-11-53; E-mail: ankrutau@yandex.by.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГАТУ.

Автореферат разослан 23 февраля 2024 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций кандидат технических наук, доцент



А.В. Крутов

Научное издание

**АЛЕКСАНДРОВСКИЙ
Сергей Владимирович**

**ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМЫЙ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
МЕХАНИЗМОВ С НЕЗАВИСИМЫМ ОТ СКОРОСТИ
СТАТИЧЕСКИМ МОМЕНТОМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Ответственный за выпуск С.В. Александровский

Компьютерная верстка С.В. Александровский

Подписано в печать 20.02.2024. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,10. Тираж 60. Заказ 98.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.

SUMMARY

Aleksandrovski Sergey

Frequency controlled synchronous electric drive of mechanisms with speed-independent static torque

Keywords: electrical drive, permanent magnets synchronous motor, scalar frequency control, transients, efficiency, allowed torque, modeling

Purpose of the work is to substantiate the possibility and expediency of using permanent magnet synchronous motors (PMSM) with scalar frequency control for mechanisms operating with a constant static torque.

Research methods are based on the use of the theory of electric drive, electric machines, automatic control theory, as well as numerical experiments using simulation.

Results obtained and novelty. Expressions are obtained for the analytical calculation of transient processes of a frequency-controlled synchronous electric drive with a linear change in the voltage frequency and taking into account the influence of the damper winding. A method for controlling the PMSM has been developed, which ensures the stabilization of the angular velocity of the rotor in the steady state mode of a frequency-controlled synchronous motor without a damper winding. The law of scalar frequency control of PMSM is obtained taking into account the parameters of the engine. It is shown that the difference between this law and the proportional one at a constant static torque is insignificant and the proportional law can be applied without correction, in contrast to the scalar frequency control of an asynchronous motor. A method for calculating the energy performance of synchronous electric motors with a constant magnetic flux with scalar frequency control has been developed. A method has been developed for calculating the torque of a frequency-controlled synchronous self-ventilated electric motor that is permissible under heating conditions.

The results of the research are used in the educational process of the department "Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes" of BNTU.

The area of application of the results obtained in the dissertation is electric drives with PMSM mechanisms operating with a constant static moment.

ВВЕДЕНИЕ

Производители преобразователей частоты и напряжений для регулируемых электроприводов (ЭП) большое разнообразие нагрузок (статических моментов) упрощенно разделяют на три вида: постоянный статический момент, не зависит от скорости; статический момент, пропорциональный квадрату скорости и постоянная статическая мощность.

Это наиболее характерные виды нагрузки, которые определяют требования к ЭП. Наиболее распространены механизмы и машины, работающие практически при неизменной величине статического момента при изменении скорости механизма, например, грузоподъемные механизмы и механизмы передвижения грузов (механизмы передвижения мостов и тележек кранов, прокатные станы, бумагоделательные машины, ножницы для резки металла, канатные дороги, лифты, механизмы подачи металлоорежущих станков и т.д.). Для ЭП, приводящих в движение механизмы с постоянным статическим моментом, необходимо иметь высокую перегрузочную способность порядка $2\div 3$ и большую величину максимального и пускового момента, не зависящую от скорости, а также жесткие механические характеристики ЭП, чтобы обеспечить требуемый диапазон регулирования скорости.

Для второго вида механизмов – это турбомеханизмы (центробежные насосы, вентиляторы и компрессоры), требования к ЭП значительно легче: перегрузочная способность порядка $1,1\div 1,2$, пусковой момент может быть меньше номинального, жесткость механических характеристик мало влияет на диапазон регулирования скорости. Поэтому для турбомеханизмов могут применяться простые системы скалярного частотного управления асинхронными двигателями, например, закон $U/f = \text{const}$, которые тем не менее обеспечивают значительную экономию электроэнергии по сравнению с нерегулируемыми ЭП этих механизмов.

Третий вид нагрузки: постоянство статической мощности характерен для тяговых ЭП и ЭП главного движения металлоорежущих станков. В действительности такие ЭП имеют две зоны регулирования: на первой зоне ЭП работает при постоянном статическом моменте, а во второй зоне ЭП работает при постоянстве статической мощности. Диапазон изменения скорости в каждой зоне зависит от технологических условий и технических возможностей конкретного электропривода.

Поэтому актуальным является обоснование целесообразности применения синхронных частотно-регулируемых электродвигателей со скалярным управлением в ЭП механизмов с независимым от скорости статическим моментом.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами. Научные исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках научно-исследовательской работы по теме «Совершенствование электротехнических систем промышленных механизмов и транспортных средств», ГБ16-273 (2016 г.) кафедры «Автоматизированный электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью улучшения энергетических показателей и упрощения системы частотного регулирования скорости механизмов с независимым от скорости статическим моментом.

Цель и задачи исследования. Целью работы является обоснование возможности и целесообразности применения синхронных частотно-регулируемых электродвигателей с электромагнитным возбуждением и постоянными магнитами со скалярным управлением в электроприводах механизмов с независимым от скорости статическим моментом (в теории электропривода – постоянный статический момент).

Задачи исследования:

- анализ характеристик и свойств существующих электроприводов, применяемых для механизмов с постоянным статическим моментом и на их основе определение основных требований, предъявляемых к таким электроприводам;

- исследование статических характеристик и режимы работы синхронных частотно-регулируемых электроприводов со скалярным управлением;

- разработка математической и имитационной моделей синхронного электропривода с демпферной обмоткой при скалярном частотном управлении;

- исследование электромеханических переходных процессов синхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярным управлением;

- анализ потерь мощности в синхронном частотно-регулируемом двигателе со скалярным управлением и разработка методики расчета допустимого по нагреву момента самовентилируемого синхронного двигателя;

- рекомендации по применению синхронных двигателей с постоянными магнитами со скалярным частотным управлением в грузоподъемных механизмах и машинах, где в настоящее время применяются векторные системы частотного-управления асинхронными двигателями.

РЕЗЮМЕ

Александровский Сергей Владимирович

Частотно регулируемый синхронный электропривод механизмов с независимым от скорости статическим моментом

Ключевые слова: электропривод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, скалярное частотное управление, переходные процессы, коэффициент полезного действия, допустимый момент, моделирование

Цель работы – обоснование возможности и целесообразности применения синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) при скалярном частотном управлении для механизмов, работающих с независимым от скорости статическим моментом.

Методы исследования базируются на использовании теории электропривода, электрических машин, теории автоматического управления, а также численных экспериментов с помощью имитационного моделирования.

Полученные результаты и новизна. Получены выражения для аналитического расчета переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода при линейном изменении частоты напряжения и учете влияния демпферной обмотки. Разработан способ управления СДПМ, при котором обеспечивается стабилизация угловой скорости ротора в установившемся режиме частотно-регулируемого синхронного двигателя без демпферной обмотки. Получен закон скалярного частотного управления СДПМ с учетом параметров двигателя. Показано, что отличие этого закона от пропорционального при постоянном статическом моменте незначительно и можно применять пропорциональный закон без корректировки, в отличие от скалярного частотного управления асинхронным двигателем. Разработан метод расчета энергетических показателей синхронных электродвигателей при постоянном магнитном потоке при скалярном частотном управлении. Разработан метод расчета допустимого по условиям нагрева момента частотно-регулируемого синхронного самовентилируемого электродвигателя.

Результаты исследований используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ.

Область применения полученных в диссертации результатов – электроприводы с СДПМ механизмов, работающих с независимым от скорости статическим моментом.

РЭЗІЮМЭ

Александроўскі Сяргей Уладзіміравіч

Частотна рэгулюемы сінхронны электрапрывод механізмаў з незалежным ад хуткасці статычным момантам

Ключавыя словы: электрапрывод, сінхронны рухавік з пастаяннымі магнітамі, скалярнае частотнае кіраванне, пераходныя працэсы, каэфіцыент карыснага дзеяння, дапушчальны момант, мадэляванне

Мэта працы – абгрунтаванне магчымасці і мэтазгоднасці прымянення сінхронных рухавікоў з пастаяннымі магнітамі (СРПМ) пры скалярным частотным кіраванні для механізмаў з незалежным ад хуткасці статычным момантам.

Метады даследавання грунтуюцца на выкарыстанні тэорыі электрапрывода, электрычных машын, тэорыі аўтаматычнага кіравання, а таксама лікавых эксперыментаў з дапамогай імітацыйнага мадэлявання.

Атрыманыя вынікі і навізна. Атрыманы выразы для аналітычнага разліку пераходных працэсаў частотна-рэгулюемага сінхроннага электрапрывода пры лінейнай змене частаты напругі і ўліку ўплыву дэмпфернай абмоткі. Распрацаваны спосаб кіравання СРПМ, пры якім забяспечваецца стабілізацыя кутняй хуткасці ратара ва ўсталяваным рэжыме частотна-рэгуляванага сінхроннага рухавіка без дэмпфернай абмоткі. Атрыманы закон скалярнага частотнага ўпраўлення СРПМ з улікам параметраў рухавіка. Паказана, што адрозненне гэтага закона ад прапарцыйнага пры сталым статычным моманце нязначна і можна ўжываць прапарцыйны закон без карэкціроўкі, у адрозненне ад скалярнага частотнага кіравання асінхронным рухавіком. Распрацаваны метады разліку энергетычных паказчыкаў сінхронных электрарухавікоў пры сталым магнітным струмені пры скалярным частотным кіраванні. Распрацаваны метады разліку дапушчальнага па ўмовах нагрэву моманту частотна-рэгуляванага сінхроннага самовентіліруемага электрарухавіка.

Вынікі даследаванняў выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе кафедры «Электрапрывад і аўтаматызацыя прамысловых устаноў і тэхналагічных комплексаў» БДТУ.

Галіна выкарыстання атрыманых у дысертацыі вынікаў – ЭП з СРПМ механізмаў з незалежным ад хуткасці статычным момантам.

Объектом исследования является регулируемый синхронный электропривод механизмов с независимым от скорости статическим моментом.

Научная новизна.

1. Показана возможность и целесообразность применения синхронных частотно-регулируемых электродвигателей с электромагнитным возбуждением и постоянными магнитами со скалярным управлением в электроприводах механизмов с независимым от скорости статическим моментом.

2. Разработана методика аналитического расчета переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода при линейном изменении частоты напряжения синхронного двигателя (СД) с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов.

3. Разработан способ управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, при котором обеспечивается стабилизация угловой скорости ротора в установившемся режиме частотно-регулируемого синхронного двигателя без демпферной обмотки. При этом используется независимое задание частоты в скалярном частотном управлении по пропорциональному закону $U_1/f_1 = \text{const}$ при котором от сигнала заданной величины частоты питающего двигателя напряжения вычитается сигнал пропорциональный первой производной угловой скорости ротора с коэффициентом T_0 , зависящим от момента инерции электропривода.

4. Разработана методика расчета параметров скалярного частотного управления для СД с постоянными магнитами (СДПМ), предназначенных для векторного управления. Получен закон скалярного частотного управления СДПМ с учетом параметров двигателя, позволяющий повысить точность стабилизации момента.

5. Разработана методика расчета энергетических показателей частотно-регулируемых СД при постоянном магнитном потоке, которая позволяет определять потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, а также допустимый по условиям нагрева момент самовентилируемого электродвигателя, который может быть использован при выборе мощности и проверке длительно допустимого момента электродвигателя с постоянными магнитами, работающего при разных нагрузках, скоростях и температурах окружающей среды. При уменьшении частоты питающего двигателя напряжения максимум коэффициента полезного действия смещается в сторону меньших нагрузок, практически сохраняя свою величину.

6. Разработаны математическая и компьютерная (имитационная) модели, позволяющие исследовать динамические характеристики СД при скалярном частотном управлении, отличающиеся наличием демпферной обмотки и отрицательной обратной связи.

Положения, выносимые на защиту. Автором защищаются:

1. Методика аналитического расчета переходных процессов частотно-регулируемого синхронного ЭП при линейном изменении частоты напряжения отличающаяся тем, что учтено влияния демпферной обмотки и наличия отрицательной обратной связи.

2. Способ управления СДПМ, при котором обеспечивается стабилизация угловой скорости ротора в установившемся режиме частотно-регулируемого синхронного двигателя без демпферной обмотки, отличающийся тем, что используется независимое задание частоты в скалярном частотном управлении по пропорциональному закону $U_1/f_1 = \text{const}$, когда от сигнала заданной величины частоты питающего двигателя напряжения вычитается сигнал пропорциональный первой производной угловой скорости ротора с коэффициентом T_0 , зависящим от момента инерции электропривода.

3. Методика расчета параметров скалярного частотного управления для СДПМ, предназначенных для векторного управления. Закон скалярного частотного управления СДПМ с учетом параметров двигателя, позволяющий повысить точность стабилизации момента двигателя.

4. Методика расчета энергетических показателей частотно-регулируемых синхронных электродвигателей при постоянном магнитном потоке, которая позволяет определять потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, а также допустимый по условиям нагрева момент самовентилируемого электродвигателя, который может быть использован при выборе мощности и проверке длительно допустимого момента электродвигателя с постоянными магнитами, работающего при разных нагрузках, скоростях и температурах окружающей среды. Показано, что при уменьшении частоты питающего двигателя напряжения максимум коэффициента полезного действия смещается в сторону меньших нагрузок, практически сохраняя свою величину.

5. Математическая и компьютерная (имитационная) модели, позволяющие исследовать динамические характеристики синхронных двигателей при скалярном частотном управлении, отличающиеся тем, что учтено наличие демпферной обмотки и отрицательной обратной связи.

Личный вклад соискателя ученой степени. Научные и практические результаты диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на следующих конференциях:

9-А. Фираго, Б. И. Об использовании синхронных электроприводов со скалярным частотным управлением для механизмов с постоянным статическим моментом / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VI междунар. науч.-практ. конф., Минск, 1–2 марта 2018г. / Белорус. нац. тех. ун-т, 2018, Минск-Экспо, 2018. – С. 79–80.

10-А. Фираго, Б. И. Выбор параметров демпферной обмотки синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением при скалярном частотном управлении / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 244.

11-А. Фираго, Б. И. О влиянии характера нагрузки на динамические свойства СДПМ при скалярном частотном управлении / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VII междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–14 марта 2019 г. / Белорус. нац. тех. ун-т, 2019, Минск-Экспо, 2019. – С. 31–32.

12-А. Фираго, Б. И. Имитационное моделирование электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы IX междунар. науч.-практ. конф., Минск, 7 апреля 2021г. / Белорус. нац. тех. ун-т, 2021, Минск-Экспо, 2021. – С. 84–85.

13-А. Александровский, С. В. Расчет и выбор тормозного реостата в режиме динамического торможения СДПМ при скалярном частотном управлении / С. В. Александровский, Б. И. Фираго // Информационные технологии в технических и естественных науках [Электронный ресурс]: материалы Республиканской научно-практической конференции, 20 мая 2021 г. / ред. кол.: А. М. Авсиевич [и др.]; сост. В. А. Мартинович. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 121–125.

14-А. Александровский, С. В. Диапазон регулирования скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении / С. В. Александровский // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы X международной научно-практической конференции, Минск, 6 апреля 2022 г. / ред. кол.: А. Р. Околов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2022. – С. 11–12.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи

1-А. Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов в частотно-регулируемом синхронном электроприводе / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 507–518.

2-А. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 287–298.

3-А. Фираго, Б. И. Допустимый по условиям нагрева момент синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 508–516.

4-А. Фираго, Б. И. Динамическое торможение синхронного двигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Вестник Белорусско-российского университета. Могилев. 2018. № 4(61). С. 78–85.

5-А. Фираго, Б. И. Свойства, характеристики и параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами при векторном и скалярном частотном управлении / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 205–218.

6-А. Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами при линейном изменении частоты питающего напряжения / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 197–211.

Материалы конференций и тезисы докладов

7-А. Фираго, Б. И. Анализ переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 3–4 февраля 2016 г. / Белорус. нац. тех. ун-т, Минск-Экспо; редкол.: Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Минск, 2016. – С. 31–32.

8-А. Александровский, С. В. Влияние активного сопротивления обмотки статора СДПМ на закон скалярного частотного управления / С. В. Александровский, Б. И. Фираго // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы Международной научно-технической конференции молодых учёных, г. Могилёв 25–26 октября 2018 г. – С. 150.

– Международной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Белорусского национального технического университета «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, Белорусский национальный технический университет, 2018, 2019г.);

– Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (г. Минск, Белорусский национальный технический университет совместно с «МинскЭКСПО» в рамках выставки «Автоматизация. Электроника», 2017, 2018, 2019, 2021, 2022г.);

– Республиканской научно-практической конференции «Информационные технологии в технических и естественных науках», (г. Минск, Белорусский национальный технический университет, 2021г.).

– Международной научно-технической конференции молодых ученых “Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности” (г. Могилев, ГУ ВПО Белорусско-Российский университет, 2018г.).

Опубликование результатов диссертации. Основное содержание работы изложено в 14 научных работах, в том числе в 6 статьях, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь, в 8 сборниках материалов международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, библиографического списка. Полный объем диссертационной работы составляет 125 страниц, в том числе 41 рисунок на 35 страницах, 1 таблица на 2 страницах, библиографический список на 10 страницах (126 наименований), список публикаций соискателя на 3 страницах (14 наименований), 1 приложений на 1 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении и общей характеристике работы обоснована актуальность темы, отмечена связь с научными программами, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор систем ЭП, которые применяются для приведения в движение машин и механизмов, работающих с независимым от скорости статическим моментом.

Определено, что обеспечение высокой перегрузочной способности по моменту и поддержание постоянства максимального момента двигателя в широком диапазоне регулирования скорости для большинства

регулируемых ЭП достигается за счет поддержания магнитного потока (потокосцепления) на номинальном уровне с помощью различных систем управления. К таким системам относятся асинхронные частотно-регулируемые короткозамкнутые двигатели (АД КЗР) с векторным управлением (ВУ), электроприводы с вентильными двигателями (ВД) постоянного и переменного тока (т.е. с электронной коммутацией тока в силовой обмотке), частотно-регулируемые синхронные двигатели (СД) с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов и скалярным частотным управлением (СЧУ). ВД переменного тока широко используются в следящих и позиционных электроприводах металлорежущих станков и других точных механизмов. Однако в обще промышленных механизмах, где требуются высокая надежность, невысокая цена и более простая система управления, они, как правило, не применяются.

Анализ показал, что современные преобразователи частоты (ПЧ) для частотного регулирования скорости АД не имеют полноценного СЧУ, которое обеспечивало бы поддержание постоянного потокосцепления АД в широком диапазоне изменения частот и нагрузок двигателя. Имеется только один вариант СЧУ $U/f = \text{const}$ с возможностью задания начального напряжения при $f=0$ на уровне от 0 до 30% от номинального. Но такое СЧУ может применяться только для турбомеханизмов, а не для ЭП механизмов, работающих при постоянном статическом моменте. И там, где это необходимо, применяют простые системы ВУ – бездатчиковое ВУ, которое близко по свойствам к СЧУ со стабилизацией потокосцепления, но которые более дорогие, чем скалярные, и труднее в наладке и эксплуатации. Однако бездатчиковое ВУ АД имеет существенный недостаток, кроме неточного выполнения задания из-за изменения параметров двигателя в процессе работы: невозможностью управлять моментом АД при нулевой скорости. В грузоподъемных механизмах это недопустимо так как необходимо управлять моментом АД при нулевой скорости, когда груз висит. Поэтому в механизмах подъема, независимо какое ВУ используется: прямое или косвенное применяют машинные датчики скорости: энкодеры или резольверы.

Предлагается в качестве альтернативы применение СД с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов со СЧУ. В этом случае применение самого простого закона частотного управления, т.е. $U/f = \text{const}$, который заложен во всех современных ПЧ, позволяет обеспечить поддерживать постоянный магнитный поток и необходимую величину максимального момента на всем диапазоне изменения частот (скоростей) и моментов сопротивления. При этом механические характеристики СД являются астатическими без регуляторов скорости [9-А].

уменьшении частоты питающего двигатель напряжения максимум коэффициента полезного действия смещается в сторону меньших нагрузок, практически сохраняя свою величину. Разработана методика расчета допустимого по условиям нагрева момента частотно-регулируемого синхронного самовентилируемого электродвигателя, которая может быть использована при выборе мощности и проверке длительно допустимого момента электродвигателя с постоянными магнитами, работающего при разных нагрузках, скоростях и температурах окружающей среды [2-А, 3-А].

5. Разработаны компьютерные (имитационные) модели, позволяющие исследовать динамические свойства синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов при скалярном частотном управлении отличающиеся учетом демпферной обмотки и отрицательной обратной связи. Полученные результаты экспериментального исследования подтверждают адекватность разработанных компьютерных моделей и аналитических исследований с учетом принятых допущений [1-А, 4-А, 6-А, 12-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационных исследований могут быть рекомендованы для предприятий и организаций, занимающихся проектированием и эксплуатацией электроприводов механизмов, работающих с независимым от скорости статическим моментом.

Получен акт о практическом использовании результатов диссертационных исследований (Приложение А диссертации) в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ.

В качестве перспективы дальнейшего развития научного направления в области исследований данной работы можно рассматривать более глубокое изучение вопроса бездатчикового скалярного частотного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Также в перспективе следует рассматривать внедрение результатов данных исследований в серийное производство ЭП на основе СДПМ и ПЧ со скалярным частотным управлением в качестве импортозамещения зарубежных асинхронных частотно-регулируемых ЭП механизмов, работающих с постоянным статическим моментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика аналитического расчета переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода при линейном изменении частоты напряжения синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов. Предложен метод выбора параметров демпферной обмотки синхронного двигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении [1-А, 6-А, 7-А, 10-А].

2. Разработан способ управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, при котором обеспечивается стабилизация угловой скорости ротора в установившемся режиме частотно-регулируемого синхронного двигателя без демпферной обмотки. При этом используется независимое задание частоты в скалярном частотном управлении по пропорциональному закону $U_1/f_1 = \text{const}$ при котором от сигнала заданной величины частоты питающего двигателя напряжения вычитается сигнал пропорциональный первой производной угловой скорости ротора с коэффициентом T_0 , зависящим от момента инерции электропривода. Показано, что при скалярном частотном управлении, отсутствии демпферной обмотки в СДПМ и постоянном статическом моменте ($n = 0$) переходные процессы момента и угловой скорости ротора двигателя носят колебательный характер, при котором невозможна нормальная работа рабочих машин и механизмов. В тоже время для турбомеханизмов с показателем степени $n \geq 1$ могут применяться электроприводы на основе СДПМ без демпферной обмотки при скалярном частотном управлении, поскольку функцию демпфирования скорости в этом случае выполняет сам рабочий механизм [6-А, 11-А].

3. Представлено сравнение свойств и характеристик СДПМ при векторном и скалярном частотном управлении и выявлены основные их различия. Разработана методика расчета параметров СДПМ при скалярном частотном управлении для двигателей, предназначенных для векторного управления. Предложен закон скалярного частотного управления СДПМ с учетом параметров двигателя, позволяющий повысить точность стабилизации момента. Показано, что отличие этого закона от пропорционального при постоянном статическом моменте незначительно и можно применять пропорциональный закон без корректировки, в отличие от скалярного частотного управления асинхронным двигателем [5-А, 8-А].

4. Разработана методика расчета энергетических показателей, которая позволяет определять потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности частотно-регулируемых синхронных электродвигателей при постоянном магнитном потоке. Показано, что при

Для качественной оценки различных систем ЭП механизмов, работающих с независимым от скорости статическим моментом, сформулированы основные технические требования.

Во второй главе рассмотрены переходные процессы синхронного ЭП при СЧУ. Также рассмотрено динамическое торможение СД с постоянными магнитами (СДПМ) при СЧУ.

Получены аналитические выражения угловой скорости и момента синхронного ЭП с электромагнитным возбуждением и демпферной обмоткой при линейном изменении частоты питающего напряжения [1-А]:

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 t - e^{-\zeta t} \left[\Delta\omega_{\text{нач}} \cos(\Omega_p t) + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}} + \zeta \Delta\omega_{\text{нач}}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right], \quad (1)$$

$$M = M_c + M_{\text{дин},0} - e^{-\zeta t} \left[(M_{\text{нач}} - M_c - M_{\text{дин},0}) \cos(\Omega_p t) + \frac{\zeta(M_{\text{нач}} - M_c - M_{\text{дин},0}) + \beta(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}}) + b\Delta\omega_{\text{нач}}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right], \quad (2)$$

где $\omega_{0\text{нач}}$ – начальная угловая скорость магнитного поля, рад/с; ε_0 – задаваемое угловое ускорение магнитного поля, рад/с²; $\zeta = (2T_m)^{-1}$ – коэффициент затухания; Ω_p – резонансная частота колебаний; $M_{\text{дин},0}$ – задаваемый динамический момент в переходном процессе, Н·м; M_c – статический момент, Н·м; β – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики, создаваемой демпферной обмоткой СД; b – есть магнитная жесткость СД; $\Delta\omega_{\text{нач}}$, $\varepsilon_{\text{нач}}$, $M_{\text{нач}}$ – соответственно начальные значения угловой скорости, углового ускорения и момента двигателя (если переходной процесс начинается не с установившегося режима).

Показано, что при СЧУ, отсутствии демпферной обмотки в СДПМ и постоянном статическом моменте ($n = 0$) переходные процессы момента и угловой скорости ротора двигателя носят колебательный характер, при котором невозможна нормальная работа рабочих машин и механизмов. В тоже время для турбомеханизмов ($M_c \sim \omega^n$, $n \geq 1$) могут применяться ЭП на основе СДПМ без демпферной обмотки при СЧУ, поскольку функцию демпфирования колебаний скорости в этом случае выполняет сам рабочий механизм [11-А].

Предложен метод выбора параметров демпферной обмотки исходя из значения модуля жесткости механической характеристики, создаваемой действием демпферной обмотки $\beta = \sqrt{2bJ}$, где J – суммарный момент инерции ЭП, кг·м². В этом случае переходная характеристика разомкнутой системы второго порядка имеет перерегулирование по скорости $\sigma \approx 4,3\%$, что соответствует показателям при настройке регулятора скорости на технический оптимум. При наличии такой демпферной обмотки переходные

процессы ЭП с СДПМ при СЧУ и линейном изменении частоты питающего двигателя напряжения могут быть рассчитаны на основании выражений (1) и (2) для угловой скорости и электромагнитного момента соответственно. Можно отметить, что использование выпускаемых в настоящее время СДПМ при СЧУ приведет к неустойчивой работе ЭП при постоянном моменте статической нагрузки. Одним из решений данной проблемы может служить использование демпферной обмотки на роторе двигателя. Однако такой подход приведет к усложнению конструкции СДПМ и, следовательно, к удорожанию его стоимости [10-А].

Предложен способ управления СДПМ, при котором обеспечивается стабилизация угловой скорости ротора в установившемся режиме частотно-регулируемого СД без демпферной обмотки. При этом используется независимое задание частоты в СЧУ по пропорциональному закону $U_1/f_1 = \text{const}$ при котором от сигнала заданной величины частоты питающего двигателя напряжения вычитается сигнал пропорциональный первой производной угловой скорости ротора $\varepsilon = d\omega/dt$ с коэффициентом $T_0 = J/\beta$, где β – модуль жесткости кривой динамического момента (рисунок 1).

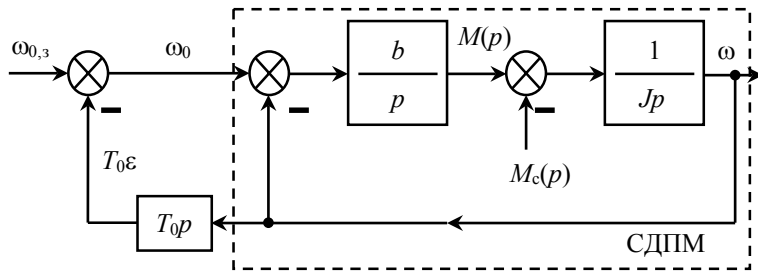


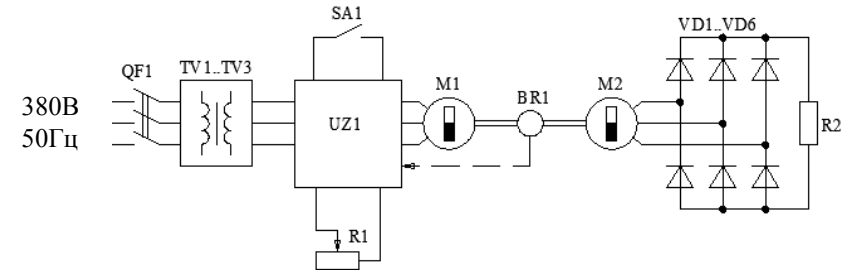
Рисунок 1 – Структурная схема СДПМ при линеаризации угловой характеристики СД и наличии ООС по угловому ускорению ротора

Получено выражение коэффициента T_0

$$T_{0, \text{опт}} = \sqrt{\frac{2J}{b}}, \quad (3)$$

при котором будет оптимальный переходный процесс (перерегулирование по скорости $\sigma = 4,3\%$, что соответствует показателям при настройке регулятора скорости по критерию оптимального модуля).

Получены выражения для угловой скорости и электромагнитного момента СДПМ при линейном изменении частоты питающего напряжения и отрицательной обратной связи (ООС) по угловому ускорению в переходном процессе [6-А] (рисунок 2):



- QF1 – автоматический выключатель; TV1 – TV3 – понижающие трансформаторы; UZ1 – преобразователь частоты;**
- VD1 – VD6 – выпрямительный мост;**
- M1, M2 – испытуемый и нагрузочный СДПМ;**
- BR1 – фотоэлектрический преобразователь;**
- SA1 – переключатель Пуск/Стоп;**
- R1 – потенциометр задания скорости СДПМ;**
- R2 – нагрузочный реостат**

Рисунок 8 – Функциональная схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования показали, что предложенный способ СЧУ СДПМ обеспечивает устойчивую работу двигателя как в переходных процессах, так и в установившемся режиме работы, а также схожесть результатов программного моделирования на основе аналитических исследований и экспериментального исследования. Учитывая близость результатов моделирования и эксперимента, сделан вывод, что разработанная компьютерная модель, по которой исследованы динамические характеристики СДПМ при СЧУ, адекватна реальной системе синхронного ЭП с ПЧ.

Анализ сравнения ЭП с СДПМ при СЧУ и частотно-регулируемого АД с ВУ для грузоподъемных механизмов по ряду критериев оценки (например, потери мощности и энергии за цикл работы, наличие машинных датчиков скорости, сложность наладки и другие) показал, что ЭП с СДПМ при СЧУ (при наличии специальных алгоритмов стабилизации скорости ротора) имеет преимущества и его можно рекомендовать к применению в механизмах с независимым от скорости статическим моментом. Важно отметить, что для подобных механизмов возможно применение СДПМ на основе ферритовых сплавов, что существенно снижает стоимость ЭД по сравнению с СДПМ с более дорогими материалами на основе сплава неодима. В этом случае совокупная стоимость синхронного ЭП будет сопоставима со стоимостью асинхронного ЭП аналогичной мощности, при этом будут обеспечены более высокие показатели.

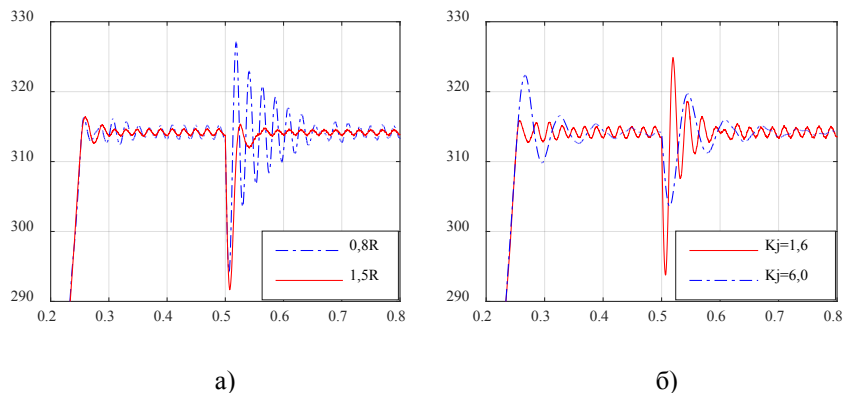


Рисунок 7 – Переходные процессы угловой скорости СДПМ при СЧУ и ООС для различных значений активного сопротивления статора (а) и коэффициента инерции (б)

Анализ полученных результатов показал, что изменение активного сопротивления обмотки статора оказывает меньшее влияние на динамические характеристики СДПМ при СЧУ и наличии ООС по угловому ускорению ротора двигателя чем изменение суммарного момента инерции ЭП. При этом увеличение данных параметров приводит к увеличению времени переходного процесса.

Разработана имитационная модель частотно-регулируемого ЭП на основе системы АИН-СД с электромагнитным возбуждением с синусоидальной ШИМ напряжения, которая дополнена моделью вычисления потерь мощности в СД. Исследование показало, что пуск СД при СЧУ в «синхронном» режиме (обмотка возбуждения включена) является предпочтительным по сравнению с пуском в «асинхронном» режиме (обмотка возбуждения отключена), т. к. приводит к значительно меньшим потерям мощности в СД даже с учетом потерь на возбуждение в роторе.

Для проведения экспериментального исследования работы СДПМ при СЧУ создана экспериментальная установка, которая представляет собой двух двигательный агрегат, в котором один двигатель является испытуемым и запитан от ПЧ, а второй нагрузочным и подключен к нагрузочному реостату (рисунок 8).

$$\omega = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 t - \varepsilon_0 T_0 - e^{-\zeta t} \left[(\Delta\omega_{нач} - \varepsilon_0 T_0) \cos(\Omega_p t) + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{нач} + \zeta(\Delta\omega_{нач} - \varepsilon_0 T_0)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right], \quad (4)$$

$$M = M_c + M_{дин,0} + e^{-\zeta t} \left[(M_{нач} - M_c - M_{дин,0}) \cos(\Omega_p t) + \frac{\zeta(M_{нач} - M_c - M_{дин,0}) + \beta(\varepsilon_0 - \varepsilon_{нач}) + b\Delta\omega_{нач}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right]. \quad (5)$$

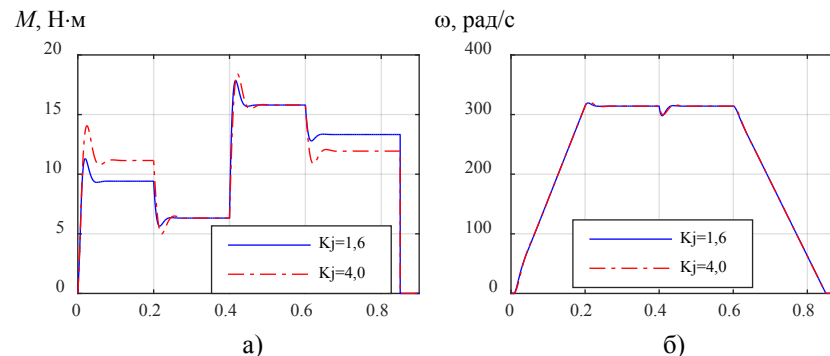


Рисунок 2 – Переходные процессы момента (а) и угловой скорости (б) СДПМ типа SGM5H-50D при линейном изменении частоты питающего напряжения и наличии ООС по ускорению

Анализ показал, что в переходном процессе скорости при наличии ООС по ускорению по сравнению с переходным процессом скорости при наличии «виртуальной» демпферной обмотки при $t > (6-8) \tau$ имеет место отклонение угловой скорости ротора ω от угловой скорости магнитного поля ω_0 на величину равную $\Delta\omega = \omega_0 - \omega = \varepsilon_0 T_0$. Такое изменение угловой скорости ротора СДПМ аналогично изменению угловой скорости двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения (НВ) или АД с короткозамкнутым ротором (КЗР) при линейном задании ω_0 . В тоже время в установившемся режиме, когда $\varepsilon_0 = 0$, в отличие от ДПТ НВ и АД КЗР отклонение скорости СД равно нулю $\Delta\omega = \omega_0 - \omega = 0$.

На основе энергетической диаграммы СДПМ предложен способ бездатчикового СЧУ с вычислением углового ускорения ротора СД в течении переходного процесса.

Рассмотрен режим динамического торможения СДПМ при СЧУ. Показано, что динамическое торможение полностью соответствует режиму работы СДПМ при управлении от ДПР с угловой частотой $\omega_1 = \omega_{эл}$ при отключении статора от источника напряжения, а также режиму работы ДПТ

НВ, когда обмотка якоря отключается от сети постоянного тока и замыкается на тормозное сопротивление.

Получены структурные схемы ЭП с СДПМ при динамическом торможении и уравнения механических характеристик, которые можно применить для конкретных механизмов, работающих с постоянным статическим моментом, например, для получения низких скоростей в ЭП при опускании грузов с помощью грузоподъемных механизмов.

Получено выражение для расчета и выбора тормозного реостата в режиме динамического торможения СДПМ при СЧУ [13-А].

В третьей главе рассмотрены характеристики, свойства и энергетические показатели синхронного ЭП при СЧУ.

Выявлены основные различия математического описания СДПМ при ВУ и СЧУ (рисунок 3). Предложена методика определения параметров СДПМ при СЧУ для двигателей, выпускаемых для работы при ВУ.

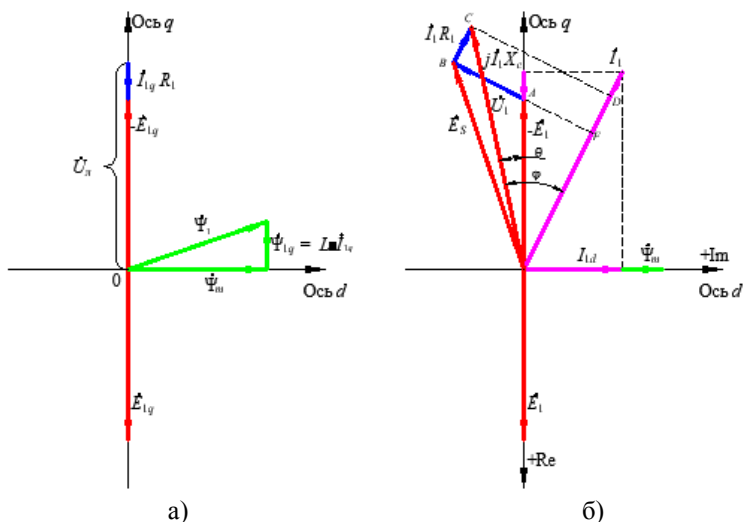


Рисунок 3 – Векторная диаграмма СДПМ при ВУ (а) и СЧУ (б)

Получен закон СЧУ реальным СДПМ с учетом параметров двигателя ($R_1 \neq 0$) [5-А, 8-А]:

$$\gamma = \alpha \sqrt{A^2 + \left[B + \frac{\rho}{\alpha} \right]^2}, \quad (6)$$

где $\alpha = f_1 / f_{1ном} = \omega_0 / \omega_{0ном}$ – относительная частота; $\gamma = U_1 / U_{1ном}$ – относительное напряжение статора при данном α ; $\rho = R_1 / R_{1ном}$ – относительное активное сопротивление одной фазы обмотки статора.

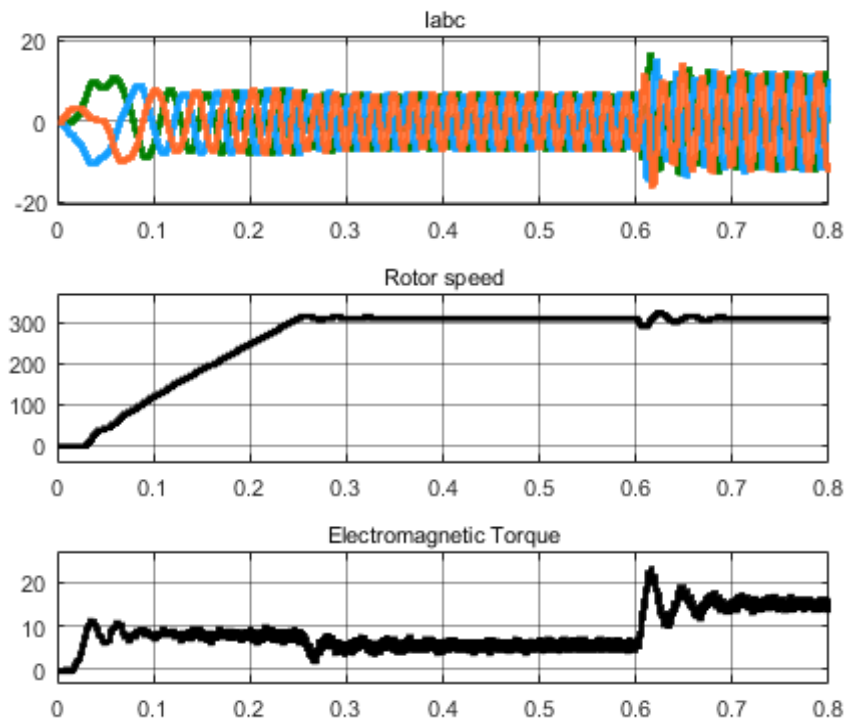


Рисунок 6 – Переходные процессы ЭП с СДПМ при СЧУ и ООС по угловому ускорению

Производственные машины можно условно разделить на две группы. К первой группе отнесем машины, в которых суммарный момент инерции в ходе работы механизма является постоянным или изменяется незначительно. Ко второй группе отнесем машины, в которых в ходе работы привода суммарный момент инерции на разных этапах производственного цикла может изменяться от минимального до максимального значения (например, в зависимости от массы перемещаемого груза).

Исследование (рисунок 7) показало, что при изменении активного сопротивления обмотки статора и суммарного момента инерции ЭП системы СЧУ с СДПМ как с вычислением ускорения по измеренной скорости ротора, так и бездатчиковая система сохраняют работоспособность.

Получена зависимость относительного допустимого момента СДПМ $\mu_{\text{доп}}$ от относительной частоты α

$$\mu_{\text{доп}} = \sqrt{q_0 + q_1 \sqrt{\alpha} - q_2 \alpha^{1,5} - q_3 \alpha^2}, \quad (10)$$

где q_0, q_1, q_2, q_3 – постоянные коэффициенты, определяемые

$$q_0 = \frac{\beta_0 - B}{A}, \quad q_1 = \frac{1 - \beta_0}{A}, \quad q_2 = \frac{p_1^*}{A}, \quad q_3 = \frac{p_2^*}{A},$$

где β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения при $\omega = 0$, т. е. при неподвижном роторе двигателя; p_1^*, p_2^*, p_3^* – относительные потери мощности в СДПМ:

$$p_1^* = \frac{\Delta P_{\text{ст.1.ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}}, \quad p_2^* = \frac{\Delta P_{\text{мх.ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}}, \quad p_3^* = \frac{\Delta P_{\text{пер.1.ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}},$$

A и B – постоянные коэффициенты:

$$A = \frac{p_3^* e_1}{(\lambda_m X_c^*)^2}, \quad B = p_3^* \left[\left(\frac{e_1}{X_c^*} \right)^2 - \frac{2e_1}{X_c^{*2}} + \frac{1}{X_c^{*2}} \right].$$

В четвертой главе представлены и описаны разработанные автором имитационные модели для исследования систем СЧУ с СДПМ и СД с электромагнитным возбуждением, а также экспериментальное исследование с опытным образцом.

Разработана имитационная модель частотно-регулируемого ЭП на основе системы АИН-СДПМ с синусоидальной ШИМ напряжения, которая дополнена моделью вычисления ООС при измерении угловой скорости ротора СДПМ и косвенным вычислении на основании измеренных величин тока и напряжения статора двигателя, для исследования динамических характеристик СДПМ (рисунок 6) [12-А]. Проведенное исследование показало адекватность полученных результатов теоретических исследований, проведенных во второй главе данной работы.

Выявлено, что при работе ЭП возможно изменение ряда параметров ЭП, которые могут влиять на динамические характеристики, основными из которых являются активное сопротивление обмотки статора и суммарный приведенный момент инерции ЭП.

Можно считать, что изменения активного сопротивления статора СДПМ будут аналогичны изменениям активного сопротивления статора АД, т. е. в диапазоне от 0,8 до 1,5 номинального значения при рабочей температуре.

B (6) A и B – постоянные величины, определяемые так

$$\left. \begin{aligned} A &= e_1 \sin(\varphi_{\text{ном}} - \theta_{\text{ном}}) + \chi, \\ B &= e_1 \cos(\varphi_{\text{ном}} - \theta_{\text{ном}}), \end{aligned} \right\},$$

где $e_1 = E_{1\text{ном}} / U_{1\text{ном}}$ – относительная величина номинальной ЭДС взаимоиндукции; $\chi = X_c / R_{\text{ном}}$ – относительное синхронное индуктивное сопротивление статора; $R_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} / I_{1\text{ном}}$ – номинальное сопротивление, аналогичное таким величинам, применяемым для расчетов ДПТ НВ и АД с фазным ротором.

Можно видеть, что закон (6) отличается от пропорционального $\gamma = \alpha$.

Показано, что отличие закона (6) от пропорционального при постоянном статическом моменте незначительно и можно применять пропорциональный закон без корректировки, в отличие от СЧУ АД (таблица 1). При изменении f_1 в 10 раз электромагнитный момент СДПМ изменяется только на 2,2%, а для аналогичного по мощности АД на 10,7%.

Таблица 1 – Функция $\gamma = f(\alpha)$ для СДПМ и АД при СЧУ

α	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05
0,4 кВт											
$\gamma_{\text{СДПМ}}$	1,0	0,904	0,808	0,711	0,615	0,519	0,423	0,326	0,23	0,134	0,086
$\Delta\gamma\%$	0,0	0,4	0,8	1,1	1,5	1,9	2,3	2,6	3,0	3,4	3,6
$\gamma_{\text{АД}}$	1,0	0,935	0,869	0,802	0,733	0,661	0,586	0,503	0,408	0,287	0,203
$\Delta\gamma\%$	0,0	3,5	6,9	10,2	13,3	16,1	18,6	20,3	21,4	21,8	22,1
5,5 кВт											
$\gamma_{\text{СДПМ}}$	1,0	0,902	0,805	0,707	0,609	0,512	0,415	0,317	0,22	0,122	0,074
$\Delta\gamma\%$	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,4
$\gamma_{\text{АД}}$	1,0	0,913	0,826	0,74	0,653	0,567	0,481	0,395	0,306	0,207	0,158
$\Delta\gamma\%$	0,0	1,3	2,6	4,0	5,3	6,7	8,1	9,5	10,6	10,7	10,8
55 кВт											
$\gamma_{\text{СДПМ}}$	1,0	0,901	0,803	0,704	0,606	0,507	0,409	0,31	0,212	0,113	0,065
$\Delta\gamma\%$	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5
$\gamma_{\text{АД}}$	1,0	0,906	0,812	0,718	0,624	0,531	0,438	0,344	0,251	0,157	0,106
$\Delta\gamma\%$	0,0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,1	3,8	4,4	5,1	5,7	5,9

$\Delta\gamma\%$ - отклонение напряжения от пропорционального закона.

Разработана методика расчета энергетических показателей, которая позволяет определять потери мощности, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности частотно-регулируемых синхронных электродвигателей при постоянном магнитном потоке.

Получено общее выражение для КПД СД при СЧУ [2-А]:

$$\eta_d = \frac{\alpha \mu P_{\text{ном}}}{\alpha \mu P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{в.ном}} + \Delta P_{\text{ст.1.ном}} \alpha^{1,5} + \Delta P_{\text{мх.ном}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{пер.1.ном}} \left(\frac{\sin^2(\mu \theta_{\text{эл.ном}})}{X_{lq}^{*2}} + \frac{[k_1 - \cos(\mu \theta_{\text{эл.ном}})]^2}{X_{ld}^{*2}} \right)} \quad (7)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность СД, Вт; $\Delta P_{\text{в.ном}}$, $\Delta P_{\text{ст.1.ном}}$, $\Delta P_{\text{мх.ном}}$, $\Delta P_{\text{пер.1.ном}}$ – соответственно номинальные потери возбуждения, в стали, механические и переменные в обмотке статора, Вт; X_{ld}^* , X_{lq}^* – относительное индуктивное сопротивление СД соответственно по оси d и q :

$$X_{lq}^* = \frac{I_{1\text{ном}} X_{lq.\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}, \quad X_{ld}^* = \frac{I_{1\text{ном}} X_{ld.\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}.$$

Анализ (7) показывает, что КПД является функцией двух независимых переменных относительной частоты α и относительного момента μ .

Получено выражение для КПД СДПМ при СЧУ (рисунок 4):

$$\eta_d = \left[1 + \frac{1}{p_0^* + 1} \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \frac{p_0^* \alpha^2 + k_3^2}{k_3 \alpha} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ – номинальный КПД СДПМ; k_3 – коэффициент загрузки, $k_3 = M / M_{\text{ном}}$; p_0^* – относительные постоянные потери мощности в частотно-регулируемом СДПМ:

$$p_0^* = \frac{\Delta P_{\text{пост.ном}}}{\Delta P_{\text{пер.1.ном}}}.$$

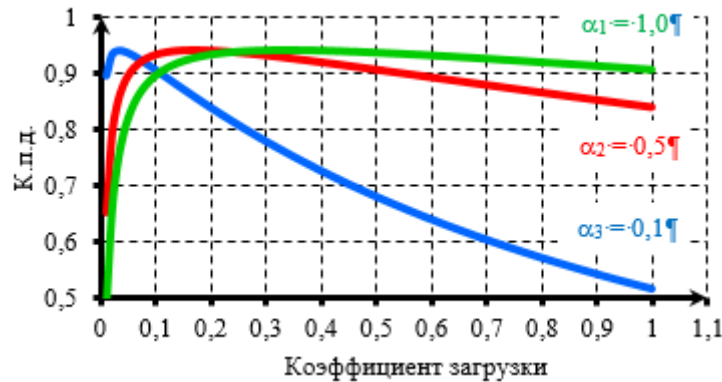


Рисунок 4 – Зависимость КПД СДПМ типа YGT132S4 от коэффициента загрузки при различных значениях относительной частоты

Получено выражение максимального КПД СДПМ при СЧУ:

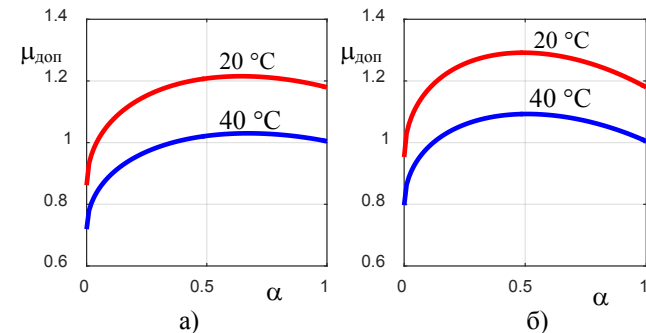
$$\eta_{\text{дmax}} = \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \frac{2\sqrt{p_0^*}}{p_0^* + 1} \right]^{-1}, \quad (9)$$

которое для заданного α соответствует оптимальному коэффициенту загрузки:

$$k_{3.\text{опт.}} = \alpha \sqrt{p_0^*}.$$

Установлено, что максимум КПД СДПМ при СЧУ остается таким же, как и для номинальной скорости $\omega_0 = \omega_{0\text{ном}}$ или $\alpha = 1$, но величина этого максимума достигается при меньшем коэффициенте загрузки, так как здесь рассматриваем регулирование частоты α , и, соответственно, синхронной угловой скорости ω_0 в диапазоне частот $\alpha_{\text{min}} \leq \alpha \leq 1$ или $\omega_{\text{min}} \leq \omega_0 \leq \omega_{0\text{ном}}$. Следовательно, при принятых допущениях относительно зависимости постоянных потерь мощности от относительной частоты α и коэффициента загрузки по моменту μ , равным коэффициенту загрузки по току i , мы получили зависимость КПД частотно-регулируемого СДПМ от относительной скорости α и коэффициента загрузки k_3 такого же характера как и для частотно-регулируемого АД с постоянным магнитным потоком (потокосцеплением). Но КПД такого СДПМ будет выше, чем у АД, поскольку здесь отсутствуют потери мощности в роторе при таком же развиваемом моменте.

Разработана методика расчета допустимого по условиям нагрева момента частотно-регулируемого самовентилируемого СДПМ (рисунок 5), которая может быть использована при выборе мощности и проверке длительно допустимого момента СДПМ, работающего при разных нагрузках, скоростях и температурах окружающей среды [3-А].



а) LSRPM90SL ($P_{\text{ном}} = 3$ кВт); б) LSRPM200L ($P_{\text{ном}} = 25$ кВт)
Рисунок 5 – Зависимость относительного допустимого момента $\mu_{\text{доп}}$ от относительной частоты α для СДПМ при СЧУ