


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Богданов Анатолий Олегович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУФТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ КРИВОШИПНОГО ПРЕССА

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор А.М. Литвиненко

Воронеж 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИВОДОВ МУФТ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ КРИВОШИПНЫХ ПРЕССОВ .....	9
1.1 Общая классификация .....	9
1.2 Традиционный привод муфты .....	12
1.3 Электромеханическая система управления фрикционными муфтой и тормозом .....	13
1.4 Орбитальный электропривод муфты включения пресса .....	19
1.5 Схемы подключения орбитального электропривода муфты пресса .....	24
1.6 Нахождение оптимальных размеров полюсов статора .....	29
Выводы .....	31
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУФТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ.....	33
2.1 Исследование статических режимов.....	33
2.2 Проектирование системы управления орбитального электропривода муфты включения.....	40
2.3 Исследование динамических режимов орбитального электропривода муфты кривошипного пресса.....	44
2.4 Взаимосвязь главного привода и муфты пресса .....	52
2.5 Оценка тепловых режимов работы орбитального электропривода муфты включения.....	63
2.6 К определению особенностей орбитального электропривода муфты включения пресса .....	67
Выводы .....	71
3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ .	72
3.1 Математическое описание орбитального электропривода муфты .....	72
3.2 Выбор исполнительных элементов орбитального электропривода муфты включения.....	84

3.3 Оптимальный способ управления орбитальным электроприводом .....	93
3.4 Отключение неиспользуемых зон статора .....	105
Выводы .....	118
<b>4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО</b>	
<b>ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУФТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ .....</b>	
4.1 Сравнение прямого пуска и скалярного управления.....	119
4.2 Сравнение скалярного управления и векторного .....	124
4.3 Прямое управление моментом применительно к орбитальному электроприводу.....	128
4.4 Применение полученных результатов .....	131
4.5 Техничко-экономические показатели орбитального электропривода муфты включения прессы .....	136
Выводы .....	143
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>144</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>145</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ №1 Экспериментальная установка.....</b>	<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ №2 Зависимость площади перекрытия от отключения сегментов.....</b>	<b>162</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ №3 Зависимости параметров от количества роторов.....</b>	<b>167</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ №4 Алгоритмы .....</b>	<b>170</b>
<b>Акт внедрения.....</b>	<b>174</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В кузнечно-прессовом оборудовании (КПО) наибольшее распространение получили пневматические системы управления фрикционными муфтой и тормозом. Один из недостатков таких систем - необходимость использования для работы КПО двух энергоносителей: электрической энергии для привода главного электродвигателя и сжатого воздуха для управления (включения и отключения) муфтой и тормозом. Применение в системе управления КПО сжатого воздуха снижает безопасность и надежность работы оборудования, а так же существенно уменьшает его эффективный КПД, работа сопровождается выбросом масляных паров в атмосферу и высоким уровнем шума.

В работе рассматривается орбитальный электропривод муфты включения кривошипного пресса (ОЭМВКП), который является много роторной многосвязной электромеханической системой. В таком типе привода отсутствуют недостатки, присущие пневматическим системам, использующим сжатый воздух, и для работы системы необходим один вид энергии – электрический. Это определяет экологическую безопасность и практическую значимость. Впервые идея отказа от пневматических систем в пользу электромеханических в приводе муфты пресса была предложена д.т.н. профессором МГТУ им Н.Э. Баумана Сафоновым А.В.. Предложенная система обладала рядом преимуществ по сравнению с пневматическими системами, но имела недостатки в виду сложности механической части. Поскольку усилие от одного двигателя распределяется на часть нажимного диска, при этом возникает необходимость исключения их перекосов. Разработка так и осталась на стадии прототипа.

Таким образом, существует необходимость в разработке электропривода муфты, обладающего распределенным усилием, что присуще орбитальному электроприводу и определяет актуальность данной работы.

**Степень разработанности.** Исследования, проводимые в настоящее время, в подавляющем большинстве направлены на главный электропривод пресса, и отображают результаты, не учитывающие возможность применения электропривода для муфты включения. Следовательно, для решения поставленной задачи, целесообразен подход, объединяющий исследования в области параллельной работе приводов со спецификой орбитального электропривода и прессового оборудования.

**Цель работы:** разработка и исследование схемных решений, алгоритмов и системы управления орбитального электропривода муфты включения кривошипного пресса для обеспечения энергоэффективности и ресурсосбережения.

Для достижения сформулированной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ используемых приводов муфт кривошипных прессов для формирования технического задания на разработку орбитального электропривода муфты, включающего:

1.1. Разработка силовой структуры ОЭМВКП.

1.2. Разработка системы управления ОЭМВКП и определение оптимального закона управления.

3. Проведение компьютерного моделирования ОЭМВКП и анализ полученных характеристик.

3. Разработка и создание экспериментальной модели, в масштабе, ОЭМВКП с системой управления на основе результатов предварительного исследования.

4. Проведение комплекса экспериментальных исследований, позволяющих выявить особенность работы ОЭМВКП, оценить достоверность используемых алгоритмов.

**Объект исследования:** орбитальный электропривод муфты кривошипного пресса.

**Предмет исследования:** выявление зависимостей ОЭМВКП от конструктивных параметров и способов управления.

**Идея работы:** заключается в разработке ОЭМВКП, позволяющего улучшить показатели энергоэффективности.

**Методология и методы исследования:** в теоретических исследованиях использовались положения и методы теории систем управления электроприводами, теории электрических цепей, теории автоматического управления, теоретических основ электротехники. Задачи, поставленные в ходе исследования, решались с помощью методов математического моделирования переходных процессов на ЭВМ с помощью пакета математических программ Simulink в программной среде Matlab. Для исследования эффективности орбитального электропривода, разработана и изготовлена экспериментальная модель, включающая в себя преобразователь частоты Altivar ATV31.

**Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:**

1. На базе результатов теоретических исследований характеристик орбитального электропривода муфты включения кривошипного пресса в зависимости от основных конструктивных параметров ротора, статора, и всей системы в целом, предложен новый тип электропривода.

2. На основе результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования работы орбитального электропривода муфты, с несколькими типами управления, выявлены новые взаимосвязи позволяющие осуществить, модификацию закона управления в рамках программно-аппаратного модуля.

3. Установлена зависимость площади лобовых частей с учетом наложения координат, на основе построения функциональной карты ротора и статора, что дает возможность снизить уровень энергопотребления.

4. На основании исследований математической модели разработан способ обеспечения минимального перерегулирования, отличающийся реализацией ввода дополнительного воздействия в момент времени нарастания, проанализировано влияние различных параметров на перерегулирование.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснования применения компоновочной схемы орбитального электропривода муфты включения кривошипного пресса.

2. Полученные результаты теоретических исследований основных характеристик орбитального электропривода муфты включения кривошипного пресса с различными типами управления, а так же сопоставление нескольких типов управления (прямой пуск, скалярное управление, векторное управление, ПУМ), установлена причинно-следственная взаимосвязь эффективности функционирования привода, в частности его динамических характеристик, от конструктивных параметров.

3. Алгоритм управления орбитальным электроприводом муфты включения пресса с учетом компенсации износа.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований, характеристики орбитального электропривода муфты кривошипного пресса при различных типах управления и конструктивных параметрах.

**Тематика работы** соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.03:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

**Практическая реализация работы и её результатов:** в ходе диссертационного исследования созданы компьютерная и физическая модели орбитального электропривода муфты пресса с одним модулем. Полученные расчетно-теоретические и экспериментальные результаты позволяют сформулировать рекомендации по проектированию электропривода муфты с использованием орбитального двигателя. Полученные результаты могут быть

полезными и для других направлений с использованием орбитального двигателя

Результаты исследования приняты к использованию в учебном процессе ФГБОУ ВО ВГТУ. Полученные в работе результаты приняты к внедрению ООО НПФ «МехПресс» г. Воронеж.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректной постановкой задач исследований, использованием элементов теории планирования эксперимента, совпадении с результатами экспериментальных исследований модели в масштабе ОЭМВКП и теоретических расчетов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и были одобрены на научно-практических конференциях: Международная конференция «Электроэнергетика и электромеханика 2014», Воронеж, 2014г.; Инновационные разработки молодых ученых воронежской области на службу региона 16-17 апреля 2014; XII Всероссийской научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве (НТ – 2013)», Воронеж, 2013г.; Международная конференция «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» Воронеж, 2015г, а также научных семинарах кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (2013-2016).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 8 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Получены 2 патента РФ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка использованной литературы, и 5 приложений. Объем работы составляет 175 страниц, в том числе 156 страниц текста, 78 рисунков, 4 таблицы, списка литературы из 121 наименование и приложения на 17 страницах.

# 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИВОДОВ МУФТ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ КРИВОШИПНЫХ ПРЕССОВ

## 1.1 Общая классификация

В системе привода всех прессов предусматривают сцепные муфты и тормоза, которые дают возможность передавать движение на исполнительный механизм от привода, а в нужный момент наоборот, прекращать связь с приводом, останавливая ползун механизма без выключения электродвигателя. Включение и выключение взаимно заблокированных муфты и тормоза производят системами управления. Муфта, тормоз и система управления образуют так называемую систему включения пресса, от работоспособности которой во многом зависит надежность и безопасность эксплуатации пресса в целом.

Система включения пресса работает в тяжелых условиях, связанных с большим числом включений в единицу времени; ограниченным временем включения и выключения, задаваемым сравнительно небольшим временем цикла. Время включения и выключения обычно не должно превышать нескольких десятых долей секунды, а в быстроходных прессах оно составляет менее 0.1 сек. К системе включения предъявляется требование абсолютной безотказности в работе, ибо ложные срабатывания того или иного элемента могут привести к тяжелым травмам обслуживающего персонала.

Наиболее тяжелые условия падают на долю главного элемента системы – муфты. В прессах применяют конструкции сцепных муфт, специфичность которых определяется главным образом довольно большим передаваемым моментом и большим числом включений. Фрикционные муфты у прессов всегда имеют значительные габаритные размеры, а их конструкция и расположение должны обеспечивать высокую износостойкость, а также удобство для обслуживания и ремонта [1].

Классификация муфт включения. В жестких муфтах в качестве сцепного элемента применяется какая-нибудь жесткая деталь – палец, кулачок, поворотная шпонка. По этому элементу и классифицируют жесткие муфты. Фрикционные муфты классифицируют в зависимости от конструкции рабочих поверхностей, передающих момент трения, дисковых, конусных и цилиндрических элементов. В муфтах скольжения связующим элементом служит жидкость или электромагнитное поле.

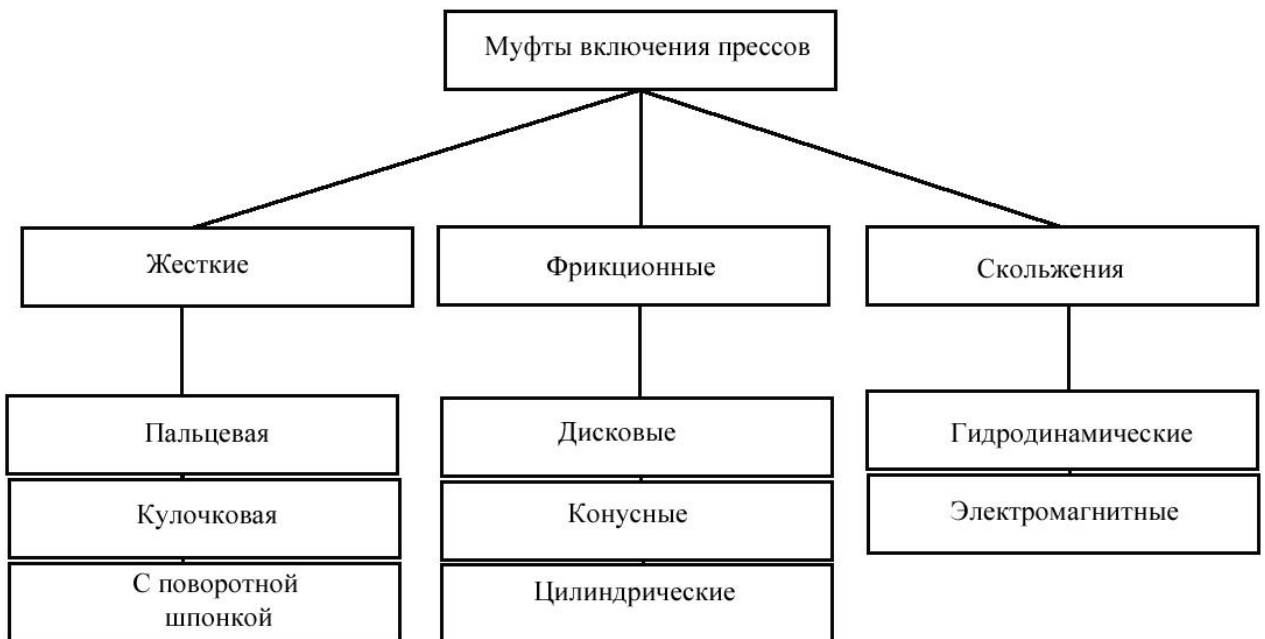


Рисунок 1.1 – Классификация муфт включения прессов

Из конструкций фрикционных муфт [2,3], приведенных в классификации, наибольшее распространение получили дисковые муфты. Фрикционные дисковые муфты удобны тем, что они не ограничивают число оборотов, можно довольно широко изменять передаваемый  $M_{кр}$ . Ее можно использовать как дополнительное предохранительное устройство, хотя некоторые механики не рекомендуют этого делать. Недостаток конструкции конусных муфт заключается в ограничении передаваемого момента, поэтому их применяют лишь в прессах небольшого усилия при малом числе ходов. Муфты с цилиндрической рабочей поверхностью большого распространения не получили. Конструкций фрикционных муфт очень много, но принцип действия

один и тот же. Дисковые муфты бывают одно-, двух- и многодисковые. В настоящее время наибольшее распространение получили однодисковые малогабаритные муфты с фрикционными вставками. Для удобства ремонта муфты устанавливают консольно. При этом с тормозом они блокируются либо непосредственно, либо посредством системы управления. Большие передаваемые моменты и необходимость быстрого действия заставляют применять пневматические или гидравлические силовые цилиндры для управления работой муфты или тормоза. Механические и электромагнитные устройства для этой цели применяют редко, так как они при приемлемых габаритах не могут обеспечить возникновения большого усилия, равномерно передаваемого на площадь нажимного диска. Наибольшее применение нашли муфты с пневматическим управлением.

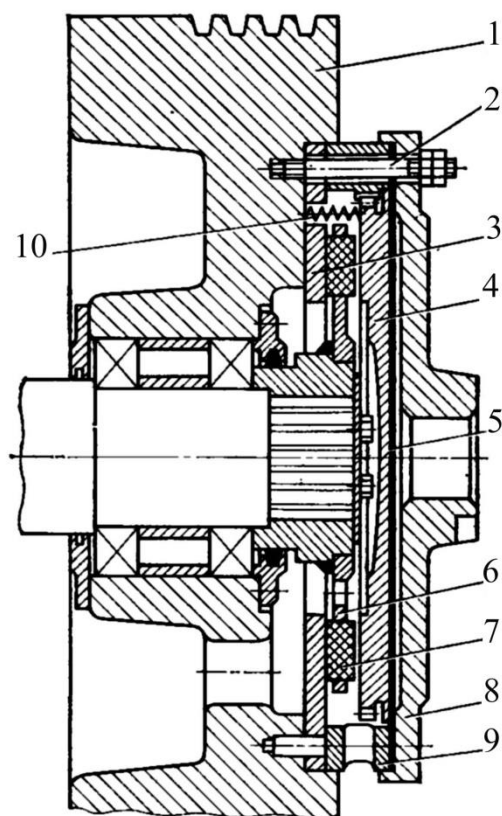


Рисунок 1.2 – Однодисковая фрикционная муфта: 1 – маховик; 2 – шпилька; 3 – опорный диск; 4 – нажимной диск; 5 – диафрагма; 6 – ведомый диск; 7 – фрикционные вставки; 8 – крышка диафрагмы; 9 – цилиндр; 10 – возвратные пружины

## 1.2 Традиционный привод муфты

В муфтах кривошипного пресса обычно применяют пневматический привод [4], такой тип привода преобразует потенциальную энергию давления сжатого воздуха в механическую работу. Типовая схема питания пневмопривода приведена на рисунок 1.3

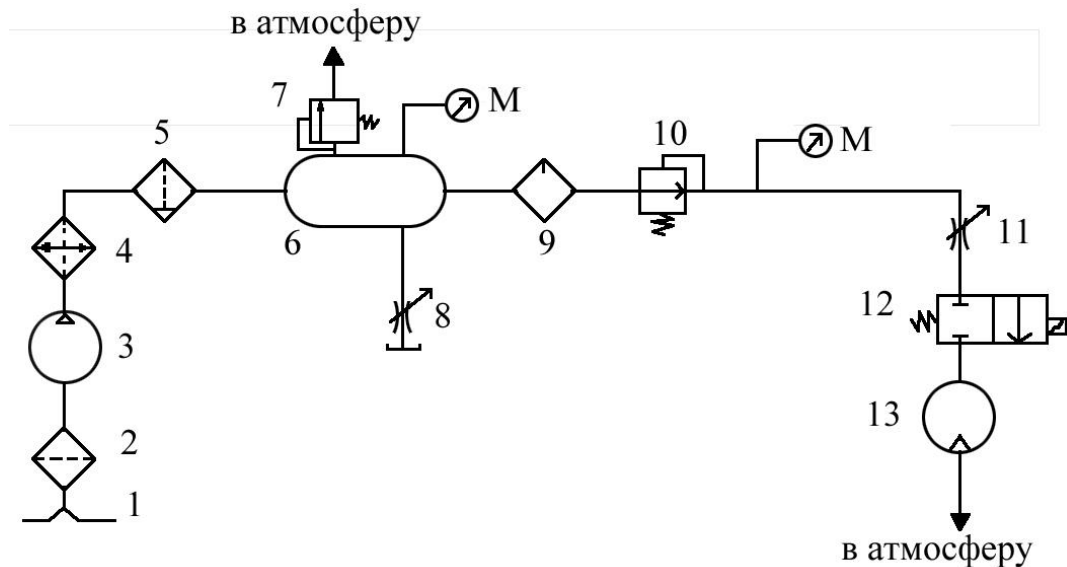


Рисунок 1.3 – Типовая схема питания пневмопривода: 1 – воздухозаборник; 2 – фильтр; 3 – компрессор; 4 – теплообменник; 5 – влагоотделитель; 6 – ресивер; 7 – предохранительный клапан; 8 – дроссель; 9 – маслораспылитель; 10 – редукционный клапан; 11 – дроссель; 12 – распределитель; 13 – пневмопривод; М — манометр

Схема работы такой системы следующая, через воздухозаборник 1, воздух попадает в систему затем фильтр 2 служит для очистки воздуха, тем самым предупреждая повреждения элементов привода и уменьшения их износа. После этого компрессор 3 сжимает воздух, повышая его температуру. Перед подачей воздуха потребителям необходимо его охладить в теплообменнике 4, далее чтобы предотвратить обледенение пневмопривода вследствие расширения воздуха, а так же для уменьшения коррозии деталей, воздух проходит через влагоотделитель 5 и поступает в ресивер 6, который

служит для сглаживания пульсаций давления в системе и для создания запаса воздуха. Эти пульсации обусловлены принципом работы объёмных компрессоров, подающих воздух в систему порциями. Далее в маслораспылителе 9 в сжатый воздух добавляется смазка, для уменьшения трения между подвижными деталями пневмопривода и предотвращает их заклинивание. Редукционный клапан 10 обеспечивает подачу воздуха при постоянном давлении. После этого идет распределитель 12, и сам исполнительный механизм 13.

Коэффициент полезного действия такой системы в общем случае состоит из трех составляющих:

$$\eta = \eta_k \cdot \eta_t \cdot \eta_n,$$

где  $\eta_k$  – КПД компрессора,  $\eta_t$  – КПД трубопровода,  $\eta_n$  – КПД исполнительного механизма.

В общем, коэффициент полезного действия такой системы не превышает 15% [5], что является большим недостатком данного привода. Ко всему этому можно добавить следующие недостатки: сравнительно высокая стоимость энергии сжатого воздуха, что сказывается при непрерывном потреблении сжатого воздуха и его расходах; нестабильность скорости движения выходного звена при переменных нагрузках; для обеспечения заданного закона движения звена, необходимо применять специальные устройства; необходимость обеспечения элементов системы защитой от коррозии.

### 1.3 Электромеханическая система управления фрикционными муфтой и тормозом

В МГТУ им. И. Э. Баумана разработана новая электромеханическая система управления кузнечно-прессовым оборудованием [5], в которой в качестве силового элемента используются серийно выпускаемые промышленно-

стью асинхронные электродвигатели. Электродвигатели работают в режимах скоростей, превышающих критические скорости на всех режимах работы пресса (автоматические и одиночные ходы и режим наладки), что обеспечивает необходимую частоту включения и отключения муфты и тормоза.

У новой системы отсутствуют недостатки, присущие пневматическим системам управления, использующим сжатый воздух. Механическая часть системы управления состоит из кулачкового или винтового механизма преобразования крутящего момента, развиваемого электродвигателем управления, в силу, которая, воздействуя с помощью системы рычагов и толкателей на нажимные диски муфты и тормоза, включает и отключает их.

Электромеханическая система управления муфтой с кулачковым механизмом преобразования крутящего момента (рисунок 1.4) состоит из электродвигателя управления 1, связанного ременной передачей 2 со шкивом б, установленным на валу 8; кулачка 7, связанного со шкивом б; трех рычагов 4, установленных на осях 5 в крышке 9 муфты. Вал 8 может вращаться в крышке 9. Рычаги 4 одним концом упираются в торец нажимного диска муфты, а другим концом через ролики 3 прижимаются к рабочей поверхности кулачка. При вращении маховика принудительно вращается кулачок 7, момент от которого передается через шкив б и ременную передачу 2 на вал электродвигателя.

Для включения муфты на электродвигатель управления 1 подается напряжение, возникает крутящий момент под действием которого увеличивается скорость вращения электродвигателя управления и кулачок 7 поворачивается относительно крышки 9 муфты, воздействуя через рычаги 4 на нажимной диск муфты. Для отключения муфты напряжение с электродвигателя 1 снимается, скорость его вращения снижается под действием силы пружин 10 и момента трения в ременной передаче 2, кулачок 7 и рычаги 4 возвращаются в исходное положение. Аналогично работает кулачковый механизм системы управления тормозом.

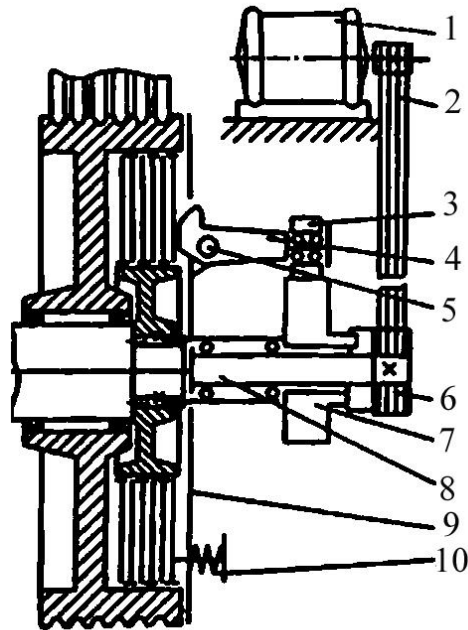


Рисунок 1.4 – Электромеханическая система управления с кулачковым механизмом преобразования крутящего момента

Электромеханическая система управления муфтой с винтовым механизмом преобразования крутящего момента (рисунок 1.5) состоит из электродвигателя управления, связанного ременной передачей 2 со шкивом 6. Винт 7 шариковой винтовой передачи установлен на крышке 9 муфты. Гайка связана со шкивом 6 с возможностью осевого перемещения и соединена с тремя рычагами 5, установленными на осях 3 на крышке 9. Гайка 8 ограничена в осевом перемещении рычагами 5, поэтому вал электродвигателя 1 принудительно вращается от маховика.

Для включения муфты подается напряжение на электродвигатель 1, который поворачивает и перемещает относительно винта 7 гайку 8, рычаги 5 и нажимной диск муфты. Винтовой механизм аналогичным образом работает при отключении и включении тормоза.

При таком пуске электродвигателя управления пусковые токи составляют  $(2, 3)I_n$  ( $I_n$  – номинальный ток). При обычном пуске электродвигателя управления из состояния покоя эти токи равны  $(5, \dots, 7)I_n$ . Это позволяет во

время технологических пауз, когда электродвигатели управления отключены, избежать перегрева обмоток статора [5].

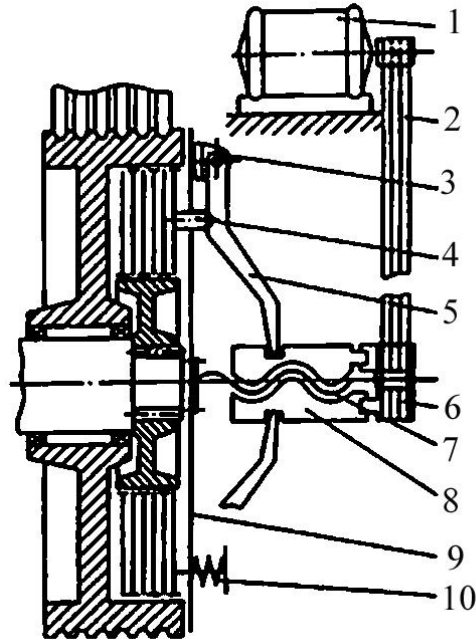


Рисунок 1.5 – Электромеханическая система управления с винтовым механизмом преобразования крутящего момента

Электромеханическую систему управления можно устанавливать на кузнечно-прессовое оборудование с отдельно управляемыми, а также со заблокированными системами включения муфты и тормоза. Она может применяться как при создании нового кузнечно-прессового оборудования, так и при модернизации существующего, например, кривошипных горячештамповочных прессов, кривошипных листоштамповочных прессов, горизонтально-ковочных машин, винтовых прессов с муфтовым приводом. Для предотвращения одновременной работы муфты и тормоза предусмотрена электрическая блокировка включения и отключения электродвигателей управления.

Электромеханическая система управления обеспечивает работу пресса в режимах одиночных ходов, автоматических ходов и наладки. Для работы в режиме автоматических ходов электродвигатель управления муфтой и тор-

мозом включаются в начале работы пресса и остаются включенными до завершения его работы.

Конструкция и возможности применения кулачковых и винтовых механизмов преобразования крутящего момента электродвигателя управления в силу воздействия на нажимной диск зависят от конструкций муфты и тормоза, привода пресса и условий его эксплуатации [5]. Сравнительный анализ пневматической и электромеханической системы управления и результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что при переходе от пневматических систем управления муфтой и тормозом к электромеханической системе управления, уровень технических характеристик кузнечно-прессового оборудования не снижается, при этом улучшаются условия эксплуатации оборудования и экология окружающей среды.

Результаты теоретических исследований показывают, что номинальная мощность электропривода управления не превышает 10% мощности главного электродвигателя. При переходе от пневматической системы управления к электромеханической мощность главного электродвигателя можно уменьшить на величину мощности электропривода управления, так как работа электропривода управления суммируется с работой главного электродвигателя. При исследовании электромеханической системы управления кривошипным горячештамповочным прессом номинальной силой 16 МН время включения муфты составило 0.2 с при номинальной мощности электропривода управления муфтой 11 кВт и мощности главного электродвигателя 110 кВт. В таком же кузнечно-прессовом оборудовании с пневматической системой управления время включения муфты при ходе нажимного диска составляет 0.25с.

В результате экспериментальных исследований электромеханической системы управления муфтой винтового пресса номинальной силой 400 кН установлено, что общее время включения муфты от момента нажатия на кнопку на пульте управления до силового смыкания дисков муфты составляет 0.1 с, из них 0.06 с — время, затрачиваемое непосредственно на включение

муфты (свободное перемещение нажимного диска и силовая нагрузка на фрикционные диски муфты), и 0.04 с — время срабатывания электромагнитного пускателя. Для повышения быстродействия системы управления рекомендуется применять безынерционное тиристорное управление для включения электропривода управления.

Таким образом, применение электромеханической системы управления кузнечно-прессовым оборудованием обеспечивает:

- работу кузнечно-прессового оборудования от электросети без применения сжатого воздуха, что повышает потребительские качества оборудования;
- при работе на одиночных ходах повышение коэффициента полезного действия пресса до 15 % в зависимости от частоты ходов;
- снижение шумовой нагрузки при эксплуатации пресса и исключение выброса масляных паров в атмосферу.

Несмотря на многочисленные преимущества, у такой системы есть недостатки, это разветвлённая сложная механическая часть, которая показана на рисунке 1.6.

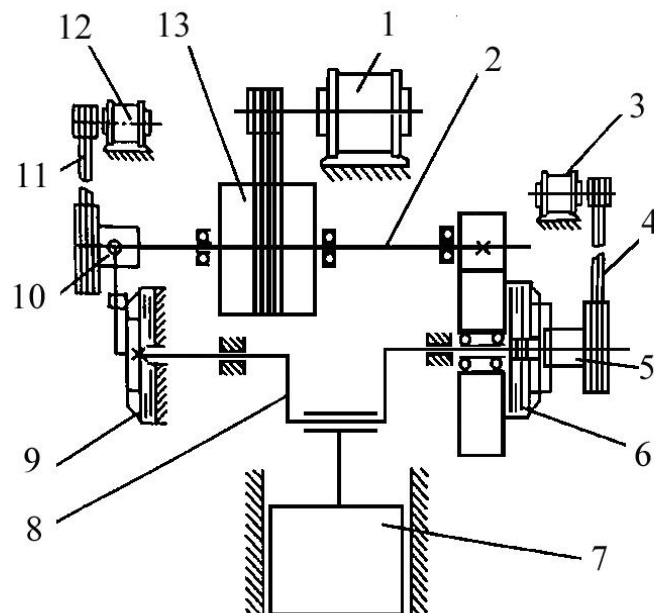


Рисунок 1.6 – Электромеханическая система управления

На рисунке 1.6 имеются следующие обозначения: 1 – главный электродвигатель; 2 – промежуточный вал; 3 – электродвигатель управления муфтой; 4,11 – ременные передачи; 5,10 – винтовые механизмы; 6 – муфта; 7 – ползун прессы; 8 – эксцентриковый вал; 9 – тормоз; 12 – электродвигатель управления тормозом; 13 – маховик. Использование ременных передач, и винтовых механизмов, образуют сложную механическую систему, с низкой ремонтпригодностью, потерю полезного момента в преобразованиях. Поэтому разработан орбитальный электропривод муфты включения, который совмещает в себе все преимущества электромеханической системы управления, и так же лишен его недостатков.

#### 1.4 Орбитальный электропривод муфты включения прессы

В кузнечно-прессовом оборудовании наибольшее распространение получили пневматические системы управления фрикционными муфтой и тормозом. Один из недостатков таких систем - необходимость использования для работы кузнечно-прессового оборудования двух энергоносителей: электрической энергии для привода главного электродвигателя и сжатого воздуха для управления (включения и отключения) муфтой и тормозом. Применение в системе управления кузнечно-прессового оборудования сжатого воздуха снижает безопасность и надежность работы оборудования, а так же существенно уменьшает его эффективный КПД, так как КПД пневматической системы 5-10% [5-7].

Работы по совершенствованию существующих пневматических систем управления кузнечно-прессового оборудования, использующих сжатый воздух, направлены в основном на уменьшение выбросов масляных паров в атмосферу цеха и снижение шума при выхлопе из пневмоцилиндров муфты и тормоза, что не решает проблемы повышения эффективности работы этих систем и улучшения условий эксплуатации.

Были попытки создать электромеханическую систему управления кузнечно-прессового оборудования, в которой использовались серийные асинхронные двигатели. Но данная система управления, имеет ряд недостатков, в числе которых сложная механическая часть, неравномерное прикладываемое усилие [5]. Применение орбитального электропривода муфты прессы избавляет от таких недостатков и дает следующие преимущества: отсутствует надобность в сжатом воздухе и используется один вид энергии – электрический; управления; значительно больший КПД (около 50–80%); скорость реагирования.

Орбитальный электропривод муфты прессы [8-10] включает в себя маховик 1, на котором закреплен опорный диск 2 и крышка 3 (рисунок 1.7-1.8). Крышка закреплена с помощью шпилек 4. Маховик на валу установлен консольно, вращение вала передается ведомым диском 5, расположенном на шлицах вала. В диске 5 установлены фрикционные вставки 6 из материала типа ретинакса или ферродо. Также имеется нажимной диск 7. Нажимной диск имеет кольцевую выемку, стойку 8, которая установлена на станине прессы. На стойке закреплены внешние 9 и внутренние 10 кольцевые статоры, которые через воздушный зазор связаны с дисковым ротором 11, установленным на валах 12 модульных приводов, в состав которых входят редуктор и преобразователь крутящего момента, которые размещены в корпусе 13 (рисунок 1.8). Нажимной диск 7 направляется и фиксируется по шлицам 14 и движется благодаря выдвиганию штоков 15 приводов. Кроме того, по периферии маховика 1 и нажимного диска 7 установлены пружины 16. Для обеспечения принудительной фиксации каждый модуль снабжен тормозными накладками 17, установленный на стержнях 18, которые прикреплены к ротору 11. В центре стойки 8 и крышки 3 имеются отверстия для обслуживания муфты. Шток 15 перемещается в поступательных направляющих 19, имеет внутреннюю резьбу 20, которая через тела качения - шары 21 взаимодействует с ходовым винтом 22, который установлен на одном валу 23 с зубчатым колесом 24 с внутренним зацеплением».

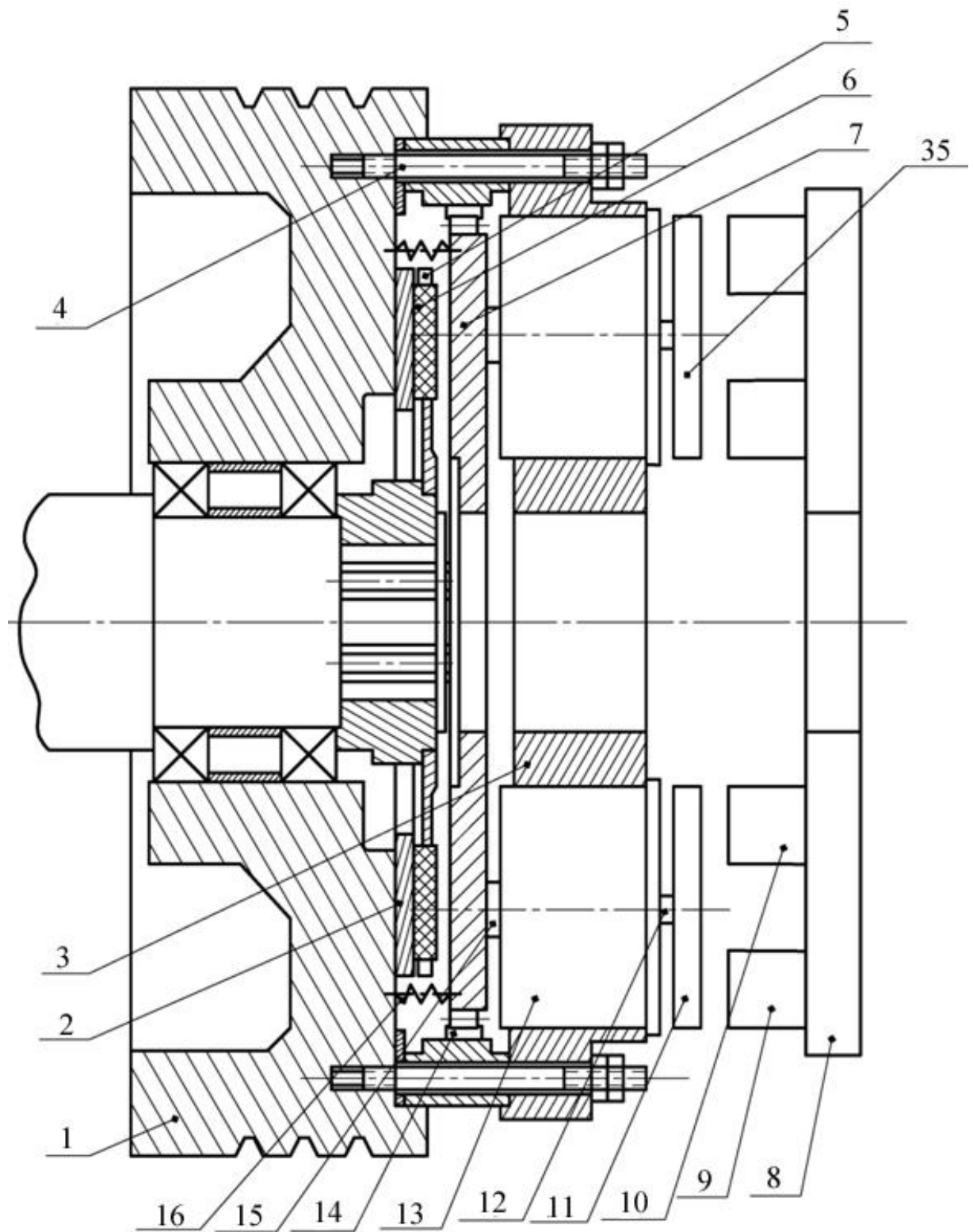


Рисунок 1.7 – Орбитальный электропривод муфты  
кривошипно-шатунного пресса

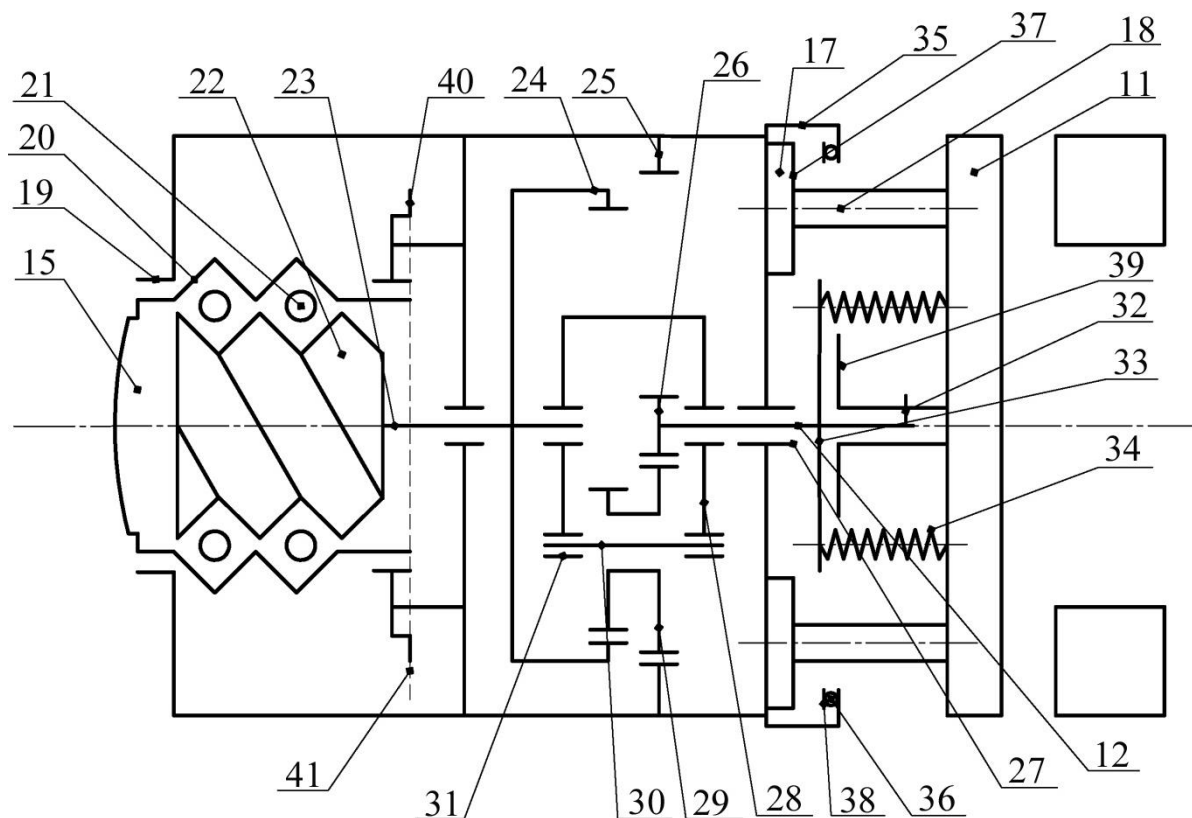


Рисунок 1.8 – Модуль с дисковым ротором

Внутри корпуса модуля закреплено зубчатое колесо 25 с внутренним зацеплением. Ротор 11 вращает шестерню 26 внешнего зацепления, которая закреплена на одном валу 12 в подшипнике 27 с ротором. Между колесами 24 и 25 с одной стороны и 26 с другой стороны установлено несколько сателлитов в водиле 28. Каждый из сателлитов представляет собой зубчатый блок 29 из двух шестерен, которые вращаются на валах 30 в подшипниках 31 водила. Кроме этого вал ротора выполнен в виде шлицевого соединения со шлицами 32, на этом же валу установлен диск 33, между диском и ротором установлены пружины сжатия 34. Так же на корпусе модуля установлены обоймы 35 с подшипниками 36 большого диаметра. На валу 23 для синхронизации работы всех модулей установлены звездочки 40, с цепью 41. Это позволяет обеспечить одинаковую степень выдвигания штоков, даже если

один или несколько торцевых роторов с редукторами в следствии каких либо причин выйдут из синхронизма.

Данная конструкция по сравнению с известивши аналогами имеет следующие преимущества:

- наличие нескольких модулей, например 6 приводит к распространению эффективной площади воздушного зазора по всей поверхности внешнего и внутреннего статоров, что обеспечивает равномерность возникновения больших усилий, передаваемых на площадь нажимного диска - минимум 6 точек контакта;
- в состав привода не входит ременная передача, что также увеличивает быстродействие из-за сочетания с модульностью и минимальной длиной кинематических цепей;
- поскольку для включения муфты и разгона ведомых частей за короткое время необходим момент значительно меньший, чем расчетный, взятый из условия преодоления полезного сопротивления, то появляется возможность управления включением с помощью задания некоторого оптимального закона включения статоров, при этом данный закон может быть непрерывным, а не двухступенчатым, который обычно применяется в пневматических приводах;
- возможность введения регулирования рабочего момента приводит к уменьшению динамического момента в валопроводах, что повышает надежность пресса в целом.

Главной частью орбитального электропривода является роторный элемент, который в свою очередь схож по конструкции с торцевым асинхронным электродвигателем. Особенностью настоящего электропривода является импульсный режим его работы, что предъявляет специальные требования к механической части: минимальное время разгона и соответственно минимальный момент инерции; возможность форсированного разгона; специфические условия эксплуатации связанные с повышенной температурой, ли-

нейными перегрузками, ударами, вибрацией; минимальная потребляемая мощность; минимальная стоимость.

Одним из главных вопросов является определение геометрических размеров, в так же распределение объемов ротора и статора на медь и сталь, от этого зависит величина приведенного активного сопротивления ротора, определяющего во многом параметры механической характеристики и энергетические показатели двигателя. Известно, что торцевые машины обладают большей сложностью магнитных полей, по сравнению с машинами классического типа из-за неравномерности поля по радиусу.

Во всем остальном такой тип привода схож с классическим асинхронным двигателем, и способы управления не отличаются кардинально. Так как орбитальный электропривод муфты, можно использовать не только при проектировании нового пресса, но и модернизировать уже существующие. Вместо классической пневмомагистрали, здесь используется электрическая сеть, такая же, как и для питания главного привода. Управление самой же муфты осуществляется через частотный преобразователь, который в свою очередь управляется контроллером пресса. Так же необходим датчик положения роторов относительно статора для эффективного управления. Несмотря на ряд достоинств, недостатком орбитального привода, даже в торцевом исполнении является неполное соответствие проекции роторов и статора.

### 1.5 Схемы подключения орбитального электропривода муфты пресса

Недостатки орбитального электропривода могут быть нивелированы с помощью введения зонного секционирования обмоток статора, который заключается в том, что по сигналу датчика положение главного вала муфты запрашивает лишь те секции статора, которые находятся в зоне торцевых роторов. Принцип работы напоминает шаговый двигатель, однако в работе не рассматривается в виду кругового движения орбитального электропривода.

Одновременно это дает возможность понизить тепловые нагрузки на секции статора, что в сочетании с характером нагрузки муфты (режим  $S_3$ ) позволяет улучшить малогабаритность характеристик привода.

Секции ротора представляют собой одинаковые индукторы. Индукторы могут быть как однофазные, так и трехфазные. Данные о положении одного из роторов поступают в контроллер пресса, положение других роторов рассчитывается. Секции включаются по мере нахождения рядом с ними ротора. Примерная схема реализации показана на рисунке 1.9.

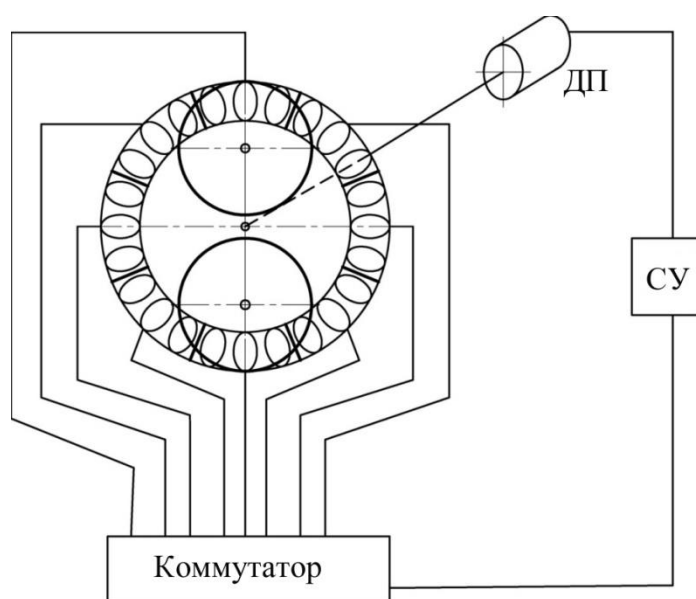


Рисунок 1.9 – Схема реализации секционирования статора

Питание такой системы может, осуществляется разными методами, как например прямое подключение к трех фазной сети или с использованием частотного преобразователя, пример такого подключения показан на рисунке 1.10, где показаны индукторы с обмоткой и схема подключения фаз А, В, С.

При питании орбитального электропривода напрямую от трех фазной сети, нам нужен управляющий коммутатор, датчик положения роторов и контроллер управления, который сопоставляет положение роторов относительно статора, и управляет коммутатором, своевременно включая и отключая секции статора. Схема такого подключения показана на рисунке 1.11.

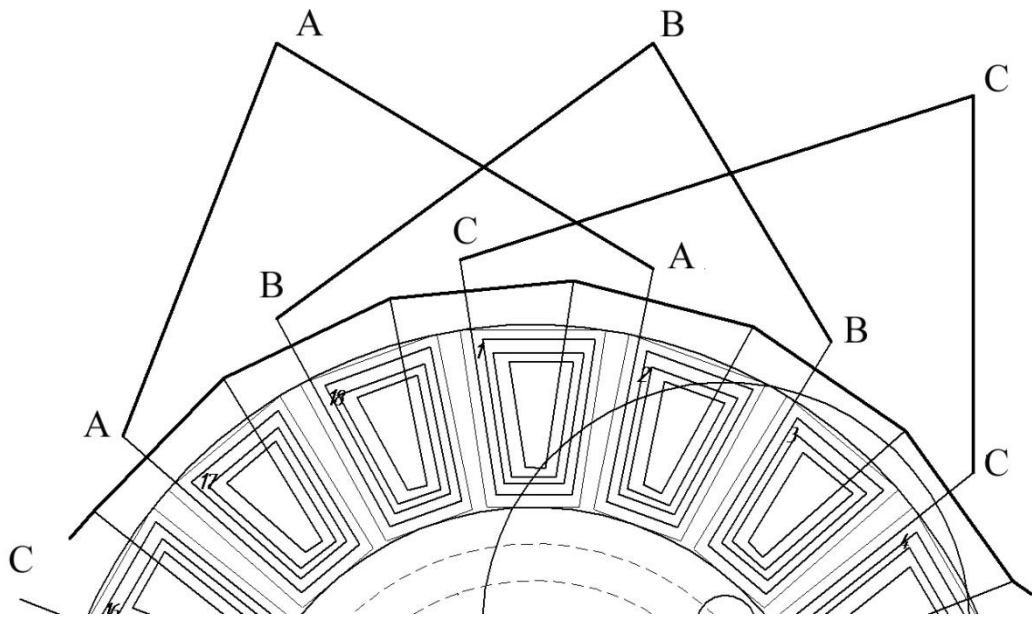


Рисунок 1.10 – Схема обмоток статора

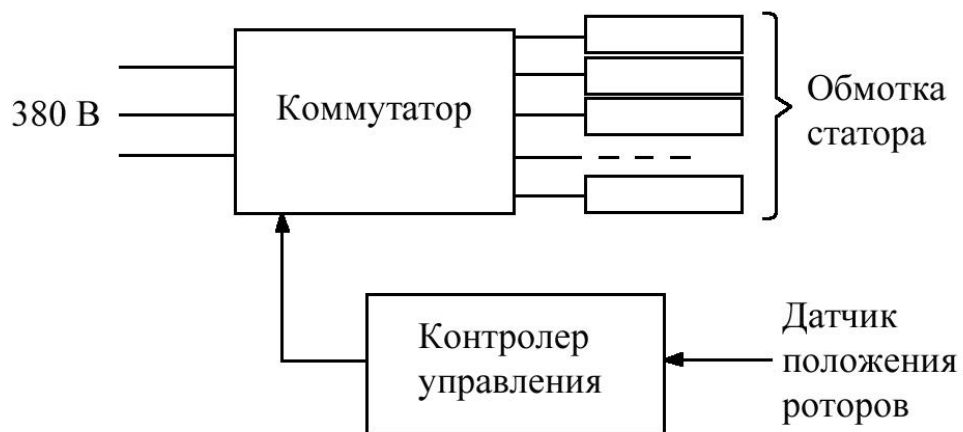


Рисунок 1.11 – Схема подключения напрямую от трех фазной сети

Вторым вариантом питания орбитального электропривода, это использование частотного преобразователя, причем с различными методами управления, как скалярным так и векторным. Использование готового преобразователя частоты (ПЧ), заставляет нас так же использовать коммутатор, но в этом случае контролер управления взаимодействует с преобразователем частоты меняя скорость вращения в зависимости от скорости изменения поло-

жения роторов относительно статора. Схема такого подключения показана на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Схема подключения с использованием ПЧ

Для более точного управления орбитальным электроприводом, необходимо исключить коммутатор из системы. Такое возможно при использовании единого контроллера управления, в котором на программном уровне будет реализовано частотное управление. Схема такого подключения на рисунке 1.13.

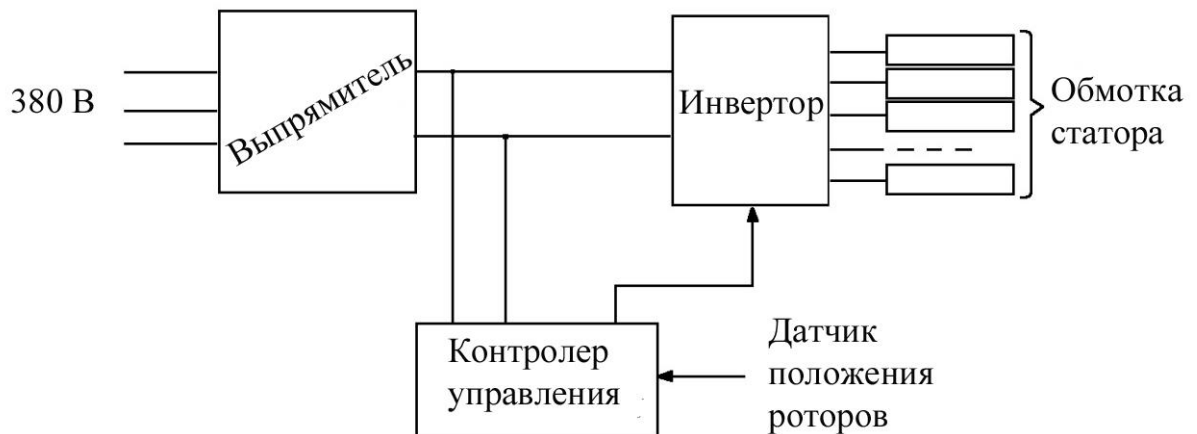


Рисунок 1.13 – Схема подключения с использованием ПЧ

Такая схема уменьшает число звеньев между питающей сетью и конечным потребителем, уменьшая число преобразований, повышается надежность всей системы. Для реализации векторного управления с таким типом подключения, необходим более производительный контроллер и обратная

связь в виде датчиков тока при выходе с инвертора. Помимо различных схем подключения, может быть использовано два варианта конструкции, отличающиеся между собой не только способом управления, но и конструктивно.

Первый вариант конструкции это использования самотормозящегося редуктора, тогда, что бы совершить ход диска муфты необходимо подать напряжение на статор, диски муфты сомкнутся, и для возврата в исходное положение используется реверс. Такой способ требует меньших затрат на перемещение дисков муфты, но требуется затраты на возвращение диска в исходное положение. Так же для такого способа нужно резервное питание, на случай, если вдруг основное питание пропадет, необходимо разжать диски муфты. Для этих целей можно использовать супер конденсаторы, что существенно повысит стоимость орбитального электропривода муфты пресса.

Второй вариант это использование шарико–винтовой передачи, тогда для совершения хода диска муфты так же необходимо подать напряжение на статор, диски муфты сомкнутся при этом сжимая пружины, а для возврата в исходное положение достаточно снять напряжение со статора. Подобный алгоритм работы использует и пневматический привод, что повышает безопасность орбитального электропривода муфты пресса. При таком варианте работы есть возможность использовать алгоритм компенсации износа муфты. Кинематическая схема показана на рисунке 1.14.

Алгоритм компенсации износа муфты работает следующим образом, в контроллере измеряется время от подачи напряжения на статор муфты, до начала вращения кривошипного вала пресса, так же необходимо знать время разгона главного двигателя после прекращения вращения кривошипного вала. Анализируя это время, система может включать муфту чуть раньше, перед тем, как главный двигатель наберет обороты для готовности к следующему ходу пресса. Таким образом, при увеличении зазора, от износа муфты, время смыкания останется неизменным, но такую схему выгодно применять при использования в пресса в непрерывном режиме работы.

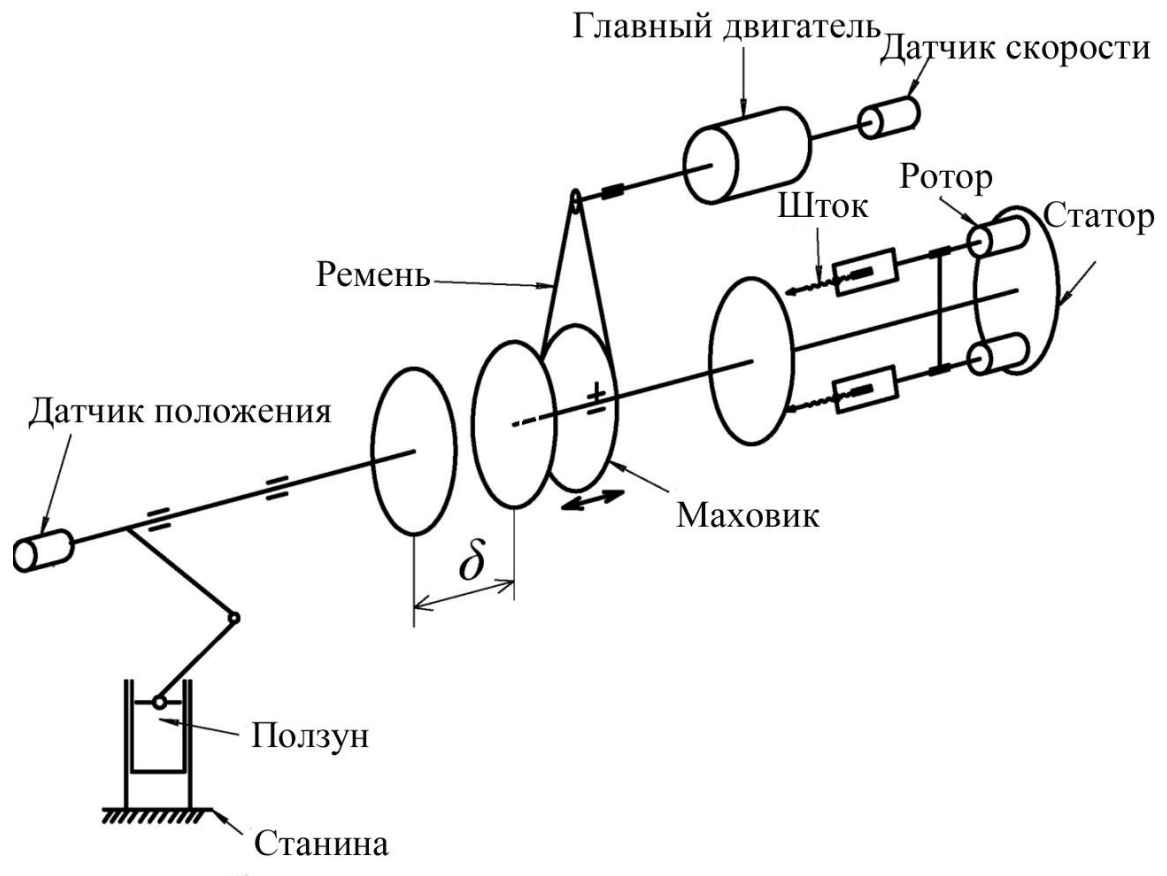


Рисунок 1.14 – Кинематическая схема орбитального электропривода муфты пресса

### 1.6 Нахождение оптимальных размеров полюсов статора

Площадь перекрытия зоны статора и зоны роторов в орбитальном электроприводе муфты включения пресса не совпадает – зоны ротора не полностью перекрываются статором. Поэтому возникает задача нахождения оптимальных размеров полюсов статора, для этого минимизируем разность [11, 12]:

$$\Delta = S_R - S_r \rightarrow \min ,$$

где  $S_R$ ,  $S_r$  – соответственно площади секторов статора и дискового ротора, которую, можно принять за обобщённый критерий. На рисунке 1.15 заштри-

хованная область и есть площадь перекрытия. Согласно рисунку 1.15 составим уравнения кинематики:

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \cos \beta + r \cdot \cos(\alpha + \beta); \\ R \cdot \sin \beta + r \cdot \sin(\alpha + \beta), \end{bmatrix}$$

где  $r$  – радиус ротора,  $R$  – орбита ротора,  $\alpha$  – угол поворота ротора,  $\beta$  – угол поворота ротора относительно орбиты.

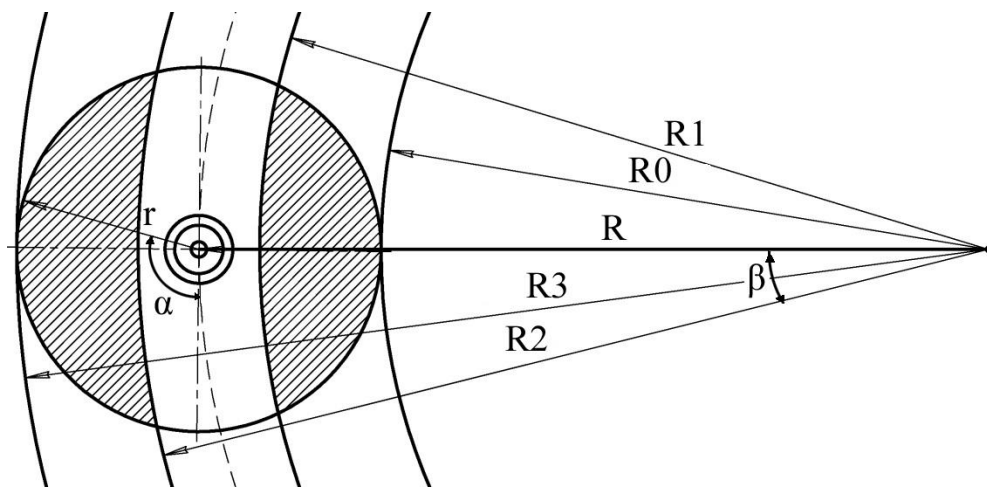


Рисунок 1.15 – Сопоставление площадей ротора и статора

Известно, что в общем случае площадь перекрытия будет равна [11]:

$$S_{\Pi} = \int_m \left( \int_{t_2}^{t_1} \sqrt{(\dot{\bar{x}}(t), \dot{\bar{x}}(t))} dt \right) dx = \int_{t_2}^{t_1} \sum_{k=1}^n l_k^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^k b_k^{ij} q_i q_j} dt,$$

где  $m$  – заданная разность конфигураций;  $l_k$  – длина  $k$ -го звена;  $q_i, q_j$  – обобщенные координаты;

$$b_k^{ij} = \left( \frac{\partial \mathbf{B}_k^*}{\partial q_i} \frac{\partial \mathbf{B}_k^*}{\partial q_j} \mathbf{l}_k^0, \mathbf{l}_k^0 \right) = \left( \mathbf{B}_k^* \mathbf{B}_k^i \mathbf{l}_k^0, \mathbf{l}_k^0 \right), \quad i, j, k = 1, \dots, n;$$

$B_k=B_k(q)$  – матрица перехода от системы координат  $k$ -го звена к инерциальной системе координат. Простой способ вычислить  $S_{\Pi}$  – воспользоваться выражением для площади фигуры заданной параметрически:  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $t \in [0, 2\pi]$ :

$$S_{\Pi} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (x_1 x_2' - x_2 x_1') dt.$$

Подставим уравнения кинематики и получим [11]:

$$\begin{aligned} S_{\Pi} &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \{ [R \cdot \cos \beta + r \cdot \cos(\alpha + \beta)] \cdot [R \cdot \beta \cdot \cos \beta + r \cdot (\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha + \beta)] + \\ &\quad + [R \cdot \sin \beta + r \cdot \sin(\alpha + \beta)] \cdot [R \cdot \beta \cdot \sin \beta + r \cdot (\alpha + \beta) \cdot \sin(\alpha + \beta)] \} dt = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [R^2 \beta + r^2 (\beta + \alpha) + \frac{Rr}{2} (2\beta + \alpha) \cos \alpha] dt = \\ &= R^2 (\beta^1 - \beta^0) + r(\beta^1 + \alpha^1 - \beta^0 - \alpha^0) + \frac{Rr}{2} \int_0^{2\pi} [(2R + r) \cos \alpha] dt \end{aligned}$$

при условиях:

$$\beta(0) = \beta^0; \quad \alpha(0) = \alpha^0; \quad \beta(2\pi) = \beta^1; \quad \alpha(2\pi) = \alpha^1$$

Таким образом, по известным величинам можно оценить площадь зон перекрытия статора и ротора, или же можно поставить обратную задачу, по заданной площади можно определить ширину зоны статора или радиус роторов.

## Выводы

1. Использование орбитального электропривода муфты пресса, необходимо использовать в совокупности с аналогичным тормозом, что бы полностью исключить использование воздуха в системе.

2. Электромеханические системы, в областях кузнечно-прессового оборудования сменяют пневматические и гидравлические системы, что обусловлено развитием специальных электроприводов.

3. Использование в орбитальном электроприводе секционирование статора дает возможность повысить энергоэффективность системы.

## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУФТЫ

### 2.1 Исследование статических режимов

Задачей, решаемой при проектировании, является выявление основных особенностей такого электродвигателя на основе натурального эксперимента. Метод решения данной задачи – физическое моделирование и обработка результатов с помощью планирования эксперимента [13]. Главная особенность проектирования, орбитального электропривода муфты включения пресса состоит в проектировании в заданном объеме много роторной системы, которая обеспечивает требуемый номинальный момент, кратность максимального момента, при наиболее возможном КПД, и выполнения определенных эксплуатационных ограничений, состоящих в первую очередь, в недопущения выхода проектируемой электромеханической системы за габариты пневматического привода.

Центральным вопросом при определении геометрических размеров, является распределение объемов ротора и статора на медь и сталь, от этого зависит величина приведенного активного сопротивления ротора, определяющего во многом параметры механической характеристики и энергетические показатели двигателя [14]. Известно, что торцевые машины обладают большей сложностью магнитных полей, по сравнению с машинами классического типа из-за неравномерности поля по радиусу. Это не позволяет приступить, в полной мере, к аналитическому исследованию полей и требует предварительного накопления экспериментальных данных, на специальных моделях для дальнейшего уточнения картины физического распределения потоков и выделения основных факторов.

С указанной целью были проведены исследования двух полюсной, двух фазной торцевой магнитной системы, имеющей следующие размеры (рисунок 2.1): диаметр якоря 140 мм; рабочий воздушный зазор 1...2 мм; габариты сердечника катушек 11x14 мм; высота катушки 20 мм.

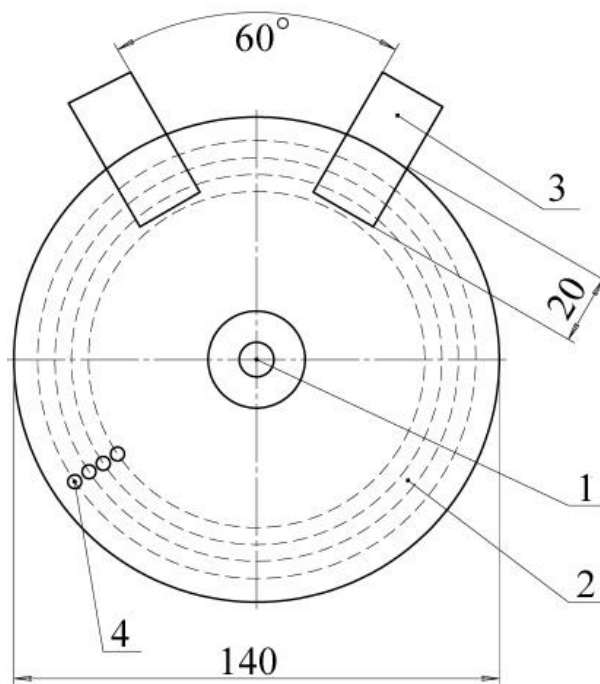


Рисунок 2.1 – Геометрические размеры модели орбитальной электромеханической системы: 1 – вал; 2 – диск; 3 – катушки; 4 – болты

С целью увеличения технологичности, уменьшению стоимости обмоточных работ, проведено исследование возможности применения ротора на основе алюминиевого диска с ферромагнитными элементами в виде массива болтов малого диаметра (2.5 мм), обращенных головками к статору (рисунок 2.2), при этом нарезная часть болтов используется для крепления внешнего шихтованного магнитопровода.

На основании предварительных исследований в качестве основных факторов были выделены: величина воздушного зазора; шаг болтов (при условии расположения болтов в 4 ряда); ток возбуждения; величина рабочей ёмкости; количество болтов. Величина рабочей ёмкости была взята в качестве значимого параметра из-за особенностей проведения эксперимента, при подключении к трех фазной сети, этот параметр не требуется. Наиболее значимыми параметрами являются величина воздушного зазора, величина рабочей ёмкости, количество болтов.

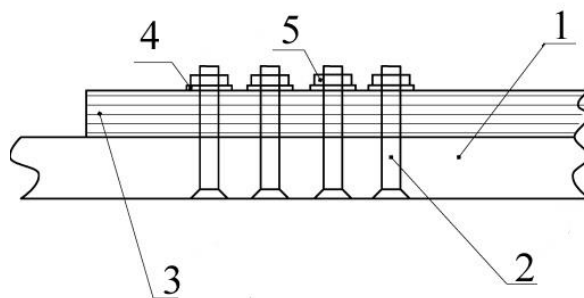
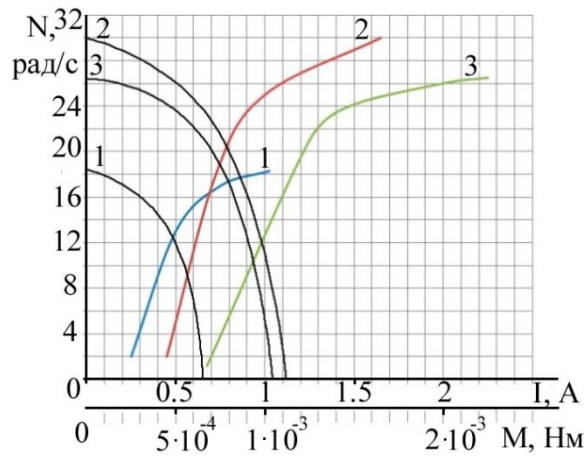


Рисунок 2.2 – Расположение массива болтов: 1 – диск; 2 – болты;  
3 – ферромагнитный пакет; 4 – шайбы; 5 – гайки

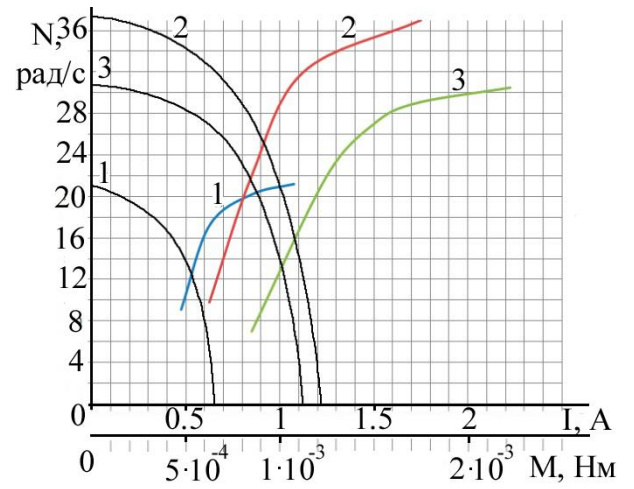
В дальнейшем была проведена серия экспериментов с различными параметрами [15]. Полученные результаты зависимости скорости вращения от тока показаны на графиках (рисунок 2.3) для рабочей ёмкости 10 мкф (1), 15 мкф (2), и 20 мкф (3) и различных параметрах (рисунок 2.3): а – воздушный зазор 1 мм, количество болтов 0 шт. ; б – воздушный зазор 2 мм, количество болтов 0 шт.; в – воздушный зазор 2 мм, количество болтов 12 шт.; г – воздушный зазор 2 мм, количество болтов 24 шт.; д – воздушный зазор 2 мм, количество болтов 34 шт.; е – воздушный зазор 2 мм, количество болтов 48 шт. Так же получены механические характеристики для всех проведенных экспериментов. Измерение пускового момента производилось с помощью динамометра, рабочего момента - методом поднятия груза, измерение скорости вращения ротора с помощью лазерного тахометра DT - 0071.

На основании приведенных серий экспериментальных данных был проведен анализ для выявления степени влияния факторов на выходные характеристики привода (пусковой момент и скорость). Для этого выбираем вид функции в виде отрезка полинома – квадратичную модель системы. По результатам экспериментов, была выделена рабочая ёмкость в 15 мкф. Другими значимыми факторами, были выбраны:  $\delta$  – воздушный зазор;  $n$  – количество болтов;  $I$  – ток. Таким образом система описывается некоторой функцией вида:

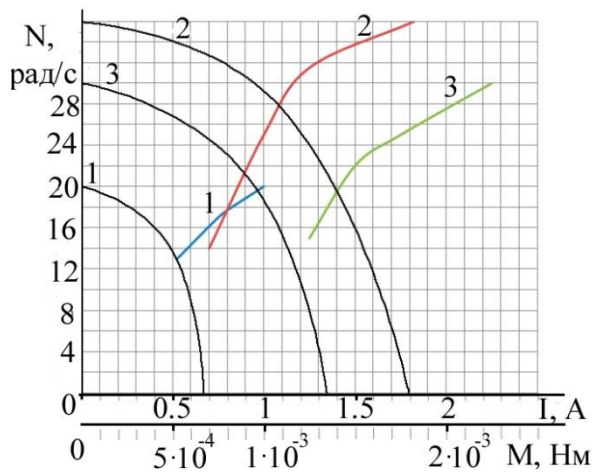
$$\begin{cases} N = f(\delta, I, n); \\ M = g(\delta, I, n). \end{cases} \quad (2.1)$$



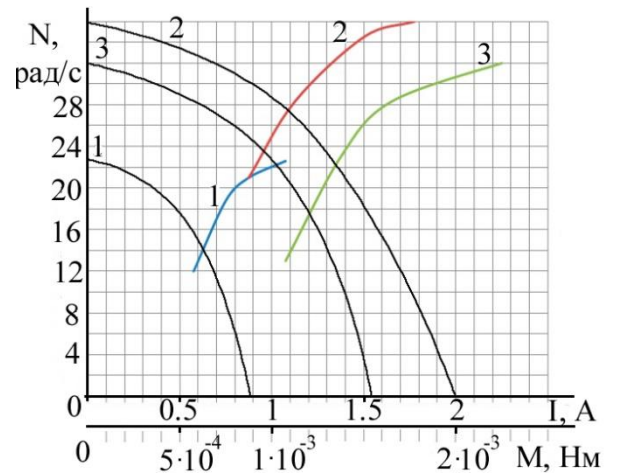
а



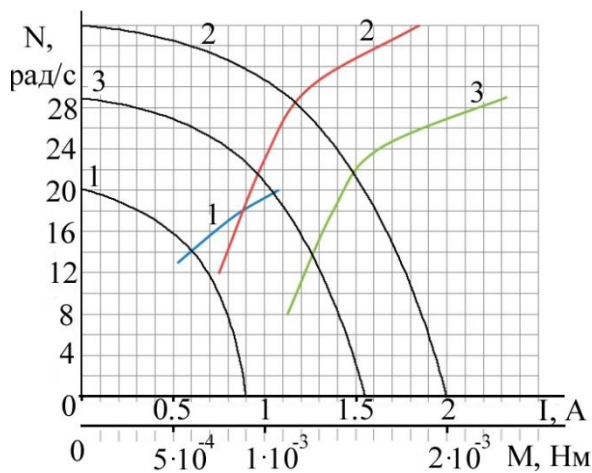
б



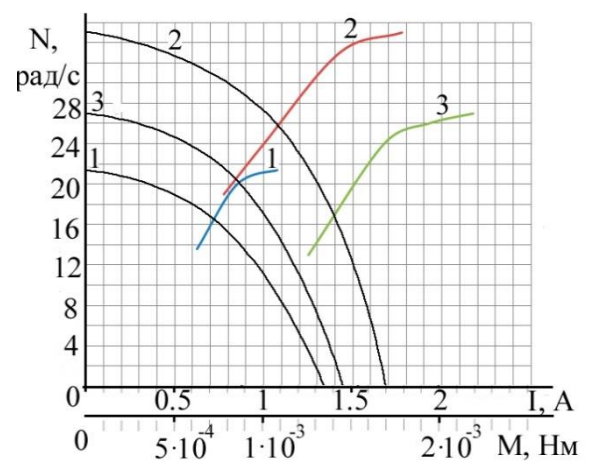
в



г



д



е

Рисунок 2.3 – Результаты экспериментов

Математическая модель системы получается в результате аппроксимации этих функций, например полиномиальной формой, тогда функции имеют вид:

$$\begin{cases} N = a_0 + a_1\delta + a_2I + a_3I^2 + a_4n + a_5n^2; \\ M = b_0 + b_1\delta + b_2I + b_3I^2 + b_4n + b_5n^2, \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $a_0$ - $a_5$  – искомые параметры модели для нахождения скорости  $N$ ,  $b_0$ - $b_5$  искомые параметры модели для нахождения момента  $M$ . Таким образом, есть две модели, каждая из которых имеет 6 неизвестных.

На основании полученных результатов эксперимента (рисунок 2.3) можно составить две системы уравнений для нахождения искомых параметров модели. Система уравнений для нахождения скорости:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 + a_2 \cdot 1.5 + a_3 \cdot 1.5^2 + a_4 \cdot 0 + a_5 \cdot 0^2 = 290; \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 1.5 + a_3 \cdot 1.5^2 + a_4 \cdot 34 + a_5 \cdot 34^2 = 330; \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 1.85 + a_3 \cdot 1.85^2 + a_4 \cdot 34 + a_5 \cdot 34^2 = 360; \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 1.6 + a_3 \cdot 1.6^2 + a_4 \cdot 24 + a_5 \cdot 24^2 = 350; \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 0.7 + a_3 \cdot 0.7^2 + a_4 \cdot 12 + a_5 \cdot 12^2 = 140; \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 0.8 + a_3 \cdot 0.8^2 + a_4 \cdot 48 + a_5 \cdot 48^2 = 150. \end{cases} \quad (2.3)$$

Система уравнений для нахождения момента:

$$\begin{cases} b_0 + b_1 + b_2 \cdot 1.5 + b_3 \cdot 1.5^2 + b_4 \cdot 0 + b_5 \cdot 0^2 = 100; \\ b_0 + b_1 \cdot 2 + b_2 \cdot 1.5 + b_3 \cdot 1.5^2 + b_4 \cdot 34 + b_5 \cdot 34^2 = 175; \\ b_0 + b_1 \cdot 2 + b_2 \cdot 1.85 + b_3 \cdot 1.85^2 + b_4 \cdot 34 + b_5 \cdot 34^2 = 200; \\ b_0 + b_1 \cdot 2 + b_2 \cdot 1.6 + b_3 \cdot 1.6^2 + b_4 \cdot 24 + b_5 \cdot 24^2 = 190; \\ b_0 + b_1 \cdot 2 + b_2 \cdot 0.7 + b_3 \cdot 0.7^2 + b_4 \cdot 12 + b_5 \cdot 12^2 = 30; \\ b_0 + b_1 \cdot 2 + b_2 \cdot 0.8 + b_3 \cdot 0.8^2 + b_4 \cdot 48 + b_5 \cdot 48^2 = 50. \end{cases} \quad (2.4)$$

Решим эти системы уравнений и найдем, искомые параметры моделей:

$$\begin{cases} N = -334.8 + 72.74 \cdot \delta + 596.9 \cdot I - 152.6 \cdot I^2 - \\ - 1.249 \cdot n + 0.0084 \cdot n^2; \\ M = -520.1 + 154.7 \cdot \delta + 503.8 \cdot I - 129.1 \cdot I^2 - \\ - 5.012 \cdot n + 0.0785 \cdot n^2. \end{cases} \quad (2.5)$$

Для полученных моделей построим различные графики зависимости. На рисунках 2.4 – 2.6 показаны зависимости скорости от тока, и количества болтов, зависимости скорости от тока и величины воздушного зазора, зависимости момента от величины воздушного зазора, и количества болтов.

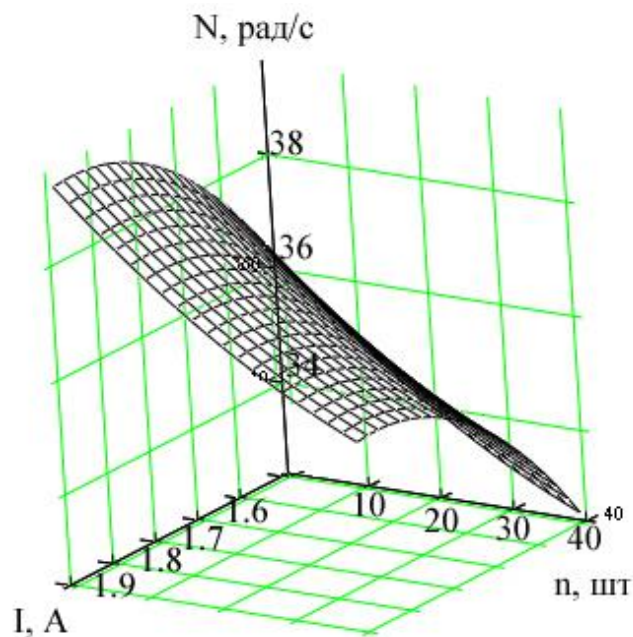


Рисунок 2.4 – Результаты моделирования, зависимости скорости от тока, и количества болтов

Стоит отметить, что данные модели линейны и совпадают с экспериментальными данными только в окрестностях определенных точек, которые и использовались для построения модели. Но даже эти данные дают возможность судить о весомости тех или иных факторов [13].

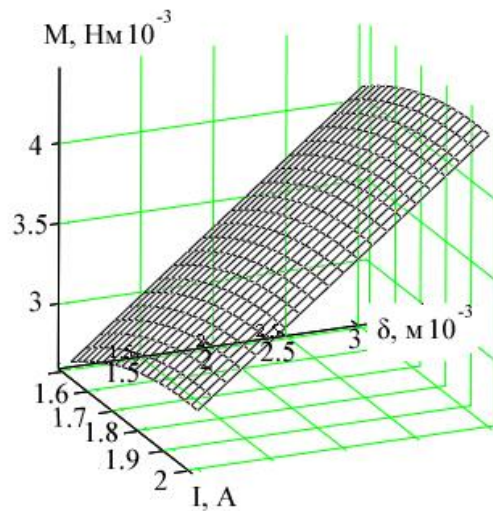


Рисунок 2.5 – Результаты моделирования, зависимости скорости от тока и величины воздушного зазора

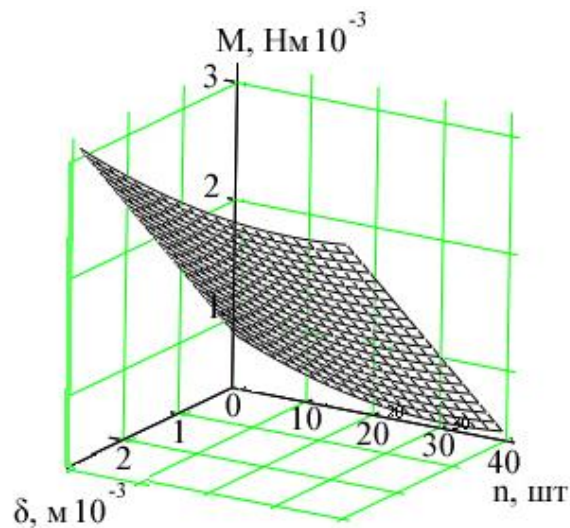


Рисунок 2.6 – Результаты моделирования, зависимости момента от величины воздушного зазора, и количества болтов

В результате были получены модели, которые упрощают дальнейшее проектирование торцевого асинхронного электродвигателя. С помощью этих моделей можно определить характеристики системы с определенной погрешностью, изменяя те или иные параметры.

## 2.2 Проектирование системы управления орбитального электропривода муфты включения

Особенность орбитального электропривода такое же, как и у асинхронного двигателя, значение воздушного зазора и особая конструкция магнитной системы, связанная с наличием нескольких пар полюсов (рисунок 2.7) и предполагающая секционирование, как в орбитальном, так и в радиальном направлениях [11,12].

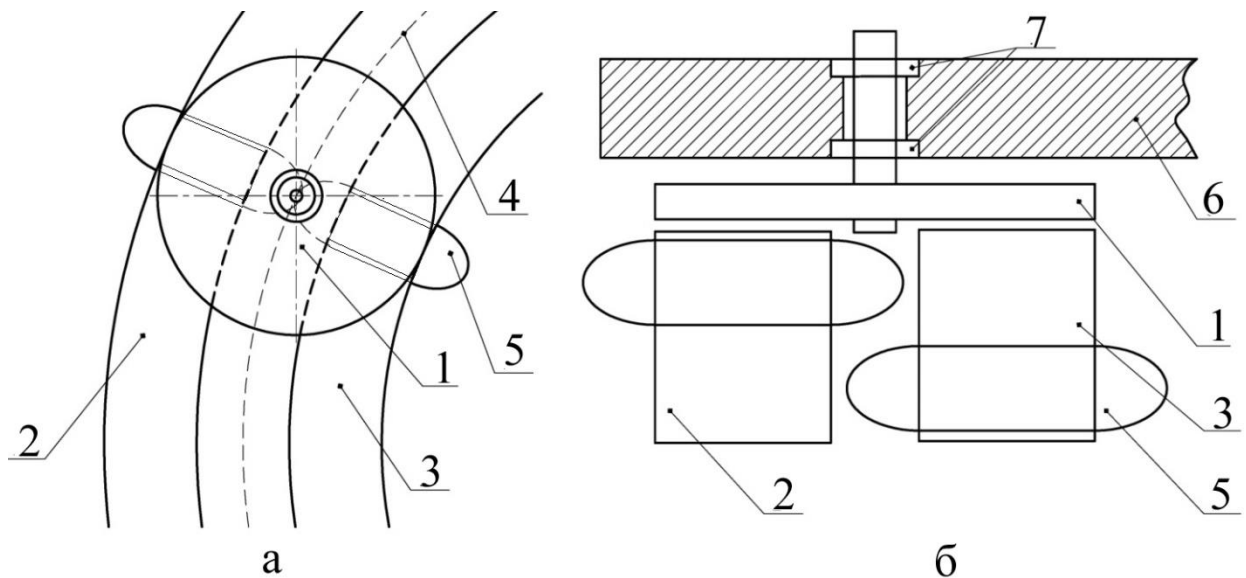


Рисунок 2.7 – Орбитальный электропривод, вид сверху (а), вид в разрезе (б):

1 – ротор; 2 – внешний статор; 3 – внутренний статор;  
4 – траектория движения ротора; 5 – обмотка статора; 6 – диск для крепления роторов; 7 – подшипники

Статоры разделены на внутренний 3 и внешний 2, сделано это для того чтобы ось ротора могла свободно передвигаться. Обмотка 5 на статорах сдвинута, для обеспечения минимальных габаритов.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется по формуле [16-18]:

$$M = C\Phi I_2 \cos\psi_2,$$

где  $C = 3 \cdot 4,44 \cdot f \frac{w_2 k_2}{\omega_0} = \frac{3}{\sqrt{2}} w_2 k_2 p$  – конструктивный коэффициент;

$\omega_0 = 2\pi f / p$  – скорость вращения магнитного поля;  $\psi_2$  – сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора;  $I_2 \cos \psi_2$  – активная составляющая тока ротора [19].

Таким образом, электромагнитный момент зависит от результирующего магнитного поля  $\Phi$  и активной составляющей тока ротора. Результирующая магнитного поля  $\Phi$  зависит от площади зон перекрытия прямо пропорционально, при допущении, что отсутствуют краевые эффекты, из этого следует, что момент орбитального электропривода будет равен:

$$M_{\text{ОП}} = M_{\text{АД}} \cdot \frac{S_r}{S_{\text{П}}} = M_{\text{АД}} \cdot K_{\text{П}} \quad (2.6)$$

где  $M_{\text{АД}}$  – момент аналогичного асинхронного двигателя,  $K_{\text{П}}$  – коэффициент перекрытия,  $S_r$  – площадь ротора,  $S_{\text{П}}$  – площадь перекрытия ротора и статора.

Расчеты, приведенные в параграфе 1.6 справедливы для распределенной обмотки. Статор с распределенной обмоткой является более сложным в изготовлении. Поэтому для орбитального привода была выбрана однослойная сосредоточенная обмотка (рисунок 2.8). Несмотря на некоторые потери, в том числе зон перекрытия статора и ротора, сосредоточенная обмотка является более дешевой и универсальной.

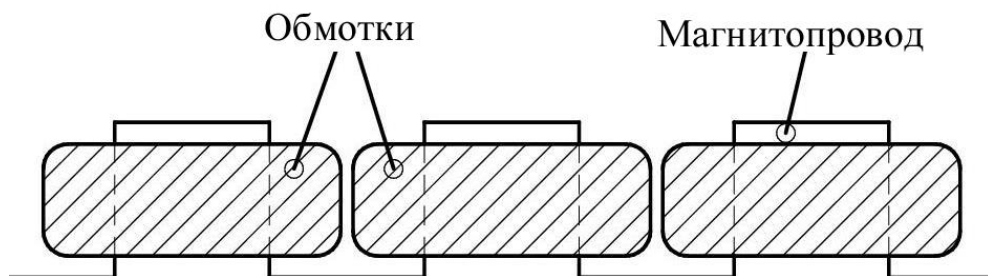


Рисунок 2.8 – Однослойная сосредоточенная обмотка

Для обеспечения как можно большей зоны перекрытия ротора и статора, необходимо выбрать форму обмотки. Для этого был использован графический пакет Компас 3D, с помощью которого определили процентное соотношение площадей статора и обмотки, с различными формами. На рисунке 2.9 а,б,в – различные прямоугольные формы обмотки, г – квадратная форма обмотки, д – круглая форма обмотки, е – трапецевидальная форма обмотки. По расчетам максимально возможную площадь занимает трапецевидальная обмотка – 94%, а самую минимальную круглая обмотка – 75%.

Обмотка трапецевидальной формы, хоть и обеспечивает максимальную площадь перекрытия, но сложна в изготовлении, поэтому для унификации конструкции предложено использовать индукторы с прямоугольной формой обмотки, пример такой обмотки показан на рисунке 2.10. Своеобразное расположение индукторов позволяет обеспечить максимальную площадь перекрытия. Так же унификация конструкции позволяет использовать одни и те же индукторы для различных конфигураций орбитального электропривода муфты включения кривошипного прессы.

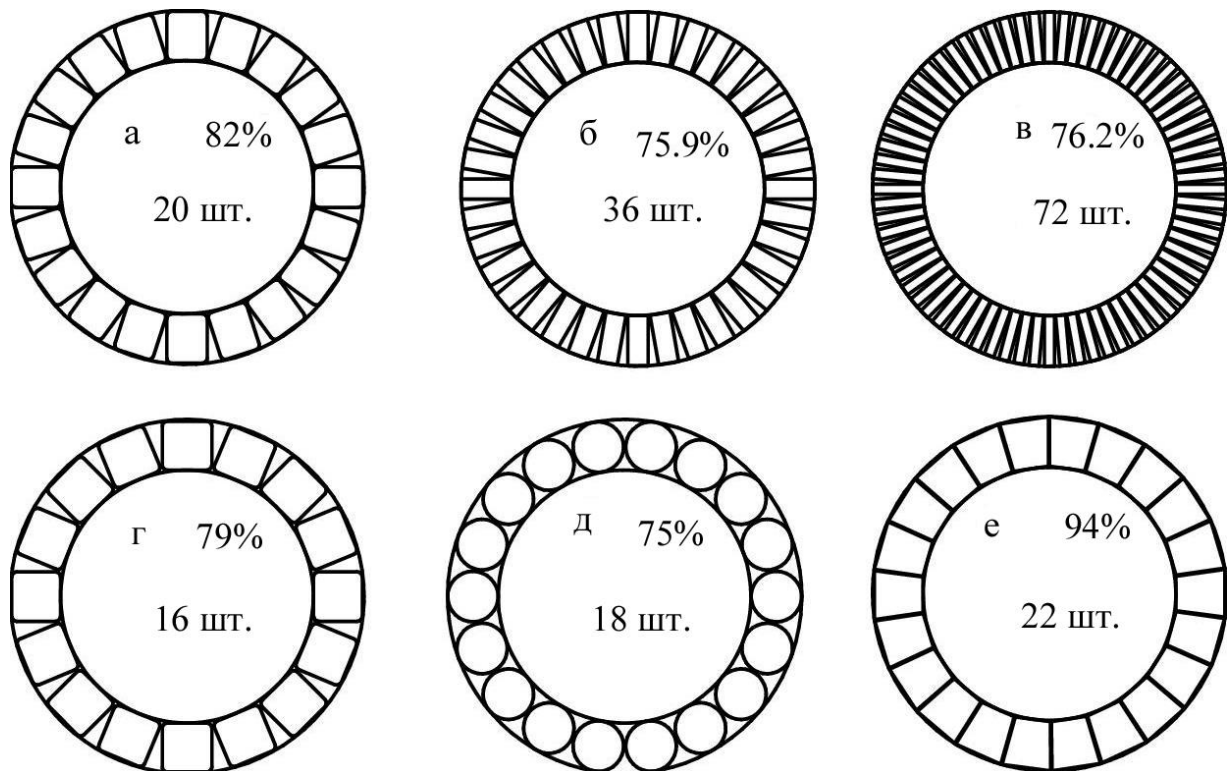


Рисунок 2.9 – Форма обмотки и отношение площадей к статору

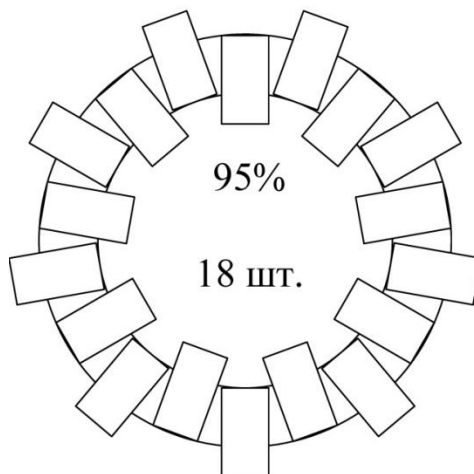


Рисунок 2.10 – Прямоугольная форма обмотки

В конечном итоге, зная площадь перекрытия, определить характеристики двигателя можно лишь приблизительно, для более точного анализа необходимо учесть следующие закономерности: это не симметрия активной зоны вдоль расчетной длины, модульное выполнение статора, особенности геометрии обмоток [12].

Многообразие конструктивных форм выполнения активной зоны делает задачу исследования в достаточной степени сложной. В этом смысле представляется целесообразным для каждого из наиболее типичных исполнений выбрать такой метод, использование которого позволит с необходимой точностью и эффективностью исследовать орбитальный электропривод. Помимо характеристик статора необходимо обратить внимание на конструкцию ротора, воздушный зазор и систему управления. Для исследования этих вопросов были произведены эксперименты, в которых упор делался на конструкцию ротора.

Из всего этого можно сделать выводы, для получения максимальных характеристик орбитального электропривода, необходимо уменьшить разницу площадей ротора и статора, в этом очень сильно поможет трапецеидальная форма катушек, что минимизирует зазор между катушками, так же необходимо уделить внимание конструкции ротора и выбора системы управления.

### 2.3 Исследование динамических режимов орбитального электропривода муфты кривошипного пресса

Основное требование, предъявляемое к орбитальному электроприводу муфты – малое время срабатывания, которое для кривошипного пресса с усилием, например, 2500 т.с. доходит до 0.3-0.5 секунды при общей длине цикла программы 1-2 секунды [20–22].

Как известно время разбега определяется из уравнения динамики:

$$t_p = 10^{-5} \int_{\Omega=0}^{\Omega=\Omega_H^*} N_D \frac{Jd\Omega}{M_D(\Omega) - M_c(\Omega)} = 10^{-5} \int_{\Omega=0}^{\Omega_H^*} \frac{Jd\Omega}{M_{изб}(\Omega)}. \quad (2.7)$$

Здесь  $M_D(\Omega)$ ,  $M_c(\Omega)$  и  $M_{изб}(\Omega)$ — соответственно моменты вращения двигателя, его нагрузки (сопротивления) и избыточный в функции скорости  $\Omega$ ;  $J$  — момент инерции вращающихся частей;  $\Omega^*$  — расчетная номинальная угловая скорость. Согласно формуле (2.7) время разбега определяется кривой избыточного момента двигателя: чем больше момент  $M_{изб}$  при каждой скорости, тем меньше при прочих равных условиях время разбега [23]. Реальная зависимость  $M_c(\Omega)$  может быть представлена в виде прямой, проходящей через начало координат и точку номинального режима:

$$M_c(\Omega) = M_H \frac{\Omega}{\Omega_H} = M_H \frac{1-s}{1-s_H}. \quad (2.8)$$

Анализ этих зависимостей показывает, что минимизация времени разбега пропорционально моменту вращения и обратно пропорционально моменту инерции, который в свою очередь прямо зависит от толщины ротора. Между тем, как известно из предыдущих параграфов, максимальный момент возрастает с толщиной ротора, а затем убывает, таким образом задачей явля-

ется определение основных соотношений, которые позволили бы минимизировать время разбега и момент инерции, при одновременном увеличении момента вращения.

Кроме этого, для пуска роторов можно рекомендовать форсированный запуск, т.е. запуск с повышенным напряжением, который хотя и приводит к снижению КПД и  $\cos\phi$ , а так же увеличению степени нагрева, но позволяет уменьшить время разбега. Изменение основных величин, характеризующих форсированный запуск, определяется следующими уравнениями [23, 24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_M^* = \frac{M_{M2}^*}{M_{M1}^*} = U^2; \quad M_{\Pi}^* = \frac{M_{\Pi2}^*}{M_{\Pi1}^*} = U^2; \\ I_{\Pi}^* = \frac{I_{\Pi2}^*}{I_{\Pi1}^*} = U; \quad P_{\Pi}^* = \frac{P_{\Pi2}^*}{P_{\Pi1}^*} = U^2; \quad t_p^* = \frac{t_{p2}^*}{t_{p1}^*} = \frac{1}{U^2}. \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Уравнения (2.9) позволяют оценить кратность изменения пускового тока  $k_I^*$  и пусковой мощности  $k_p^*$  по отношению к рабочим току и мощности при номинальном напряжении:

$$k_I^* = \frac{I_{\Pi2}^*}{I_{H1}^*} = \frac{I_{\Pi2}^*}{I_{\Pi1}^*} \cdot \frac{I_{\Pi1}^*}{I_{H1}^*} = k_1^* U;$$

$$k_p^* = \frac{P_{\Pi2}^*}{P_{H1}^*} = \frac{P_{\Pi2}^*}{P_{\Pi1}^*} \cdot \frac{P_{\Pi1}^*}{P_{H1}^*} = k_1^* U^2.$$

Если учесть, что для реальных асинхронных торцевых двигателей обычно  $k_I = 2—4$ , а  $k_p = 2—5$ , то при форсированном запуске при  $U^* = 1,5—1,8$  кратность пускового тока составит уже  $k_I^* = 3—7$ , а  $k_p^* = 4—15$ .

Таким образом, процедура выбора дисковых роторов орбитального привода является сложной взаимно противоречивой, тем не менее можно реализовать следующий алгоритм проектирования.

При расчете электрических машин обычно исходят из известного уравнения для машинной постоянной [17]:

$$d_1^2 l_1 = \frac{6,1 \cdot 10^4 \cdot k_E \cdot P_{2H}}{a_\delta \cdot k_B k_{\omega 1} \eta \cos \varphi \cdot n A B_\delta}, \quad (2.10)$$

где  $d_1^2 l_1$  – средний объем активной поверхности;  $P_{2H}$  – расчетная мощность;  $A$  – линейная нагрузка на среднем диаметре;  $B_\delta$  – амплитуда индукции в зазоре;  $n$  – синхронная частота вращения;  $a_\delta, k_\delta$  и  $k_{\omega 1}$  – коэффициенты утолщения, формы кривой поля и обмоточный, откуда вытекают зависимость для электромагнитных нагрузок  $A \cdot B_\delta$  при данных размерах и моменте:

$$A \cdot B_\delta = \frac{64 \cdot k_E}{a_\delta \cdot k_B k_{\omega 1}} \cdot \frac{1 - s_H}{\eta \cos \varphi} \cdot \frac{M_H}{d_1^2 l_1}. \quad (2.11)$$

Но кроме того, требуются еще дополнительные уравнения для  $d_1 / d_H$  и  $l_1 / L_1$ , связывающие габариты ротора с размерами его статора и необходимые для определения последних. Для определения электромагнитных нагрузок необходим предварительный выбор таких исходных величин как КПД,  $\cos \varphi$  и коэффициент ЭДС  $k_E$ , а кроме того, чтобы разделить найденное  $A \cdot B_\delta$  на линейную нагрузку  $A$  и индукцию в воздушном зазоре  $B_\delta$  надо задаться или их отношением  $A / B_\delta$  или одним из них, например, значением  $A$ . Это означает, что необходимо иметь достаточно четкие рекомендации по выбору  $A$  (или  $A / B_\delta$ ),  $\eta$  и  $\cos \varphi$  в функции мощности или размеров ротора, учитывающие и конкретные условия размещения, и эксплуатационные ограничения, и требования максимума КПД, и заданного времени разбега. V-образный характер

зависимости  $A \cdot B_\delta$  от диаметра может быть подтвержден и данными реальных АД [14].

Выбор того или иного отношения  $k_d$  наружного диаметра  $d_H$  к диаметру статора  $d_1$  определяет при данных внешних размерах диаметр статора:

$$d_1 = \frac{d_H}{k_d}, \quad (2.12)$$

и распределение объема двигателя на ротор и статор.

Для торцевого асинхронного двигателя увеличение  $k_d$  приводит к тому, что активное сопротивление ротора снижается, а статора — увеличивается. Рост  $k_d$  затрудняет выполнение статора (из-за технологических ограничений) и обеспечение желаемой площади его пазов  $\xi_{п1}$ ; снижение  $k_d$ , наоборот, ограничивается технологически допустимыми размерами ротора. Значения  $k_d$ , рекомендуемые для торцевого АД по условиям максимума КПД — чем больше число зубцов ротора  $Z_2$ , тем при  $r'_2 = \text{const}$  может быть взят меньшим размер паза и относительная толщина ротора  $W$ . С ростом удельного максимального момента требуется ротор с большей толщиной  $W$ . При нормальном исполнении торцевого АД величина  $k_d$  также, хотя и не непосредственно, связана с относительной толщиной ротора

$$W = \frac{d_2}{d_3} < 1;$$

$$k_d = \frac{d_H}{d_1} = \frac{d_H}{d_{BH}} \cdot \frac{d_{BH}}{d_1} \approx \frac{d_H}{d_{BH}} \cdot W.$$

В свою очередь,  $W$  выбирается из тех же соображений, что и при обратном исполнении. Однако выбор  $k_d$  во многом определяется здесь диаметром расточки статора  $d_1$  целесообразным по условиям его выполнения.

Для примера рассчитаем модуль муфты для прессы 2500 тс. Усилие такой муфты должно достигать 372 кН. В данной конструкции используется 6 модулей, таким образом, усилие на один модуль 62 кН. В качестве механической цепи модуля использовался червячный редуктор.

Рассчитаем момент на редукторе:

$$M_2 = l_2 \cdot F = 0.25 \cdot 62 = 15.5 \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (2.13)$$

где  $l_2$  – радиус большого колеса редуктора. Зная передаточное число редуктора, можем определить момент на двигателе:

$$M_1 = \frac{M_2}{u \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{15500}{60 \cdot 0.9 \cdot 0.99} = 289 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.14)$$

где  $\eta_{1,2}$  – КПД механизма, подшипников и т.д.,  $u$  – передаточное число редуктора.

Исходя из линейной скорости муфты  $v$ , и радиуса большого колеса редуктора, можно определить необходимую угловую скорость большого колеса редуктора:

$$\omega_2 = \frac{v}{l_2} = \frac{0.04}{0.25} = 0.16 \text{ рад/с}, \quad (2.15)$$

отсюда:

$$\omega_1 = \omega_2 \cdot u = 60 \cdot 0.16 = 9.6 \text{ рад/с}. \quad (2.16)$$

Расчётная мощность:

$$P = M_1 \cdot \omega_1 = 289 \cdot 9.6 = 2775 \text{ Вт} \approx 3 \text{ кВт} \quad (2.17)$$

Используя эти данные можно рассчитать диаметр ротора, используя табличные значения и формулу (2.10) с некоторыми допущениями [14], можно определить объем ротора:

$$V = \frac{6,1 \cdot 10^5 \cdot P}{a_\delta \cdot k_B k_{\omega 1} A B_\delta \cdot n}$$

подставив полученное выражение в формулу, получим выражение связывающее диаметр ротора и его объем

$$D = 0.5 \cdot \sqrt[3]{\frac{a+1}{a-1}} \cdot \sqrt[3]{V} = 0.5 \cdot \sqrt[3]{\frac{a+1}{a-1}} \cdot \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 10^5 \cdot P}{a_\delta \cdot k_B k_{\omega 1} A B_\delta \cdot n}} \quad (2.18)$$

где  $V$  - средний объем активной поверхности;  $P$  – расчетная мощность;  $A$  – линейная нагрузка на среднем диаметре;  $B_\delta$  – амплитуда индукции в зазоре;  $n$  – синхронная частота вращения;  $a$  – геометрический параметр;  $\alpha_\delta$ ,  $k_\delta$  и  $k_{\omega 1}$  – коэффициенты уплощения, формы кривой поля и обмоточный.

По результатам расчётов была построена модель в среде Simulink Matlab с допущениями в виде того что модуль всего один и он не вращается по орбите, которая показана на рисунке 2.11. Полученные результаты моделирования (ток, момент, скорость) показаны на рисунке 2.12. Как видно из рисунка момент и скорость имеют отрицательную составляющую. Чтобы избежать этого, к системе применен метод обеспечения монотонности переходных процессов [25]. Устройство реализующее данный метод (рисунок 2.13), содержит основной задатчик 1, основной элемент сравнений 2, регулятор 3, объект управления 4, ключ 5 с замыкающим входом 6, основным входом 7 и размыкающим входом 8. Имеются дополнительный элемент сравнения 9, нуль-орган 10 и генератор импульса 11 [25].

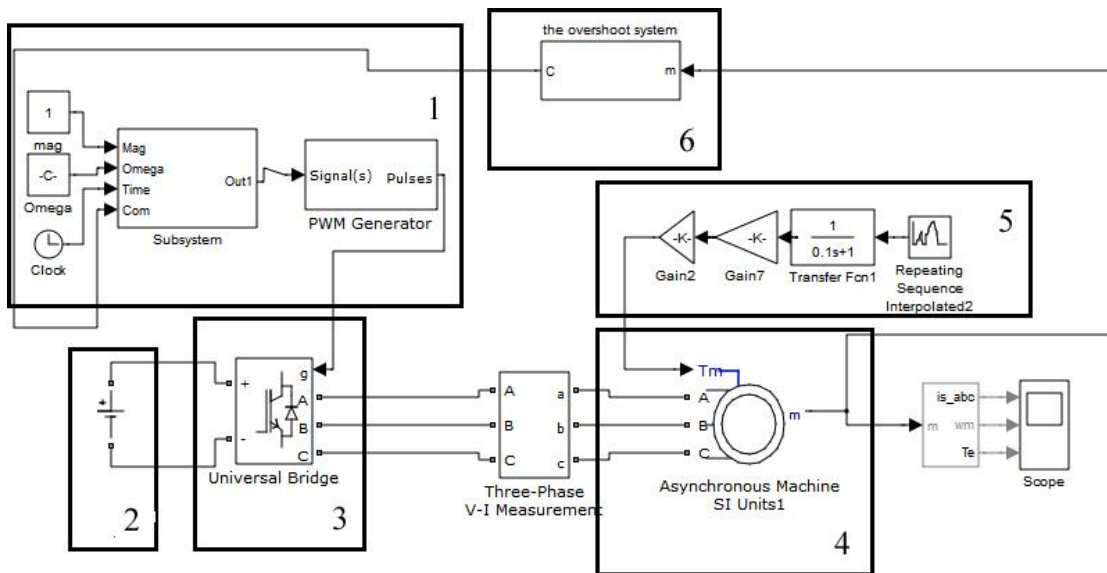


Рисунок 2.11 – Модель системы в среде Matlab: 1 – система управления инвертором; 2 – источник постоянного напряжения; 3 – инвертор; 4 – двигатель главного привода; 5 – нагрузка; 6 – система обеспечения монотонности

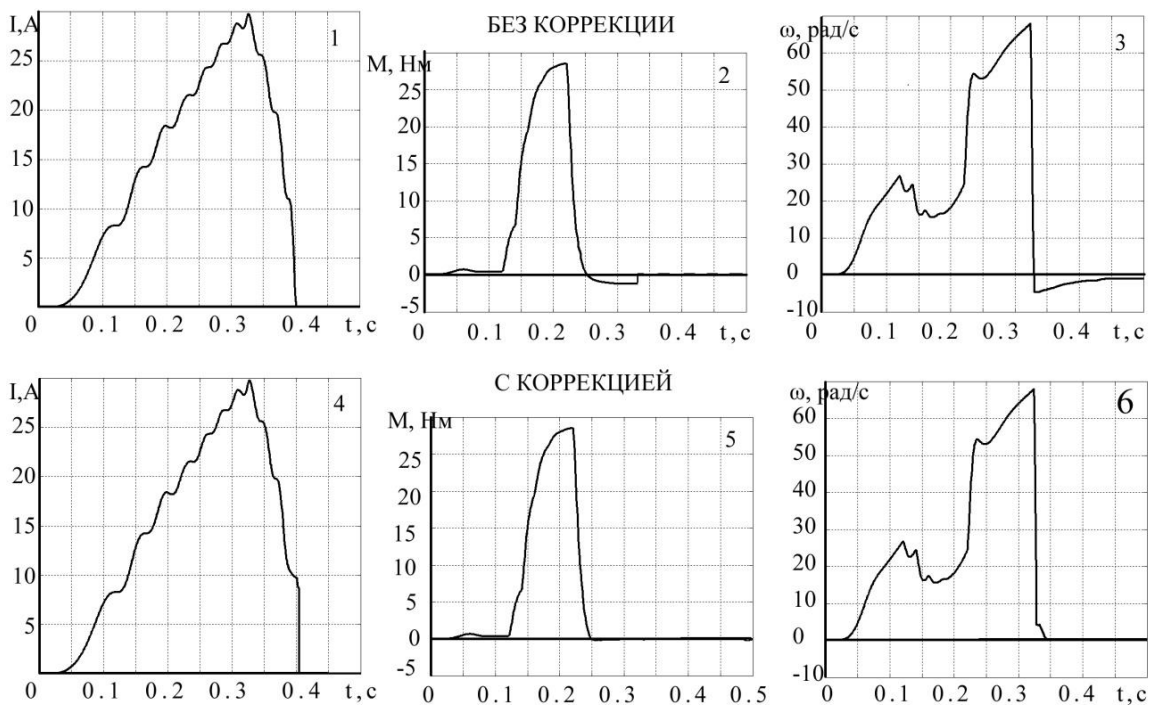


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования: 1 – график тока; 2 – график момента; 3 – график скорости двигателя; 4,5,6 – аналогичные графики с применением метода обеспечения монотонности переходных процессов

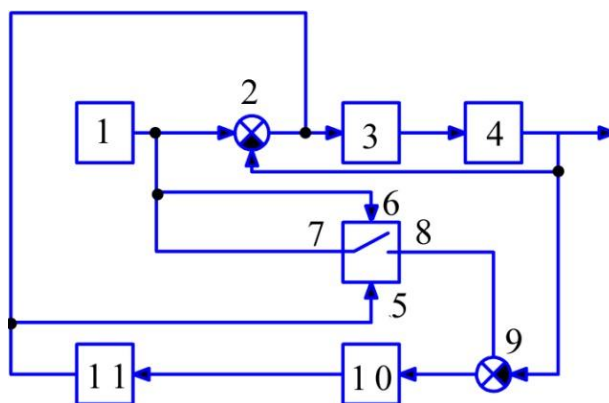


Рисунок 2.13 – Устройство реализующее метод снижения перерегулирования

Отличительной особенностью метода является то, что при неизменной замкнутой структуре за счет введения практически только простого генератора единичного импульса монотонность обеспечивается вследствие формирования особой формы сигнала на задающем входе элемента сравнения. Эта форма представляет собой сочетание обычного ступенчатого воздействия и импульса противоположного знака, сдвинутого на значение времени нарастания или времени спада. Под временем нарастания понимается абсцисса первой точки пересечения исходной колебательной кривой переходного процесса при разгоне с уровнем установившегося значения. Под временем спада будем понимать время, соответствующее первому пересечению кривой исходной переходной колебательной характеристики при торможении с уровнем установившегося значения [25].

Таким образом, генератор-импульса включается в работу после первого достижения регулируемой величиной установившегося значения, т. е. после времени нарастания. При этом, если например, вследствие изменения конфигурации объекта его постоянная времени изменится, все равно после нового времени нарастания, генератор импульса срабатывает, причем только один раз за время переходного процесса.

Данное устройство осуществляет снижение перерегулирования только на спаде характеристики, после завершения основного цикла. Решение вопросов с перерегулированием в начале цикла, при разгоне решается введением ограничителя по току, тогда характеристика орбитального электроприво-

да имеет вид «экскаваторной» характеристики, и в зависимости от ограничения по току имеет разный наклон (рисунок 2.14).

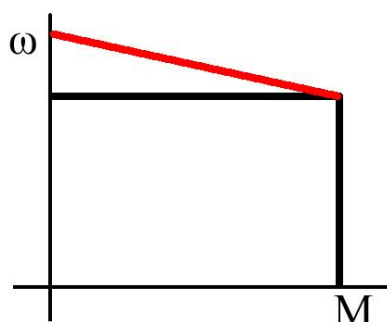


Рисунок 2.14 – Экскаваторная характеристика

Таким образом, в результате исследования допускается возможность использования орбитального привода муфты прессы, который обладает более активной площадью нажатия, кроме этого использования специальных методов исключает перерегулирование, что очень важно для таких систем.

#### 2.4 Взаимосвязь главного привода и муфты прессы

Частота включения муфты, зависит не только от возможностей самой муфты, но и от главного привода прессы. Один и тот же пресс можно использовать для изготовления деталей для которых требуется различное усилие. Использование кривошипного прессы в полную мощность при изготовлении деталей с меньшей трудоемкостью избыточно и расходует больше энергии чем требуется. В таких случаях целесообразно использовать систему дозирования энергии, при этом будет различная частота между включениями муфты.

Скорость подвижных частей определяется из уравнений движения. Рассмотрим ход разгона подвижных частей, на котором происходит накопление кинетической энергии маховика. В общем случае движение подвижных частей описывается уравнением:

$$F_a - F_u + G - \Sigma R = 0, \quad (2.19)$$

где  $F_a$  – активная сила разгона;  $F_u$  – инерционная сила подвижных частей;  $G$  – вес подвижных частей;  $\Sigma R$  – сумма сил сопротивления (трения).

Инерционная сила определяется выражением:

$$F_u = m_{\text{пр}} \frac{dv}{dt}, \quad (2.20)$$

где  $v$  – скорость поступательного движения подвижных частей;  $m_{\text{пр}}$  – приведенная масса подвижных частей.

Активные силы разгона  $F_a$  в зависимости от вида создаются усилием прижатия приводных дисков к маховику (фрикционные прессы), активным движущим моментом двигателя (прессы с электро- или гидромоторным приводом) или усилием гидравлических цилиндров (гидровинтовые пресс-молоты). В  $\Sigma R$  входят силы трения в направляющих ползуна, подпятнике (опоре), в уплотнительных элементах и др. Подставив в уравнение (2.19) выражение  $F_u$  получим:

$$m_{\text{пр}} \frac{dv}{dt} = F_a + G - \Sigma R. \quad (2.21)$$

Отсюда текущее значение скорости с достаточной для практики точностью будет равно:

$$v = \frac{F_a + G - \Sigma R}{m_{\text{пр}}} t. \quad (2.22)$$

Интенсивность работы прессы при одиночных ходах оценивается коэффициентом использования числа ходов  $p = n_{\text{од}}/n_{\text{н}}$ , где  $n_{\text{од}}$  – число одиночных ходов в минуту;  $n_{\text{н}}$  – номинальное число ходов ползуна прессы.

Общий расход энергии за цикл  $A_{ц}$ , приведенный к валу двигателя, можно получить из суммы расходов энергии на преодоление полезного сопротивления  $A_o$  и за время холостого хода  $A_x$ :

$$A_{ц} = A_o + A_x. \quad (2.23)$$

В свою очередь с учетом КПД:

$$A_o = \frac{A_{т.и} + A_{упр} + A_{п}}{\eta_{пер}\eta_{т.о}} + \frac{A_m}{\eta_m}, \quad (2.24)$$

где  $A_{т.и}$  – работа технологической операции (без учета упругости и трения) на ползуне машины;  $A_{упр}$  – работа на ползуне затраченная на деформацию деталей кривошипной машины (пресса);  $A_{п}$  – работа пневматической или гидропневматической подушки;  $A_m$  – работа включения муфты на её валу;  $\eta_{пер}$  – общий КПД передач от кривошипа исполнительного механизма до вала электродвигателя;  $\eta_{т.о}$  – КПД технологической операции (средний КПД кривошипно-ползунного механизма), учитывающий работу, затраченную на преодоления сил трения, приведенную к валу исполнительного механизма;  $\eta_m$  – КПД передач вала муфты до вала электродвигателя. Обычно  $\eta_m = \eta_{кл}$ , где  $\eta_{кл}$  – КПД клиноременной передачи.

В свою очередь работа холостого хода определяется по формуле:

$$A_x = A'_x + A_{x.м} + A_b, \quad (2.25)$$

где  $A'_x$  – работа холостого хода за один поворот кривошипа при автоматической работе машины, приведенная к валу электродвигателя;  $A_{x.м}$  – работа холостого хода вращения маховика при отключенной муфте, приведенная к валу электродвигателя;  $A_b$  – работа вспомогательных механизмов, приводимых

от главного двигателя за один оборот кривошипа при автоматической работе машины [26–28].

Приближенно можно определить работу холостого хода по средней мощности  $N_{ха}$  на валу электродвигателя в режиме автоматических ходов пресса без нагрузки:

$$A'_x = N_{ха} t_{ц}, \quad (2.26)$$

где  $t_{ц}$  – время цикла.

При этом нужно учитывать и мощность холостого хода двигателя. Работа  $A_{х.м}$  учитывается только при работе пресса в режиме одиночных ходов при наличии паузы между ходами ползуна:

$$A_{х.м} = f_m r_m G_m \frac{370 t_{п}}{n_m \eta_{кл}}, \quad (2.27)$$

где  $f_m$  – коэффициент трения в подшипнике маховика;  $r_m$  – радиус опоры подшипника маховика;  $G_m$  – вес маховика;  $t_{п}$  – время паузы;  $n_m$  – частота вращения маховика. Таким образом, если энергия избыточна, то энергию холостого хода маховика необходимо ограничивать, что можно достичь либо уменьшением времени паузы  $t_{п}$ , либо уменьшением скорости электродвигателя. В первом случае уменьшение времени паузы  $t_{п}$  ведет к уменьшению производительности, во втором случае происходит уменьшение мощности электродвигателя, что при том же времени цикла эквивалентно уменьшению мощности холостого хода при уменьшении полезного сопротивления  $A_0$ .

Мощность электродвигателя выбирают исходя из средней работы за цикл с некоторым запасом. Причем этот запас должен быть больше, чем больше фактическое число ходов пресса в минуту и тем меньше, чем больше  $A'_x / A_0$ . Средняя и расчетная мощность электродвигателя:

$$N_{\text{ср}} = (A_o + A_x) / (1000 \cdot T_{\text{ц}}), \quad (2.28)$$

где  $T_{\text{ц}}$  – время цикла.

Мощность двигателя с фазовым ротором при работе на искусственной характеристике:

$$N_{\text{рф}} = \left( \frac{1 - s_{\text{н}}}{1 - s_{\text{и}}} \right)^{s/2} k \cdot N_{\text{ср}}, \quad (2.29)$$

где  $k$  – коэффициент запаса мощности,  $s_{\text{н}}$  – номинальное скольжение электродвигателя;  $s_{\text{и}}$  – скольжения двигателя при выбранной искусственной характеристике [28,29].

Для уменьшения энергии во время работы, необходимо уменьшение мощности двигателя, это можно достичь точным управлением при помощи частотного управления электродвигателем с поддержанием оптимального скольжения во время работы. Таким образом уменьшая мощность двигателя для менее трудоемких деталей, так же уменьшается допустимая нагрузка для прессы, но этого количества достаточно чтобы выполнить операцию. Например есть кривошипный пресс с номинальным усилием  $P_{\text{н}}$  и номинальной скоростью вращения двигателя  $\omega_{\text{н}}$  при котором это усилие и достигается, но на этом прессе нужно выполнить работу, при котором фактическое усилие  $P_{\text{ф}}$  меньше чем  $P_{\text{н}}$ , тогда появляется возможность снизить скорость вращения двигателя до  $\omega_{\text{ф}}$  которая меньше чем  $\omega_{\text{н}}$ , но достаточная для выполнения операции. Механические кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП) [1,2], эксплуатируемые в настоящее время на предприятиях России, и произведенные в основном в 70-80 г. оснащены асинхронными электродвигателями с фазным ротором со ступенчатым разгоном, за счет пусковых ящиков сопротивлений и постоянно включенного добавочного сопротивления, обеспечивающей энергетически сбалансированный режим работы системы «электродвигатель-маховик» прессы.

Интенсивное развитие производства частотно-регулируемых преобразователей с широким спектром назначения и высоким уровнем надежности предоставляет производителям и потребителям КГШП и других механических прессов возможность регулирования частоты вращения главных приводов и как следствие регулирование линейной скорости рабочего органа прессов (ползуна), обеспечение плавного разгона маховика пресса и другие преимущества по сравнению с релейно-контакторными схемами управления электродвигателями прессов. Учитывая то обстоятельство, что значительная часть единиц кузнечно-прессового оборудования (КПО) эксплуатируемых в настоящее время, морально и технически устарела и требует капитальных вложений на ремонт и модернизацию, вопросы оснащения прессов современными устройствами регулирования частоты вращения главных двигателей прессов являются весьма актуальными, но при этом требуют взвешенного и технически обоснованного подхода, как при выборе электродвигателя, так и преобразователя частоты.

Регулирование частоты вращения главного двигателя пресса позволяет получить возможность плавного или ступенчатого изменения (снижения) скорости движения ползуна пресса, или числа ходов пресса в режиме «Наладка», что значительно улучшает эксплуатационные и технологические характеристики оборудования (при смене штампов, инструмента, наладке околопрессовой механизации). На прессах, не имеющих систему регулирования числа ходов, обслуживающий персонал обеспечивает снижение скорости ползуна (например, при смене штампов) на «выбеге» главного двигателя, т.е. его отключением. При этом для получения точной остановки ползуна в крайних нижней и верхней точках (КНП, КВП), оператор вынужден неоднократно включать и затем, после короткого разгона выключать электродвигатель, что является нарушением требований эксплуатации двигателей.

Как отмечалось выше, основная часть оборудования КГШП, эксплуатируемого в настоящее время оснащена электродвигателями с фазным ротором с постоянно включенной ступенью сопротивления, что позволяет полу-

чить мягкую характеристику двигателя со скольжением 8 - 12% что обеспечивает эффективную работу маховика пресса.

Результаты анализа пускового и рабочего (выполнение технологической операции) режимов электродвигателя выполнены для пресса силой 16 МН. Анализ проведен для электродвигателя с фазным ротором и короткозамкнутого электродвигателя с частотным преобразователем (далее ПЧ-АД). Построение моделей осуществлялось с использованием программного приложения MatLab Simulink [30-32]. В модели главного привода пресса, имеющем асинхронный двигатель с фазным ротором (рисунок 2.15) из упомянутых элементов имеются: 1 - источник питания 50 Гц 380 В; 2 - двигатель главного привода; 3 - нагрузка; 4 – разгонные и постоянная ступени сопротивлений. В модели главного привода пресса с ПЧ - АД (рисунок 2.16) входят: 1 - система управления инвертором; 2 - источник постоянного напряжения; 3 - инвертор; 4 - двигатель главного привода; 5 - нагрузка.

При моделировании работы пресса на каждом шаге интегрирования вычисляется момент двигателя, частота вращения ротора, скольжение, активный, реактивный и полный фазные токи, потребляемая активная мощность, коэффициент полезного действия [33,34].

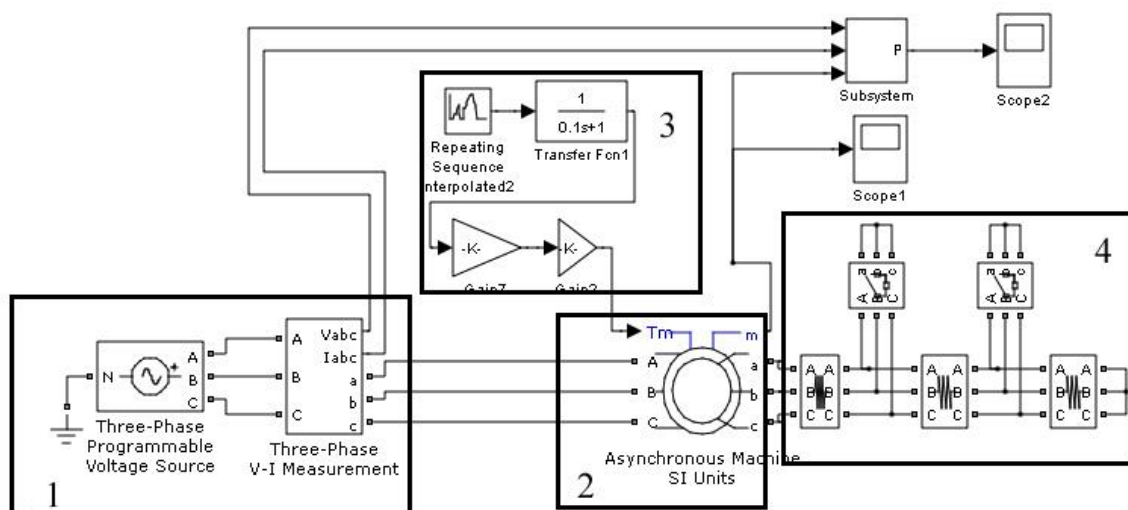


Рисунок 2.15 – Модель главного привода пресса с электродвигателем с фазным ротором

Для исключения влияния нестационарного периода работы пресса, например периода разгона маховика, вычисление эквивалентного тока начинается в фиксированный момент модельного времени, который вводится как один из параметров модели. Его значение можно принимать равным времени начала первого цикла работы пресса. В кривошипных прессах целесообразность привода с маховиком вытекает из анализа пяти периодов его работы за один полный оборот главного эксцентрикового вала пресса (рисунок 2.17).

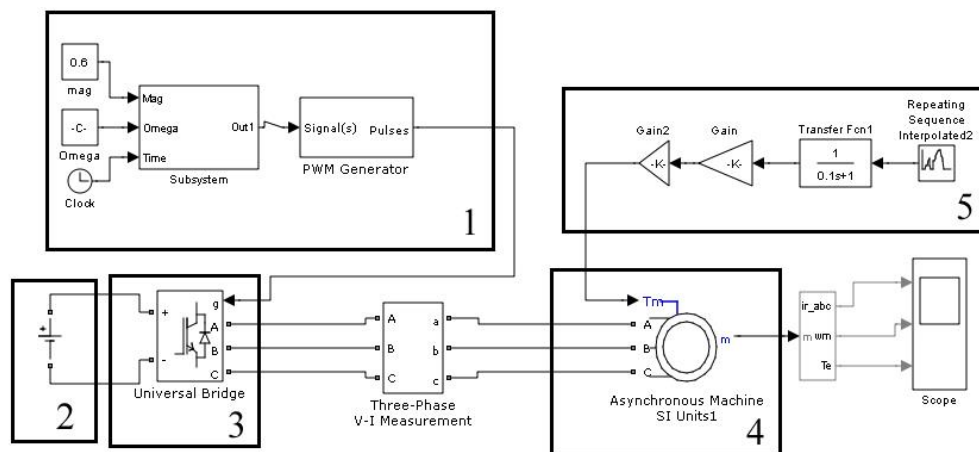


Рисунок 2.16 – Модель главного привода пресса с ПЧ - АД

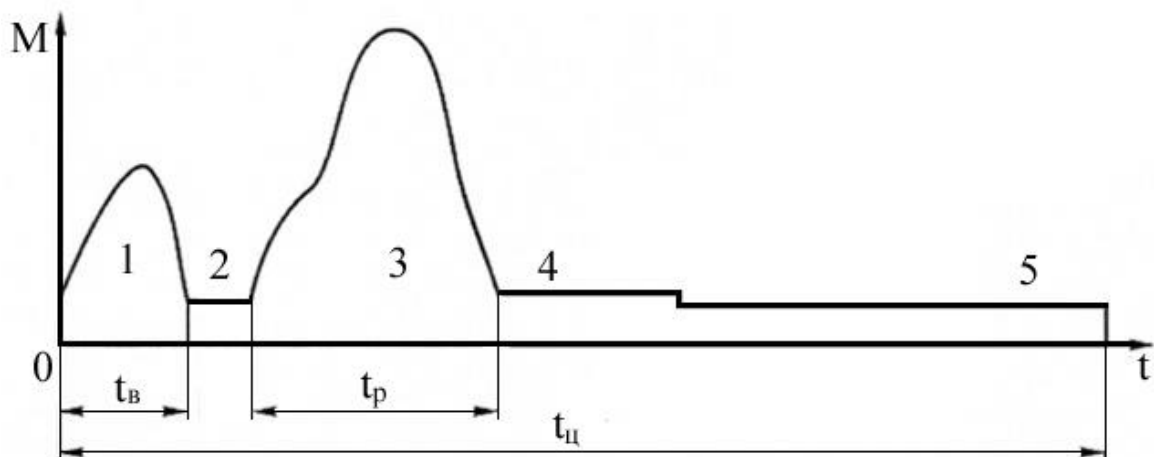


Рисунок 2.17 – График изменения момента ( $M$ ) главного электродвигателя пресса за время ( $t$ ) полного оборота эксцентрикового вала ( $t_{ц}$  – время цикла)

Рисунок 2.17 имеет следующие обозначения: 1 – включение муфты ( $t_B$ ); 2 – ход ползуна вниз до начала рабочей операции; 3 – ход ползуна вниз при совершении рабочей операции ( $t_P$  – технологически ход); 4 – ход ползуна вверх; 5 – выстой ползуна перед началом следующего хода. Для моделирования время цикла  $t_{ц}$  принимаем равным 2 с. Для сравнения на рисунках 2.18-2.19 показаны графики изменения параметров главного двигателя во время пуска: 1а,1б - графики токов статора; 2а, 2б – графики скорости главного двигателя; 3а,3б – графики момента; 4а,4б – графики потерь энергии. На рисунках 2.20-2.22 показаны графики изменения параметров главного двигателя за время цикла: 1а, 1б, - токи статора; 2а, 2б – скорость двигателя; 3а,3б - момент; 4а, 4б - потери энергии; 5а, 5б – коэффициент полезного действия; 6а, 6б – работа.

Графики с индексом «а» относятся к системе главного привода с фазным ротором, с индексом «б» - к системе ПЧ-АД с короткозамкнутым ротором.

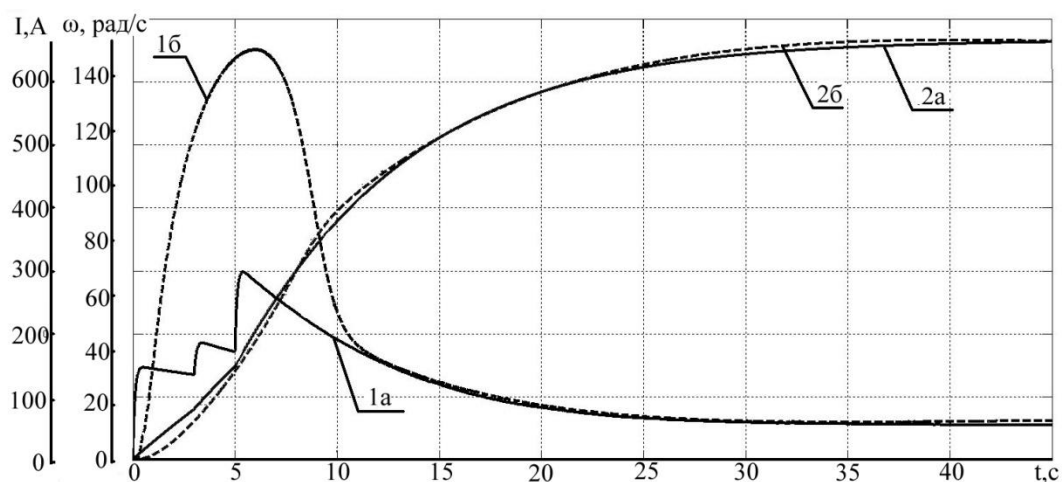


Рисунок 2.18 – Графики изменения характеристик главного двигателя во время пуска

Вышеизложенное позволяет прийти к утверждению, что применение частотных преобразователей для управления электродвигателем главного привода прессы:

1. Позволяет обеспечить плавный пуск и разгон маховика прессы.

2. Предоставляет возможность регулирования частоты вращения электродвигателя (соответственно маховика), снижение линейной скорости перемещения ползуна в наладочном режиме работы прессы.

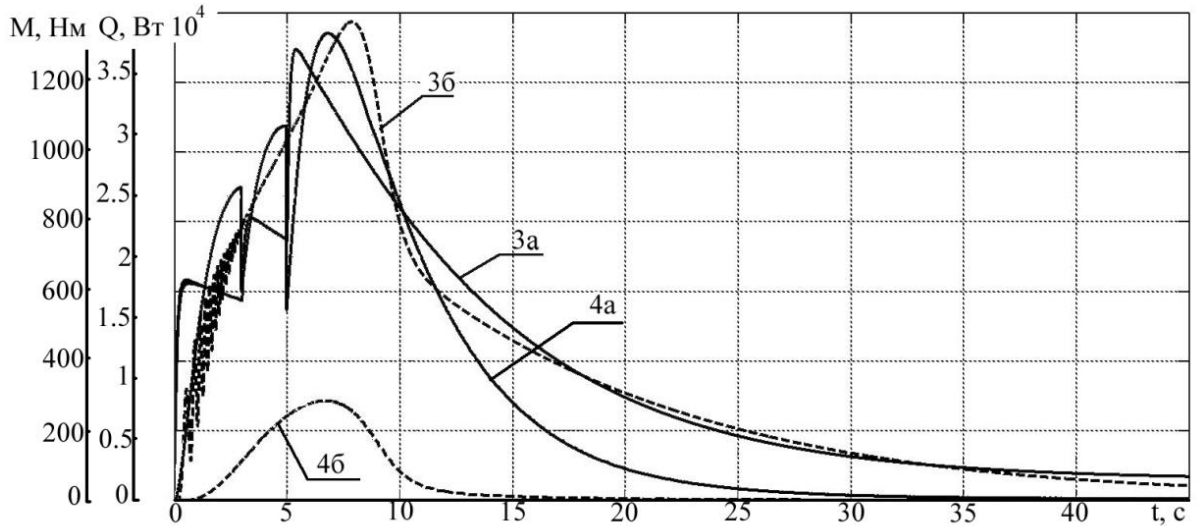


Рисунок 2.19 – Графики изменения характеристик главного двигателя во время пуска

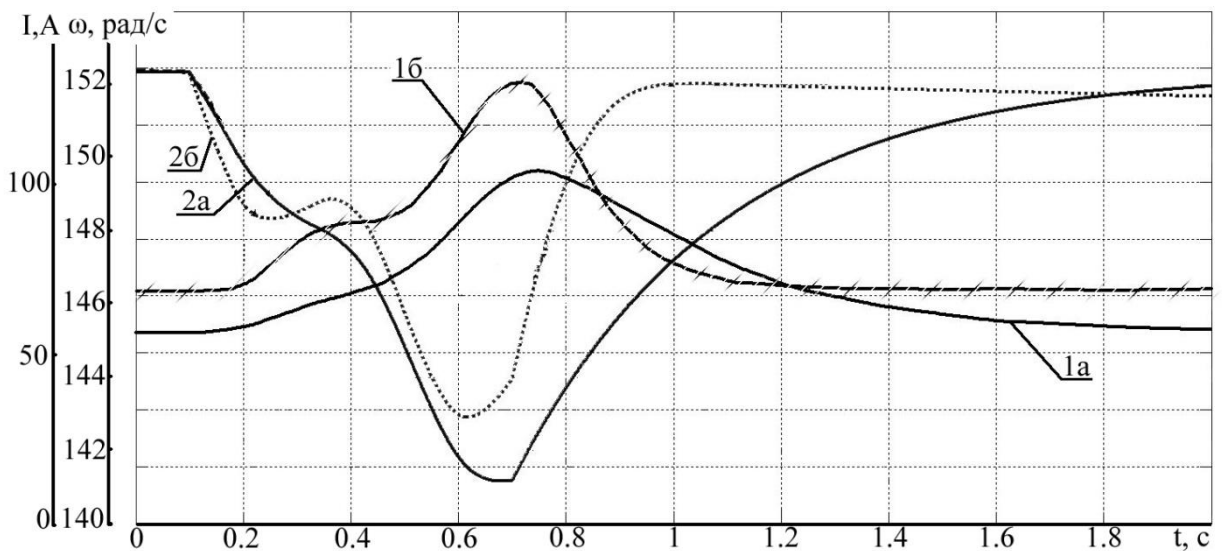


Рисунок 2.20 – Графики изменения параметров главного двигателя во время рабочего цикла

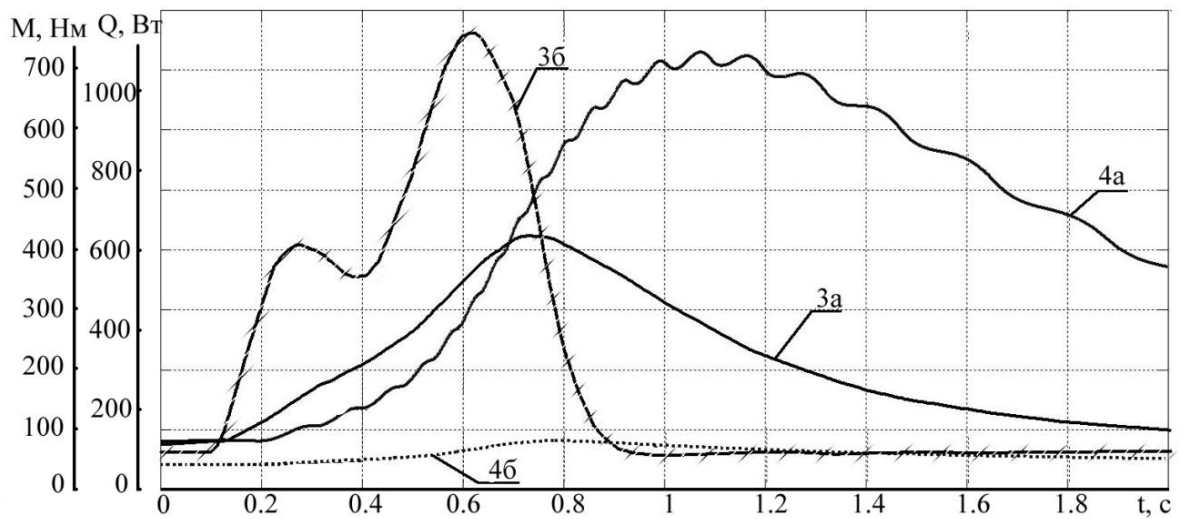


Рисунок 2.21 – Графики изменения характеристик главного двигателя во время рабочего цикла

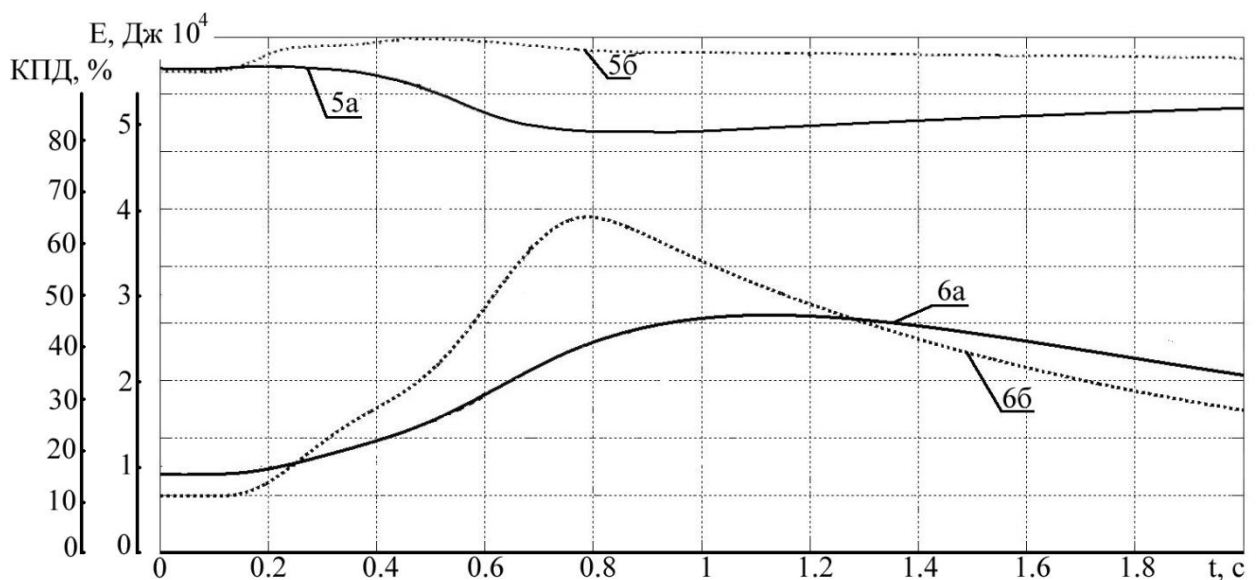


Рисунок 2.22 – Графики изменения характеристик главного двигателя во время рабочего цикла

3. Обеспечивает снижение потерь при запуске электродвигателя (отсутствие разгонных ступеней сопротивлений, потерь на питающих проводах при размещении электрошкафа управления на значительном расстоянии от прессы).

4. Увеличение износостойкости штампа, за счет меньшего времени контакта с деталью.

Таким образом использование частотного управления для главного электродвигателя пресса уменьшает просадку по скорости во время работы, что значительно увеличивает скорость выхода пресса на рабочий режим, что повышает возможность увеличить частоту включения муфты, при должном быстродействии самой муфты.

## 2.5 Оценка тепловых режимов работы орбитального электропривода муфты включения

Расчет тепловых режимов состоит в расчете тепловых потоков и распределения температуры в активных элементах, в данном случае в обмотке. Такой расчет позволяет правильно выбрать электромагнитные нагрузки, которые могут повлиять на надежность и характеристики орбитального электропривода. Наиболее важным параметром является значение максимальной температуры во время работы. Именно этот параметр накладывает ограничения на мощность орбитального электропривода, при выбранном классе изоляции. Вторым параметром, при определении тепловых режимов, является средняя эксплуатационная температура, которая определяется по сопротивлению обмоток.

Надежность орбитального электропривода, определяется исходя их выбранного класса изоляции обмоток, срок службы которой зависит от температуры [35]. Срок службы изоляции в годах в зависимости от температуры определяется выражением:

$$t = \alpha e^{-\vartheta T_{из}},$$

где  $\alpha$ ,  $\vartheta$  – коэффициенты зависящие от класса изоляции,  $T_{из}$  – температура изоляции. Из соотношения параметров можно сделать вывод, при малейшем

превышении допустимой температуры срок службы изоляции уменьшаться значительно.

По мимо всего этого следует учитывать температуру охлаждающей среды  $T_{ж}$ , увеличение которой на каждые 3 °С вызывает рост температуры статора примерно на 1 °С. Поэтому для использования орбитального электропривода муфты включения в цехах с горячей штамповкой, необходимо использовать принудительный обдув, вместе с высоким классом изоляции Н или выше класс 200, класс 220 и т.д. в зависимости от температуры цеха. В методе эквивалентных тепловых схем используется аналогия тепловых и электрических токов, основанная на единой форме уравнений теплообмена (закон Фурье):

$$P = \frac{\lambda S_{cp} \Delta T}{\delta} = \frac{\Delta T}{R_{\lambda}},$$

и электрического тока (закон Ома):

$$I = \frac{k S_1 \Delta U}{l} = \frac{\Delta U}{R_{э}},$$

где  $S_{cp}$  – средняя площадь теплопроводящей поверхности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $k$  – удельная электрическая проводимость;  $\Delta T$  – падение температуры на длине  $\delta$ ;  $\Delta U$  – разность потенциалов на длине  $l$  проводника с сечением  $S_1$ ;  $R_{\lambda}$  – тепловое сопротивление данного участка пути теплового потока;  $R_{э}$  – электрическое сопротивление.

В эквивалентных тепловых схемах разность температур соответствует разности потенциалов, электрические токи – тепловым потокам, электрические сопротивления – тепловым сопротивлениям.

Второе уравнение метода тепловых схем, аналогично первому уравнению закона Кирхгофа:

$$P = \sum_{i=1}^n q_i,$$

где  $q_i$  – тепловой поток в ветви, отходящей от теплового источника;  $P$  – мощность теплового источника. Основное отличие от расчета электрических цепей, это по известным величинам тепловых источников определить температуру, и в отличие от электрических цепей тепловые цепи всегда изображаются разомкнутыми [36]. Для расчета тепловых сопротивлений обусловленных теплопередачей с поверхности определяется соотношением:

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha S}, \quad (2.30)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности;  $S$  – площадь поверхности.

Так же необходимо учитывать нагрев охлаждающей среды, что бы определить интересующую нас величину – превышение температуры. Для учета этого чаще всего добавляют к  $\Delta T$  – половинный нагрев среды, таким образом, результирующая величина выражена следующим выражением:

$$R_{\text{ж}} = \frac{1}{\alpha S(1 - 0.5\nu)}, \quad (2.31)$$

$$\nu = \frac{\Delta T_{\text{ж}}}{\Delta T}, \quad (2.32)$$

где  $\nu$  – коэффициент подогрева воздуха, равный отношению подогрева воздуха при прохождении его по каналу охлаждения  $\Delta T_{\text{ж}}$  к превышению  $\Delta T$  температуры охлаждаемой поверхности над температурой входящей среды. Так же коэффициент подогрева воздуха определяется:

$$v = 1 - e^{-\frac{\alpha \Pi}{Q C_p}},$$

где  $\Pi$  и  $l$  – теплоотдающий периметр и длина канала;  $Q$  – объемный расход среды через канал;  $C_p$  – удельная объемная теплоемкость охлаждающей среды.

Для расчета сопротивления подогрева среды может использоваться также и другое выражение, основанное на изменении теплоемкости среды

$$R_{\text{ж}} = \frac{\Delta T_{\text{ж}}}{P} = \frac{1}{C_p \rho Q}, \quad (2.33)$$

где  $\Delta T_{\text{ж}}$  – подогрев охлаждающей среды в каналах;  $P$  – тепло отводимое в канал.

Рассмотрим тепловое сопротивление лобовых частей обмотки статора, орбитального электропривода, при этом стоит учитывать особенности, а именно из-за открытого корпуса система температура внутренних и внешних лобовых частей отличается незначительно, поэтому для упрощения оценки примем их равными друг другу. Так же главным параметром является коэффициент обдуваемой поверхности лобовых частей  $k_{\text{обд}}$ , для закрытых асинхронных двигателей такой коэффициент равен от 0.8 до 0.85, а для орбитального электропривода такой коэффициент около 1. Таким образом, общее тепловое сопротивление определяется по формуле:

$$R_1 = \frac{1}{1/R'_1 + 1/R''_1},$$

где  $R'_1$  и  $R''_1$  – тепловые сопротивление на входе и выходе воздуха охлаждаемой поверхности,  $R'_1$  определяется выражением

$$R'_1 = \frac{\delta}{\lambda l_1 Z_1 (2h + a_1)} + \frac{1}{k_{\text{обд}} \alpha_1 l_1 Z_1 (2h + a_1)},$$

где  $\delta$  – толщина корпусной изоляции,  $h$  и  $a_1$  – геометрические параметры,  $l_1$  – длина лобовых частей,  $Z_1$  – количество пар полюсов. Выражение для определения  $R''_1$  аналогично.

Таким образом, при проектировании орбитального электропривода муфты включения, необходимо учитывать так же и нагрев системы, который зависит от величины протекаемого тока через статор, и необходимо учесть скорость охлаждения системы, которая зависит от площади охлаждаемой поверхности, температуры охлаждаемой среды. Преимуществом орбитального электропривода, в этом вопросе, является открытая система, которая имеет меньшее тепловое сопротивление, таким образом, имеем максимально возможное взаимодействие между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей средой, а использование дополнительного охлаждения в виде обдува, повышает срок службы системы в целом.

## 2.6 К определению особенностей орбитального электропривода муфты включения кривошипного пресса

Главной особенностью орбитального электропривода, является неравномерная взаимная индуктивность при изменении положение ротора относительно статора. Это обусловлено тем, что секции статора (индукторы) расположены на некотором расстоянии друг от друга, в которых происходят «провалы» взаимной индукции. Есть несколько способов решения такой проблемы.

Первый способ это использование распределенной или двухслойной обмотки. Преимущество такого метода это равномерная характеристика, взаимной индукции, на всей окружности статора. Самым большим недостатком

является стоимость такой обмотки, а так же невозможность использования алгоритмов для энергосбережения с отключением неиспользуемых обмоток.

Второй способ это применение разновысотных лобовых частей, которые так же увеличат площадь перекрытия (рисунок 2.7 б), тем не менее, статор все так же будет состоять из секций с возможностью отключения, легкой замены в случае поломки.

Третий способ это использование программных методов, которые основаны на построении алгоритма оптимального управления. Такой алгоритм учитывает изменения взаимной индукции, и регулирует величину тока, компенсируя неравномерность характеристики.

Для определения формы характеристики взаимной индукции в зависимости от изменения угла положения роторов относительно статора, был произведен эксперимент [37]. Суть эксперимента состояла в измерении магнитного потока, при различных положениях ротора. Схема такой установки показана на рисунке 2.23. и рисунке 2.24, где 1 – обмотка статора, 2 – ротор, 3 – датчик Холла. Для проведения эксперимента, было заблокировано вращение ротора, к ротору с прокладкой из диэлектрика был прикреплен датчик холла, на статор подавалось напряжение, и меняя угол  $\beta_R$  снималась показания с датчика холла и строился график зависимости взаимной индукции в зависимости от угла  $\beta_R$ .

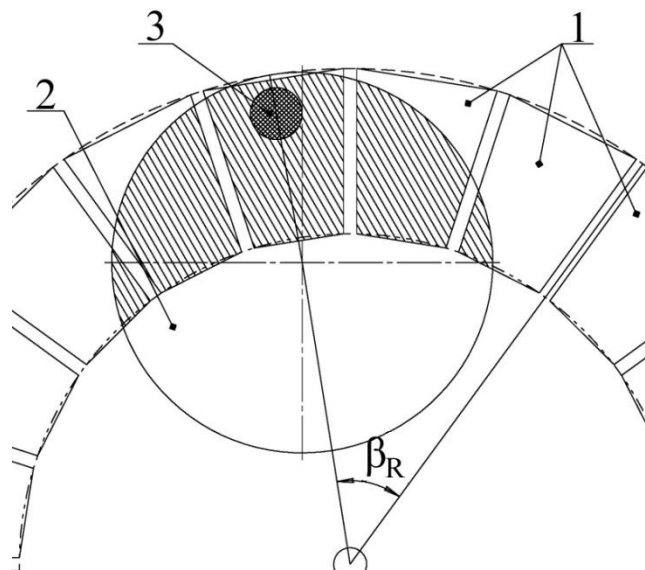


Рисунок 2.23 – Схема экспериментальной установки

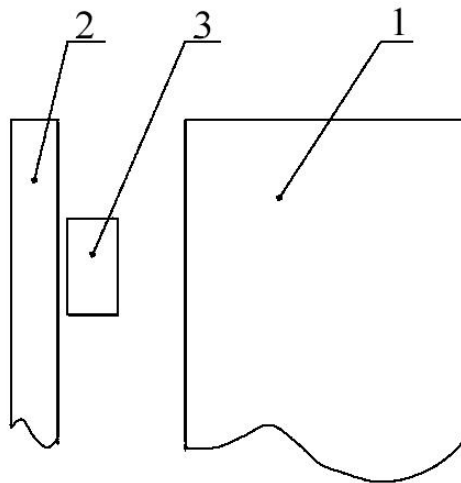


Рисунок 2.24 – Схема экспериментальной установки вид с торца

По результатам эксперимента были получены зависимости  $L_m L_R$  от угла поворота  $\beta_R$ , где  $L_R$  – коэффициент индуктивности, зависящий от положения ротора на орбите. В частности  $L_R$  зависит еще от других конструктивных параметров орбитального электропривода, например от радиуса орбиты, радиуса ротора, количества индукторов статора, количества роторов в системе, длины индукторов и т.д.. Полученная экспериментальная кривая зависимости показана на рисунке 2.25.

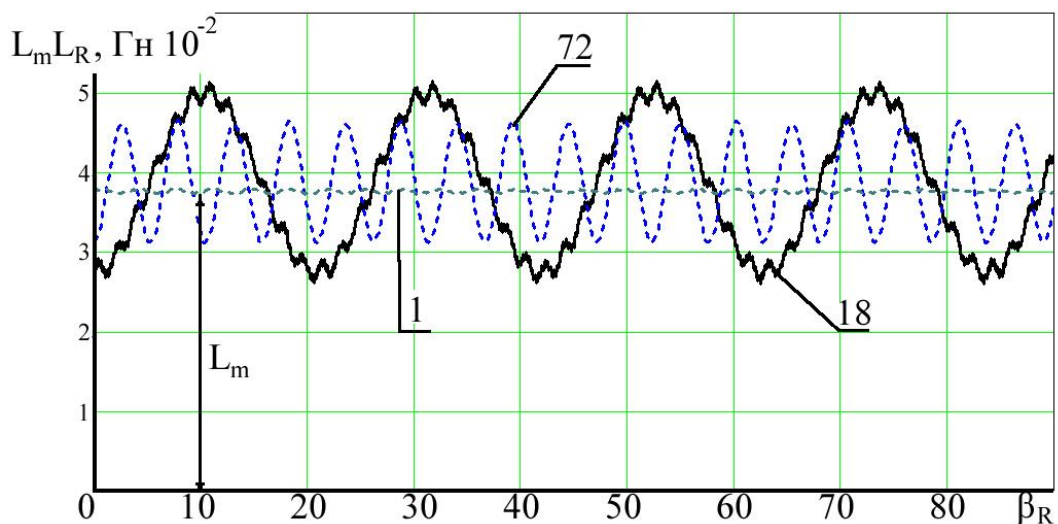


Рисунок 2.25 – Экспериментальная кривая индуктивности в зависимости от угла, где цифрами обозначено количество индукторов

На рисунке 2.25 так же выражена главная индуктивность  $L_m$ , которая так же присутствует в асинхронном электродвигателе. Скорость изменения угла  $\beta_R$ , зависит от скорости вращения роторов по орбите, которая зависит от скорости вращения главного привода пресса. Если скорость главного привода пресса будет равна нулю, то значение угла  $\beta_R$  будет постоянным и тогда произведение  $L_m L_R$  так же будет постоянным.

Второй главной особенностью, является распределенный тип привода. Здесь используется несколько модулей, что способствует равномерному прижатию дисков муфты и исключает перекосы. Не в одном типе привода муфты нет такой возможности. Если сравнить использование одного асинхронного электропривода, и использование орбитального электропривода, из-за использования большего количества модулей, но с меньшей мощностью, вес такого модуля будет намного меньше, соответственно время разгона будет меньше, при использовании одного мощного асинхронного электропривода, мы теряем в скорости и возможен перекося дисков муфты. Так же синхронизация вращения роторов самовыравнивающееся. В некоторых вариантах конфигурации привода, предусмотрена цепь, которая охватывает все модули, такое решение создано для повышения быстродействия, но на практике не проверялось.

Третья главная особенность это разная скорость вращения ротора по орбите и собственная скорость вращения, если использовать один внешний статор, то значение этой особенности минимальна. Если использовать два кольцевых статора внутренний и внешний, это увеличит площадь перекрытия статора и ротора, но тогда скорость вращения ротора вокруг собственной оси относительно внутреннего статора будет больше чем относительно внешнего. Для решения этой проблемы предложено использовать разную питающую частоту напряжения внешнего и внутреннего статора. Так как скорость относительно внешнего статора будет меньше то для питания внешнего статора необходимо использовать частотный преобразователь, а внутренний статор необходимо питать от сети с фиксированной частотой. Подбирается

частота питания внешнего статора, что бы уравновесить действующие силы от внутреннего и внешнего статора. Таким образом статор будет иметь разный гармонический состав питающего напряжения в отдельных его частях.

Еще одной немало важной особенностью, является то, что электрические параметры, такие как активное и индуктивное сопротивление, зависят от геометрических параметров обмотки. Так как внутренние и внешние лобовые части обмоток не совпадают по геометрическим размерам, они имеют разные электрические параметры и разную площадь перекрытия с ротором.

### Выводы

1. Использование деления статора на сегменты, дает возможность применить алгоритм отключения неиспользуемых обмоток, что уменьшает потребление и соответственно нагрев.

2. Применение современных способов управления двигателем, таких как частотное управление, повышает отзывчивость главного привода пресса, что способствует к более быстрой реакции на внешнее воздействие, тем самым повышает готовность пресса.

3. Различные конфигурации ротора и статора дают разные площади перекрытия, и соответственно разные конечные характеристики привода, такую особенность можно применить при разработке орбитального электропривода тормоза пресса, а так же муфты для разных конфигураций прессов.

4. Орбитальный электропривод является открытой системой, что способствует лучшему охлаждению, по сравнению с классическими асинхронными двигателями.

5. Учет взаимной индуктивности повышает эффективность работы в целом.

### 3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

#### 3.1 Математическое описание орбитального электропривода муфты

Учитывая особенности орбитального электропривода, необходимо составить математическое описание, которое бы учитывало изменение индуктивности во время движения роторов по орбите.

В предыдущих главах было выяснено, что общая индуктивность пропорциональна площади перекрытия роторов и статора. Чем больше площадь перекрытия ротора и статора, и чем плотнее обмотки статора тем меньше пульсация индуктивности во время вращения роторов по орбите.

Чтобы построить схему замещения, надо записать уравнения для мгновенных значений напряжений, токов и потокосцеплений. Обозначая цифрой «1» – переменные, относящиеся к статору, а цифрой «2» – относящиеся к ротору, для фаз А статора и «а» ротора эти уравнения могут быть записаны в виде [38]:

$$u_{1A} = R_1 i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt};$$

$$u_{2a} = R_2 i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt},$$

где  $u_{1A}$ ,  $u_{2a}$  – мгновенные значения напряжений, приложенных к обмоткам фаз статора и ротора;  $R_1$ ,  $R_2$  – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора соответственно;  $i_{1A}$ ,  $i_{2a}$  — мгновенные значения токов в фазных обмотках статора и ротора;  $\Psi_{1A}$ ,  $\Psi_{2a}$  — полные потокосцепления фазных обмоток статора и ротора, создаваемые, как током в рассматриваемой обмотке, так и токами во всех остальных обмотках фаз статора и ротора:

$$\Psi_{1A} = L_{AA}i_{1A} + L_{AB}i_{1B} + L_{AC}i_{1C} + L_{Aa}i_{2a} + L_{Ab}i_{2b} + L_{Ac}i_{2c};$$

$$\Psi_{2a} = L_{aA}i_{1A} + L_{aB}i_{1B} + L_{aC}i_{1C} + L_{aa}i_{2a} + L_{ab}i_{2b} + L_{ac}i_{2c},$$

где  $L_{AA}$ ,  $L_{aa}$  – полные индуктивности фазы статора и фазы ротора соответственно, определяемые главными потокосцеплениями и потокосцеплениями в фазах А и а;  $L_{AB}$ ,  $L_{AC}$ ,  $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$  — коэффициенты взаимоиндукции между обмоткой А фазы статора и двумя другими его обмотками, сдвинутыми относительно нее на 120 и 240 электрических градусов, и между обмоткой а ротора и двумя другими обмотками ротора;  $L_{Aa}$ ,  $L_{Ab}$ ,  $L_{Ac}$ ,  $L_{aA}$ ,  $L_{aB}$ ,  $L_{aC}$  – коэффициенты взаимоиндукции между обмоткой А фазы статора и обмотками ротора и между обмоткой а фазы ротора и обмотками статора, зависящие от положения ротора относительно статора в каждый данный момент времени.

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{ab} = L_{ac} = L_{m\phi} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot L_R = L_{m\phi} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \cdot L_R = -0.5 \cdot L_{m\phi} \cdot L_R,$$

где  $L_R$  – коэффициент индуктивности, зависящий от положения ротора на орбите в зависимости от угла поворота ротора относительно статора  $\beta_R$ .

Полные индуктивности фазы статора и фазы ротора находим по формулам:

$$L_{AA} = L_{m\phi} L_R + L_{1\sigma}; \quad L_{aa} = L_{m\phi} L_R + L_{2\sigma},$$

где  $L_{m\phi}$  – главные индуктивности фаз;  $L_{1\sigma}$ ,  $L_{2\sigma}$  – индуктивности рассеяния фаз статора и ротора. Отсчитывая углы против часовой стрелки, коэффициенты индуктивности, характеризующие влияние токов в фазах ротора на потокосцепление обмотки фазы А статора, можно представить в виде:

$$L_{Aa} = L_{m\phi} L_R \cos\theta_2;$$

$$L_{Ab} = L_{m\phi} L_R \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$L_{Ac} = L_{m\phi} L_R \cos\left(\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right) = L_{m\phi} L_R \cos\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right).$$

Коэффициенты взаимной индукции, учитывающие влияние токов статора на потокосцепление обмотки фазы а ротора записываются в виде:

$$\begin{aligned} L_{aA} &= L_{m\phi} L_R \cos(2\pi - \theta_2) = L_{m\phi} L_R \cos \theta_2; \\ L_{aB} &= L_{m\phi} L_R \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta_2\right) = L_{m\phi} L_R \cos\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right); \\ L_{aC} &= L_{m\phi} L_R \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \theta_2\right) = L_{m\phi} L_R \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned}$$

С учетом изложенного для фазы А статора и фазы а ротора система уравнений, описывающих электромагнитные процессы, примет вид:

$$u_{1A} = R_1 i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt}; \quad (3.1)$$

$$u_{2a} = R_2 i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt}; \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{1A} &= (L_{m\phi} L_R + L_{1\sigma}) i_{1A} - 0.5 L_{m\phi} L_R i_{1B} - 0.5 L_{m\phi} L_R i_{1C} + \\ &+ L_{m\phi} L_R \left[ i_{2a} \cos \theta_2 + i_{2b} \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{2c} \cos\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right) \right]; \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{2a} &= (L_{m\phi} L_R + L_{2\sigma}) i_{2a} - 0.5 L_{m\phi} L_R i_{2b} - 0.5 L_{m\phi} L_R i_{2c} + \\ &+ L_{m\phi} L_R \left[ i_{1A} \cos \theta_2 + i_{1B} \cos\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{1C} \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

С учетом, что угол поворота ротора в эл. рад определяется как  $\theta_2 = p_{\Pi} \omega t$ , а  $\omega_p = \omega_{0эл} - \omega p_{\Pi}$ ,  $p_{\Pi}$  – число пар полюсов двигателя, произведем преобразования

$$\begin{aligned} \omega_p &= s \omega_{0эл}; \\ s &= \frac{\omega_{0эл} - p_{\Pi} \omega}{\omega_{0эл}} = \frac{\omega_p}{\omega_{0эл}}, \end{aligned}$$

где  $s$  – скольжение;  $\omega$  – угловая скорость двигателя.

Тогда в установившемся режиме электромагнитные процессы в орбитальном электроприводе могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I_1 + j\omega_{0эл} \Psi_1; \\ 0 &= \frac{R_2 I_2}{s} + j\omega_p \Psi_2; \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\Psi_1 = (L_m L_R + L_{1\sigma}) I_1 + L_m L_R I_2;$$

$$\Psi_2 = L_m L_R I_1 + (L_m L_R + L_{2\sigma}) I_2,$$

где  $U_1, I_1, \Psi_1, U_2, I_2, \Psi_2$  – векторы напряжения, тока, потокосцепления статора и ротора соответственно.

Описанные преобразования могут быть выполнены для любой фазы, поэтому индексы А и а здесь опущены и далее.

Для построения схемы замещения преобразуем эти формулы, для чего исключим из рассмотрения потокосцепления, подставив их значения в два первых уравнения (3.5). Тогда

$$\begin{aligned} U_1 &= (R_1 + j\omega_{0эл} L_{1\sigma}) I_1 + j\omega_{0эл} L_m L_R (I_1 + I_2); \\ 0 &= \left( \frac{R_2}{s} + j\omega_p L_{2\sigma} \right) I_2 + j\omega_p L_m L_R (I_1 + I_2), \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $L_m$  – главная индуктивность. Обычно задаются индуктивными сопротивлениями, которые рассчитываются при номинальной частоте  $\omega_{0элн}$ :

$x_m = \omega_{0элн} L_m$  – индуктивное сопротивление намагничивающего контура;

$x_{1\sigma} = \omega_{0элн} L_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора;

$x_{2\sigma} = \omega_{0элн} L_{2\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, приведенное к статору.

Полные индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора определяются по формулам:

$$X_1 = X_m + X_{1\sigma}; \quad X_2 = X_m + X_{2\sigma},$$

Выражения (3.6) можно переписать в удобном при частотном регулировании виде, при котором значения индуктивных сопротивлений не нужно пересчитывать при каждом изменении частоты, а достаточно изменить значение относительной частоты:

$$\begin{aligned} U_1 &= (R_1 + j\bar{\omega}_0 X_{1\sigma}) I_1 + j\bar{\omega}_0 X_m L_R (I_1 + I_2); \\ 0 &= \left( \frac{\bar{\omega}_0 R_2}{\bar{\omega}_p} + j\bar{\omega}_0 X_{2\sigma} \right) I_2 + j\bar{\omega}_0 X_m L_R (I_1 + I_2). \end{aligned} \quad (3.7)$$

Аналогично как и для асинхронного двигателя, с учетом меняющейся индуктивности запишем выражения для описания электромагнитных процессов в пространственных векторах, вращающихся с синхронной скоростью вместе с вращающейся системой координат для орбитального электропривода муфты включения:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{0\text{эл}} \bar{\Psi}_1; \\ \bar{U}_2 &= R_2 \bar{I}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j\omega_p \bar{\Psi}_2; \\ \bar{\Psi}_1 &= L_1 \bar{I}_1 + L_R L_m \bar{I}_2; \\ \bar{\Psi}_2 &= L_R L_m \bar{I}_1 + L_2 \bar{I}_2. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Электромагнитная мощность одной фазы, как активная мощность, передаваемая из статора в ротор, рассеивается в эквивалентном сопротивлении  $\bar{\omega}_0 R_2 / \bar{\omega}_p = R_2 / s$ . Электромагнитная мощность трехфазного двигателя равна

суммарной мощности трех фаз:  $P_{\text{эм}} = 3I_2^2 R_2 \bar{\omega}_0 / \bar{\omega}_p$ . Входящий в это выражение модуль тока ротора  $I_2$  записывается в виде

$$I_2 = \frac{\bar{\omega}_0 x_m}{\sqrt{(A^2(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p) + B^2(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p))}} U_1,$$

где  $A(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p)$  и  $B(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p)$  определяются так:

$$A(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p) = \bar{\omega}_0 \left( \frac{R_1 R_2}{\bar{\omega}_p} - \bar{\omega}_0 \sigma x_1 x_2 \right);$$

$$B(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p) = \bar{\omega}_0 \left( \frac{\bar{\omega}_0 x_1 R_2}{\bar{\omega}_p} + x_2 R_1 \right);$$

$$\sigma = 1 - \frac{(L_m L_R)^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{(x_m L_R)^2}{x_1 x_2}.$$

Тогда формула для электромагнитного момента орбитального электропривода приобретает вид

$$M_{\text{Д}} = 3 \frac{P_n U_1^2}{\omega_{0\text{элн}}} \frac{\bar{\omega}_p L_R^2 x_m^2 R_2}{(R_1 R_2 - \bar{\omega}_0 \sigma x_1 x_2 \bar{\omega}_p)^2 + (\bar{\omega}_0 x_1 R_2 + x_2 R_1 \bar{\omega}_p)^2}, \quad (3.9)$$

Другая форма записи формулы для момента может быть получена, если выразить электромагнитную мощность через приведенные к статору роторную ЭДС и ток в роторной цепи как:

$$P_{\text{эм}} = 3E_2 I_2 \cos \varphi_2;$$

$$E_2 = \bar{\omega}_0 x_m L_R I_m = \bar{\omega}_0 \omega_{0\text{элн}} L_m L_R I_m,$$

где  $\varphi_2$  – угол между векторами ЭДС и тока ротора;  $E_2$  – модуль вектора роторной ЭДС. После подстановки этого выражения для электромагнитной мощности в формулу (3.9) выражение для момента получится в виде  $M_D = 3p_n L_m L_R I_m I_2 \cos \varphi_2$ , или с учетом значения потокосцепления от магнитного потока в зазоре  $\Psi_m = L_m L_R I_m$  [38]:

$$M_D = 3p_n \Psi_m I_2 \cos \varphi_2$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{(R_2^2 + \bar{\omega}_2^2 X_{2\sigma}^2)}}. \quad (3.10)$$

Отметим, что входящие в приведенные формулы значения напряжений токов и потокосцеплений представляют собой действующие значения величин. Рассматривая двигатель с короткозамкнутым ротором, примем  $\bar{U}_2 = 0$ ; поочередно исключая в системе уравнений (3.8) из третьего равенства ток  $\bar{I}_2$  и из четвертого равенства ток  $\bar{I}_1$ , выразим ток статора и ток ротора как функции потокосцеплений.

Тогда исходные уравнения, описывающие орбитальный электропривод, будут представлены в виде:

$$p\bar{\Psi}_1 = \bar{U}_1 - R_1 \bar{I}_1 - j\omega_{0эл} \bar{\Psi}_1; \quad (3.11)$$

$$p\bar{\Psi}_2 = -R_2 \bar{I}_2 - j\omega_p \bar{\Psi}_2; \quad (3.12)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{\sigma L_1} (\bar{\Psi}_1 - k_2 \bar{\Psi}_2); \quad (3.13)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{\sigma L_2} (\bar{\Psi}_2 - k_1 \bar{\Psi}_1); \quad (3.14)$$

$$M_D = \frac{3}{2} p_n L_R L_m \operatorname{Im}[\bar{I}_1 I_2]; \quad (3.15)$$

$$p\omega = \frac{1}{J_p}(M_D - M_c); \quad (3.16)$$

$$\omega_p = \omega_{0эл} - p_n \omega. \quad (3.17)$$

где  $J$  – момент инерции привода;  $M_c$  – момент нагрузки, включающий в себя момент нагрузки на валу и момент потерь вращения двигателя,  $k_1, k_2$  – безразмерные коэффициенты,  $k_1 = L_R L_m / L_1$ ,  $k_2 = L_R L_m / L_2$ ;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния машины,  $\sigma = 1 - (L_m L_R)^2 / (L_1 L_2) = 1 - k_1 k_2$ .

Для построения структурной схемы необходимо произвести преобразования над выражениями 3.11-3.17. После преобразований выражения могут быть записаны в виде:

$$p\Psi_2 = -R_2 I_2 - \omega_p B \Psi_2;$$

$$I_1 = \frac{1}{\sigma L_1}(\Psi_1 - k_2 \Psi_2);$$

$$I_2 = \frac{1}{\sigma L_2}(\Psi_2 - k_1 \Psi_1),$$

где  $B$  – квадратная матрица имеет следующий вид

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Так же стоит учитывать, что

$$U_1 = \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \end{bmatrix}; \quad I_1 = \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix}; \quad \Psi_1 = \begin{bmatrix} \Psi_{1\alpha} \\ \Psi_{1\beta} \end{bmatrix}; \quad \Psi_2 = \begin{bmatrix} \Psi_{2\alpha} \\ \Psi_{2\beta} \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Выражение для момента двигателя записывается как скалярное произведение двух векторов:

$$M_D = \frac{3}{2} p_n L_R L_m I_1 B I_2;$$

Структурная схема орбитального электропривода представлена на рисунке 3.1. Внешними входными воздействиями служат: матрица-столбец статорного напряжения (выражение (3.18)), угловая частота статорного напряжения и момент нагрузки  $M_c$ . Выходными переменными являются матрицы-столбцы токов статора и ротора, потокосцеплений статора и ротора и токов статора и ротора, а также скорость двигателя  $\omega$  и частота роторной ЭДС  $\omega_p$ , зависящая от нагрузки двигателя [38].

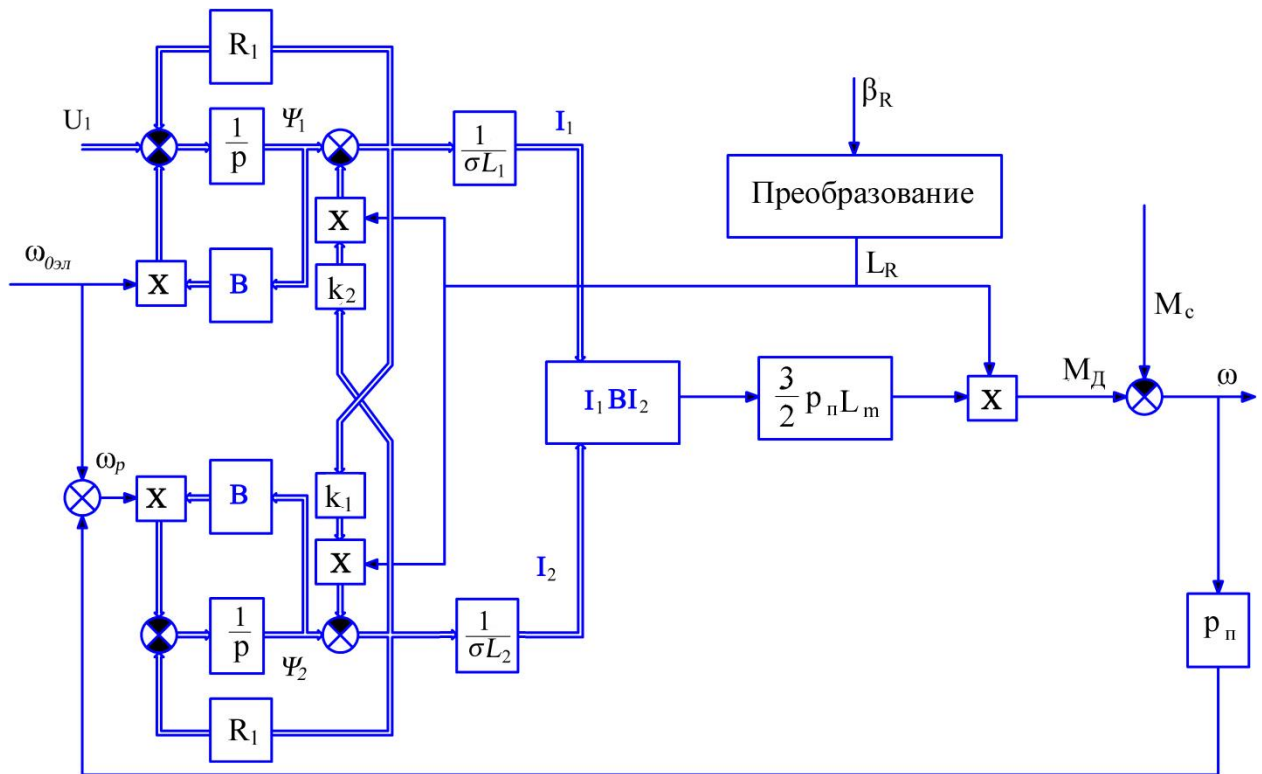


Рисунок. 3.1 – Структурная схема орбитального электропривода

Для построения структурной схемы орбитального электропривода с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора, система уравнений имеет следующий вид:

$$i_{1\alpha} = \frac{1}{\sigma T_1 p R_1} (u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T_1 R_1 i_{1\beta} - k_2 p \Psi_2) \quad (3.19)$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{\sigma T_1 p R_1} (u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta} - \omega_{0\text{эл}} \sigma T_1 R_1 i_{1\alpha} - k_2 p \Psi_2) \quad (3.20)$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{T_2 p} (L_R L_m i_{1\alpha} - \Psi_2) \quad (3.21)$$

$$\omega_p = \frac{k_2 R_2 i_{1\beta}}{\Psi_2}. \quad (3.22)$$

Эти выражения дополняются формулой для электромагнитного момента

$$M_{\text{д}} = \frac{3}{2} p_n k_2 \Psi_2 i_{1\beta}$$

основным уравнением механики  $p\omega = (M_{\text{д}} - M_{\text{с}})/J$  ( $M_{\text{с}}$  – момент нагрузки;  $J$  – момент инерции) и равенством  $\omega_{0\text{эл}} = \omega p_n + \omega_p$ , где

$$\sigma = 1 - (L_m L_R)^2 / (L_1 L_2), \quad k_2 = L_R L_m / L_2, \quad T_1 = L_1 / R_1 \text{ и } T_2 = L_2 / R_2.$$

Структурная схема (рисунок 3.2), построенная на основании уравнений, которые соответствуют направлению оси  $a$  по вектору потокосцепления ротора, отличается от схемы рисунок 3.1, не только своей конфигурацией, но и по существу. Главное отличие состоит в том, что при таком математическом описании внешними управляющими воздействиями являются только компоненты пространственного вектора напряжения на статоре, а частота напряжения на статоре  $\omega_{0\text{эл}}$  как управляющее воздействие не рассматривается и определяется через скорость орбитального привода  $\omega$  и частоту роторной ЭДС  $\omega_p$ , которая, в свою очередь, рассчитывается через значения составляющей тока статора по квадратурной оси  $i_{1\beta}$  и потокосцепление ротора.

Из структурной схемы видно, что на входы блоков  $(1/R_1)/\sigma T_1 p$  воздействуют сигналы перекрестных связей по проекциям вектора тока статора  $i_{1\alpha}$  и  $i_{1\beta}$ . Если свести к минимуму влияние этих перекрестных связей, то, задавая значение  $u_{1\alpha}$ , можно независимо устанавливать потокосцепление ротора  $\Psi_2$ . При данном значении  $\Psi_2$  сигнал задания составляющей напряжения  $u_{1\beta}$  будет задавать значение электромагнитного момента и скорости орбитального привода. Таким образом, задачи управления потокосцеплением ротора и электромагнитным моментом двигателя будут разделены подобно тому, как это имеет место в двигателе постоянного тока независимого возбуждения.

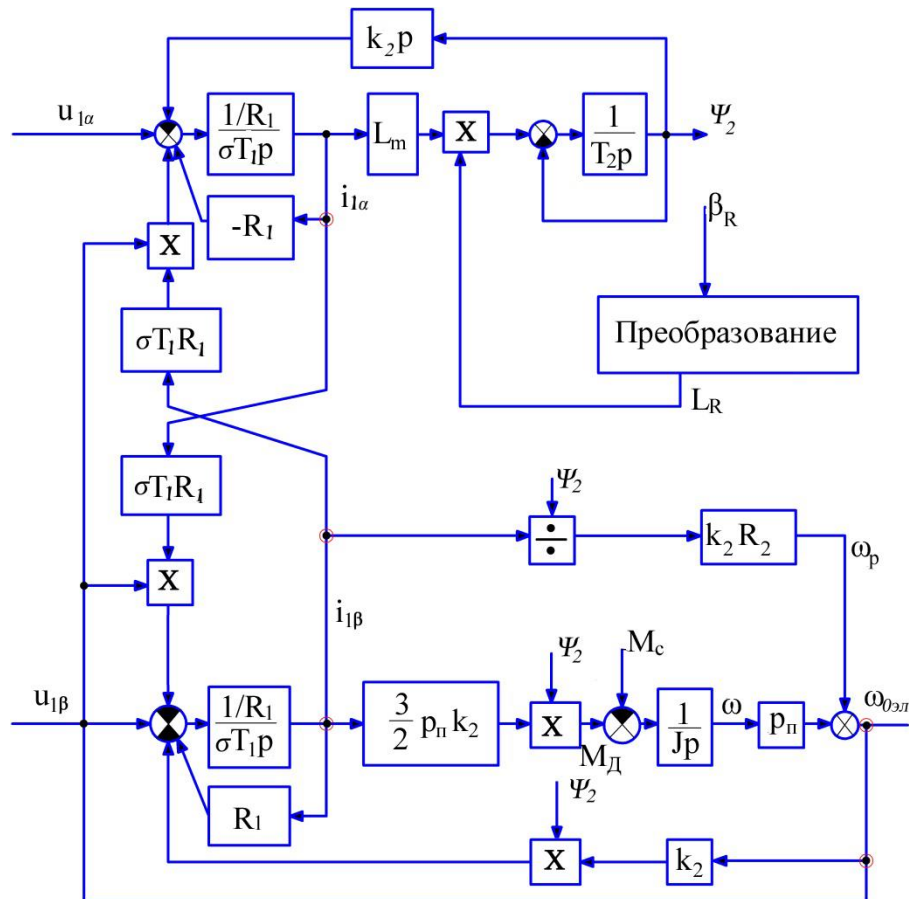


Рисунок 3.2 – Структурная схема орбитального электропривода при ориентации вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора

Эффективным способом исключения влияния перекрестных связей является непосредственное управление током статора. Это может быть достигнуто при питании двигателя от преобразователя частоты, управляемого током. Из получающейся при этом структурной схемы двигателя (рисунок 3.3) видно, что установившееся значение потокосцепления ротора однозначно определяется составляющей тока статора по прямой оси  $i_{1\alpha}$ .

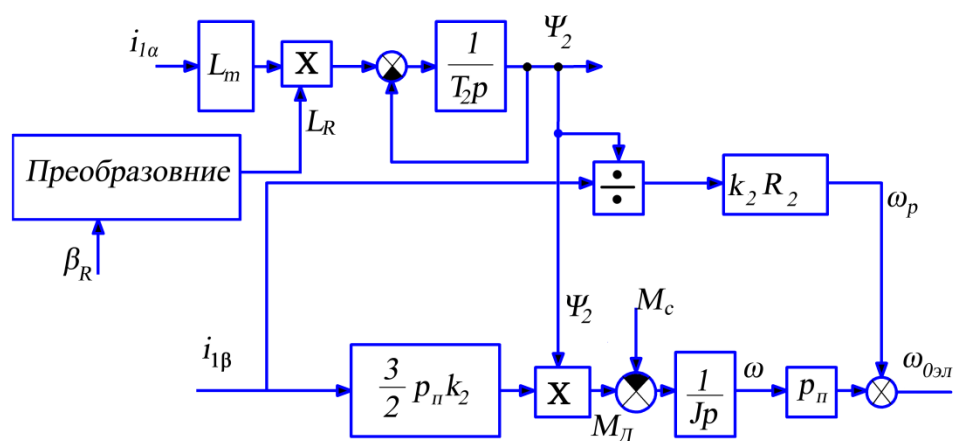


Рисунок 3.3 – Структурная схема орбитального электропривода при управлении током статора и ориентации вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора

В переходном режиме замедление потокосцепления по отношению к току  $i_{1\alpha}$  характеризуется постоянной времени ротора  $T_2$ . Электромагнитный момент двигателя при постоянном потокосцеплении ротора определяется только значением составляющей тока статора по квадратурной оси  $i_{1\beta}$  и без замедления следует за ее изменениями, т.е. момент изменяется так быстро, как быстро изменяется составляющая тока статора по квадратурной оси. Это способствует обеспечению высокого быстродействия электропривода с торцевым асинхронным двигателем.

### 3.2 Выбор исполнительных элементов орбитального электропривода муфты включения

Рассмотрим динамический режим, заданный скоростью  $\omega_c$ , ускорением  $\varepsilon_c$  и моментом  $M_c$ . Задачу по выбору исполнительных элементов принято решать в момент-энергетических координатах, тогда требуемые параметры для орбитального электропривода, определяются следующим образом:

мощность

$$P_c = M_c \omega_c ; \quad (3.23)$$

приемистость

$$П_c = M_c \varepsilon_c . \quad (3.24)$$

После приведения этих величин к валу орбитального электропривода, для одного модуля, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c^* = P_c ; \\ П_c^* = П_c ; \\ M_c^* = \frac{M_c}{q} . \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Заданный динамический режим определяется в координатах  $P$ ,  $\Pi$ ,  $M$  в виде некоторой точки. Положение точки зависит от числа редуктора  $q$ , при изменении которого она перемещается параллельно оси  $OM$ . Если точка лежит в пределах момент-энергетического пространства орбитального электропривода, или может быть приведена в это пространство, то заданный динамический режим для такого двигателя может быть выполнимым. В другом случае, орбитальный электродвигатель не сможет воспроизвести требуемый динамический режим, тогда необходимо изменить конструктивные парамет-

ры орбитального электропривода, или же в некоторых случаях изменить передаточное число редуктора [39-41].

На рисунке 3.4 изображены три динамических состояния, определяемых точками A1, A2, A3. За счет редуктора в пределы момент-энергетического пространства попадают точки A2 и A1, которые изображают выполнимое динамическое состояние для данного орбитального электропривода. Третья точка A3 не может быть выполнена данной конфигурацией орбитального электропривода, так как использование редуктора никак не может привести эту точку в момент-энергетическое пространство.

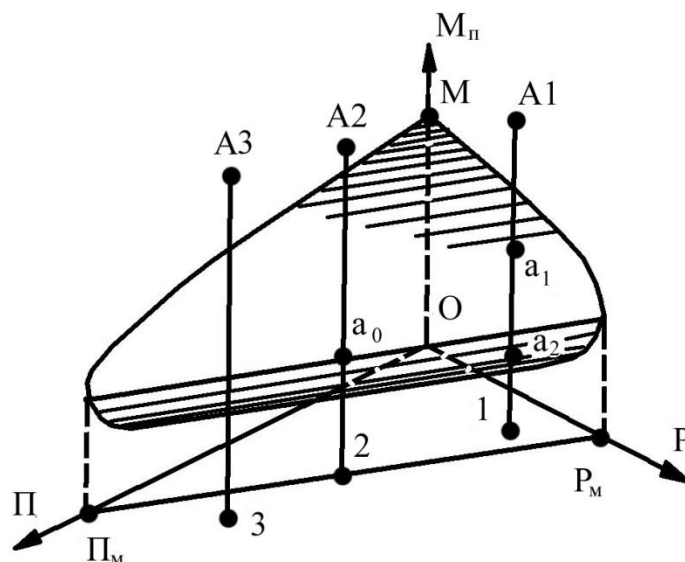


Рисунок 3.4 – Графическое отображение точечного динамического состояния

Из рисунка 3.4 видно, что точку можно привести в момент-энергетическое пространство в некоторых случаях, когда траектория движения пересекает (точка A1) или касается (точка A2) момент-энергетического цилиндра выбранной конфигурации орбитального электропривода. Последнее имеет место, если проекция точки на плоскость  $M=M_{\pi}/2$  не выходит за пределы области, ограничиваемой лежащей в этой плоскости предельной энергетической характеристикой. Аналитически это условие записывается в виде неравенства

$$1 - \frac{P_c}{P_M} - \frac{\Pi_c}{\Pi_M} \geq 0. \quad (3.26)$$

Это выражение и есть критерий для выбора передаточного числа редуктора орбитального электропривода в данной задаче. Этот критерий определяет требования, которым должна удовлетворять конфигурация орбитального электропривода. Выполнение этих требований – необходимое условие для воспроизведение заданного динамического режима, а достаточное условие – требования предъявляемые к механическому редуктору, что обуславливает выбор передаточного число в заданном диапазоне

$$q_1 \leq q \leq q_2, \quad (3.27)$$

граничные значения, которого

$$q_{1,2} = \frac{M_c}{\frac{M_{\Pi}}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{P_c}{P_M} - \frac{\Pi_c}{\Pi_M}} \right)}. \quad (3.28)$$

Может оказаться, что ни одна из имеющих конфигураций орбитального электропривода при номинальном управлении не может выполнить заданный динамический режим, в таких случаях возможно применение форсирования двигателя на коэффициент  $K_{\phi}$ :

$$K_{\phi} = \frac{M_{\Pi.форс}}{M_{\Pi.ном}},$$

где  $M_{\Pi.форс}$  и  $M_{\Pi.ном}$  – пусковые моменты форсированного и номинального режимов. Необходимая величина  $K_{\phi}$  с учетом граничных условий

$$K_{\phi} \geq \sqrt{\frac{P_c}{P_M} + \frac{\Pi_c}{\Pi_M}}.$$

Тогда после определения требуемого коэффициента форсирования, необходимо решить вопрос о технической реализации, при этом необходимо учесть тепловой режим, механическую прочность и другие параметры. Не всегда требуемые значения скорости, момента, ускорения, мощности и прие- мистости, заданы точками, чаще всего они заданы временными функциями, где каждому моменту времени соответствует свое точечное динамическое состояние, характеризуемое своими мгновенными значениями параметров. Выбранная конфигурация орбитального электропривода и конфигурация ре- дуктора должна воспроизводить всю совокупность точечных динамических состояний.

Для точного решения таких задач используют аналитические решения, для приближенного решения используют графо-аналитические решения. Для решения аналитически определяют несколько точечных динамических со- стояний, которые трудно выполнимы для данной конфигурации орбитально- го электропривода. Если выбранная конфигурация орбитального электропри- вода воспроизводит наиболее тяжелые состояния, то с наибольшей вероятно- стью воспроизведет и более простые точечные состояния. Для разных конфи- гураций орбитального электропривода, а так же в зависимости от поставлен- ной задачи, тяжелое точечное состояния может быть одно, а может быть и несколько.

Рассмотрим задачу по воспроизведению гармонических колебаний с частотой  $\phi$  и амплитудой  $\alpha$ , требуемый момент состоит из нескольких со- ставляющих

$$M_c = C_M \beta_v + J_{и} \varepsilon_c,$$

где  $C_M$  – жесткость нагрузки;  $J_{и}$  – момент инерции;  $\beta_v$  – угол поворота выход- ного вала.

Угол, скорость, и ускорение таких гармонических колебаний равны:

$$\begin{cases} \beta_v = \alpha \sin \varphi t; \\ \omega_c = \omega_A \cos \varphi t; \\ \varepsilon_c = -\varepsilon_A \sin \varphi t, \end{cases} \quad (3.29)$$

где  $\omega_A = \alpha \varphi$  и  $\varepsilon_A = \alpha \varphi^2$  – амплитуды скорости и ускорения гармонических колебаний. Найдем требуемые характеристики мощность, приемистость и момент:

$$\begin{cases} P_c = P_A \sin 2\varphi t; \\ \Pi_c = -\Pi_A (1 - \cos 2\varphi t); \\ M_c = M_A \sin \varphi t, \end{cases} \quad (3.30)$$

где  $P_A$ ,  $\Pi_A$  и  $M_A$  – амплитудные значения мощности, приемистости, момента:

$$\begin{cases} P_A = \frac{C_M - J_{\text{и}} \varphi^2}{2} \alpha^2 \varphi; \\ \Pi_A = -\frac{C_M - J_{\text{и}} \varphi^2}{2} \alpha^2 \varphi^2; \\ M_A = (C_M - J_{\text{и}} \varphi^2) \alpha. \end{cases} \quad (3.31)$$

Эти системы уравнений, описывают в полной мере требования к исполнительным элементам привода. В координатах  $P$ ,  $\Pi$ ,  $M$  плоская пространственная кривая  $f_c$ , является геометрическим местом всех требуемых статических и динамических точечных состояний. Пересечение параболического (I) и эллиптического (II) цилиндров и есть нагрузочная кривая. После приведения в момент-энергетические координаты орбитального электропривода получим:

$$\begin{cases} P_c^* = P_c(t); \\ \Pi_c^* = \Pi_c(t); \\ M_c^* = \frac{M_c(t)}{q}. \end{cases} \quad (3.32)$$

Из этой системы уравнений видно, что применение редуктора деформирует нагрузочную кривую  $f_c$  вдоль образующей эллиптического цилиндра II (рисунок 3.5).

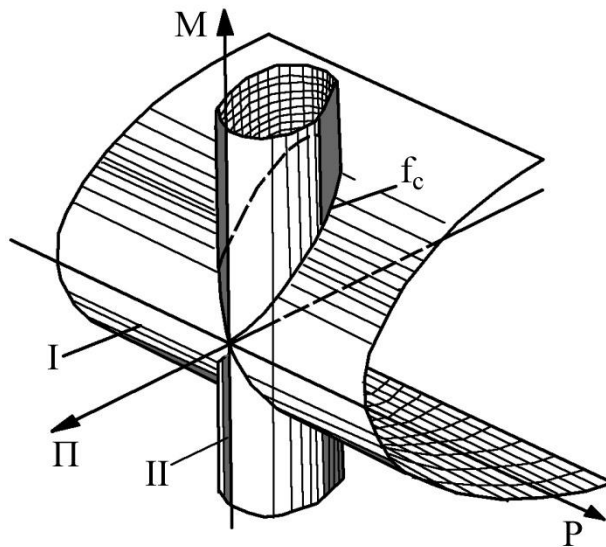


Рисунок 3.5 – Графическое отображение динамического состояния в виде кривой

Так же как и при динамических режимах, заданными точками, если применение редуктора сможет сместить кривую в пределы располагаемого момент-энергетического пространства выбранной конфигурации орбитального электропривода, то для данного гармонического колебания выбрана правильная конфигурация орбитального электропривода. В другом случае необходимо выбрать другую конфигурацию орбитального электропривода. Нагрузочная кривая  $f_c$  для данного случая симметрична относительно плос-

кости  $M=0$ , поэтому достаточно будет рассмотреть одну из ветвей, например  $M>0$ .

В общем случае необходимо узнать вписывается ли приведенная нагрузочная кривая в пределы параболического цилиндра. При некотором значении передаточного числа редуктора, нагрузочная кривая будет полностью приведена в пределы параболического цилиндра, и коснется его нижней поверхности. Точка внутреннего касания является одной из расчетных точек, а соответствующее передаточное число редуктора – верхним диапазоном передаточных чисел, при превышении этого диапазона, часть нагрузочной кривой будет за пределами параболического цилиндра, таким образом, гармонические колебания для данной конфигурации орбитального электропривода, будут невыполнимы. Другой расчетной точкой, является касание нагрузочной кривой с верхней поверхностью параболического цилиндра, а соответствующее передаточное число редуктора, определяет второе нижнее значение диапазона передаточных чисел. Поэтому передаточное число ниже значения из диапазона, так же деформирует нагрузочную кривую, что она будет находится за пределами параболического цилиндра.

Из этого можно определить критерий для проверки воспроизведения данных гармонических колебаний:

$$1 + 2 \frac{P_A}{P_M} - \left( \frac{P_A}{P_M} \right)^2 \geq 0. \quad (3.33)$$

Это выражение и есть критерий для выбора конфигурации орбитального электропривода. Этот критерий определяет требования, которым должна удовлетворять конфигурация орбитального электропривода. Выполнение этих требований – необходимое условие для воспроизведение заданного гармонического колебания, а достаточное условие – требования предъявляемые к механическому редуктору, что обуславливает выбор передаточного число в заданном диапазоне

$$q_1 \leq q \leq q_2, \quad (3.34)$$

граничные значения которого

$$q_{1,2} = \frac{\sqrt{\frac{M_A^2}{2} \left[ 2 \left( \frac{\Pi_A}{\Pi_M} \right)^2 + \left( \frac{P_A}{P_M} \right)^2 \left( 1 - \frac{\Pi_A}{\Pi_M} \pm \sqrt{1 + 2 \frac{\Pi_A}{\Pi_M} - \left( \frac{P_A}{P_M} \right)^2} \right) \right]}}{\frac{M_{II}}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 + 2 \frac{\Pi_A}{\Pi_M} - \left( \frac{P_A}{P_M} \right)^2} \right) \sqrt{\left( \frac{\Pi_A}{\Pi_M} \right)^2 + \left( \frac{P_A}{P_M} \right)^2}}. \quad (3.35)$$

Аналогично можно применить форсирование двигателя в этом случае необходимая величина  $K_\phi$  с учетом граничных условий

$$K_\phi \geq \sqrt{\sqrt{\left( \frac{P_A}{P_M} \right)^2 + \left( \frac{\Pi_A}{\Pi_M} \right)^2} - \frac{\Pi_A}{\Pi_M}}.$$

Рассмотрим выбор передаточного числа редуктора для орбитального электропривода муфты пресса включения. У нас есть некая конфигурация орбитального электропривода, которая имеет момент-энергетическую характеристику, показанную на рисунке 3.6.

Конфигурация показанная на рисунке 3.6 уже содержит в себе редуктор с некоторым передаточным числом, задача заключается в следующем – изменить передаточное число редуктора, но при этом не меняя конструктивные параметры орбитального электропривода. На рисунке 3.6 точками А и В обозначены два требуемых динамических режима. Режим А рассчитан меньшее количество оборотов орбитального электропривода, режим В, наоборот на высокое количество оборотов, при этом оба режима должны обеспечить высокий крутящий момент близкий к пусковому.

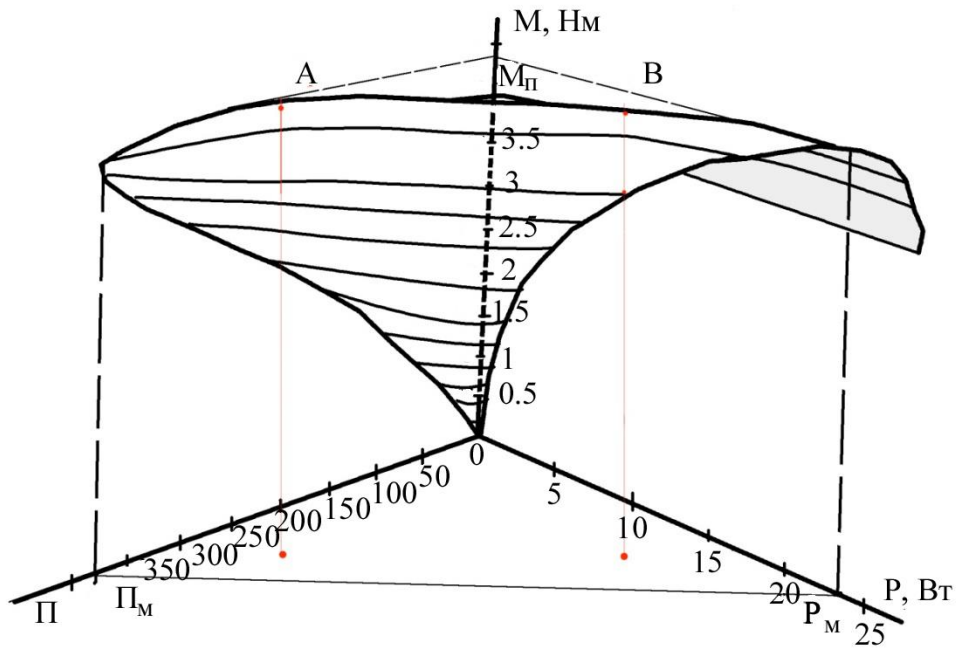


Рисунок 3.6 – Момент-энергетическая характеристика орбитального электропривода

Запишем параметры требуемого динамического режима:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c^A = 5; \\ \Pi_c^A = 250; \\ M_c^A = \frac{4.4}{q}; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} P_c^B = 15; \\ \Pi_c^B = 50; \\ M_c^B = \frac{4.4}{q}. \end{array} \right.$$

При этом имеем следующие параметры  $M_{\Pi} = 4.4$ ,  $P_M = 24$ ,  $\Pi_M = 370$ . Проверим граничные условия для режима А используя формулу 3.26:

$$1 - \frac{5}{24} - \frac{250}{370} = 0.115 \geq 0,$$

для режима В аналогично:

$$1 - \frac{15}{24} - \frac{50}{370} = 0.239 \geq 0.$$

Для режима А и В условия выполняются. Теперь необходимо определить граничные значения для передаточного числа используя формулу 3.28, для режима А:

$$q_{1,2} = \frac{4.4}{\frac{4.4}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{5}{24} - \frac{250}{370}} \right)} = 1.5, 3.$$

Чтобы точка А попала в момент-энергетическое пространство необходимо изменить передаточное число редуктора от 1.5 до 3 раз, в данном случае при использовании нижнего предела мы получаем максимальный крутящий момент, что и требуется по условию задачи.

Аналогично для режима В получаем следующие значения от 1.3 до 3.9, так же для получения максимального момента берем нижнюю границу. Таким образом, из всего этого можно сделать вывод. Зная значения текущей конфигурации орбитального двигателя, и зная необходимую нагрузку, можно определить передаточное число редуктора, которое удовлетворит решению задачи. Так же если уже есть готовое решение с уже выбранным передаточным числом редуктора, можно определить стоит ли использовать форсирование двигателя, или же использовать измененный закон управления при частотном управлении, который бы сдвинул характеристику в нужную сторону.

### 3.3 Оптимальный способ управления орбитальным электроприводом

Для того чтобы найти оптимальный способ управления, необходимо определить характер нагрузки на двигатель, и исходя из этого строить оптимальное управление. Основным критерием оптимальности является обеспечение максимального момента, при минимальном токе и соответственно при минимальных затратах энергии, при этом необходимо обеспечить приемлемое быстродействие. На рисунке 3.7 показана компоновка орбитального

электропривода муфты пресса: 1 – ротор; 2 – обмотка внешнего кольцевого статора; 3 – обмотка внутреннего кольцевого статора; 4 – корпус модуля; 5 – пружина; 6 – нажимной диск; 7 – корпус муфты; 8 – опорный диск, который связан с маховиком; 9 – ведомый диск с фрикционными вставками.

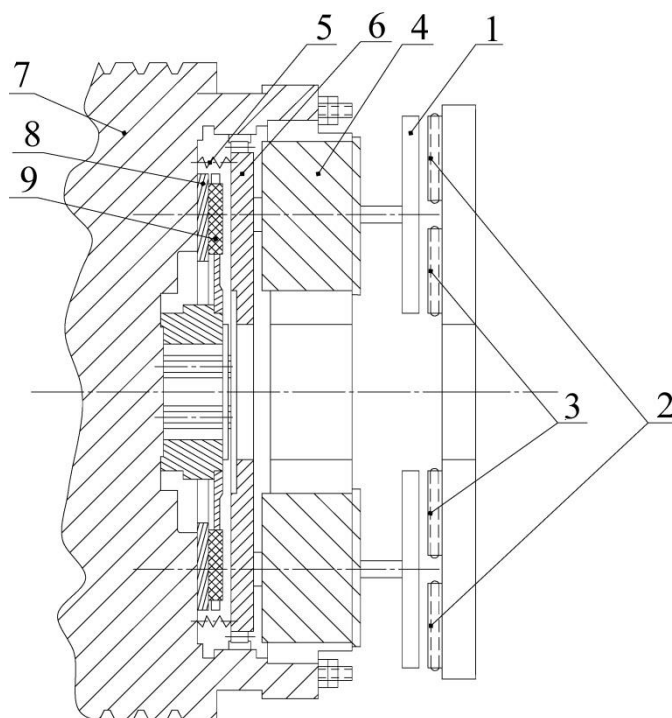


Рисунок 3.7 – Общая схема орбитального электропривода муфты пресса

Работает такая муфта следующим образом: станина с закрепленными модулями 4, вращается вместе с маховиком и приводится в движение главным двигателем пресса после подачи напряжения на статоры 2 и 3, происходит вращение ротора 1 вокруг собственной оси вращения, роторы передают крутящий момент на редукторы, которые преобразуют вращательное движение в поступательное. Штоки, встроенные в редукторы, нажимают на нажимной диск 6, который в свою очередь зажимает опорный и ведомый диски, при этом сжимает пружины 5, и передают вращение на кривошипный вал пресса. После отключения напряжения на статорах 2 и 3, пружины 5 разжимаются, и отводят нажимной диск в исходное положение. Следуя этому алгоритму работы можно составить циклограмму работы муфты (рисунок 3.8).

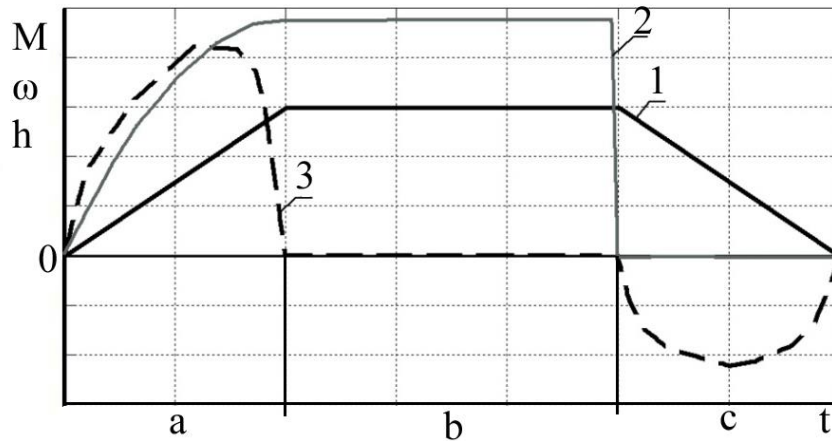


Рисунок 3.8 – Циклограмма работы муфты: 1 – ход муфты; 2 – момент вращения ротора; 3 – скорость вращения ротора

Согласно циклограмме работы электропривода муфты прессы, весь цикл работы муфты можно разбить на три участка «а», «b», «с». На участке «а» подается напряжение на статоры, роторы достигают максимальной скорости и максимальный момент, до тех пор пока диски не соприкоснутся, тогда скорость стремится к 0, а момент к максимальному своему значению. На участке «b» ход муфты остается неизменным, в это время происходит ход ползуна, напряжение на статоре все еще есть, и момент держится в максимальном значении, а скорость близка к 0. На участке «с» отключается напряжение со статора, момент становится равным 0, под действием пружин нажимной диск возвращается в исходное положение, сжимая штоки, и вращение ротора происходит в обратном направлении. Таким образом, управление муфтой осуществляется на двух участках «а» и «b». Причем на участке «а» основная нагрузка – это сжатие пружин, а на участке «b» удержание дисков сжатыми.

Помимо этого алгоритма управления возможен следующий алгоритм работы с использованием реверса показанный на рисунке 3.9.

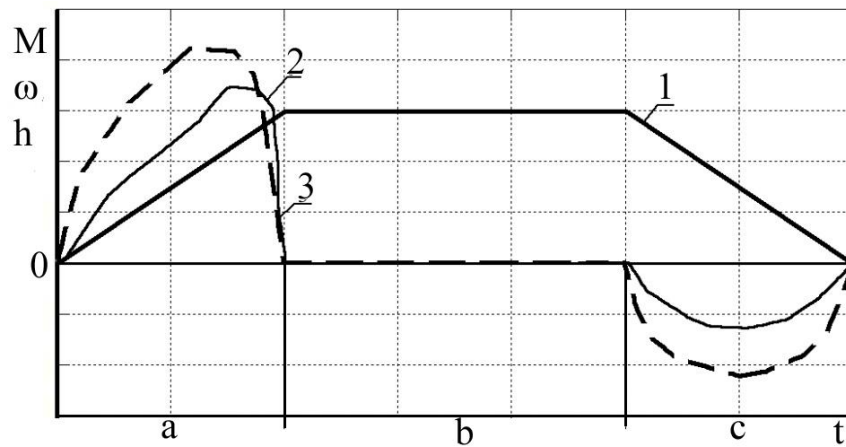


Рисунок 3.9 – Циклограмма работы муфты с использованием реверса, где 1 – ход муфты, 2 – момент вращения ротора, 3 – скорость вращения ротора

Такой вариант алгоритма имеет две разновидности: с самотормозящейся передачей, и со свободной передачей. На рисунке 3.9 показан пример использования с самотормозящейся передачей, и он так же поделен на 3 участка. Первый участок «а» отличается от предыдущего алгоритма тем, что отсутствуют пружины, возвращающие нажимной диск в исходное положение, поэтому требуется приложить меньшее усилие при перемещении нажимного диска. На участке «b» нажимной диск уже в рабочем положении и передает крутящий момент с главного привода, на кривошипный вал пресса, а положение самого диска зафиксировано из-за особенности редуктора с самотормозящейся передачей, поэтому на данном этапе управление орбитальным электроприводом муфты не требуется. На участке «с» необходимо вернуть нажимной диск в исходное положение, поэтому командой «реверс» на орбитальный электропривод муфты возвращаем нажимной диск, усилие при этом требуется меньшее, чем на участке «а». От использования не самотормозящего редуктора данный отличается тем, что на участке «b» необходимо использовать орбитальный электропривод, что бы прижать нажимной диск, поэтому участок «b», аналогичен первому варианту с использованием пружин, а участок «с» аналогичен алгоритму с самотормозящейся передачей.

Основные преимущества использование алгоритма с реверсом, это меньшие энергетические затраты во время цикла, по сравнению с алгоритмом с использованием пружин. Если в такой в схему с таким алгоритмом ввести контур адаптации, то появится возможность автоматически компенсировать износ муфты, что в свою очередь уменьшает работу муфты во время цикла, так как ход муфты во время адаптации уменьшается, каждый раз перемещение нажимного диска осуществляется на минимальную величину, и при износе муфты эта величина не изменится. Использование контура адаптации для алгоритма с пружиной намного сложнее, из-за невозможности менять исходное положение нажимного диска, и там необходимо использовать стартовый импульс что бы компенсировать это расстояние, но предугадать время подачи импульса возможно только в автоматическом режиме пресса, где ход пресса осуществляется непрерывно в течении технологического цикла. Главный недостаток алгоритма с реверсом, это недостаточная безопасность, так как во время аварийной ситуации необходимо отсоединить главный привод от кривошипного вала пресса, но это будет невозможно при отключении электроэнергии или обрыве питающих проводов. Поэтому предпочтение отдается алгоритму с использованием пружин.

Рассмотрим принцип векторного управления. Измеряемыми величинами являются токи статора  $i_a, i_b, i_c$  и скорость вращения вала  $\omega_r$ . В сбалансированной трехфазной цепи описание состояния с помощью трех величин всегда избыточно, всегда два значения задают третье [42]. Поэтому значения токов  $i_a, i_b, i_c$  преобразуем в постоянные  $i_{sd}, i_{sq}$  с помощью формулы:

$$\begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}, \quad (3.36)$$

где  $\theta_s(t) = \int_0^t \omega_s(\tau) d\tau$  – угловое положение вращающейся системы координат,

$\omega_s$  – скорость вращения системы координат.

Как видно из формулы, для такого преобразования необходимо знать скорость вращения координат  $\omega_s$ , которая зависит от измеренной скорости вращения вала  $\omega_r$  и скольжения  $s$ , которая находится из следующих соотношений:

$$p = -\frac{p}{\tau_r} + \frac{i_{sd}}{\tau_r}, \quad s = \frac{i_{sq}}{\tau_r p}, \quad (3.37)$$

где  $p$  – переменная состояния, пропорциональная оценке потока ротора.

При вычислении  $\omega_s$  используется постоянная времени ротора двигателя  $\tau_r$ , которая должна быть измерена или оценена до запуска двигателя в векторном режиме.

Модель двигателя в пространстве состояний с ориентацией потокосцепления ротора  $\varphi_r$  вдоль оси  $d$ , описывается системой дифференциальных уравнений [43-45]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_r &= -\frac{R_R}{L_M} \varphi_r + i_{sd} R_R; \\ \dot{i}_{sd} &= -\frac{\omega}{L_\sigma} \varphi_r - \frac{R_s}{L_\sigma} i_{sq} - \frac{R_R}{L_\sigma} i_{sq} - i_{sd} \omega_s + \frac{u_{sq}}{L_\sigma}; \\ \dot{i}_{sq} &= \frac{R_R}{L_\sigma L_M} \varphi_r - \frac{R_R}{L_\sigma} i_{sd} - \frac{R_s}{L_\sigma} i_{sd} + i_{sq} \omega_s + \frac{u_{sd}}{L_\sigma}; \\ \dot{\omega} &= p \frac{T_e - T_m}{J}, \end{aligned} \quad (3.38)$$

где  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  – токи статора в системе dq-координат,  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  – напряжения статора,  $\omega$  – скорость вращения вала двигателя,  $T_e = p \varphi_r i_{sq}$  – электромагнитный момент. Параметры двигателя задаются отдельно и имеют следующие обозначения:  $R_R$  – приведенное сопротивление ротора,  $R_s$  – сопротивление статора,

$L_\sigma$  – приведенная индуктивность статора,  $L_M$  – приведенная индуктивность намагничивания,  $p$ – число пар полюсов,  $J$ – момент инерции ротора нагрузки.

Система dq-координат вращается с синхронной скоростью двигателя:

$$\omega_s = \omega + \frac{R_R i_{sd}}{\Phi_r}. \quad (3.39)$$

На рисунке 3.10 изображена упрощенная структура векторного управления орбитальным электроприводом муфты пресса. Стоит обратить внимание, что фактически вычисление скорости вращения координат  $\omega_s$ , использует значение потокосцепления  $\Phi_r$ , которое обычно вычисляется из модели двигателя (3.38), в таких случаях важно знать значения  $R_R$  и  $L_M$ .

Особенность конструкции орбитального электропривода муфты пресса не позволяет использовать датчик угла поворота вала ротора, поэтому для вычисления угла поворота ротора используются косвенные методы на основе измеряемых токов. Так же для повышения точности вычислений в системе используются датчики Холла, которые помогают определить магнитный поток ротора. Схематичное расположение датчиков холла изображено на рисунке 3.11.

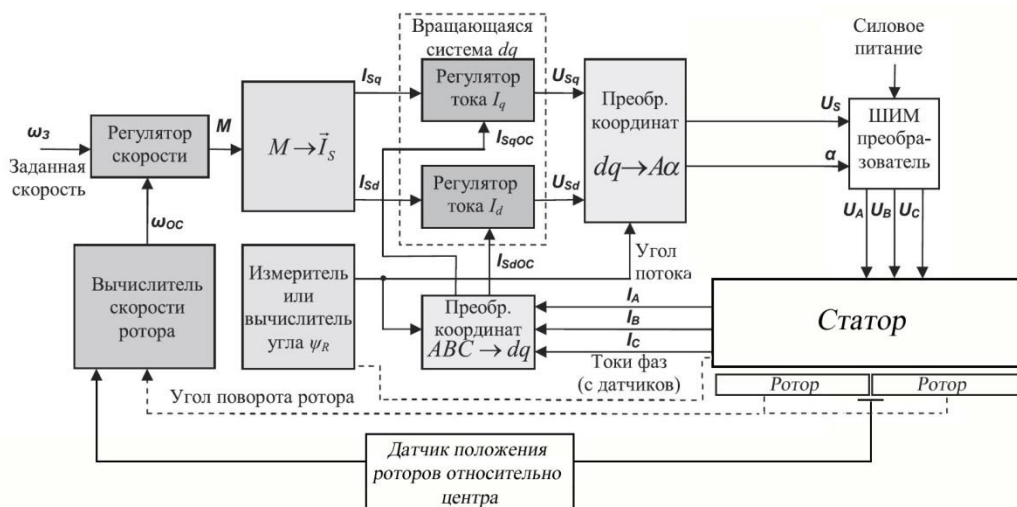


Рисунок 3.10 – Структура векторного управления

Для снятия данных с датчиков Холла используется общий датчик положения роторов относительно статора (или центра вращения), тем самым система управления распознает, когда ротор находится над датчиком. Таким образом, скорость ротора относительно статора определяется суммой скоростей вращения ротора по орбите и собственной скоростью вращения ротора, что является особенностью орбитального электропривода.

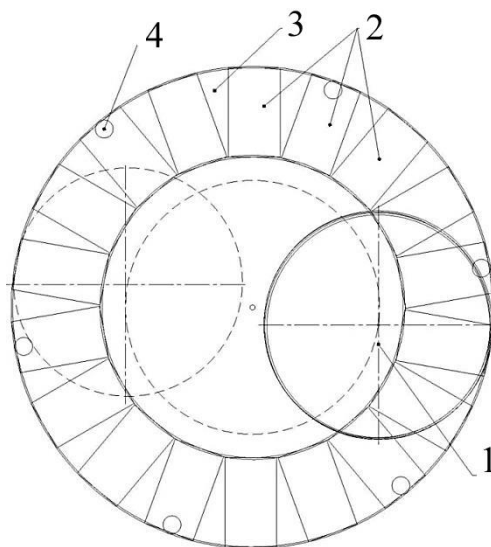


Рисунок 3.11 – Схема орбитального электропривода: 1 – катушки статора; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – датчики положения

Основной принцип векторного управления состоит в независимом регулировании квадратурного тока  $i_{sq}$  и тока намагничивания двигателя  $i_{sd}$ . Ток намагничивания определяет величину потокосцепления поля ротора и поддерживается постоянным, а квадратурный ток всегда устанавливается на минимальном уровне так, чтобы обеспечить достаточный механический момент для поддержания заданной скорости. За счет этого, векторное управление обладает высокой энергетической эффективностью.

Условно будем пренебрегать динамикой регуляторов тока статора  $i_{sd}$  и  $i_{sq}$ , считая, что их быстродействие значительно выше, чем динамика потокосцепления и скорости. Тогда сокращенная модель двигателя имеет вид:

$$\begin{aligned}\varphi_r &= -\frac{R_R}{L_M}\varphi_r + i_{sd}R_R; \\ \omega &= p\frac{p\varphi_r i_{sq} - T_m}{J}.\end{aligned}\quad (3.40)$$

Пренебрегая динамикой регуляторов, входная мощность  $P_{вх}$  может быть выражена сумой выходной механической мощности  $P_{вых}$  и мощностью потерь  $P_{п}$ :

$$\begin{aligned}P_{п} &= i_{sq}^2(t)(R_R + R_s) + i_{sd}^2 R_R; \\ P_{вых} &= \frac{\omega(t)T_e(t)}{p}; \\ P_{вх} &= P_{вых} + P_{п}.\end{aligned}\quad (3.41)$$

В установившемся режиме минимум мощности потерь  $P_{п}$  достигается при следующем токе намагничивания [42]:

$$i_{sd}^{opt}(T_m) = \sqrt{\frac{T_m}{L_M L_R p}} \sqrt[4]{\frac{R_R + R_s}{R_s}}, \quad (3.42)$$

который зависит от момента нагрузки на валу двигателя.

Квадратурный ток определяется из уравнения момента  $T_e$  (формула 3.38) следующим образом:

$$i_{sq} = \frac{T_m}{L_M L_R p i_{sd}}, \quad (3.43)$$

так же можно вычислить оптимальное значение квадратурного тока, после упрощения получаем:

$$\frac{i_{sq}^{opt}}{i_{sd}^{opt}} = \sqrt{\frac{R_s}{R_R + R_s}} = \gamma. \quad (3.44)$$

Таким образом, соотношение двух оптимальных токов не зависит от момента нагрузки, а только от отношений сопротивлений двигателя. Конструкция орбитального электропривода, позволяет с легкостью менять сопротивление ротора, методом изменения его геометрических размеров, изменением соотношения меди и стали, таким образом, имеется возможность менять характер работы привода.

Так же стоит обратить внимание на индуктивность намагничивания  $L_M$ , если в обычном асинхронном двигателе эта величина постоянная на линейном участке кривой намагничивания двигателя, при насыщении магнитопровода двигателя величина индуктивности уменьшается, то в орбитальном электроприводе эта величина еще и прямо пропорциональна площади перекрытия ротора и статора. Тогда:

$$L_R L_M = \frac{L_M^* S_{\Pi}}{S_s}, \quad (3.45)$$

где  $L_M^*$  – индуктивность намагничивания при полном перекрытии,  $S_{\Pi}$  – площадь перекрытия ротором статор,  $S_s$  – площадь статора. Площадь перекрытия в свою очередь зависит от положения роторов относительно центра, и определяется [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\Pi} = R^2(\beta^1 - \beta^0) + r(\beta^1 + \alpha^1 - \beta^0 - \alpha^0) + \frac{Rr}{2} \int_0^{2\pi} [(2R + r) \cos \alpha] dt; \\ \text{При условии} \\ \beta(0) = \beta^0; \alpha(0) = \alpha^0; \beta(2\pi) = \beta^1; \alpha(2\pi) = \alpha^1, \end{array} \right. \quad (3.46)$$

где  $R$  – радиус орбиты вращения роторов,  $r$  – радиус ротора,  $\alpha$  – угол поворота ротора,  $\beta$  – угол положения ротора на орбите.

Таким образом, особенностью орбитального привода, является во-первых, особенность в определении скорости ротора и во-вторых, зависимо-

сти индуктивности намагничивания от перекрытия, с учетом этих особенностей было произведено моделирование в среде MATLAB, где вычислялась мощность потерь формула (3.40), при номинальных токах и оптимальных формула (3.42) и формула (3.43), полученные результаты приведены на рисунок 3.12.

Из всего этого можно сделать следующие выводы. Применение векторного управления к орбитальному электроприводу муфты прессы возможно, так как используется косвенное определение скорости ротора, необходимо применять датчики для определения магнитного потока, количество датчиков зависит от количества роторов, но чем больше, тем точнее определение состояния системы и соответственно меньше мощность потерь. Применение оптимального управления током в зависимости от нагрузки так же снижает мощность потерь до 6%. В совокупности эти методы увеличивают коэффициент полезного действия, что приводит к увеличению полезной мощности.

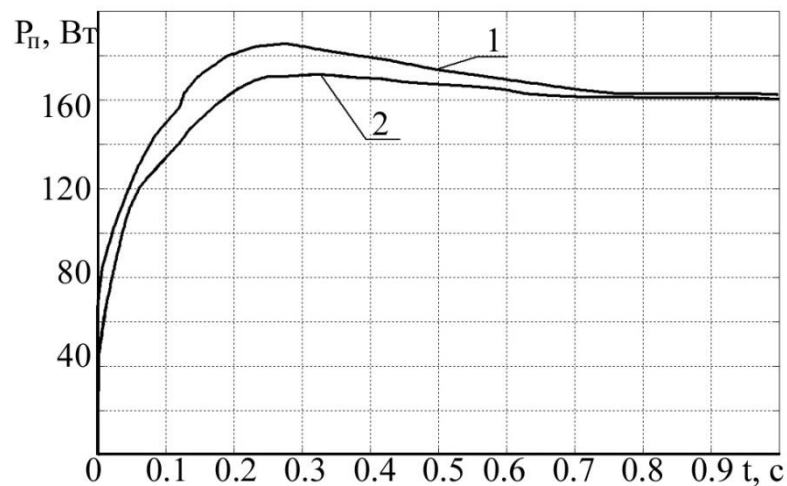


Рисунок 3.12 – Мощность потерь при увеличении нагрузки:

- 1 – для номинального закона управления током;
- 2 – для оптимального закона управления током

В некоторых случаях применение оптимального закона управления, плохо сказывается на быстродействии орбитального электропривода муфты пресса. Поэтому для увеличения быстродействия используют так называемый форсированный пуск, это когда пусковой ток увеличивают относительно номинального пускового тока. Такой способ управления позволят повысить быстродействие всей системы, но так же есть в этом способе недостатки.

Для количественной оценки взята система с определенными параметрами, и был произведен пуск с разными пусковыми токами,  $I_n$ ,  $1.5 I_n$ ,  $0.5 I_n$ , так же определили мощность потерь на статоре такой системы, полученные кривые показаны на рисунке 3.13 в относительных единицах.

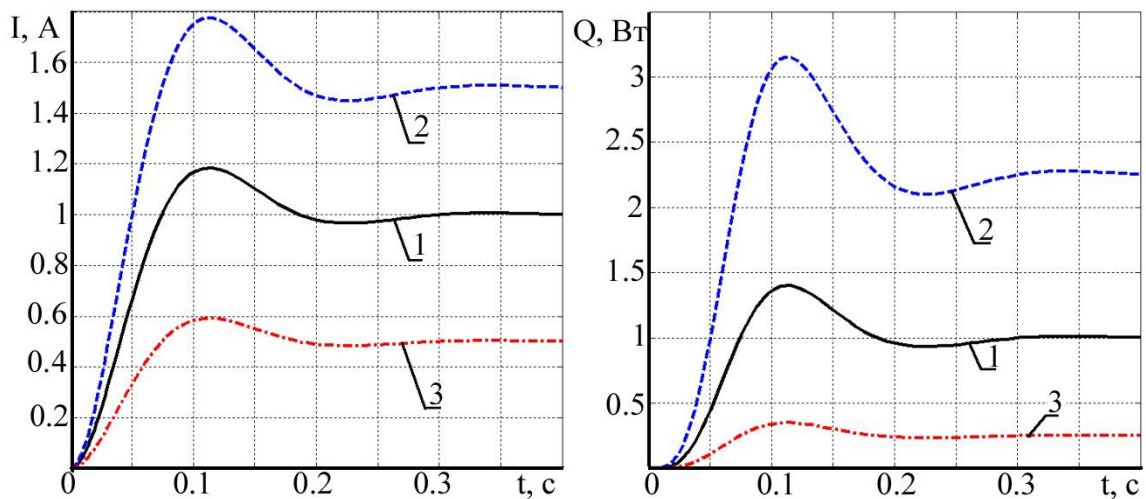


Рисунок 3.13 – Кривые тока и потерь: 1 – для номинального тока  $I_n$ ; 2 – для  $1.5 I_n$  тока; 3 – для  $0.5 I_n$  тока

Повышение пускового тока в 1.5 раза дает небольшой прирост в быстродействии, примерно 10-15%, но как видно по графику, потери при таком способе возрастают чуть более чем в 2 раза. Уменьшение в два раза пускового тока, заметно замедляет систему, но при этом потери остаются номинальными.

Большие потери в статоре при пуске, очень нежелательны для орбитального электропривода, так как большую часть времени работы, орбитальный электропривод работает с максимальным моментом при минимальной

скорости вращения, что приводит к очень быстрому нагреву, и выходу из строя.

### 3.4 Отключение неиспользуемых зон статора

Орбитальный электропривод (рисунок 3.14) построен с использованием общего статора, который взаимодействует с несколькими модулями, количество модулей зависит от поставленной задачи. Каждый модуль (рисунок 3.15) состоит из редуктора, ротора и выдвигающегося штока. Чем больше используется модулей, тем большая часть статора перекрывается ими, но не всегда требуется многороторная конструкция. Конфигурация самого ротора рассмотрена в [15]. Мы рассматриваем конфигурацию с двумя роторами, для макета муфты пресса. При такой конфигурации, если разбить цикл движения на временные промежутки, то в каждый конкретный момент времени перекрывается малая часть статора, в то время как не перекрытая часть статора также потребляет энергию и нагревает обмотки.

Орбитальный электропривод муфты пресса разрабатывается с учетом исключить использование сжатого воздуха и полностью использовать один вид энергии – электрический, что повысит потребительские качества прессового оборудования на малых предприятиях, у которых нет компрессорных систем. Для экономического обоснования применения такого электропривода был рассмотрен кривошипный пресс с усилием 2500 тс. Для такой конструкции необходимо 6 модулей, расчетная мощность каждого модуля 2.7 кВт, тогда мощность всей системы около 16 кВт. В отличие от пневматической системы, где компрессор работает все время для обеспечения постоянного давления в системе, орбитальный электропривод работает только тогда, когда необходимо подключить муфту. Если взять производительность пресса 60 ходов в минуту, то 1 ход – 1 секунда, из этого следует, что работа муфты составляет 0.2–0.5 секунды остальное время занимает разгон маховика главным

двигателем. При таких условиях орбитальный электропривод имеет меньшее потребление энергии, чем компрессорная система в 1.5–2.5 раза.

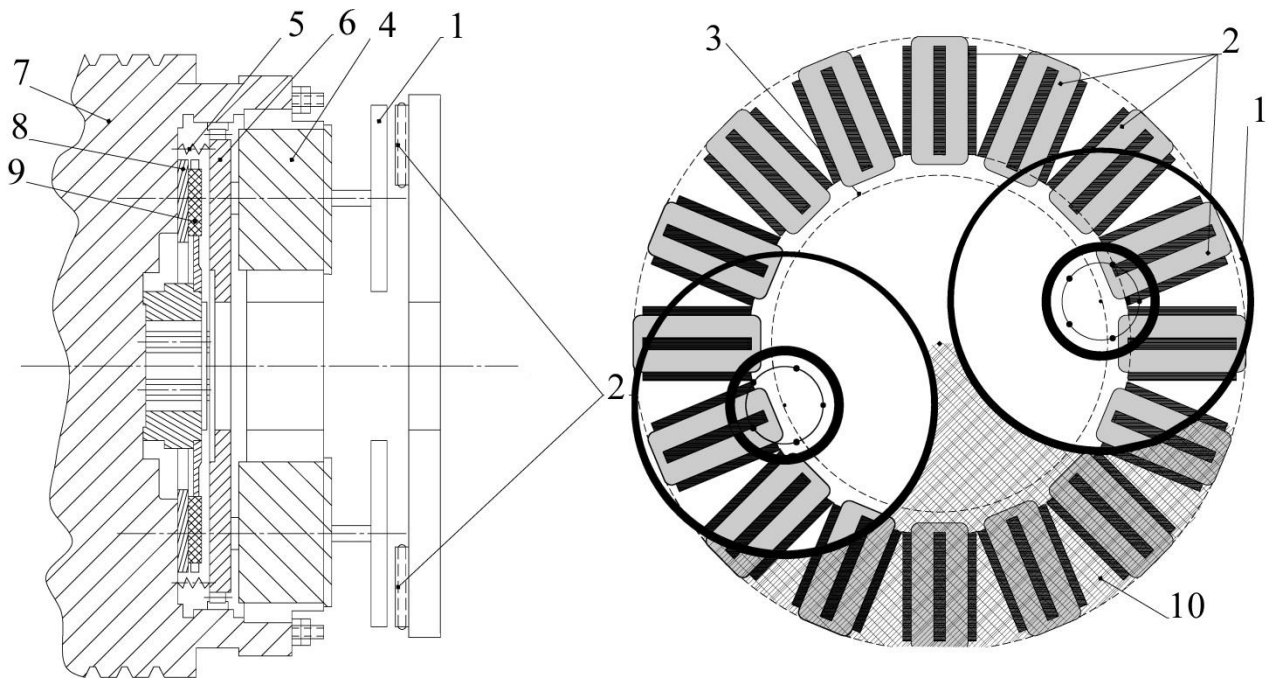


Рисунок 3.14 – Орбитальный электропривод муфты пресса: 1 – ротор;  
 2 – статор; 3 – орбита движения ротора; 4 – модуль; 5 – пружина;  
 6 – нажимной диск; 7 – корпус муфты; 8 – опорный диск, который связан с маховиком; 9 – ведомый диск с фрикционными вставками;  
 10 – не перекрытая зона статора

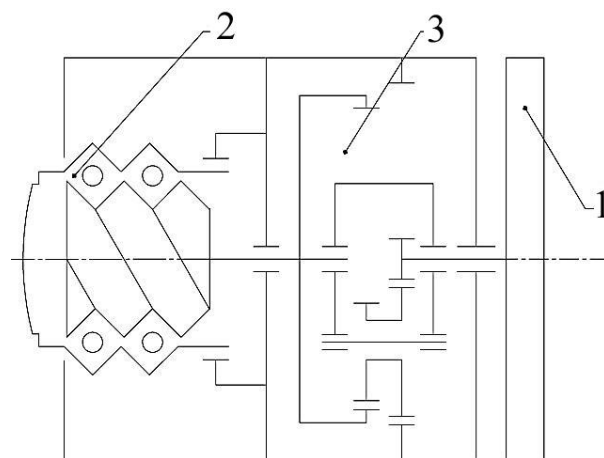


Рисунок 3.15 – Схема модуля: 1 – ротор; 2 – выдвижной шток;  
 3 – редуктор



стеме необходимо использование АЦП, что бы подать показания на контроллер, из-за всего этого снижается точность позиционирования.

Датчики различаются по принципу действия и конструктивным особенностям. Рассмотрим датчик индуктивного типа. Внутри расположен металлический стержень, имеющий на наружном конце магнит. Он предназначен для намагничивания стержня. Вокруг этого стержня намотана обмотка, из медного провода, концы которой выведены в виде разъёмов для подключения проводов. Принцип работы датчика положения коленчатого вала индуктивного типа: при нахождении стального предмета рядом со стержнем на выводах появляется сигнал [47]. Датчик индуктивного типа, реагирует на прохождение зубьев задающего диска на шкиве привода генератора вблизи своего сердечника. Зубья расположены на диске с интервалом  $6^\circ$ . Для синхронизации с ВМТ два зуба из 60 срезаны, образуя впадину. При прохождении впадины мимо датчика в нем генерируется так называемый "опорный" импульс синхронизации. К достоинствам такого типа датчиков можно отнести: простота и прочность конструкции, отсутствие скользящих контактов; возможность подключения к источникам промышленной частоты; относительно большая выходная мощность (до десятков Ватт); значительная чувствительность. К недостаткам можно отнести: точность работы зависит от стабильности питающего напряжения по частоте; возможна работа только на переменном токе.

Рассмотрим датчик коленчатого вала, который основан на эффекте Холла. Работает датчик Холла следующим образом. Когда через зазор проходит металлическая часть задающего диска, магнитный поток шунтируется и индукция на микросхеме равна нулю. При этом сигнал на выходе из датчика относительно «массы» имеет высокий уровень, то есть почти равен напряжению питания [47]. Основные достоинства такого типа датчиков: малые габариты; изменение оборотов двигателя не вызывает смещения момента измерения; электрический сигнал от датчика имеет прямоугольную форму: при включении он сразу набирает определенную и постоянную величину, а

не носит характер всплесков. Для управления электроникой это немалый плюс. Так же к преимуществам можно отнести неприхотливость, долговечность и безконтактность. Надёжность прибора обусловлена тем, что в нём отсутствуют физически взаимодействующие детали. К недостаткам датчика Холла относится то, что датчик чувствителен к электромагнитным помехам, возникающим в цепи питания. Кроме того, у датчиков с низкой стоимостью, чувствительность зависит от температуры.

К датчику положения предъявляются особые требования – он должен быть защищен от магнитного поля статора, при этом иметь высокую точность позиционирования. Для унификации конструкции решено позаимствовать систему позиционирования коленчатого вала двигателя автомобиля, а именно датчик положения коленчатого вала и задающий диск с зубьями. Для того чтобы говорить о необходимой точности датчиков, необходимо рассмотреть зоны включения и выключения сегментов статора орбитального электропривода муфты пресса. Рассмотрим схему зон перекрытия (рисунок 3.14), параметры которой были составлены на основе физической модели орбитального электропривода муфты. На рисунок 3.14 изображен статор состоящий из 18 катушек, два ротора, радиус которых, равен половине внешнего радиуса статора. Заштрихованный участок – это участок статора, который в данный момент времени не перекрыт ротором и соответственно не используется, как видно из рисунка при такой конфигурации, сектора в общей сложности только на  $200^{\circ}$  перекрыты ротором, остальная часть статора (почти 45%) остается неиспользованной.

Таким образом, точность датчика зависит от количества отключаемых сегментов. На примере конфигурации (рисунок 3.17), предположим, что один отключаемый сегмент состоит из одной катушки, тогда  $20^{\circ}$  – это сегмент который занимает катушка и  $20^{\circ}$  – это минимально необходимая точность датчика для данной системы. При использовании датчика положения коленчатого вала и стандартного задающего диска, такая точность более чем достаточная для использования в орбитальном электроприводе муфты пресса.

Не считая датчиков, в системе управления важной частью является алгоритм работы, в нашем случае алгоритм включения и выключения катушек, в зависимости от положения роторов. Для каждой такой системы расчет должен производиться отдельно, но чтобы произвести расчет у нас должны быть входные данные. Входные данные – это геометрические размеры, которые в реальной системе можно получить с помощью линейки.

Возьмем в качестве примера расчет системы управления для макета орбитального электропривода муфты пресса, но для увеличения площади перекрытия заменим прямоугольные катушки на трапецеидальные.

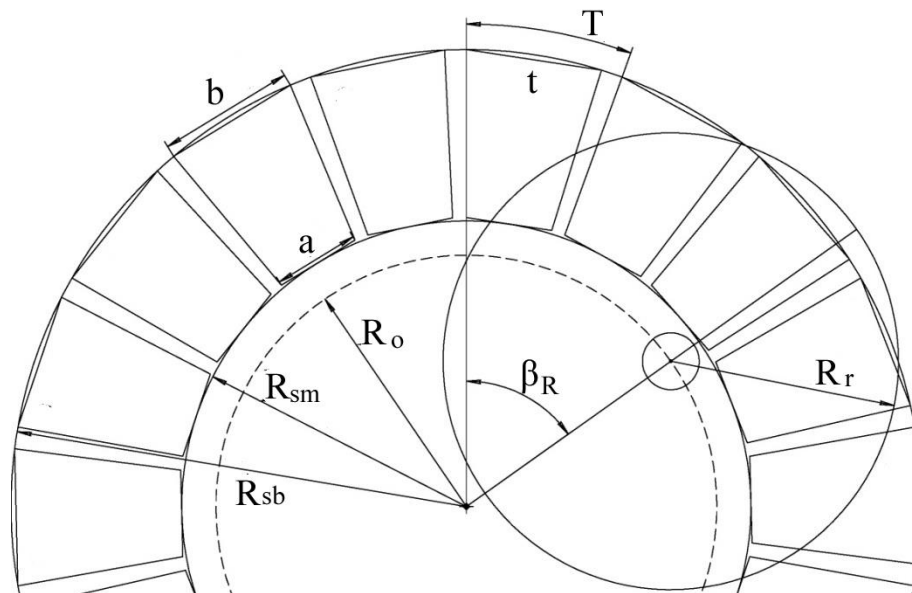


Рисунок 3.17 – Система с трапецеидальными катушками и входными данными для расчета

На рисунке 3.17 так же изображены примеры входных данных для расчета системы управления. Итак, нам понадобится:  $R_r$  – радиус ротора;  $R_o$  – радиус орбиты ротора;  $R_{sm}$  – радиус статора малый;  $R_{sb}$  – радиус статора большой;  $a, b$  – ширина катушки или нижнее и верхнее основание трапеции;  $N$  – количество катушек.

Первым шагом, необходимо построить функциональную карту статора, так как катушки занимают не всю площадь статора, необходимо знать расположение катушек на статоре. Рассчитаем угол между катушками:

$$T = \frac{360^\circ}{N}. \quad (3.47)$$

В нашем случае 18 секций статора и угол между секциями  $20^\circ$ , так же необходимо знать угол между началом и концом катушки, для этого воспользуемся теоремой косинусов:

$$t = \arccos\left(\frac{R_{sm}^2 + R_{sm}^2 - a^2}{2 \cdot R_{sm} \cdot R_{sm}}\right). \quad (3.48)$$

Здесь угол рассчитан по основанию «а» катушки и малому радиусу статора  $R_{sm}$ , также необходимо аналогичным способом рассчитать угол по основанию «b» катушки и большому радиусу статора  $R_{sb}$ , но в нашем случае размеры катушек подобраны так, что эти углы одинаковы. Таким образом, у нас есть все данные для построения функциональной карты статора (рисунке 3.18). Теперь по функциональной карте статора можно сопоставить угол и занимаемую площадь катушки на статоре в процентном соотношении. Функциональная карта статора, в нашем случае, получилась в виде прямоугольных импульсов, поэтому площадь в каком-либо угле 0%, либо 100%, если размеры оснований катушек другие, то импульсы будут в виде трапеции, тогда процентное соотношение площади будет меняться от 0% до 100% плавно.

Вторым шагом, идет построением функциональной карты ротора. Для этого нужно разделить ротор на две части, где перекрытие статора 100% и часть, где перекрытие от 0% до 100% (рисунок 3.19).

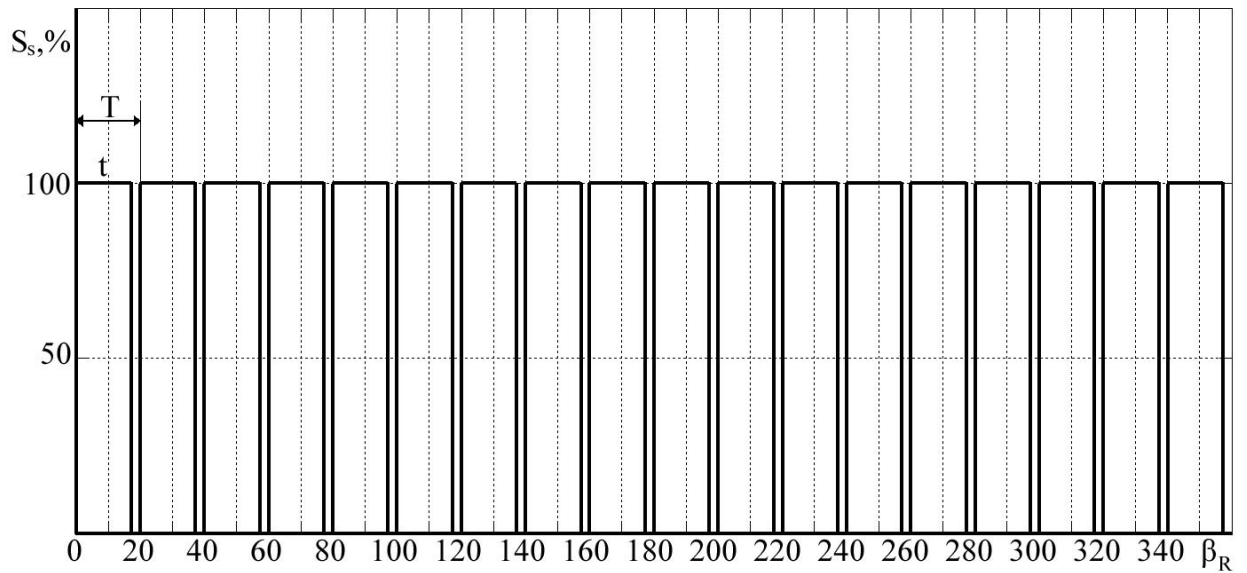


Рисунок 3.18 – Функциональная карта статора

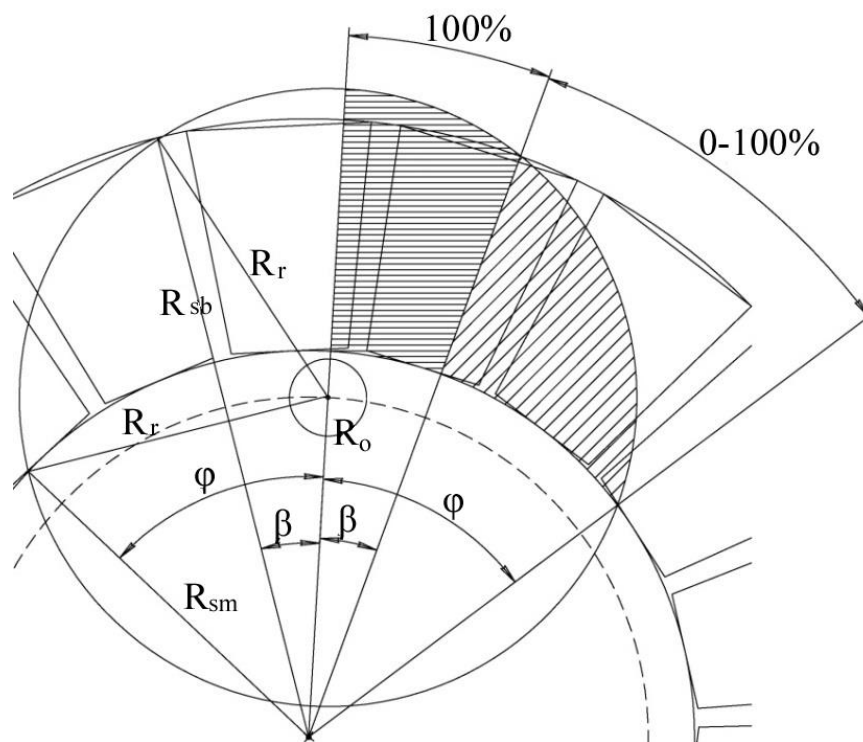


Рисунок 3.19 – Схема построения функциональной карты ротора

Как и при построении функциональной карты статора воспользуемся теоремой косинусов, чтобы найти интересующие нас углы:

$$\beta = \arccos\left(\frac{R_o^2 + R_{sb}^2 - R_r^2}{2 \cdot R_o \cdot R_{sb}}\right),$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_o^2 + R_{sm}^2 - R_r^2}{2 \cdot R_o \cdot R_{sm}}\right).$$

Таким образом, найдены крайние точки. Если все оставить как есть, то при построении функциональной карты ротора получается трапеция, в таком случае получается большая погрешность на участке, где площадь перекрытия 0-100%. Чтобы снизить погрешность, необходимо на этом участке взять промежуточные точки и найти углы этих точек, тогда формула примет вид:

$$\omega_i = \arccos\left(\frac{R_o^2 + R_i^2 - R_r^2}{2 \cdot R_o \cdot R_i}\right),$$

где  $R_{sm} < R_i < R_{sb}$ . Для удобства возьмем разность  $\Delta = R_{sb} - R_{sm}$  за 100 % и найдем углы для трех точек,  $\omega_1$  при  $R_i = R_{sm} + 0.25\Delta$ ,  $\omega_2$  при  $R_i = R_{sm} + 0.5\Delta$ ,  $\omega_3$  при  $R_i = R_{sm} + 0.75\Delta$  и построим функциональную карту ротора (рисунке 3.20). Чем больше точек взять, тем выше точность.

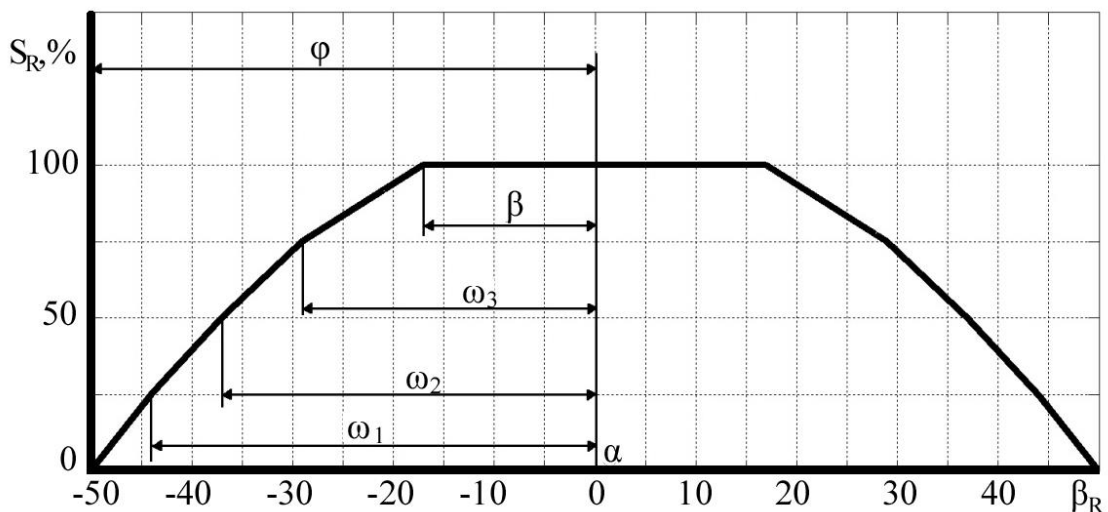


Рисунок 3.20 – Функциональная карта ротора

Таким образом, получили координаты, отталкивающиеся от угла текущего положения ротора  $\alpha$ . Теперь, чтобы узнать площадь перекрытия ротора и катушек при значении угла  $\alpha$ , например  $100^\circ$ , необходимо функциональную карту ротора сдвинуть на  $100^\circ$ , и полученный график наложить на график функциональной карты статора (рисунок 3.21). На рисунке 3.21 видно, что ротор при данном угле  $\alpha$  перекрывает 6 секций статора, из них полностью только одну.

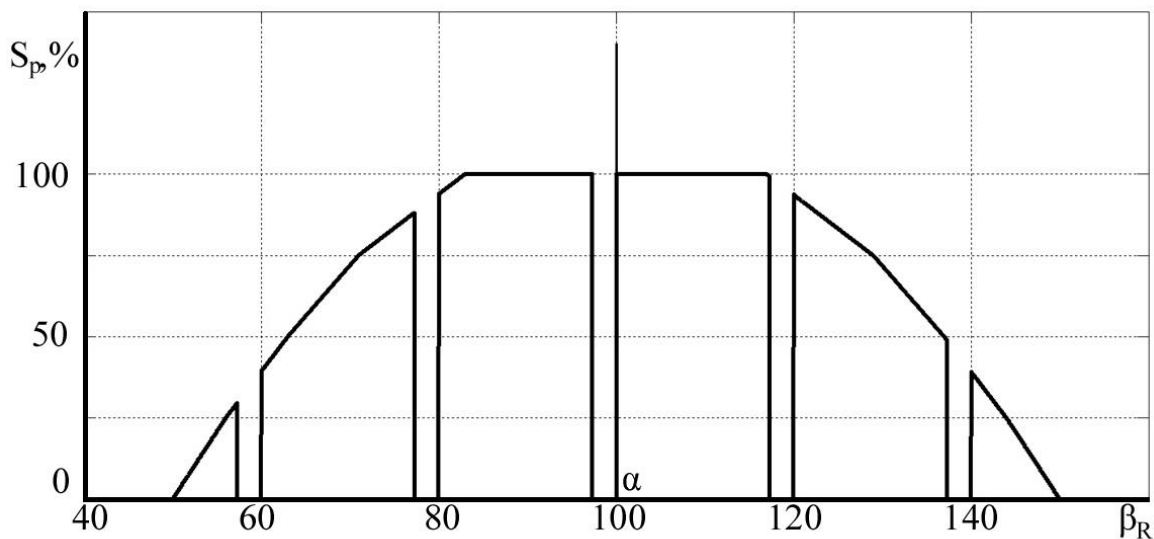


Рисунок 3.21 – Функциональная карта перекрытия ротора и катушек статора

Были смоделированы несколько алгоритмов включения и выключения секций статора, оптимальным вариантом отключения и включения секций это при 70% площади их перекрытия, если площадь меньше, то переход между включением и выключением будет иметь скачкообразный характер (рисунок. 3.22), где  $N$  – обозначена количественная площадь катушек, например, 1 – соответствует 100% суммарной площади одной секции, 2 – 100% суммарной площади двух секций и тд.

Исходя из этого, для системы с двумя роторами в каждый момент времени будет задействовано только три секций для одного ротора, и шесть для двух, тогда для данной системы из 18 секций будет задействовано только 6 из 18. Система с отключением каждой секций затратная, в плане ШИМ пре-

образователя (необходимо большое количество ключей), поэтому целесообразно отключать катушки группами по 3. Тогда для одного ротора будет задействовано 6 секций, а для всей системы будет задействовано 12 секций из 18, что позволяет до 30% снизить потребление, что подтверждает график 3 на рисунок 3.22.

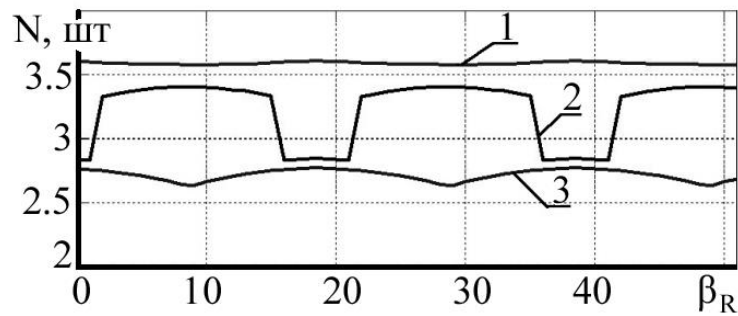


Рисунок 3.22 – Количество перекрытых секций при различных вариантах отключения: 1 – без отключения секций; 2 – отключение секций, у которых перекрытие меньше 50%; 3 – отключение секций, у которых перекрытие меньше 70%

Такая система, в каждый момент времени обеспечивает слежение за роторной системой, что позволяет не только отключать неиспользуемые зоны статора, но и опередить площадь перекрытия ротора и статора.

Зная площадь перекрытия ротора и статора, и зависимость площади от положения ротора на орбите, можно вычислить зависимость магнитного потока  $\Phi$  от положения ротора:

$$\Phi = BS,$$

где  $S$  – площадь перекрытия ротора и статора,  $B$  – магнитная индукция, создаваемая статором. Помимо отключения неиспользуемых секций, необходимо правильное управление подключенными секций. Для этого рассмотрим работу муфты, пока диски муфты не пришли в соприкосновение друг с другом, момент сопротивления мал, и его можно принять равным нулю. Как только диски соприкоснулись, момент сопротивления скачком возрастает и

его можно принять постоянным с некоторой погрешностью. Тогда сопротивление является кусочно-постоянным: при  $0 \leq A \leq A_1$  значение сопротивления  $\mu=0$ , ток  $i=i_1$ ; при  $A_1 \leq A \leq A_2$  значение сопротивления  $\mu=\mu_2$ , ток  $i=i_2$ . На первом участке скорость  $v$  будет возрастать, тогда скорость в конце первого участка будет  $v_m$ , тогда потери на первом участке [35]:

$$Q_1 = \frac{v_m^3}{2A_1},$$

на втором участке, где скорость двигателя будет убывать до нуля, потери находятся аналогичным способом:

$$Q_2 = \frac{2\mu_2^2(A_2 - A_1)}{v_m} - 2\mu_2 v_m + \frac{v_m^3}{2(A_2 - A_1)}.$$

Дифференцируя сумму потерь  $Q_1+Q_2$  по  $v_m$  и приравнявая производную нулю, находим значение  $v_m$ , при котором потери будут минимальны, зная значения  $v_m$ , находим токи:

$$i_1 = \frac{1}{3} \mu_2 \frac{A_2 - A_1}{A_2} \left( 1 + \sqrt{1 + 3 \frac{A_2}{A_1}} \right);$$

$$i_2 = \mu_2 \left[ 1 - \frac{1}{3} \frac{A_2}{A_2} \left( 1 + \sqrt{1 + 3 \frac{A_2}{A_1}} \right) \right].$$

Тогда, зная отношения пути разгона  $A_1$  к пути под нагрузкой  $A_2 - A_1$ , можно определить оптимальное значение токов на этих участках. Для нашего случая такое соотношение 1 к 5, тогда оптимальные токи:

$$i_1 = 1,49 \mu_2;$$

$$i_2 = 0,702 \mu_2.$$

Исходя из этого, было произведено моделирование и рассмотрено два случая с оптимальным управлением током и без, результаты приведены на рисунке 3.23.

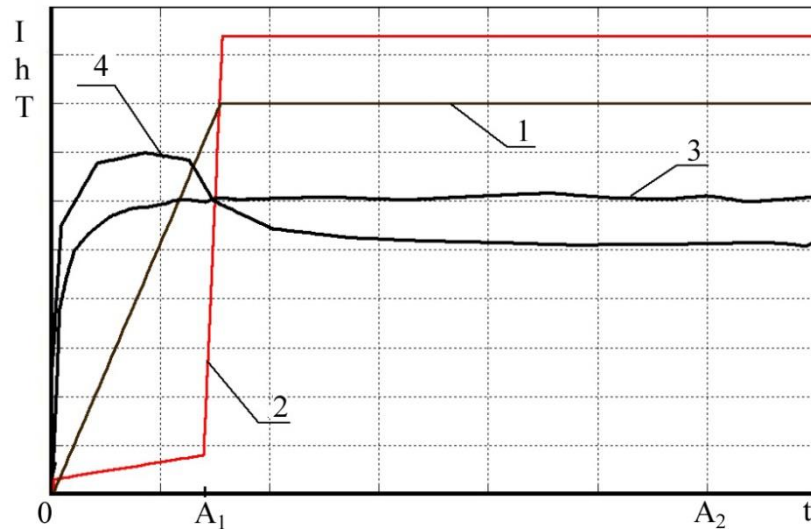


Рисунок 3.23 – Результаты моделирования: 1–ход муфты; 2–нагрузка; 3– график тока без оптимизации; 4–график тока с оптимизацией

Применение орбитального электропривода муфты пресса вместо пневматических приводов, дает свои преимущества: снижение шумовой нагрузки; отсутствие выбросов масляных паров в атмосферу; значительно больший КПД; обеспечивается работа всего прессового оборудования от сети без применения сжатого воздуха, что повышает потребительские качества прессового оборудования. Единственным недостатком является стоимость такого электропривода, но это со временем окупается меньшим энергопотреблением. Оптимальное управление током снижает потребление до 8% на активном участке с нагрузкой. Алгоритм с отключением неиспользуемых секций очень эффективен в системах с малым количеством роторов, но не целесообразен в системах с большим количеством роторов, так как статор почти полностью перекрыт роторами и отключать оставшуюся часть статора невыгодно в плане ШИМ преобразователя.

## Выводы

1. Использование математической модели орбитального электропривода, дает возможность применять векторное управление.

2. Использование функциональной карты ротора и функциональной карты статора, дает возможность с высокой точностью использовать алгоритм для отключения неиспользуемых сегментов статора, что повышает энергоэффективность всей системы.

3. Каждый закон оптимального управления, повышает эффективность орбитального электропривода, но эта задача может быть решена методом векторной оптимизации.

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУФТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ КРИВОШИПНОГО ПРЕССА

### 4.1 Сравнение прямого пуска и скалярного управления

Орбитальный электропривод муфты создан на основе торцевого асинхронного двигателя. К такому типу устройств предъявляются специфические требования, такие как минимальное время срабатывания, и максимальный момент. Так как торцевой двигатель является разновидностью асинхронного двигателя, то и способы управления у них одни и те же, что упрощает задачу. Так же выбор торцевого двигателя обусловлен рядом особенностей, например компактные размеры по сравнению с обычным асинхронным двигателем и открытый корпус, который способствует лучшему притоку воздуха и, как следствие к лучшему охлаждению. Существуют различные способы управления асинхронным двигателем, такие как прямой, реостатный, частотный, импульсный и другие. Самый простой в реализации это прямой пуск, но также под наши требования подходит частотный способ управления с использованием частотного преобразователя.

Прямой пуск является самым распространённым способом управления, но не самым эффективным. Прямой пуск электродвигателей и неконтролируемая производительность сопровождается рядом проблем, таких как провалы напряжения, высокое энергопотребление, снижение КПД, электродинамические и термические воздействия, которые сокращают срок службы двигателя.

Частотный способ управления имеет ряд преимуществ, таких как формирование различных пусковых характеристик двигателя (плавный пуск, реверс, торможение, остановка), гибкое управление режимами работы двигателя в соответствии с технологическим процессом, защита электрического и механического оборудования от аварийных режимов, оптимизация пусковых и тормозных моментов для безударных разгонов и остановок и многое другое.

Для получения характеристик орбитального электропривода при различных способах управления, были построены модели [48-50] в среде MATLAB (рисунок 4.1-4.2). Целью моделирования является построение характеристик для одного модуля орбитального электропривода муфты прессы, с различными способами управления.

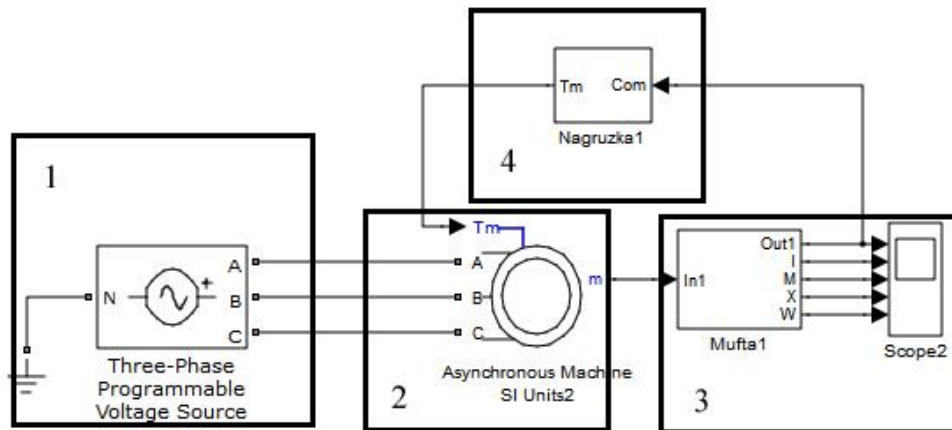


Рисунок 4.1 – Система с прямым пуском: 1 – источник питания 380В/50Гц;  
2 – модель двигателя с заданными параметрами;  
3 – модуль муфты; 4 – нагрузка

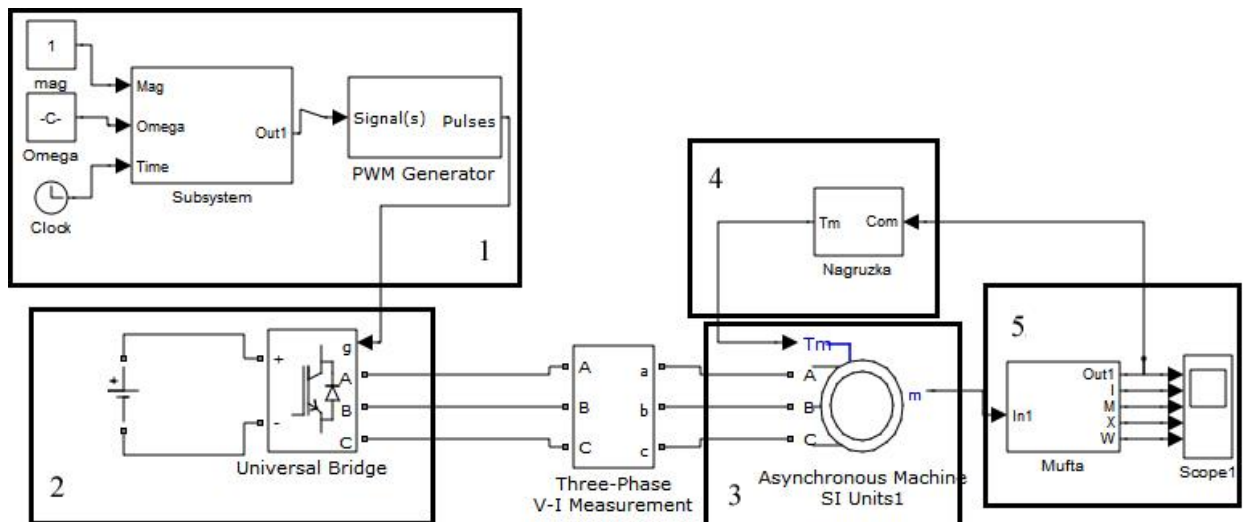


Рисунок 4.2 – Система с частотным управлением: 1 – блок скалярного управления; 2 – инвертор с источником постоянного напряжения; 3 – модель двигателя с заданными параметрами; 4 – нагрузка; 5 – модуль муфты

Механическая часть муфты в модели выполнена в виде редуктора преобразующего вращение в поступательное движение. Основная нагрузка на муфту – это перемещение нажимного диска и сжатия пружин, с помощью которых нажимной диск муфты возвращается в исходное положение. В стандартную модель были введены параметры характерные торцевому [14] орбитальному электроприводу: коэффициент перекрытия, сопротивления и индуктивности, взаимная индуктивность и тд. По результатам моделирования были получены сравнительные графики двух систем управления (рисунок 4.3-4.4). Моделирование проводилось при ходе привода в рабочее положение, без возвращения в исходное.

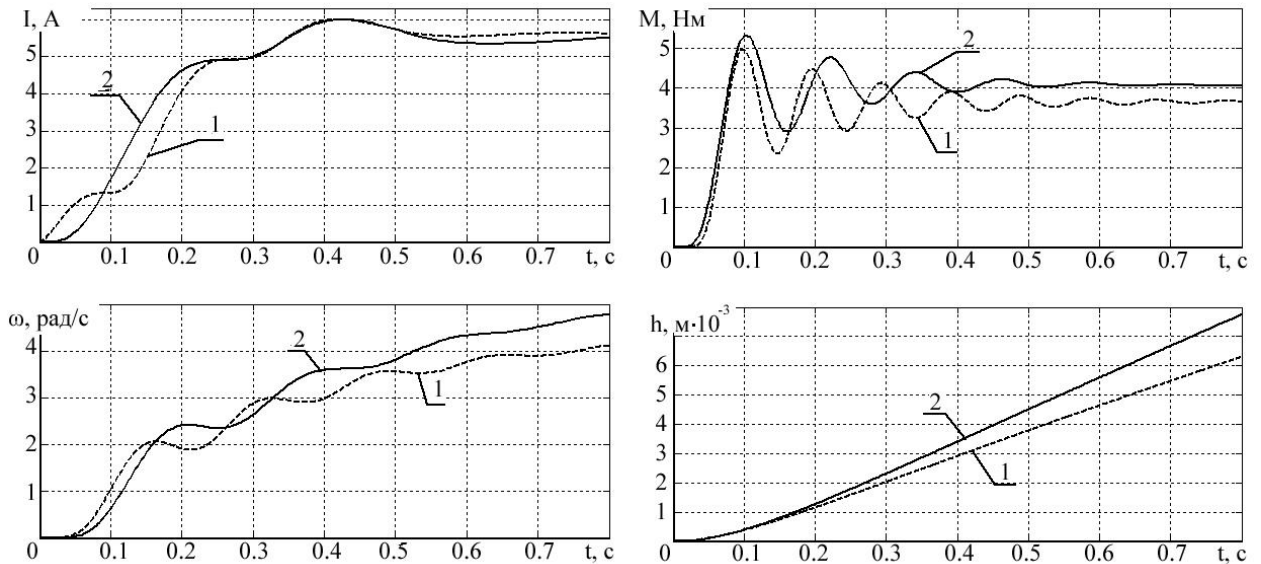


Рисунок 4.3 – Результаты моделирования: 1 – для системы с прямым пуском; 2 – для системы с частотным управлением

По графикам видно, что момент на валу двигателя для системы с частотным управлением чуть больше чем у системы с прямым пуском. Ток при разгоне у системы с прямым пуском меньше, так же более интенсивный набор скорости у системы с частотным пуском, за счет этого за одно и то же время с использованием системы с частотным управлением ход выдвигного штока больше.

Для проведения реального эксперимента был построен макет кривошипного пресса в масштабе 1:225 с использованием орбитального электроприводы муфты пресса, с одним модулем.

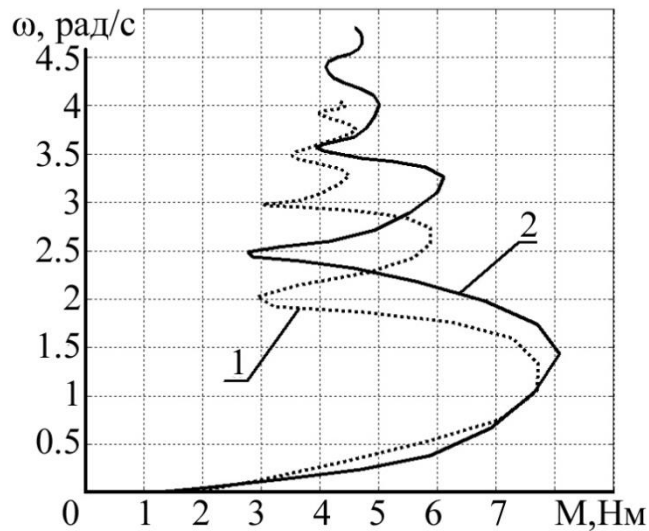


Рисунок 4.4 – Результаты моделирования, зависимость момента от скорости: 1 – для системы с прямым пуском; 2 – для системы с частотным управлением

Макет приставляет из себя статорную систему состоящую из нескольких катушек, а так же ротор, который вращается по орбите, схема макета показана на рисунок 4.5. Эксперимент состоял из пуска двигателя, без нагрузки с системой прямого пуска и частотного управления. Данные экспериментов были получены с помощью цифрового осциллографа Актаком АСК-2034, который измерял напряжения на ДПМ-25, который был в качестве датчика скорости, и напряжение на шунте 75ШИП1-10-0.5, который установлен на одной из фаз питания статора. Для системы прямого пуска использовалась трехфазная сеть 380В / 50 Гц, для системы с частотным управлением использовался частотный преобразователь серии ATV 31. Результаты экспериментов показаны на рисунок 4.6.

Результаты эксперимента отличаются от результата моделирования, это объясняется тем, что при моделировании использовалась идеальная мо-

дель орбитального электропривода, где некоторые параметры не учитываются. В реальном эксперименте погрешность измерительных приборов, температура окружающей среды, не идеальная частота питающей сети, влияют на результаты. Тем не менее, между моделированием и экспериментом есть сходство – в обоих случаях преимущество за частотным управлением.

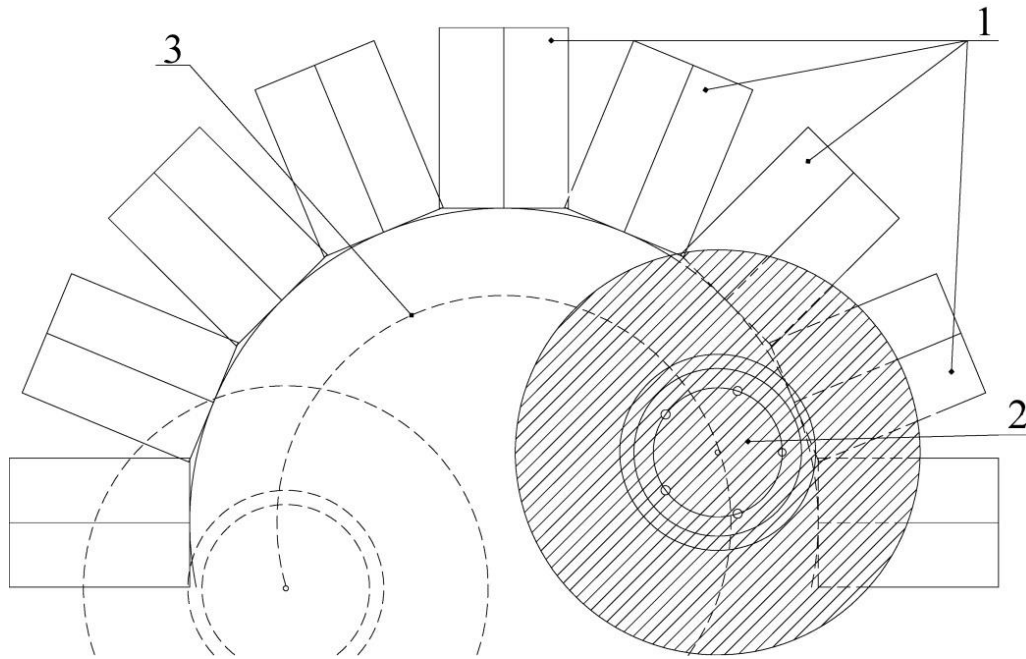


Рисунок 4.5 – Экспериментальная установка орбитального электропривода муфты прессы: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – орбита движения ротора

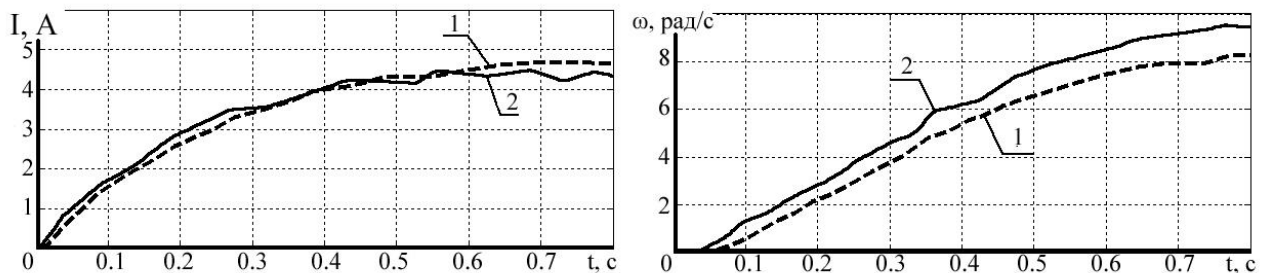


Рисунок 4.6 – Результаты реального эксперимента: 1 – для системы прямого пуска; 2 – для системы с частотным управлением

Таким образом, можно сделать вывод, что для управления орбитальным электроприводом муфты, требуется система частотного управления. Ос-

новным преимуществом для нашего случая является возможность обеспечения плавного пуска двигателя, что необходимо для оптимальной работы муфты кривошипного пресса.

#### 4.2 Сравнение скалярного управления и векторного

Скалярный способ управления распространен там, где важно поддерживать определенный технологический параметр, например давление в трубопроводе). Преимущество этого способа управления это легкость реализации. К недостаткам можно отнести диапазон регулирования скорости при таком способе управления 1:10, а так же нет возможности контролировать момент, что для нашей системы очень важно.

Векторный способ управления используется там, где нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а так же в случаях, когда необходимо получить большой диапазон регулирования частоты при номинальных моментах. Преимуществами векторного управления является быстрота реакции на изменения нагрузки, а при низкой скорости вращения двигателя плавность и отсутствие рывков. Так же есть возможность поддержания номинального момента на валу двигателя при нулевой скорости вращения [45]. В большинстве случаев векторное управление использует закон регулирования, при котором поток ротора остается постоянным. Обычно выбор потока ротора обусловлен минимуму тока при номинальном моменте [51]. Но при этом с нагрузками отличающийся от номинальной, минимум тока не обеспечивается. В случаях если нагрузка существенно переменна и меняется не очень быстро (не скачкообразно), как в нашем случае, уместно использовать оптимизацию потока ротора [52]. Для получения характеристик орбитального электропривода при различных способах управления, были построены модели [53] в среде MATLAB которая показаны на рисунках 4.7-4.8 и рисунке 4.2.

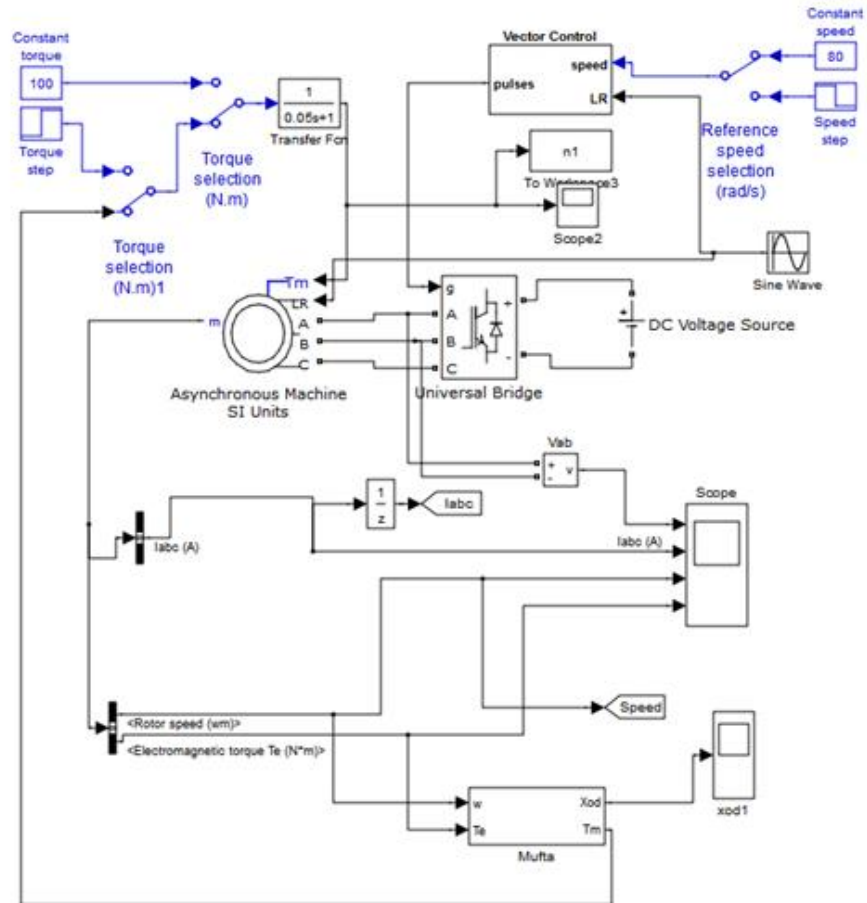


Рисунок 4.7 – Модель электропривода муфты с векторным управлением

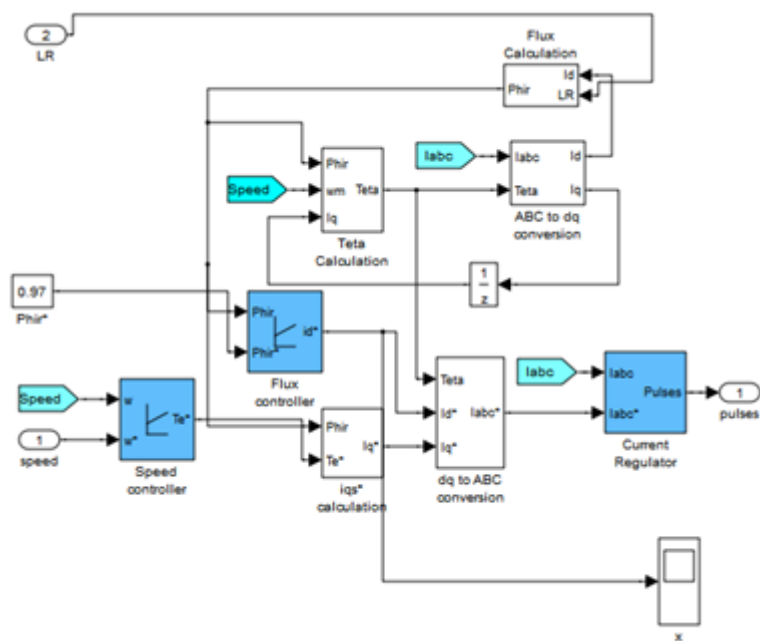


Рисунок 4.8 – Блок векторного управления

По результатам моделирования были получены сравнительные графики двух систем векторного управления (рисунки 4.9-4.10). Моделирование проводилось при ходе привода в рабочее положение, без возвращение в исходное.

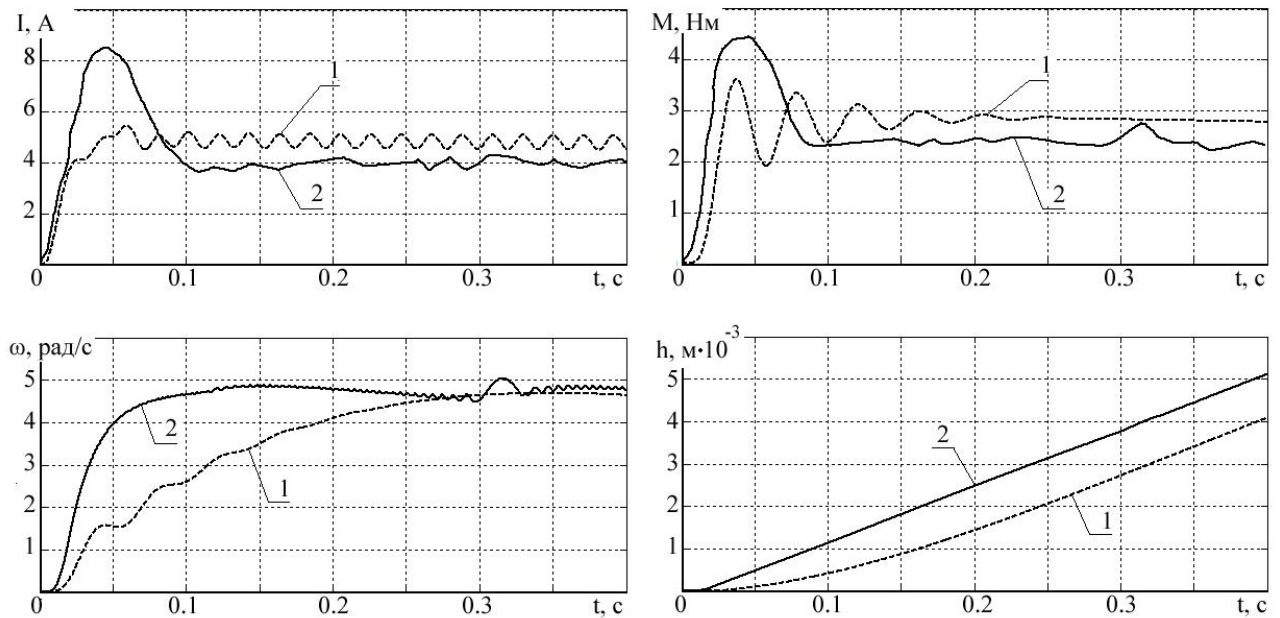


Рисунок 4.9 – Результаты моделирования: 1 – для системы скалярным управлением; 2 – для системы с векторным управлением

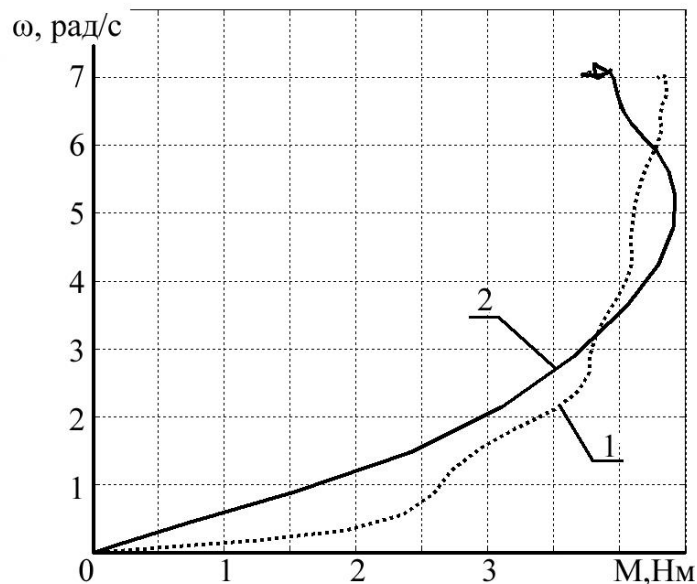


Рисунок 4.10 – Результаты моделирования, зависимость момента от скорости: 1 – для системы скалярным управлением; 2 – для системы с векторным управлением

Система векторного управления обеспечивает более интенсивный разгон, при этом скачек тока при разгоне больше, чем у системы со скалярным управлением. Исходя из этого, муфта срабатывает быстрее и за одно и то же время нажимной диск муфты проходит большее расстояние.

Для проверки компьютерного моделирования был построен макет орбитального электропривода муфты кривошипного пресса в масштабе. Макет представляет из себя статорную систему, которая состоит из нескольких катушек, а так же ротор, который вращается по орбите. В качестве однозубцовых обмоток статора использовались катушки с магнитопроводом Ш-образной формы, с габаритами 60x42x28мм. Радиус ротора 75мм, радиус орбиты ротора 85 мм. Ротор состоит из алюминиевой части и стальной, которые скреплены между собой стальными болтами М5.

Эксперимент состоял из пуска двигателя с системой частотного управления для этого использовался частотный преобразователь серии ATV 31. Данные экспериментов были получены с помощью цифрового осциллографа Актаком АСК-2034, который измерял напряжения на ДПМ-25, который был в качестве датчика скорости, и напряжение на шунте 75ШИП1-10-0.5, который установлен на одной из фаз питания статора. Результаты экспериментов показаны на рисунок 4.11.

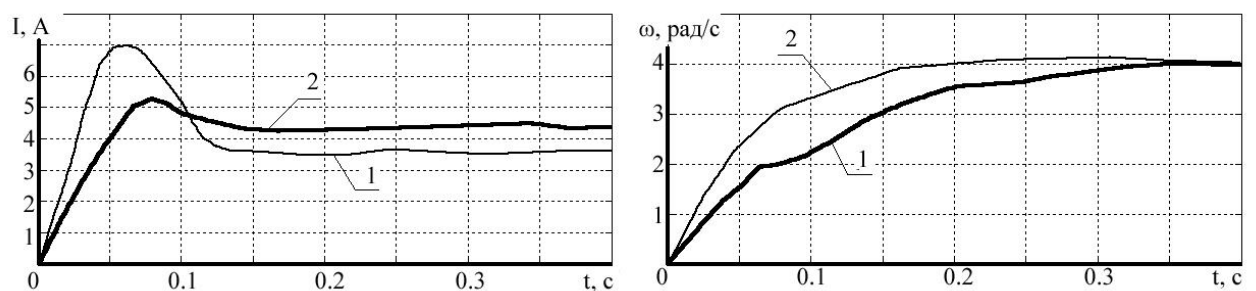


Рисунок 4.11 – Результаты эксперимента: 1 – для системы скалярным управлением; 2 – для системы с векторным управлением

Из всего этого можно сделать вывод, что для управления орбитальным электроприводом муфты можно использовать систему со скалярным, так и векторным управлением. Основным преимуществом векторного управления,

является быстроедействие по сравнению со скалярным методом, а так же возможность обеспечения номинального момента на валу двигателя при нулевой скорости [45].

#### 4.3 Прямое управление моментом применительно к орбитальному электроприводу

Недостаток классического векторного управления – это сложная структура, вследствие чего необходимо применять преобразование систем координат из неподвижной во вращающуюся по полю ротора, и обратно. Это все требует сложных вычислений и соответственно повышаются требования к исполняемому микроконтроллеру, что ведет за собой повышенную стоимость оборудования и уменьшает быстроедействие.

На базе векторного управления был создан метод прямого управления моментом (ПУМ), который обладает рядом преимуществ – простота реализации и высокая динамика. Существует несколько способов практической реализации ПУМ: управление с переключающей таблицей; прямое собственное управление; управление с прямой векторной модуляцией.

Структура системы управления ПУМ, применительно к орбитальному электроприводу показана на рисунке 4.13. Структура системы прямого управления моментом содержит релейные регуляторы момента и потока, которые в общем случае гистерезисные и обычно двух или трех позиционные. Регуляторы работают сами по себе, без определенной привязки к осям. Структура ПУМ позволяет определять необходимое состояние инвертора для изменения контролируемых величин в нужную сторону. Аналогично векторному управлению в системе присутствует наблюдатель, который представляет собой математическую модель орбитального электропривода, тем самым образуя обратную связь в системе.

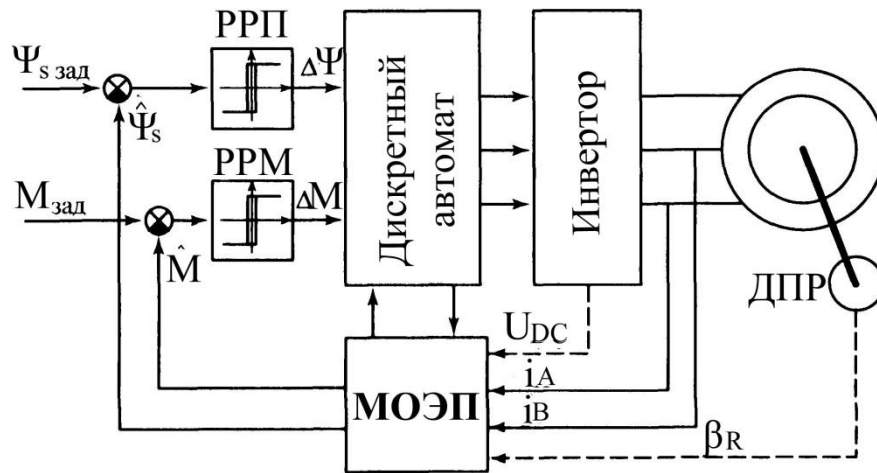


Рисунок 4.13 – Структура системы прямого управления моментом:  
 РРП – релейный регулятор потока; РРМ – релейный регулятор момента;  
 МОЭП – модель орбитального электропривода;  
 ДПР – датчик положения роторов

По информации наблюдателя, дается команда на блок коммутации ключей инвертора, которые приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 ключей инвертора в системе ПУМ

Условия		Сектор					
		1	2	3	4	5	6
$\Delta\Psi_s > 0$	$\Delta M > 0$	110	010	011	001	101	100
	$\Delta M < 0$	101	100	110	010	011	001
$\Delta\Psi_s < 0$	$\Delta M > 0$	010	011	001	101	100	110
	$\Delta M < 0$	001	101	100	110	010	011

Значение «110» в таблице соответствует включенным верхним транзисторам фазы А и В и нижний для фазы С. Из таблицы видно что инвертер не использует нулевых состояний, это приводит к тому, что производная изменения момента всегда максимальна, а следовательно максимальна и пульсация момента, что не является оптимальным по механике и энергетике.

Построим модель в среде MATLAB Simulink (рисунок 4.14) и проверим два типа управления векторное управление и система управления ПУМ.

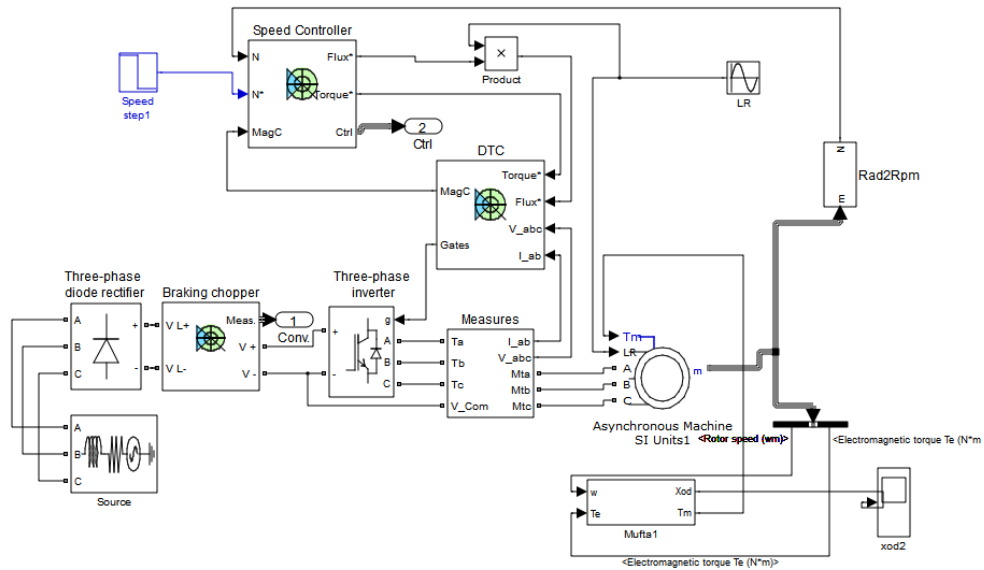


Рисунок 4.14 – Система управления ПУМ применительно к орбитальному электроприводу муфты включения

Полученные результаты сопоставили с результатами моделирования векторного управления, полученные результаты отображены на рисунке 4.15.

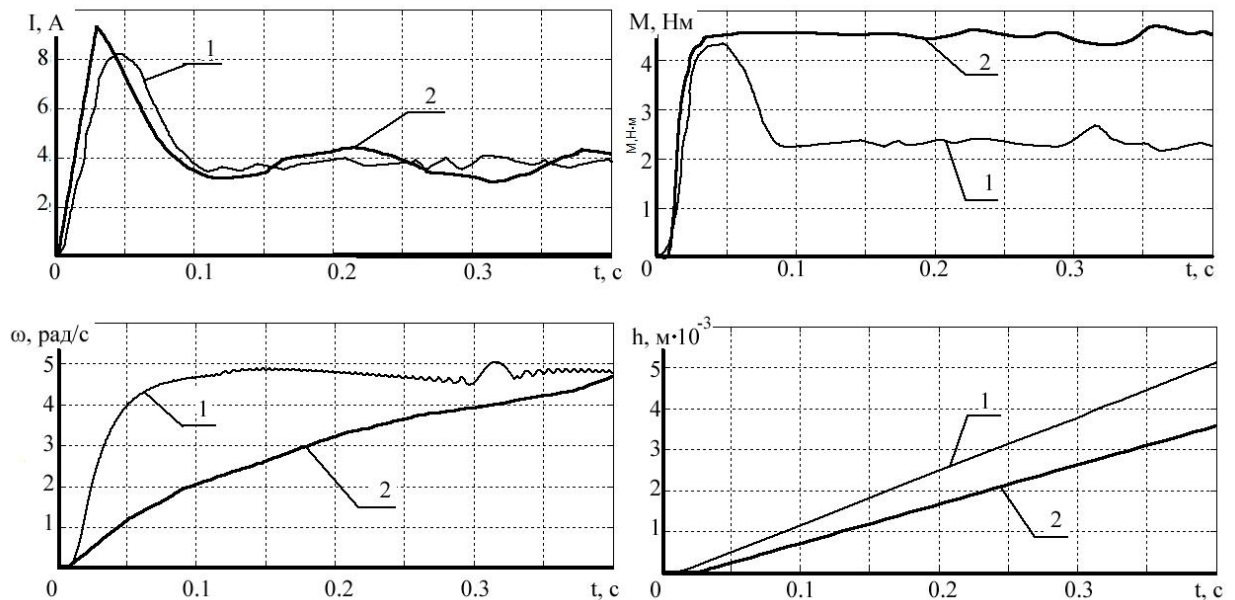


Рисунок 4.15 – Результаты моделирования: 1 – для системы с векторным управлением; 2 – для системы с ПУМ

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы, система с ПУМ, имеет максимальный момент, однако график скорости нарастает медленно. Исходя из полученных результатов, все основные характеристики по различным системам управления сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнительная таблица различных систем управления

	Прямое подключение	Скалярное управление	Векторное управление	ПУМ
Быстродействие, с	0,5	0,4	0,32	0,45
Максимальный момент, Н•м	4	3,5	4,4	4,6
Пусковой ток, А	6	5	8	9
Рабочий ток, А	6	5	4	4

При данной конфигурации орбитального электропривода система управления ПУМ проигрывает векторному управлению, что бы исправить эту ситуацию, необходимо использовать редуктор с другим передаточным числом, тогда медленный набор скорости компенсируется высоким моментом на валу двигателя.

#### 4.4 Применение полученных результатов

Полученные результаты экспериментов и моделирования, применимы к созданному нами макету орбитального электропривода муфты прессы. Для возможности применения уже в готовом устройстве, на настоящем прессе с усилием до 2500 тс, воспользуемся теорией подобия, так как изготовить опытный образец в данный момент не представляет возможности.

Электромагнитные процессы описываются системой уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \bar{H} &= K_1 \left( j + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right); \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= K_2 \left( -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \right),\end{aligned}$$

где  $\bar{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\bar{D}$  – электрическая индукция,  $\bar{E}$  – напряженность электрического поля,  $\bar{B}$  – магнитная индукция,  $K_1, K_2$  – критерии подобия.

При исследовании всех процессов протекающих при высоких частотах, можно не учитывать плотности тока смещения:

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = 0.$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

Основные критерии подобия

$$\pi_1 = \frac{\omega \varphi(i_B)}{U}; \quad \pi_2 = \frac{J_0 \omega_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}} t}; \quad \pi_3 = \frac{L}{Rt};$$

Если опытный образец изготовить подобно модели, и связать все линейные размеры модели  $l^M$  со сходными размерами опытного образца  $l^{\text{об}}$  соотношением

$$l^M = m_1 l^{\text{об}},$$

где  $m_1$  – масштаб линейных размеров, тогда связь между масштабами других величин, можно установить с помощью сопоставления уравнений Максвелла,

записанных в одной системе координат для модели и опытного образца. Для этого при помощи масштабов нужно связать величины, характеризующие элементарный объем модели, с величинами опытного образца и принять, что процессы подобны. Если пренебречь токами смещения, и изготовить опытный образец орбитального электропривода муфты, и модель орбитального электропривода из одинаковых материалов обладающих сходственными элементарными объемами, и сходственными физическими свойствами, то можно найти соотношение между масштабами величин, характеризующих электромагнитные процессы, и масштабом линейных размеров:

$$m_t = m_l^2; m_H = 1; m_i = \frac{1}{m_l}; m_\mu = 1; m_E = m_j; m_\gamma = 1.$$

Так же для периодически меняющихся полей, масштаб частоты без учета токов смещения:

$$m_f = \frac{1}{m_l^2} = \frac{1}{m_t}.$$

Соотношение между масштабами обеспечивают подобие магнитных полей и токов во всех контурах для геометрически подобных орбитальных электроприводов муфт пресса, так же необходимо что бы все было изготовлено из одинаковых материалов. Таким образом, для получения плотностей токов необходимо при переходе от оригинала к модели изменять частоту обратно пропорционально квадрату изменения размеров. Так же применение одинаковых материалов в модели и в опытном образце, напряженность магнитного поля в сходственных точках будет одинаковая, при этом толщина материалов должна быть пропорциональна линейным размерам. Это применимо, как к размерам обмотки, так и к размерам ротора и другим конструктивным деталям.

При выполнении условий описанных выше можно использовать следующие формулы для пересчета и формулы масштаба, где с индексом «м» – величины для модели, с индексом «об» – величины для опытного образца. Линейный размер в пределах полюсного деления:

$$l^M = m_l l^{об};$$

частота:

$$f^M = m_f f^{об};$$

время:

$$t^M = m_t t^{об}; \quad m_t = \frac{1}{m_f} = m_l^2;$$

плотность тока:

$$j^M = m_j j^{об}; \quad m_j = \frac{1}{m_l};$$

напряженность электрического поля:

$$E^M = m_E E^{об}; \quad m_E = m_j;$$

напряженность магнитного поля:

$$H^M = m_H H^{об}; \quad m_H = 1;$$

электрическая проводимость:

$$\gamma^M = m_\gamma \gamma^{\text{об}}; \quad m_\gamma = 1;$$

магнитная проницаемость:

$$\mu^M = m_\mu \mu^{\text{об}}; \quad m_\mu = 1;$$

скорость вращения

$$n^M = m_n n^{\text{об}}; \quad m_n = \frac{p^{\text{об}}}{p^M} m_f,$$

где  $p^{\text{об}}$ ,  $p^M$  – число пар полюсов для опытного образца и модели;  
расчетный диаметр:

$$D^M = m_D D^{\text{об}}; \quad m_D = \frac{p^M}{p^{\text{об}}} m_l;$$

магнитное напряжение:

$$F^M = m_F F^{\text{об}}; \quad m_F = m_l;$$

ТОК:

$$I^M = m_I I^{\text{об}}; \quad m_I = \frac{a^M w^{\text{об}}}{a^{\text{об}} w^M} m_l,$$

где  $a^{\text{об}}$ ,  $a^M$  – число параллельных ветвей в обмотках для опытного образца и модели;  $w^{\text{об}}$ ,  $w^M$  – число последовательных витков в обмотках для опытного образца и модели; магнитный поток:

$$\Phi^M = m_\Phi \Phi^{\text{об}}; \quad m_\Phi = m_l^2;$$

напряжение:

$$U^M = m_U U^{об}; \quad m_U = \frac{w^M}{w^{об}} \cdot \frac{a^{об}}{a^M} \cdot \frac{p^M}{p^{об}};$$

вращающий момент:

$$M^M = m_M M^{об}; \quad m_M = \left( \frac{p^M}{p^{об}} \right)^2 m_1;$$

сопротивление электрических цепей:

$$Z^M = m_Z Z^{об}; \quad m_Z = \left( \frac{a^{об} w^M}{a^M w^{об}} \right) \frac{p^M}{p^{об} m_1};$$

мощности и потери:

$$P^M = m_P P^{об}; \quad m_P = \frac{p^M}{p^{об} m_1}.$$

Из этого всего можно сделать вывод, что результаты экспериментов, полученные для масштабной модели орбитального электропривода муфты пресса, будут подобны для опытного образца орбитального электропривода муфты пресса, с учетом формул пересчета основанных на теории подобия.

#### 4.5 Техничко-экономические показатели орбитального электропривода муфты включения пресса

Муфта являются важной частью пресса, так как она передает крутящий момент от двигателя к исполнительному механизму. К такому типу

устройств самые главные требования это надежность и безопасность. Основной исполнительный механизм муфты это привод. Сравним следующие варианты привода муфты пресса:

- пневматический привод;
- электромеханический привод;
- орбитальный электропривод;

В первом варианте используется сжатый воздух, который подается на исполнительный – механизм поршень. Кроме этого необходим компрессор, в основе которого обычно лежит электрический двигатель, для питания которого необходимо электричество. Так же необходима система очистки и осушения воздуха для того что бы исключить появление конденсата в пневмомагистрали, который ведет к коррозии. Часто используются дополнительные механизмы для подачи масла в систему. Для управления такими системами используют специальные исполнительные механизмы которые так же питаются от электричества. Такие системы проектировались еще в 60х годах XX века, когда пневмомагистрали были на любом крупном предприятии. Развитие электроприводов переменного тока и их способов управления, способствовало к вытеснению пневматических систем из различных областей, например в авиастроении, космических областях.

Во втором варианте в качестве привода используется асинхронный двигатель, который с помощью системы кулачков сжимает диски муфты. Для такого способа необходим один вид энергии – электрический. Кроме того по сравнению с пневматическими системами, электрическая система имеет большее быстродействие и меньшую необходимость в обслуживании. Из-за высокой производительности и точности управления, повышается качество конечного изделия и уменьшаются затраты на производство. Кроме того, меньшее количество компонентов увеличивает надежность системы.

Орбитальный электропривод муфты пресса, это следующее развитие электрических систем, так же имеет преимущество над пневматическими системами, как и электромеханический привод. Но и перед электромеханиче-

ским приводом есть свои преимущества, такие как распределенная система, что обеспечивает еще большее быстродействие, и равномерность в распределении нажимных усилий. Кроме того, без корпусная система обеспечивает лучшую вентиляцию, что способствует к возможному увеличению темпа работы. Модульность такой системы повышает адаптивность такой системы для конкретных задач и повышает ремонтпригодность, так как в случае поломки нет необходимости менять всю систему целиком, а только лишь неисправный элемент. Таким образом, можно составить сравнительную таблицу 4.5 с основными характеристиками.

Таблица 4.3 – Сравнительные характеристики приводов муфт пресса

Характеристики	Пневматический	Электро-механический	Орбитальный
1	2	3	4
Коэффициент полезного действия	5-15%	30-60% (низкий КПД механизмов)	50-90%
Тип энергоносителя	Сжатый воздух Электричество	Электричество	Электричество
Скорость срабатывания	0,3 с	0,25 с	0,2 с
Наибольшее число включений в минуту	63	63	63
Тех. обслуживание	Сложное	Среднее	Простое
Воздействие на окружающую среду	Высокий уровень шума, выброс масляных паров	Минимальное	Минимальное

1	2	3	4
Срок службы	Большой (при правильном техническом обслуживании)	Большой, нет утечек масла	Очень большой, нет утечек масла
Габариты	Большие	Средние	Минимальные
Позиционирование	Очень сложное, не точное	Простое и очень точное	Простое и очень точное

Рассмотрим применение орбитального электропривода муфты прессы и пневматической системы для прессы с усилием 2500 тс. С учетом усилия, которое развивает пневматический привод, рассчитали мощность для одного модуля:

$$P = M_1 \omega_1 = 289 \cdot 9.6 = 2775 \text{ Вт.}$$

В орбитальном электроприводе муфты используется 6 модулей, в итоге полученная мощность системы:

$$P = 6 \cdot 2775 \text{ Вт} = 16650 \text{ Вт} \approx 16.6 \text{ кВт.}$$

Сравним полученную систему с аналогичной пневматической системой. Для обеспечения работы такой системы необходим компрессор С416М1у которого производительность 1000 л/мин и максимальное давление 10 бар, и электродвигатель 11 кВт/380 В и масса 420 кг. Такой компрессор работает постоянно, так как во время перерыва в работе муфты необходимо время для нагнетания давления. Орбитальный электропривод муфты работает только тогда когда необходимо подключить муфту. Если взять производи-

тельность пресса 60 ходов в минуту, то 1 ход – 1 секунда, из этого работа муфты составляет 0.2–0.5 секунды остальное время занимает разгон маховика главным двигателем. Теперь рассчитаем расход энергии муфтой, для пневматической и орбитальной системы. Если кривошипный пресс работает 16 часов, то все это время работает и компрессор который обеспечивает работу муфты, тогда затраченная энергия на работу муфты:

$$11 \text{ кВт} \cdot 16 \text{ ч} = 176 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Орбитальный электропривод муфты работает только 50% времени от работы кривошипного пресса, тогда затраченная энергия на работу муфты

$$(16.5 \text{ кВт} \cdot 16 \text{ ч}) \cdot 50\% = 132 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Разница составляет  $176 \text{ кВт}\cdot\text{ч} - 132 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 44 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , и это только за один день, за месяц 968 кВт·ч, за год почти 12000 кВт·ч.

Но такой расчет можно считать неверным, так как реальная производительность всей пневматической системы намного меньше, очень много преобразований воздуха, лишние затраты воздуха из-за несовершенства механизмов, что в конечном итоге сказывается на его стоимости.

При параметрах пневмоцилиндра муфты пресса с усилием 2500 тс внешний диаметр  $D = 1420 \text{ мм}$ , внутренний диаметр  $d = 1080 \text{ мм}$ , ход 4-5 мм, возьмем минимум  $h = 4 \text{ мм}$ , тогда объем сжатого воздуха пневмоцилиндра:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot h = 0.785 \cdot (142^2 - 108^2) \cdot 0.4 = \\ &= 0.785(20164 - 11664) \cdot 0.4 = 2669 \text{ см}^3 = 2.669 \text{ л} \end{aligned}$$

Производительность пресса возьмем так же 60 ходов в минуту, тогда расход сжатого воздуха муфтой в минуту составит

$$2.669 \text{ л} \times 60 \text{ вкл} = 160.14 \text{ л/мин}$$

или

$$160.14 \text{ л/мин} \times 60 \text{ мин} = 9608 \text{ л/ч} = 9.608 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Годовой фонд времени пресса составляет 3725 часов, тогда расход сжатого воздуха на одном прессе составит  $9.608 \text{ м}^3 / \text{ч} \times 3725 \text{ ч} = 35790 \text{ м}^3$  в год.

Рассмотрим работу орбитального электропривода муфты пресса. При такой же конфигурации 60 ходов в минуту, и 3725 часов в год, орбитальный электропривод при максимальной нагрузке будет потреблять 16.6 кВт, но муфта будет работать только 50% времени работы от работы пресса, тогда потребление электроэнергии в год составит

$$3725 \text{ ч} \times 50\% \times 16.6 \text{ кВт} = 30917.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Теперь посчитаем расходы для двух типов приводов муфт. Минимальная стоимость 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха при таких давлениях 12 руб. Средняя стоимость 1 кВт·ч электроэнергии 4 руб. Тогда затраты на пневматический привод  $35790 \text{ м}^3 \times 12 \text{ руб} = 429480 \text{ руб}$ , а затраты на орбитальный электропривод  $30917.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 4 \text{ руб} = 123670 \text{ руб}$ . Итого суммарный годовой эффект от использования орбитального электропривода муфты пресса  $429480 \text{ руб} - 123670 \text{ руб} = 305810 \text{ руб}$ , что почти в 3.5 раза меньше, чем при использовании пневматического привода. Аналогичным способом рассчитали и для электро-механического привода, по известным данным [5]. Все основные данные сведены в таблицу 4.4. Таким образом, орбитальный электропривод более дешевый в использовании, чем аналогичная пневматическая система или электро-механическая. Так же для пневматической системы необходима покупка оборудования (компрессор, пневмомагистраль, исполнительные механизмы, клапаны), и своевременное обслуживание. Для орбитального элект-

тропровода необходимость в покупке дополнительного оборудования (частотный преобразователь с векторным управлением) возникает только для повышения энергоэффективности, без использования частотного преобразователя орбитальный электропривод не уступает пневматическому приводу.

Таблица 4.4 – Расчет затрат при использовании приводов муфт

Параметр	Пневматический привод	Электро- механический	Орбитальный электропривод
Затраты ресурсов за 1 ход	2.669 м <sup>3</sup>	0,005 кВт•ч	0,0023 кВт•ч
Количество ходов в минуту	60	60	60
Время работы прессы за год	3725 ч	3725 ч	3725 ч
Затраты ресурсов за год	35790 м <sup>3</sup>	67050 кВт•ч	30917.5 кВт•ч
Стоимость 1 единицы ресурса	12 руб	4 руб	4 руб
Стоимость использо- вания за год	429480 руб	268200 руб	123670 руб

Кроме того орбитальный электропривод муфты имеет ряд преимуществ относительно пневматической системы, это

- увеличение быстродействия муфты;
- снижение шумовой нагрузки;
- нет выбросов масляных паров в атмосферу;
- обеспечивается работа от электросети без применения сжатого воздуха, что повышает потребительские качества оборудования.

## Выводы

1. Орбитальный электропривод муфты пресса, может работать от различных схем управления, таких как прямое питание от трех фазной сети, использование частотного преобразователя со скалярным, или векторным управлением, у каждого такого решения есть право на жизнь, но наиболее эффективным оказалось векторное управление.

2. Построение макета орбитального электропривода муфты пресса, дает возможность для проведения экспериментов, в ходе которых можно вносить изменения улучшающие выходные характеристики. Что в дальнейшем можно применять и для опытных образцов

3. Экономическая эффективность от использования орбитального электропривода муфты включения пресса выражается не только в энергоэффективности, но и простотой обслуживания, простотой конструкции, что снижает стоимость обслуживания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была решена актуальная задача разработки и исследования орбитального электропривода муфты включения кривошипного пресса. На основании совокупности теоретических положений разработан и внедрен новый тип электропривода муфты пресса – орбитальный.

Материалы диссертации могут сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработано математическое описание взаимодействия роторного и статорного элементов орбитального электропривода учитывающие зависимости параметров от режимов работы.

2. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований орбитального электропривода муфты включения пресса, показано, что такой тип привода, не уступает существующим пневматическим аналогам по характеристикам, при этом имеет не большие затраты в эксплуата-

ции и более прост в обслуживании, кроме того повышенная надежность и ремонтпригодность повышает производительность пресса в целом. На основе исследований была построена масштабная модель орбитального электропривода муфты пресса.

3. Проведение экспериментальных исследований с использованием физической модели, в полной мере помогли проверить результаты компьютерного моделирования, которые совпали на 90%, погрешность в 10% объясняется в неполном соответствии компьютерной и физической модели. Результаты моделирования и результаты физических экспериментов в полной мере дополняли друг друга, благодаря этой информации создавались различные варьирование конструктивных параметров орбитального электропривода, для оптимальной работы всей системы в целом.

4. Использование методов оптимизации, снижает энергопотребление орбитального электропривода муфты пресса при различных режимах работы. Использование совокупности этих методов повышает энергоэффективность во время всей работы муфты, что сильно сказывается на общей энергоэффективности пресса. Построение функциональной карты ротора и статора, для каждого орбитального электропривода муфты, повышает эффективность управления таким типом муфты, и в полной мере позволяет отключать неиспользуемые сектора статора, что уменьшает их нагрев и соответственно повышает срок службы.

5. Результаты выполненных исследований свидетельствует о целесообразности использования векторного управления для данного типа привода, в частности доказано, что выигрыш по сравнению со скалярным управлением по скорости составляет 10% , и по энергопотреблению до 7%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.2.113 -2006 Прессы кривошипные. Требования безопасности.
2. Живов Л.И. Овчинников А.Г. Кузнечно-штамповочное оборудование.-Киев: Высшая школа,1981.-375с.
3. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 559 с.
4. Игнатов А.А. Игнатова Т.А. Кривошипные горячештамповочные прессы.- М.Машиностроение, 1984.-312с
5. Сафонов А.В. Новая энергосберегающая и экологически чистая электромеханическая система управления кузнечно-прессовым оборудованием // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002. № 2. С. 19-23
6. Центральное проектно-конструкторское бюро кузнечно-прессового машиностроения «ЦБКМ». Руководящий технический материал. «Кривошипные кузнечно-прессовые машины. Расчет мощности асинхронного электродвигателя и момента инерции маховика». Москва 1975г
7. Шнейберг В.М., Акаро И.Л. Кузнечно-штамповочное производство Волжского автомобильного завода. М.:Машиностроение, 1977. 302 с.
8. Пат. 2561493 Российская Федерация. Муфта кривошипно-шатунного пресса – Литвиненко А.М., Богданов А.О. –опуб: 27.08.2015 Бюл. №14.
9. Пат. 2557347 Российская Федерация. Муфта кривошипно-шатунного пресса – Литвиненко А.М., Крук А.Т., Крук В.А., Соков В.И., Воскресенский Г.В., Богданов А.О. –опуб: 20.07.2015 Бюл. №20.
10. Пат. 2504475 Российская Федерация. Привод муфты пресса – Литвиненко А.М., Крук В.А., Воскресенский Г.В. –опуб: 20.01.2014 Бюл. №2.

11. Литвиненко А.М. Симметричные орбитальные электромеханические системы с дисковым якорем // Электротехника. 2001. №4. С. 12-17.
12. Богданов А.О., Литвиненко А.М. Учет особенностей статора орбитального электропривода// Энергия-XXI.2015.№2. С. 122-126.
13. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М., Атомиздат, 1978, - 232 с.
14. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. – М.: Энергоатомиздат, 1988 г. – 308 с.
15. Литвиненко А.М., Богданов А.О. Исследование роторного элемента орбитального привода муфты кривошипного пресса // Электричество. 2014. №8. С.51-55
16. Делекторский Б.А., Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Проектирование гидроскопических электродвигателей. – М.: Машиностроение, 1968 г. – 252 с.
17. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1978.-818с.
18. Ильинский, Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Академия 2008. – 208 с.
19. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В.Иванов-Смоленский, Ю.В.Абрамкин, А.И.Власов, В.А. Кузнецов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216 с.
20. Сафонов А.В., Сидоркевич В.Ф. Винтовые прессы с муфтовым приводом для горячей штамповки: Обзорная информация / ВНИИТЭМП. М.: 1988. – 52 с.
21. Документация на пресс механический с модифицированным колленноры-чажным приводом модели К04К0040 усилием 10000 кН. Расчеты. Воронеж: ЗАО ТМП. 1998.-88с.
22. Гурьев Ю.Т., Плюгачев В.Г. Современное кузнечно-штамповое оборудование (кривошипные горячештамповочные прессы). М.:Машиностроение, 1984. – 44 с.

23. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин [и др.] ; под ред. М.Д. Находкина. – М. : Транспорт, 1976. – 623 с.
24. Ерошин С.С., Мирошник С.А., Расчет механической характеристики дискового асинхронного двигателя со свободным ротором / Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– 2012. –№1/8(55). – С. 48-53
25. Литвиненко А.М. Монотонность переходных процессов в электромеханических системах / Электричество. 1991. № 4. С. 66-70.
26. Банкетов А. Н. Кузнечно-штамповочное оборудование / А. Н. Банкетов, Ю. А. Бочаров др. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с.
27. Филькин И.Н., Автоматизированные комплексы горячей штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 1981, №5. С. 7-9.
28. Перевозчиков Б.С., Салов В.П., Бовыкин И.В. Основные тенденции развития винтовых кузнечно-прессовых машин НИИМАШ , 1974, № 2.
29. Бурдаков С. Ф. Динамический расчет электромеханических следящих приводов промышленных роботов : учеб. пособие / С. Ф. Бурдаков, А. А. Первозванский. — Л.: ЛПИ, 1982. — 72 с.
30. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
31. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – СПб.: ДМК Пресс, Питер, 2008. – 288 с.
32. Черных, И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Текст] / И.В. Черных. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 252 с.
33. Крук В.А., Воскресенский Г.В., Литвиненко А.М., Богданов А.О. Сравнительный анализ систем главных приводов механических кривошипных горячештамповочных прессов./ Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. №4 2015 с 24–29

34. Литвиненко А.М., Богданов А.О. Еременко Ю.И., Автоматизация изменения скорости подвижных частей прессов с системой дозирования энергии// Вестник ВГТУ, Т9, № 6-2, 2013, С. 38-40

35. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом// М-Л.: Госэнергоиздат, 1961 – 187 с.

36. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / И.П. Копылов – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

37. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

38. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272с.

39. Егупов, Н.Д. Синтез регуляторов и теории оптимизации систем автоматического управления [Текст] / Н.Д. Егупов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.

40. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления : учеб. пособие / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург : Профессия, 2003. — 747 с

41. Бурдаков С. Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: учеб. пособие для вузов / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко, А. Н. Тимофеев. — М.: Высш. шк., 1986. — 264 с.

42. Борисевич А.В, Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями: обзор и состояния и новые результаты: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 104 С.

43. Богданов А.О., Литвиненко А.М. Выбор системы частотного управления орбитальным электроприводом муфты пресса// Электротехнические комплексы и системы управления, 2015, № 4 С. 47–51

44. Богданов А.О., Литвиненко А.М. Выбор системы управления орбитальным электроприводом муфты пресса // Электричество. 2015. №10. С. 63–66
45. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). Методическое пособие. – М.: ЭФО, 2013 – 63 с
46. Кудряшов С.В. О применении дробных однозубцовых обмоток в синхронных машинах с постоянными магнитами // Электротехника. 2015. №3. С. 50-54.
47. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов.- 9-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1996. 638 с.
48. Лазарев, Ю. Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB [Текст] / Ю. Ф. Лазарев – СПб.: Питер. 2005 – 511 с.
49. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями [Текст]: учебн. пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
50. Su Jinming, A Guidance of MATLAB6.1 Practical Application, Publishing House of Electronics Industry, 2002, pp. 48-55.
51. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
52. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 98 с.
53. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.: С-Петербургская электротехническая компания, 2004.

54. Литвиненко А.М., Богданов А.О. Автоматизация дозирования энергии прессов// Электротехнические комплексы и системы управления, 2014, № 1 С. 43–46
55. Литвиненко А.М., Богданов А.О. Дозирование энергии кривошипных прессов // Вести высших учебных заведений черноземья. 2014. №2. С. 44-46
56. Браславский, И.Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов / И.Я. Браславский // Электротехника. – 1998. – №8.
57. Преобразователи частоты - просто о сложном [Текст] / Danfoss Drives A/S – М.: ЗАО «Данфосс», 2006. – 165 с.
58. Рассел, Д. Векторное управление [Текст] / Д. Рассел, Р. Кон. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 88 с.
59. Кривошипный горячештамповочный пресс с вращающимся инструментом // Кузнечно-штамповочное производство / В.Н. Субич, В.А. Степанов, В.Н. Горожанкин. 1999. –№ 8. – С. 30–31.
60. Машиностроение. Энциклопедия: В 40 т. Т. IV–4. Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства / Под ред. Ю.А. Бочарова, И.В. Матвеевко. –М.: Машиностроение, 2005. – 926 с.
61. Сарапулов Ф.Н., Черных И.В. Математическая модель линейной ин-дукционной машины как объекта управления, // Электричество. 1994. N5.
62. Laithwaite E.R. Induction machine for special purposes / London: George Newness Ltd., 1966/ 377 p.
63. Branko Blanusa, New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives, New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems, Meng Joo Er (Ed.), 2010, ISBN: 978-953-307-212-8, InTech, DOI: 10.5772/10427
64. Abrahamsen F., Energy optimal control of induction motor drives, Ph.D. thesis, Aalborg University, Denmark, ISBN 87-89179-26-9, Feb. 2000.

65. Chelliah, T.R.; Yadav, J. G.; Srivastava, S.P.; Agarwal, P., "Optimal energy control of induction motor by hybridization of loss model controller based on Particle Swarm Optimization and search controller," Nature and Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress pp.1178,1183, 9-11 Dec. 2009 doi: 10.1109/NABIC.2009.5393784

66. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005. — 336 с.: ил. (Серия «Учебное пособие»)

67. Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 234 с.

68. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

69. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных электроприводов постоянного тока: учебное пособие по курсовому проектированию. – Томск: Издво ТПИ, 1991. – 104 с.

70. Гулятьев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс. – СПб.: Питер, 2000. – 432 с.

71. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 144 с.

72. Шрейнер Р.Т., Кривовяз В.К., Калыгин А.И. Управление непосредственными преобразователями частоты с ШИМ в системах электроприводов переменного тока // Электричество, 2007. №5 с.26-37.

73. Aaltonen M., Tiintinen P., Lalu J., Heikkila S. Direct Torque Control of AC Motor Drives // ABB Review. 1995. No 3. p. 19-24.

74. Расчет и конструирование передач винт — гайка качения: Рук. мат. Под ред. Г.А. Левит. М., 1964. 83 с.

75. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя: в 3 т. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003.

76. Drubel, Oliver; Waschek, Jorg "Alternative stiff asynchronous motor design for efficient pipeline operation", Electric Drives Production Conference (EDPC), 2011 1st International, On page(s): 187 – 191

77. Werner, Ulrich "An analytical method to minimize dynamic foundation forces caused by transient torques in the air gap of an asynchronous machine", Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on, On page(s): 6 – 11

78. Werner, U. "Optimized rotor design for rigid balancing of large flexible induction rotors", Electric Drives Production Conference (EDPC), 2011 1st International, On page(s): 249 – 254

79. Kindl, Vladimir; Hruska, Karel; Sobra, Jan; Byrtus, Miroslav "Effect of induction machine's load and rotor eccentricity on space harmonics in the air gap magnetic flux density", Mechatronics - Mechatronika (ME), 2014 16th International Conference on, On page(s): 463 – 468

80. Werner, Ulrich "Foundation forces due to dynamic air gap torques of soft mounted asynchronous machines with flexible rotors in sleeve bearings — a calculation method", Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on, On page(s): 1325 – 1332

81. L. Sandlund, M. Fahlander, T. Cedell, A. E. Clark, J. B. Restorff, and M. Wun-Fogle, "Magnetostriction, elastic moduli, and coupling factors of composite Terfenol-D", J. Appl. Phys., vol. 75, no. 10, pp. 5656-5658, 1994

82. L. Kiesewetter, "The application of Terfenol in linear motors", "7" in Proc. 2nd Int. Conf. Giant Magnetostrictive Alloys, pp. 15, 1988

83. J. M. Vranish, D. P. Naik, J. B. Restorff, and J. P. Teter, "Magnetostrictive direct drive rotary motor development", IEEE Trans. Magn., vol. 27, pp. 5355-5357, 1991

84. S. Ashley, "Magnetostrictive actuators", Mech. Eng. , vol. 120, no. 6, pp. 68-70, 1998

85. F. Stillesjö,, G. Engdahl, and A. Bergqvist, "A design technique for magnetostrictive actuators with laminated active material", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, pp. 2141-2143, 1998
86. G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 1986, Addison-Wesley
87. Î. Î. Khambadkone, "Vector-Controlled Induction Motor Drive with a Self-Comission Scheme", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 322-327, 1991
88. "Novel Real-Time Harmonic Minimized PWM Control for Drives and Static Power Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 256-262, 1994
89. W Leonhard, *Control of electrical drives*, pp. 346, 1990, Springer – Verlag
90. L. H.-M. Jang, "Design and electrical characteristics analysis of 100 HP HTS synchronous motor in 21st century frontier", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 2197-2200, 2003
91. M. Miki , S. Tokura , H. Hayakawa , H. Inami , M. M. Kitano , H. Matsuzaki , Y. Kimura , I. Ohtani , E. Morita , H. Ogata , M. Izumi , H. Sugimoto and T. Ida, "Development o a synchronous motor with Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. S494-S499, 2006
92. C. P. Bean, "Magnetization of high field superconductors", *Review of Modern Physics*, vol. 36, pp. 31-39, 1964
93. J. A. Benito, "Electric Motor", U.S. Patent 6 222 288, 2001
94. Y. S. Cha and T. R. Askew, "Transient response of a high-temperature superconductor tube to pulsed magnetic fields", *Physica C*, vol. 302, pp. 57-66, 1998
95. T. R. Askew and Y. S. Cha, "Transient response of 50 KiloAmp Y-Ba-Cu-O rings and ring pairs to pulsed magnetic fields", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, pp. 3947-3950, 2000

96. C. Mei, J.C. Balda, and W.P. Waite "Minimization and cancellation of common-mode currents, shaft voltages and bearing currents for induction motor drives", IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference. 2003, vol. 3, pp.1127-1132

97. Y.S. Lai, P.S. Chen, and H.K. Lee, "Optimal common-mode voltage reduction PWM technique for inverter control with consideration of the dead-time effects-part II applications to IM drives with diode front end", IEEE Transactions on Industry Applications", 2004, vol. 40, no. 6, pp. 1613-1620

98. R.S. Kanchan, P.N. Tekwani, and M.R. Baiju, "Three-level inverter configuration with commonmode voltage elimination for induction motor drive", IEE Proceedings Electric Power Applications, 2005, vol. 152, no. 2, pp. 261-270

99. ZHAO Shengdun , YU Dehong , Gao Ming, et al. Study on Aerodynamic Characteristic of Clutch Engaging[J]. Journal of Xi'An Jiaotong University, 1996, 30 (7): 89-96

100. ZHAO Shengdun, YU Dehong, Gao Ming. Dragangle Calculation in braking of Pneumatic friction brake[J]. Forging & Stamping Technology, 1995, 20 (6): 44-48

101. Zhao SD, Wang J, Wang J, et al. Expansion-chamber muffler for impulse noise of pneumatic frictional clutch and brake in mechanical presses[J]. Applied Acoustics, 2006, 67 (6): 580-594.

102. SHI Hushan,ZHAO Shengdun. Investigation of Radiation Law of Intermittent Exhaust Noise Generated via Pneumatic Valve[J]. Journal of Xi'An Jiaotong University, 2008, 42 (9): 1091-1095.

103. C. Junge, F. Senecar, R. Wegener, S. Soter Pressure Control of a Non-linear System with a Linear-PMSM and a Standard Inverter IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC 2009, Miami/Florida, USA, May 3-6, 2009.

104. William Drury Modeling and High Performance Control of Electric Machines (IEEE Press Series on Power Engineering) John Chiasson Wiley-IEEE Press; 1st edition

105. Wegener, R.; Senicar, F.; Junge, C.; Soter, S. Low Cost Position Sensor for Permanent Magnet Linear Drive, Seventh International Conference on Power Electronics and Drive Systems - PEDS 2007, Bangkok, Thailand

106. A.C. Van der Heijden et al., 'Hybrid optimal control of dry clutch engagement. Int. Journal of Control, pp 1717-1728, 2007.

107. J. Horn et al. Flatness-based clutch control for automated manual transmissions. Control Engineering Practice, pp 1353-1359, 2003.

108. M.H.M. Dassen. Modelling and control of automotive clutch systems. Report number 2003.73, Eindhoven 2003.

109. V. Pauvert, N. Bernard, M.E. Zaim, J. Bonnefous, "Modelisation and Optimization of clutch magnet actuator topologies", Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE 23-27 Sept. 2007, p.:853 - 860.

110. J.-S. Plante and S. Dubowsky, "On the performance mechanisms of dielectric elastomer actuators", Sens. Actuators, A: Phys, vol. 137, no. 1, pp. 96-109, 2007

111. M. Wissler and E. Mazza, "Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators", Sens. Actuators, A: Phys, vol. 138, no. 2, pp. 384-393, 2007

112. M. Babic, R. Vertechy, G. Berselli, J. Lenarcic, V. Parenti Castelli and G. Vassura, "An electronic driver for improving the open and closed loop electro-mechanical response of dielectric elastomer actuators", Mechatronics, vol. 20, no. 2, pp. 201-212, 2010

113. D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, pp. 24-34, 1997

114. R. Subbiah, A. S. Kumar, and T. S. Sankar, "Transient dynamic analysis of rotors using the combined methodologies of finite elements and transfer matrix", Trans. ASME, pp. 448-452, 1988

115. H. D. Nelson and J. M. Mcvaugh, "The dynamics of rotor-bearing systems using finite elements", *Trans. ASME*, pp. 593-600, 1976
116. Ch. Junge, S. Gruber, F. Budschun, S. Soter System Analysis and Optimization of a Pressure Control for a Hydraulic-Clutch-Brake-Combination actuated with a Lineardrive Details International Conference on Industrial Technology 2010, Vina del Mar, Valparaiso, Chile, March 14-17
117. Wegener, R.; Senicar, F.; Junge, C.; Soter, S. Low Cost Position Sensor for Permanent Magnet Linear Drive, Seventh International Conference on Power Electronics and Drive Systems - PEDS 2007, Bangkok, Thailand
118. D Yildirim and M. Bilgiç, "PWM AC Chopper Control of Single - Phase Induction Motor for Variable - Speed Fan Application", *IECON 2008*, pp. 1337-1342, 2008
119. H Bodur, AF Bakan and MH Sarul, "Universal Motor Speed Control with Current Controlled PWM AC Chopper by Using a Microcontroller", *Industrial Technology 2000*, vol. 2, pp. 394-398, 2000
120. F. Swift and A. Kamberis, "A New Walsh Domain Technique of Harmonic Elimination and voltage control in Pulse-Width Modulated Inverters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8, pp. 170-185, 1993
121. G.-H. Choe, A. K. Wallace and M.-H. Park, "An improved PWM technique for AC chopper", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 4, pp. 496-505, 1989

ПРИЛОЖЕНИЕ №1  
Экспериментальная установка



Рисунок П1.1 – Ротор орбитального электропривода

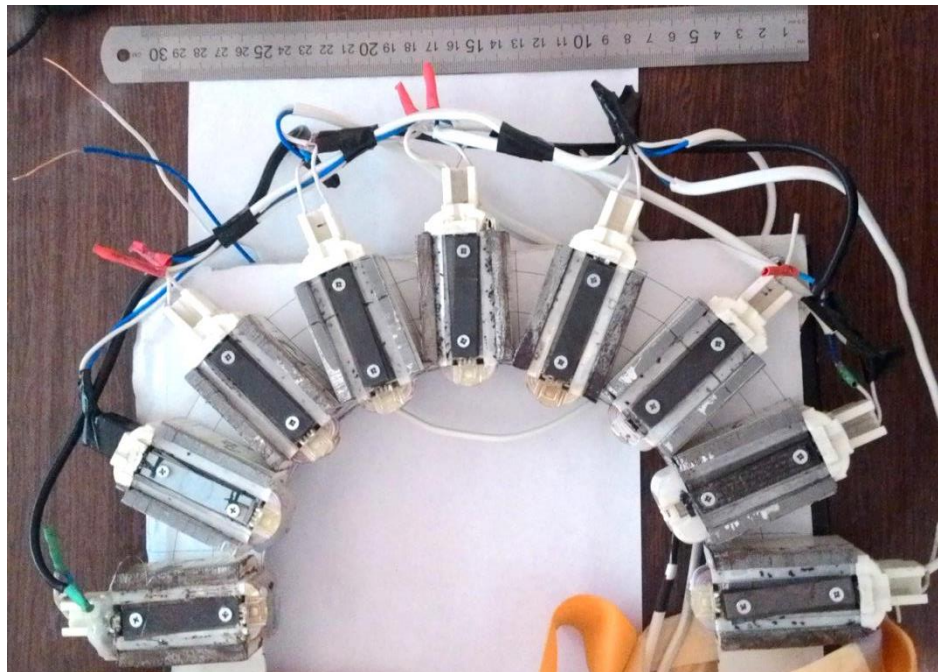


Рисунок П1.2 – Статор орбитального электропривода

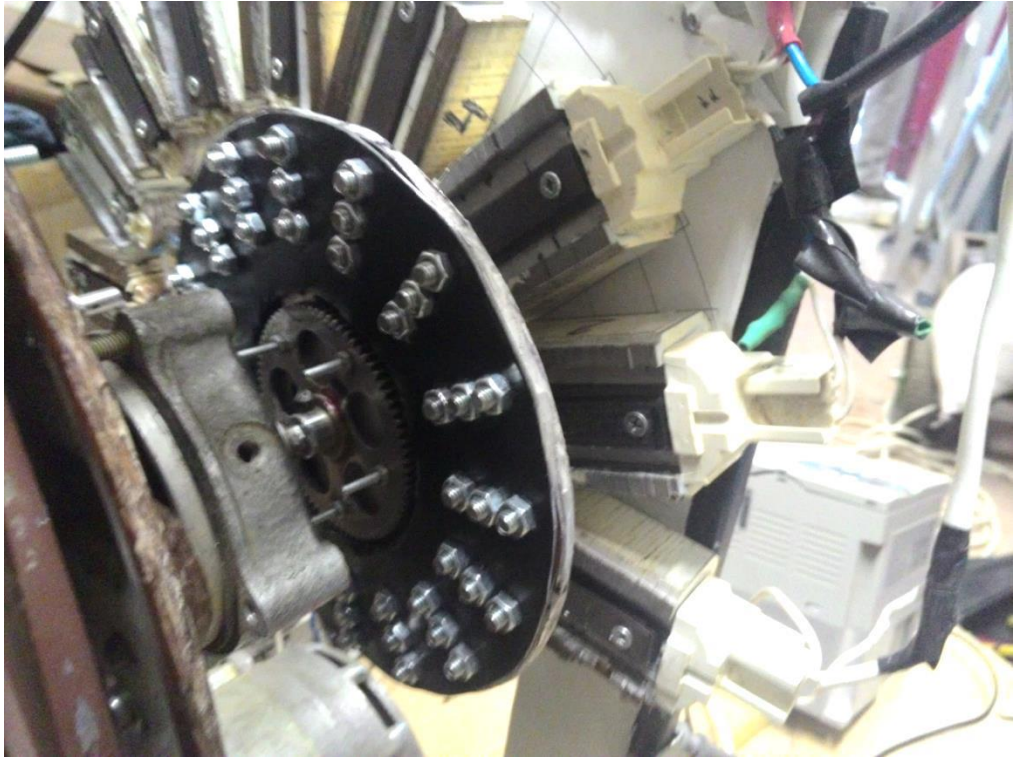


Рисунок П1.3 – Ротор и статор

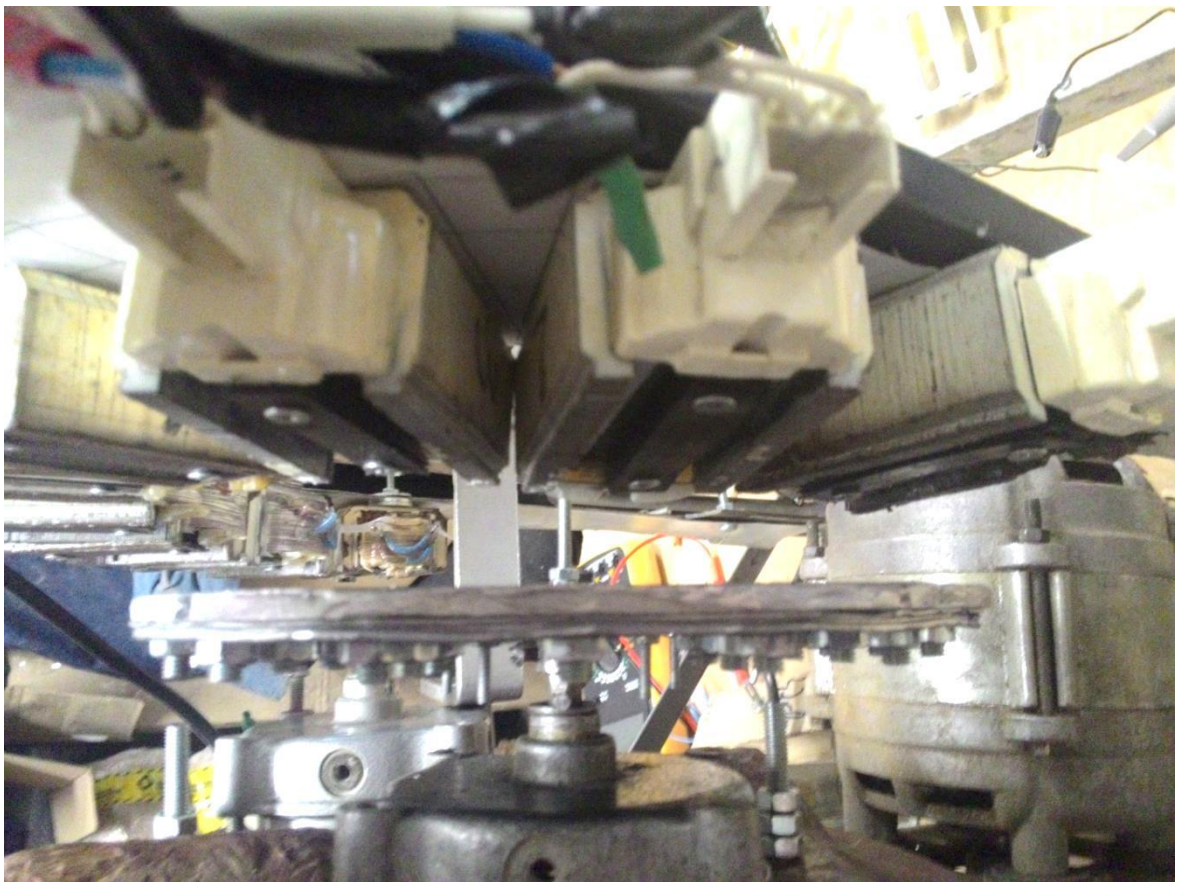


Рисунок П1.4 – Различные зазоры, ротора и статора

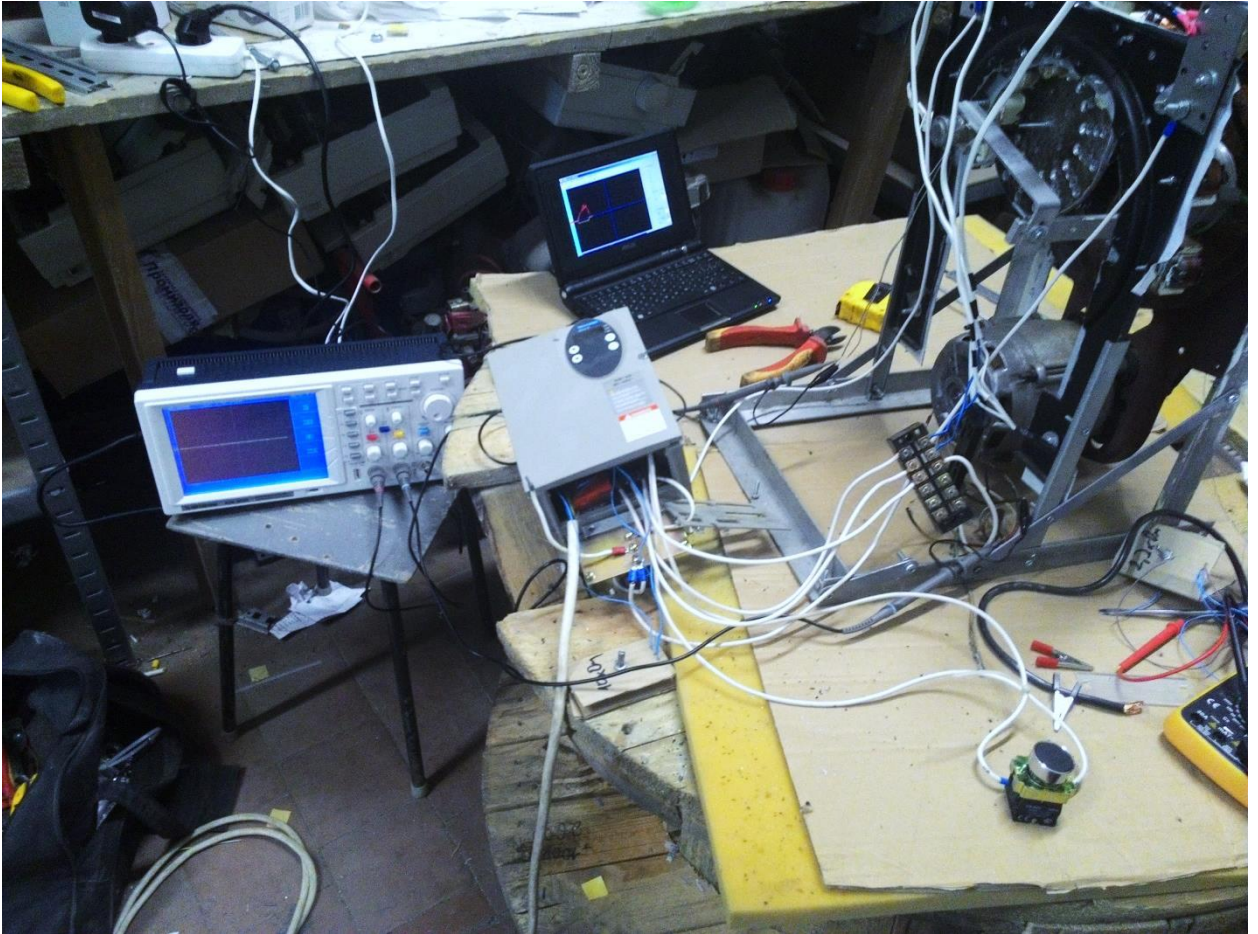


Рисунок П1.5 – Запуск орбитального электропривода муфты пресса, через частотный преобразователь

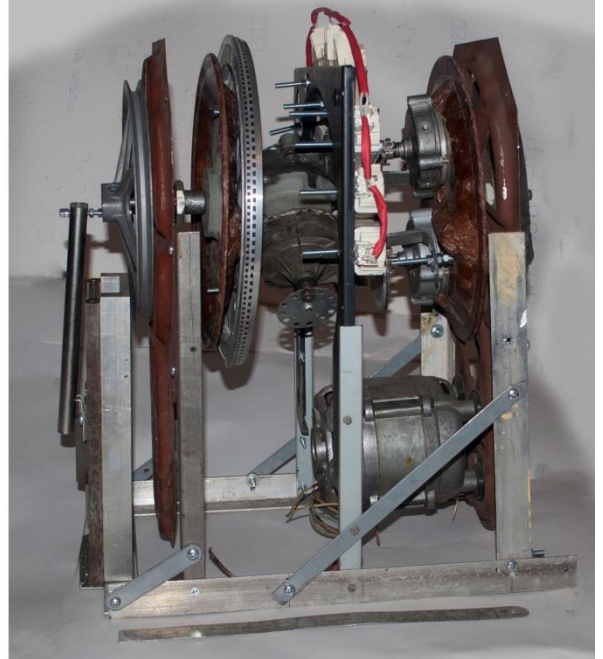
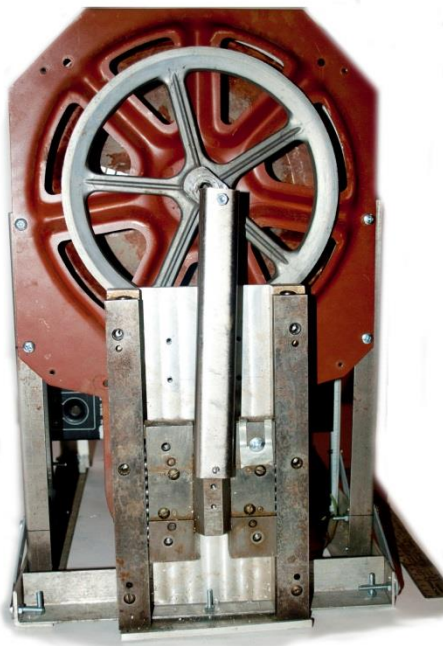
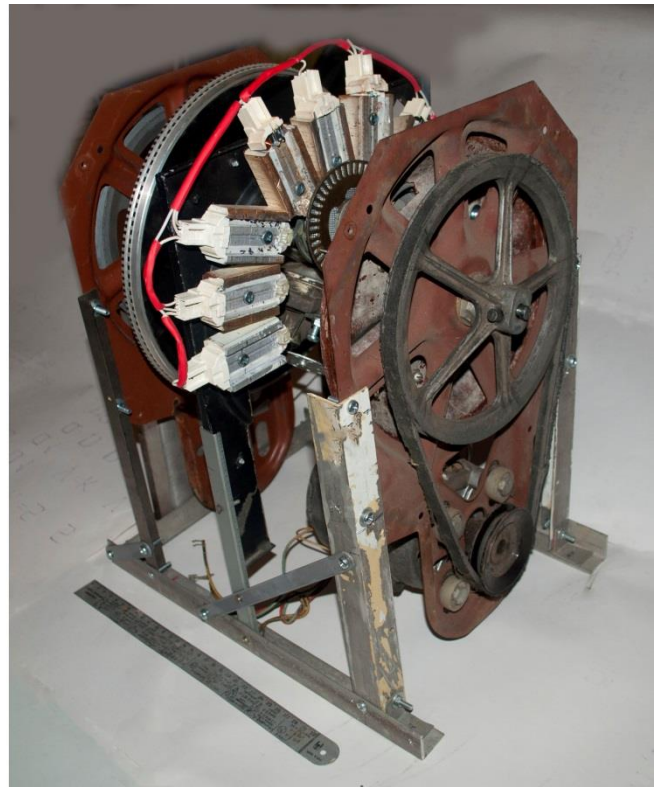
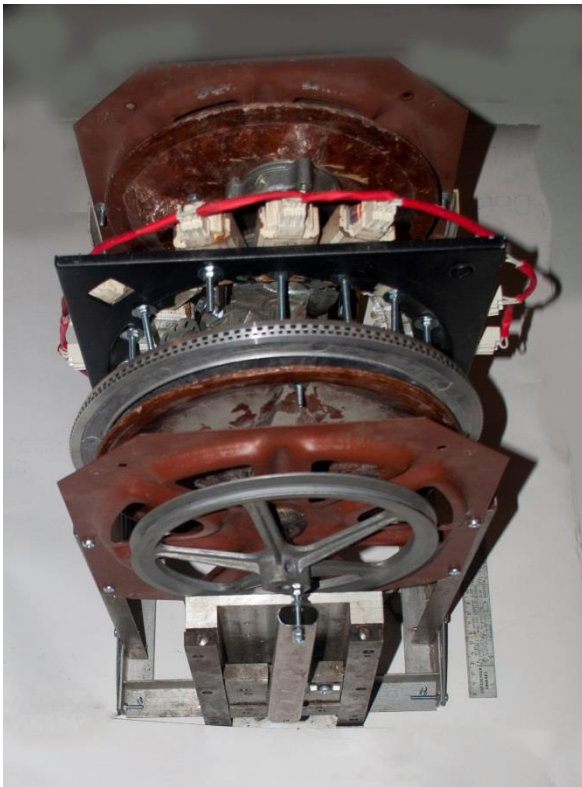


Рисунок П1.6 – Первая экспериментальная установка в масштабе

ПРИЛОЖЕНИЕ №2

Зависимость площади перекрытия от отключение сегментов

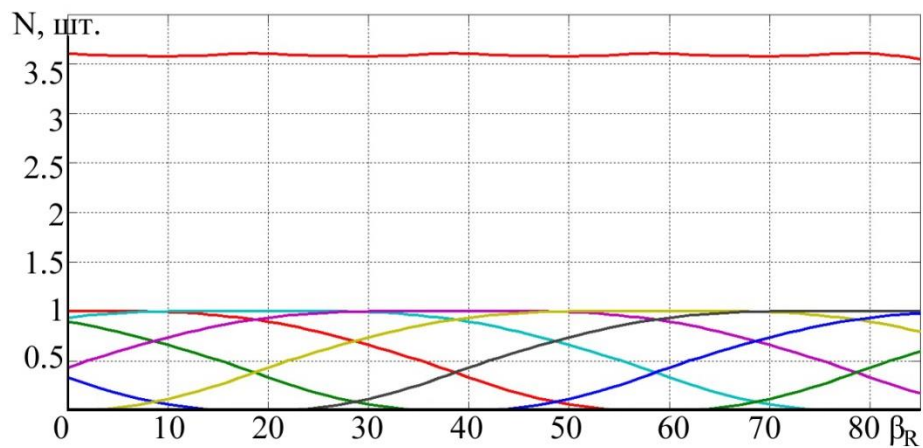


Рисунок П2.1 – Без отключения сегментов

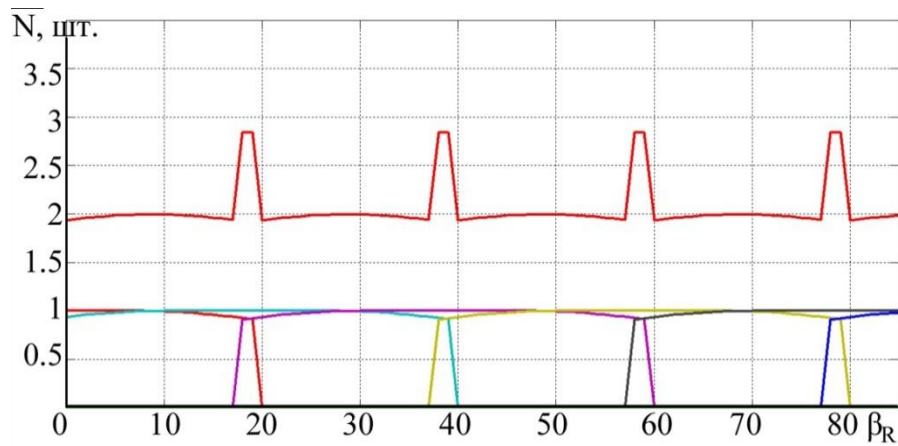


Рисунок П2.2 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 90 % от общей площади сегмента

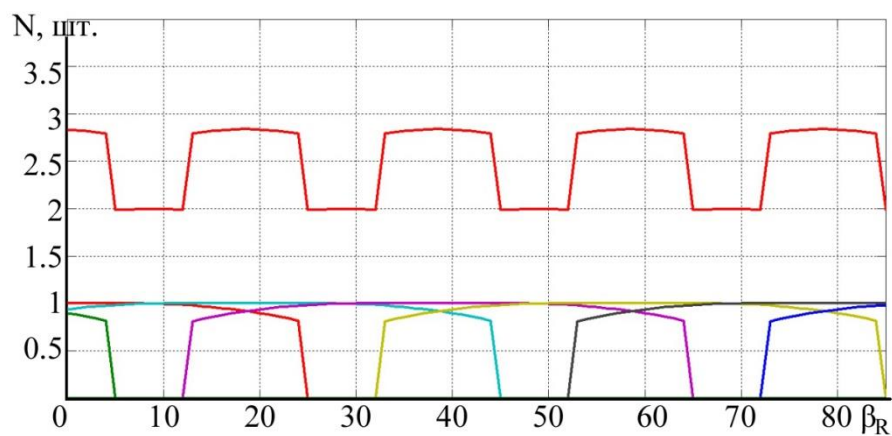


Рисунок П2.3 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 80 % от общей площади сегмента

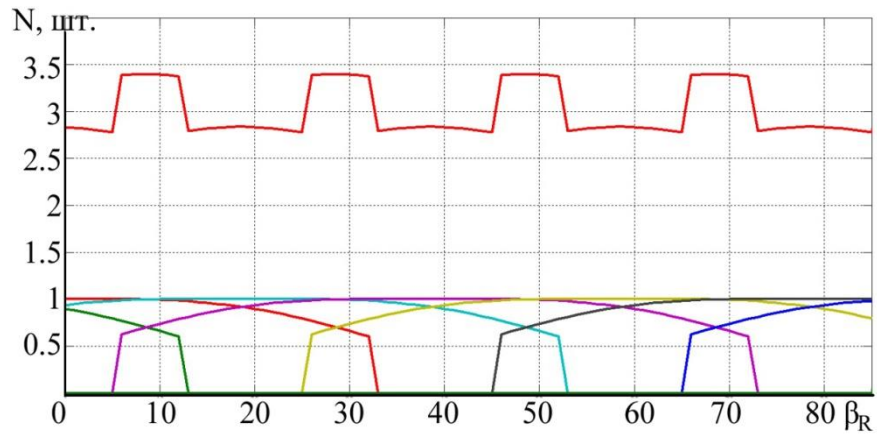


Рисунок П2.4 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 60 % от общей площади сегмента

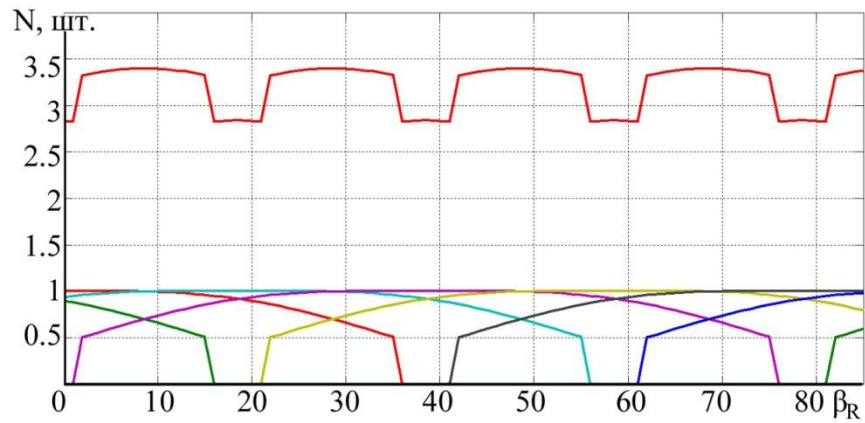


Рисунок П2.5 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 50 % от общей площади сегмента

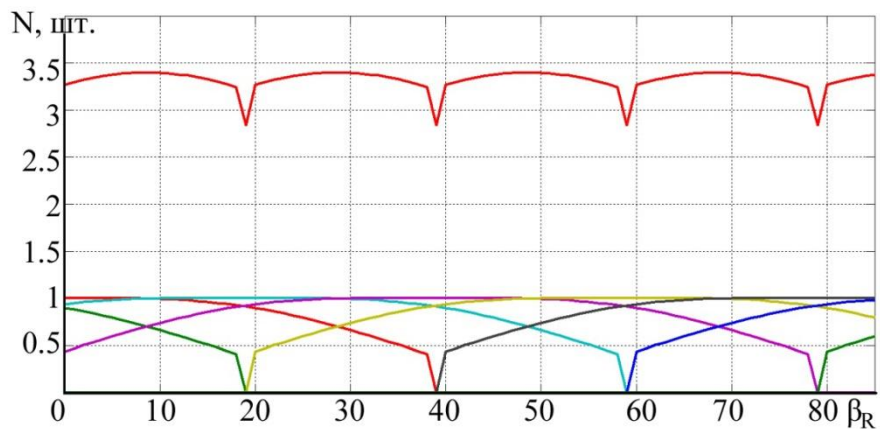


Рисунок П2.6 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 40 % от общей площади сегмента

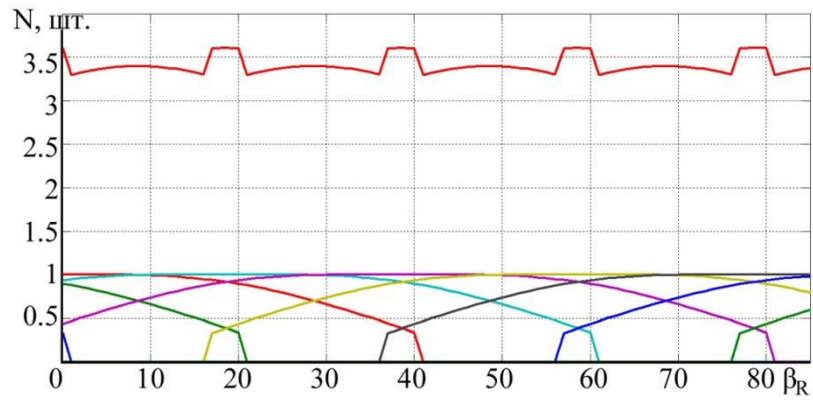


Рисунок П2.7 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 30 % от общей площади сегмента

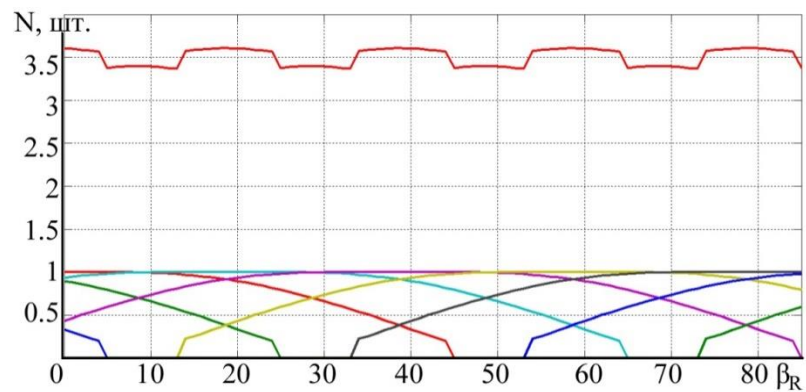


Рисунок П2.8 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 20 % от общей площади сегмента

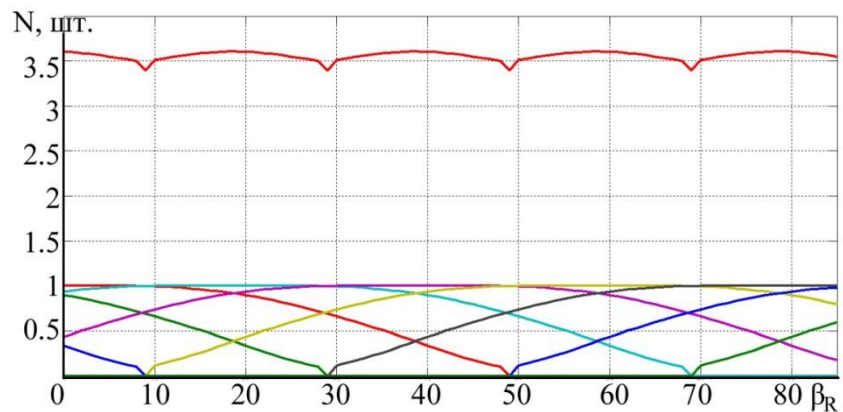


Рисунок П2.9 – Отключение сегмента, если площадь перекрытия ротором сегмента меньше чем 10 % от общей площади сегмента

Таблица П2.1 – сводная таблица отключения не используемых сегментов

Порог отключения сегмента	Площадь перекрытия равная суммарной площади сегментов	Количество сегментов под напряжением
<90%	2	2
<80%	2.5	3
<70%	2.6	3
<60%	3.2	4
<50%	3.3	4
<40%	3.4	4
<30%	3.4	5
<20%	3.5	5
<10%	3.6	5
Без отключения	3.6	6

ПРИЛОЖЕНИЕ №3

Зависимости параметров от количества роторов

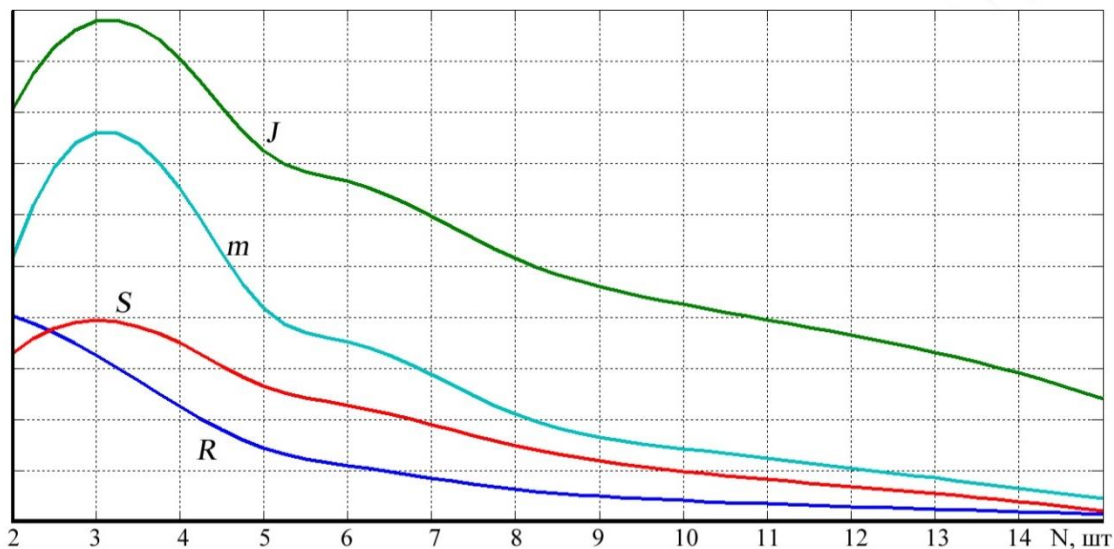


Рисунок ПЗ.1 – Зависимость количества роторов от момента инерции; массы; площади перекрытия; радиуса ротора

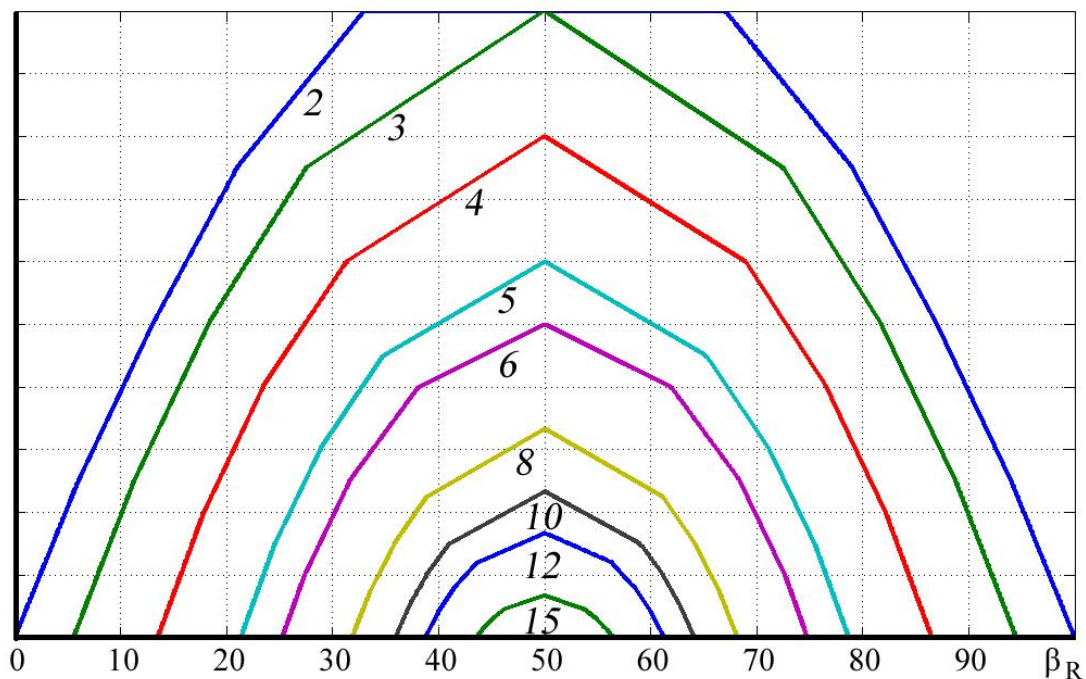


Рисунок ПЗ.1 – Площадь перекрытия статора в зависимости от радиуса роторов

Таблица ПЗ.1 – Сводная таблица зависимости параметров

Количество роторов	Радиус ротора, мм	Площадь ротора мм <sup>2</sup>	Общая площадь роторов мм <sup>2</sup>	Перекрываемая площадь мм <sup>2</sup>
2	80	20114.28	40228.57	16422
3	72	16292.57	48877.71	19715
4	60	11314.28	45257.14	17488
5	48	7241.14	36205.71	13285
6	42	5544	33264	11430
8	32	3218.28	25746.28	7488
10	26	2124.57	21245.71	4980
12	22	1521.14	18253.71	3492
15	16	804.57	12068.57	1095

ПРИЛОЖЕНИЕ №4

Алгоритмы

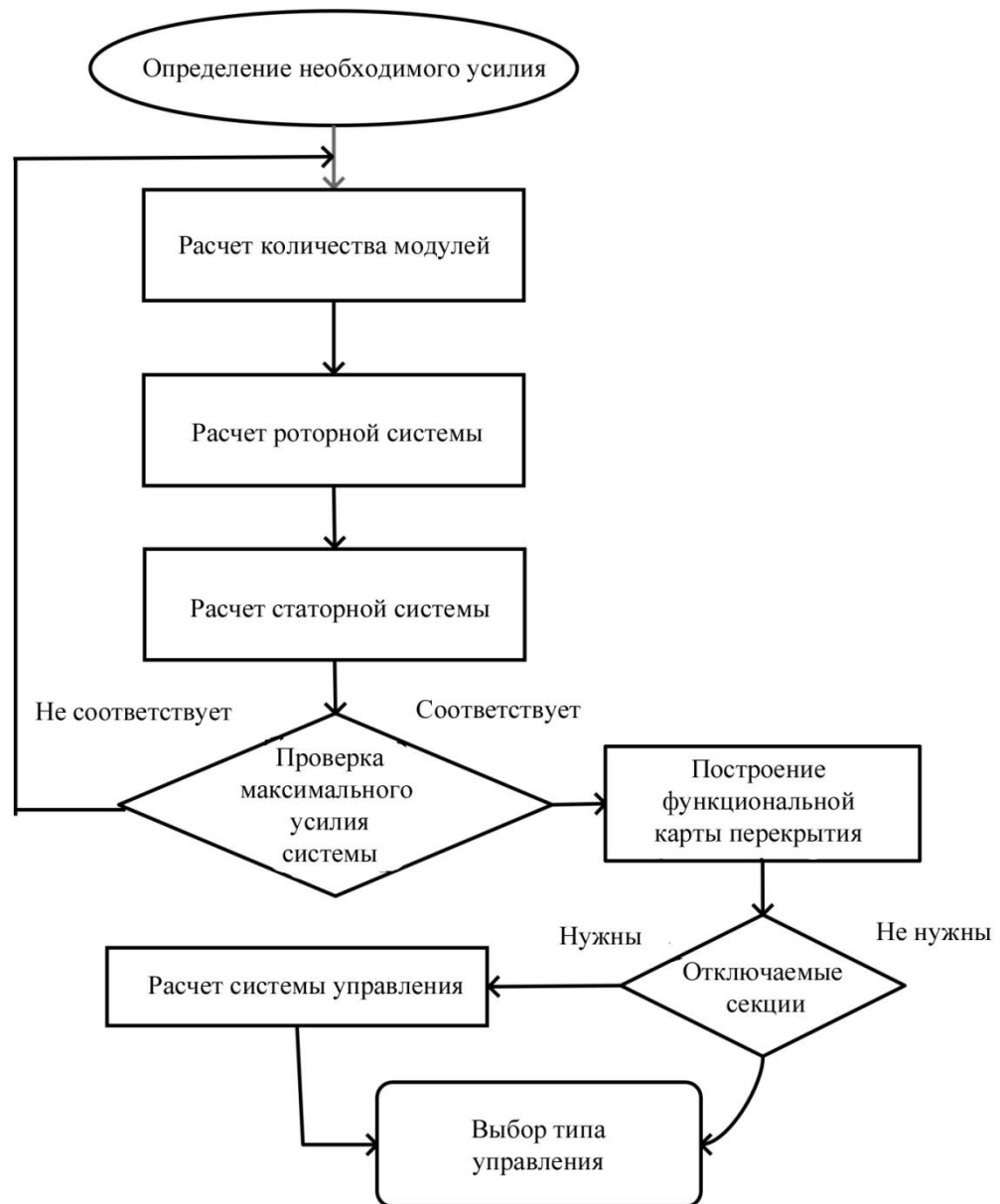


Рисунок П4.1 – Алгоритм расчёта орбитального электропривода

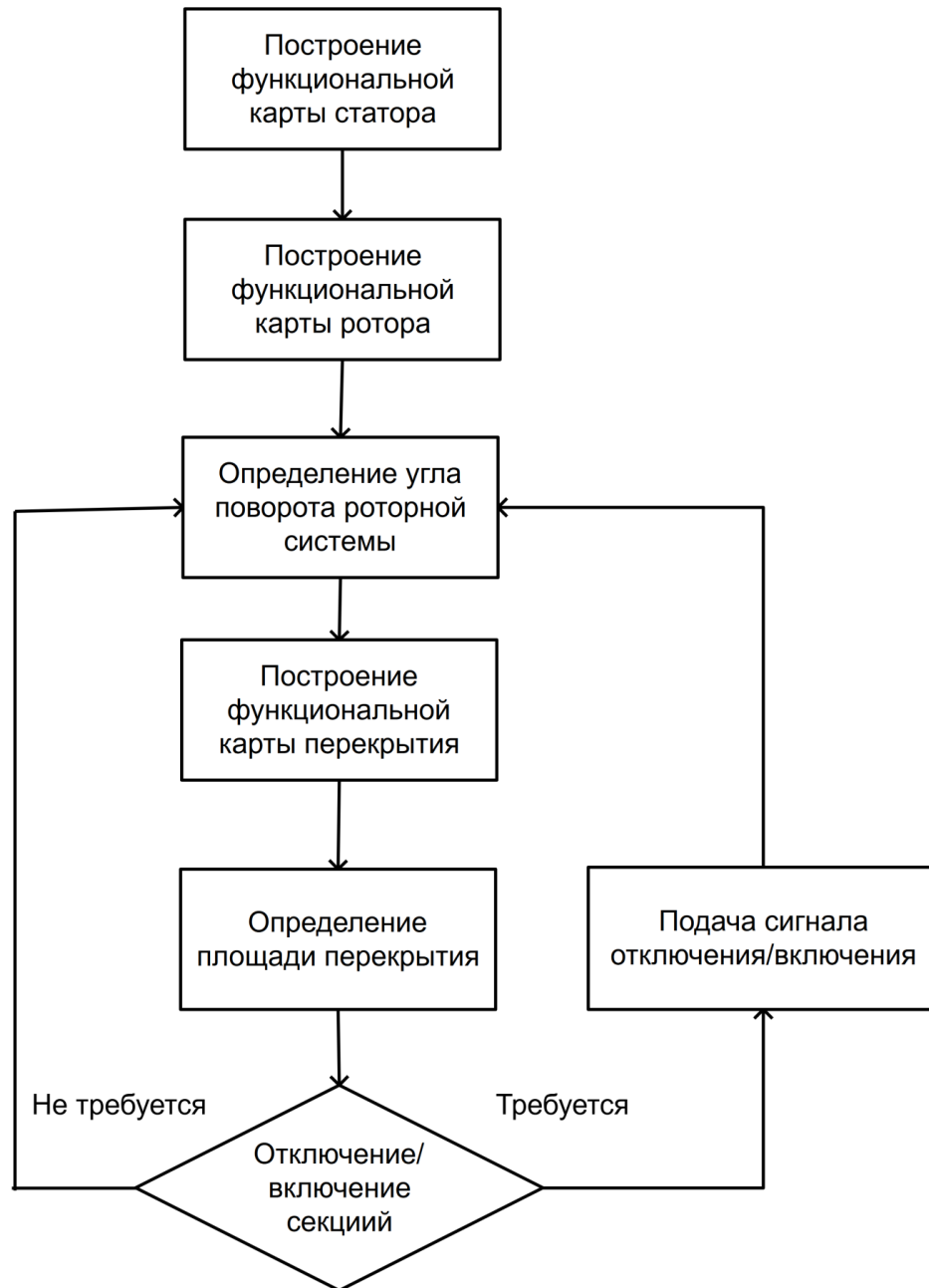


Рисунок П4.2 – Алгоритм отключения не используемых секторов статора

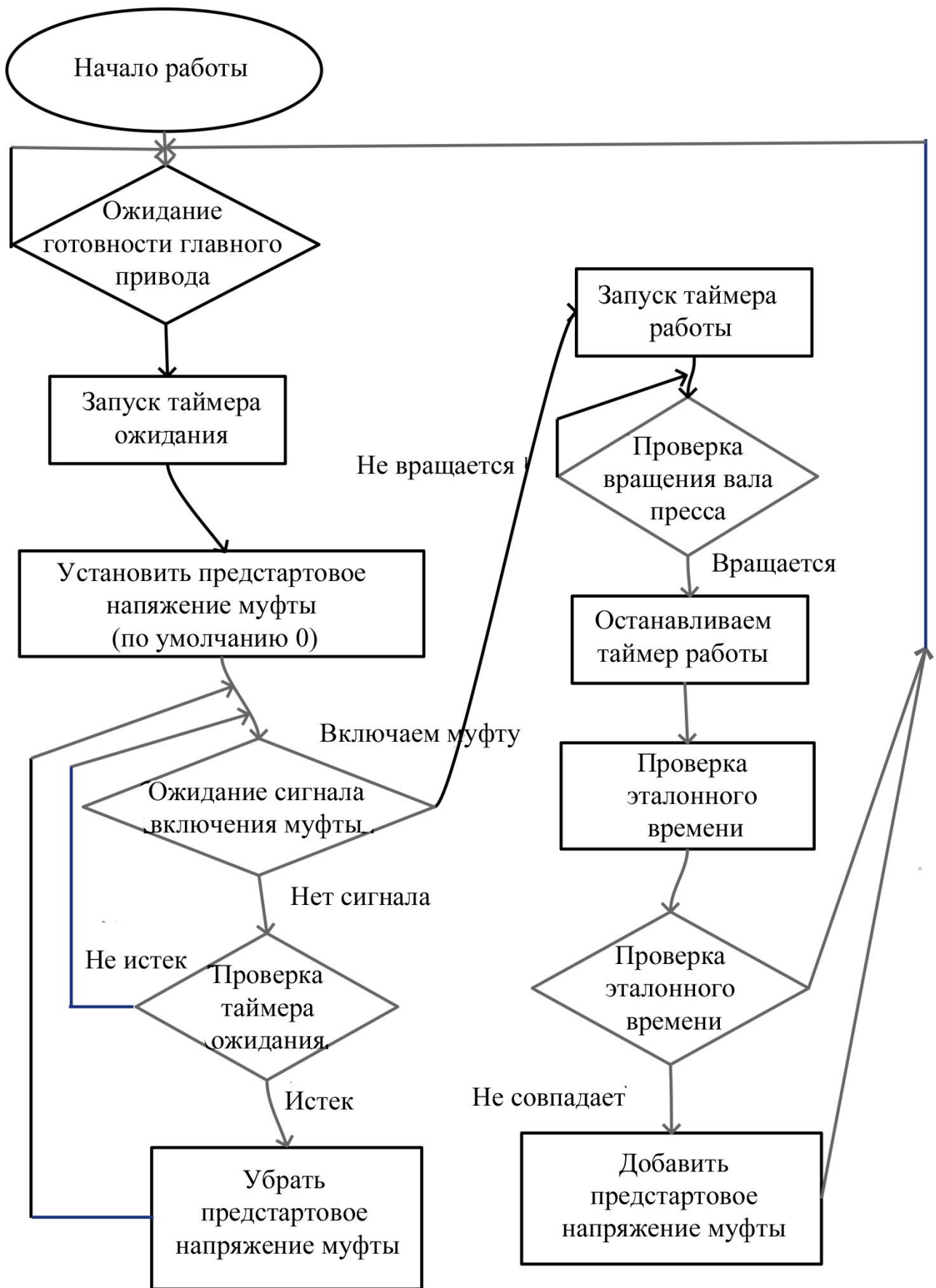


Рисунок П4.3 – Алгоритм компенсации износа муфты

Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ



Директор ООО НПФ «МехПресс»

Крук В.А.

*В.А. Крук*  
«26» 09 2016 г.

## АКТ

о внедрении в производственный процесс результатов работы аспиранта Богданова А.О. «Орбитальный электропривод муфты включения пресса».

Полученные в работе Богданова А.О результаты приняты к внедрению ООО НПФ «МехПресс».

Форма внедрения – методологический комплекс, ориентированный на разработку орбитального электропривода муфты пресса, включающий:

– Комплексную математическую модель торцевого асинхронного двигателя, позволяющую получить статические характеристики, а также исследовать магнитные, электромагнитные и тепловые процессы;

– Алгоритм и программную модель управления орбитальным электроприводом муфты пресса с двумя накопителями, один из которых предназначен для работы с муфтой пресса, а другой в совокупности с аналогичным приводом тормоза.

Результаты расчетов методологического комплекса на реальных данных, свидетельствуют об его эффективности и работоспособности.

Технический директор

Воскресенский Г.В.