

На правах рукописи



Шмарин Яков Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ОБЪЕМНОГО ГИДРОНАСОСА МНОГОКОЛЕСНОЙ
АВТОТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)” на кафедре автоматизированного электропривода.

Научный руководитель –
доктор техн. наук, профессор **Кодкин Владимир Львович**.

Официальные оппоненты:

Козярук Анатолий Евтихиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский горный университет”, действительный член Академии Электротехнических Наук Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.

Симаков Геннадий Михайлович, д-р техн. наук, профессор кафедры электропривод и автоматизация промышленных установок ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”, г. Иваново.

Защита состоится 20 октября 2017 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)”, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)” и на сайте ЮУрГУ по адресу <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/shmarin-yakov-alekseevich>

Автореферат разослан “___” _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-23.

E-mail: grigorevma@susu.ac.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.298.05
д-р техн. наук, доц.



М.А. Григорьев

Актуальность работы. В крупных многоколесных автотранспортных платформах (МАП) для работы рулевого управления и работы подвески применяются гидравлические системы. Гидронасосы на таких объектах приводятся в движение автономным электроприводом.

Большинство электроприводов объемных гидросистем строится на базе асинхронных двигателей, которые обеспечивают, вращение гидронасоса с одной угловой частотой. Однако к электроприводу рассматриваемой гидросистемы МАП предъявляются особые требования по габаритам, энергоэффективности и грубости к изменению параметров, которые асинхронным электроприводом не удовлетворяются. Электропривод постоянного тока также не является оптимальным. Синхронный электропривод видится наиболее подходящим для гидравлической системы МАП. Предприятием ОАО НПО «Электромашина» был разработан синхронный электродвигатель с постоянными магнитами ЭДБН-25 обладающий требуемыми характеристиками по указанным критериям. Электродвигатель ЭДБН-25 функционирует в режиме вентильного электропривода: работает совместно со специально разработанным коммутатором и датчиком положения ротора.

Согласно перспективному режиму работы МАП для повышения энергоэффективности гидравлической системы необходимо регулирование скорости гидронасоса в зависимости от давления. От электропривода требуется жесткое поддержание заданной скорости. Функционирование электропривода на автономном объекте обуславливает высокие требования по энергоэффективности. С учетом особенностей эксплуатации, важна простота наладки и обслуживания электропривода, грубость к изменению параметров.

Анализ существующего электропривода показал, что при работе на заданной скорости, отличной от номинальной, возникают ошибки настроек угла коммутации, существенно повышающие потери в обмотках системы, вызывающие рост пульсаций и снижение КПД. В системе при работе гидравлики могут возникать ударные нагрузки. Из-за разброса параметров объекта, настройки системы управления оказываются неоптимальными при изменении режимов работы, а наладка электропривода на объекте невозможна. Также оказывается экономически неэффективной разработка и использование специального электронного коммутатора для работы вентильного электропривода.

При указанных особенностях становится актуальной научно-технической задачей создания электропривода гидравлической системы МАП с бездатчиковым управлением на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающего высокую энергоэффективность, простой и эффективный процесс наладки, нечувствительность к изменению параметров электропривода.

Степень научной разработанности проблемы. Электрогидравлические системы достаточно широко исследованы в науке и технике, как в советский период, так и в современных работах. Значимый вклад в исследование

гидравлики и электрогидравлических систем внесли ученые Свешников В.К., Наземцев А.С., Гийон М., Хохлов В.А., Нейман В.Г., однако электрическая часть в таких системах рассматривается лишь с точки зрения управления электромагнитными дросселями, распределителями либо характеристиками объемного гидронасоса.

Системы управления синхронными двигателями с постоянными магнитами также достаточно подробно изучены российскими и иностранными учеными. Вопросы регулирования синхронных электроприводов рассмотрены Вейгнером А.М., особенности построения систем бездатчикового управления двигателями с постоянными магнитами были изучены Vas P., Gieras F.J., Morimoto S. Hrabovcova.V. Среди российских ученых условия устойчивого пуска и работы синхронного двигателя без демпферной обмотки были получены Коршуновым А.А.. Система бездатчикового управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при скалярном управлении была исследована Perera С., им предложен и теоретически обоснован метод стабилизации частоты вращения электродвигателя.

Вместе с этим, возможности повышения энергоэффективности при регулировании скорости электродвигателя в электрогидравлической системе недостаточно изучены, а существующие способы бездатчикового управления СДПМ требуют более точных методик реализации на практике.

Объект исследования – электропривод гидросистемы многоколесной автотранспортной платформы на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Предмет исследования – статические и динамические режимы работы синхронного электродвигателя с постоянными магнитами при частотном управлении.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы и наладки электропривода гидравлической системы МАП.

Идея работы. Используя комплексную модель электрогидравлической системы уточнить требования к электроприводу для обеспечения энергоэффективной работы. Для удовлетворения требований к электроприводу использовать частотное управление с дополнительным стабилизирующим блоком для обеспечения характеристик поддержания скорости и грубости системы к изменению параметров и автоматическим экстремальным регулятором амплитуды напряжения статора для обеспечения энергоэффективности электропривода.

Задачи исследования:

- разработать комплексную модель электропривода, объединенного с гидравлической системой;
- провести анализ систем управления СДПМ;
- сформулировать методику наладки блока стабилизации угловой частоты вращения СДПМ;
- определить характеристики разработанного частотного управления СДПМ;

- разработать алгоритм поиска наиболее эффективных режимов работы электропривода;
- разработать компьютерные модели для подтверждения адекватности методик и алгоритмов;
- провести программное моделирование и экспериментальные исследования.

Методы исследований. В работе использовались методы теоретического и экспериментального исследований.

К теоретическим методам относится теория электропривода, теория автоматического управления, методы математического моделирования, построение векторных диаграмм.

Экспериментальные методы исследования: наблюдения и измерения на испытательном стенде, который состоит из электропривода, устанавливаемого в последующем на реальный объект и нагрузки, которая соответствует реальным условиям эксплуатации.

Достоверность полученных результатов определялась обоснованностью принятых допущений, корректностью использования математического аппарата, подтверждением основных теоретических выводов на программных моделях и экспериментальным путем.

Научные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна

1. Разработана комплексная математическая и компьютерная модель синхронного электропривода гидросистемы, отличающаяся тем, что предусматривает управление параметрами гидросистемы многоколесной автотранспортной платформы по каналу регулирования частоты вращения вала электродвигателя и влияние гидравлических параметров на нагрузочный момент электродвигателя.

2. Предложена методика наладки системы электропривода на базе СДПМ без демпферной обмотки с частотным управлением, отличающаяся тем, что выбор коэффициентов структурной схемы системы управления производится с помощью разработанной компьютерной модели, и обеспечивающая требуемые показатели поддержания скорости и грубости к изменению параметров СДПМ.

3. Разработан алгоритм повышения энергоэффективности при работе СДПМ с частотным управлением, отличающийся применением принципов экстремального регулирования, обеспечивающий автоматический выбор оптимального значения напряжения для различных рабочих точек и возможность работы СДПМ с общепромышленным преобразователем частоты.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложенная комплексная математическая модель электрогидравлической системы МАП на базе электропривода с СДПМ, позволяет решать задачи синтеза систем автоматизированного электропривода и может быть положена в основу методики разработки регулируемого электрогидропривода;

- методика наладки системы электропривода на базе СДПМ и ПЧ может быть применена при разработке электроприводов промышленных механизмов,

требующих бездатчикового управления электроприводом на базе СДПМ, и использующих общепромышленные преобразователи частоты.

Результаты диссертационной работы нашли применение:

- в учебном процессе на кафедре электропривода ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»;

- в рамках хоздоговора №120р-0424-13/00 от 01.11.2013 между ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) и ОАО «НПО Электромашина».

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедр:

– «Автоматизированный электропривод» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск.

– «Электропривода и автоматизации промышленных установок» ФГБОУ ВО «НГТУ», г. Новосибирск.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на: XX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», Томск, 2014г.; X Международной научно-технической конференции «Энергия-2015», Иваново, 2015г.; VIII Международной научной конференции «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия», Северный Чарльстон, США, 2015г.; VI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Иваново, 2015г.; Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Челябинск, 2016г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных статей, из них – 2 в периодических изданиях **рекомендованных ВАК РФ**, 3 – входящих в систему цитирования **Scopus**, 7 докладов на конференциях, 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке методов исследований, в формулировании и доказательстве научных положений. В работах [2,3,5-7] автору принадлежат: разработка методики проведения физического эксперимента, в работе [8] разработка математических моделей и результаты моделирования; в публикациях [1, 4, 9-13] – ведущая роль в обосновании методов исследований.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 150 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 2 таблицы, список используемой литературы из 156 наименования.

Соответствие научной специальности: исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует формуле и пп. 1 и 3 области исследования, приведённой в паспорте специальности 05.09.03.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научные положения, их новизна, практическая значимость.

В первой главе рассмотрены существующие варианты электрогидравлических систем. Показана возможность повышения энергоэффективности за счет применения регулируемого электропривода. Описан технологический объект и основные технологические требования, предъявляемые к электроприводу. Рассмотрены возможные варианты электропривода, обеспечивающие удовлетворение технологических требований.

Во второй главе проведен анализ существующих систем управления СДПМ и их сравнение относительно применения в электроприводе гидравлической системы МАП. Сравнение проведено по критериям надежности, стоимости, возможности регулирования скорости, энергоэффективности, практической реализации. Сформирована система уравнений электрической части. Сформулировано первое научное положение. Приведена структурная схема комплексной математической модели электрогидравлической системы МАП.

В третьей главе разработана компьютерная модель стандартного электропривода на базе СДПМ и ПЧ в режиме скалярного управления. Разработана функциональная схема системы управления, обеспечивающая устойчивую работу СДПМ без демпферной обмотки при скалярном управлении. Разработана компьютерная модель стабилизированного скалярного управления СДПМ и проверена ее работоспособность. Сформулировано второе научное положение. Обосновано существование оптимального значения напряжения при частотном управлении. Сформулированы условия повышения энергоэффективности при работе СДПМ со стандартными преобразователями частоты. Описана работа экстремального регулятора напряжения совместно с СДПМ. Разработана функциональная и структурная схема экстремального регулятора напряжения, а также система уравнений, описывающая его работу. Сформулировано третье научное положение.

В четвертой главе приведены результаты моделирования и экспериментальные данные, подтверждающие существование оптимального значения напряжения статора с точки зрения энергоэффективности. Проведена адаптация системы экстремального регулирования к существующей системе электропривода МАП. С помощью компьютерного моделирования проверена адекватность второго и третьего научного положения. Проведена проверка работоспособности системы экстремального регулирования напряжения в требуемом рабочем диапазоне.

В заключении сформулированы основные выводы и даны результаты исследований в соответствии с целью и задачами исследований.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1 научное положение: комплексная математическая и компьютерная модель синхронного электропривода гидросистемы.

При проектировании расчет гидравлической части ведется с допущением, что частота приводного двигателя постоянна и не зависит от нагрузки. Электродвигатель выбирается на основании требуемой частоты вращения и средней мощности, необходимой для обеспечения технологического процесса. Постоянство частоты вращения приводных двигателей гидросистем привело к созданию собственных, – «гидравлических» – методов регулирования технологических параметров, которые влекут за собой увеличение числа соответствующих агрегатов: распределителей, делителей, дросселей, что снижает надежность системы. Эксплуатируемый электропривод на базе СДПМ при определенных усовершенствованиях может обеспечить регулирование скорости, однако для полноценного использования этих возможностей и перераспределения части функций регулирования на электропривод необходима модель электрогидравлической системы. В такой модели управление подачей или давлением системы должно осуществляться за счет регулирования скорости электродвигателя, а нагрузочный момент должен быть связан с этими же технологическими параметрами. Существующие модели нельзя использовать, так как входными сигналами в них являются низковольтные управляющие воздействия на электромагнитные катушки распределителей, а выходным – перемещения рабочего органа или другие технологические параметры.

Качественный анализ диаграмм работы гидравлической системы указывает на возможности повышения энергоэффективности электропривода. С учетом графика нагрузки оказывается, что электродвигатель совершает полезную работу только в процессе функционирования механизмов гидросистемы. Согласно технологическому процессу управление гидравлическими аппаратами происходит в течение 20-25% от всего времени цикла, а в оставшееся время полезной работы не совершается. Вместе с этим, мощность, потребляемая электродвигателем, равняется номинальному значению на всем времени цикла. Для повышения эффективности рабочего процесса предлагается реализовать понижение частоты вращения вала электродвигателя при неработающих гидравлических аппаратах и возврат на номинальную скорость при их функционировании. Отслеживание работы гидравлических аппаратов обеспечить по изменяющемуся давлению в системе.

Кроме задач повышения энергоэффективности, решение которых позволит уточнить требования к электроприводу, электрогидравлическая модель необходима для прогнозирования условий работы электропривода и его реакции на нагрузку. Особенности наладки и эксплуатации технологического объекта не позволяют совместно с электроприводом испытывать и производить его настройки.

Электрогидравлическая система МАП состоит из исполнительных органов (гидроцилиндров), трубопровода, гидравлических аппаратов регулирования, гидронасоса, электродвигателя, электрического силового преобразователя и системы управления. Гидравлическая часть имеет относительно сложную структуру, однако в целях исследования электропривода решено использовать ее упрощенный вариант. По сути, указанная система представляет собой следящий гидропривод, состоящий из объемного гидронасоса, переливного клапана, поворотного распределителя, который имеет вращающуюся втулку и золотник, гидроцилиндра, механически связанного с распределителем.

При составлении комплексной математической модели (рис. 1) принималось, что жидкость является несжимаемой, стенки трубопроводов абсолютно жесткие, рассматриваются системы с короткими трубопроводами, т.е. отсутствуют потери по длине трубопровода.

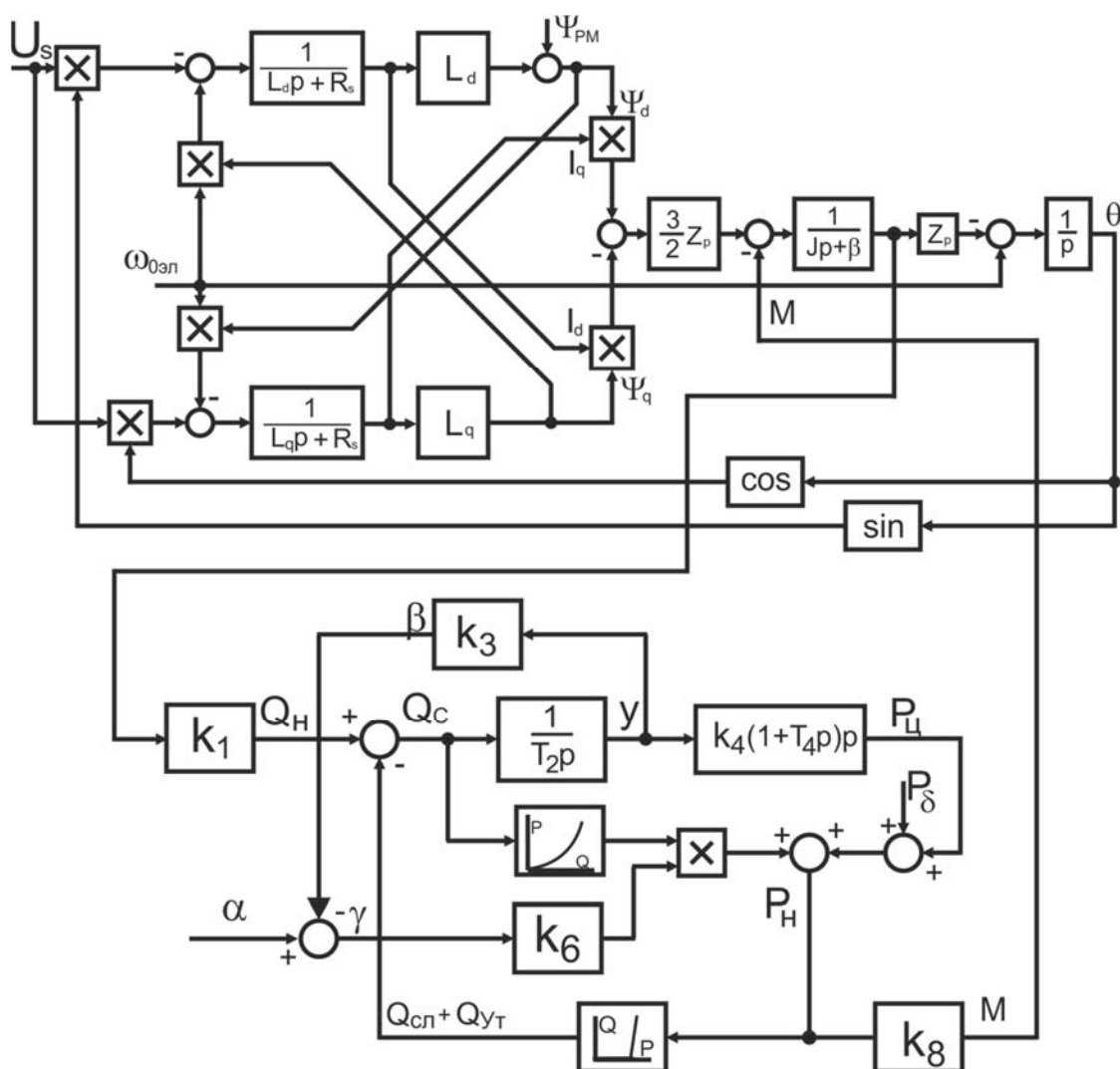


Рис. 1. Комплексная математическая модель электрогидравлической системы МАП

Модель электромеханической части основывается на модели скалярного управления СДПМ. Модель гидравлической части разработана с учетом задач электропривода. Входом гидравлической части модели является угловая

частота вращения электродвигателя. Подача насоса Q_H определяется угловой частотой вращения вала и объемом рабочей камеры насоса, что выражается коэффициентом k_1 . Первый сумматор характеризует уравнение расходов системы. Подача насоса равна сумме расходов рабочей жидкости через гидроцилиндр, через переливной клапан и утечки в системе. На схеме Q_C – расход через систему гидроцилиндров; $Q_{СЛ}$ – расход через переливной клапан; $Q_{УТ}$ – расход, определяемый утечками в системе. Перемещение поршня гидроцилиндра определяется интегралом расхода рабочей жидкости через гидроцилиндр и его геометрическими параметрами, которые выражаются в постоянной времени T_2 . Звено с коэффициентом k_3 определяет механическую связь между рабочим органом и поворотным распределителем, с соответствующим коэффициентом усиления, зависящим от геометрических параметров связи и размерностью m^{-1} . Звено связывает угловое перемещение распределителя с линейным перемещением штока.

Динамическая составляющая давления в системе определяется уравнением движения поршня гидроцилиндра, включающего первую и вторую производную линейного перемещения штока. Параметры передаточной функции выражаются коэффициентом k_4 , зависящего от коэффициента вязкого трения и геометрических параметров гидроцилиндра, и постоянной времени T_4 , определяемой за счет масс подвижных частей гидросистемы и рабочей жидкости. Статическая составляющая давления определяется напорной характеристикой гидросистемы и зависит от параметров трубопроводов, гидравлических сопротивлений аппаратов, характеристик переливного клапана. В модели напорная характеристика аппроксимируется квадратной зависимостью от подачи с коэффициентом k_5 . Для моделирования возмущающих скачков давления в системе, вызванных неровностями поверхности, по которой движется платформа, а также неидеальной работой гидравлической системы, в структурную схему вводится параметр P_5 .

Напорная характеристика системы представляется в виде произведения сигналов звена 5 и 6. Направление потока рабочей жидкости определяется распределителем, поэтому, представив его в виде звена с напорной характеристикой, зависящей от рассогласования между сигналом задания и фактическим поворотом рулевого механизма, можно получить значение падения давления в системе при полностью открытом распределителе и при изменении угла рассогласования. Работа распределителя была представлена произведением выхода пятого звена на коэффициент определяемый выходом шестого звена и зависящий от рассогласования. Передаточная функция шестого звена представлена в виде коэффициента k_6 . Коэффициенты усиления k_5 и k_6 определяются эмпирически так, чтобы при рассогласовании равному нулю падение давления в системе было максимальным, а при максимальном рассогласовании падение давления P_n в системе соответствовало параметрам распределителя. Уравнение переливного клапана сформировано таким образом, что он не пропускает рабочую жидкость при давлении ниже, чем определенное установленное значение, а затем с ростом давления расход через клапан

линейно нарастает. Звеном также представляются утечки, которые присутствуют в системе в виде линейной зависимости от величины давления.

Для получения момента на валу электродвигателя необходимо использовать значение давления и коэффициент пропорциональности.

Математическая модель и представленная структурная схема позволили реализовать компьютерную модель в программном приложении *Matlab Simulink*, провести симуляцию работы электрогидравлической системы в различных режимах и проверить адекватность математической модели.

Адекватность модели и гипотеза возможности энергосбережения подтверждается при моделировании работы электрогидравлической системы при регулировании скорости электродвигателя (Рис. 2). Задание на скорость электродвигателя формировалось специально разработанным регулятором давления. В начальный момент времени система заполняется рабочей жидкостью, а после достижения требуемого давления задание на скорость снижается с необходимым темпом. В момент программного времени 2 с. начинается работа поворотного распределителя, давление снижается и с регулятора давления формируется задание на номинальную скорость. После прекращения работы гидравлических аппаратов скорость двигателя вновь снижается. Если скорость двигателя останется низкой при работе гидрораспределителя – возникает просадка давления до 50%, что недопустимо по условиям рабочего процесса. При регулировании давление снижается не более чем на 7%. При этом, потребляемая мощность двигателя снижается в неактивном режиме до 3,5 кВт против 11 кВт в системе без понижения скорости, что подтверждает возможность повышения энергоэффективности электрогидравлической системы МАП.

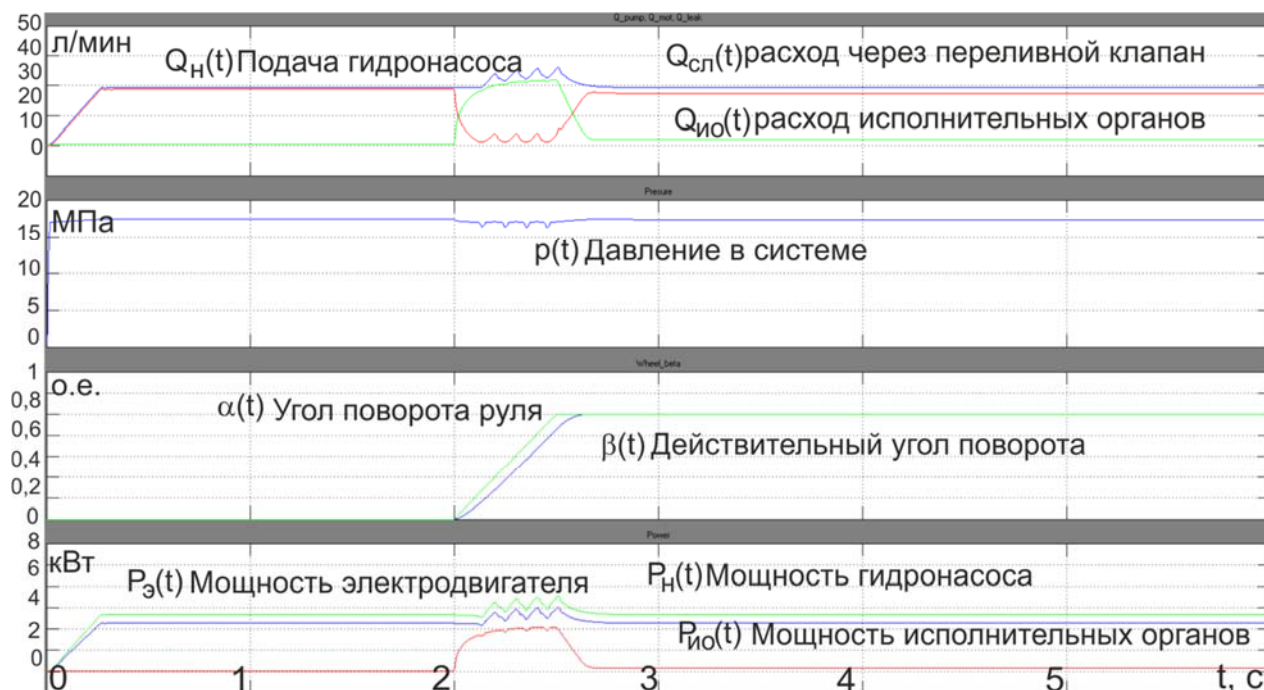


Рис. 2. Диаграммы работы модели электрогидравлической системы МАП

2 научное положение: методика наладки системы частотного управления СДПМ.

Модель электрогидравлической системы позволяет полностью сформулировать требования к электроприводу МАП. К требованиям относятся: минимальные габариты (сводится к применению разработанного электродвигателя ЭДБН-25); эффективность реализации (необходимо использовать общедоступные электротехнические модули и аппараты); система управления должна быть бездатчиковой; регулирование должно осуществляться в диапазоне от $0,2n_n$ до $1,2n_n$; КПД при регулировании скорости должен быть не ниже 85%; поддержание скорости с нулевой статической ошибкой и динамической ошибкой не более 8%; робастность системы по отношению к изменениям параметров электропривода.

В существующем электроприводе используется датчик скорости, параметры регуляторов оказываются неэффективными при изменении параметров объекта управления, что вызывает значительное снижение КПД при регулировании скорости. Проведенный анализ систем управления электроприводами указывает на наилучшие качественные показатели векторного управления СДПМ, однако особенности двигателя ЭДБН-25 затрудняют реализацию со стандартными приложениями в преобразователях частоты. Кроме того, отмечается высокая чувствительность векторного управления к изменению параметров, что требует дополнительных алгоритмов адаптации и как следствие усложняют систему.

При исследовании методов бездатчикового управления СДПМ исследователями отмечается перспективность применения скалярного управления, которое предусмотрено во всех общепромышленных ПЧ. Так, в работе *Stulrajter M.* показана возможность стабилизированной работы СДПМ, а *Perera C.*, в своем исследовании теоретически определил границы устойчивости электропривода на базе СДПМ и скалярного управления и показал способ стабилизации частоты вращения вала электродвигателя. Тем не менее, для применения этих возможностей на практике отсутствуют методики наладки и синтеза структурной схемы. Таким образом, возникла гипотеза о наилучшем удовлетворении технических требований за счет частотного управления при решенной задаче стабилизации частоты вращения двигателя.

Способ стабилизации заключается в формировании дополнительного сигнала приращения к заданию угловой частоты вращения. Формирование сигнала приращения возможно несколькими способами, но в настоящей работе рассматривается вариант с использованием информации об электрической мощности. Основываясь на балансе мощностей электропривода и принимая, что мощность потерь и изменение запаса электромагнитной энергии постоянны, а колебания мощности связаны с колебаниями скорости на валу электродвигателя, колебания мощности можно записать в виде

$$\Delta P = \left(\frac{2}{p}\right)^2 J \omega_{0,эл} \frac{d}{dt} \Delta \Omega + 2 \left(\frac{2}{p}\right)^2 \tau \omega_{0,эл} \Delta \Omega + \frac{2}{p} M_c \Delta \Omega,$$

где p – число пар полюсов, J – момент инерции, $\Delta\Omega$ – колебания угловой частоты вращения, $\omega_{0эл}$ – угловая частота вращения электромагнитного поля, τ – коэффициент вязкого трения, M_c – момент статического сопротивления в установившемся режиме. Преобразуя записанное уравнение, получим $\Delta\omega_{0эл} = -k_p \Delta P$ – выражение для приращения к сигналу задания по угловой частоте, используемое в качестве стабилизирующего сигнала, на основе которого можно создать функциональную схему управления СДПМ (Рис. 3). Согласно функциональной схеме основным элементом, обеспечивающим формирование сигнала приращения задания по скорости, является измеритель мощности, который использует сигналы с датчиков тока и сигналы задания по амплитуде напряжения. Из полученного сигнала мощности с помощью высокочастотного фильтра выделяется переменная составляющая, которая с учетом коэффициента пропорциональности используется в качестве корректирующего сигнала на сумматоре. Из-за отсутствия конкретных методик наладки, такой способ стабилизации затруднительно использовать на практике.

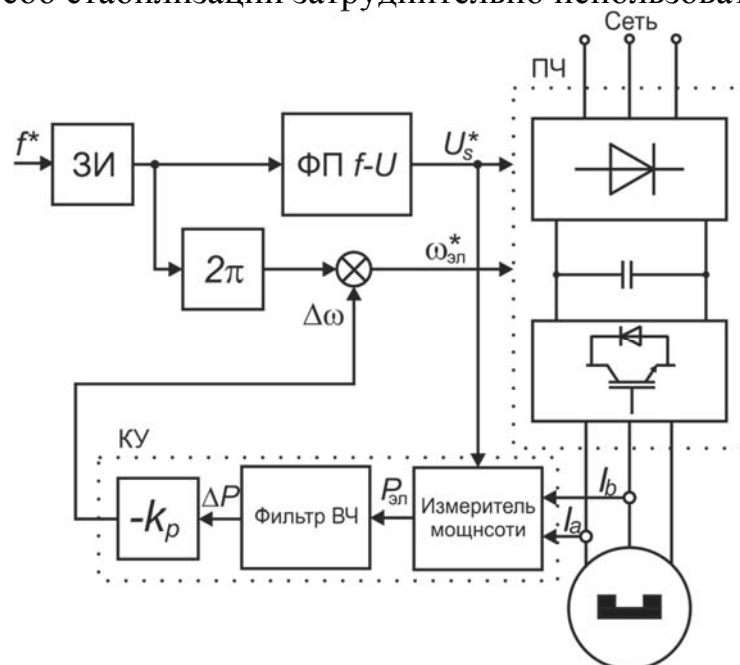


Рис. 3. Функциональная схема стабилизированного СДПМ с U/f-управлением

В настоящей диссертационной работе впервые разработана компьютерная модель стабилизированной системы управления СДПМ с обратной связью, формирующей сигнал коррекции из вычисленной электрической мощности. Модель позволяет провести синтез системы управления.

Модель разработана в приложении *Matlab Simulink*. Использовались стандартные блоки из библиотеки приложения, как в силовой, так и в информационной частях. Модель преобразователя частоты с входными сигналами задания по угловой частоте и по амплитуде напряжения статора также традиционна и проверена как в исследовательском, так и в учебном процессе.

В компьютерной модели для расчета мощности используются сигналы токов двух фаз и сигнал задания по амплитуде напряжения статора. Блок

регулятора, обеспечивающий стабилизацию, содержит высокочастотный фильтр и пропорциональное звено. Передаточная функция фильтра позволяет выделить колебания мощности $\Delta P = \frac{p}{1 + T_{вч} p} P_{эл}$ из вычисленного значения мощности, но для корректной работы системы необходимо подобрать постоянную времени фильтра $T_{вч}$. После пропорционального звена с коэффициентом k_p на выходе регулятора формируется сигнал приращения к заданию по угловой частоте вращения, который поступает на сумматор перед ПЧ.

Выбор коэффициентов $T_{вч}$ и k_p теоретически происходит на основании анализа характеристического уравнения системы электропривода. Вместе с этим, отсутствует методика, позволяющая специалистам на практике осуществлять проектирование и реализовывать системы электропривода. Компьютерное моделирование позволяет определить коэффициенты гораздо эффективнее. Согласно предложенной методике необходимо:

а) установить параметры электродвигателя (активное, индуктивное сопротивление двигателя, коэффициент по ЭДС, момент инерции, число пар полюсов) в соответствующие блоки модели;

б) установить параметры рабочей точки электропривода (нагрузочный момент и задание угловой скорости) и запустить модель в разомкнутом состоянии;

в) установить значение постоянной времени фильтра $T_{вч}$ равное периоду колебаний скорости на диаграмме работы электродвигателя до выхода из синхронизма;

г) установить значение коэффициента пропорциональности k_p в соответствии с выражением $k_p = \frac{\Delta\omega \cdot p}{2\pi \cdot \Delta P}$, где $\Delta\omega$ амплитуда колебаний скорости на диаграмме работы электропривода при фиксированном задании частоты, p – число пар полюсов; ΔP – амплитуда колебаний мощности на выходе корректирующего блока;

д) – замкнуть контур стабилизации, соединив выход стабилизирующего блока с сумматором, запустить модель и проверить работоспособность системы. При необходимости скорректировать параметры стабилизирующего блока в пределах 5%.

Для рассматриваемого электродвигателя ЭДБН-25 постоянная времени $T_{вч}=0,091$ с, а коэффициент пропорциональности $k_p=0.95 \cdot 10^{-5}$.

Достоверность предлагаемой методики подтверждается проведенным моделированием (рис.4) и экспериментальными исследованиями (рис.5). Нестабилизованная система частотного управления совместно с СДПМ при

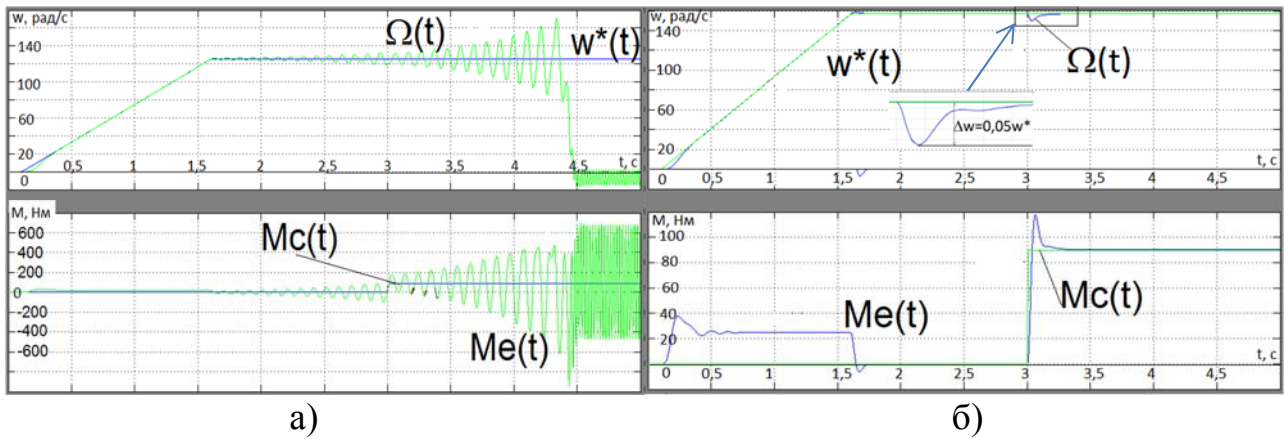


Рис. 4. Работа СДПМ с частотным управлением до стабилизации а) и после – б)

работе с заданием 50Гц характеризуется значительной колебательностью и через некоторое время после достижения скорости задания электродвигатель выходит из синхронизма (момент времени 4,5 с. рис. 4а). После применения контура стабилизации колебательность устраняется, а двигатель не выходит из синхронизма (рис. 4б). Динамическая ошибка по скорости при ударном приложении нагрузки, равной номинальному моменту электродвигателя, относительно небольшая и составляет 5% при частоте 50Гц. При задании частоты 10 Гц электродвигатель также не выходит из синхронизма, хоть и динамическая ошибка увеличивается.

Экспериментальные исследования, проводившиеся на испытательном стенде, также указывают на работоспособность предлагаемого метода коррекции и выбора коэффициентов. Испытания проводились с электродвигателем, устанавливаемым на гидросистему реальной мобильной платформы. При работе на пониженной скорости (900 об/мин) отсутствует колебательность, а при набросе нагрузки соответствующей номинальной (85 Нм) двигатель не выпадает из синхронизма. Динамическая ошибка соизмерима с результатами моделирования.



Рис. 5. Временные диаграммы наброса нагрузки при стабилизированной системе частотного управления СДПМ

Испытания проводились с электродвигателем, устанавливаемым на гидросистему реальной мобильной платформы. При работе на пониженной скорости (900 об/мин) отсутствует колебательность, а при набросе нагрузки соответствующей номинальной (85 Нм) двигатель не выпадает из синхронизма. Динамическая ошибка соизмерима с результатами моделирования.

В целях проверки робастности системы было проведено моделирование при изменении параметров электропривода (Рис. 6, 7). Моделирование подтвердило работоспособность системы при изменении сопротивления статора в 6 раз, изменении индуктивности в 7 раз, изменении приведенного момента инерции более чем в 7 раз без появления статических ошибок и при незначительном изменении динамической ошибки. При других системах

управления появляются статические ошибки уже при двукратном изменении параметров, и до 40% растет динамическая ошибка.

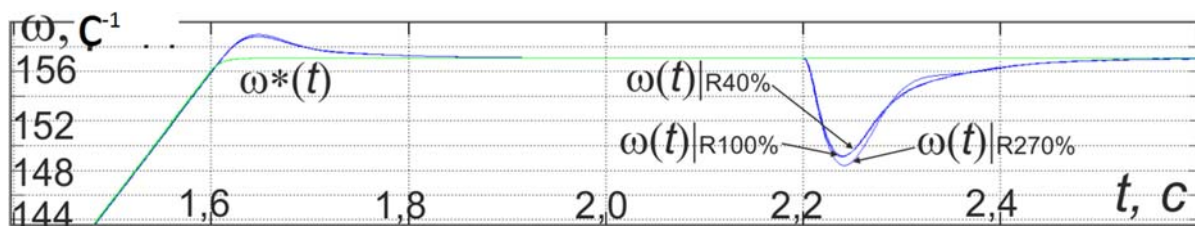


Рис. 6. Вид переходных процессов скорости при изменении сопротивления статора

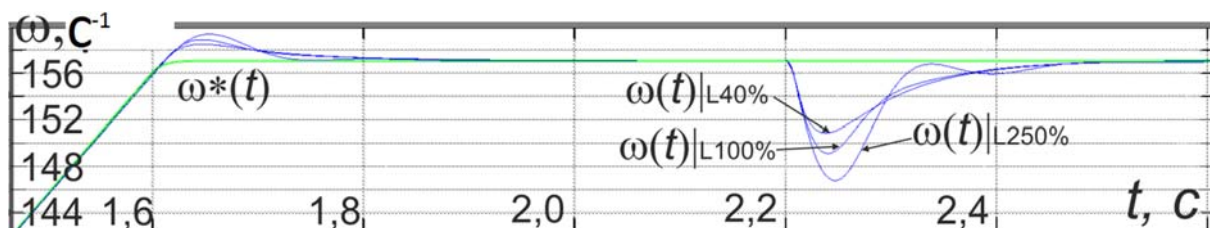


Рис. 7. Вид переходных процессов скорости при изменении индуктивности статора

Предлагаемая методика позволяет реализовать систему электропривода СДПМ удовлетворяющую требованиям по отсутствию датчика скорости, эффективности реализации, регулированию скорости и грубости по отношению к изменениям параметров электропривода.

3 научное положение: алгоритм энергоэффективного управления СДПМ с частотным управлением

При векторном управлении СДПМ реализуется два канала влияния на электропривод (Виноградов А.Б., *Merzoug, M.S., Zhao Y.* и др.). Один канал определяет электромагнитный момент, другой используется для управления энергоэффективностью. При работе с синхронным двигателем с электромагнитным возбуждением, дополнительный канал регулирования обеспечивается током возбуждения. При скалярном режиме работы СДПМ с ПЧ такого канала нет, однако для обеспечения сформулированных требований к электроприводу необходимо обеспечить высокий КПД во всем рабочем диапазоне. В процессе исследований возникло предположение, что каналом управления энергоэффективностью может быть амплитуда напряжения статора.

Анализ векторных диаграмм работы СДПМ показывает, что при скалярном управлении изменение амплитуды вектора напряжения статора приводит к подобным соотношениям, что и изменение амплитуды вектора ЭДС при регулировании тока возбуждения. Отсюда возникла гипотеза о существовании, при скалярном управлении СДПМ при определенной скорости, такого значения амплитуды напряжения статора, при котором значение КПД будет наибольшим и, как следствие, задача поиска такого напряжения. Было найдено теоретическое подтверждение максимума КПД при регулировании амплитуды напряжения статора. В работе *S.Gieras* приведен вывод уравнения тока и

входной мощности электродвигателя. Выражение для входной мощности запишется в виде

$$P_{ex} = m \left[I_q E + R_1 I^2 + I_q I_d (X_d - X_q) \right].$$

Графическая характеристика последнего уравнения в функции напряжения статора имеет форму выпуклой вниз линии, то есть имеет минимум.

Подтвердить наличие наиболее оптимального значения напряжения позволила разработанная компьютерная модель частотного управления СДПМ. Модель позволяет задавать различные рабочие точки электропривода (нагрузочный момент, угловая скорость), а также при фиксированном задании по скорости изменять значение амплитуды напряжения статора. При определенном задании по скорости ступенчатым образом изменялся нагрузочный момент, от 10 до 120Нм с шагом 10Нм. В интервале работы при определенном нагрузочном моменте и задании скорости ступенчатым образом изменялось значение амплитуды напряжения статора. В каждой рабочей точке определялось значение тока статора при десяти различных значениях напряжения статора. Задание по скорости изменялось от 10Гц до 60Гц с шагом 10 Гц. Таким образом, было определено значение амплитуды напряжения статора, при котором ток статора был минимальным для 72 рабочих точек электропривода.

На представленной поверхности оптимальных значений (Рис. 8.) виден «дрейф» оптимального значения напряжения в различных рабочих точках. С ростом задания по угловой скорости значение оптимального напряжения снижается, а с ростом нагрузки – повышается. В итоге, наиболее минимальное оптимальное значение напряжения достигается на холостом ходу, а наибольшее – при минимальном задании по скорости и максимальной нагрузке. Стоит также отметить нелинейную зависимость оптимального значения напряжения от рабочей точки.

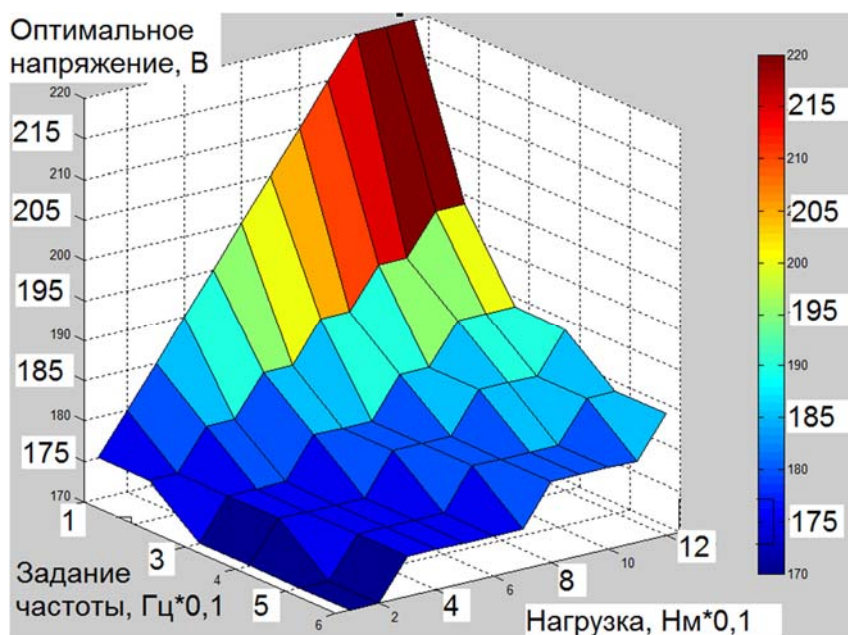


Рис. 8. Временные диаграммы наброса нагрузки при стабилизированной

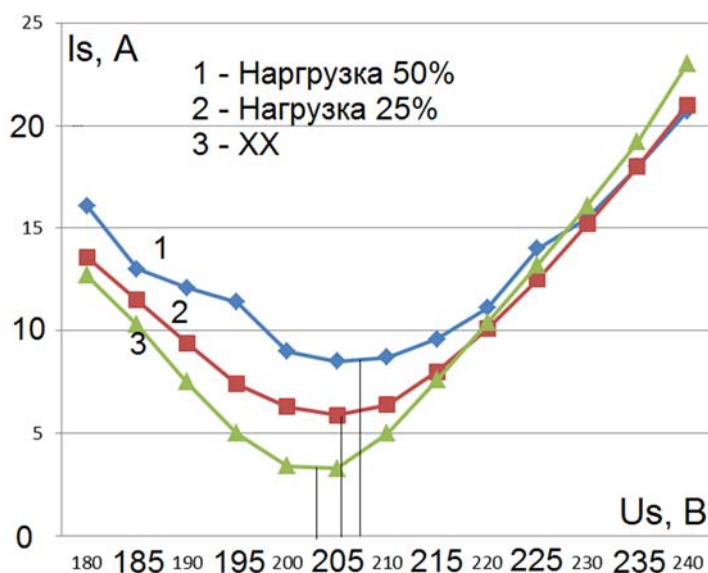


Рис. 9. Зависимость тока статора СДПМ от амплитуды питающего напряжения

Аналогичные исследования были проведены на испытательном стенде. СДПМ управлялся от общепромышленного ПЧ *Altivar 71* производства *Schneider Electric*, а в качестве нагрузки использовался аналогичный электродвигатель в генераторном режиме. В составе стенда использовались поверенный динамометрический датчик, позволяющий определять значения момента на валу двигателя, датчик скорости, датчики тока и напряжения.

Характер зависимости тока статора от амплитуды напряжения статора также подтвердился. Значение оптимального напряжения оказалось не постоянным для всего рабочего диапазона электропривода. На рис. 9 отображена зависимость тока статора от напряжения и видно, как для одной и той же скорости при увеличении нагрузки смещается точка минимума. Экспериментальные зависимости тока статора от напряжения при одной и той же нагрузке, но при разном задании угловой скорости также показали смещение точки минимума тока статора.

Таким образом, возникла задача поиска оптимального значения амплитуды напряжения статора для каждой установившейся рабочей точки электропривода. Несмотря на наличие уравнения мощности, из которого можно вычислить оптимальное значения напряжения, аналитический подход остается достаточно трудоемким и ненадежным из-за возможных неточностей в параметрах СДПМ и их изменения в процессе работы. Функция мощности имеет минимум, поэтому задачу поиска эффективного значения напряжения решалась с применением принципов экстремального регулирования.

В работе впервые была разработана система экстремального регулирования амплитуды напряжения статора для поиска минимума тока статора. Особенностью разработанного экстремального регулятора является использование сигнала тока статора самого электродвигателя в качестве источника корректирующего сигнала. Согласно идее поиска оптимального значения напряжения был разработан алгоритм экстремального регулирования (Рис.10). Цикл алгоритма начинается с работы анализатора состояния, который определяет наличие переходного процесса по нагрузке или по скорости. Если рабочая точка изменилась, то запускается процесс поиска минимума тока статора. Для этого формируется тестовый положительный импульс приращения напряжения и определяется производная тока статора. При положительной

производной приращение напряжения становится отрицательным и через коэффициент связывается с изменением тока статора, при отрицательной – наоборот. При достижении нуля производной тока процесс поиска минимума заканчивается, а система приводится в исходное состояние и ожидается следующий переходный процесс.

Проверка предлагаемого алгоритма осуществлялась с помощью компьютерной модели, в основу которой была положена разработанная структурная схема (Рис.11). В предложенной структурной схеме обеспечивается регулирование скорости поиска минимума тока и его точность. Скорость изменения рабочих точек на электроприводе мобильной автономной платформы невелика, поэтому вопросы устойчивости экстремального регулятора в настоящей работе не рассматривались.

Приведенные результаты компьютерного моделирования (Рис.12) подтверждают работоспособность системы. При произвольном задании

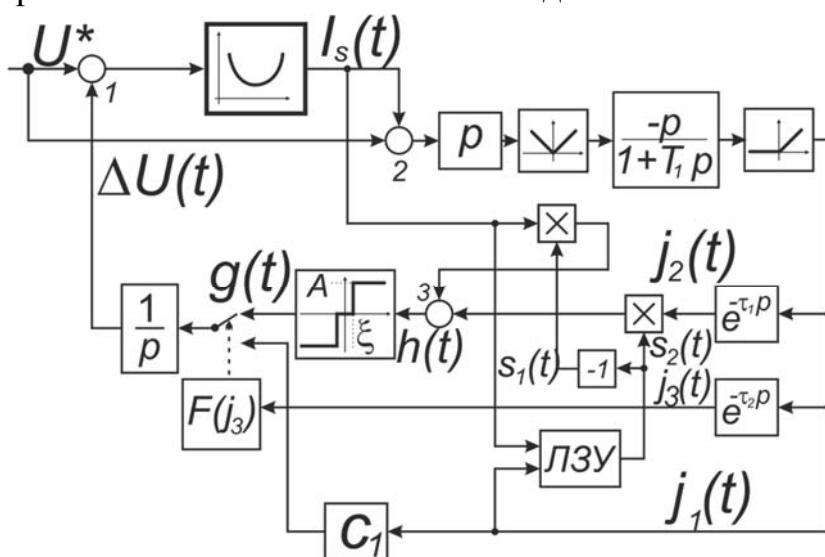


Рис. 11. Структурная схема экстремального регулятора СДПМ

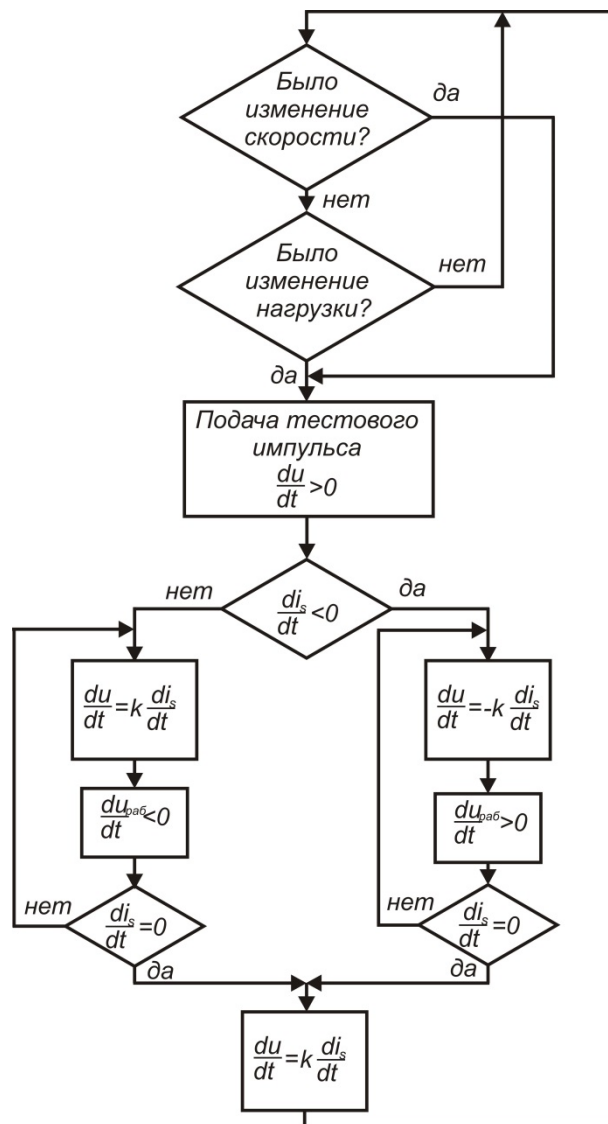


Рис. 10. Алгоритм поиска оптимального значения напряжения СДПМ

первоначального напряжения с помощью тестового импульса определяется направление поиска экстремума и далее в течение 1-2 секунд сигнал приращения напряжения достигает значения, при котором ток статора становится минимальным. Система экстремального

регулирования работоспособна как при изменении нагрузки на

валу электродвигателя, так и при изменении скорости. Причем первоначальный выбор напряжения может быть произвольным.

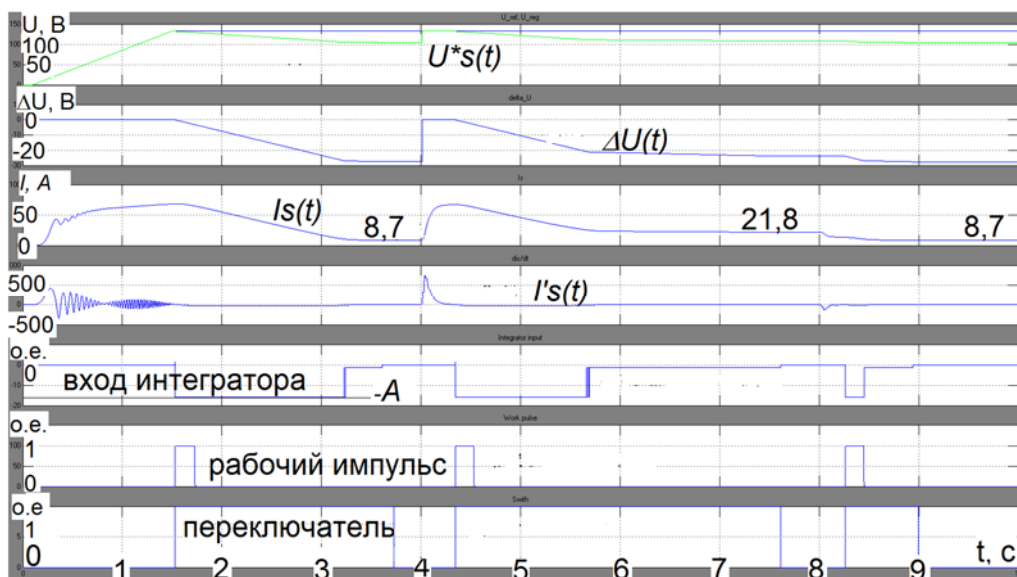


Рис. 12. Временные диаграммы работы системы экстремального регулирования СДПМ

На рисунке 13 представлен процесс поиска экстремума с отображением диаграммы изменения КПД электродвигателя. Видно, что до поиска экстремума ($t=2$ с) КПД значительно ниже, чем после найденного оптимального значения напряжения ($t=3$ с). При работе в номинальной точке КПД системы достигает 92%, что на 5-20% выше, чем при работе этого же двигателя по типу БДПТ со специальным преобразователем (коммутатором).



Рис. 13. Процесс автоматического поиска наибольшего значения КПД СДПМ

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – создан электропривод гидравлической системы МАП на базе СДПМ, обеспечивающий высокую энергоэффективность во всем рабочем диапазоне, упрощен процесс наладки электропривода. Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана комплексная математическая и компьютерная модель электрогидравлической системы МАП, в качестве входного воздействия рассматривается частота вращения вала электродвигателя, а выходными

сигналами являются угол отклонения рабочего органа и механический момент на валу гидронасоса, отличающаяся тем, что нагрузочный момент электропривода формируется через канал гидравлической части, а задание по скорости электродвигателя формируется регулятором давления. Показано, что применение регулирования скорости приводного двигателя позволяет снизить энергопотребление в неактивных режимах на 60%. Адекватность математической модели проверялась с помощью компьютерного моделирования и сравнения с экспериментальными данными.

2. Предложена методика наладки электропривода на базе СДПМ и ПЧ в режиме скалярного управления и стабилизирующего блока, обеспечивающая устойчивую работу электропривода гидросистемы, отличающаяся применением компьютерной модели для выбора параметров стабилизирующего канала системы управления, что позволяет повысить эффективность наладки электропривода гидросистемы и обеспечить грубость системы по отношению к изменению параметров электропривода. Система оказывается работоспособна при более чем шестикратном изменении параметров.

3. Разработан алгоритм поиска энергоэффективного значения напряжения статора при частотном управлении СДПМ, отличающийся использованием системы экстремального регулирования (СЭР). Разработанный алгоритм совместно со стабилизирующим блоком и методикой наладки стабилизирующего блока позволяет использовать в составе электропривода гидросистемы общепромышленный ПЧ в скалярном режиме. Полученная система электропривода, состоящая из электродвигателя ЭДБН-25 и преобразователя частоты *Schneider Electric*, удовлетворяет сформулированным техническим требованиям. Регулирование скорости происходит в диапазоне от $0,2n_n$ до $1,2n_n$, КПД системы при регулировании скорости не ниже 89%, просадка скорости при ударном приложении номинального момента не более 3%, датчик обратной связи по скорости не используется.

4. Разработана компьютерная модель и методика наладки СЭР системы электропривода СДПМ, подтверждающая работоспособность системы экстремального регулирования напряжения. Установлено, что алгоритм управления обеспечивает поиск значения напряжения, при котором КПД в определенной рабочей точке оказывается максимальным.

5. Обосновано применение в составе электропривода МАП на базе СДПМ и ПЧ в режиме скалярного управления, включающего дополнительный стабилизирующий блок и СЭР. Проведенное моделирование и экспериментальные исследования подтвердили, что система обеспечивает функционирование электропривода в требуемом рабочем диапазоне с нулевой статической ошибкой по скорости, а динамическая ошибка составляет не более 5% при номинальной скорости. Система позволяет автоматически находить параметры энергоэффективной работы СДПМ; при работе в рабочем диапазоне, максимальное КПД системы составляет 92%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций

1. Кодкин, В.Л. Эффективное частотное управление асинхронными электроприводами для работы при перегрузках / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин, **Я.А. Шмарин** // Электротехника. – 2014. - № 10. - С. 56-59.

2. **Шмарин, Я.А.** Статические характеристики синхронного электропривода с постоянными магнитами / Я.А. Шмарин, В.Л. Кодкин, А.С. Аникин // Электротехника. – 2015. – №12. - С. 41-44.

Издания, входящие в систему цитирования Scopus

3. **Shmarin, Y.A** Static Parameters of a Synchronous Electric Drive with Permanent Magnets / Y.A. Shmarin, V.L. Kodkin, A.S. Anikin // Russian Electrical Engineering. 2015. Т. 86. - № 12. – С. 719-722.

4. Kodkin V.L. Effective Frequency Control for induction Electric Drives under Overloading / Kodkin V.L., Anikin A.S., **Shmarin Y.A.** // Russian Electrical Engineering. 2014. Т. 85. № 10. С. 641-644.

5. Kodkin V.L. Dynamic Load Disturbance Correction for Alternative Current Electric Drives / V. L. Kodkin; A. S. Anikin; **Y.A. Shmarin** // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE Conference Publications. Chelyabinsk, Russia, IEEE. – 2016. – p. 1-5.

Другие научные издания

6. Кодкин, В.Л. Особенности частотного управления вентильным двигателем с постоянными магнитами / В.Л. Кодкин, Я.А. Шмарин // Материалы XX Всероссийской научно-технической конференции Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». — Томск: Изд-во ТПУ. - 2014. – с. 143-147.

7. Шмарин, Я.А. Экспериментальное исследование частотного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами / Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 4. – Иваново: Изд-во ФГБОУ ВПО ИГЭУ. 2015г. – с 3-5.

8. Шмарин, Я.А. Экспериментальное исследование частотных способов управления синхронным двигателем с постоянными магнитами / Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. // Материалы 8 международной научной конференции. Научно-издательский центр «Открытие». 2015. С. 146-151.

9. Шмарин, Я.А. Способ оптимизации системы частотного управления электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами / Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. // Труды VI международной научно-технической конференции Электроэнергетика глазами молодежи. – Иваново: Изд-во ФГБОУ ВПО ИГЭУ. 2015. С. 389-392.

10. Кодкин, В.Л. Коррекция динамических моментных возмущений в электроприводах переменного тока / Кодкин. В.Л., Аникин. А.С., Шмарин Я.А. // Материалы 68-й научной конференции. – Челябинск: Изд-во ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ). 2016. С. 805-814.

11. Шмарин, Я.А. Динамические характеристики системы частотного электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами / Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. // Материалы 67-й научной конференции. Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Изд-во ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ). 2015. С. 1062-1068.

12. Кодкин, В.Л. Коррекция динамических моментных возмущений в электроприводах переменного тока / В.Л.Кодкин, Я.А.Шмарин, А.С.Аникин // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВО ПНИПУ. 2016 г. с 165-169.

Патенты и свидетельства

13. Пат. 2599529 Российская Федерация, МПК: H02P23/02. Устройство частотного управления асинхронным электроприводом / Кодкин В.Л., Аникин А.С., Шмарин Я.А., Балденков А.А. - № 2014151549/07; заявл. 17.11.2015; опубл. 10.10.2016 Бюл. № 28.

Шмарин Яков Алексеевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОБЪЕМНОГО ГИДРОНАСОСА МНОГОКОЛЕСНОЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Специальность 05.09.03

«Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. ____ . Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ

Отпечатано в типографии издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И.Ленина, 76.