

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(Национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Шмарин Яков Алексеевич

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

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Кодкин В.Л.

Челябинск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИДРОСИСТЕМЫ.....	10
1.1. Силовые агрегаты мобильной техники	10
1.2. Особенности электрогидравлических систем	11
1.3. Электропривод гидросистем	16
1.4. Объект исследования	20
1.5. Электропривод насосной станции объекта.....	25
1.6. Требования к системе электропривода гидравлической системы	28
1.7. Задачи исследования	33
1.8. Выводы по первой главе	34
2. модель электрогидравлической системы	35
2.1. Математическая модель гидросистемы при регулировании скорости гидронасоса.....	35
2.2. Структурная схема и компьютерная модель электрогидравлической системы с СДПМ.....	41
2.3. Повышение эффективности гидросистемы МАП с помощью комплексной модели электрогидравлической системы.....	44
2.4. Особенности СДПМ и соответствующих систем управления	48
2.5. Сравнение систем управления СДПМ	56
2.6. Выводы по второй главе	72
3. бездатчиковое управление сдпм.....	74
3.1. Компьютерная модель СДПМ.....	74
3.2. Стабилизация СДПМ при скалярном управлении.....	79
3.3. Грубость системы частотного управления с применением разработанной методики наладки к вариации параметров	86
3.4. Регулирование напряжения статора	89
3.5. Разработка экстремального регулятора СДПМ.....	90
3.6. Компьютерная модель экстремального регулятора СДПМ.....	102
3.7. Выводы по третьей главе	109

4. Моделирование и экспериментальные исследования.....	110
4.1. Исследование модели стабилизированного U/f -управления СДПМ	110
4.2. Экспериментальное исследование СДПМ с преобразователем частоты	
114	
4.3. Адаптация системы экстремального регулирования к СДПМ	118
4.4. Методика наладки СЭР для СДПМ	128
4.5. Энергоэффективность электропривода гидросистемы на базе СДПМ с	
СЭР	
130	
4.6. Выводы по четвертой главе.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
Библиографический список	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В крупных многоколесных автотранспортных платформах (МАП) для работы рулевого управления и работы подвески применяются гидравлические системы. Гидростанции на таких объектах приводятся в движение 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 по типу вентильного электропривода и работает совместно со специально разработанным преобразователем (коммутатором) и датчиком положения ротора.

Согласно перспективному режиму работы МАП для повышения энергоэффективности гидравлической системы необходимо регулирование скорости 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 неэффективным разработка и использование специального электронного коммутатора для работы БДПТ.

При указанных особенностях становится актуальной научно-техническая задача создания системы электропривода гидравлической системы МАП на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающего высокую энергоэффективность в рабочем диапазоне, простой и эффективный процесс наладки, нечувствительный к изменению параметров.

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 изучались Вейгнером А.М., особенности построения бездатчиковых систем 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 C., 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, приводящего в движение объемный гидронасос, при частотном управлении без датчика скорости.

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 обеспечения требований к электроприводу использовать частотное U/f -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 частоты вращения СДПМ;
- определить характеристики разработанного U/f -управление 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 и полупроводниковой преобразовательной техники, 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 компьютерной модели, обеспечивающая требуемые показатели поддержания скорости и грубости к изменению параметров СДПМ.

3. Разработан алгоритм энергоэффективного управления СДПМ при работе в режиме скалярного управления, отличающийся применением принципов экстремального регулирования, обеспечивающий возможность автоматического выбора оптимального значения напряжения для различных рабочих точек.

Практическая значение 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 электропривода гидравлических систем;

- методика наладки системы электропривода на базе СДПМ и ПЧ может быть применена при разработке электроприводов промышленных механизмов, требующих бездатчиковый электропривод, и использующих общепромышленные преобразователи частоты что подтверждается актами о внедрении.

Результаты диссертационной работы нашли применение:

- и были приняты к внедрению в ОАО НПО «Электромашина» (г.Челябинск);
- в учебном процессе на кафедре электропривода ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет”;
- работа выполнялась 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.

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 Международная научная конференция «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия», Северный Чарльстон, США, 2015г.; VI Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», Иваново, 2015г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», Челябинск, 2016г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных статей, из них – 2 в периодических изданиях **рекомендованных ВАК РФ**, 2 – входящих в систему цитирования **Scopus**, 8 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 и приложения, изложенных на 150 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 2 таблицы, список используемой литературы из 156 наименования.

1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИДРОСИСТЕМЫ

1.1. Силовые агрегаты мобильной техники

Существующий уровень развития систем управления электроприводом, позволяет достаточно качественно контролировать рабочий орган и поддерживать постоянство скорости механизма независимо от моментных возмущений, что позволяет обеспечивать высокие показатели технологического процесса. Вместе с этим, при ограничении доступной входной мощности, например, в мобильных автономных установках, значительным оказывается вопрос энергоэффективности электропривода, но при сохранении технологических качеств.

Одним из классов систем, часто встречающихся на мобильных автономных установках (строительная техника, горнодобывающие машины, транспортная и дорожная техника, многоколесные автотранспортные платформы (МАП) (рис. 1.1)) являются гидросистемы. Гидравлические системы находят достаточно широкое применение в современном машиностроении благодаря ряду преимуществ, среди которых: реализация больших сил и мощностей при ограниченных размерах гидродвигателей; высокое быстродействие и качество переходных процессов; бесступенчатое регулирование скорости исполнительных механизмов; простая реализация защиты и регулирования перегрузочной способности систем; обширные возможности рекуперации и аккумулирования энергии; относительно высокий КПД. С другой стороны, такие факторы как попадание воздуха в трубопроводы гидросистемы, утечки, необходимая фильтрация, зависимость рабочей жидкости от температуры и влажности, высокая трудоемкость изготовления узлов гидропривода, требования к квалификации обслуживающего персонала вызывают трудности при реализации гидросистем. Анализируя вышеперечисленные недостатки можно сказать, что главной сложностью в эксплуатации гидросистем является транспортирование энергии от источника (гидронасоса) к потребителю (гидроцилиндру или гидромотору) [45, 79, 80 92].



Рис. 1.1. Примеры многоколесных автотранспортных платформ

Лидирующие позиции в эффективной передачи энергии, занимает электричество. Удобство передачи электрической энергии обуславливает наличие комбинаций и совместное проектирование электрогидравлических систем. Применение комбинированных электрогидравлических систем также открывает определенные возможности регулирования и построения алгоритмов управления. В различных отраслях промышленности в машинах и оборудовании копировальных устройств, станках и технологических машинах применяются дросселирующие распределители с электроуправлением, электрогидравлические и электростатические приводы.

На указанных выше МАП в качестве первичного источника энергии чаще всего применяются двигатели внутреннего сгорания, которые обеспечивают работу генераторов электрической энергии. Электрическая энергия используется в различных видах: мотор-колеса, системы управления, вспомогательные приводы и т.д., а также применяется для приведения в движение электродвигателей гидронасосов, обеспечивающих функционирование всей гидросистемы.

1.2. Особенности электрогидравлических систем

Гидравлическая система состоит из источника расхода жидкости (гидронасос), гидродвигателя (возвратно-поступательного или вращательного), системы управления, вспомогательных устройств и

трубопроводов. Принцип действия объемного гидропривода основан на факте практической несжимаемости жидкости и на законе Паскаля [45].

Энергию движения ведущего вала в энергию потока рабочей жидкости под давлением преобразуют объемные насосы. Преобразование происходит с помощью рабочих камер, герметично отделенных друг от друга. Основной зависимостью характеризующей объемный насос является напорная характеристика связывающая подачу (расход) и рабочее давление насоса (рис. 1.2). Современные технологии позволяют изготавливать насосы с рабочим давлением до 90 МПа и частотой вращения до 20 000 об/мин.

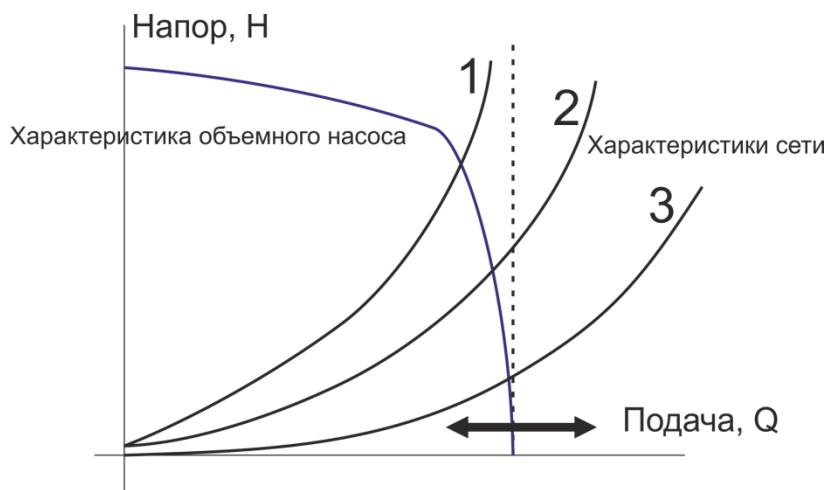


Рис. 1.2. Напорные характеристики объемного гидронасоса и сети

В объемных насосах теоретическое значение подачи не зависит от давления и определяется выражением $Q_T = V_0 n \cdot 10^{-3}$ л/мин (Q_T - теоретическая подача; V_0 - рабочий объем насоса; n - частота вращение приводного двигателя, об/мин). Однако на практике с ростом давления величина фактической подачи Q несколько убывает, что характеризуется коэффициентом подачи (объемным КПД) $\eta_o = Q / Q_T$, который увеличивается с ростом V_0 , n , и вязкости рабочей жидкости и уменьшается при возрастании давления p .

Рабочая точка гидронасоса определяется его напорной характеристикой и результирующей напорной характеристикой трубопровода и потребителей

гидросистемы. Изменяя указанные характеристики, добиваются необходимых движений исполнительных механизмов с заданными скоростями и усилиями.

Для корректирования напорной характеристики в соответствии с технологическими требованиями насосы комплектуются рядом внешних регулирующих гидравлических устройств (дроссели, клапаны, гидроаккумуляторы). Вместе с этим, возможность регулирования в гидросистеме вытекает из выражения для подачи насоса – на его расход влияет объем рабочей камеры и частота вращения приводного вала.

При проектировании гидросистемы и сочленении ее с приводным двигателем необходимо определить потребляемую мощность и усилия на валу объемного насоса.

Приводной крутящий момент в Нм определяется выражением

$$M = \frac{pV_0}{2\pi\eta_m}, \quad (1.1)$$

где p – давление в системе, МПа; V_0 – объем рабочей камеры гидронасоса, см³; η_m - механический КПД насоса.

Потребляемая насосом мощность, кВт

$$P_H = \frac{Mn}{9552,2} = P_{эл}\eta_{эл}, \quad (1.2)$$

где $P_{эл}$ и $\eta_{эл}$ – соответственно мощность, кВт, и КПД приводного электродвигателя.

Частота вращения вала n определяется исходя из требуемого расхода в гидросистеме Q . Определив значения давления и расхода рабочей точки гидросистемы по напорным характеристикам, можно рассчитать значения нагрузки и скорости, которые должен обеспечить электропривод.

В гидравлических системах приводной двигатель во многих случаях вращается с постоянной скоростью и при таком условии, как видно из выражений (1.1) и (1.2), его потребляемая мощность будет определяться давлением в системе и объемом рабочей камеры гидронасоса. Однако со

стороны электропривода, давление и объем рабочей камеры это факторы, на которые электрическая система не оказывает прямого влияния и, следовательно, процесс управления энергопотреблением системы невозможен.

При решении задач повышения эффективности использования электроэнергии можно выделить энергетическую эффективность технологического процесса, который осуществляется рабочей машиной с электроприводом и эффективность самого электропривода, обеспечивающего выполнение технологического процесса [82]. Тогда при постоянстве частоты вращения вала гидронасоса повышение энергоэффективности видится в части электропривода. Методы совершенствования электроприводов в целях максимальной эффективности энергопотребления исследуются и разрабатываются многими авторами [1, 27, 37, 47, 66, 105] хотя и наблюдается некоторое «приближение» к пределу энергоэффективности электроприводов [58]. С другой стороны, анализ гидравлических устройств [53, 56, 64, 79, 80, 92, 101], указывает на неиспользованные возможности повышения энергоэффективности электрогидравлических систем во взаимодействии электрической и гидравлической частей. Учитывая вышесказанное, видится наиболее рациональным исследовать возможность повышения энергоэффективности электрогидравлической системы не только в электроприводе, но и путем регулирования скорости приводного вала гидронасоса.

Перед исследованием методов регулирования гидравлической системы путем изменения скорости приводного двигателя необходимо упомянуть о наиболее распространенных на текущий момент способах регулирования технологических параметров гидравлики.

Специальные гидравлические аппараты позволяют изменять напорные характеристики. Клапаны давления поддерживают, ограничивают или регулируют давление в гидросистеме. Существуют напорные (переливные и предохранительные), редукционные и другие клапаны, которые позволяют

пропускать рабочую жидкость из напорной линии в сливную при определенных значениях давления. Дроссели позволяют изменять расход рабочей жидкости в гидролинии и, по сути, являются гидравлическими сопротивлениями, ограничивающими поток жидкости при определенном перепаде давлений. Для аккумулирования энергии рабочей жидкости, находящейся под давлением применяются гидроаккумуляторы, которые позволяют кратковременно получать большие потоки гидророджидкости под давлением, могут поддерживать давление при выключенном насосе или применяться для уменьшения пульсаций давления или исключения пиков в переходных режимах [79, 92]. Также для управления потоками жидкости в гидросистемах применяются различного рода распределители и делители.

Процессы регулирования в гидросистемах с помощью вышеперечисленных устройств сопровождаются значительными потерями мощности и как следствие разогревом рабочей жидкости. Кроме этого, с ростом числа регулирующих устройств повышается объемы разного рода утечек, переливов, упругостей, люфтов и зон нечувствительности, что не лучшим образом оказывается на эксплуатационных характеристиках системы.

Регулирование также может осуществляться за счет изменения рабочего объема в гидронасосе и изменения объема подачи жидкости в единицу времени. При таком регулировании изменение расхода обеспечивается специальной конструкцией объемного насоса (например, аксиально-поршневой насос с наклонным диском), а воздействия на рабочую камеру осуществляются через кинематическую связь [87]. Регулируемые гидронасосы позволяют достигать достаточно высоких показателей быстродействия и управляемости, вместе с этим, у них увеличиваются стоимость и габариты, к тому же статистика эксплуатации указывает на то, что интенсивность отказов регулируемых насосов практически в два раза выше, чем нерегулируемых [92].

В современных высококачественных гидравлических системах воздействие на регулирующие органы часто оказывают специальные электромеханические преобразователи (соленоиды, катушки), которые позволяют управлять положением гидравлических аппаратов (например, золотника в распределителе) пропорционально току управления. В таких электрогидравлических системах значительно снижается мощность управляющих сигналов, появляются дополнительные возможности управления: введение корректирующих связей по скорости или ускорению. Возникают возможности резкого повышения статических и динамических характеристик, синтеза интеллектуальных систем и систем самодиагностики.

Методы анализа и проектирования электрогидравлических систем, их динамические характеристики и качественные параметры довольно полно изложены как в литературе советского периода [45, 53, 55], так и в современной литературе [79, 92], однако анализу, проектированию, методикам наладки электрогидравлических систем, в которых объемное регулирование осуществляется с помощью электропривода (изменением частоты вращения вала гидронасоса) уделяется недостаточно внимания, а также невелико количество работ и исследований раскрывающих особенности функционирования такого рода электро-гидросистем.

1.3.Электропривод гидросистем

Электропривод гидравлических систем и насосных установок применяется во многих отраслях и технологических процессах (нефтедобывающая и нефтетранспортная отрасли, пищевая промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство, машиностроение и металлургия). Вопросы эффективного управления за счет регулирования скорости приводного двигателя достаточно широко освещены в научной и инженерной литературе [66, 102, 107], но в основном в области электропривода динамических насосов.

Идея реализации энергосбережения в гидравлических системах с помощью управляемого электропривода заключается в изменении режима работы источника гидравлической энергии – насоса – в соответствии с режимом работы потребителей. Режим работы гидравлической системы характеризуется напором и расходом, которые постоянно меняются в зависимости от количества потребителей, уровня их потребления, характеристик трубопроводов и т.д. Изменяя частоту вращения вала электродвигателя можно влиять на напорную характеристику насоса, корректировка которой в соответствие с определенными законами [66, 88, 102, 108, 109] позволяет добиться высокой энергоэффективности системы.

Указанная идея реализуется главным образом в электроприводах динамических гидронасосов – высокомощных насосных станций транспортных магистралей, нефтедобывающих станций, систем водоснабжения, что обусловлено долей электроэнергии, приходящейся на такие установки.

В гидросистемах автомобилей, грузового транспорта, сельскохозяйственной и строительной техники, авиации и станках применяется иной тип гидронасосов – объемный. В таких системах устанавливается нерегулируемый электродвигатель, либо двигатель внутреннего сгорания, а вопросы регулирования решаются с помощью гидравлических аппаратов. Возможности повышения энергоэффективности гидравлических систем за счет применения регулируемого электропривода оказываются недоиспользованными, в то время как качественные характеристики электродвигателей с течением времени значительно выросли, а также появились новые возможности в их управлении.

Требования к электроприводу, предъявляемые со стороны гидравлической системы, на текущий момент не самые жесткие. Основное требование – это соответствие мощности электропривода во всех технологических режимах. Часто в установках с гидравлическими системами рабочие механизмы функционируют с максимальной мощностью

непродолжительное время (иногда до 10% от времени технологического цикла), однако с точки зрения работоспособности всей установки электропривод должен обеспечивать такие периоды. В результате при проектировании электротехнической части приходится завышать установленную мощность оборудования, которая является избыточной для больших интервалов рабочего времени.

Требования по регулированию электропривода либо вообще не предъявляются – необходима работа с постоянной частотой вращения вала – либо предъявляются довольно грубые: часть времени технологического цикла электропривод работает, а часть находится в остановленном состоянии или требуется фиксированное количество скоростей (две - три) [110]. Регулирование технологических параметров гидросистемы осуществляется за счет гидравлической регулирующей аппаратуры, но сопровождается значительным количеством потерь мощности, кроме того частые пуски и остановки электродвигателя приводят к повышенному износу большого числа элементов как электрической, так и гидравлической частей.

Еще один класс требований относится по большей части к системе управления и представляет собой всевозможные защиты, блокировки и элементы автоматизации и не вызывает особых трудностей.

Работы по оптимизации электрогидравлических систем встречаются как в зарубежной, так и в отечественной литературе. Например, в работе [17] исследуется работа синхронного двигателя с постоянными магнитами в качестве приводного двигателя гидронасоса рулевого управления автомобиля. В работе упоминается, что электропривод рулевого усилителя не всегда соответствует габаритам и может негативно сказываться на ощущениях управления от вибраций, вызванных пульсациями момента. Лучшие эксплуатационные свойства (относительно низкие массогабаритные показатели) можно достичь, применяя электрогидравлическую систему, однако требуется решение задач оптимизации режимов работы электродвигателя.

В другой работе [156] рассматривается электропривод компрессора холодильных установок, в которых в качестве приводного двигателя применяется однофазный асинхронный двигатель (ОАД). В статье упоминается, что регулирование системы включением и выключением ОАД приводит к повышенному износу компрессора, вызываемому ухудшениями условий смазки при пуске, вызывает повышенный нагрев обмоток двигателя и колебания температуры холодильной установки. Также упоминается, о неполном использовании электродвигателя, рассчитанного на самые тяжелые условия эксплуатации. Показано, что применение регулируемого электродвигателя вместо ОАД позволяет изменять производительность компрессора и повысить эффективность холодильной установки.

В исследовании, посвященному электроприводу компрессора системы кондиционирования воздуха [111], упоминается, что введение регулируемого электропривода обеспечивает повышение эффективности приводной системы. Система кондиционирования воздуха является одной из наиболее энергоемких систем и вместе с этим мощность, отбираемая силовой установкой современных самолетов гражданской авиации на обеспечение функционирования, заметно превышает необходимую мощность для работы. Использование регулируемого электродвигателя для привода компрессора позволяет приводить в соответствие мощность электропривода мощности необходимой для корректной работы системы кондиционирования, и позволяет снизить потери мощности до 30%, сократить массу трубопроводной системы и агрегатов на 20-30%, а также сократить расходы топлива.

В рассмотренных работах показаны результаты и возможности применения регулируемого электропривода в объемных гидросистемах, однако при разработке и исследованиях новых методов регулирования требуется использование соответствующих математических моделей. Существующие модели достаточно широко описывают гидравлическую часть, но часть электропривода не рассматривается и заменяется источником

постоянной скорости. Для исследования режимов работы электрогидравлической системы при регулировании скорости приводного двигателя требуется разработка комплексной модели, описывающей совместную работу гидравлики и системы электропривода.

1.4.Объект исследования

В рамках настоящего диссертационного исследования рассматривается электропривод гидравлической системы многоколесной автотранспортной платформы. Гидравлическая часть системы обеспечивает усиление рулевого управления, а также работу подвески платформы. Электрогидравлическая система состоит из исполнительных органов, трубопровода, гидравлических аппаратов регулирования, гидронасоса, электродвигателя, электрического силового преобразователя и системы управления.

Электродвигатель управляет электрическим преобразователем и приводит в движение объемный насос. В качестве объемного насоса используется аксиально-поршневой гидронасос (таблица 1), который сообщает энергию рабочей жидкости, обеспечивая необходимое давление и расход. Гидравлические аппараты – гидроаккумулятор, переливные клапаны, предохранительные клапаны, распределители и т.д. – формируют необходимые значения расхода и давления, а также реализуют управление исполнительными органами. В качестве исполнительных органов применяются гидроцилиндры. При изменении положения распределителя (например, поворотного распределителя рулевого управления), изменяется структура трубопровода, а рабочая жидкость подается под давлением в рабочую полость гидроцилиндра, вызывая при этом его перемещение. Сигналы задания электрического преобразователя формируются на основе требуемого технологического процесса, а также с учетом сигналов обратной связи о гидросистеме (датчики, токов, напряжений, скорости, температуры, давления, уровня жидкости и т.д.).

Таблица 1.1. Рабочие характеристики насоса 313.2.28.390.5

V_0 , см ³	n, об/мин	$p_{\text{ном}}$, МПа	$P_{\text{ном}}$, кВт	$Q_{\text{ном}}$, л/мин	КПД подачи	КПД полный
28	1920	20	18,5	51	0,95	0,90

В исследуемой системе частота вращения электродвигателя определяется из выражения

$$Q = \frac{V_0 \cdot n \cdot \eta_o}{1000}, \quad (1.3)$$

где V_0 – объем рабочей камеры гидронасоса, см³; n – частота вращения вала, об/мин; Q – фактическая подача, л/мин; η_o - объемный КПД насоса.

За требуемое значение подачи при расчете необходимой скорости электродвигателя по выражению (1.3) принимается максимальное значение расхода в исполнительных механизмах, однако, как было сказано ранее, в режиме максимального потребления мощности гидравлическая система работает лишь часть технологического цикла.

Основываясь на статистических данных и экспертных знаниях специалистов, эксплуатирующих рассматриваемую гидросистему, можно построить временную диаграмму типового технологического процесса (маршрута), на котором можно определить основные качественные и количественные соотношения при работе в системе.

На временной диаграмме (рис. 1.3) представлены графики основных технологических переменных в электрогидравлической системе: перемещение исполнительного органа u (шток гидроцилиндра); подача насоса, полезный расход исполнительных органов гидросистемы и расход через переливной клапан Q_h , Q_p , $Q_{\text{Пер}}$, соответственно; давление гидронасоса p , МПа; мощность, отбираемая исполнительными органами гидросистемы и мощность гидронасоса $P_{\text{ИО}}$ и P_h , кВт. Момент на валу электродвигателя и угловая скорость вращения ротора M , Нм и n , об/мин соответственно,

определяются давлением и подачей гидронасоса. Мощность гидронасоса пропорциональна мощности электродвигателя с учетом КПД насоса.

Кривые технологических переменных на временных диаграммах приближенно определяются следующими ниже соотношениями.

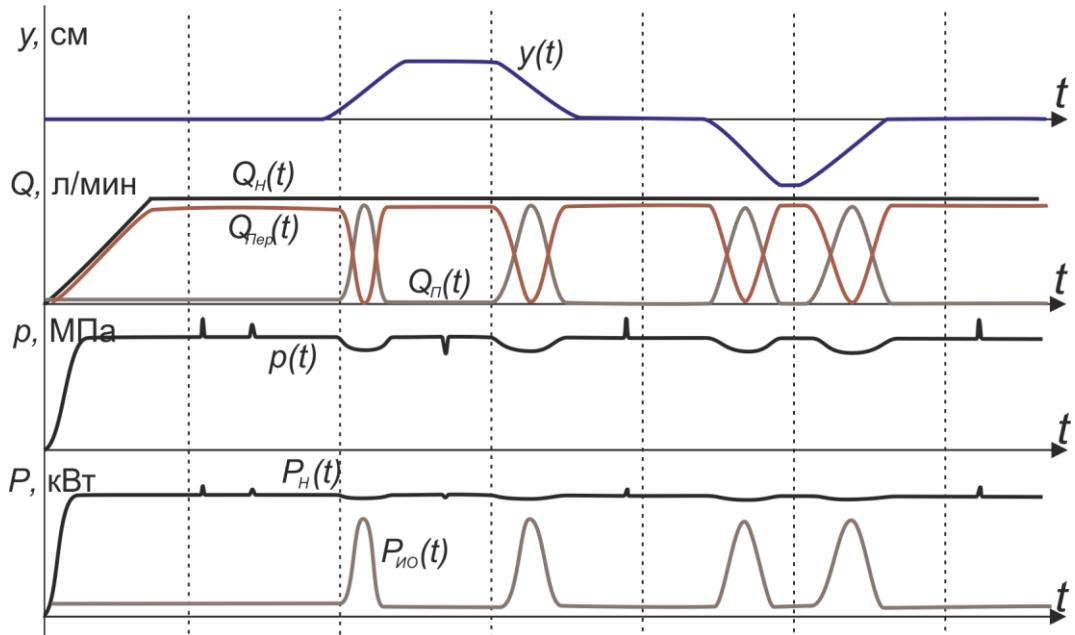


Рис. 1.3. Диаграммы работы гидравлической системы

Давление в системе

$$p = p_0(Q) - k_p Q + p_\delta, \quad (1.4)$$

где $p_0(Q)$ - давление в системе при заданном значении подачи, которое определяется конфигурацией гидросистемы и регулируется гидравлическими аппаратами; k_p - коэффициент определяемый структурой трубопровода; p_δ - внешние возмущения в системе вызванные неровностями поверхности земли, электромагнитными возмущениями, действующими на электрогидравлические узлы (электромагнитные клапаны) и т.п.

Расход исполнительного органа можно определить производной от перемещения штока с учетом геометрических параметров гидроцилиндра

$$Q = k_q \left| \frac{dy}{dt} \right|, \quad (1.5)$$

где k_q – коэффициент, определяемый геометрическими размерами гидроцилиндра и поршня. Также стоит отметить, что относительно насоса расход гидроцилиндра увеличивается при перемещении штока не зависимо от направления, поэтому производная берется по модулю.

Момент на валу электродвигателя определяется в соответствии с выражением (1.1), а скорость двигателя – из выражения (1.3).

Мощность на валу электродвигателя определяется выражением (1.2), а мощность, отбираемую исполнительными органами, используя значения, рассчитанные по (1.4) и (1.5), можно определить по формуле

$$P_{\text{ИО}} = \frac{p \cdot Q \cdot k_{\Pi}}{60}, \quad (1.6)$$

где k_{Π} – коэффициент меньше единицы, характеризующий падение давления по длине трубопровода и в направляющих узлах гидролинии.

Анализ диаграммы технологического цикла показывает, что при отсутствии перемещений исполнительного органа расход системы минимален и равен величине утечек в гидролинии ($q_{\text{ут}}$), а давление в системе равно заданному значению. В таком режиме мощность, отбираемая исполнительными органами, тоже минимальна, так как работа не совершается, однако мощность на валу электродвигателя, которая равна потребляемой мощности гидроусилителя, близка к номинальному значению, так как частота вращения вала электродвигателя равна номинальной (определяется требуемой подачей). Момент на валу тоже близок к номинальному значению, что определяется необходимостью поддержания в системе заданного давления. Излишки рабочей жидкости, которые выдает объемный насос, переливаются в сливную линию через специальный клапан. В результате излишки мощности тратятся на непроизводительную перекачку жидкости через переливной канал.

В момент времени, когда исполнительный орган начинает движение, расход в системе резко увеличивается. Вместе с увеличением расхода происходит некоторая просадка давления, объясняемая «мягкостью»

напорной характеристики гидросистемы. В режиме движения исполнительного механизма отбираемая мощность увеличивается до максимальных значений, а мощность на валу электродвигателя практически не изменяется. Рабочая жидкость при этом протекает по основному напорному каналу гидросистемы, через направляющие распределители и гидроцилиндры.

Различного рода возмущающие усилия, вызванные как внешними факторами относительно исполнительного органа, так и внутренними, вызывают определенные колебания давления (шум), которые вызывают кратковременные ударные нагрузки на валу электродвигателя.

Со стороны технологического процесса для качественной работы исполнительного органа от электрогидравлической системы требуется как можно более точное поддержание давления, энергоэффективность, надежность и минимальные габариты. Однако в рассматриваемом объекте можно найти ряд неиспользованных возможностей, относительно указанных критериев. Из диаграммы видно, что наибольшая эффективность системы достигается при перемещении исполнительного органа, во время которого повышается полезная мощность, отбираемая рабочим механизмом, а мощность на валу электродвигателя значительно не меняется. Однако длительность таких режимов, на основании имеющихся статистических данных, составляет не более 30% от длительности технологического цикла (движения по маршруту). Для повышения точности поддержания давления существует много способов [45, 87], но дополнительные регулирующие гидравлические аппараты увеличивают габариты и вес всей системы и снижают надежность.

Обеспечить изменение мощности на валу объемного насоса и привести ее в соответствие с отбираемой мощностью возможно за счет регулирования частоты вращения вала электродвигателя. Применение регулируемого электропривода должно повысить энергоэффективность всей электрогидравлической системы, снизить массогабаритные показатели,

повысить надежность и гибкость системы управления гидравлическими параметрами путем сокращения элементов гидравлической части.

1.5.Электропривод насосной станции объекта

В рассматриваемой системе в качестве электропривода объемного насоса применяется синхронный двигатель с постоянными магнитами в исполнении бесколлекторного двигателя постоянного тока. Бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ) или вентильные двигатели с постоянными магнитами (в английской литературе *Brushless DC-motor*) представляют собой синхронную машину переменного тока с распределенной или сосредоточенной трехфазной обмоткой на статоре и с постоянными магнитами на роторе. Статор БДПТ подключен к трехфазному инвертору напряжения. В первый момент времени полупроводниковые ключи в преобразователе открыты таким образом, что потокосцепление в статоре занимает определенную пространственную ориентацию по поперечному сечению машины. Взаимодействие потокосцепления статора с потокосцеплением постоянных магнитов ротора создает электромагнитный момент, под действием которого ротор начинает вращаться. Непрерывное вращение ротора обеспечивается системой управления инвертором напряжения. Неотъемлемой частью БДПТ является датчик положения ротора, сигналы с которого поступают в инвертор и однозначно определяют состояние полупроводниковых ключей. При вращении ротора изменяется сигнал с датчика положения и ключи коммутируются таким образом, чтобы вектор потокосцепления статора всегда опережал на определенный угол вектор потокосцепления ротора. Скорость электродвигателя определяется значением напряжения на звене постоянного тока перед инвертором.

Со стороны гидравлической системы к электроприводу предъявляется только требование стабильного поддержания скорости вращения вала объемного насоса, необходимой для технологического процесса.

Несмотря на то, что применяемое решение электропривода с БДПТ реализует поставленные задачи, существует ряд принципиальных проблем, которые возникли в процессе эксплуатации системы (Рис. 1.4.). Во-первых, это конструктивно-экономические факторы. Для реализации режима вентильного привода требуется специальный тип электрического преобразователя (коммутатора), который не производится серийно, а изготавливается малыми партиями, откуда вытекает относительно завышенная стоимость и нестабильность качества изготовления. Другим фактором, связанным со стоимостью и надежностью системы является датчик положения ротора и соответствующие соединительные кабели, при неисправности которых электропривод оказывается неработоспособным.

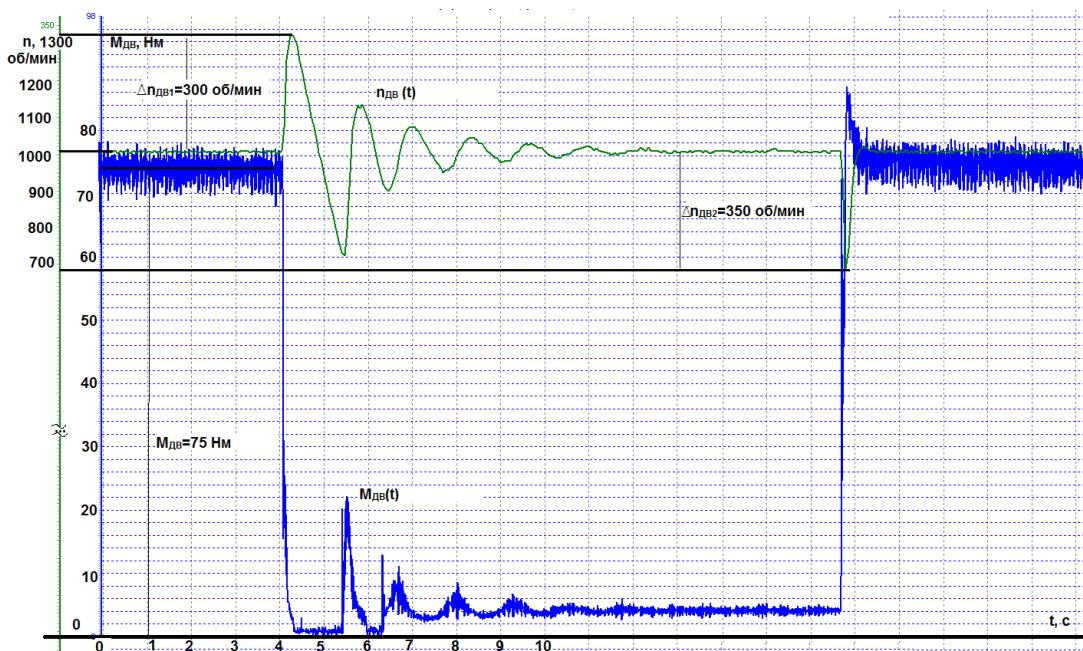


Рис. 1.4. График наброса нагрузки электропривода на базе БДПТ

Этот же фактор влияет на скорость ремонта, так как настройка датчика положения в рабочих условиях является трудоемкой. Во-вторых, БДПТ имеет значительную динамическую ошибку по скорости при ударном набросе нагрузочного момента (рис. 1.4.). Режим БДПТ позволяет довольно просто реализовывать систему подчиненного регулирования и

соответствующие принципы управления, которые предназначены для двигателей постоянного тока, однако при таком способе управления теряется одно из самых значительных преимуществ синхронного двигателя – абсолютно жесткая механическая характеристика. Для исключения статической ошибки по скорости требуются контуры регулирования тока и скорости, которые усложняют процесс проектирования и наладки системы. Некорректная настройка регуляторов системы управления приводит к тому, что изменения задания по скорости или возмущающие воздействия вызывают неэффективный режим электропривода, а иногда колебательность скорости, что негативно сказывается на технологическом процессе. При сбросе нагрузки из-за появления динамического момента и мягкости естественной механической характеристики электропривода скорость увеличивается, выход регулятора скорости изменяет задание практически до нуля с запаздыванием, регулятор скорости не формирует отрицательного значения и торможение происходит за счет оставшегося момента сопротивления. При снижении скорости до определенного значения ниже установленного возникает резкое задание на регулятор тока, что вызывает резкое возрастание скорости выше установленного и процесс повторяется. Колебательные процессы снижаются при наиболее оптимальной настройке регуляторов, но на объекте процесс наладки является одним из самых проблемных. Настройка электропривода производится в лаборатории на идеализированные средние параметры объекта. Но при интеграции с реальными установками проявляются расхождения в параметрах объекта управления, гидравлических аппаратов и т.д., а корректировка настроек регуляторов невозможна в виду их аппаратной реализации. В итоге при эксплуатации объекта могут возникать нежелательные процессы с колебаниями технологических параметров (рис. 1.5).

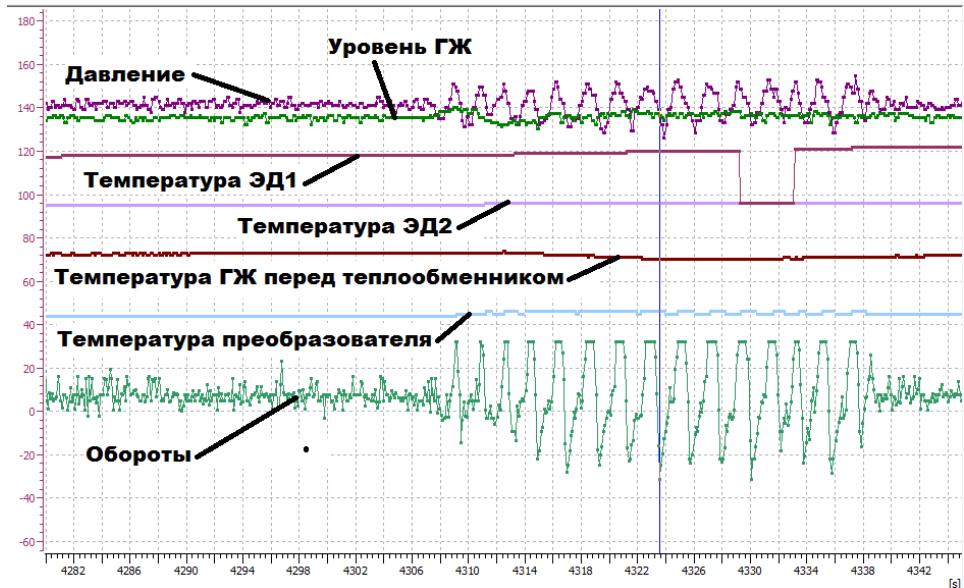


Рис. 1.5. Временные диаграммы работы насосной станции

В-третьих, для обеспечения наилучшей энергоэффективности, датчик положения ротора настраивается на работу в оптимальной точке, т.е. выставляется необходимый угол коммутации. При изменении скорости вращения ротора изменяется значение оптимального угла коммутации и энергоэффективность значительно сокращается и выходит за допустимые пределы.

Сформулированные проблемы и анализ объекта исследования указывают на необходимость разработки, с одной стороны, системы электропривода, которая, исключая недостатки существующей системы, обеспечивала бы реализацию технологических процессов и конструктивных требований, с другой стороны, модели электрогидравлической системы, позволяющую рассматривать электропривод и параметры гидравлики в едином комплексе.

1.6. Требования к системе электропривода гидравлической системы

Реализация электрогидравлической системы, в которой решаются выявленные проблемы, сопровождается рядом технических требований.

В первую очередь необходимо выделить требования по габаритам установки. Ввиду конструктивных особенностей конечного объекта, электродвигатель должен обеспечивать электромагнитный момент 95 Н/м,

при этом вписываться в установленные габариты, соответственно необходимо определить возможный тип электродвигателя.

Среди типов электродвигателей, которые в настоящее время получают широкое распространение в промышленности и в машиностроении, можно отметить асинхронные двигатели (*Induction Motors*), двигатели с постоянными магнитами (*Permanent Magnet Motors*), вентильно-индукторные двигатели (*Switched Reluctance Motors*), синхронные реактивные машины (*Reluctance synchronous motor*). Двигатели постоянного тока все реже применяются во вновь проектируемых регулируемых электроприводах, из-за их низкой надежности и невысоких показателей КПД.

Асинхронные электродвигатели являются наиболее распространенным типом двигателей в промышленности, доля их количества среди всех электродвигателей, по некоторым оценкам, составляет не менее 80%. Среди преимуществ асинхронных двигателей высокая надежность, экономичность, прочность, возможность достижения высоких качественных показателей за счет совершенствования систем управления, относительно высокое значение КПД, который в современных сериях асинхронных двигателях по стандартам NEMA (*National Electrical Manufacturers Associations*) в некоторых исполнениях превышает 90% [4, 24, 40, 43, 59, 67, 76]. Ограничивают применение асинхронных двигателей требования по частоте вращения вала двигателя, изменение критического момента при изменении скорости, инерционности и потери вызванные наличием обмотки на роторе.

Синхронные реактивные машины имеют достаточно большую историю (работы Крюйкшенка в 1871, Костко в 1923), однако до недавнего времени не получали широко распространения. Благодаря совершенствованию электрических преобразователей и технологий производства синхронные реактивные машины демонстрируют ряд преимуществ, такие как: простая и надежная конструкция ротора, достаточно высокая эффективность благодаря отсутствию обмоток в роторе, относительно низкий момент инерции ротора и широкие возможности регулирования. Вместе с этим, синхронные

реактивные машины отличаются низким коэффициентом мощности и ограничениями по скорости вращения ротора, а также необходимостью завышения мощности инвертора [8, 25, 38, 58, 99].

Также приобретает актуальность во многих промышленных отраслях Вентильно-индукторный двигатель (ВИД), который привлекает своей достаточно простой конструкцией и технологией производства, что обуславливает надежность данного типа двигателей [10, 68, 84]. Он также обладает потенциально низкой стоимостью и возможностью реализации сравнительно высоких скоростей вращения ротора, ввиду отсутствия обмоток и магнитов на роторе. Вместе с этим, для обеспечения качественного управления моментом и скоростью ВИД необходима достаточно сложная высокопроизводительная цифровая система управления, стоит отметить также значительную нелинейность характеристики момента по отношению к току статора, высокие показатели шума и пульсаций момента при работе электродвигателя.

Двигатели с постоянными магнитами широко известны как БДПТ и как синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). Несмотря на некоторые различия этих двигателей (в первом случае двигатель имеет трапециевидную форму ЭДС, а во втором – синусоидальную) их преимущества и недостатки практически одинаковы [1, 5, 7, 12, 14, 17, 21, 27, 93]. СДПМ характеризуются высокими удельными показателями крутящего момента, высокими показателями КПД и коэффициентом мощности, широкими возможностями регулирования (высокие статическая точность и динамические показатели), а также большим диапазоном скоростей. К недостаткам СДПМ относятся относительно высокая стоимость, зависимость значения потока постоянных магнитов от температуры, сложность технологии изготовления и ремонта, затруднительное регулирование магнитного потока (только для определенного типа СДПМ).

Анализ ряда работ по сравнению различных типов машин в промышленных установках или объектах, в которых требуется высокая

энергоэффективность, малые габариты и высокие динамические характеристики показывает, что на текущий момент имеют преимущество синхронные двигатели с постоянными магнитами. Так, в статье [93] упоминается о преимуществах СДПМ (в пределах 80% рабочего диапазона КПД выше, чем у асинхронного двигателя на 1-2%) и приводятся примеры его использования в железнодорожном и автомобильном транспорте. Например, СДПМ использовались на электропоезде *TGV V150* компании *Alstom*, установившего в 2007 мировой рекорд скорости колесного состава; упоминается об использовании СДПМ в двухэтажных поездах *SBB Twindexx Bombardier* (Швейцария), трамвай-поезде *SNCF Citadis Dualis Alstom* (Франция), низкопольных трамвайных вагонах типа 15T *Škoda* (Чехия), электропоездах серии 16000 *Kawasaki* метрополитена Токио (Япония) и др.

В работе [21] посвященной электроприводам в гибридном электротранспорте изучается энергопотребление при различных стандартных тестах вождения. Показано, что вентильно-индукторный электропривод обладает преимуществами на высоких скоростях, но для использования таких преимуществ, требуется редуктор с высоким передаточным числом, и предпочтение все-таки отдается СДПМ. В другой статье [40] также исследуется электропривод гибридных автомобилей и сравнивается четыре типа электродвигателей: двигатель постоянного тока, асинхронный двигатель, вентильно-индукторный двигатель и СДПМ. Приводятся примеры применения асинхронных электродвигателей производителями из США и Германии, однако японские производители используют СДПМ. В результирующем сравнении СДПМ имеет лучшие характеристики по удельным показателям и эффективности, хоть и проигрывает по технологичности и стоимости. Кроме сравнений в применениях к гибридному электротранспорту есть работы посвященные сравнению СДПМ и АД в гидравлических системах [7]. Показано, что в качестве электродвигателя погружных насосов одинакового типоразмера СДПМ имеет лучшие показатели КПД. Как в зарубежной, так и отечественной литературе

[2, 8, 15, 20, 27, 58, 61, 74] отмечаются преимущества СДПМ перед другими типами электрических машин в установках, где требуется высокая энергоэффективность и малые габариты.

Таким образом, в целях удовлетворения технических требований, в рамках работы исследуется электропривод объемного насоса гидравлической станции МАП на базе СДПМ. Более того, в существующей системе электропривода гидросистемы МАП двигатель с постоянными магнитами указанного типа уже эксплуатируются (ЭДБН25 производства НПО «Электромашина», г. Челябинск).

С учетом анализа объекта и существующего электропривода можно выделить следующие требования к системе:

- минимальные габариты электропривода и конструктивное исполнение. Данное требование сводится к применению в составе электропривода существующего электродвигателя ЭДБН25;
- исполнение электропривода без датчика скорости и положения ротора. Необходимо для повышения надежности, скорости наладки и обслуживания;
- эффективность реализации. При совершенствовании электропривода необходимо, по возможности, использовать существующие в промышленности устройства и элементную базу. То есть в первую очередь адаптировать общепромышленные преобразователи. При невозможности применения общепромышленных преобразователей, разработка специального устройства должна осуществляться при минимальных затратах временных и финансовых ресурсов;
- регулирование скорости. При использовании нерегулируемого насоса подача будет определяться частотой вращения вала электродвигателя. Изменение подачи насоса в соответствии с отбираемой мощностью может повысить энергоэффективность установки. Электропривод должен обеспечивать диапазон скорости от $0,2n_n$ до $1,2 n_n$;
- КПД электропривода в номинальной рабочей точке не ниже 90%, при регулировании скорости не ниже 85%. Для многоколесных

автотранспортных платформ вопрос экономичности и длительности цикла эксплуатации является особенно важным, поэтому необходимо добиться максимально возможной энергоэффективности во всем диапазоне регулирования скоростей;

- поддержание скорости с нулевой статической ошибкой, динамическая ошибка не более 8% в номинальной рабочей точке. Стабильность поддержания скорости вращения электродвигателя позволяет поддерживать постоянной подачу объемного насоса, но так как насос работает на систему трубопроводов и гидроцилиндров, которые обладают собственными напорными характеристиками, колебания подачи вызовут колебания давления, которые негативно сказываются как на технологическом процессе, так и на долговечности гидросистемы;

- рабочность системы по отношению к изменениям параметров, простота и скорость наладки. Наладка системы электропривода невозможно произвести на реальном объекте, поэтому целесообразно совершать ее с минимальным количеством операций. Нечувствительность к изменениям параметров объекта позволит снизить необходимую точность в настройке системы управления.

1.7.Задачи исследования

Повышение энергоэффективности, разрешение практических и технологических проблем в существующей системе предполагает два блока задач. Первый блок касается связи электромеханической и гидравлической частей в комплекс и исследование взаимовлияний в частях МАП, а второй – исследование и разработка удовлетворяющего техническим и технологическим требованиям электропривода гидросистемы. На предварительном этапе предполагается, что обеспечить требования к электроприводу можно используя частотную систему управления СДПМ.

Таким образом, требуется решение следующих задач:

- проанализировать и выбрать систему управления СДПМ, удовлетворяющую требованиям к электроприводу;
- разработать комплексную модель электропривода, объединенного с гидравлической системой;
- сформулировать методику наладки блока стабилизации частоты вращения СДПМ;
- определить условия повышения эффективности электропривода на базе СДПМ;
- разработать алгоритм поиска наиболее эффективных режимов работы электропривода;
- провести программное моделирование и экспериментальные исследования для подтверждения результатов исследования.

1.8. Выводы по первой главе

В настоящей главе можно сформулировать следующие выводы:

- установлено, что существующее описание процессов взаимодействия между электроприводом и гидравлической частью недостаточно для проектирования регулируемого электропривода объемных гидросистем;
- установлено, что существующий электропривод на базе БДПТ имеет недостатки: наличие датчика положение ротора, недопустимое снижение КПД при регулировании частоты вращения ротора, чувствительность системы управления к изменениям параметров объекта и регуляторов.
- сформулированы технические требования к электроприводу, которые обуславливают применение в составе электропривода СДПМ, а в качестве системы управления – частотный метод управления СДПМ.
- сформулированы задачи диссертационного исследования, обеспечивающие повышение эффективности работы и проектирования электропривода гидравлической системы МАП.

2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Математическая модель гидросистемы при регулировании скорости гидронасоса

Для исследования системы электропривода необходима информация об объекте управления: формируемые моменты в зависимости от скорости вращения вала рабочего органа, инерционные характеристики, требуемые скорости обеспечения технологического процесса и т.д.

Существующие модели гидравлических систем [45, 56, 79, 80, 92] разрабатываются в основном для исследования гидравлических процессов – анализа характеристик систем. Приводные двигатели (ДВС, электродвигатели) гидронасосов не включаются в математические модели, так как принимаются в качестве источников постоянной угловой скорости, не участвующих в процессах управления. Однако возможности современного электропривода позволяют реализовать дополнительный канал управления гидравлической системой, что требует расширения математического аппарата. При интеграции электропривода и гидравлики в одну электрогидравлическую систему требуются математические модели, которые позволяют проводить анализ, в том числе, и со стороны электромеханической части. Такие модели позволяют сформировать новые методики управления гидросистемами по каналу электропривода и спрогнозировать поведение гидравлической системы.

Для реализации задач объемного регулирования путем изменения скорости приводного электродвигателя гидронасоса необходима математическая модель гидросистемы обеспечивающая исследование соотношений между гидравлическими параметрами, скоростью приводного двигателя и моментом на валу гидронасоса.

Гидравлическую схему рулевого управления упрощенно можно представить в соответствие с рис. 2.1.

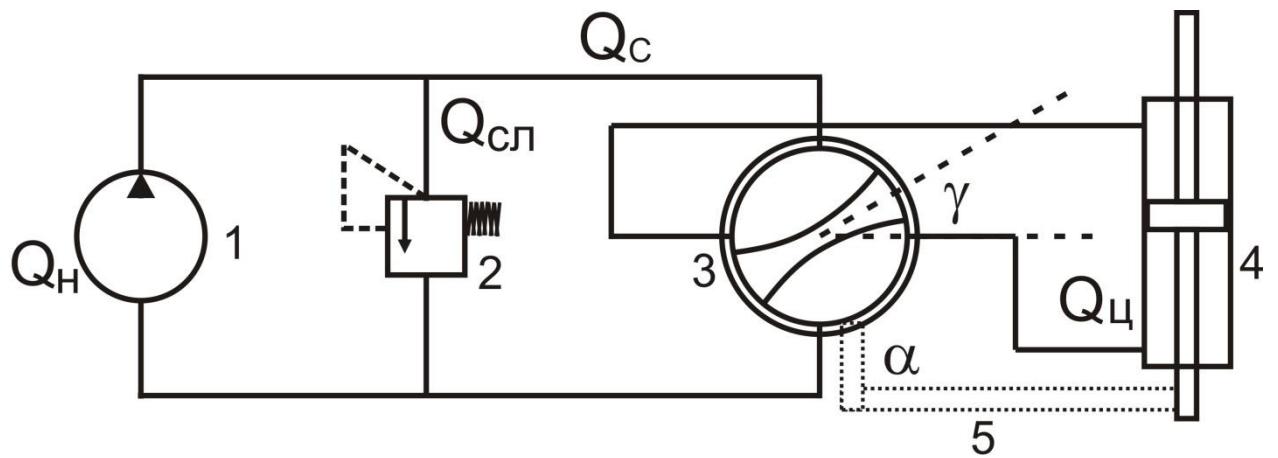


Рис. 2.1. Упрощенная гидравлическая схема рулевого управления МАП

На гидравлической схеме блок 1 – объемный гидронасос; 2 – переливной клапан; 3 – поворотный распределитель, который имеет вращающуюся втулку и золотник; 4 – гидроцилиндр; 5- механическая связь гидроцилиндра и распределителя.

Указанная система представляет собой следящую гидравлическую систему. Объемный гидронасос обеспечивает постоянную подачу рабочей жидкости в систему. Поворотный распределитель связан механически с гидроцилиндром таким образом, чтобы при определенном отклонении руля α угол поворота втулки β , определяемый смещением штока гидроцилиндра, повторял задание руля. Причем разница между отклонением руля и поворотом втулки – γ определяет скорость движения штока гидроцилиндра. Соответственно угол γ определяет сечение окна распределителя, через которое протекает рабочая жидкость и приводит в движение поршень гидроцилиндра. Переливной клапан ограничивает давление в системе. Так как в исходном состоянии угол γ ($\gamma=\alpha-\beta$) равен нулю, то и расход рабочей жидкости системы Q_C равен нулю, однако подача гидронасоса не равна нулю, что свидетельствует о невыполнении уравнения расходов и теоретически вызвало бы непрерывный рост давления в трубопроводе. На практике рост давления будет вызывать рост утечек и достижение равновесного состояния, но при значительной перегрузке трубопровода и гидронасоса. Для ограничения давления в системе применяются переливные клапаны,

открывающиеся при достижении в системе определенного значения давления и обеспечивающие дополнительный расход рабочей жидкости. Изменение угла руля α приводит к появлению рассогласования γ и открытию распределителя. Рабочая жидкость начинает протекать через трубопровод к определенной камере гидроцилиндра. Изменение положения гидроцилиндра вызывает поворот втулки распределителя до угла задания ($\alpha=\beta$). При открытии окна распределителя давление в системе снижается, и переливной клапан 2 закрывается, при этом большая часть подачи насоса идет на перемещение поршня гидроцилиндра. В установившемся режиме давление опять повышается и открывается клапан.

Процессы в системе можно представить в виде структурной схемы изображенной на рисунке 2.2.

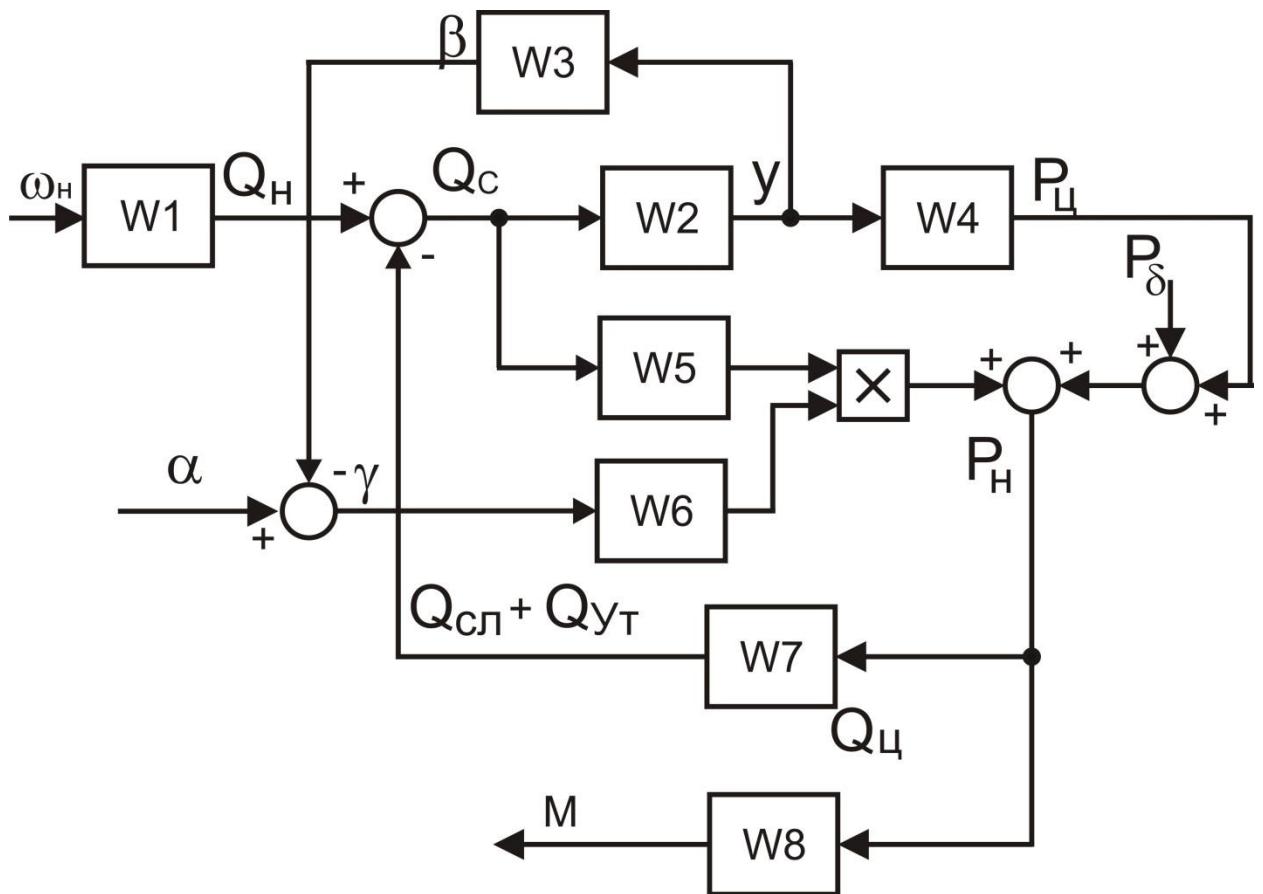


Рис. 2.2. Структурная схема гидравлической части

При составлении математической модели принималось, что жидкость является несжимаемой, стени трубопроводов абсолютно жесткие,

рассматриваются системы с короткими трубопроводами, т.е. отсутствуют потери по длине трубопровода.

Входом системы является угловая частота вращения приводного электродвигателя. Подача насоса определяется угловой частотой вращения вала и объемом рабочей камеры насоса. Поэтому передаточную функцию W_1 можно записать из выражения для подачи

$$Q_H = V_0 \eta_V n \cdot 10^{-3}, \quad W_1(p) = V \eta_V \cdot 10^{-3} = k_1, \quad (2.1)$$

где η_V – объемный КПД насоса.

Первый сумматор характеризует уравнение расходов системы. Подача насоса равна сумме расходов рабочей жидкости через гидроцилиндр, через переливной клапан и утечки в системе и определяется уравнением

$$Q_H = Q_C + Q_{CL} + Q_{yt}, \quad (2.2)$$

где Q_C – расход через систему гидроцилиндров; Q_{CL} – расход через переливной клапан; Q_{yt} – расход, определяемый утечками в системе.

Перемещение поршня гидроцилиндра определяется интегралом расхода рабочей жидкости и геометрическими параметрами гидроцилиндра, что можно определить как

$$\dot{y} = \frac{1}{A_{Ц}} Q_C, \quad y = \frac{Q_C}{A_{Ц}} \frac{1}{p}, \quad W_2(p) = \frac{1}{T_2 p}, \quad (2.3)$$

где $A_{Ц}$ – площадь поршня гидроцилиндра; T_2 – постоянная времени второго звена.

Звено W_3 определяет механическую связь между рабочим органом и поворотным распределителем, а представить его можно коэффициентом усиления, зависящим от геометрических параметров связи

$$W_3(p) = k_3. \quad (2.3)$$

Коэффициент k_3 имеет размерность m^{-1} так как связывает угловое перемещение распределителя с линейным перемещением штока.

Динамическая составляющая давления в системе определяется уравнением движения поршня гидроцилиндра и его массовыми

характеристиками, а статическая составляющая – напорной характеристикой гидросистемы и регулируется переливным клапаном. Уравнение движения поршня можно представить в виде

$$pA_{\Pi} = (m_n + m_{np})\ddot{y} + \lambda\dot{y}, \quad (2.4)$$

где λ – коэффициент вязкого трения в звене гидроцилиндра; m_n – масса подвижных частей; m_{np} – приведенная к поршню масса масла в трубопроводах, соединяющих гидропривод с цилиндром. Тогда передаточную функцию четвертого звена запишем

$$W_4(p) = k_4(1 + T_4 p)p, \quad (2.5)$$

где коэффициент усиления $k_4 = \lambda/A_{\Pi}$; постоянная времени $T_4 = (m_n + m_{np})/\lambda$.

Моделирование возмущающих скачков давления в системе, вызванных неровностями поверхности движения платформы, и неидеальной работой гидравлической системы производится с помощью параметра P_{δ} .

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. Передаточную функцию звена 5 представим в виде квадратичной зависимости так, что

$$P_5 = k_5 Q^2, \quad W_5(p) = f(Q). \quad (2.6)$$

Работу распределителя можно представить произведением выхода пятого звена на коэффициент определяемый выходом шестого звена и зависящий от рассогласования. Передаточную функцию шестого звена представим в виде коэффициента

$$W_6(p) = k_6 = \frac{1}{k_6^*}, \quad (2.7)$$

коэффициенты усиления k_5 и k_6 в выражениях (2.6), (2.7) определяются эмпирически так, чтобы при рассогласовании равному нулю падение давление в системе было максимальным, а при максимальном рассогласовании падение давления P_{π} в системе соответствовало параметрам распределителя.

Звеном семь представлена характеристика переливного клапана. Клапан работает таким образом, что не пропускает рабочую жидкость при давлении ниже, чем определенное установленное значение, а затем с ростом давления расход через клапан линейно нарастает [140]. Звеном также можно представить утечки, которые присутствуют в системе в виде линейной зависимости от величины давления. Поэтому клапан можно представить системой уравнений

$$\begin{cases} Q_{CL} + Q_{ym} = k_{7.1}P, & \text{если } P < P_3 \\ Q_{CL} + Q_{ym} = k_{7.2}P - k_{7.3}, & \text{если } P \geq P_3 \end{cases}, \quad (2.8)$$

где $k_{7.1}$ – коэффициент, определяющий утечки в системе при росте давления; $k_{7.2}$ – коэффициент, определяющий изменение подачи через клапан в зоне давлений выше заданного; $k_{7.3}$ – коэффициент определяющий точку сочленения двух прямых роста расхода.

Для получения момента на валу электродвигателя необходимо использовать значение давления и в соответствии с выражением (1.1) передаточную функцию можно будет записать как

$$W_8(p) = \frac{V_0}{2\pi\eta_M} = k_8, \quad (2.9)$$

Таким образом, структурная схема, изложенная на рисунке 2.2 и представленная уравнениями (2.1)-(2.9) позволит определить моментные нагрузки на валу электродвигателя и исследовать зависимости между

технологическими параметрами гидросистемы и параметрами электропривода.

2.2.Структурная схема и компьютерная модель электрогидравлической системы с СДПМ

Уравнения СДПМ вытекают из общеизвестных уравнений для обобщенной двухфазной машины в системе координат $d-q$.

Так как система управления на предварительном этапе принимается скалярной, изменение угла нагрузки при постоянной амплитуде напряжения статора можно учесть, записав проекции вектора напряжения через синус и косинус угла нагрузки.

Угол нагрузки определяется интегралом разности угловой скорости на валу электродвигателя и угловой частоты вращения магнитного поля статора. Используя уравнения для СДПМ в форме Коши, уравнения для задания напряжения и угла нагрузки получим систему уравнений

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_{sd}}{dt} &= -\frac{1}{L_{sd}}U_s \sin \theta - \frac{R_s}{L_{sd}}I_{sd} + \frac{1}{L_{sd}}\omega_{0\omega_l}\Psi_{sq} \\
 \frac{dI_{sq}}{dt} &= \frac{1}{L_{sq}}U_s \cos \theta - \frac{R_s}{L_{sq}}I_{sq} - \frac{1}{L_{sq}}\omega_{0\omega_l}\Psi_{sd} \\
 \Psi_{sd} &= L_{sd}I_{sd} + \Psi_{PM} \\
 \Psi_{sq} &= L_{sq}I_{sq} \\
 M_{\omega_m} &= \frac{3}{2}Z_p(\Psi_{sd}I_{sq} - \Psi_{sq}I_{sd}) \\
 J \frac{d\Omega}{dt} &= M_{\omega_m} - M_C - \beta\Omega \\
 \theta &= \int(\omega_{0\omega_l} - \Omega Z_p)dt \\
 \Omega &= \frac{\omega_{0\omega_l}}{Z_p}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

где I_{sd} , I_{sq} - проекции тока статора на оси d и q ; Ψ_{sd} , Ψ_{sq} - проекции потокосцепления статора на оси d и q ; Ψ_{PM} - потокосцепление создаваемое

постоянными магнитами; R_s - активное сопротивление обмотки статора; L_{sd} , L_{sq} - индуктивности по продольной и поперечной осям; $\omega_{0\text{эл}}$ - угловая частота переменного напряжения статора электродвигателя; Z_p - число пар полюсов; $M_{\text{эм}}$ - электромагнитный момент создаваемый электродвигателем; M_C - статический момент, создаваемый технологическим объектом; J - суммарный момент инерции; β - коэффициент характеризующий упругость электромагнитной связи статора и ротора; Ω - угловая частота вращения вала электродвигателя.

Объединяя структурные схемы гидравлической системы (рис.2.2) структурную схему электродвигателя (система уравнений 2.10) получим структурную схему электропривода гидравлической системы (рис.2.3).

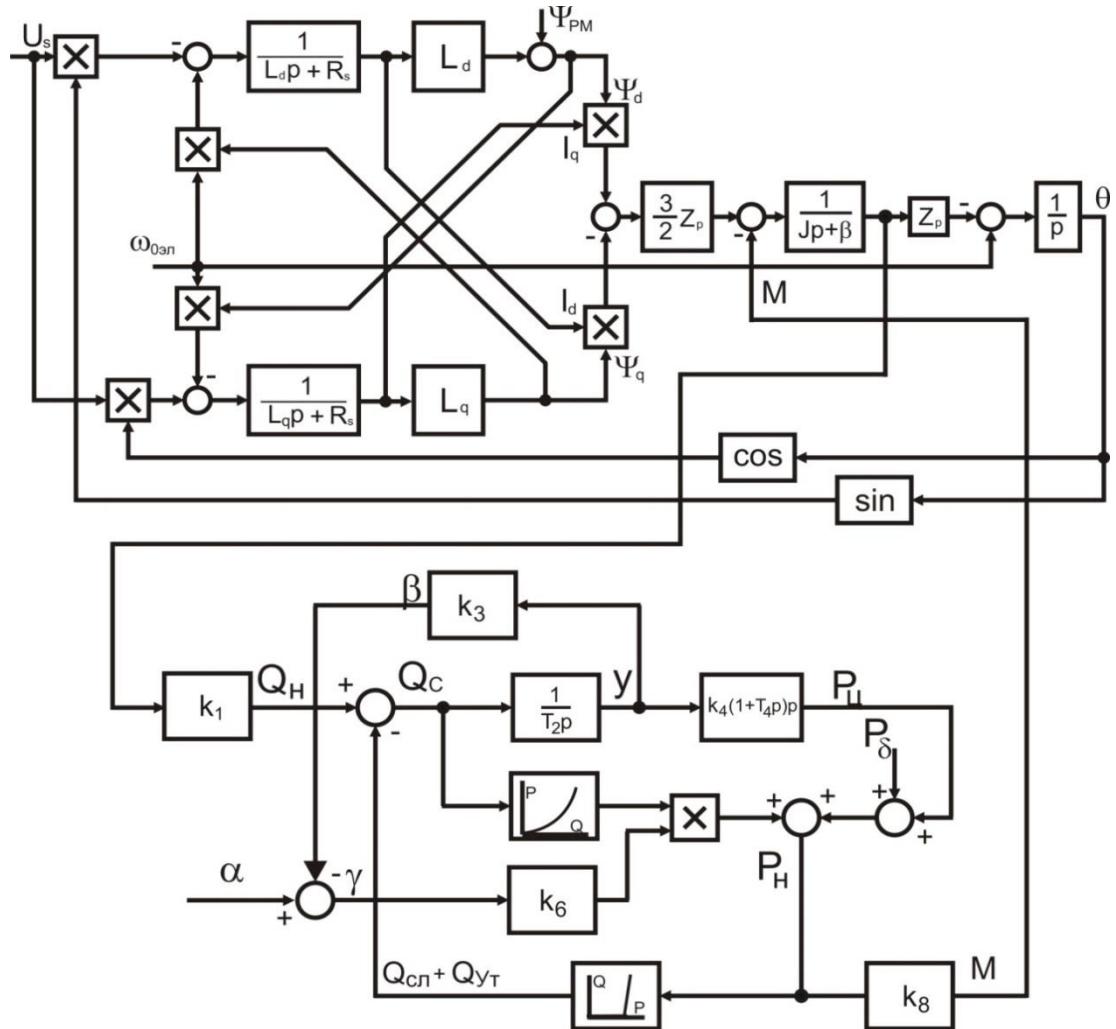


Рис. 2.3. Структурная схема комплексной модели электрогидравлической системы на базе СДПМ

Разработанная комплексная модель электрогидравлической системы позволяет на этапе проектирования исследовать связи электрической и гидравлической части и заранее определять параметры составных элементов систем для обеспечения технических и технологических требований. В отличии от существующих гидравлических моделей скорость вала гидронасоса не принимается постоянной, а зависит от частоты вращения электродвигателя. С другой стороны, для точного проектирования электропривода, модель позволяет определять нагрузки, при которых функционирует электропривод. Вновь разработанная структурная схема позволяет создать компьютерную модель и количественно оценивать технологические процессы.

На основании структурной схемы комплексной математической модели электрогидравлической системы (Рис.2.3) была разработана компьютерная модель в программном приложении *Matlab Simulink* (Рис. 2.4.).

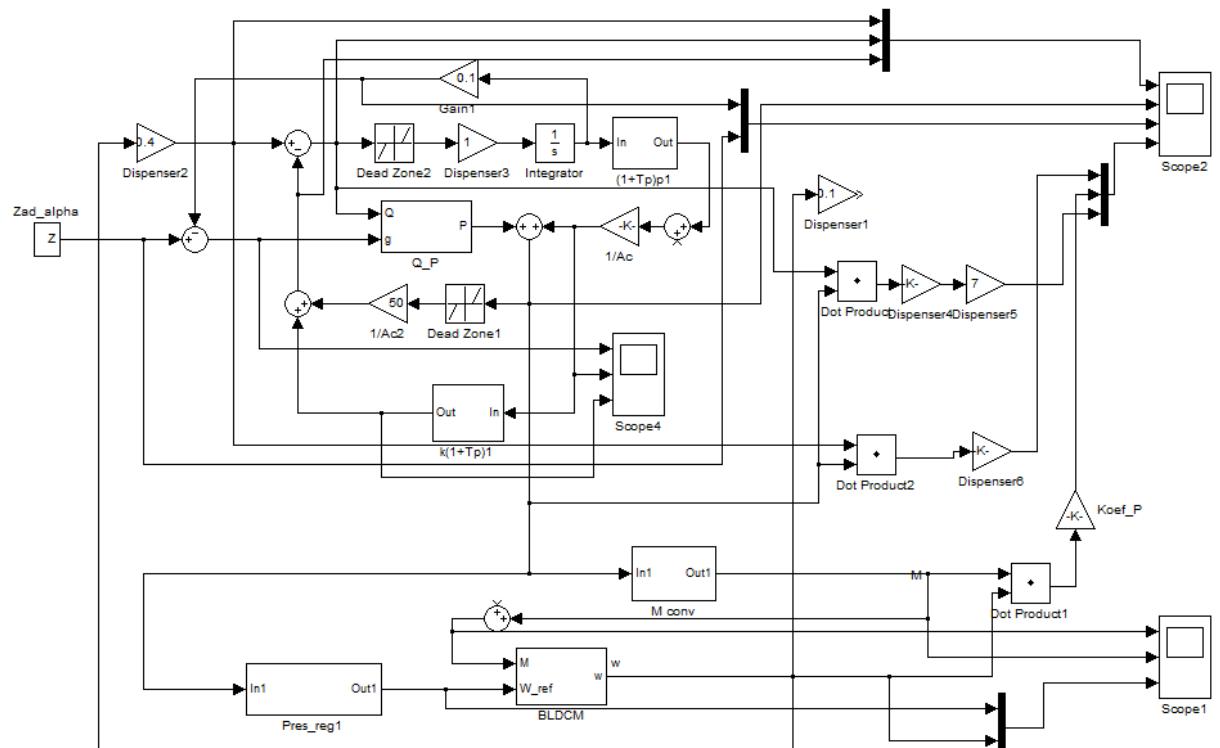


Рис. 2.4. Компьютерная модель электрогидравлической системы

Компьютерная модель позволяет формировать определенную программу движения МАП путем изменения задания угла поворотного механизма (руля), но при этом есть возможность воздействия на задание частоты вращения приводного электродвигателя. К основным выходным координатам, которые компьютерная модель позволяет фиксировать относятся: угол поворотного механизма (колес), давление и расход рабочей жидкости, момент сопротивления и угловая скорость электродвигателя. Модель позволяет регулировать коэффициенты характеризующие параметры гидроцилиндров, переливного клапана, напорной характеристики гидросистемы.

2.3. Повышение эффективности гидросистемы МАП с помощью комплексной модели электрогидравлической системы

Работа электрогидравлической системы представлена на рисунках 2.5-2.7. При номинальной частоте вращения вала электродвигателя (рис. 2.5) система работает следующим образом. В момент разгона электродвигателя происходит быстрое заполнение системы гидржидкостью, затем в момент времени 2с происходит руление: угол задания руля отклоняется до номинального значения. Открывается поворотный распределитель и рабочая жидкость начинает протекать по исполнительному органу, создавая полезное усилие. В момент времени с 2 до 2,5 с. видно, как изменяется расход через переливной клапан и через исполнительный орган. Также можно зафиксировать изменение давления в системе при движении исполнительных органов и, соответственно, изменение момента нагрузки электродвигателя. Из диаграммы мощностей видно, что большую часть работы механизма, когда не происходит руления, система практически не выдает полезной мощности, но потребляемая мощность при этом близка к номинальной.

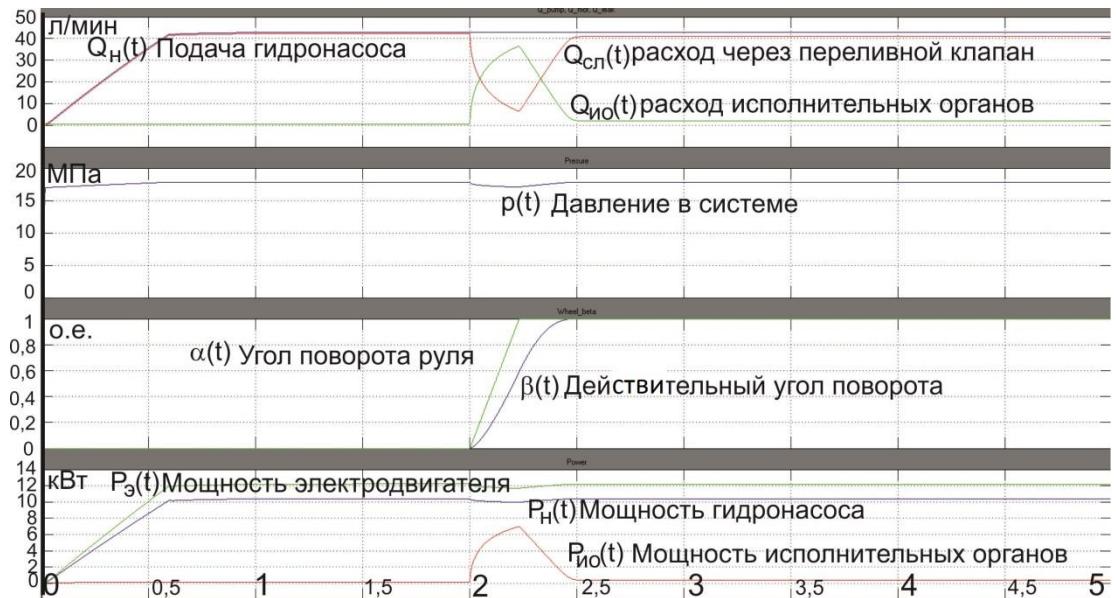


Рис. 2.5. Работа гидросистемы при номинальной скорости двигателя

При пониженной скорости электродвигателя (Рис. 2.6) система работает по схожему алгоритму, но изменяется скорость отработки задания по углу отклонения: поворотный механизм сильнее «отстает» от руля, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках. Кроме этого, в момент руления происходит провал давления в системе, что также негативно сказывается на работе МАП. Однако при пониженном задании частоты снижается мощность снимаемая с электродвигателя и соответственно интегральный КПД за рабочий цикл повышается.



Рис. 2.6. Работа гидросистемы при пониженной скорости двигателя

На основе анализа временных диаграмм работы эксплуатируемой системы и сопоставления их с приведенными результатами моделирования, можно сделать вывод о соответствии процессов моделирования процессам, проходящим в эксплуатируемой системе.

С помощью разработанной компьютерной модели можно показать, что при мягкой характеристике электродвигателя возникают скачки подачи рабочей жидкости, что может приводить к дополнительному износу гидрооборудования. Учитывая особенности работы системы при номинальной и пониженной скоростях электродвигателя, логичным оказывается переход к регулированию его частоты вращения, что обеспечит повышение энергоэффективности системы в целом. Разработанную модель можно использовать при исследовании и разработки методов регулирования частоты вращения электродвигателя в гидросистеме.

Для исследования потенциала компьютерной модели и проверки идеи повышения эффективности с помощью регулирования скорости электропривода был создан релейный регулятор давления. В регуляторе устанавливается требуемый уровень поддержания давления, два значения скорости – при давлении выше порогового значения и ниже, и два значения темпа изменения скорости – при изменении задания с пониженной скорости на повышенную и наоборот.

На рисунке 2.7 представлена работа гидросистемы при регулировании скорости. В первоначальный момент времени давление в системе быстро возрастает и двигатель переходит на пониженную скорость, но при нагрузке давление падает, и задание на электродвигатель увеличивается. Давление вновь выходит на заданный уровень. Необходимое давление поддерживается на всем интервале руления с минимальной просадкой в отличие от системы, работающей с пониженной скоростью (Рис. 2.6). КПД системы в неактивных режимах работы повышается: потребляемая мощность двигателя – 3,5 кВт в неактивном режиме против 11 кВт в системе без понижения скорости.

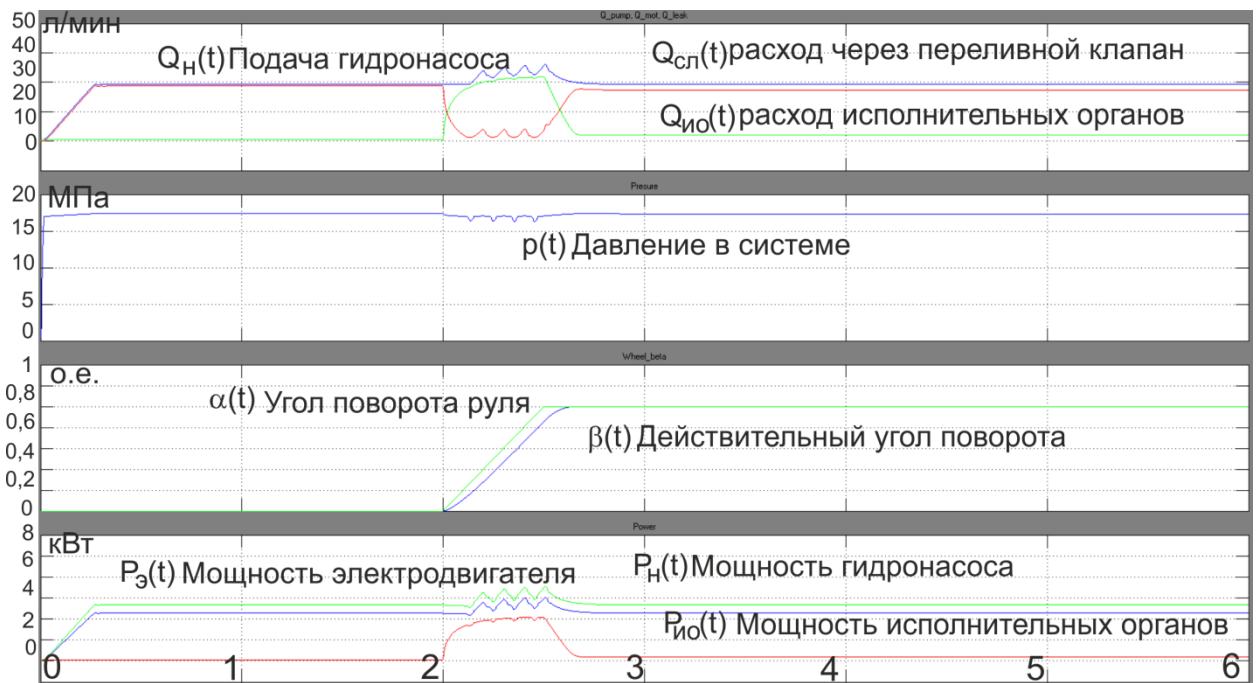


Рис. 2.7 Работа гидросистемы при регулировании частоты вращения насоса

Вариация задания скорости вращения может позволить повысить эффективность электропривода гидросистемы, но практически не изучена в существующей литературе. Отсутствуют методики, которые определяли бы правила регулирования скорости с учетом динамических моментов разгона и торможения электродвигателя. На диаграммах (Рис. 2.7) видно, как при работе гидрораспределителя возникают колебания давления и подачи в системе, что на двигателе отразится в колебаниях скорости и момента сопротивления. Представленная модель позволяет сформулировать условия и методику регулирования скорости электродвигателя в составе гидросистемы. Стоит отметить, что выявленное преимущество в регулировании скорости затрудняет применение существующего электропривода. Согласно экспериментальным исследованиям. КПД электропривода при регулировании скорости может снижаться до 60%.

Представленная модель подтверждает необходимость в регулировании скорости электропривода. Для дальнейшей реализации эффективной системы электропривода гидростанции необходимо обеспечить выполнение сформулированных в первой главе требований к электроприводу.

2.4. Особенности СДПМ и соответствующих систем управления

Несмотря на общие принципы работы СДПМ, существует несколько разновидностей таких двигателей с определенными особенностями. Отличия выражаются как в статорной части двигателей, так и в роторной. В статоре различия в основном заключаются в распределении обмотки статора, также возможны различия в исполнении сердечника статора. Те или иные конструкции статора должны соответствовать конструкции ротора и системе управления. Значительнее оказывается многообразие в роторах (рис.2.8): возможно неравенство индуктивностей по продольной и поперечной осям и различия в размещении постоянных магнитов в роторе. [85, 90]. Выделяют двигатели с поверхностно установленными постоянными магнитами (*SPMSM Surface Permanent Magnet Synchronous Motor*) и внутренними постоянными магнитами (*IPMSM Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*). Первый тип двигателей имеет меньшие пульсации и проще в изготовлении, а второй обладает лучшей энергоэффективностью и удельными показателями [17, 20]. Конструктивное исполнение ротора может значительно повлиять на форму ЭДС. Распространено синусоидальное и трапецидальное распределение ЭДС. Первое обеспечивает минимальные пульсации крутящего момента и лучшие массогабаритные показатели [2], однако производителями отмечается усложнение технологического процесса изготовления такого электродвигателя [146]. Существуют и нетиповые виды двигателей с постоянными магнитами, например, с аксиальным расположением потокосцепления или с двойным статором и др.[13, 16].

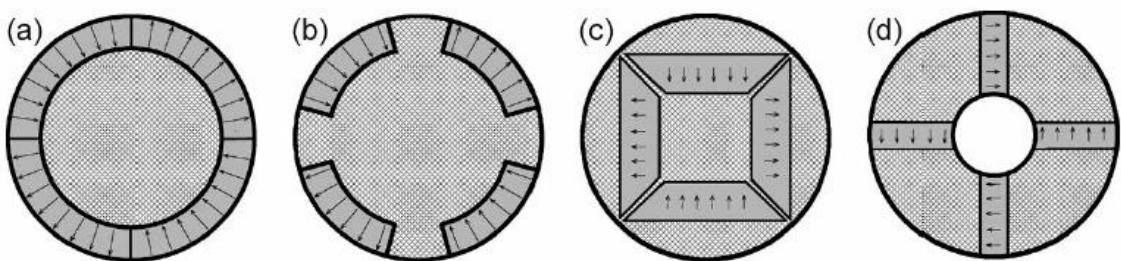


Рис. 2.8. Варианты исполнения роторов СДПМ

В настоящей работе исследуется электродвигатель с поверхностно установленными магнитами и трапецидальной ЭДС. В связи с отработанной технологией изготовления связанной с изготовлением постоянных магнитов и установкой их на роторе переход на вариант электродвигателя с синусоидальной ЭДС влечет за собой значительные временные и финансовые издержки. Поэтому одним из требований к системе управления электропривода является обеспечение работы с двигателем независимо от формы ЭДС.

Для выбора системы управления произведем анализ существующих систем. Работу СДПМ при питании от источника переменного напряжения можно реализовать одним из трех основных типов систем управления: U/f -управление (скалярное управление), векторное управление и прямое управление моментом.

В процессе U/f -управления на статор электрической машины подается переменное напряжение с определенным значением амплитуды и частоты. В трехфазной распределенной обмотке статора возникает круговое движение магнитного поля. При вращении магнитного поля вектор потокосцепления статора начинает отклоняться от вектора потокосцепления ротора, в результате чего между указанными векторами образуется так называемый угол нагрузки $\theta_{\text{ЭЛ}}$, который определяет электромагнитный момент, создаваемый в машине согласно выражению [50, 65]

$$M = \frac{mU_1E \sin \theta_{\text{ЭЛ}}}{\omega_0 x_{1d}} + \frac{mU_1^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \sin 2\theta_{\text{ЭЛ}}, \quad (2.11)$$

где m – число фаз электрической машины, U_1 – амплитуда питающего напряжения, ω – частота вращения ротора, x_{1d} , x_{1q} – индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям СДПМ. Значение ЭДС электрической машины определяется общезвестным выражением, пропорционально угловой частоте и магнитному потоку электродвигателя.

Под действием электромагнитного момента ротор двигатель начинает вращаться и разгоняется до скорости, определяемой согласно выражению для синхронной угловой скорости $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$.

Вращение будет происходить до тех пор, пока нагрузочный момент не превысит критический момент, который может развивать электрическая машина (угол нагрузки $\theta_{\text{ЭЛ}}$ становится больше 90°). Критический момент можно определить из выражения (2.11). Если пренебречь вторым слагаемым, характеризующим реактивный момент, то получим уравнение

$$M_{\text{KP}} = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{U_1 2\pi f_1 \Psi_{\text{ПМ}}}{2\pi f_1 L_d}, \quad (2.12)$$

где p – число пар полюсов электродвигателя, $\Psi_{\text{ПМ}}$ – потокосцепление постоянных магнитов, L_d – индуктивность по оси d .

Или, обозначив как $C = \frac{3p\Psi_{\text{ПМ}}}{2\pi L_d}$, запишем критический момент следующим образом

$$M_{\text{KP}} = C \frac{U_1}{f_1}. \quad (2.13)$$

Поддерживая постоянное значение $\frac{U_1}{f_1}$ можно добиться постоянства критического момента при различной частоте вращения вала электродвигателя. Однако выражение (2.13) справедливо только при относительно низком активном сопротивлении статора R_1 , что не выполняется при низких частотах вращения ротора (при частотах меньших 10 Гц снижается индуктивное сопротивление статора x_{1d}), а также для электромашин малой мощности.

Чаще всего скалярный тип управления применяется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, однако такой тип управления для СДПМ имеет определенный потенциал в качестве бездатчикового электропривода. Реализация $\frac{U_1}{f_1}$ -управления довольно проста, однако сопровождается рядом недостатков. Если посмотреть на структурную схему

синхронного электродвигателя [65], то без демпферной обмотки или дополнительных корректирующих звеньев возникает потенциальная неустойчивость из-за наличия двух интеграторов в прямом канале. Анализ литературы [32] показывает, что электропривод обладает значительной колебательностью, а также ухудшается процесс пуска при задании частоты больше 25% от номинальной.

Синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением чаще всего имеют демпферную обмотку на роторе, которая обеспечивает пусковой момент в процессе разгона и дополнительный электромагнитный момент препятствующий выходу из синхронизма при скольжении ротора. Когда синхронный двигатель выходит на синхронный режим – по демпферной обмотке прекращается протекание тока. Роторы синхронных двигателей с постоянными магнитами выполняются без демпферных обмоток, что затрудняет процессы управления двигателем без дополнительных обратных связей. Вместе с этим, в ряде работ представляются системы управления, в которых специальными корректирующими устройствами решаются проблемы устойчивости и пуска синхронных двигателей без демпферной обмотки [32, 36, 70-72].

В векторной системе управления синхронным двигателем предусматривается независимое регулирование проекций токов статора по продольной и поперечной осям. Электромагнитный момент СДПМ определяется в большей степени потокосцеплением постоянных магнитов и проекцией тока статора по поперечной оси i_q , но при явнополюсном исполнении ротора проявляется составляющая электромагнитного момента из-за разницы индуктивностей по продольной и поперечной осям (L_d, L_q).

Как в двигателе постоянного тока при векторном управлении отдельно регулируются два контура: момента, который определяется током i_q и магнитного потока, определяемого током i_d (рис. 2.9) [103, 112]. Имея сигнал

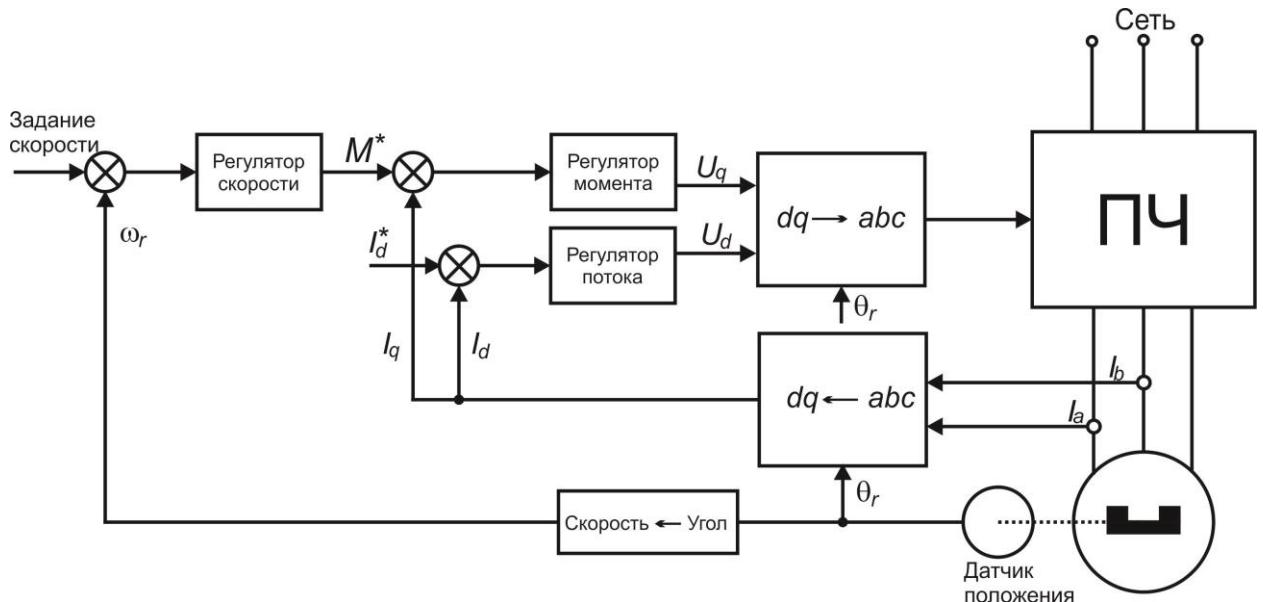


Рис. 2.9. Функциональная схема векторного управления СДПМ

с датчика тока статора и с датчика скорости ротора можно реализовать принципы подчиненного регулирования. Однако для получения проекций токов и напряжений участвующих в управлении необходимо провести координатные преобразования из стационарной системы координат $a-b-c$ во вращающуюся систему координат $d-q$, причем ось d принимается совпадающей вектором магнитного потока постоянных магнитов, установленных на роторе.

В случае использования системы координат $d-q$ проекции токов статора электрической машины являются постоянными и не зависят от частоты питающего напряжения, что значительно упрощает вычисления, но вместе с этим возникают определенные требования к преобразованиям. Выражения для координатных преобразований довольно просты, однако для вычислений координат требуется информация об угле положения ротора, для чего требуется устанавливать датчик, либо применять алгоритмы бездатчикового определения положения.

Векторное управление обеспечивает лучшие характеристики в сравнении со скалярным. В двигателе магнитный поток придерживается заданного значения на всем диапазоне регулирования, исключая режимы

недовозбуждения и перевозбуждения. Для поддержания высоких энергетических характеристик составляющая тока статора по оси d i_d приравнивается к нулю. Реализованные в векторном управлении замкнутые по току и по скорости контуры объясняют высокие динамические характеристики электропривода. Недостатками векторного управления являются неизбежные погрешности при координатных преобразованиях и применении математической модели, погрешности при изменении параметров, необходимость определения углового положения ротора двигателя, аппаратно-вычислительные затраты, возможные ограничения вызванные наличием чувствительных элементов (датчик тока, датчик скорости).

Векторное управление несет определенные сложности реализации. Во-первых, необходимость в информации о скорости и положении вращения ротора. Этот вопрос решается с помощью датчика скорости либо с помощью бездатчиковых алгоритмов. Бездатчиковые методы могут иметь неточности и ошибки [112], которые возникают из-за динамических особенностей работы ключей инвертора. Во-вторых, качество векторного управления изменяется при вариации параметров электродвигателя [17, 28]. Исправление указанных недостатков возможно с применением специальных алгоритмов адаптации и коррекции, но тогда необходимо будет решать вопросы устойчивости цифровых вычислений и запаздывания расчетов.

Прямое управление моментом (ПУМ) изначально создавалось для асинхронных двигателей для того чтобы напрямую воздействовать на электромагнитный момент и магнитный поток электрической машины, но вскоре было реализовано и на синхронном двигателе. В классическом исполнении прямого управления моментом на статор электрической машины подается вектор напряжения соответствующий определенной комбинации значений с релейных регуляторов момента и потокосцепления. Релейный регулятор потокосцепления выполняется двух-позиционным, а регулятор электромагнитного момента – трехпозиционным. Аппаратная часть прямого

управления момента реализуется с использованием стандартного инвертора с шестью полупроводниковыми ключами, так что в один момент времени к статору может быть приложен один из шести основных векторов напряжения. Две оставшиеся комбинации включения ключей инвертора из восьми возможных возникают при замыкании всех верхних или всех нижних ключей плеча инвертора и называются нулевыми векторами. Три варианта состояний релейного регулятора электромагнитного момента, два состояния регулятора магнитного потока, а также шесть возможных зон расположения вектора напряжения статора определяют, в конечном счете, таблицу подаваемых напряжений, состоящую из тридцати шести ячеек.

На вход релейного регулятора подается требуемое расчетное значение электромагнитного момента. Значение потокосцепления, которое подается на вход соответствующего регулятора, определяется выражением

$$\Psi_1 = \int_t^{t+\Delta t} (U_1 - R_1 i_1) dt, \quad (2.14)$$

Каждый из шести возможных векторов напряжений способствует увеличению или снижению магнитного потока и электромагнитного момента. Если заданное значение больше или меньше оцененного значения, то на выходе релейных элементов формируется комбинация, определяющая требуемый вектор напряжения статора.

Электропривод с прямым управлением моментом обеспечивает лучшие динамические показатели по сравнению с векторным управлением благодаря непосредственному воздействию на электромагнитный момент и потокосцепление синхронного двигателя. Кроме того электропривод обеспечивает высокое значение момента на малых скоростях. В ряде работ отмечается, что ПУМ обладает более низким количеством переключений силовых ключей и требует меньше вычислительных затрат чем векторное управление. Однако стоит отметить, что из-за приложения вектора напряжения с фиксированной амплитудой при ПУМ появляются большие

пульсации момента, которые могут ухудшать энергетические характеристики электропривода [5, 28, 31, 33, 42].

Существует вариант системы управления двигателем с постоянными магнитами при его питании источником постоянного напряжения, при этом двигатель работает как бесколлекторный двигатель постоянного тока.

Для работы в режиме БДПТ двигатели с постоянными магнитами изготавливаются с сосредоточенной обмоткой на статоре и трапецидальным полем, что обуславливает применение специального коммутатора для управления.

Физически для управления БДПТ используется такой же инвертор напряжения, как и для синхронного двигателя, однако принципиально отличается управление ключами: импульсы управления формируются непосредственно от сигналов датчика положения ротора, что позволяет реализовать принцип самосинхронизации ротора. Управление и основные соотношения в БДПТ практически соответствуют двигателю постоянного тока, только функции коллектора выполняет электронная схема или микропроцессор.

Как и в двигателе постоянного тока, скорость вращения ротора определяется напряжением на звене постоянного тока и нагрузкой на валу. Механическая характеристика БДПТ не является абсолютно жесткой как у синхронного двигателя [14].

ЭДС двигателя и электромагнитный момент как и в двигателе с постоянным током пропорциональны соответственно скорости электродвигателя с коэффициентом пропорциональности k_E и току якоря с коэффициентом k_M .

В произвольном положении ротора ось его вектора потокосцепления направлена в соответствие с расположением постоянных магнитов. Электронный коллектор (коммутатор) строится таким образом, чтобы сигнал с датчика положения ротора обеспечивал включение таких ключей силового инвертора напряжения, при работе которых вектор потокосцепления статора

будет отклонен от вектора потокосцепления ротора на определенный угол δ соответствующий, так называемому углу коммутации (электрический угол отклонения ротора от первоначального положения, при котором происходит смена состояний силовых ключей инвертора). В зависимости от требуемого направления вращения ротора одному и тому же положению ротора могут соответствовать две комбинации включения силовых ключей.

Учитывая схожесть БДПТ с двигателями постоянного тока, несложно реализовать систему управления двигателем по принципу подчиненного регулирования с замкнутым контуром по току и скорости. Также одним из преимуществ такого способа управления является относительная простота регулирования скорости двигателя, отмечается также довольно широкий диапазон регулирования скорости – максимальный момент электрическая машина может развить уже с нулевой скорости. Однако в связи со скачкообразным изменением вектора подаваемого напряжения у БДПТ наблюдаются значительные пульсации тока и, как следствие электромагнитного момента. Пульсации электромагнитного момента вызывают ухудшение энергетических показателей электропривода, а также могут вызывать вибрации и повышенный износ оборудования.

2.5. Сравнение систем управления СДПМ

Для решения задач диссертационного исследования необходимо выбрать систему управления для СДПМ, которая наилучшим образом удовлетворяет работе технологического объекта. Выбор произведем на основании следующих критериев:

- надежность;
- стоимость;
- диапазон регулирования скорости
- быстродействие;
- энергоэффективность;

- практическая реализация.

Известно, что *надежность* это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранение и транспортирования. Так как надежность является комплексным свойством, включающим безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость, для характеристики той или иной технической системы могут потребоваться разные составляющие надежности. Например, для неремонтопригодных систем основным свойством надежности становится безотказность [113].

Надежность систем является вероятностной характеристикой и поэтому изучается с помощью теории вероятностей и математической статистики. Показатели надежности определяются аналитически на основании логических формул и по результатам испытаний и наблюдений. Так как надежность необходимо оценить еще до реализации и эксплуатирования систем, оценка надежности на этапе проектирования производится на модели реальной системы. Модель системы не обязательно полностью отражает все ее свойства, но помогает с определенной точностью оценить надежность всей технической системы, используя определенные соотношения между надежностью ее элементов.

Для сравнения надежностей систем можно использовать коэффициентный метод надежности, при котором надежность элемента системы определяется выражением

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_b} \quad (2.15)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента; λ_b – интенсивность отказов базового элемента (интенсивность отказов которого достоверно известна).

При коэффициентном методе подразумевается, что все факторы, влияющие на надежность системы, действуют одинаково на все элементы, поэтому интенсивности отказов λ_i изменяются пропорционально.

Оценку надежности технического объекта можно произвести на основании выражения

$$\lambda = \lambda_0 \sum_{i=1}^m N_i k_i, \quad (2.16)$$

где m – число элементов системы, N_i – число элементов с коэффициентом надежности k_i .

Для приближенной оценки надежности системы управления электроприводом можно построить упрощенную модель, состоящую из определенного количества последовательно или параллельно включенных функциональных блоков. Функциональным блоком или элементом системы может являться как аппаратное средство, так и программное обеспечение [147, 148].

Очевидно, что если принять интенсивности отказов элементов системы управления электроприводом одинаковыми при различных исполнениях самой системы управления (например, датчик тока применяемый как при векторном управлении, так и при ПУМ), то надежность системы управления электроприводом можно будет оценить на основании количества элементов ее составляющих и отраженных в модели.

Модель надежности системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами строится на основании функциональных моделей этих же систем (рис. 2.10). Однако принципы построения моделей надежности несколько отличаются: если выход из строя элемента приводит к неработоспособности всей системы – такой элемент нужно считать соединенным последовательно. Если же выход из строя элемента не нарушает работоспособность системы – можно считать такой элемент включенным параллельно (элемент имеет резервирование). Для точного

определения надежности системы управления необходимо досконально определить все узлы и элементы, но в целях качественного сравнения в модель оценки надежности включались только основные блоки. Во всех моделях на вход подается сигнал задания частоты вращения двигателя, а последним блоком является формирователь импульсов управления силовыми полупроводниковыми ключами.

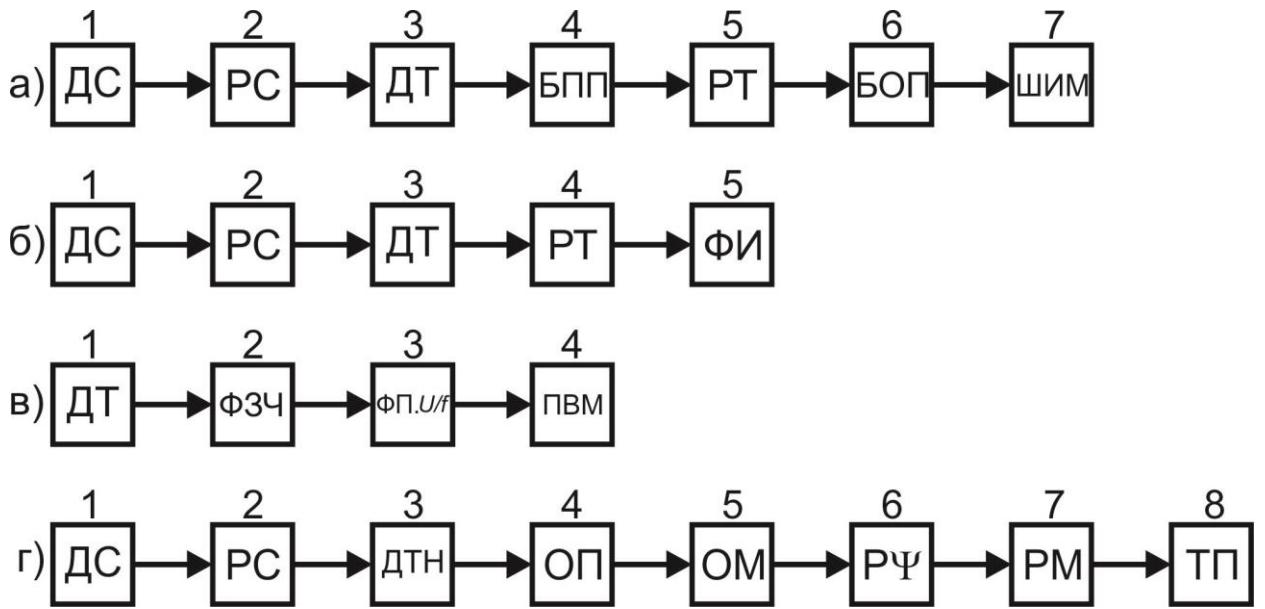


Рис. 2.10. Модель надежности различных систем управления СДПМ.
Векторное управление (а), управление по принципу БДПТ (б), скалярное управление (в), прямое управление моментом (г)

Исследования U/f -управления СДПМ без демпферной обмотки [32] показывают, что при превышении частоты задания более 15-20% от номинальной наступает неустойчивый режим работы и двигатель выходит из синхронизма. Для коррекции неустойчивых режимов и обеспечения условий синхронизации применяются специальные блоки компенсации задания частоты, которые обеспечивают стабильную работу СДПМ при U/f -управлении, однако несколько усложняют систему управления. Для более адекватной оценки надежности в сравнении с другими СУ решено использовать именно скорректированную систему управления, подробнее о которой будет сказано ниже.

В модели в отличие от классического скалярного управления, которое чаще всего состоит только из задания частоты и функционального преобразователя $f-U$, присутствуют блоки датчика тока (ДТ) и формирователя сигнала задания по частоте (ФЗЧ - блок коррекции сигнала задания). Формирователь напряжения (ФП.У/ф) определяет связь между сигналом задания частоты и сигналом задания амплитуды питающего напряжения. Блок пространственно-векторного модулятора (ПВМ) формирует импульсы управления ПЧ.

Векторное управление также представлено набором последовательно соединенных элементов, составляющих систему управления. Датчик скорости (ДС) необходим не только для обеспечения контура регулирования, но и для реализации координатных преобразований. Регулятор скорости (РС), датчик тока (ДТ), регулятор тока (РТ) – являются стандартным набором функциональных блоков векторного управления. Также в модель включены блоки прямого (БКПП) и обратного (БКПО) преобразования координат из системы $a-b-c$ в систему $d-q$. В модели векторного управления необходим блок компенсации перекрестных связей, однако для наглядности он опущен. Блок ШИМ – широтно импульсной модуляции формирует импульсы управления ПЧ.

Для реализации прямого управления моментом необходим датчик скорости (ДС) и регулятор скорости (РС) для формирования сигнала задания по моменту. Стоит отметить, что для функционирования оценщика потокосцепления и электромагнитного момента (ОцПМ) требуется не только информация о токе статора (ДТ), но и о питающем напряжении (ДН). Контроллер электромагнитного момента (КМ) и потокосцепления (КП) представляют релейные регуляторы. К ним также можно отнести блоки функциональной связи между потоком и моментом, блоки ограничения и т.д. Блок таблица напряжений (ТН) формирует импульсы управления на ПЧ в соответствие с пространственным расположением текущего вектора напряжения статора и сигналов с регуляторов потока и момента.

Система управления БДПТ тоже требует наличия датчика скорости (ДС). В самом простом случае для реализации БДПТ требуется только сигналы с датчика скорости и блок таблица переключений (ТП), формирующий импульсы управления инвертором, однако такая система управления демонстрирует относительно низкие качественные характеристики. Поэтому, представленная модель соответствует системе управления БДПТ по принципу подчиненного регулирования и включает также регулятор скорости (РС), датчик тока (ДТ) и регулятор тока (РТ).

Во всех представленных моделях последовательность блоков принята условной и не точно соответствует логике работы системы, а лишь демонстрирует зависимость всей системы управления от надежности каждого элемента. Стоит отметить, что в схемах, где используется датчик скорости, этот блок можно заменить оценщиком скорости, который, используя сигналы с датчика тока и математическую модель, определяет значение скорости. Однако такая замена с точки зрения модели надежности существенно не изменит общую оценку. Во всех выше приведенных моделях не отражены различного рода вспомогательные блоки - фильтры, сумматоры, цифро-аналоговые преобразователи и т.д., которые важнее учитывать скорее при определении абсолютной надежности систем управления, чем при их сравнении.

С учетом того, что в рамках настоящего сравнения предлагается степень надежности оценивать по количеству элементов системы управления, можно сделать вывод о выигрышных позициях U/f -управления СДПМ, которое имеет в составе четыре основных блока, что является минимальным значением среди всех СУ. Несмотря на то, что режим БДПТ представлен моделью из пяти блоков, отличие от скалярной системы управления, все-таки, значительное, что объясняется наличием датчика скорости. Датчик скорости резко понижает надежность системы, так как по данным [114] интенсивность отказов датчиков скорости на несколько порядков превышает интенсивность отказов датчиков тока. Однако при количественной оценке

надежности оказывается, что различия в надежности систем невелики. Так, регуляторы и функциональные преобразователи реализуются программно, поэтому набор этих элементов можно свести к надежности одного блока – программного обеспечения. В таком случае отличие систем управления от скалярного будет в одном блоке. Отметим только, что количество преобразований информационных потоков, вычислений и подпрограмм для реализации других систем управлений несколько выше, чем для скалярного управления. Различия в надежности прямого управления моментом и векторного управления как видно из модели невелики. В конкретных исполнениях тот или иной тип управления может демонстрировать лучшие показатели надежности, тем не менее, в целом можно считать векторное управление несколько надежнее, чем ПУМ.

Сравнение стоимости систем управления производилось на основании открытых данных в сети интернет, а также путем непосредственной связи с торговыми представительствами ведущих мировых производителей. Так как компаниями не реализуются системы управления отдельно, сравнивалась стоимость преобразователей частоты реализующих определенные способы управления.

Ведущие отечественные и зарубежные производители преобразователей частоты имеют среди своей продукции серии для использования с синхронными двигателями и включают либо векторное управление, либо прямое управление моментом, однако такие решения имеют большую стоимость, чем преобразователи частоты общепромышленной серии. Преобразователи частоты со специальным скалярным управления для синхронных двигателей не были найдены, но, как показали экспериментальные исследования, такой режим можно реализовать, используя ПЧ общепромышленной серии.

Стоимость ПЧ, конечно, меняется, однако соотношения между специальными сериями и общепромышленными сериям остаются практически постоянными (рис. 2.11). Так, преобразователи частоты

отечественной компании «Овен» серии ПЧВ3 [123], обладающие возможностью работы с СДПМ имеют стоимость в среднем на 15% выше чем ПЧВ1/2 – для обычных двигателей. Преобразователи компании *Schneider Electric* серии *ATV71* имеют стоимость выше на 20% [138]. У фирмы *ABB* преобразователи серии *ACS800* и *ACS850*, имеющих программные приложения для синхронных двигателей, дороже преобразователей общепромышленных серий *ACS350* на 23% [122]. Дороже также и преобразователи компании *Siemens* серии *Sinamics S120* [118-120]. Стоимость электронных коммутаторов для БДПТ значительно выше, так как они не выпускаются серийно. Сравнительная диаграмма стоимости преобразователей различных серий и производителей на мощность 11 кВт представлена на рисунке 2.5 [121-126, 12]. Стоит отметить, что некоторые производители электротехнических изделий вообще не имеют преобразователей частоты для синхронных двигателей.

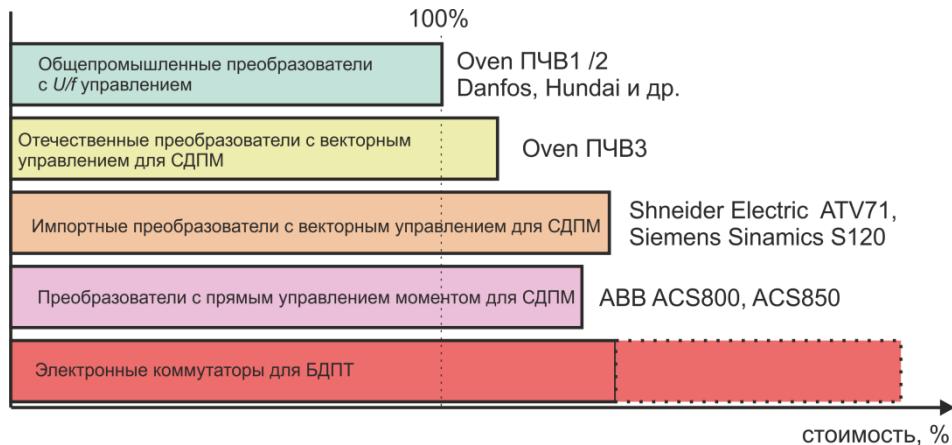


Рис. 2.11 Сравнение стоимости преобразователей различных серий

С точки зрения экономической эффективности использование даже самого дорого преобразователя, но который уже выпускается, будет экономически эффективнее, чем разработка нового, специального.

Оценка регулирования скорости, по сути, представляет собой сравнение диапазона скоростей – регулирование вниз и вверх от номинальной скорости, а также оценку статической ошибки под нагрузкой.

На малых скоростях при скалярном управлении проявляется влияние активного сопротивления статора, что вызывает изменения потокосцепления и некоторое снижение электромагнитного момента при стандартном способе управления. Для исправления такой ситуации применяются специальные законы изменения напряжения на малых скоростях, но результат, тем не менее, не всегда отвечает необходимым требованиям. Регулирование вверх от номинальной скорости сопряжено с необходимостью повышать допустимое напряжение электрической машины, либо использовать электропривод в режиме ослабления поля или постоянства мощности, что несколько ограничивает диапазон регулирования. Статическая ошибка по скорости в электроприводах с СДПМ и U/f -управлении отсутствует, так как ротор вращается синхронно с полем [50, 65].

При векторном управлении проблемы низких скоростей решаются за счет формирования потокосцеплений, соответствующих требуемому электромагнитному моменту. С другой стороны, на малых скоростях возникают некоторые трудности с точным определением положения ротора. Для решения этой проблемы применяются датчики скорости большей разрядности и специальные методы оценки положения ротора при малых скоростях [3]. Ограничения максимальной скорости соответствуют скалярному управлению. Статические ошибки возможны в электроприводе при некорректной настройке регуляторов системы управления.

При работе СДПМ с системой прямого управления моментом достигаются высокие показатели диапазона регулирования скорости благодаря непосредственному формированию момента в электродвигателе. Особенности регулирования выше номинальной скорости соответствуют векторному и U/f -управлению. Среди серийно выпускаемых СДПМ номинальные частоты вращения достигают 6000 об/мин.

В режиме БДПТ двигатель достигает наилучших показателей диапазона регулирования, в таком режиме существует возможность развития номинального момента с нулевой скорости и работой на упор (с учетом

токограничения). Максимальная скорость электродвигателей достигает 30 000-60 000 об/мин, а некоторые микродвигатели специальных назначений имеют максимальную скорость до 100 000 об/мин. Недостатком БДПТ является мягкая механическая характеристика электропривода и необходимость построения дополнительных регуляторов.

Быстродействие электропривода на базе двигателя с постоянными магнитами при различных системах управления можно оценить, исследуя реакцию на сброс/наброс нагрузки и время переходного процесса разгона или реверса от нуля до номинальной скорости.

Существуют исследовательские работы, демонстрирующие преимущества и недостатки различных способов управления. Сравнение скалярного управления и векторного способа [32, 36] показывает, что динамическая ошибка при набросе нагрузки при скалярном управлении значительно больше, более длительным оказывается и время переходного процесса при скалярном управлении, сопровождающегося, к тому же, колебательностью. Темп разгона при скалярном управлении ограничен условиями выпадения из синхронизма и не позволяет достигать таких показателей, как при векторном управлении.

Сравнения между векторным управлением и прямым управлением моментом также вызывают значительный интерес среди исследователей. Эти два способа обладают высокими показателями быстродействия, однако в работах [22, 28, 42, 139] часто не отдается предпочтения тому или иному способу управления. Принято считать, что благодаря более точному формированию электромагнитного момента при прямом управлении моментом, процессы разгона и соответствие скорости сигналу задания выполняется с большей точностью и меньшими временными затратами. Например, переходный процесс реверса при прямом управлении моментом занимается меньше времени на 30-40%. С другой стороны, реакция на наброс нагрузки лучше при векторном управлении. Так, динамическая ошибка по скорости может на 20-30% быть меньше чем при ПУМ.

Сравнения в части быстродействия показывают, что управление в режиме БДПТ несколько проигрывает управлению в режиме СДПМ в части реакции на наброс нагрузки. Кроме того, экспериментальные исследования варианта электропривода ЭДБН-25 (НПО «Электромшина») демонстрируют эти недостатки.

В части разгона и реверса БДПТ, с другой стороны, показывает высокие результаты, сравнимые с векторным управлением и ПУМ, но высоко динамичное задание по скорости в виде синусоидального сигнала, электроприводом не отрабатывается.

Различия систем управления с точки зрения энергоэффективности не так значительны, однако существуют некоторые принципиальные особенности, обеспечивающие энергоэффективность той или иной системы управления.

Для достижения максимальной энергоэффективности требуется во всех режимах работы электропривода (разгон, стабильная работа, реакция на наброс нагрузки и т.д.) обеспечивать наиболее выгодные соотношения между векторами потоксцеплений. Для реализации наиболее эффективных энергетических режимов существует четыре принципа управления указанными векторами:

- постоянный угол нагрузки ($\theta=90^\circ$ - ПУН);
- максимум момента на ампер (ММНА);
- единичный коэффициент мощности;
- постоянный магнитный поток.

Управление по принципу ПУН обеспечивает угол нагрузки равный 90° за счет управления вектором проекции тока статора по продольной оси i_d . Основная задача при таком управлении поддерживать ток $i_d=0$. В таком случае достигается наибольшая энергоэффективность, однако для СДПМ у которых существует выраженная явнополюсность такое управление становится не самым эффективным, так как не учитывается реактивный момент электродвигателя.

При ММНА угол нагрузки, обеспечивающий минимум тока статора выражается через уравнение для электромагнитного момента с учетом реактивного момента, создаваемого за счет неравенства между индуктивностями L_d , L_q (2.11). Если дифференцировать выражение (2.11) и определить экстремум функции момента, то получим два значения угла нагрузки, при котором обеспечивается максимальное соотношение между моментом и током. Формируя при определенном электромагнитном моменте проекции токов i_d , i_q так, чтобы поддерживался необходимый угол нагрузки можно добиться максимальной энергоэффективности СДПМ с явнополюсным ротором.

Методы поддержания единичного коэффициента мощности и постоянного магнитного потока в электродвигателе также опираются на основные уравнения электромашины и сводятся к выражениям для угла нагрузки.

Таким образом, реализация того или иного принципа энергоэффективного управления обеспечивается управлением проекциями токов статора и поддержания необходимого угла нагрузки. Наиболее полно такую возможность реализует векторная система управления, при которой проекции токов статора по продольной и поперечной осям регулируются непосредственно. Кроме того, при векторном управлении применяется система пространственно-векторной модуляции, формирующая управляющие импульсы на инверторе, а также обеспечивающая минимальные пульсации момента двигателя [42].

Прямое управление моментом несколько проигрывает векторному управлению из-за появления высоких гармоник токов и относительно больших пульсации моментов. При U/f -управлении также существует возможность реализовать вышеописанные принципы энергоэффективного управления, однако в переходных процессах изменения скорости или нагрузки влекут за собой изменения потокосцепления и электрическая машина может оказаться перевозбужденной или недовозбужденной, что

влечет за собой рост потерь мощности [36]. В режиме БДПТ энергоэффективность системы управления становится несколько хуже, чем при векторном управлении, что объясняется несинусоидальностью питающего тока и трапецидальной формой ЭДС [22].

Учитывая выше сказанное, среди всех систем управления в плане энергоэффективности можно выделить векторное управления, однако в ряде работ [5, 28, 33, 139] отмечается, что энергетические различия довольно малы и при определенных коррекциях, например, при соответствующей системе импульсно-фазового управления инвертором или корректной наладке и настройке регуляторов, один из способов управления может демонстрировать лучшие результаты.

Не смотря на большое количество работ посвященных системам управления СДПМ, реализовать работоспособную систему на практике не просто. Новые методы и тонкости систем управления доходят до внедрения в серийных образцах преобразователей частоты достаточно долго. Промышленные компании чаще всего используют проверенные и надежные способы управления.

Внедрение СДПМ в промышленные установки ограничивается, помимо стоимости самого электродвигателя, необходимостью использования специальных преобразователей с программными приложениями для синхронных двигателей. Кроме того, преобразователи для БДПТ серийно практически не выпускаются, а изготавливаются мелкими партиями к специальным двигателям [124, 125, 130, 131], что вызывает некоторое повышение конечной стоимости электропривода.

Реализация векторного управления или прямого управления моментом хоть и достаточно изучена с теоретической точки зрения, однако фактически могут возникать трудности с наладкой и интеграцией в систему датчика скорости. Например, для работы системы датчик скорости должен обеспечивать точность определения положения около $3\text{-}4^\circ$, в то время как некорректное монтирования датчика на вал уже может вызвать погрешности

определения положения и ухудшить работу системы. Непросто также реализовать бездатчиковую систему управления с использованием алгоритмов оценивания скорости, при которых возможны программные сбои, программные задержки, нужно учитывать изменение параметров электрической машины и т.д. При реализации системы управления необходима точная настройка регуляторов. Сложность системы влечет за собой необходимость в больших настройках и, соответственно, чувствительность к изменению этих настройках.

В отношении практической реализации, электропривод по принципу БДПТ имеет несколько лучшие условия. Так, например, для реализации двухполюсного исполнения БДПТ достаточно будет датчика положения с разрешением в 60° , который может быть основан на датчиках холла и уже установленным в двигателе при изготовлении электрической машины. Согласно теории сложности систем [151, 152], упрощенно сложность можно определять количеством элементов, входящих в систему. Если сравнивать количество элементов с учетом функциональных схем, представленных на рисунке 2.10 векторное управление и ПУМ сложнее скалярного управления более чем на 70%, а управления БДПТ на 20%. Повышенная сложность системы повлечет за собой необходимость в больших сроках разработки, высокой квалификации инженеров и соответственно временных и финансовых затратах. Оценка сложности разработки субъективна. Для групп инженеров, имеющих опыт в разработке определенных систем управления (например, векторного), суммарная сложность разработки другого способа управления может оказаться выше. Вместе с этим, при бездатчиковых исполнениях в программном обеспечении обязательно требуются дополнительные блоки оценщика скорости и адаптации переменных, что увеличивает количество элементов системы. На сложность реализации векторного управления косвенным образом указывает и количество патентов [153]. Систему частотного управления потенциально можно реализовать практически с любым преобразователем частоты, осложняют реализацию

необходимость в дополнительных корректирующих блоках, которые, тем не менее, легко могут быть интегрированы в систему. Частотное управление также имеет больший потенциал к нечувствительности к изменению параметров.

Сравнение систем управления двигателем с постоянными магнитами показывает, что наилучшими качественными характеристиками обладают векторное управление и прямое управление момента, однако они достаточно сложны в плане реализации и отладки, требуют точного датчика скорости либо дополнительных программных алгоритмов оценивания скорости и адаптации параметров электропривода. Режим БДПТ также имеет достаточно высокие показатели характеристик, однако уступает режимам для СДПМ по энергетике и надежности. Скалярное U/f -управление СДПМ обеспечивает приемлемый диапазон регулирования, нулевую статическую ошибку при этом преобразователи с таким режимом имеют относительно низкую стоимость и простую реализацию. В сочетании с несколько лучшей надежностью и низкой чувствительностью к изменениям параметров становится наиболее подходящим для сформулированных технических требований.

Отсутствие необходимости в датчике положения ротора и определения угловой скорости вращения делает скалярное U/f -управление наиболее привлекательным и простым с точки зрения практической реализации. Такая система управления является проще, даже с учетом дополнительных блоков коррекции [32].

Как ранее упоминалось, в работе рассматривается система электропривода с двигателем ЭДБН-25 разработанным НПО «Электромашина». Как показали экспериментальные исследования, совместно с серийным преобразователями частоты и со стандартными приложениями векторного управления для синхронных двигателей указанный двигатель не работоспособен, что объясняется несинусоидальной ЭДС двигателя и несоответствием модели СДПМ в преобразователе частоты

реальному двигателю. При разработке преобразователей и системы управления в них предполагается работа с электродвигателями определенного диапазона параметров. Электродвигатель ЭДБН-25 не вписывается в предполагаемые параметры из-за чего в режиме векторного управления, при котором алгоритмы опираются на модель электродвигателя, электропривод оказывается неработоспособен. На основании экспериментальных исследований было установлено, что с приложениями U/f -управления двигатель демонстрирует не худшие показатели управляемости и энергетики относительно управления тем же двигателем, но в режиме БДПТ. При реализации U/f -управления не использовался датчик положения ротора, что является преимуществом такого типа управления перед БДПТ.

С учетом технических требований необходимо обеспечить работу электропривода по возможности используя существующие устройства и аппараты. Если реализовать электропривод не удается с использованием существующих устройств – разработка должна занимать минимальное количество временных и финансовых ресурсов. Поэтому вывод относительно сравнения систем управления делался в проекции текущей реализации и потенциального проектирования. С точки зрения текущей реализации управление БДПТ не удовлетворят требованиям. Более того, при анализе комплексной электрогидравлической модели определено, что для повышения энергоэффективности гидросистемы необходимо регулирование скорости. Однако при регулировании скорости существующего электропривода с БДПТ происходит значительное снижение КПД до 60%. Экспериментальные исследования работы электродвигателя с общепромышленным преобразователем частоты (*Schneider Electric Altivar 71*) в режиме векторного управления обнаружили неработоспособность электропривода. Двигатель периодически не запускается, либо работа оказывается некорректной со значительным завышением токов статора. При работе в скалярном режиме с тем же преобразователем частоты отмечалась высокая работоспособность:

поддержание скорости с нулевой статической ошибкой, незначительная динамическая ошибка, относительно высокое КПД в требуемом диапазоне регулирования скорости [95, 143]. Вместе с этим было обнаружено, что при определенной настройке на рабочую точку можно повысить эффективность работы электропривода.

В проекции потенциальной разработки преобразователя наилучшими регулировочными и энергетическими свойствами обладает векторное управление, однако для объекта не менее важным оказываются требования по разработке, которые лучшим образом удовлетворяет скалярное управление. Векторное управление для исследуемого объекта обладает избыточными характеристиками качества. Кроме того, скалярное управление имеет потенциально меньшую чувствительность к вариации параметров («грубость»), что дает дополнительное преимущество при выборе системы управления.

Таким образом, в дальнейшей работе исследуется скалярное, U/f -управление электродвигателем гидронасоса. Для дальнейшего решения задач исследования необходимо, с одной стороны, определить алгоритмы наладки электропривода, обеспечивающие наилучшую энергоэффективность с использованием существующего ПЧ. С другой стороны, необходимо устранить недостатки скалярного управления для разработки специального преобразователя частоты.

2.6. Выводы по второй главе

В настоящей главе можно сформулировать следующие выводы:

- разработана комплексная математическая модель электрогидравлической системы, учитывающая взаимовлияние гидравлической и электромеханической частей друг на друга, отличающаяся возможностью регулирования гидравлических параметров за счет скорости приводного электродвигателя;

- разработана комплексная компьютерная модель электрогидравлической системы, обеспечивающая исследование режимов работы электропривода в составе гидравлической системы МАП, включающая релейный регулятор давления гидросистемы через канал изменения скорости электродвигателя. Компьютерная модель упрощает процесс наладки благодаря возможности прогнозирования реакции системы на изменения электропривода;
- проведено моделирование, показывающее возможность повышения энергоэффективности гидравлической системы. Для повышения эффективности гидросистемы необходимо, чтобы электропривод обеспечивал номинальную частоту вращения гидронасоса в момент «руления», а при отсутствии нагрузки - вращение с пониженной скоростью;
- проведен анализ и определены преимущества и недостатки систем управления СДПМ с точки зрения надежности, стоимости, диапазона регулирования скорости, быстродействия, энергоэффективности, практической реализации;
- с учетом технических требований гидросистемы МАП для реализации электропривода гидросистемы решено использовать частотное U/f -управление СДПМ, которое обеспечит реализацию бездатчикового управления, относительно высокую надежность, доступность реализации, грубость к изменению параметров системы и возможность применения с существующим электродвигателем гидросистемы;
- для построения эффективного электропривода гидросистемы МАП необходимо устраниТЬ недостатки бездатчикового частотного U/f -управления СДПМ в части колебания скорости и выпадения из синхронизма, а также обеспечить возможность управления энергоэффективностью системы электропривода.

3. БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ СДПМ

3.1. Компьютерная модель СДПМ

Структурная схема электропривода гидросистемы представляет собой идеализированную систему. Как известно, без демпфирующих обмоток и при скалярном управлении два интегратора в прямом канале приводят к неустойчивому режиму. Однако в некоторых источниках отмечаются теоретические способы формирования специальных корректирующих блоков для устранения нежелательных эффектов колебательности и выпадения из синхронизма. Практические методы и алгоритмы реализации таких устойчивых систем частотного управления не описываются.

В целях исследования и анализа неустойчивых режимов синхронного электропривода необходимо создать компьютерную модель соответствующую U/f -управлению СДПМ. Программная модель создавалась в приложении *Matlab*, с использованием стандартных блоков из пакетов *Simulink* и *SimPowerSystem*. Общий вид модели представлен на рисунке 3.1.

В качестве модели электродвигателя с постоянными магнитами принимается базовая модель из библиотеки *SimPowerSystem* и обозначается на рисунке блоком *PMSM EDBN25_Sin*. Уравнения блока электродвигателя приведены в файлах поддержки и соответствуют уравнениям (2.10) [141]. Параметрами, которые программируются в блоке электродвигателя, являются: активное сопротивление статора - 0,15 Ом; индуктивности по продольной и поперечной осям - 1,48, 1,92, Гн; коэффициент пропорциональности по ЭДС - 0,196, $B/\text{об/мин}$; момент инерции ротора 0,24, кгм^2 ; коэффициент вязкого трения - 0,005, Нмс; число пар полюсов - 2.

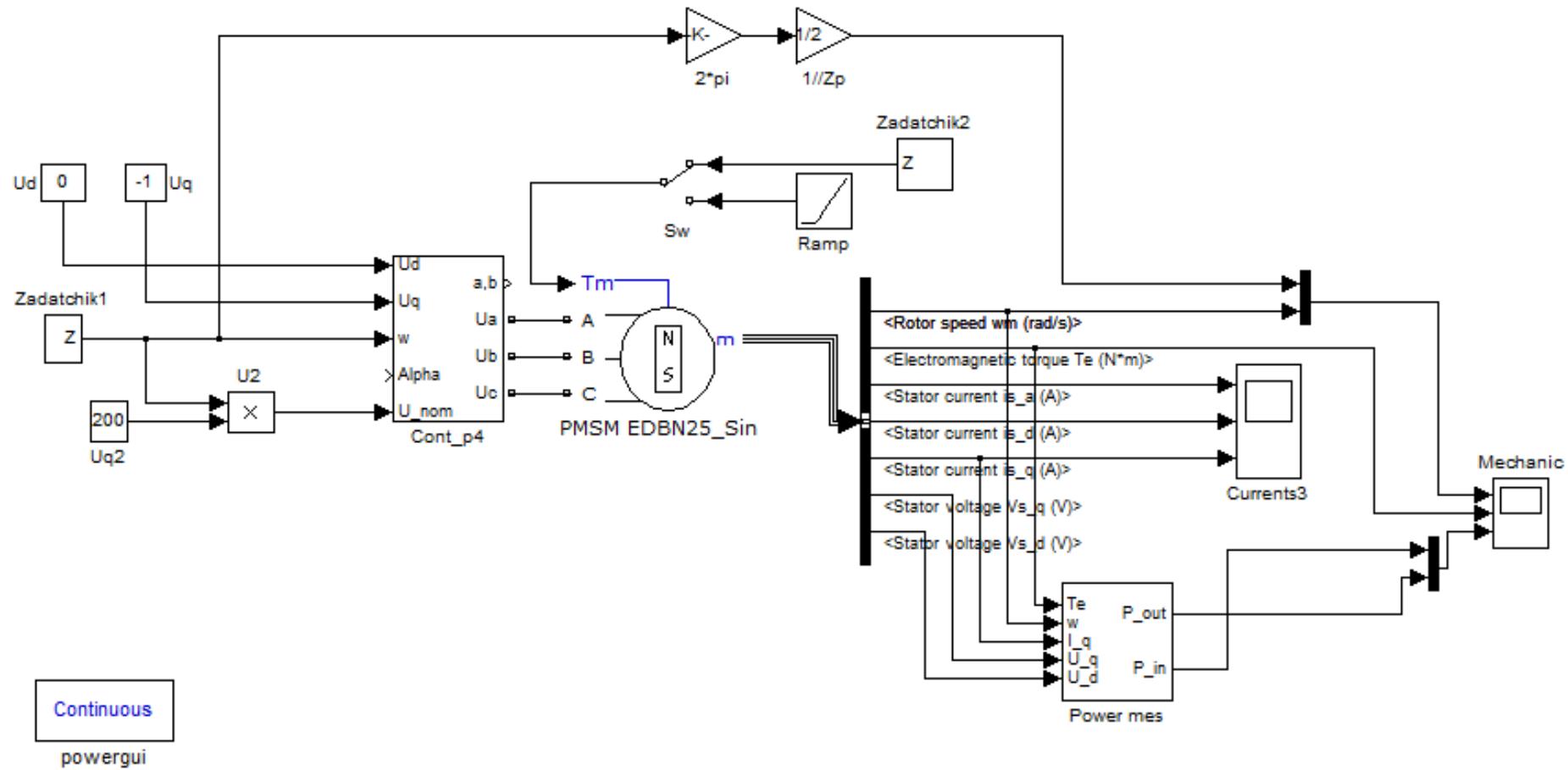


Рис. 3.1 Модель синхронного электропривода СДПМ с частотным управлением

Блоком, который моделирует работу преобразователя частоты (ПЧ), является блок *Cont_p4*. Входом блока ПЧ являются задание на угловую частоту вращения вектора напряжения статора (w) и задание на амплитуду вектора напряжения (U_{nom}). Для установки начального соотношения между векторами проекций напряжения статора на продольную и поперечную оси применяются входы (Ud , Uq). Данный блок можно использовать также в составе системы векторного управления, чем объясняется наличие входа задания углового положения вектора напряжения ($Alpha$). На выходе блока моделируется симметричное трехфазное напряжение соответствующей амплитуды и частоты (Ua , Ub , Uc). На рисунке 3.2 показано соответствие параметров линейного напряжения U_{ab} заданным значениям частоты и амплитуды.

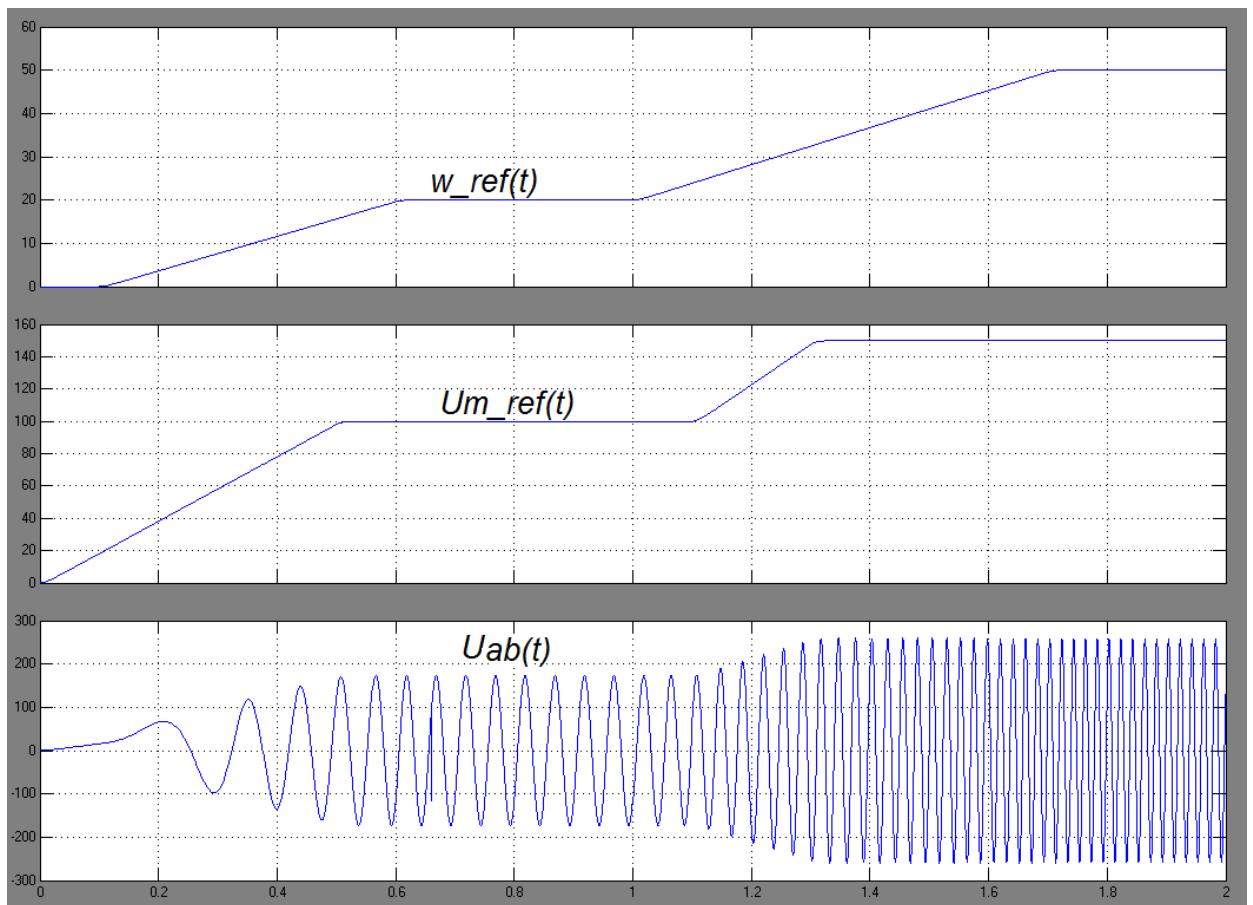


Рис. 3.2 Работа блока моделирующего ПЧ

Блок задатчика интенсивности (*Zadatchik1*) формирует задание на угловую частоту вращения вектора напряжения статора с требуемым темпом нарастания сигнала. В базовом варианте модели задание на амплитуду напряжения статора формируется пропорционально частоте, реализуется закон управления $U/f = \text{const}$. Блоком *Uq2* устанавливается значение напряжения при частоте 50Гц.

Нагрузку на электродвигатель можно формировать либо скачкообразным сигналом, с регулируемым темпом нарастания (*Zadatchik2*), либо применяя плавное нарастание сигнала для снятия статических характеристик (*Ramp*).

В измерительной части модели присутствуют блок измерения сигналов токов статора (*Currents3*), которые отображает ток фазы *A* статора электродвигателя, а также проекции токов статора I_d и I_q на продольную и поперечную оси соответственно. Измерительный блок механической части (*Mechanic*) отображает совмещенные сигналы угловой частоты вращения ротора и задания угловой частоты вращения, совмещенное значение нагрузочного момента сопротивления и значение электромагнитного момента электродвигателя, совмещенные сигналы входной активной электрической мощности (*P_in*) и механической мощности на валу электродвигателя (*P_out*). Блок, формирующий сигналы электрической и механической мощностей (*Power mes*), использует для вычислений значения тока статора по поперечной оси I_q , значение проекций напряжения статора U_d и U_q , значения угловой частоты вращения ротора Ω и электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм}}$.

Таким образом, представленная модель позволяет исследовать работу синхронного электродвигателя с постоянными магнитами совместно с преобразователем частоты, используемого в режиме U/f -управления. Компьютерная модель гидравлической системы на текущем этапе не рассматривалась.

Как известно [50, 63, 65, 82], синхронные двигатели с постоянными магнитами без демпферной обмотки представляют собой неустойчивую систему и имеют повышенную колебательность и склонность к выпадению из

синхронизма. Указанные эффекты подтверждаются и в предлагаемой программной модели (Рис. 3.3).

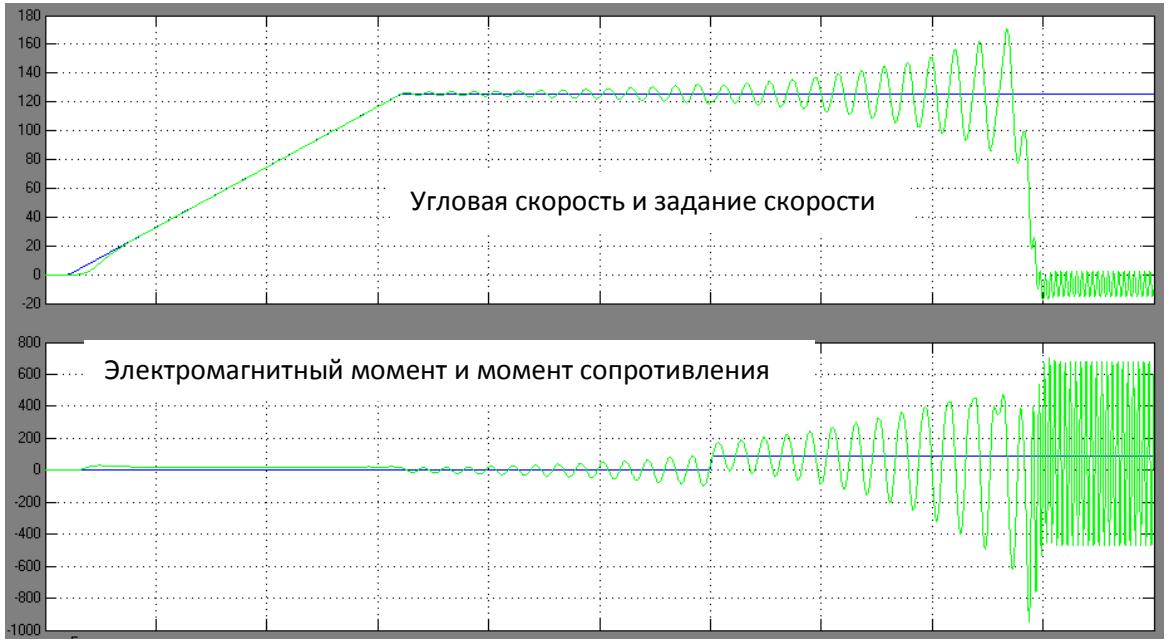


Рис. 3.3 Работа СДПМ со скалярным управлением без демпферной обмотки. Задание 40Гц

В моделируемых процессах на электродвигатель подавалось задание частоты 40 Гц с темпом 1,5 с. В момент времени моделирования 3 с происходил скачкообразный наброс нагрузки. Из диаграммы работы видно, что после завершения процесса разгона угловая скорость ротора начинает колебаться и амплитуда колебаний с течением времени возрастает. Наброс нагрузки не меняет характеров колебаний и в момент времени моделирования 4,4 с двигатель выпадает из синхронизма.

Устойчивость работы электропривода зависит от значения заданной скорости [32]. В разомкнутой системе диапазон задания по скорости значительно ограничен. Так, устойчивой работы без обратных связей можно добиться лишь при значении задания не превышающем 15-17 Гц. На рисунке 3.4 представлены диаграммы работы электропривода с заданием 17 Гц. Видно, что процессы колебания скорости затухают, тем не менее, присутствуют колебания электромагнитного момента и угловой скорости ротора.

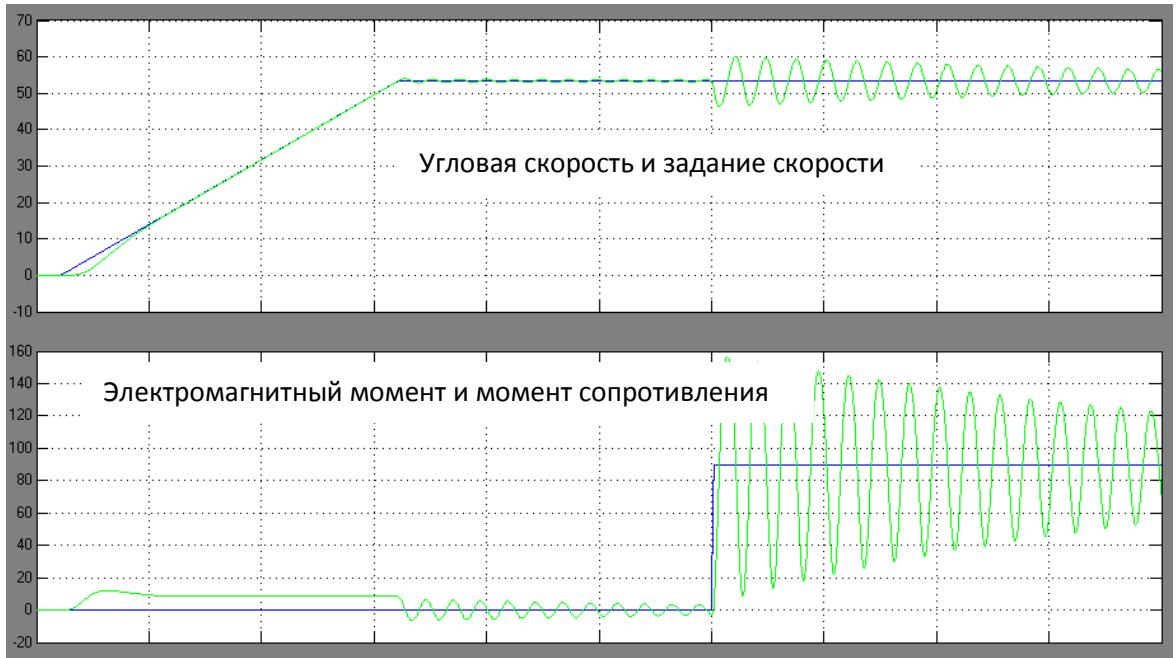


Рис. 3.4 Работа СДПМ со скалярным управлением без демпферной обмотки. Задание 17 Гц

3.2. Стабилизация СДПМ при скалярном управлении

Неустойчивая работа СДПМ при скалярном управления значительно ограничивает возможности их использования. На практике такой способ управления не встречается, а применяются более сложные системы управления. Вместе с этим, скалярный способ управления несет в себе значительные возможности бездатчикового управления, а синхронный характер вращения ротора с полем статора обеспечивает высокую точность поддержания скорости инвариантно относительно нагрузочных моментов.

В целях сохранения преимуществ бездатчиковой системы управления, необходимо обеспечить самосинхронизацию СДПМ. Стабилизация при разомкнутом U/f -управлении предложена в работе [32]. Основная идея стабилизации заключается в изменении сигнала на задание по частоте питающего напряжения в зависимости от параметров электропривода. Сформировать сигнал коррекции задания частоты можно, используя данные о скорости вращения ротора, входной электрической мощности

электродвигателя, либо сигнал тока в звене постоянного тока при использовании преобразователя частоты.

Первый метод предполагает наличие информации о скорости ротора, что подразумевает либо использование датчика скорости, либо сложных оценщиков. Формирование сигнала коррекции, используя данные о мощности или о токе, требуют наличие датчиков тока, которые часто уже предусмотрены системой управления. Для определенности в работе используется метод, основанный на значении входной мощности электродвигателя.

Формирование сигнала стабилизации скорости ротора основывается на уравнении баланса мощностей, которое можно записать как

$$P_{\text{эл}} = P_n + \frac{dW}{dt} + \frac{2}{p} \Omega M_{\text{эм}}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{эл}}$ – электрическая мощность подводимая к двигателю, P_n - мощность потерь, $\frac{dW}{dt}$ - изменения запаса электромагнитной энергии, последнее слагаемое – выходная мощность на валу электродвигателя.

В установившемся режиме первые два слагаемых из уравнения (3.1) можно считать неизменными, тогда изменения мощности будут вызваны последним слагаемым. При таком допущении и подстановке в последнее слагаемое уравнения (3.1) выражения для электромагнитного момента из системы уравнений (2.10) можно записать колебания мощности в виде

$$\Delta P = \left(\frac{2}{p}\right)^2 J \omega_{0\text{эл}} \frac{d}{dt} \Delta \Omega + 2 \left(\frac{2}{p}\right)^2 \beta \omega_{0\text{эл}} \Delta \Omega + \frac{2}{p} M_c \Delta \Omega, \quad (3.2)$$

где M_c – момент нагрузки в установившемся режиме.

Тогда, если вариация заданной частоты питающего напряжения пропорциональна колебаниям мощности, получим

$$\Delta \omega_{0\text{эл}} = -k_p \Delta P, \quad (3.3)$$

где k_p – коэффициент пропорциональности.

Переменная составляющая мощности может быть получена с помощью высокочастотного фильтра первого порядка, тогда выражение для колебания мощности можно будет записать как

$$\Delta P = \frac{P}{1 + T_{\text{вч}} p} P_{\text{эл}}, \quad (3.4)$$

где $T_{\text{вч}}$ – постоянная времени высокочастотного фильтра.

На основании вышеизложенных уравнений можно составить функциональную схему систем электропривода с ПЧ при U/f -управлении и СДПМ (Рис. 3.5). Преобразователь частоты используется в простейшем режиме и имеет входы по заданию амплитуды напряжения статора и угловой частоты вращения. Так как на входе системы присутствует только задание по частоте, то для вычисления необходимого значения задания напряжения используется функциональный преобразователь (ФП $U-f$). Для формирования сигнала коррекции $\Delta\omega$ используется корректирующее устройство (КУ), которое включает в себя измеритель мощности, фильтр высоких частот и пропорциональное звено. Для измерения мощности используются значения токов статора I_a, I_b и значение амплитуды напряжения статора.

Активная мощность вычисляется в соответствии с выражением

$$P_{\text{эл}} = \frac{3}{2} U_s I_s \cos(\varphi). \quad (3.5)$$

В качестве напряжения статора можно взять значение задания на амплитуду напряжения в преобразователе частоты. Коэффициент $I_s \cos(\varphi)$ представляет собой активное значение тока статора. Если ортогональную систему координат $d-q$ ориентировать по вектору напряжения, то значение активного тока статора будет соответствовать проекции тока статора на поперечную ось q

$$I_{qs} = I_s \cos(\varphi) = \frac{2}{3} \left[i_a \cos(\theta_{\text{эл}}) + i_b \cos(\theta_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3}) - (i_a + i_b) \cos(\theta_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3}) \right]. \quad (3.6)$$

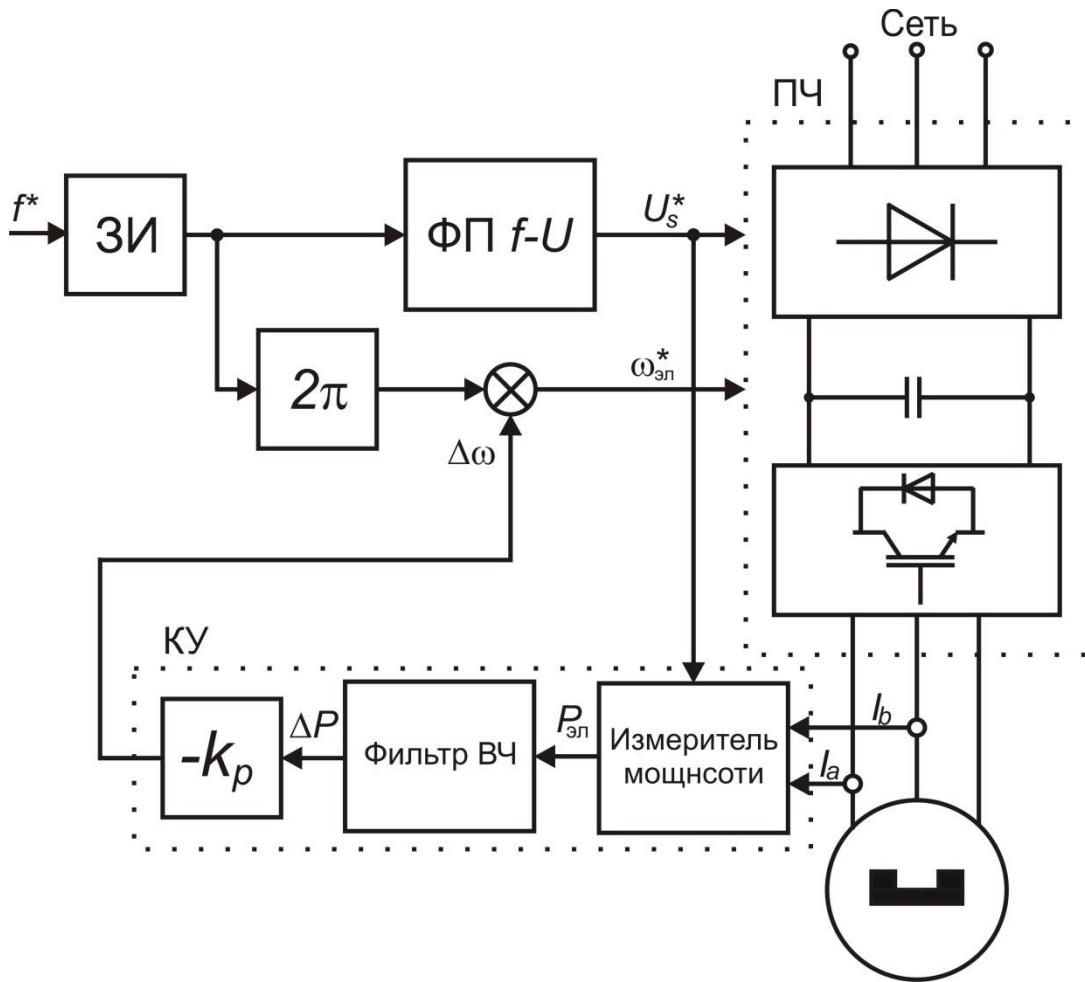


Рис. 3.5 Функциональная схема стабилизированного СДПМ с U/f -управлением

Вновь разработанная компьютерная модель стабилизированного частотного управления СДПМ (рис. 3.6) получена из основной модели (Рис. 3.1) путем добавления корректирующего устройства (рис. 3.7.), которое состоит из идеально дифференцирующего звена, апериодического фильтра и коэффициента усиления. Измеритель мощности, который в обычной модели используется для информативных целей, в стабилизированной системе непосредственно участвует в формировании выходного сигнала корректирующего устройства. Сигнал по коррекции задания угловой частоты поступает на сумматор перед моделью преобразователя частоты.

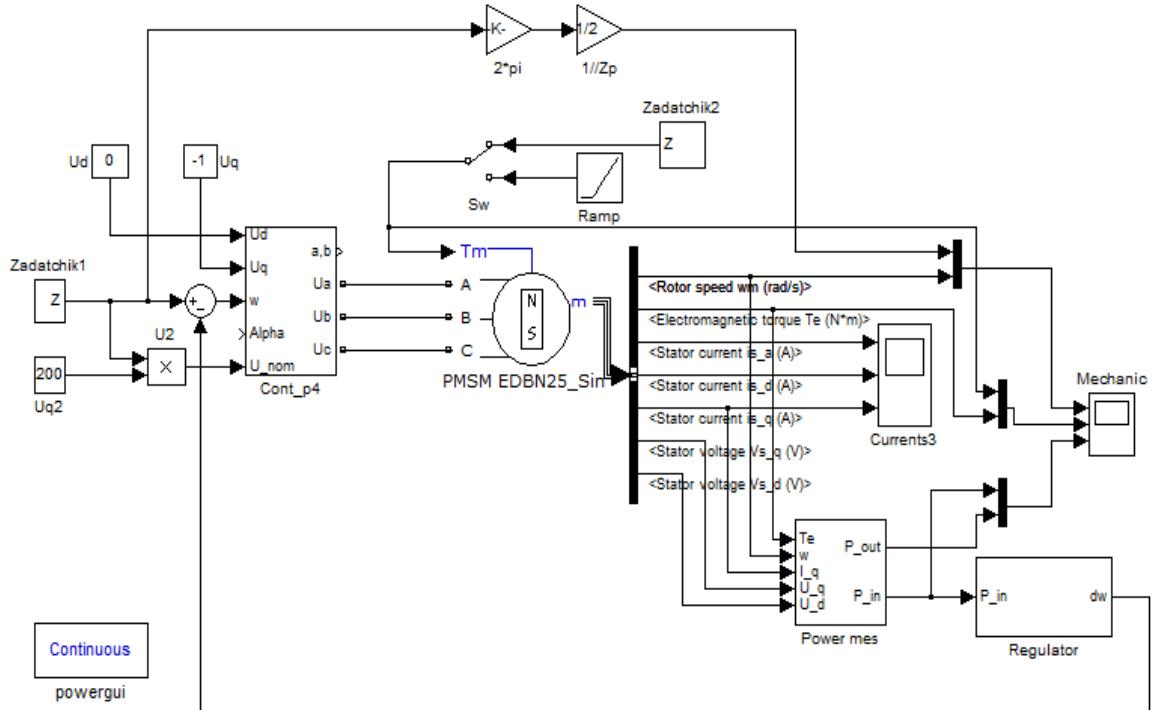


Рис. 3.6 Модель стабилизированного СДПМ с U/f -управлением

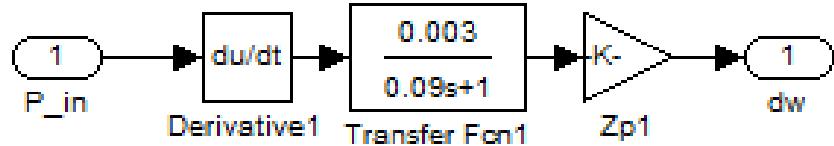


Рис. 3.7 Внутренний вид модели корректирующего устройства

Вычисление мощности в блоке «*Power mes*» осуществляется в соответствии с выражением

$$P_{\text{in}} = \frac{3}{2} U_s I_s \cos(\varphi) = \frac{3}{2} \sqrt{U_q^2 + U_d^2} \cdot I_q. \quad (3.7)$$

Основными параметрами корректирующего устройства являются коэффициент усиления k_p и постоянная времени $T_{\text{вч}}$ высокочастотного фильтра. Значение коэффициента k_p подбирается таким образом, чтобы при поиске корней характеристического уравнения в системе корни лежали в отрицательной зоне вещественной оси. При работе в заданной точке корни характеристического уравнения не изменяются, однако при изменении нагрузки или установленной частоты вращения рекомендуется [32] подбирать

k_p таким образом, чтобы $k_p \omega_{0_{\text{эл}}} = \text{const}$. При определенном диапазоне нагрузки «движение» корней незначительно, поэтому k_p можно принять постоянным. Основная проблема существующего подхода заключается в отсутствии методики, позволяющей специалистам производить проектирование системы управления. Авторами предложенного метода коррекции предлагается производить поиск коэффициентов структурной схемы аналитически на основании характеристического уравнения, однако этот путь достаточно трудоемкий и зависит от условий и допущений при составлении математической модели проектируемого электропривода.

В настоящей работе предлагается производить выбор коэффициентов структурной схемы на основе вновь разработанной компьютерной модели и соответствующей методики.

В процессе моделирования и анализа работы модели в разомкнутом и замкнутом состоянии было установлено, что для определения коэффициентов регулятора необходимо:

- установить параметры электродвигателя (активное, индуктивное сопротивления двигателя, коэффициент по ЭДС, момент инерции, число пар полюсов) в соответствующие блоки модели (Рис. 3.6.);
- установить параметры рабочей точки электропривода (нагрузочный момент и задание угловой скорости) и запустить модель в разомкнутом состоянии;
- установить значение постоянной времени фильтра $T_{\text{вч}}$ равное периоду колебаний скорости на диаграмме работы электродвигателя до выхода из синхронизма;
- 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;

- замкнуть контур стабилизации, соединив выход стабилизирующего блока с сумматором, запустить модель и проверить работоспособность системы. При необходимости допускается корректировка параметров стабилизирующего блока в пределах 10%.

В соответствии с предложенной методикой и с учетом параметров СДПМ в модели установлено значение $k_p = 0,95 \cdot 10^{-5}$, а значение постоянной времени высокочастотного фильтра $T_{вч} = 0,091$ с. Работа модели с корректирующим блоком приводит к повышению устойчивости и обеспечивает работу электропривода при задании частоты 50 Гц (рис. 3.8), при задании частоты 10 Гц (рис. 3.9). При задании ниже 10 Гц сказывается величина активного сопротивления статора и при нагрузке двигатель может выйти из синхронизма из-за недостаточного момента, поэтому при низких значениях задания частоты требуется переходить к непропорциональному изменению напряжения статора. При более высоких значениях задания система оказалась работоспособна вплоть до 130 Гц без изменений настройки параметров корректирующего устройства.

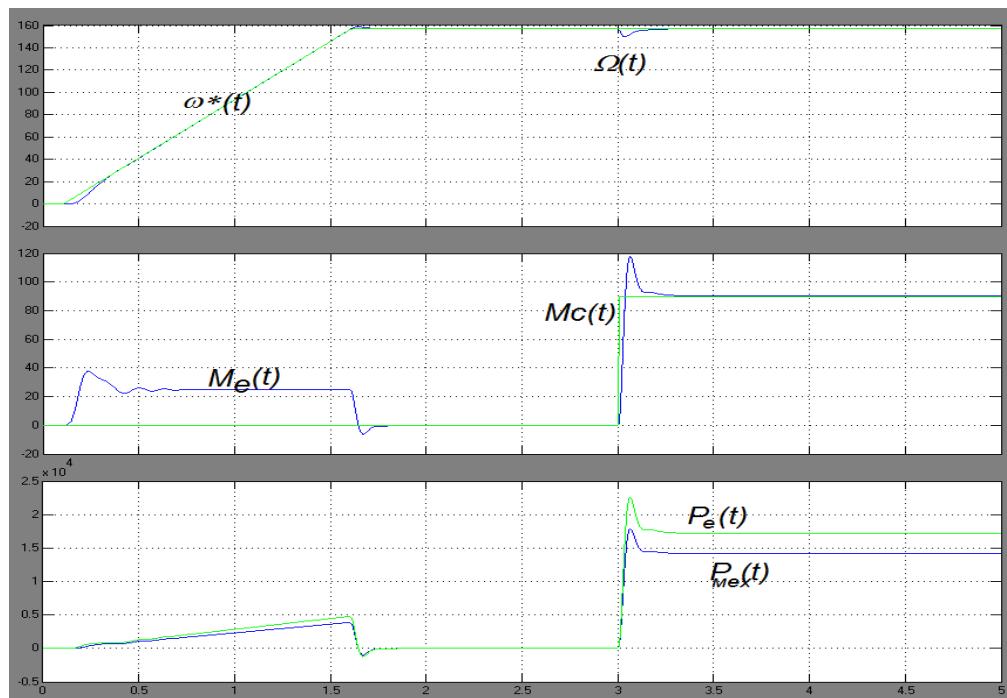


Рис. 3.8 Работа стабилизированной СДПМ при 50 Гц задания частоты

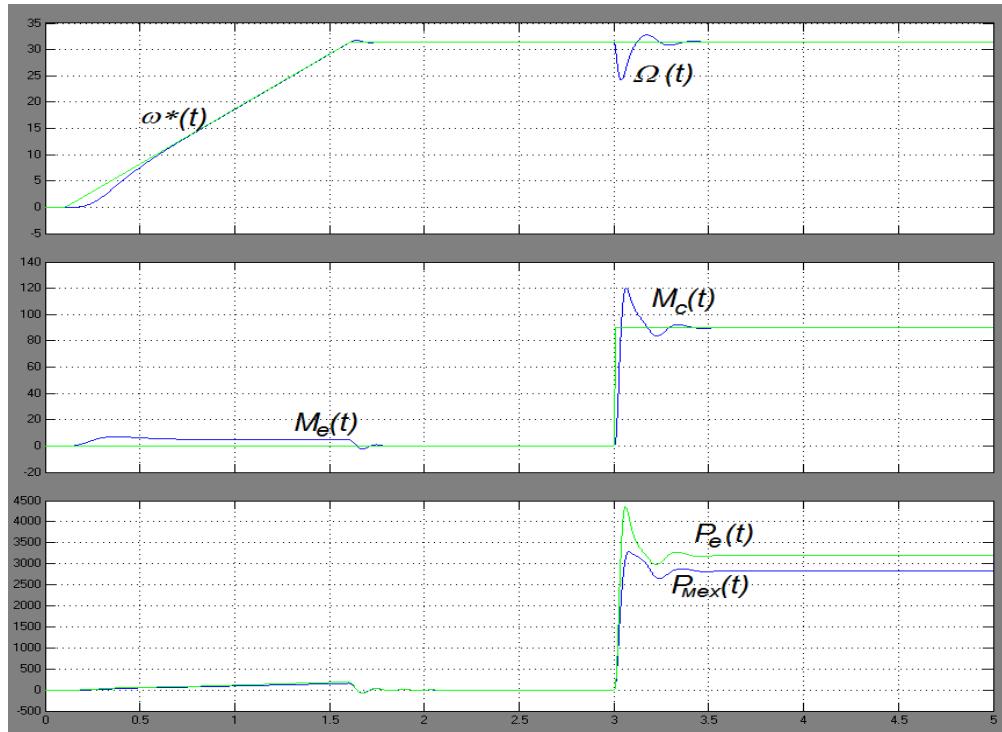


Рис. 3.9 Работа стабилизированной СДПМ при 10 Гц задания частоты

Полученная модель позволяет исследовать систему бездатчикового частотного U/f -управления СДПМ и определять параметры системы управления, необходимые для обеспечения технических требований гидросистемы.

3.3. Грубость системы частотного управления с применением разработанной методики наладки к вариации параметров

Одним из преимуществ рассматриваемой системы частотного U/f -управления СДПМ является грубость (робастность) системы по отношению к изменениям параметров электропривода. Разработанная компьютерная модель и методика наладки электропривода, использующая эту модель, позволяет провести моделирование процессов при вариации параметров.

Исследование проводилось при моделировании разгона электропривода до номинальной скорости (157 рад/с) и скачкообразного наброса номинального момента сопротивления (100Нм). В качестве изменяющихся параметров принимались: активное сопротивление статора, индуктивность статора по продольной и поперечной оси, момент инерции двигателя.

На рисунке 3.10 показаны диаграммы угловой скорости вращения ротора при изменении активного сопротивления. При отклонении сопротивления вниз от номинального значения вид переходного процесса практически не изменяется. Вплоть до 40% от номинального сопротивления динамическая ошибка по скорости сохраняется в пределе 5%. Рост активного сопротивления приводит к отклонению переходного процесса и незначительному увеличению динамической ошибки. Изменения времени затухания переходного процесса не происходит, а статическая ошибка по скорости равна нулю. Таким образом, система оказывается работоспособна при изменении значения активного сопротивления более чем в 6 раз.

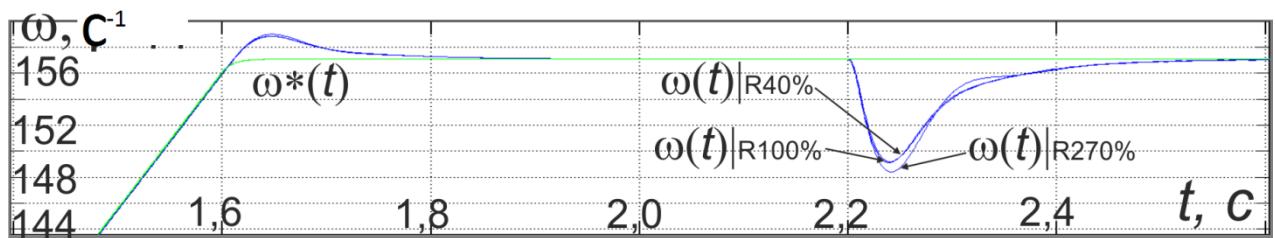


Рис. 3.10. Вид переходных процессов скорости при изменении сопротивления статора

При вариации индуктивностей статора (Рис. 3.11) электропривода также оказывается работоспособным в широких пределах, хотя и различия между переходными процессами более заметны. При уменьшении индуктивности вид переходного процесса становится более монотонным, значение динамической ошибки снижается до 4%. Увеличение индуктивности вызывает появление колебательности и увеличение динамической ошибки, но скорость переходного процесса практически не изменяется и статическая ошибка не возникает. Моделирование при дальнейшем увеличении индуктивности до 300% от номинального значения показывает, что система сохраняет работоспособность.

При работе в составе гидросистемы возможны частые изменения моментов инерции электропривода ввиду изменения контуров трубопровода и соответствующего объема рабочей жидкости. Поэтому одним из

изменяющихся параметров рассматривался момент инерции электропривода. Вид переходных процессов при вариации указанного параметра в семикратном диапазоне (Рис. 3.12) подтверждает эффективность U/f -управления СДПМ. Отметим только, что при значительном увеличении момента инерции растет время затухания переходного процесса.

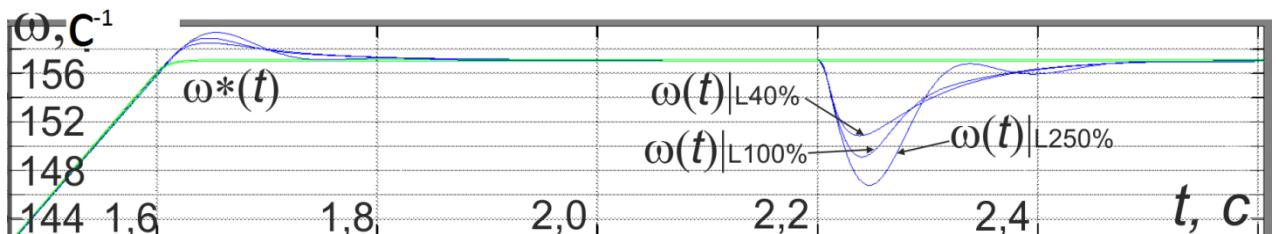


Рис. 3.11. Вид переходных процессов скорости при изменении индуктивностей статора

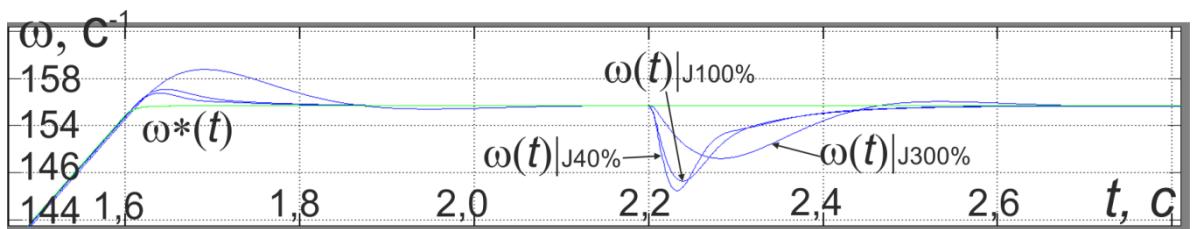


Рис. 3.12. Вид переходных процессов скорости при изменении момента инерции электропривода

Представленные результаты робастности системы по отношению к изменению параметров подтверждают определенные преимущества относительно систем с векторным управлением. Так в ряде работ по [26, 154, 155] параметры сопротивления статора изменяются в пределах от 0,8 до 1,5 номинальных значений, при этом различия в переходных процессах уже становятся заметны, в некоторых случаях появляется и статическая ошибка регулирования скорости. При определенных отклонениях параметров возможно появление значительных (до 40%) динамических ошибок и потеря работоспособности.

3.4. Регулирование напряжения статора

Для использования бездатчикового частотного управления СДПМ совместно с гидравлической системой МАП необходимо исследовать условия энергоэффективной работы электродвигателя, что можно сделать с помощью разработанной компьютерной модели.

При векторном управлении СДПМ предусмотрено два канала влияния [98, 112] на двигатель. Для реализации контура момента используется ток по поперечной оси I_q . Далее, используя информацию о значении скорости ротора, можно создать второй контур регулирования скорости. Вместе с этим, второй канал, влияющий на проекцию тока статора на продольную ось I_d , используется, для обеспечения энергоэффективности электропривода, регулируя который можно обеспечить максимальный коэффициент мощности, максимум электромагнитного момента на ампер и т.д. Известно, например, что наиболее простым способом поддержания высоких энергетических показателей СДПМ является поддержание тока $I_d=0$ или немного отличным от нуля, если имеется явнополюсность ротора.

При эксплуатации синхронных машин с электромагнитным возбуждением на энергоэффективность работы можно влиять током обмотки возбуждения. Добиваясь при различных рабочих точках единичного коэффициента мощности, либо используя синхронный двигатель в режиме емкостной нагрузки.

Если построить векторные диаграммы работы синхронного двигателя с постоянными магнитами, то можно определить, что при работе с одной угловой частотой вращения ЭДС двигателя будет практически постоянной, так как будет определяться потокосцеплением постоянных магнитов. В таком случае параметром, на который можно воздействовать является амплитуда вектора напряжения статора U_s , который в свою очередь воздействует на составляющую тока статора I_d . Такой способ частотного управления, может позволить повысить энергоэффективность электропривода и реализовать некоторые принципы векторного управления.

Другой особенностью рассматриваемого метода является наличие экстремального значение напряжения. В работе [35, 104] показано, что функция тока статора от напряжения статора в синхронном двигателе имеет экстремальный характер. С другой стороны, в теоретических материалах [50, 65] и в экспериментальных исследованиях [83, 106] отмечается изменение экстремума функции, соответствующего наиболее энергоэффективным режимам работы СДПМ. Также в работе [14] приводится вывод аналитической зависимости потребляемой мощности от тока статора

$$P_{ex} = m \left[I_q E + R_l I^2 + I_q I_d (X_d - X_q) \right] \quad (3.8)$$

где E – ЭДС на фазу без учета реакции якоря, X_d, X_q – индуктивные сопротивления по осям d, q соответственно, R_l – сопротивление статора.

Графические характеристики двух представленных выражений имеют минимум. Наличия экстремальной зависимости тока статора от напряжения, возможности стабилизированной работы СДПМ при частотном управлении, а также возможности регулирования проекции тока статора I_d позволяют реализовать экстремальный регулятор, который в автоматическом режиме обеспечит отыскание и стабилизацию наиболее энергоэффективной точки работы электропривода.

3.5.Разработка экстремального регулятора СДПМ

Стандартной задачей системы автоматического управления является поддержание параметров управляемого объекта удовлетворяющих некоторому интегральному функционалу критериев качества. При синтезе оптимальных регуляторов известны граничные условия, а также известен некоторый функционал, который необходимо поддерживать в экстремуме [60, 81]. Однако в ряде технологических процессов и объектов автоматического управления существуют режимы работы с заранее неопределенной конечной рабочей точкой. В химических реакторах, некоторых процессах металлургического производства, процессах обогащения, тепловых процессах, устройствах радиосвязи, а также в электроприводах, характеристики

регулируемых объектов могут не прогнозируемо изменяться с течением времени, более того, на систему оказывают влияние внешние воздействия, которые также могут носить случайный характер. Для эффективной работы таких систем синтезируются специальные, адаптивные управляющие устройства, которые способны в результате анализа информации о работе объекта подстраиваться, т.е. изменять уровень задающего воздействия, корректировать параметры системы управления, изменять алгоритм работы, а в некоторых случаях и критерий оптимизации.

Одним из классов адаптивных систем являются статические самонастраивающиеся системы. В них орган управления способен изменять только параметры управляющего сигнала для получения наилучшего статического режима работы. Наилучшая статическая рабочая точка системы предполагает наличие минимума или максимума (экстремума) на функции качества или статической характеристики объекта. Поэтому такие системы еще называют системами экстремального регулирования (СЭР).

В системе U/f -управления СДПМ функцией качества, которая обладает экстремумом, можно считать зависимость амплитуды тока статора от амплитуды поданного на статор синусоидального напряжения. Существует такое напряжение статора, при котором ток I_d равен нулю и соответственно значение амплитуды тока статора I_s минимально. Более того, известно, что при изменении нагрузки и заданной частоты вращения ротора экстремальная точка изменяет свои координаты (дрейфует). Экстремум при дрейфе смещается как по горизонтали, так и по вертикали, поэтому обычные системы управления оказываются неэффективными, в то время как СЭР обеспечивает не только поддержание наиболее выгодной рабочей точки, но и ее отыскание. Таким образом, в СЭР основными задачами являются поиск координат экстремальной точки, организация движения фазовой точки системы к экстремальным значениям и удержание ее в этом экстремуме.

Для того, чтобы найти экстремум функции необходимо определить точку, в которой производная функции обращается в ноль, меняет знак, или не

существует, поэтому требуется проводить анализ приращений функции, либо поведение производной функции при изменении аргумента, или при изменении знаков приращений. На основании этого, существуют два основных способа нахождения экстремума: поиск по приращению и поиск по чувствительности. Поиск по приращению основывается на анализе знака приращения функции при положительном приращении входного сигнала. Если ведется поиск положительного экстремума, то при достижении максимума приращение сменит знак с положительного на отрицательный, если отрицательного – наоборот. При поиске по чувствительности оценивается крутизна характеристики объекта в конкретной точке и если значение положительное и ведется поиск максимума, то необходимо увеличить значение входного сигнала, а по достижению экстремума производная изменит знак.

В управлении синхронными двигателями с постоянными магнитами системы экстремального управления встречаются редко, лишь в некоторых вариантах регулирования мощности синхронных генераторов. Так как чаще всего управление СДПМ осуществляется с помощью векторного управления, прямого управления моментом, либо в режиме бесколлекторного двигателя, то и методы оптимизации управления применяются соответствующие. Изменение параметров электропривода (активные сопротивления и индуктивности обмоток статора), возникновение непредсказуемых помех ухудшают качественные характеристики электропривода. Для реализации высококачественных систем управления применяются специальные алгоритмы адаптирующихся систем, но они значительно усложняют систему и усложняют процесс наладки: в процессе настройки приходится вносить довольно много параметров об электродвигателе. Экстремальные системы управления находят наилучшую рабочую точку независимо от параметров электропривода, для работоспособности достаточно лишь наличие экстремума. Поэтому для СДПМ с U/f -управлением система экстремального

регулирования может оказаться достаточно эффективным способом управления.

При построении экстремального регулятора в СДПМ за функцию качества принимается зависимость тока статора от амплитуды напряжения статора $I_s=f(U_s)$. Система экстремального регулирования должна найти экстремум и сформировать такое задание на систему (амплитуда напряжения статора), при котором значение выхода системы (амплитуда тока статора СДПМ) будет минимальна. Поэтому в СЭР входным воздействием будет значение амплитуды тока статора I_s , а выходным сигналом – изменение амплитуды напряжения статора ΔU_s . В литературе по построению экстремальных регуляторов упоминается, что СЭР должна содержать измеритель показателя экстремума (ИПЭ) и формирователь сигнала управления (ФСУ). Поиск экстремального значения и организация движения рабочей точки к экстремуму в СЭР обычно разделяется, однако в данной системе видится возможным одновременный поиск и движение, т.е. входное напряжение будет плавно изменяться до определенного значения, которое распознается системой как экстремальное.

Для поиска экстремума в первую очередь необходимо определить направление движения. Экстремальное значение в нашем случае является минимумом, поэтому при его поиске за верное направление принимается то, при котором производная $di_s/dt < 0$. Пусть изначально напряжение U_s задано таким, что электродвигатель работает в точке А (U_{sa}, I_{sa}) (рис 3.13), тогда необходимо увеличивать значение выхода СЭР ΔU_s , которое будет прибавляться к заданию до той степени, пока производная di_s/dU_s не станет равна нулю и СДПМ будет работать в точке Э (U_{se}, I_{se}). Аналогичным образом функционирует система и в случае если в первый момент времени электродвигатель работает при таком напряжении, что рабочей точкой оказывается точка Б ($U_{sб}, I_{sб}$) (рис. 3.13), только здесь требуется уже

уменьшать значение поданного на СДПМ напряжения до равенства нулю производной, поэтому выход СЭР становится отрицательным.

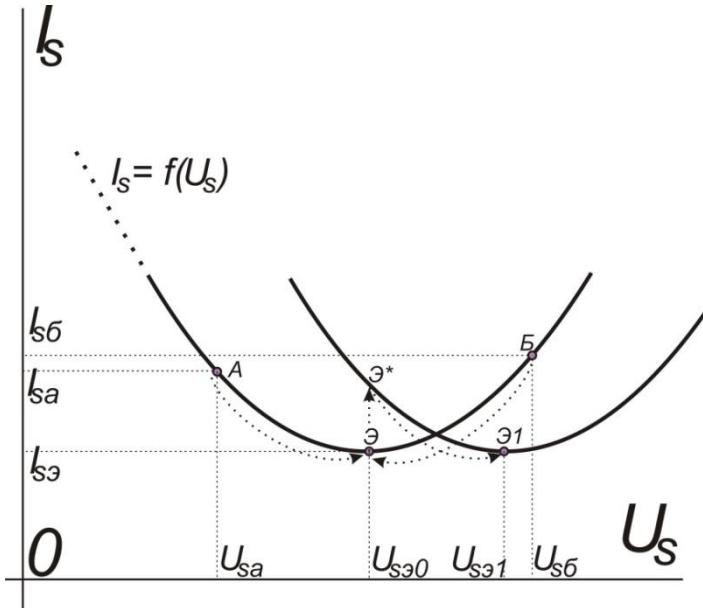


Рис. 3.13 Движение рабочей точки СДПМ к экстремуму

Для реализации СЭР в первую очередь необходимо сформировать блок, который будет определять верное направление изменения сигнала коррекции. Этот блок с помощью тестового короткого импульса определяет знак производной тока при положительном изменении сигнала задания по напряжению. Если при тестовом сигнале производная тока $\frac{di_s}{dt} < 0$, то рабочая точка находится слева от экстремума и в дальнейшем рабочий сигнал должен быть положительным, обеспечивая положительную производную $\frac{du_s}{dt}$. Если при тестовом сигнале производная тока $\frac{di_s}{dt} > 0$, то рабочая точка располагается справа от экстремума, поэтому для поиска минимума надо двигаться в противоположную сторону, и производная $\frac{du_s}{dt}$ при рабочем сигнале будет отрицательной. Блок определения направления должен формировать информацию для последующих блоков о необходимости реверсирования при поиске экстремума, а также информацию о соотношении знаков между производными тока и напряжения по времени.

Следующим элементом СЭР должен быть блок, который непосредственно будет формировать сигнал коррекции напряжения и выполнять функции ФСУ. В процессе изменения амплитуды напряжения статора возникает соответствующее изменение тока статора, которое характеризуется производной. Эта производная будет отлична от нуля, пока напряжение изменяется с определенным темпом и рабочая точка не достигнет экстремума. Однако если считать, что для нахождения экстремума, напряжение должно изменяться до тех пор, пока есть производная тока, то ее можно будет использовать в качестве команды на приращение к заданию напряжения. В установившемся режиме производная тока будет близка к нулю и сигнал на изменение напряжения не поступит, поэтому при таком методе нужно «запустить» процесс поиска экстремума с помощью специального импульса – тестового приращения напряжения. Знак так называемого рабочего импульса и соотношение между производной тока и напряжения определяется как раз в первом блоке при подаче тестового импульса. При положительной производной тока, движения быть не должно и задание на приращение равно нулю. Если движение начинается из точки А (рис. 3.13), то производная тока отрицательна, а приращение должно быть положительным, соответственно блок определения направления выдает команду на инвертирование сигнала. Если движение идет из точки Б, то производная тока как и производная напряжения имеют один знак, но в данном случае блок направления должен выдать команду на реверс.

Следующей необходимой составляющей СЭР должен быть блок ИПЭ, анализирующий нахождение в экстремальной точке. Блок должен выдавать сигнал о состоянии движения к экстремуму и достижении экстремума.

Для «запуска» процесса поиска экстремума нужен еще один блок СЭР, который формирует тестовые и рабочие импульсы в определенных условиях. В текущем варианте СЭР для СДПМ принимается, что процесс поиска экстремума целесообразно начинать после изменения сигнала задания по скорости, либо при значительном изменении нагрузки.

На рисунке 3.14 представлена функциональная схема СЭР предназначенная для регулирования напряжения СДПМ. На схеме видно, что для работы СЭР достаточно сигнала с датчика тока на фазе электродвигателя, а выход системы СЭР суммируется с сигналом задания по напряжению. Блок анализатор состояния (АС) формирует тестовые и рабочие импульсы при изменении сигнала задания, либо при изменении нагрузки. Определитель направления (ОН) после команды АС подает тестовый сигнал и после анализа изменения тока статора формирует рабочий сигнал. ФСУ после подачи рабочего сигнала старта формирует приращения напряжения в зависимости от значения тока статора и поданной информации о направлении поиска с ОН. Информация о токе и об экстремуме (блок ИПЭ) требуется для корректной работы для всех блоков.

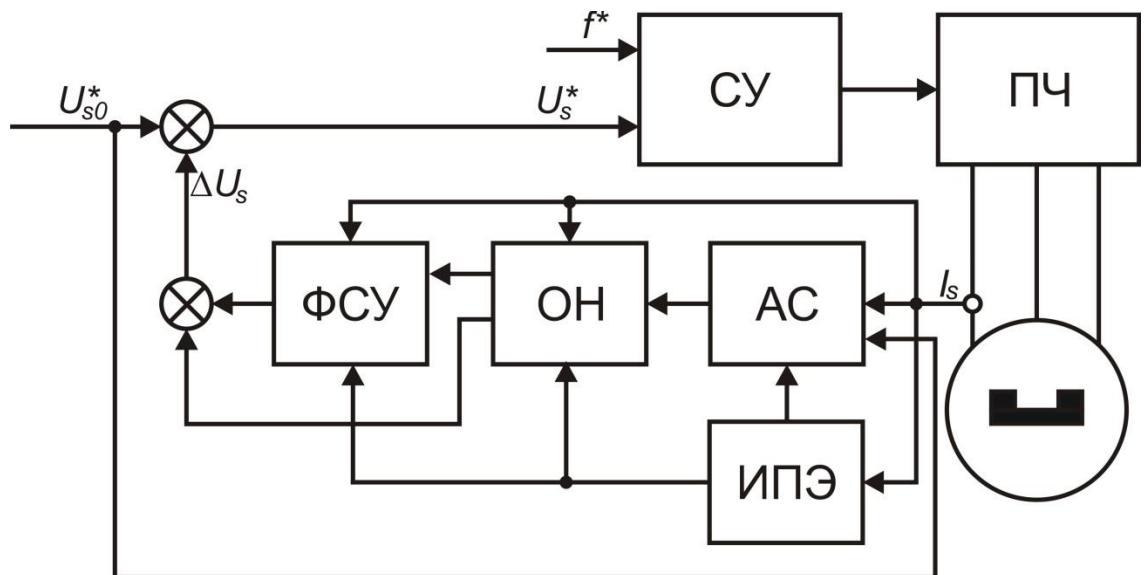


Рис. 3.14 Функциональная схема СЭР СДПМ

Алгоритм работы СЭР в системе управления СДПМ можно представить следующим образом:

- сразу после переходного процесса (изменение скорости или нагрузки) необходимо сформировать тестовый импульс ΔU_s положительного направления, для оценки направления поиска экстремума;
- определить направление поиска экстремума с помощью тестового импульса. Пусть тестовый импульс всегда положительный, тогда если

производная при тестовом импульсе отрицательная, то направление верное, рабочий импульс должен быть положительный, реверс не требуется, но в ФСУ необходимо подать сигнал о смене знака пропорциональности между производной тока и напряжения. Если сигнал производной тока после тестового импульса положительный, то требуется реверс, рабочий импульс должен быть отрицательный, производная тока и напряжения одного знака;

- запустить процесс поиска экстремума путем подачи рабочего импульса верного знака. Рабочий импульс как бы выводит систему из равновесия и вызывает возникновение производной тока, но вместе с этим, производная тока поступает в качестве обратной связи в формирователь сигнала управления и, в свою очередь вызывает изменение ΔU_s , поэтому после пропажи рабочего импульса система продолжит поиск экстремума до момента равенства нулю производной тока, что и укажет на минимум;

- привести систему в исходное состояние после достижения экстремума. В процессе поиска экстремума возникает производная, как тока, так и напряжения, что для блока АС является знаком для начала поиска, поэтому СЭР должна контролировать ведется ли поиск или нет, чтобы корректно выдавать сигнал на очередной поиск.

Блок-схему описанного выше алгоритма можно представить в соответствии с рисунком 3.15. Строго говоря, рабочий импульс в ветви алгоритма после определения направления возникает только первый раз. В последующей работе импульс не требуется, так как производная тока автоматически вызывает увеличение управляющего воздействия.

Для более подробной реализации СЭР, основываясь на предложенном алгоритме и блок-схеме, необходимо сформировать систему уравнений. Из алгоритма ясно, что уравнения должны быть значительно нелинейны, с разрывами функций и с функциями запоминания сигнала.

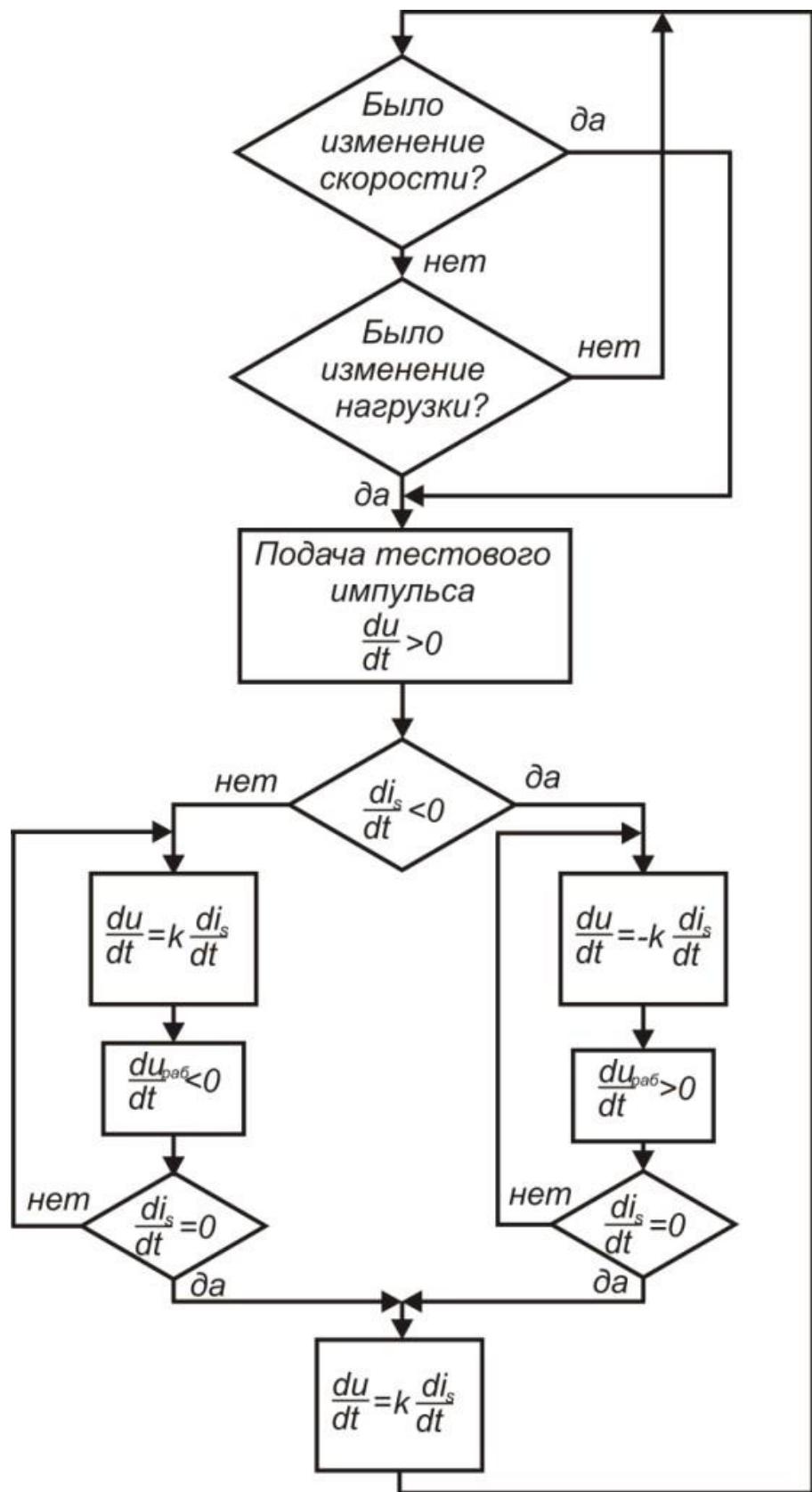


Рис. 3.15 Блок-схема алгоритма работы СЭР для СДПМ

СЭР можно представить в виде обобщенной системы уравнений, представленной ниже

$$\begin{aligned}
 \Delta U(t) &= \int g(t)dt, \text{ если } F(j_3) = 0 \\
 \Delta U(t) &= c_1 \int j_1(t)dt, \text{ если } F(j_3) = 1 \\
 g(t) &= A, \text{ если } h(t) \geq \xi \\
 g(t) &= 0, \text{ если } -\xi \leq h(t) \leq \xi \\
 g(t) &= -A, \text{ если } h(t) \leq -\xi \\
 h(t) &= \frac{di_s}{dt} \cdot s_1(t) + j_2(t) \\
 j_1(t) &= f_1(i_s) + f_2(u_s) \\
 j_2(t) &= (f_3(i_s) + f_4(u_s)) \cdot s_2(t) \\
 j_3(t) &= f_5(i_s) + f_6(u_s) \\
 s_1(t) &= 1, \text{ если } j_1(t) \cdot \frac{di_s}{dt} > 0 \\
 s_1(t) &= -1, \text{ если } j_1(t) \cdot \frac{di_s}{dt} < 0 \\
 s_2(t) &= 1, \text{ если } j_1(t) \cdot \frac{di_s}{dt} < 0 \\
 s_2(t) &= -1, \text{ если } j_1(t) \cdot \frac{di_s}{dt} > 0
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

здесь $\Delta U(t)$ - сигнал приращения к заданию по напряжению; $g(t)$ - функция, определяющая изменение сигнала приращения напряжения; $j_3(t)$ - функция переключения между источниками приращений; $F(j_3)$ - функция от сигнала переключения источника изменения напряжения; c_1 - коэффициент усиления сигнала, создаваемого тестовым импульсом; $j_1(t)$ - функция тестового сигнала; A - коэффициент, определяющий темп изменения напряжения; $h(t)$ - функция, определяющая изменение напряжения при поиске экстремума; ξ - коэффициент, определяющий зону нечувствительности изменений производной; $s_1(t)$ - функция, определяющая знак между производной тока и напряжения; $j_2(t)$ - функция, определяющая рабочий импульс; $f_1(i_s)$, $f_3(i_s)$, $f_5(i_s)$, $f_2(u_s)$, $f_4(u_s)$, $f_6(u_s)$ - функции от тока статора и

напряжения статора, позволяющие сформировать рабочий, тестовый импульс и сигнал переключения; $s_2(t)$ - функция, определяющая знак реверса.

Первое и второе уравнение системы (3.9) содержат интегралы, что позволяет сохранять найденное значение напряжение в процессе последующей работы. Для корректного определения направления поиска экстремума, тестовый импульс подается напрямую на сумматор. Знак функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$ определяется во время подачи тестового импульса и должен запоминаться в течение всего процесса поиска экстремума. Функции $j_1(t)$, $j_2(t)$, $j_3(t)$ - представляют собой импульсы, которые формируются при определенных условиях изменения тока и напряжения статора. Указанные функции могут быть получены из одного импульса, формирующего сигнал на старт работы СЭР, путем изменения времени запаздывания и длительности. Коэффициенты, c_1 , A , ξ - позволяют регулировать работу системы влияя на быстродействие и устойчивость СЭР.

На основе системы уравнений можно сформировать уточненную функциональную схему СЭР (Рис. 3.16). В целях наглядности схемы модель СДПМ заменена звеном с ярко выраженной экстремальной формой (в виде параболы), кроме того, на текущем этапе важна именно эта характеристика электропривода. В реальном электроприводе кроме экстремальной зависимости необходимо будет учесть также инерционность цепи статора. Как видно из схемы, первый канал, анализирующий сигналы тока статора и задание на напряжение, формирует импульс по окончанию переходного процесса, т.е. первая производная формирует сигнал о том, что протекает переходный процесс, а вторая производная указывает на старт и окончание переходного процесса. Так как информация о старте не требуется, отрицательный импульс отсекается нелинейным звеном. Выпрямление сигнала между первой и второй производной необходимо, так как изменение задания и нагрузки происходит в обоих направлениях. Далее с помощью

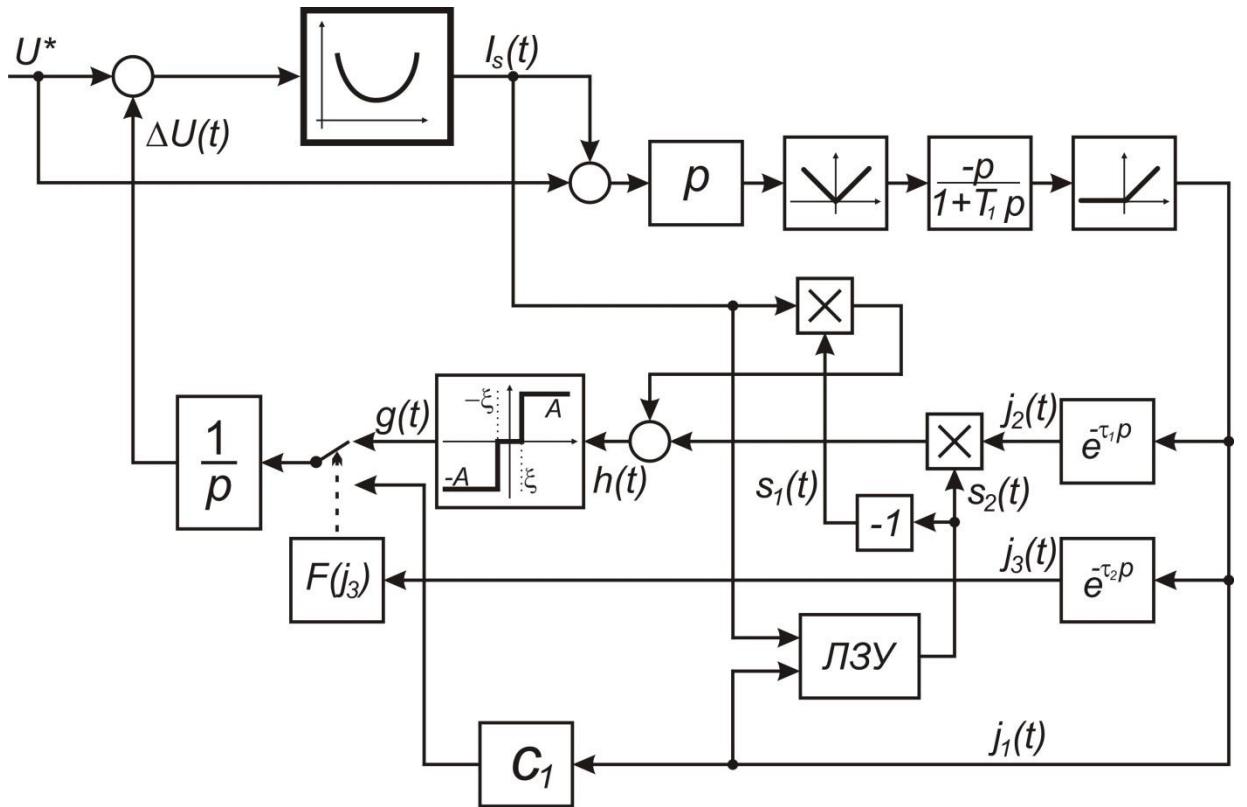


Рис. 3.16 Уточненная функциональная схема СЭР для СДПМ

звеньев чистого запаздывания формируется еще два импульса через время τ_1 и τ_2 , таким образом, чтобы сначала действовал тестовый импульс, затем переключился ключ, а затем только последовал рабочий импульс, т.е. $\tau_1 > \tau_2$. Во время подачи тестового импульса активируется логико-запоминающее устройство (ЛЗУ), в котором определяется знак функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$ после определения знака тестовый импульс исчезает, однако знать эти знаки необходимо во время всего поиска экстремума, поэтому в данном блоке реализована функция запоминания. Блок, реализующий функцию $F(j_3)$ позволяет изменять состояние ключа с приходом нового импульса переключения. Строго говоря, для полноценной реализации СЭР требуется блок, формирующий импульс сброса системы в исходное состояние. Этот блок должен переводить ключ в нижнее состояние (реагирование на тестовый импульс), переводить в исходное состояние ЛЗУ и препятствовать реагированию формирователя импульсов на изменение тока во время поиска экстремума (реакция должны быть только когда СДПМ работает в

установившейся точке). Из схемы видно также, что изменяя коэффициент c_1 можно влиять на чувствительность системы на тестовый сигнал, а изменяя значение A можно изменять скорость поиска экстремума.

3.6. Компьютерная модель экстремального регулятора СДПМ

Реализация компьютерного прототипа системы экстремального регулирования для СДПМ осуществлялась для функции, имеющей экстремум, параболы вида

$$I_s(U_s) = k(U_s - B)^2 + D. \quad (3.10)$$

Программная модель была разработана в приложении *Matlab*, с использованием стандартных блоков из пакета *Simulink* (Рис. 3.17). СДПМ на текущем этапе моделируется, как было ранее отмечено блоком с экстремальной функцией (*Subsystem*). В качестве задатчика напряжения используется блок (*Zadatchik1*), который моделирует разгон электропривода с обычным U/f -управлением. Имитация изменения заданной скорости осуществляется блоком *Load*. Для реализации процесса поиска экстремума, в соответствии с алгоритмом, необходимы блоки анализа нагрузки и заданной скорости. Эти роли выполняют блоки “*Speed an*” и “*Load an*”. Если в случае с анализом изменения заданной скорости (и, как следствие, напряжения) входом блока является только заданное значение напряжения, то в блоке анализа нагрузки (тока статора) входами служат и другие сигналы, которые препятствуют появлению ложных срабатываний блока. Значение тока статора изменяется как в процессе разгона, так и торможения двигателя, поэтому при отсутствии дополнительных ограничений, данный блок будет некорректно запускать процесс поиска экстремума. Блоки анализа скорости и нагрузки

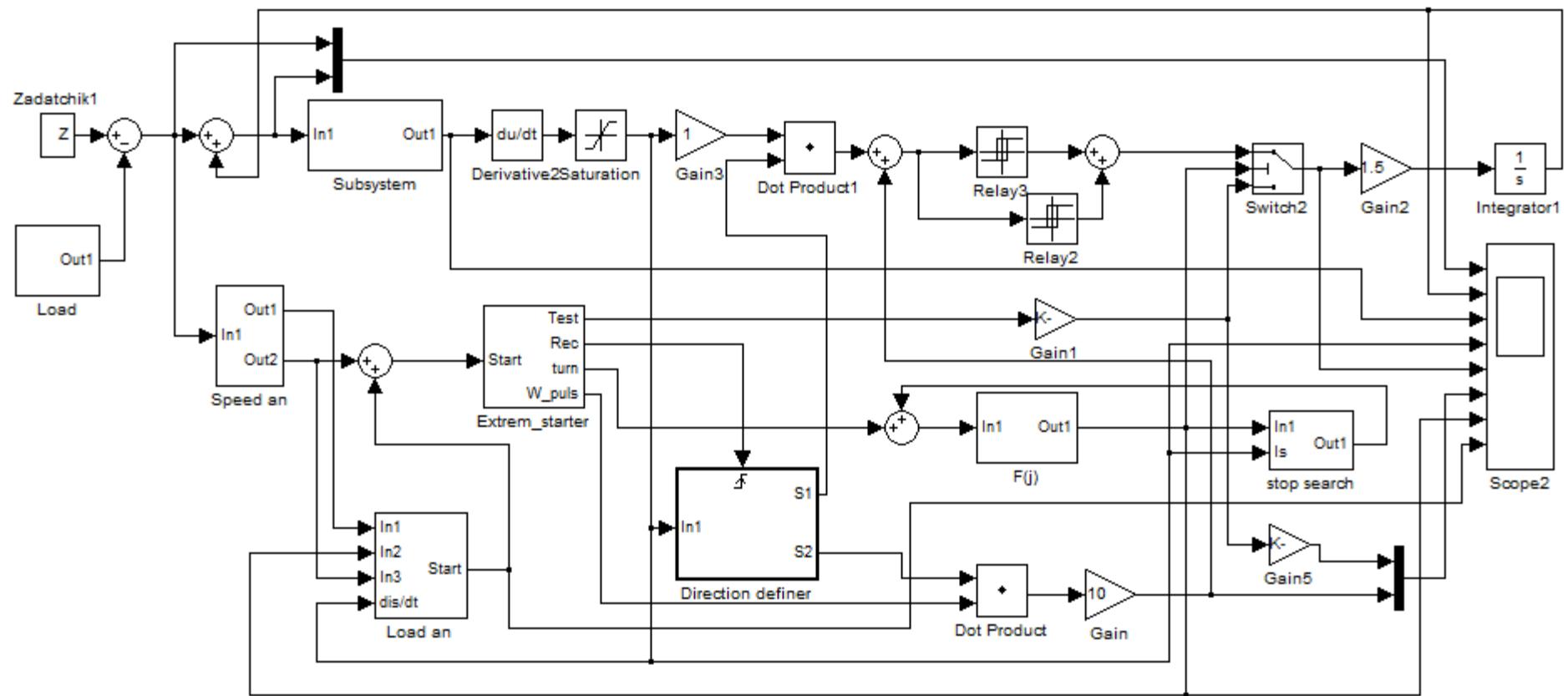


Рис. 3.17 Программная модель СЭР

формируют импульсы на блок “*Extreme_starter*”, обеспечивающий формирование тестового и рабочего импульсов, сигнала записи знаков поиска направления и сигнала переключения тумблера “*Switch2*”.

Блок “*Extreme_starter*” обеспечивает создание импульсов в соответствии с необходимыми временными задержками и длительностями импульсов (Рис. 3.18). Практически одновременно с импульсом старта возникает тестовый импульс, обеспечивающий оценку направления поиска экстремума. Во время тестового импульса формируется импульс записи, который поступает на блок “*Direction Definer*”. Через определенное время формируется импульс переключения. И в последнюю очередь, уже после переключения тумблера, формируется рабочий импульс.



Рис. 3.18 Импульсы старта поиска экстремума

На вход блока “*Direction Definer*” поступает значение производной тока, поэтому во время тестового импульса в соответствии с последними четырьмя уравнениями системы (3.9) формируются значения функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$, а при поступлении сигнала записи эти значения сохраняются на весь период поиска экстремума.

Импульс переключения поступает на блок функции $F(j)$, который формирует сигнал переключения тумблера и задействует канал формирования

сигнала приращения напряжения через рабочий импульс и производную тока. В исходное состояние, т.е. ожидание тестового импульса, тумблер переводится импульсом, поступающим с блока “*stop search*”, который формирует импульс в момент, когда производная тока становится равной нулю, что означает достижение экстремума.

Канал формирования приращения напряжения включает: блок производной “*Derivative*”, блок умножения ”*Dot production1*” для формирования верного знака между производной тока и напряжения, сумматор обеспечивающий сложение с рабочим импульсом, релейные элементы, реализующие характеристику в соответствие с блоками функциональной схемы (Рис. 3.16), усилитель ‘*Gain2*’ и интегратор “*Integrator1*”. В режиме ожидания ключ включен таким образом, что тестовый импульс подается напрямую через усилитель на интегратор.

Проверка работоспособности схемы осуществляется тремя способами изменения состояния СДПМ. Во-первых, запуск системы, который характеризуется линейным изменением «напряжения» на входе экстремального блока. Задание формируется таким образом, чтобы изначально система оказалась не в точке минимума (рис. 3.13). Во-вторых, проверка работоспособности системы при изменении задания. Задание следует также изменять как вправо, так и влево от экстремума. В-третьих, следует оценить работоспособность системы при изменении экстремальной характеристики, т.е. при дрейфе координат точки минимума.

В первом случае (Рис. 3.19) имеем нарастание сигнала задания до значения ниже точки экстремума, затем положительное изменение сигнала и затем смещение экстремальной характеристики вправо по оси. Для определенности моделирования уравнение (3.10) взято с коэффициентами

$$I_s(U_s) = 0,1(U_s - 50)^2 + 20. \quad (3.11)$$

Очевидно, что минимум функции (3.11) достигается в точке $U_s=50$, а значение функции при этом $I_{smin}=20$, соответственно при любых изменениях

состояния системы СЭР должна формировать такое приращение к заданию напряжения, чтобы ток статора стремился к значению I_{smin} . В момент программного времени 0.1 с, начинается нарастание сигнала задания до значения 40В. По окончанию переходного процесса возникает тестовый импульс, переключается состояние ключа и с рабочим импульсом начинается поиск экстремума. Увеличенная диаграмма возникновения импульсов показана на рисунке 3.20. Видно, что приращение напряжения равномерно увеличивается (на вход интегратора подается постоянное значение) до тех пор, пока производная не приблизится к нулевому значению. Переключатель возвращается в исходное состояние с некоторым запаздыванием, чтобы не «проскочить» точку минимума.

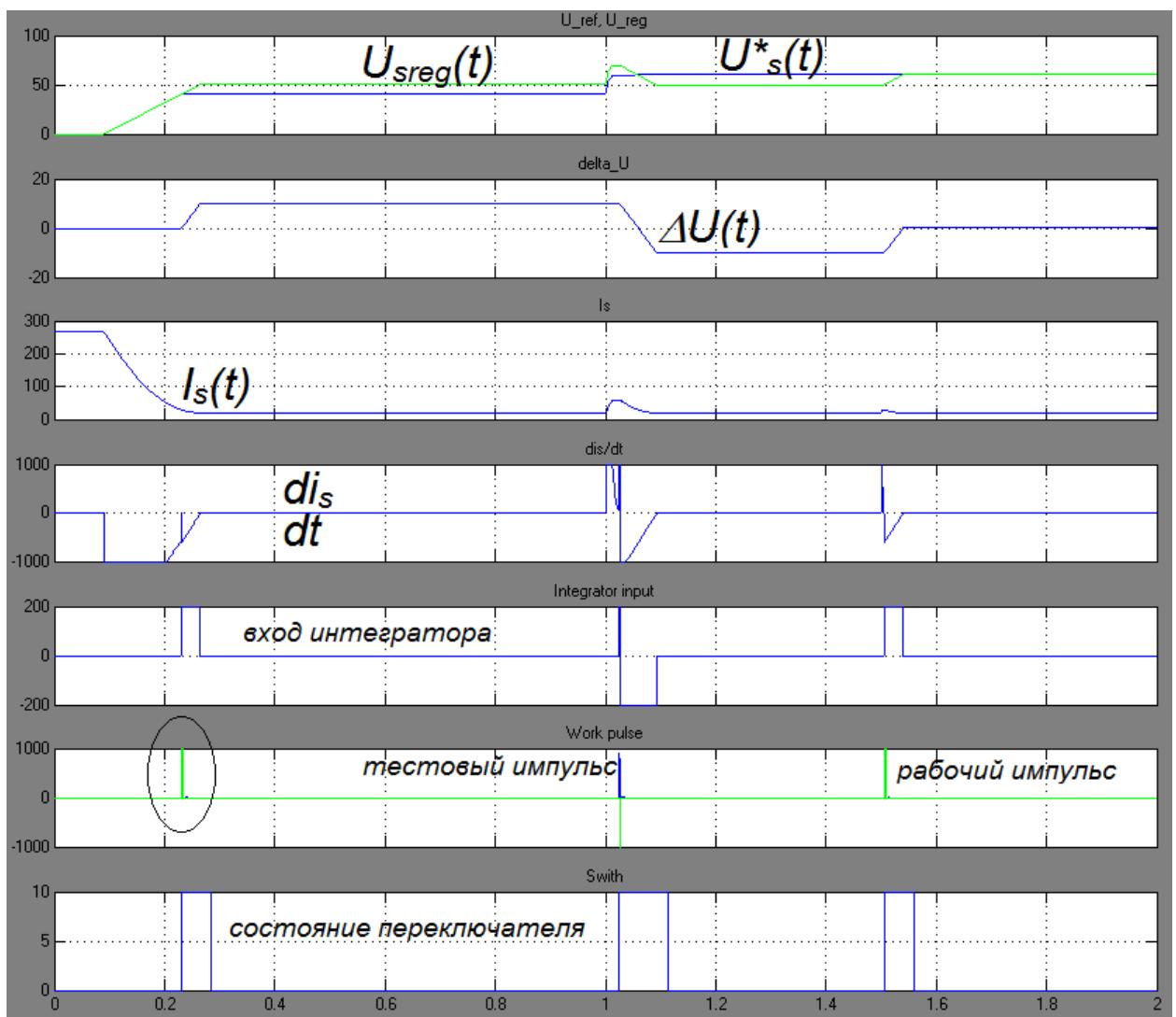


Рис. 3.19 Диаграмма работы СЭР при задании меньше точки минимума

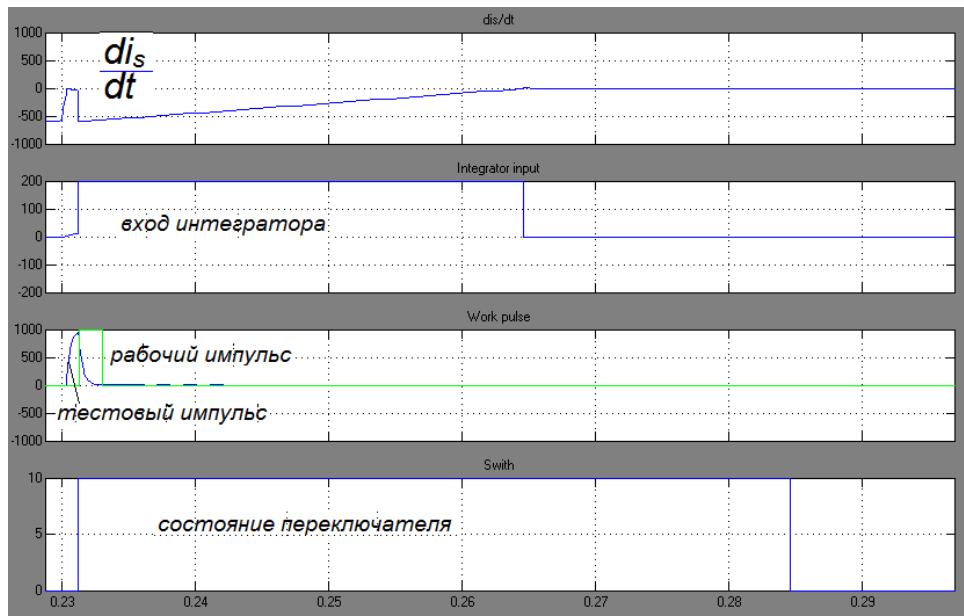


Рис. 3.20 Увеличенная диаграмма работы СЭР при старте поиска экстремума

В момент времени 1с возникает изменение задания напряжения, которое вызывает смещение рабочей точки с экстремальной позиции. После окончания переходного процесса снова возникает тестовый импульс, а далее – рабочий, однако из-за того, что изменение задания привело к смещению рабочей точки вправо от экстремума (рис. 3.13) рабочий импульс уже должен быть отрицательного знака, что и видно при работе системы.

В момент времени 1,5с возникает смещение характеристики вправо (рис. 3.13) уже без изменения задания по напряжению. Значение напряжения не соответствует минимальному значению (точка \mathcal{E}^* , рис. 3.13), поэтому вновь нужно запустить процесс поиска экстремума. На диаграмме рабочий и тестовый импульс одинакового знака, так как поиск требуется вести в сторону увеличения напряжения.

В другом случае (рис. 3.21), первоначальное задание формируется таким образом, что рабочая точка оказывается справа от точки минимума (0,1с), изменение задания смещает рабочую точку влево от минимума (1с), а дрейф характеристики влево (1,5с) переводит рабочую точку также влево. Рабочие импульсы соответственно возникают с отрицательным знаком, когда рабочая точка оказывается справа от точки экстремума, и с положительным знаком, если рабочая точка – слева.

Увеличение диаграммы выхода экстремальной функции, «тока статора» (рис. 3.22) показывает, что минимальное значение (20A) достигается при любых изменениях состояния с точностью выше 0.025%, что свидетельствует о работоспособности системы.

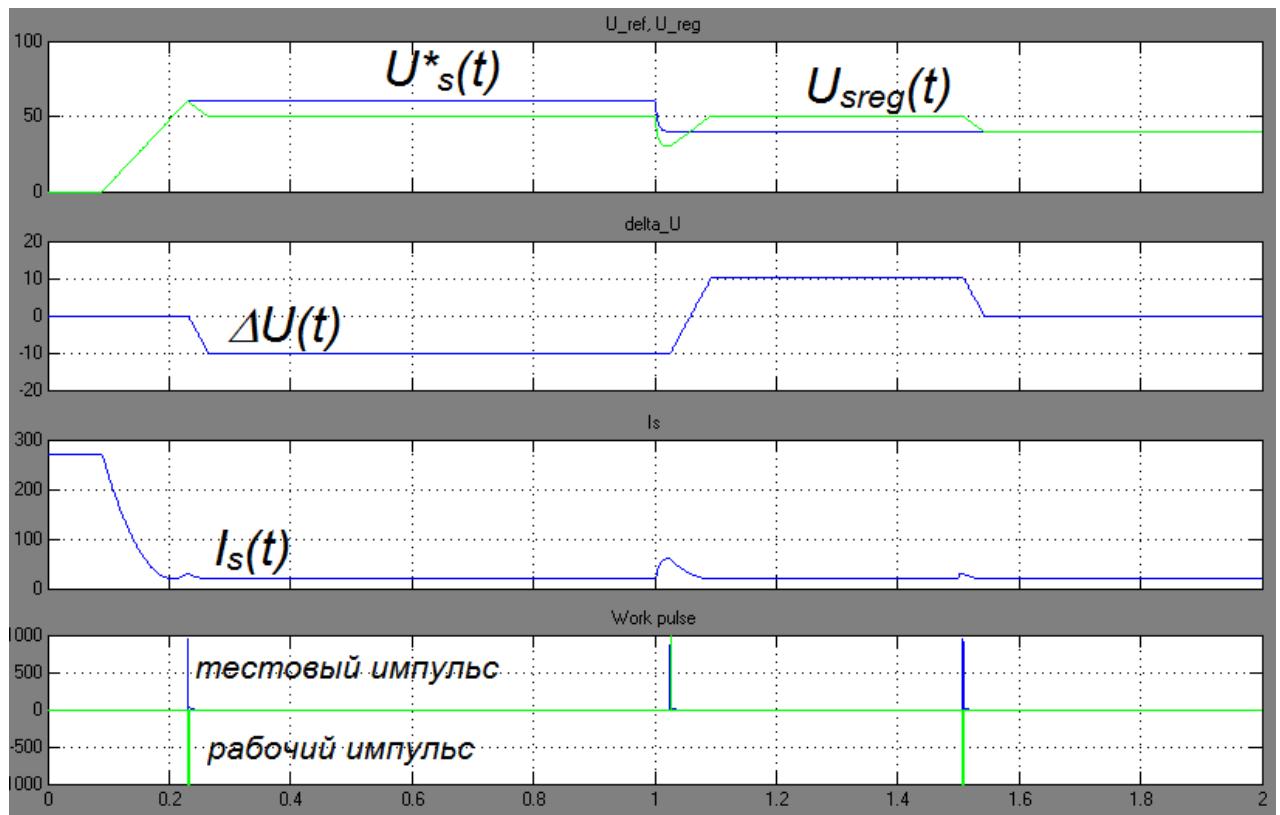


Рис. 3.21 Диаграмма работы СЭР при задании больше точки минимума

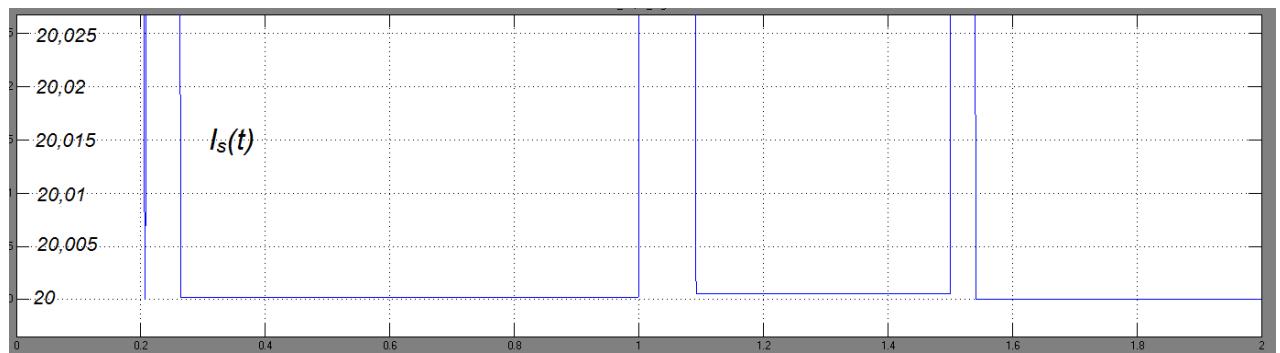


Рис. 3.22 Диаграмма значения тока статора $I_s(t)$ при поиске экстремума

3.7. Выводы по третьей главе

В настоящей главе получены следующие результаты:

- разработана компьютерная модель бездатчикового частотного U/f -управления СДПМ со стабилизирующим блоком, позволяющая исследовать работу электропривода на базе СДПМ. С помощью модели подтверждено, что электродвигатель устойчиво работает при задании частоты от 10 до 130 Гц, и не выпадает из синхронизма, а при набросе нагрузки номинальным моментом динамическая ошибка составляет меньше 5%;
- предложена методика проектирования бездатчикового частотного U/f -управления СДПМ на основании разработанной компьютерной модели. Для выбора коэффициентов стабилизирующего блока необходимо установить параметры электропривода в модель и провести анализ временных диаграмм работы системы. Методика позволяет обеспечить рабочесть системы при более чем шестикратном изменении параметров электропривода;
- разработан алгоритм поиска оптимального значения напряжения статора СДПМ обеспечивающий автоматический поиск такого напряжения статора, при котором ток статора оказывается минимальным;
- на основе разработанных функциональной схемы и системы уравнений экстремального регулятора разработан прототип компьютерной модели экстремального регулятора напряжения статора СДПМ;
- с учетом стабилизирующего блока, методики его наладки и возможности оптимизации энергоэффективности работы частотного управления СДПМ система удовлетворяет сформулированным техническим требованиям и способна обеспечить регулируемую работу гидравлической системы;
- для проверки адекватности методики построения системы СЭР для СДПМ необходимо провести адаптацию компьютерных моделей бездатчиковой системы U/f -управления СДПМ со стабилизирующим блоком, и экстремального регулирования напряжения статора СДПМ и провести исследования с помощью экспериментов и моделирования.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Исследование модели стабилизированного U/f -управления СДПМ

Представленная в третьей главе компьютерная модель U/f -управления синхронного двигателя с постоянными магнитами, благодаря стабилизации, позволяет исследовать поведение СДПМ при различных нагрузках и задании скорости, изменять при этом параметры управления (амплитуду напряжения статора и частоту).

В данном параграфе с помощью модели предполагается подтвердить экстремальный характер зависимости тока статора от амплитуды напряжения статора, уточнить характер зависимости и условия дрейфа экстремальной точки.

В модели СДПМ (Рис. 3.6) блок “ U_{q2} ” Позволяет изменять амплитуду напряжения статора. По умолчанию в системе управления предусмотрено пропорциональное соотношение между амплитудой питающего напряжения и частотой, причем соотношение $U/f = const$, поэтому в указанном блоке задается значение напряжения соответствующее 50Гц задания частоты, а значение напряжения в любой точке f^* будет определяться пропорционально. Нагрузка формируется блоком “*Zadatchik2*” И подается на моментный вход электродвигателя в один и тот же момент времени. По истечению переходного процесса измеряется амплитуда тока статора.

Для каждой рабочей точки статической характеристики необходимо найти оптимальную точку регулировочной характеристики. Для этого будем изменять задание частоты питающего напряжения от 10 до 60 Гц с шагом 10 Гц. Нагрузку будем изменять от 10 до 120 Нм с шагом 10 Нм. Для возможных семидесяти двух точек необходимо, изменяя напряжение от 160 до 240 В с шагом 5 В, определить наличие экстремума и значение напряжения, соответствующее минимальному току статора.

Моделирование проводится с помощью задания из рабочей области программы *Workspace*. Проведение эксперимента осуществляется следующим образом. Сначала задается необходимая скорость электродвигателя, амплитуда напряжения при этом максимальная – 240 В, затем по окончанию переходного процесса увеличивается нагрузка на 10 Нм. При такой нагрузке напряжение постепенно уменьшается с 240 В до 160 В с шагом в 5 В, время через которое изменяется задание напряжения подобрано таким образом, чтобы следующее изменение было не раньше окончания переходного процесса по току. После достижения 160 В задание напряжения устанавливается обратно до значения 240 В, увеличивается нагрузка на 10 Нм и процесс изменения напряжения повторяется. Временная диаграмма изменения нагрузки и напряжения для определенной частоты показана на рисунке 4.1. Из рисунка можно определить значение напряжения, соответствующее минимальному значению тока статора для любого значения нагрузки из диапазона. Также на рисунке видно, что снижение напряжения приводит к уменьшению тока лишь до определенного значения, после которого дальнейшее снижение напряжения приводит к возрастанию тока.

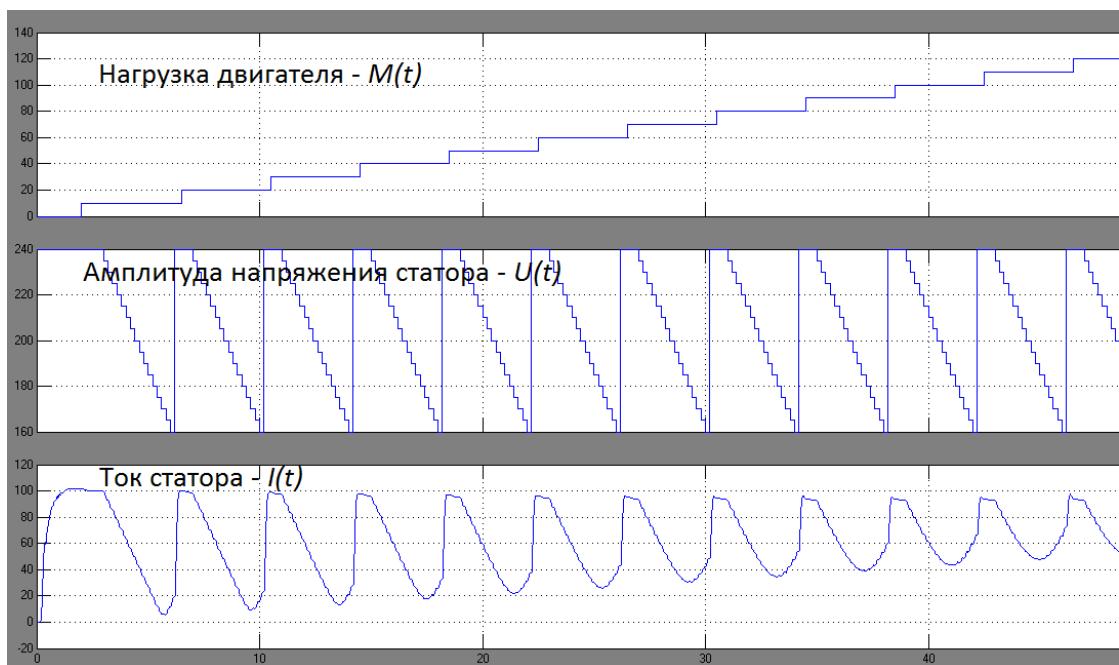


Рис. 4.1 Временная диаграмма моделирования при задании частоты 30 Гц

После изменения напряжения для каждого значения нагрузки от 10 до 120 Нм эксперимент повторяется, но уже устанавливается другое задание частоты.

Результаты проведенного моделирования сведены в таблице 4.1, в которой приведены значения напряжения, соответствующие минимальному току статора для фиксированной нагрузки и частоты. Стоит отметить, что значения напряжения в ячейках соответствуют значению напряжения при 50Гц, и при изменении частоты фактическое значение напряжения будет пропорционально изменяться. Своего рода, приведение напряжения статора к номинальному значению сделано для сравнения и наглядности.

Таблица 4.1. Значения оптимального напряжения

Нагрузка, Нм	Задание частоты вращения, Гц											
	10		20		30		40		50		60	
	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А
10	175	4,37	175	5,50	170	5,4	170	5,05	170	4,9	170	4,8
20	180	8,7	175	8,7	175	9	175	9,3	170	9,5	170	9,3
30	185	12,97	180	13,9	175	13,1	175	13,1	175	13,2	175	13,4
40	190	17,33	180	17,4	175	17,6	175	17,5	175	17,4	175	17,5
50	195	21,79	185	22,1	180	21,8	175	21,9	175	21,8	175	21,8
60	200	26,14	185	26,1	180	26,2	180	26,3	175	26,2	175	26,1
70	205	30,37	190	30,5	180	30,7	180	30,5	180	31,3	175	30,7
80	210	34,71	190	34,7	185	34,8	180	34,7	180	34,7	180	34,9
90	215	39,10	195	39,3	185	39,1	185	39,3	180	39,1	180	39
100	220	43,39	195	43,5	190	43,5	185	43,5	180	43,5	180	43,4
110	-		200	47,7	190	47,7	185	47,7	185	47,8	180	47,9
120	-		200	52,3	190	52,3	190	52,3	185	52,1	185	52,15

Как видно из таблицы для энергоэффективного управления электродвигателем значение напряжения необходимо изменять как с изменением задания частоты, так и с изменением нагрузки. При 10 Гц задания частоты и нагрузки более 110 Нм, наблюдалось выпадение двигателя

из синхронизма. Такой эффект можно связать с изменением соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями.

Из временной диаграммы (рис. 4.1) видно, насколько важно работать в точке с оптимальным значением напряжения – некорректный подбор амплитуды питающего напряжения может вызывать десятикратное увеличение статорных токов.

Более наглядно продемонстрировать изменения оптимального напряжения при изменении нагрузки и частоты можно, построив поверхность оптимальных значений (рис. 4.2). Поверхность образуется путем соединения точек значений оптимального напряжения. Цвет поверхности соответствует определенному значению напряжения. Из графика видно, что наибольшее напряжение требуется при максимальной нагрузке и при минимальных заданиях частоты вращения. С ростом частоты вращения допустимо снизить напряжение статора даже при сохраняющейся нагрузке.

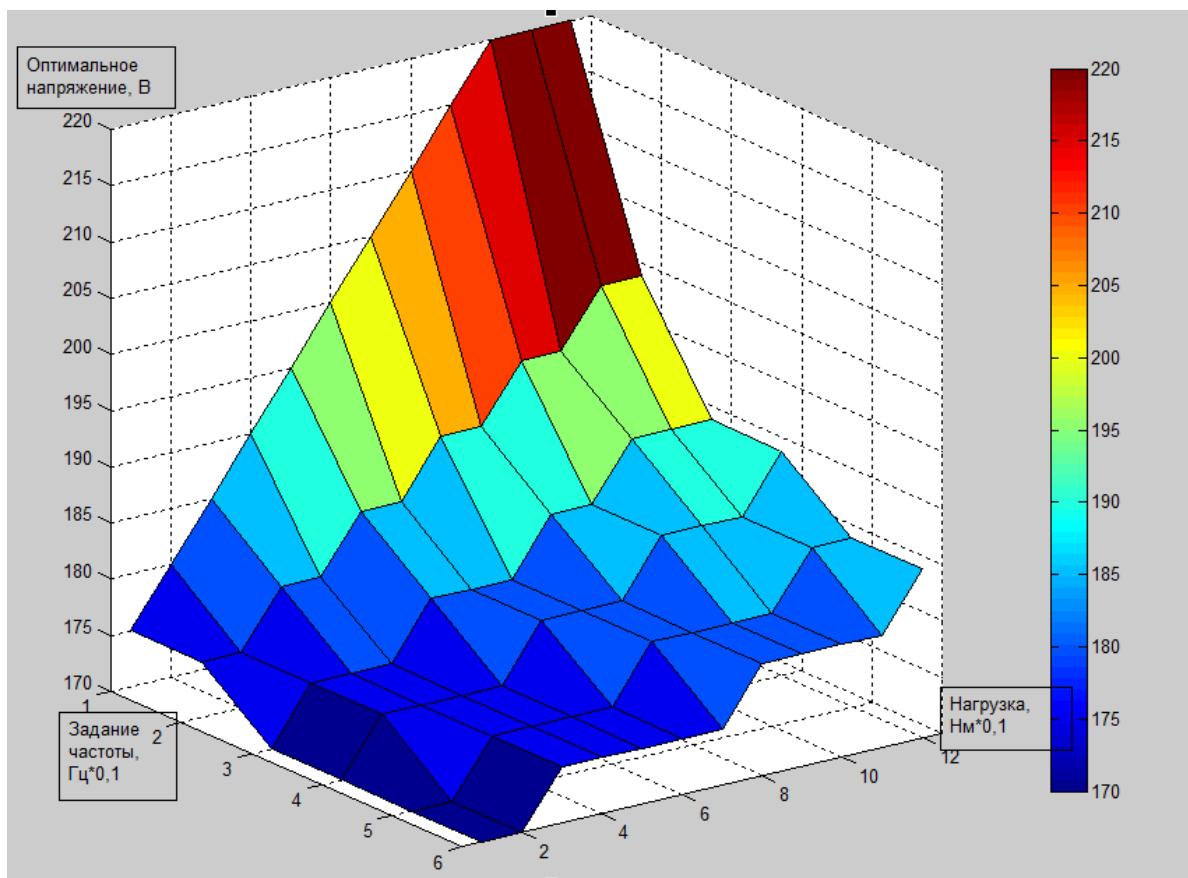


Рис. 4.2 Поверхность оптимальных значений напряжения статора

4.2. Экспериментальное исследование СДПМ с преобразователем частоты

Проведение экспериментальных исследований осуществлялось на базе электродвигателя с постоянными магнитами ЭДБН-25 производства ОАО «НПО Электромашина» (г. Челябинск), который управлялся от преобразователя частоты *Altivar 71* производства *Schneider Electric*. В качестве нагрузки использовалась аналогичная электрическая машина в генераторном режиме. На стенде [106] использовались динамометрический датчик, позволяющий снимать значения момента на валу электродвигателя, датчик скорости, объединенный с датчиком момента, заданные частота и амплитуда питающего напряжения определялись на панели преобразователя частоты (ПЧ). Устройства измерений были поверены и откалиброваны.

В отличие от моделирования экспериментальные исследования проводились по несколько другому алгоритму. В первую очередь устанавливались балластные сопротивления в цепь нагрузочной машины, для установки определенного значения нагрузки. При заданной нагрузке устанавливалось значение номинального напряжения статора при 50Гц и далее, последовательно изменяя задание частоты вращения, снимались параметры тока статора.

Процесс пуска, наброс и сброс нагрузки ЭДБН25 (рис 4.3а, б) показывает, что электродвигатель работает без автоколебаний и выхода из синхронизма, в то время как обычно синхронные двигатели без демпферной обмотки имеют склонность к колебательности. Другие эксперименты [23, 67] показывают, что двигатель без статической ошибки отрабатывает задание по скорости и механическая характеристика является абсолютно жесткой. В режимах динамических нагрузок электропривод имеет частотную характеристику близкую к апериодическому звену первого порядка, а ударные нагрузки с величиной момента выше 100% от номинального не вызывают выпадения из синхронизма.

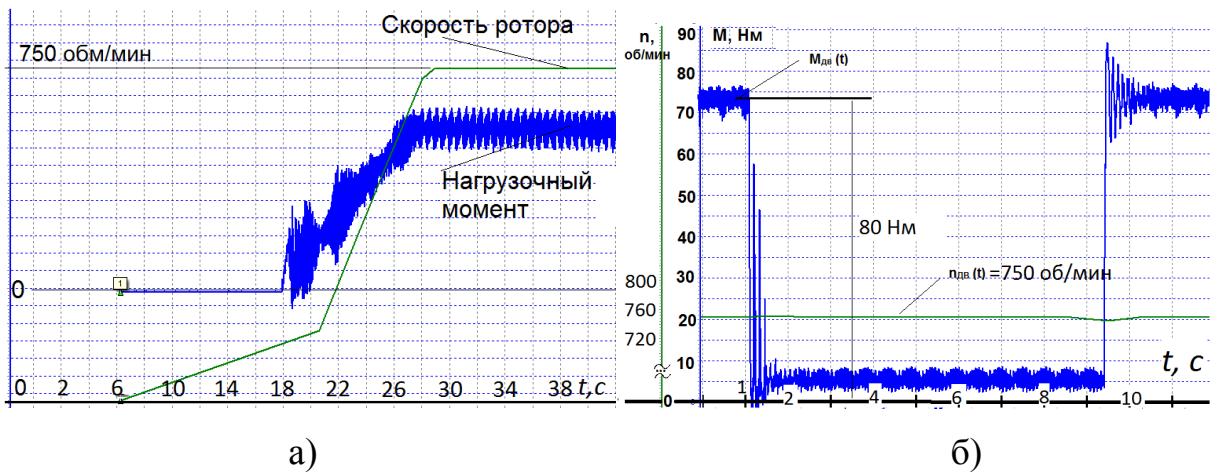


Рис. 4.3 Временные диаграммы разгона (а) и сброса/наброса (б) нагрузки двигателя ЭДБН25 при экспериментальных исследований

Массив данных снятых в процессе проведения экспериментов позволяет построить ряд характеристик для оценки изменения оптимальной точки напряжения при различной нагрузке и частоте вращения.

Влияние изменения оптимальной точки от задания частоты питающего напряжения можно обнаружить на характеристике $I_s=f(U_s)$ (рис. 4.4) при различных частотах. На графике видно, что смещение экстремума функции (оптимальной точки тока) с ростом частоты происходит влево, то есть в сторону уменьшения напряжения статора.

При изменении нагрузки на фиксированной частоте вращения электродвигателя (рис. 4.5) оптимальная точка также меняется, однако с ростом нагрузки минимум тока достигается при большем значении напряжения. На рисунке изображены три характеристики: при холостом ходу, при 25% от максимальной нагрузки и при 50% от максимальной нагрузке. Частоты вращения электродвигателя составляла 25 Гц. При большей частоте характер смещения оптимальной точки с увеличением нагрузки остается неизменным, т.е. при росте нагрузки оптимальная точка смещается вправо.

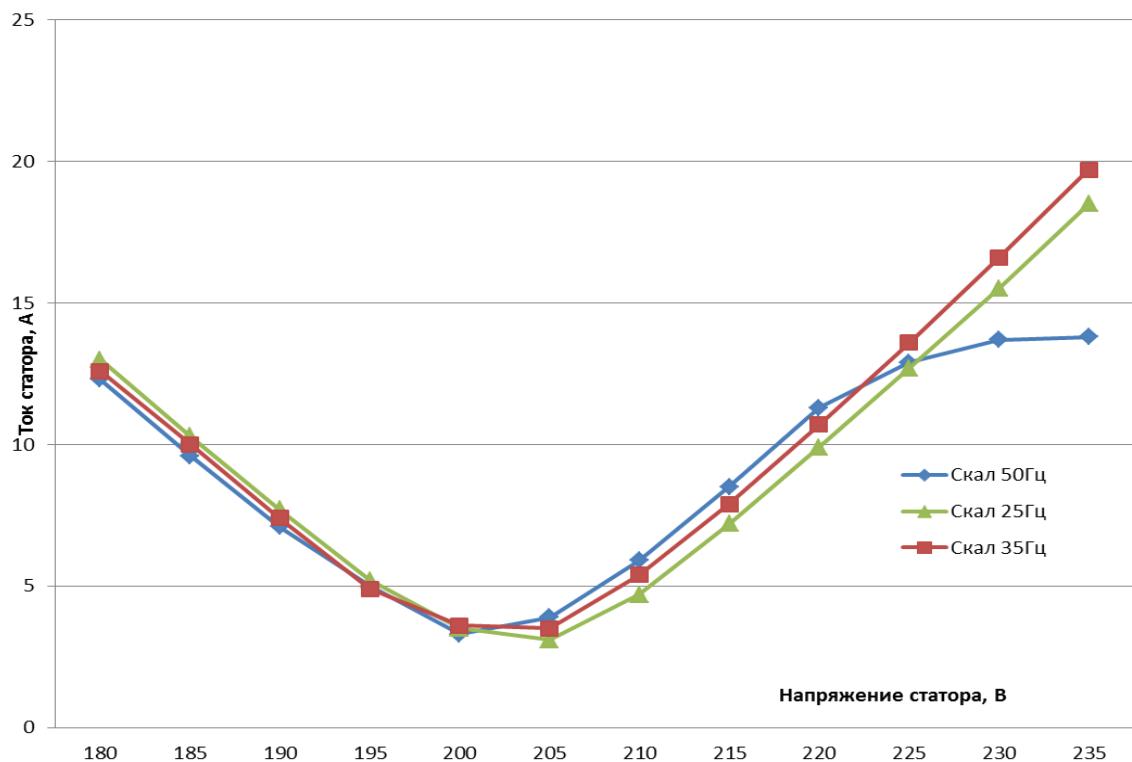


Рис. 4.4 Зависимость тока статора от напряжения статора на холостом ходу при изменении задания частоты

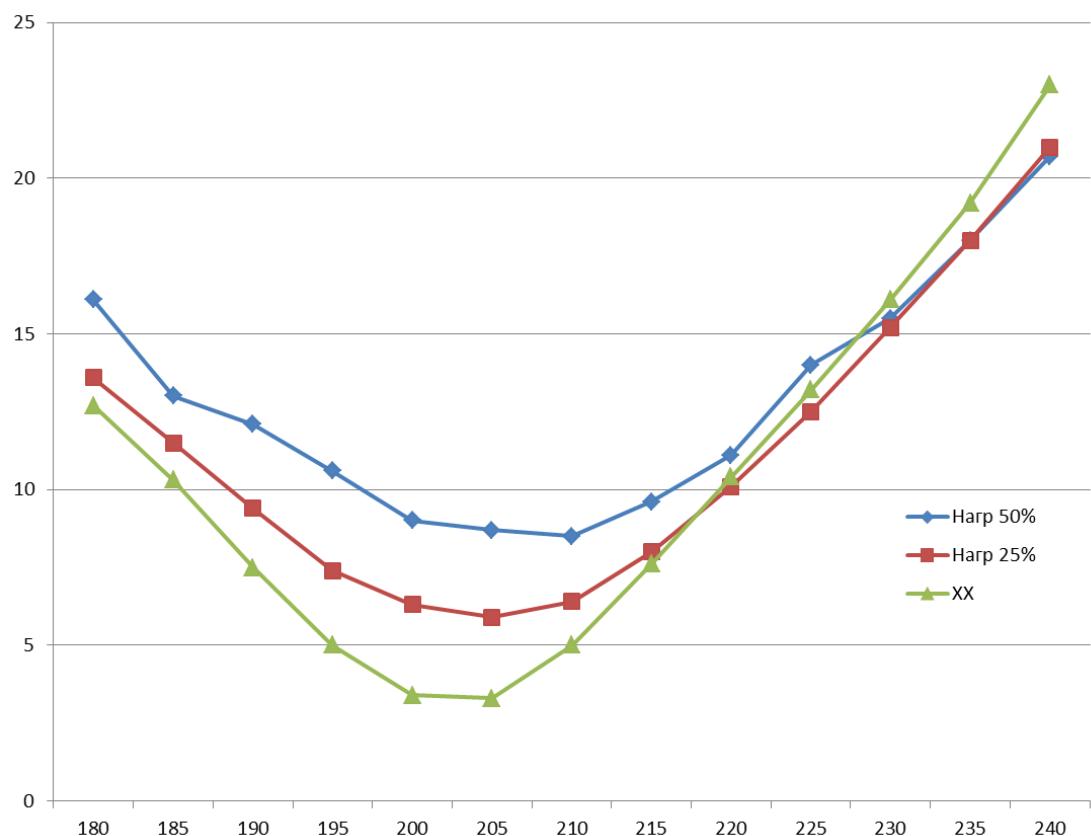


Рис. 4.5 Зависимость тока статора от напряжения при изменении нагрузки

Другой характеристикой показывающей изменения оптимального значения напряжения в зависимости от частоты вращения является график изменения тока статора при определенном напряжении. На рисунке 4.6. видно, что значения тока статора, при некорректно выбранном напряжении с ростом частоты может значительно увеличиваться. Например, при задании частоты вращения 10 Гц наиболее минимальное значение тока статора (3,2 А) достигалось при напряжении 210В, но с ростом частоты, при 50Гц при том же напряжении 210В значение тока статора возросло почти в два раза (до 6А). После значения в 15Гц минимальное значение тока достигается при напряжении 200В. При напряжении 210В в интервале от 12 до 40 Гц ток статора несколько увеличивается от минимального значения. Такое увеличение связано с методикой проведения эксперимента: в процессе снятия характеристик напряжение изменялось дискретно с 210В до 205В и далее до 200В. Если на графике отобразить линию тока при изменении частоты при напряжении 205В, а кроме этого провести ряд уточняющих экспериментов с шагом 1В, то плавно изменяя напряжение одновременно с частотой, можно «скользить» по минимальному значению тока статора.

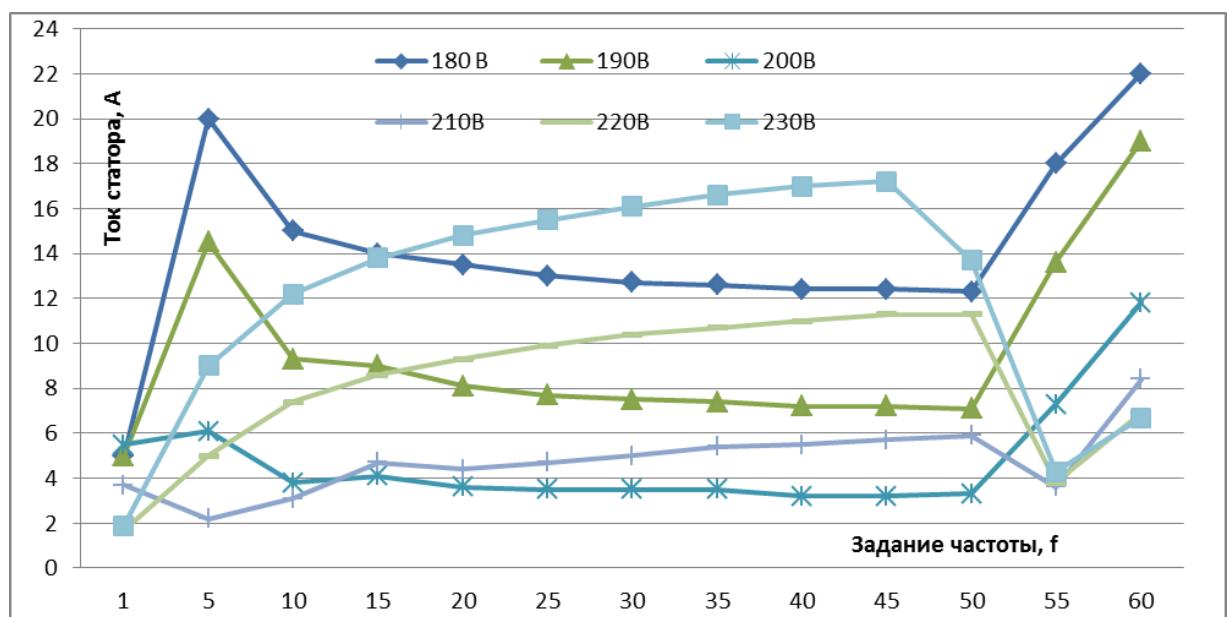


Рис. 4.6 Изменение тока статора от заданной частоты при различных значениях номинального напряжения

Таким образом, программное моделирование и экспериментальные исследования синхронного двигателя с постоянными магнитами подтверждают, что при изменении нагрузки и при изменении частоты питающего напряжения ток статора изменяется. При этом изменяется значение оптимального напряжения, при котором достигается минимум тока статора. Некорректный выбор амплитуды питающего напряжения в произвольной рабочей точке может привести к росту статорных токов от двух до десяти раз. Предложенный ранее экстремальный регулятор должен обеспечить поиск необходимой точки по напряжению независимо от рабочей точки на механической характеристике и независимо от изменяющихся параметров электропривода.

4.3.Адаптация системы экстремального регулирования к СДПМ

Для объединения модели синхронного двигателя и системы экстремального регулирования необходимо модель СДПМ изображенную на рисунке 3.6 совместить с моделью СЭР, изображенной на рисунке 3.17. Функционально это означает замещение блока нелинейного звена на уточненной функциональной схеме (рис. 3.16) моделью электродвигателя. На вход СЭР должен подаваться сигнал задания по напряжению статора, и сигнал тока статора, выходом системы экстремального регулирования является сигнал приращения к заданию по напряжению.

Вопрос адаптации СЭР к конкретному СДПМ был бы довольно прост и сводился бы лишь к незначительной корректировке коэффициента чувствительности к производной тока и постоянной времени интегратора, который определяет скорость поиска оптимального значения напряжения. Однако, ситуация усложняется наличием инерционности в цепи статора. Оказывается, что в момент, когда возникает сигнал о поиске экстремума в обычной системе, в инерционной системе синхронного двигателя еще не закончился переходный процесс тока. Поэтому определитель знака для

дальнейшего рабочего импульса может зафиксировать неверное направление поиска экстремума. Отсюда вытекает одно из правил адаптации: сигнал на поиски экстремума должен подаваться с некоторым запаздыванием после переходного процесса.

Другой нюанс вызванный инерционностью статорной цепи СДПМ связан с чувствительностью к тестовому импульсу. Слишком короткий тестовый импульс может не вызвать изменения тока и опять знак направления поиска экстремума может быть определен неверно. Из этого следует, что сигнал тестового импульса должен не только формироваться с задержкой, но и должен быть увеличен по амплитуде и длительности. Сигнал на запись знака направления поиска экстремума также должен быть сдвинут во времени.

Следующей особенностью адаптации СЭР стала скорость изменения сигнала $\Delta U(t)$. В случае слишком быстрого изменения сигнала возникает разность фаз между сигналом тока и напряжения. Такая разность фаз приводит к тому, что в процессе изменения напряжения производная тока будет отставать и значение экстремума – нулевое значение производной тока – наступит с опозданием, когда приращение будет уже больше, чем необходимо. Система в таком случае как бы «проскочит» оптимальную точку.

За счет введения задержки перед стартом поиска экстремума, изменением длины и амплитуды тестового импульса, подбором оптимального значения постоянной времени интегратора удалось адаптировать СЭР к исследуемому типу СДПМ. Результаты моделирования представлены на рисунках 4.7 и 4.8.

Из временных диаграмм видно, что старт поиска экстремума начинается с задержкой порядка 300мс. В отличие от СЭР с идеальной системой (рис 3.19), в которой поиск экстремума начинается практически мгновенно. Тем не менее, видно, что СЭР справляется с задачей поиска экстремума и определяет оптимальное значение напряжения, при котором ток достигает минимального значения в рабочей точке.

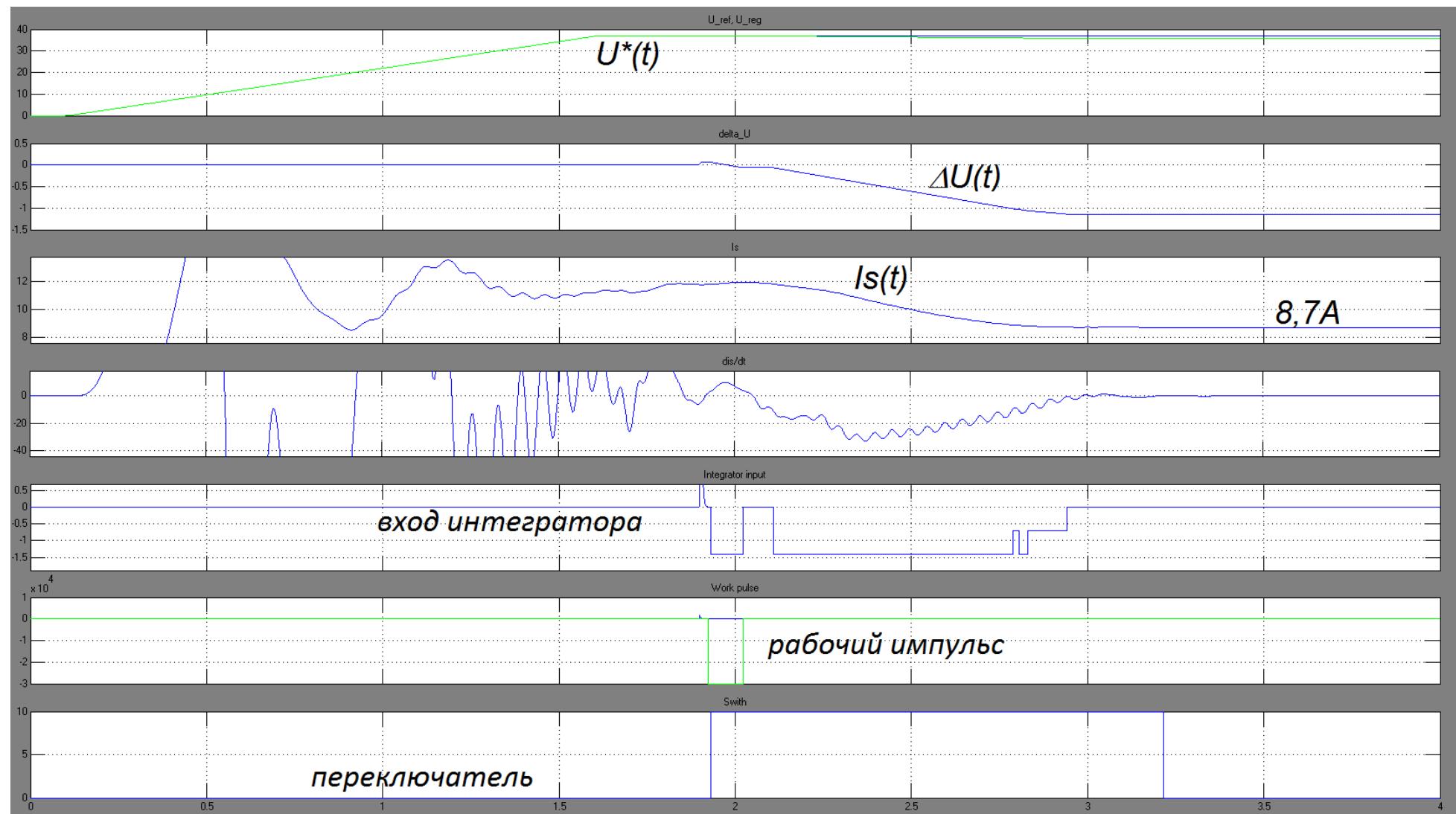


Рис. 4.7 Поиск экстремума при работе СЭР с СДПМ с установившейся скорости вращения электродвигателя 10 Гц

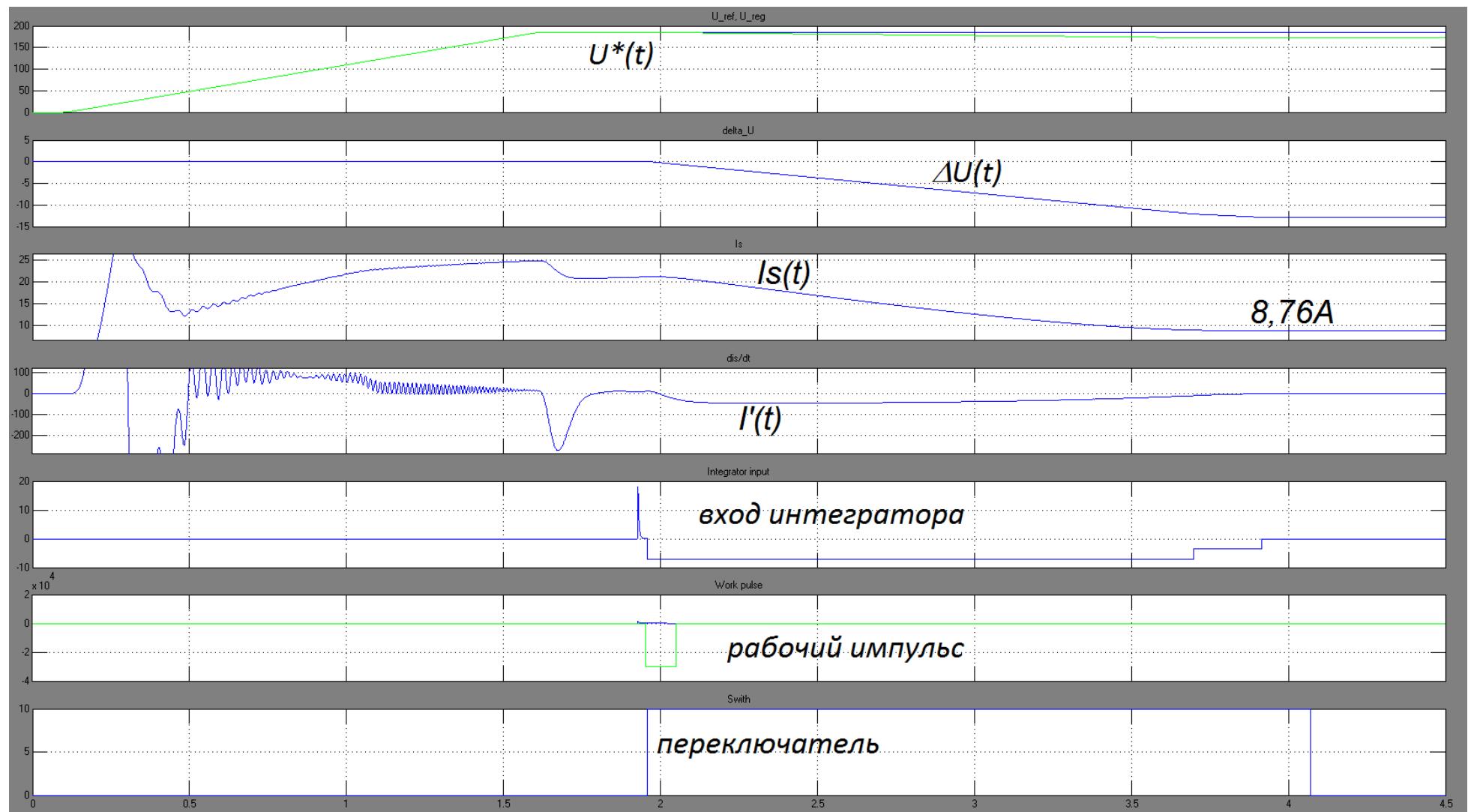


Рис. 4.8 Поиск экстремума при работе СЭР с СДПМ с установившейся скорости вращения электродвигателя 50 Гц

Оптимальные точки определяются практически с одинаковой эффективностью, как при задании в 10 Гц, так и при задании в 50 Гц. В обоих случаях нагрузка составляла 20Нм. Стоит отметить, что минимальное значение тока при 10Гц задания частоты соответствует моделированию, при котором оптимальное значение напряжения подбиралось вручную (таблица 4.1). Более того, при рабочей точке соответствующей 20 Нм и 50 Гц СЭР определила более эффективное значение напряжения и минимальное тока статора составило 8,76А против 9,5А. Это различие вызвано тем, что при ручном поиске экстремума напряжение подбиралось дискретно с шагом в 5В, в то время, как при работе СЭР напряжение изменяется плавно.

Созданная модель системы экстремального регулирования показывает свою работоспособность при управлении синхронным электродвигателем, однако имеет ряд особенностей и недостатков. Особенности работы связаны с тем, что при разных частотах вращения статорная цепь синхронного двигателя обладает различными электромагнитными свойствами, а именно изменяется индуктивное сопротивление статорной цепи. Изменение индуктивного сопротивления влечет за собой различное время реакции на тестовый сигнал при определении направления поиска экстремума. Например, если при работе на частоте вращения 50 Гц, достаточно будет задержки времени 50мс, то при работе с частотой 10Гц Такого количества времени может оказаться недостаточным, его требуется увеличивать до 100-150 мс.

Решить указанные обстоятельства можно различными методами: если электропривод работает в относительно узком диапазоне нагрузки, то временную задержку можно настроить на среднее значение соответствующее крайним значениям диапазона. Также можно воспользоваться другим, более сложным методом и связать параметр частоты вращения электродвигателя с параметром временной задержки тестового импульса. Такой способ, однако, усложняет систему и оказывается относительно медленным. Более того, как ранее было отмечено из-за инерционности статорной цепи электродвигателя

запуск поиска экстремально точки требуется откладывать до тех пор, пока не закончится переходный процесс тока. Что в совокупности замедляет весь процесс поиска экстремума на 300-400 мс.

Анализ моделирования работы СДПМ при различных частотах вращения, нагрузках и напряжениях статора, а также анализ экспериментальных исследований показывает, что перед началом поиска оптимальной точки электропривод чаще всего работает с завышенным напряжением статора. С другой стороны, рабочая точка, при которой напряжение статора будет ниже оптимального значения, является довольно опасной с точки зрения работоспособности электропривода. При таком напряжении ток по продольной оси становится отрицательным, что означает угол нагрузки больше 90° , что в свою очередь может привести к выпадению из синхронизма СДПМ. В результате оказывается, что после переходного процесса электропривода (изменение нагрузки или скорости) однозначно определяется направление поиска экстремума: напряжение статора необходимо снижать до достижения минимального значения тока статора. Соответственно отпадает необходимость в задержках времени при подаче тестового импульса и задержка перед поиском экстремума. Для начала поиска экстремума необходимо сразу подать рабочий импульс, система определения знаков при этом не участвует.

Работа СЭР с модифицированной системой подачи рабочих импульсов показана на рисунке 4.9. На электропривод подавалось различное задание частоты вращения: пуск осуществлялся на скорость 30 Гц, далее с 4с по 5с программного времени скорость снизилась до 20 Гц, и далее с 7с по 8,5с скорость изменилась до 50 Гц. На временной диаграмме видно, что рабочий импульс в отличие от предыдущего исполнения СЭР возникает практически сразу после окончания переходного процесса, что значительно ускорило процесс поиска экстремума в среднем на 600-700 мс. На диаграмме рабочих импульсов видно, что процесс поиска запускался три раза и после каждого поиска система «находила» минимальное значение тока статора.

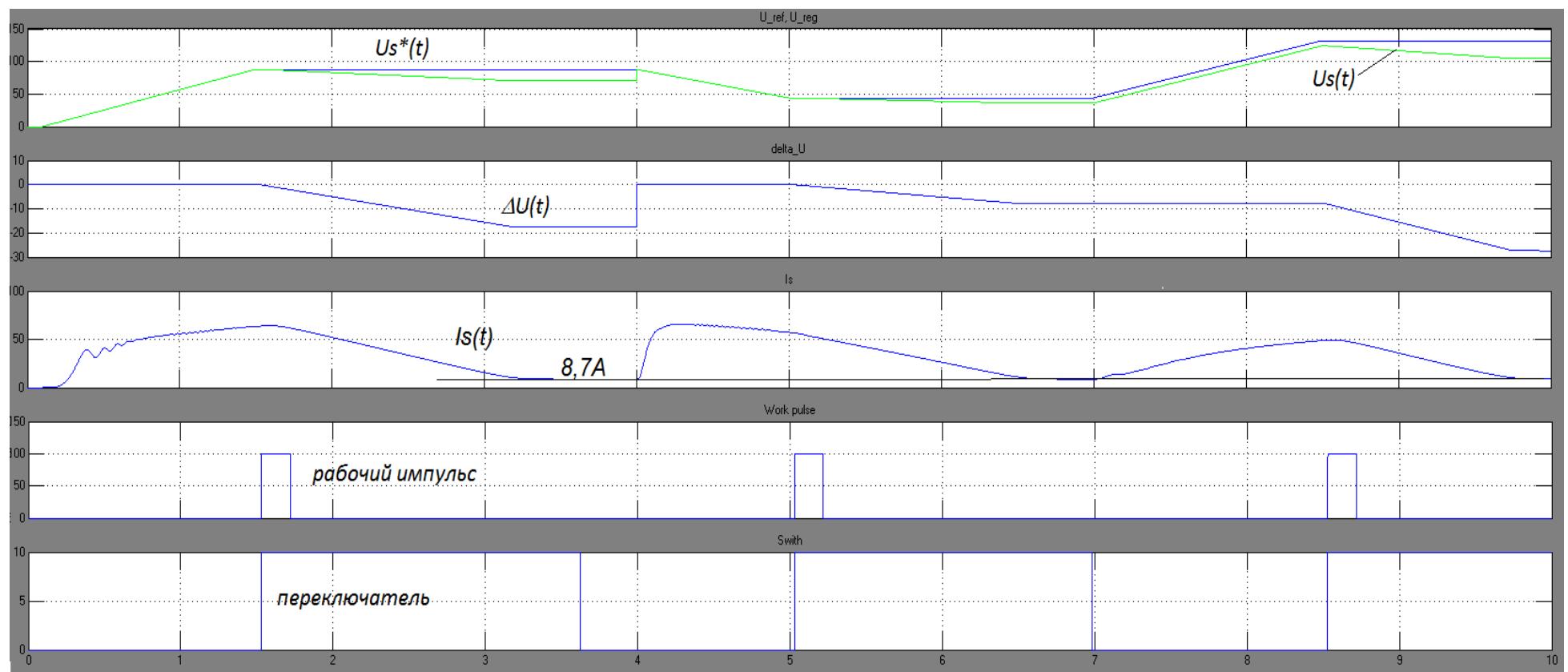


Рис 4.9 Работа модифицированной СЭР при изменении частоты вращения электродвигателя

На диаграмме добавочного напряжения $\Delta U(t)$ видно, что при старте второго переходного процесса, произошел сброс значения интегратора, что связано, как раз с условиями выпадения двигателя из синхронизма. Если посмотреть на таблицу 4.1 можно определить, что оптимальное напряжение повышается с ростом нагрузки и с уменьшением частоты вращения. Поэтому если при уменьшении угловой скорости или при увеличении нагрузки не изменять значение добавочного напряжения – появляется вероятность выпадения из синхронизма. На рис 4.9 в момент времени 4с начинается снижение задания скорости. Блок анализа переходных процессов скорости и нагрузки это фиксирует и подает команду на сброс интегратора, обнуляя значения добавочного напряжения. Тем самым, рабочая точка по напряжению вновь оказывается выше оптимального значения и, плавно уменьшая напряжение, можно «найти» оптимальную рабочую точку. При росте задания частоты «обнуления» добавочного напряжения не происходит, так как оптимальная точка должна быть ниже и при окончании переходного процесса напряжение уменьшается уже с предыдущего значения.

При сбросе и набросе нагрузки также должен подключаться блок анализа переходных процессов. На рисунке 4.8 приведены диаграммы работы электропривода при работе на 30 Гц и изменении нагрузки. В момент времени 4с скачкообразно увеличивается нагрузка на 30Нм. На диаграмме добавочного напряжения видно, что в момент возникновения нагрузки напряжение сразу возвращается в исходное состояние, что препятствует выпадению из синхронизма. При сбросе нагрузки обнуления добавочного напряжения уже не происходит. В процессе изменения рабочей точки СЭР отыскивает минимальное значение напряжения такое же, как и было найдено в ручном режиме (таблица 4.1).

Работоспособность системы проверялась на всем диапазоне нагрузки и частоты вращения электродвигателя. Установлено, что даже при самом неблагоприятном случае низкой скорости и высоком скачке нагрузки анализатор переходного процесса «успевает» обнулить интегратор.

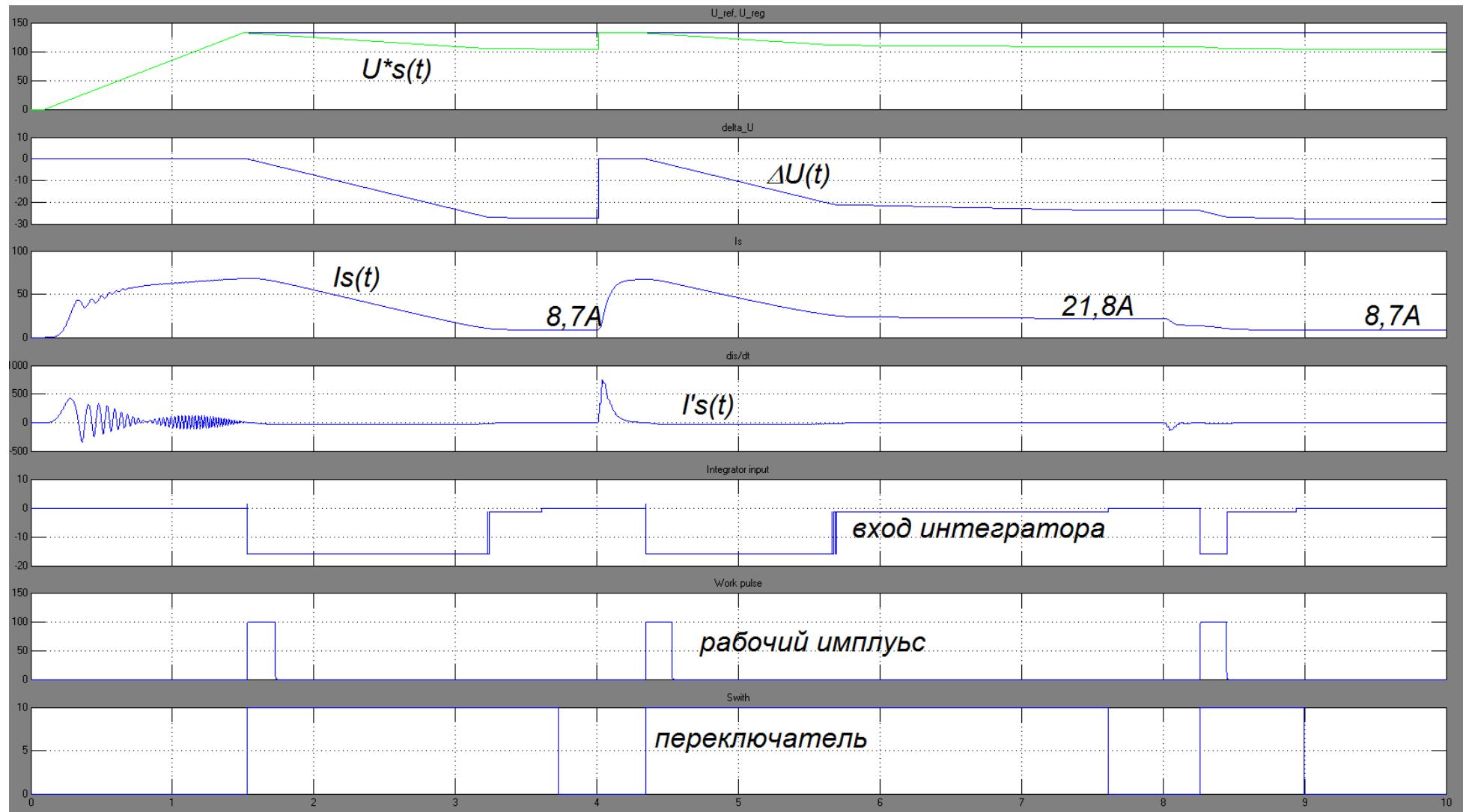


Рис 4.8 Работа модифицированной СЭР при набросе и сбросе нагрузки 50Нм

При наладке системы возникает вопрос о базовом значении напряжения, относительно которого происходит снижение при поиске оптимальной точки. Если рассматривать весь рабочий диапазон электропривода (таблица 4.1) видно, что приведенное к 50Гц оптимальное напряжение варьируется от 170 до 220 В. Если, например, базовое напряжение будет установлено на 200 В, то при росте нагрузки до 80Нм при 10Гц возникает вероятность выпадения электродвигателя из синхронизма или, как минимум высоких токов статора, даже не смотря на то, что интегратор снизит свое значение до нуля. Из этого следует, что для надежной работы электропривода во всем рабочем диапазоне в качестве базового напряжения нужно выбирать максимальное оптимальное напряжение из всех возможных рабочих точек.

При выборе максимального напряжения значение добавочного напряжения будет снижаться до нуля всякий раз, когда будет увеличиваться нагрузка или уменьшаться заданная частота вращения. Этот факт хоть и обеспечивает работоспособность электропривода во всем необходимом рабочем диапазоне, однако вводит в систему некоторую избыточность. Так, например, при нагрузке 50 Нм и снижении заданной частоты вращения с 40 до 30 Гц оптимальное напряжение должно повыситься только на 5 В, в то время как СЭР сначала переведет в ноль выход интегратора (т.е. напряжение статора будет соответствовать 220В), а только затем будет плавно снижать и достигнет значения 180В. Тем не менее, вариант, при котором напряжение из рабочей точки будет плавно повышаться - недопустим, так как характер нагрузки в рассматриваемом технологическом процессе (а также во многих других технологических процессах) носит случайный характер и изменяется скачкообразно.

Возникающее «петляние» СЭР при изменении нагрузки, безусловно, повышает длительность переходных процессов и поиска экстремума, однако для повышения скорости переходных процессов можно сформулировать определенные методы.

Один способ ускорения поиска экстремума реализуется в процессе наладки электропривода и связан с ограничением рабочего диапазона. Например, если в процессе проектирования и наладки электропривода известно, что заданная скорость не опускается ниже 30Гц, то и максимальное напряжение допустимо установить 190В. В таком случае, при последующем возникновении переходного процесса, значение амплитуды напряжения статора повысится до 190В, а снижение до требуемого напряжения в рабочей точке из диапазона будет проходить быстрее.

Другой способ связан с анализом исходных данных об оптимальных точках рабочего диапазона и приводит к некоторому усложнению алгоритма СЭР. Из таблицы 4.1 видно, что для каждой частоты вращения при максимальной нагрузке оптимальное напряжение изменяется. Вместе с этим, в отличие от определения момента нагрузки, определить заданную частоту вращения не представляется затруднительным. Поэтому, в процессе наладки можно выделить определенные диапазоны частоты вращения и установить для каждого диапазона соответствующее значение максимального оптимального напряжения. Для определенной рабочей частоты вращения скачок напряжения снизится и повысится скорость поиска экстремума.

4.4.Методика наладки СЭР для СДПМ

Учитывая то, что при эксплуатации синхронных электродвигателей система экстремального регулирования ранее не применялась, необходимо сформулировать методику, которая позволила бы применять предлагаемую систему регулирования к любому СДПМ.

Как ранее отмечалось, проблемы при переходе от одного электродвигателя к другому заключаются в инерционности цепи статора и изменении этой инерционности в зависимости от частоты вращения двигателя. Различия в инерционности требуют выбора определенного темпа поиска экстремума и различные параметры стартового тестового импульса. Значительным фактором, оказывающим влияние на работоспособность СЭР,

является базовое напряжение, которое устанавливается перед запуском системы и относительно которого происходит поиск оптимального значения напряжения. На этот параметр влияют как собственные параметры электродвигателя, так и границы рабочей зоны. В ходе моделирования и экспериментальных исследований установлено, что расчет номинального максимального рабочего напряжения можно определить как значение ЭДС рассчитанное для номинальной скорости и увеличенное на 10%. По предложенному расчету значение базового напряжения для исследуемого двигателя составило 229В.

Для подтверждения рассчитанного значения базового напряжения целесообразно провести проверку. Эта проверка может заключаться в выходе на рабочую точку и пробном изменении напряжения вниз. Если значения тока статора уменьшается, то напряжение выбрано верно. При диапазоне скорости больше 1:2 целесообразно определить базовое значение напряжения для каждого диапазона

Скорость изменения приращения напряжения, т.е. постоянную времени интегратора при поиске экстремума стоит устанавливать исходя из инерционности статорной цепи. Так если инерционность якорной цепи

определяется как $T_s = \frac{L_s}{R_s}$, то с учетом правила симметричного оптимума постоянную времени необходимо выбрать $T_{\Delta U} = 2\dots 4T_s$. При выполнении данного условия напряжение будет изменяться настолько медленно, чтобы изменения тока отслеживались системой без опоздания.

Длина тестового импульса тоже зависит от инерционности якорной цепи и определяется как $T_{puls} = 10\dots 20T_s$. Такая продолжительность связана с тем, что по окончанию переходного процесса изменения скорости или нагрузки процесс поиска экстремума запускается с некоторым опережением, т.е. когда переходный процесс уже в некоторых заданных минимальных пределах, но еще не полностью окончен. На новый переходный процесс тока, вызванный рабочим импульсом, может «наложиться» предыдущая составляющая и

изменить знак производной тока, что приведет к преждевременной остановке поиска.

Чувствительность по производной тока должна подобраться таким образом, чтобы при изменении задания напряжения релейный элемент устойчивого срабатывал.

Таким образом, методику построения СЭР для СДПМ можно свести к следующим пунктам:

- а) определить рабочий диапазон электропривода;
- б) определить количество «базовых» значений напряжения
- в) определить расчетное «базовое» значение напряжения;
- г) проверить экспериментально значение «базового» напряжения;
- д) определить скорость изменения приращения напряжения в соответствии с выражением $T_{\Delta U} = 2...4T_s$;
- е) определить длину рабочего импульса в соответствии с выражением $T_{puls} = 10...20T_s$;
- ж) определить чувствительность системы к изменению тока статора.

4.5. Энергоэффективность электропривода гидросистемы на базе СДПМ с СЭР

Диаграммы работы СЭР показывают, что статорные токи значительно снижаются при выборе оптимального значения напряжения. На основании экспериментальных исследований и моделирования можно сделать вывод о том, что снижение статорных токов в определенной рабочей точке достигается снижением напряжения. Полезная же мощность остается неизменной, так как момент не изменяется, а скорость жестко определяется частотой питающего напряжения. Изменения напряжения в процессе поиска экстремума вызывают снижение входной электрической мощности и, следовательно, повышение КПД всего электропривода.

На рисунке 4.9 видно, что по окончанию переходного процесса разгона и после изменения нагрузки график входной электрической мощности начинает сближаться с графиком полезной мощности. Если использовать электропривод с частотным управлением без адаптации напряжения, то при определенной частоте вращения с изменением нагрузки КПД может снижаться до 70%. Если же в процессе технологического процесса предусматривается изменение частоты вращения, то КПД может оказаться еще ниже.

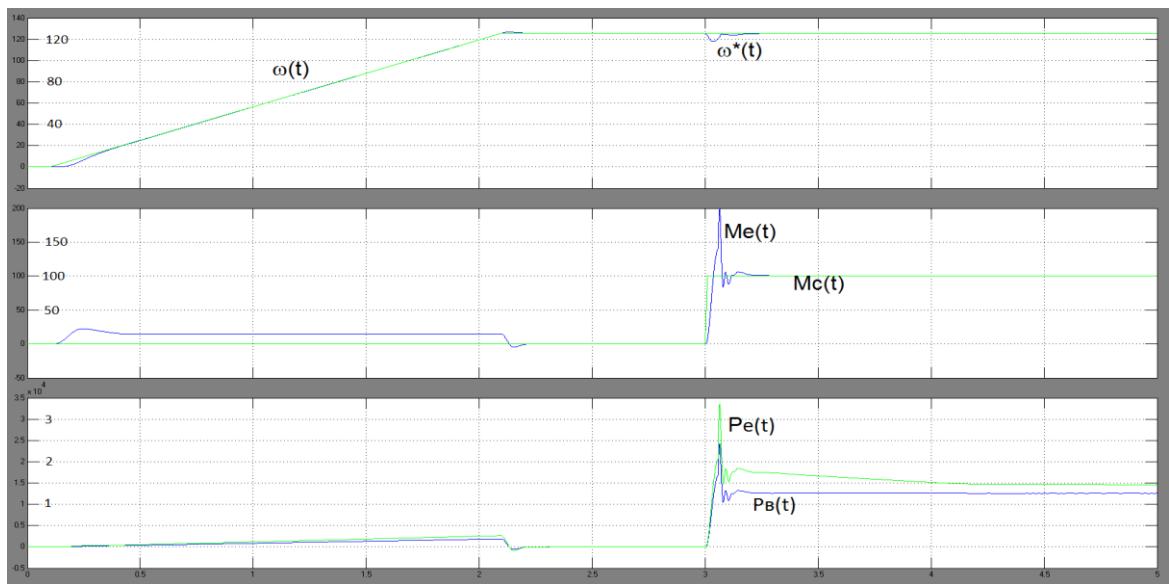


Рис. 4.9 Изменение потребляемой мощности СДПМ с применением экстремального регулятора напряжения

Более наглядным оказывается график изменения КПД вычисленный при работе системы электропривода с системой экстремального регулирования (Рис. 4.10). Из временных диаграмм видно, что процесс изменения значения приращения происходит два раза. Первый после выхода на установившуюся скорость, а второй после наброса нагрузки. Оба процесса поиска заканчиваются выходом системы на максимальный КПД (до 92%).

Максимальный КПД, который удалось получить при работе электродвигателя по принципу БДПТ в узком диапазоне достигал 87%, но при отклонениях рабочей точки снижался до 65%. Полученная система обеспечивает наивысший КПД во всех рабочих точках электропривода.

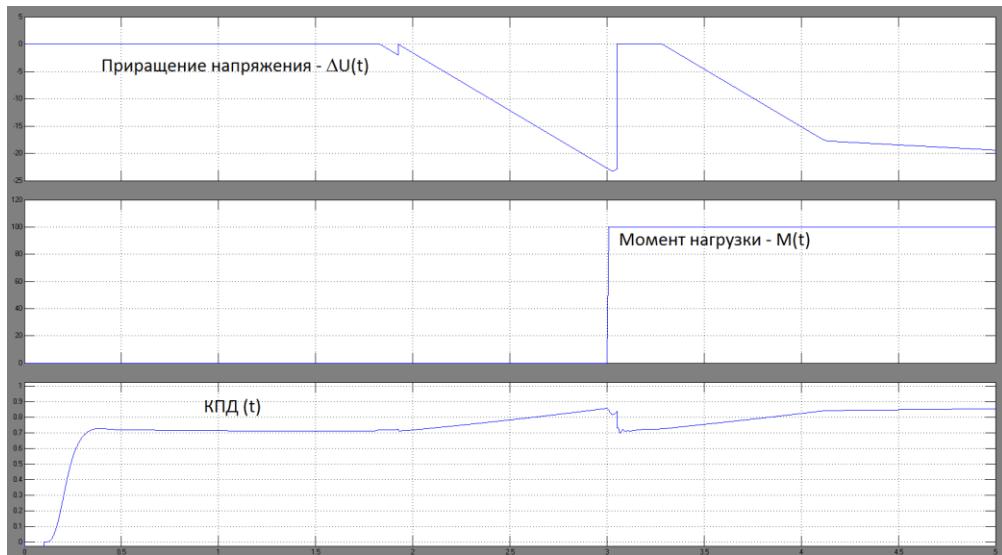


Рис. 4.10 Нагрузочная диаграмма электропривода

4.6. Выводы по четвертой главе

По настоящей главе можно сформулировать следующие выводы:

- представлены результаты моделирования в целях поиска оптимального значения напряжения для каждой рабочей точки электропривода. По поверхности оптимальных значений напряжения видна нелинейная зависимость от изменения скорости и нагрузки;
- представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие зависимость тока статора от амплитуды напряжения статора;
- компьютерная модель СЭР адаптирована с моделью стабилизированного СДПМ. С учетом инерционности статорной цепи СДПМ и направления поиска минимума сокращено время поиска экстремума;
- сформулирована методика, позволяющая производить наладку СЭР совместно с системой бездатчикового U/f -управления СДПМ;
- с помощью компьютерной модели показано, что система обеспечивает автоматический поиск значения напряжения статора, при котором КПД оказывается максимальным. Значение КПД в разработанной системе достигает 92%, что на 5-25% больше, чем при работе электродвигателя по принципу БДПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – повышена эффективность наладки и работы электропривода гидравлической системы МАП на базе СДПМ, обеспечивающего высокую энергоэффективность во всем рабочем диапазоне. 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. Модель позволяет исследовать динамические и статические нагрузки, создаваемые гидросистемой при штатной работе рулевой системы и при регулировании 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 U/f -управления и стабилизирующего блока, обеспечивающая устойчивую работу электропривода без демпферной обмотки, 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 $1,2 n_n$, КПД системы при регулировании скорости не ниже 89%, просадка скорости при наборе 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 бездатчикового электропривода МАП на базе СДПМ 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 КПД системы составляет 92%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Al-nabi, E. Input Power Factor Compensation for High-Power CSC Fed PMSM Drive Using d-Axis Stator Current Control / E. Al-nabi, B. Wu,N, R, Zargari, V. Sood // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Feb 2012. – Vol. 59. №2.
2. Arakawa, T. Examination of an Interior Permanent Magnet Type Axial Gap Motor for the Hybrid Electric Vehicle / T. Arakawa, M. Takemoto, S. Ogasawara, K. Inoue // IEEE Transactions on Magnets. – 2011. – Vol. 47. - №10. – 3602-3605 p.
3. Arias, A. Hybrid sensorless permanent magnet synchronous machine four quadrant drive based on direct matrix converter / A. Arias, Carlos Ortega, Jordi Zaragoza, Jordi Espina, Josep Pou, Electrical Power and Energy Systems. – 2012. – P. 78-86.
4. Barambones. O. Sliding Mode Position Control for Real-Time Control of Induction Motors / O. Barambones, P. Alkorta M. Gonzalez // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2013. – vol. 7. - №9. – 2741-2754 p.
5. Bello, A. Comparative Review Of PMSM And BLDCM Based On Direct Torque Control Method / A. Bello, I. M. Klishi, M. M. Bari, U Abubakar // International Journal of Scientific and Technology Research. – 2014. – vol. 3. №2. – 195-199 p.
6. Bose B.K. Power electronics and motion control-Technology status and recent trends / B.K. Bose // IEEE Trans. Ind.Applicat. – Sept., Oct., 1993. – Vol. 29. – P. 902–909.
7. Brinner, T.R. Induction Versus Permanent-Magnet Motors for Electric Submersible Pump Field and Laboratory Comparisons / T.R. Brinner, R.H. McCoy, T. Kopecky // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50. - №1. – 174-181 p.

8. Cao, R/ Quantitative Comparison of Flux-Switching Permanent-Magnet Motors with Interior Permanent Magnet Motors fo EV, HEV and PHEV Application / R. Cao, C. Mi, M. Cheng // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – №8. – 2374-2384 p.

9. Dhamo, L. Simulation Based Analysis of Two Different Control Strategies for PMSM / L. Dhamo, A. Spahiu // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – Apr 2013. – Vol. 4, №4

10. DiRenzo M.T. Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240. Application Report / Texas Instruments. – 2000

11. Ducar I. Comparative study for reversible pump at variable speed in PMSM applications / I. Ducar, C. Marinescu. // Advanced Topic in Electrical Engineering (ATEE). – 2015. – p. 205 – 210.

12. Economic viability, applications and efficient permanent magnet motors / Swiss Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications DETEC, SFOE. – 2009. – 31 p.

13. Feng, C. Double-Stator Permanent Magnet Synchronous in-Wheel Motor for Electric Drive System / C. Feng, X. Jing, G. Bin, C. Shukang, Z. Jiange // IEEE Transactions on Magnets. – 2009. – Vol. 45. - №1. – 278-281 p.

14. Gieras F.J. Permanent Magnet Motor Technology. Design and Application / Jacek F. Gieras // Boca Raton, London, New York.: CRC Press. – 2009. – 608 p.

15. Hamidizadeh, S. Comparison of Different Demagnetisation Models of Permanent Magnet in Machines for Electric Vehicle Application / S. Hamidizadeh1, N. Alatawneh1, R.R. Chromik, D.A. Lowther // IEEE Transactions on Magnets. – 2015.

16. Ho, S.L. Design and Analysis of a Novel Axial-Flux Electric Machine / S. L. Ho, S. Niu, W.N. Fu // IEEE Transactions on Magnets. – 2011. – Vol. 47. - №10. – 4368-4371 p.

17. Hur, J. Characteristic Analysis of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor in Electrohydraulic Power Steering Systems / J. Hur // IEEE Transactions on Industrial Electronics. June 2008. – Vol. 55. - №6.

18. Inoue, T. Mathematical Model for MTPA Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Stator Flux Linkage Synchronous Frame // IEEE Transactions on Industrial Applications. Sep 2015. – Vol. 51. - №5.

19. Jung, J.W., Equivalent Circuit Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Magnetic Saturation / J.W. Jung, J.J. Lee, S.O. Kwon, J.P. Hong, K.N. Kim, World Electric Vehicle Journal. 2009. May 13–16. Vol. 3. EVS24 Stavanger Norway.

20. Kim, S. Characteristics Comparison of a Conventional and Modified Spoke-Type Ferrite Magnet Motor for Traction Drives of Low-Speed Electric Vehicles // S. Kim, J. Cho, S. Park, T. Park // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2013. – Vol. 49. - №6. – 2516-2523 p.

21. Kiyota, K. Comparing Electric Motors / Kiyota K., Sugimoto H., Chiba A. // IEEE Industry Applications Magazine. – 2014, Aug. – p. 12-20.

22. Klintberg, E. Comparison of Control Approaches for Permanent Magnet Motors: Dissertation for the degree of Master in Electrical Engineering / Chalmers University of Technology. Sweden. – 2013.

23. 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. T. 85. № 10. C. 641-644.

24. Li, Y.W. DC-Link Current Minimization for High-Power Current-Source Motor Drives / Y.W. Li, M. Pande, N.R. Zargari, B. Wu // IEEE Transactions on Power Electronics. Junuary 2009. – Vol. 24. №1.

25. Lipo, T.A. Synchronous reluctance machines – a viable alternative for AC drives / T.A. Lipo / Electr Mach Power Syst. – 1991. - vol. 19. - 659-671 p.

26. Magri, A. El. Robust Control of Synchronous motor Through AC/DC/AC converters / A. El. Magri, F.Giri, A. Abouloifa, F.Z. Chaoui // Control Engineeringg Practice. – 2010. – 18. – p. 540-553

27. Melfi, M.J. Permanent-Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications / M.J. Melfi, D. Rogers, S. Evon, B. Martin // IEEE Transactions on Industrial Applications. Sep 2008. – Vol. 44. - №5.

28. Merzoug M.S. Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) / M. S. Merzoug, F. Naceri // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2008. - Vol:2, №9. – 1797-1802 p.

29. Morawiec, M. The Adaptive Backstepping Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Supplied by Current Source Inverter / M. Morawiec // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2013. - Vol. 9. - №2.

30. Ohm D. Y. Dynamic Model of PM Synchronous Motors / Dal Y. Ohm // Drivetech, Inc. – Virginia. – 1997.

31. Ozcira, S. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors / S. Ozcira, N. Bekiroglu // InTech. Torque Control. – 2011. - vol.10.

32. Perera, C. Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives: Dissertation for the degree of doctor of philosophy in Electrical Engineering / Institute of Energy Technology. – 2002.

33. Ramana, P. Direct Torque Control of Inverter Fed PMSM Drive using SVM / P. Ramana, B.S. Kumar, K.A. Mary, M.S. Kalavathi // IJAIEM. – 2013. – Vol. 2. - №7. – 480-486 p.

34. Sensorless PMSM Vector Control: Design Reference Manual / Freescale semiconductor. – 2009

35. Shmarin, Y.A Static Parameters of a Synchronous Electric Drive with Permanent Magnets / Shmarin Y.A., Kodkin V.L., Anikin A.S. // Russian Electrical Engineering. 2015. T. 86. № 12. C. 719-722.

36. Stulrajter, M. Permanent Magnet Synchronous Motor Control Theory / M. Stulrajter, V. Hrabovcova, M. Franko // Journal of Electrical Engineering. – 2007. – vol. 58. - №2. – 79-84 p.

37. Vaez, S. Loss Minimization Control of Interior Permanent Magnet Motor Drives / Sadegh Vaez . – Qeen`s University, 1997. 177 p.

38. Vagati, A. The synchronous reluctance solution: a new alternative in A.C. drives / A. Vagati // Proc IEEE IECON (Bologna). – 1994. - vol. 1. - 1-13 p.

39. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control / P. Vas // Oxford, New York, Tokyo. – Oxford University Press, 1998. – 729 p.

40. Zeraoulia, M. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A comparative study / IEEE Transaction on Vehicular Technology. – 2006. – vol. 55. – №6. – 1756 – 1764 p.

41. Zhang, B. Enhanced robust fractional order proportional-plus-integral controller based on neural network for velocity control of permanent magnet synchronous motor / B, Zhang, Y. Pi // ISA Transactions. – 2013. – vol.52. – p. 510 - 516.

42. Амр Рефки А.Э.В., Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / Абд Эль Вхаб Амр Рефки, А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев, С.Н. Кладиев, Энергетика. – 2011. – С. 93-99.

43. Аникин, А.С. Система управления многодвигательным асинхронным электроприводом с частотным регулированием самоходного вагона: дис. Канд. техн. наук: 05.09.03 / Аникин Александр Сергеевич. – Челябинск., 2011. – 152 с.

44. Башарин, С.А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / С.А. Башарин, В.В. Федоров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 368 с.

45. Башта, Т. М. Машиностроительная гидравлика / Т. М. Башта // «Машиностроение». – 1971. – 672 с.

46. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. / Л.А. Бессонов – 10-е изд. – М.: Гардарики, 1999. – 638 с.: ил.

47. Блантер, С.Г. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности: учебное пособие для вузов / С.Г. Блантер, И.И. Суд. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1980. – 478 с.

48. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: учебное пособие / В.П. Бычков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высш. школа», 1977. – 391 с.

49. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод. / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с., ил.

50. Вольдек, А.И. Электрические машины переменного тока: Учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб: Питер, 2008. – 350 с.: ил.

51. Воронин С.Г. Обеспечение энергетической эффективности регулирования вентильного электропривода / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов // Сборник научных работ «Наука ЮУрГУ»

52. Воронин, С.Г. Управляемый электропривод: конспект лекций / С.Г. Воронин — Челябинск: ЧГТУ, 1996. — Ч. 2. – 64 с.

53. Гавриленко Б.А. Гидравлический привод / Б.А. Гавриленко, В.А. Минин, С.Н. Рождественский // М.: «Машиностроение». – 1968. – 502 с.

54. Галдин Н.С. Гидравлические системы мобильных машин: учебное пособие / Н.С. Галдин, И.А. Семенова / Омск: Сиб АДИ. – 2013. – 203 с.

55. Гамынин Н.С. Гидравлический следящий привод / Н.С. Гамынин, под.ред. В.А. Лещенко / М.: «Машиностроение». – 1968. – 564 с.

56. Гийон, М. Исследование и расчет гидравлических систем / М. Гийон – М.: Машиностроение, 1964. – 388 с.

57. Горожанкин А.Н. Вентильный электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: дис. Канд. техн. наук: 05.09.03 / Горожанкин Александр Николаевич. – Челябинск. – 2010. – 138 с.

58. Григорьев М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. - том 13. - №1.

59. Даденков, Д.А. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink / Д.А. Даденков, Е.М. Солодкий, А.М. Шачков // Электротехника, информационные технологии системы управления. - 2014. - №11.

60. Дядик В.Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие / В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Н.С. Криницын // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

61. Закладной А.Н. Энергоэффективный Электропривода Электропогрузчика / А. Н. Закладной, О.А. Закладной, В.О. Броницкий, Д.Ю Могилат // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2013. - №1. – с. 36-41.

62. Зиннер, Л.Я., Скороспешкин А.И. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока / Л.Я. Зиннер, А.И. Скороспешкин – М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.

63. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для студ. вузов / Н.Ф. Ильинский. – М.: МЭИ, 2000. – 164 с.

64. Карелин, В.Я. Насосы и насосные станции: учеб. для вузов / В.Я. Карелин, А.В. Минаев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.

65. Ключев, В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 560 с., ил.

66. Ключникова, Г.А. Энергетическая оптимизация режимов работы электроприводов насосной станции: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Ключникова Галина Александровна. – М., 2000. - 155 с.

67. Кодкин. В.Л. Эффективное частотное управление асинхронными электроприводами при перегрузках / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин, Я.А. Шмарин // Электротехника. – 2014. - № 10.

68. Козаченко В.Ф. Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением / В.Ф. Козаченко, А. Анучин, А. Дроздов, А. Жарков // Компоненты и технологии. – 2004. - №8

69. Коррекция динамических моментных возмущений в электроприводах переменного тока / Кодкин. В.Л., Аникин. А.С., Шмарин Я.А. // Труды

Международной научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг-2016», Челябинск, 2016г.

70. Коршунов, А. Равноускоренный частотный пуск синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе / А. Коршунов // Силовая электроника. – 2007, №1
71. Коршунов, А. Управление током статора синхронного двигателя с возбуждением постоянными магнитами при частотном пуске / А. Коршунов // Силовая электроника. – 2007, №3. – с. 50-57.
72. Коршунов, А. Условия статической устойчивости синхронного двигателя с постоянными магнитами / А. Коршунов // Силовая электроника. Компоненты и технологии. – 2008, №10.
73. Ланген, А.М. Электрооборудование предприятий текстильной промышленности: учебное пособие для вузов/ А.М. Ланген, В.В. Красник. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 320 с.
74. Лимонов Л.Г. Сравнение динамических коэффициентов качества электродвигателей переменного тока / Л.Г. Лимонов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. - №10. – с. 41-44.
75. Линьков С.А. Анализ систем управления синхронных электроприводов / С.А. Линьков, А.С. Сарваров, И.В. Бачурин // Теория и практика автоматизированного электропривода. – 2014. - №2 (23). – 25 – 28.
76. Макаров. В.Г. Анализ состояния и перспективы развития работ по бездатчиковому определению скорости электропривода / В.Г. Макаров, В.В. Тамбов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – 245-248 с.
77. Машины и агрегаты текстильной и легкой промышленности. Т. IV -13/ И.А. Мартынов, А.Ф. Прошков, А.П. Яскин и др.; под общ. ред. И.А. Мартынова. – М.: Машиностроение, 1997. – 608 с.
78. Мещеряков В.Н. Реализация успешного запуска и стабильной работы синхронизированного электропривода с применением адаптивных

регуляторов / В.Н. Мещеряков, А.М. Башлыков, А.В. Вейнмейстер // Современные проблемы науки и образования. – 2012, №6.

79. Наземцев А.С. Пневматические и гидравлические приводы и системы. Часть 2. Гидравлические приводы и системы. Основы. Учебное пособие / А.С. Наземцев, Д.Е. Рыбальченко. – М.: ФОРУМ, 2007 – 304 с.

80. Нейман, В.Г. Гидроприводы авиационных систем управления / В.Г. Нейман // М. «Машиностроение». – 1973. – 200 с.

81. Олейников, В. А. Основы оптимального и экстремального управления: Учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин // Высшая школа. – Москва. - 1969. – 296 с.

82. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов / Г.Б. Онищенко // М.: РАСХН. – 2003. – 320 с.

83. Особенности частотного управления вентильным двигателем с постоянными магнитами Кодкин В.Л., Шмарин Я.А. материалы XX Всероссийской научно-технической конференции Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. Т. I. – 373 с.

84. Остриров, В.Н. Перспективные системы экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением / В.Н. Остриров, В.Ф. Козаченко, А.М. Русаков // Доклад научно-практического семинара «Электропривод экскаваторов». – М.: Издательство МЭИ. – 2004.

85. Панкратов, В.В. Вентильный электропривод от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза / В.В. Панкратов // Электронные компоненты. – 2007. – №2.

86. Полфунтиков Е.Ю. Тяговый двигатель с постоянными магнитами / Е.Ю. Полфунтиков // Сборник научных трудов НГТУ. – 209. - №2(56). – с. 141-146.

87. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. Учеб. Для машиностроительных вузов / Д.Н. Попов // «Машиностроение», М. – 1976. – 424 с.

88. Поспелов А.А. Сравнительный анализ методик построения рабочих характеристик насосов с частотно-регулируемым электроприводом / А.А. Поспелов, В. Н. Виноградов, М.Ю. Зорин, Г.В. Ледуховский, Д.Г. Денисов // «Вестник ИГЭУ». – 2007, Вып. 2.

89. Проскуряков, В.С. Электротехника. Синхронные электрические машины: учебное пособие / В.С. Проскуряков, С.В. Соболев // Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ: Екатеринбург. – 2008.

90. Радимов И.Н. Исследование вентильного электродвигателя с внутренними постоянными магнитами / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, С.К. Демяненко, П.А. Кравченко // Электротехника. – 2010.

91. Речкин С.В. Гидравлические системы мобильных машин: Учебн. Пособие / С.В. Речкин, С.П. Матяш // Новосиб. Гос. аграр. Ун-т. – Новосибирск. – 2005. – 92 с.

92. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы: Справочник / В. К. Свешников. — 6-е изд. перераб. и доп. — СПб.: Политехника, 2015. — 627 с.: ил.

93. Синхронные тяговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов / Железные дороги мир. – 2011. - №6. - с. 38-42.

94. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины: учебное пособие / А.О. Спиваковский, В.К. Дьяченков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

95. 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. ИГЭУ. 2015. С. 389-392.

96. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 302 с.

97. Усольцев, А.А. Общая электротехника / А.А. Усольцев // ИТМО

98. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А.А. Усольцев. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.

99. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – 2007. - №3. – 21-26 с.

100. Фалеев М.В. Моментный электропривод систем наведения мобильных робототехнических комплексов / М.В. Фалеев, С.Г. Самок, П.М. Поклад // Вестник ИГЭУ. – 2008, №3

101. Хохлов, В.А. Электрогидравлические следящие системы / В.А. Хохлов, В.Н. Прокофьев, Н.А. Борисова, В. И. Гусаков, В.М. Чуркин. – М.: Машиностроение, 1971. – 431 с.

102. Шабанов, В.А. О законах частотного регулирования синхронных двигателей на нефтеперекачивающих станциях / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина // Нефтегазовое дело. – 2010.

103. Шевченко, А.Ф., Векторное управление током статора синхронного двигателя с постоянными магнитами привода погружного насоса //А.Ф. Шевченко, С.А. Абдель Максуд Селим – Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2(43). С. 162-174.

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

105. Щур, И.З., Енергетична ефективність стратегій керування синхронним двигуном з постінimi магнітами / И.З. Щур, М.Ф. Мандзюк, Національний університет “Львівська політехніка”. – 2011. – С. 400-401.

106. Экспериментальное исследование синхронного двигателя с постоянными магнитами / Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. // Труды X

Международной научно-технической конференции «Энергия-2015», 2015г., г.Иваново.

107. Копырин, В.С. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода / В.С. Копырин, Е.Г. Бородацкий // Силовая электроника, 2006, №2
108. "Стрекалов, А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. / А.В. Стрекалов // Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. – 661 с.
109. Лезнов, Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Б.С. Лезнов // Москва: Энергоатомиздат, 1991. - 144с.
110. Карпович, О.Я. Вентильно-индукторный электропривод с адатпивной системой управления для компрессоров малых холодильных установок / О.Я. Карпович, О.А. Онщенко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - Одесса. - 2010. - №3. - 150-152
111. Волокитина, Е.В. Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрофицированного самолета / Е.В. Волокитина, А.И. Власов, А.Л. Копчак // ЭЭТ. Мехатронные системы, исполнительные устройства. - 2011. - №4. - с. 44-49
112. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008.– 298 с.
113. Шкляр, В.Н. Надежность систем управления: учебное пособие / В.Н. Шкляр // Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 126с.
114. Рипс, Я.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами / Я.А. Рипс, Б.А.Савельев // Москва, "Энергия", 1974. - 248с.
115. <http://www.micromo.com/products/brushless-dc-motors/brushless-dc-motors-with-integrated-speed-controller>

116. <http://www.anaheimautomation.com/products/brushless/brushless-products.php>

117. http://www.maxonmotor.co.uk/maxon/view/content/ECX-Detaisite?etcc_med=Product&etcc_cmp=%2fmaxon%2fview%2fcontent%2fECX-Detaisite%3fnoMobile&etcc_cu=onsite&etcc_var=%5buk%5d%23en%23_d_&etcc_plc=product_index&noMobile

118. http://www.apro.ru/Sinamics%20S120_Chassis.htm

119. http://promsis.spb.ru/catalog/ad_siemens/dvigateli_siemens/SIEMENS_1FE_1FK_1FL_1FT_1FV/

120. tehprivod.ru/katalog/preobrazovateli-chastoty/siemens

121. <http://www.payor.ru/catalog/avtomatika/Oborudovanie-siemens/Chastoty-preobrozovatel-Siemens/serii-G120P/>

122. <http://new.abb.com/drives/ru>

123. http://www.owen.ru/catalog/preobrazovatel_chastoti_vektornij_owen_pch vx/99561359

124. <http://xn--80aqahnfuib9b.xn--p1ai/cena.html>

125. <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/syrm/>

126. <http://machinedesign.com/motorsdrives/motors-efficiency-permanent-magnet-reluctance-and-induction-motors-compared>

127. http://www.induction.ru/library/book_002/glava7/7-3.html

128. <http://www.energosovet.ru/stat846.html> - в 1 часть

129. http://promsis.spb.ru/catalog/ad_siemens/dvigateli_siemens/SIEMENS_HT-direct_1FW4/

130. <http://www.power-prom.ru/Sinhronnye-dvigateli-s-vozbuzhdeniem-ot-postoyannyh-magnitov.html>

131. <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>

132. <http://aerostudents.com/files/advancedFlightControl/backstepping.pdf>

133. https://www.researchgate.net/post/Sliding_Mode_Controller_Vs_Backstepping_Controller

134. <http://esis-kgeu.ru/elements/760-elements;>

135. http://www.life-prog.ru/1_28087_osobennosti-chastotnogo-regulirovaniya-sd.html.

136. <http://www.orionmotor.narod.ru/privod2.htm>

137. <http://www.controleng.com/>

138. <http://www.schneider-electric.com/products/kz/ru/2900-privodnaa-tehnika/2950-standartnye-pc/1155-altivar-71/>

139. Kronberg, A. Design and Simulation of Field Oriented Control and Direct Torque Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Positive Saliency / A. Kronberg // Uppsala Universitet, 2012. - 66p.

140. Федорец, В.А. Гидроприводы и гидро- пневмо- автоматика станков / В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко // Киев, "Вища Школа", 1987. - 374с.

141. <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/>

142. Коррекция динамических моментных возмущений в электроприводах переменного тока / Кодкин. В.Л., Аникин. А.С., Шмарин Я.А. // Материалы 68-й научной конференции. Южно-Уральский государственный университет. 2016. С. 805-814.

143. 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. 2015. С. 1062-1068.

144. 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, 2016 г. с 165- 169.

145. 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.

146. http://www.induction.ru/library/book_001/glava3/3-6.html

147. Шкляр, В.Н. Надежность систем управления: учебное пособие / В.Н. Шкляр // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 126 с.

148. ГОСТ 51901.1-2002 Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт России, 2002. – 7с.

149. Чуев, П.В. Разработка систем векторного управления асинхронными приводами на базе специализированных сигнальных микроконтроллеров: дис. Канд. техн. наук: 05.09.03 / Чуев Павел Вячеславович. – Москва., 2002. – 254 с.

150. Лашкевич, М.М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторным двигателями: дис. Канд. техн. наук: 05.09.03 / Лашкевич Максим Михайлович. – Челябинск., 2013. – 175 с.

151. Казиев, В.М. Введение в системный анализ и моделирование: учебное пособие / В.М. Казиев // М.: 2001 г.

152. Бусленко, Н.П. Моделирования сложных систем / Н.П. Бусленко // М.: Наука, 1968. – 356 с.

153. <http://www.findpatent.ru/>

154. Виноградов, А.Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А. Виноградов, А. Сибирцев, И. Колодин // Силовая электроника, №3., 2006. – с. 46-51

155. Ланграф, С.В. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, К.С. Афанасьев и др. // Известия Томского политехнического университета, 2010. Т. 317. № 4. – с. 120-123.

156. Карпович, О.Я. Вентильно-индукторный электропривод с адаптивной системой управления для компрессоров малых

холодильных установок / О.Я.Карпович, О.А.Онищенко //
Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2012. - №3(19).
– с. 150-152.