

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ГАВРИЛОВА СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА

**УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО
СУДОПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА «СЛИП»**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат техн. наук, доцент
В.И. Доманов

Ульяновск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ	12
1.1. Электроприводы с параметрическим управлением, их основные элементы и области применения	12
1.1.1. Параметрическая схема резистивного регулирования скорости.....	12
1.1.2. Параметрическая схема регулирования скорости АД изменением числа пар полюсов.....	16
1.2. Взаимосвязанные электроприводы, их основные элементы и области применения.	21
1.2.1. Электроприводы с электрической синхронизацией.....	21
1.3 Особенности конструкции и работы судоподъемного комплекса «слип».....	25
1.4. Анализ работы существующего электротехнического комплекса «слип».....	31
Выводы к главе 1.	34
2. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ И СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	36
2.1. АД с двумя комплектами статорных обмоток – элемент (звено) параметрической схемы	36
2.2 Электропривод с «пассивным» режимом управления.....	44
2.3. Исследование «пассивного» взаимосвязанного электропривода.....	49
2.4. Анализ работы электропривода слипа с «пассивным» управлением....	58
Выводы к главе 2.	64
3. СИНТЕЗ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	65
3.1. Синтез «активного» взаимосвязанного электропривода.....	65
3.1.1Анализ колебательности электропривода с «активным» управлением.....	72
3.2. Электропривод с электронной редукцией, возможности коррекции....	75
3.2.1.Влияние случайных сигналов на работу электропривода.....	83
3.3. Обоснование необходимости идентификации параметров.....	87
3.4. Синтез элементов и моделирование электропривода.....	93
Выводы к главе 3.	97
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	98
4.1. Описание экспериментальной установки.....	98

4.2. Моделирование электротехнического комплекса "слип"	108
Выводы к главе 4.	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	120
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Одним из важных направлений развития науки и техники является создание современных элементов и алгоритмов функционирования объектов сложных электротехнических комплексов. Большой вклад в разработку современных устройств и развитие теории управления сложными объектами внесли советские и зарубежные ученые. Среди отечественных специалистов к ним следует отнести работы Абуталиева Э.Б.¹, Бесекерского В.А.², Елсукова В.С.³, Иванова Г.М.⁴, Кухтенко А.И.⁵, Пупкова К.А., Егупова Н.Д.⁶, Рубашкина И.Б.⁷ и др. Среди зарубежных авторов, прежде всего, следует выделить труды таких исследователей, как Омельчук А.А.⁸, Унгру Ф., Иордан Г.⁹, Филипс Ч., Харбор Р.¹⁰. Их теоретические и прикладные исследования нашли практическое применение в различных областях промышленности.

Одной из групп подобных электротехнических комплексов являются судоподъемные слипы, которые используются на многих судостроительных (судоремонтных) предприятиях для перемещения судна при спуске на воду и подъеме на сушу. Процесс перемещения массивного объекта, который

¹ Абуталиев Э.Б., Ещанов М.А. Методы и алгоритмы автоматизации расчетов сложных систем многоконтурных взаимосвязанных магистральных газопроводов. Ташк.политехи.ин-т. Ташкент, 1983, 89 с. (Рукопись деп. в УзНИИТИ, 14 ноябрь 1983 г. № 123Уз-Д83).

² Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб, Изд-во "Профессия", 2003. - 752 с.

³ Елсуков В.С. Структурно-параметрический синтез нелинейных систем управления с дифференциальными бинарно-операторными связями: диссертация ... доктора технических наук : 05.13.01 / Елсуков Владимир Сергеевич; [Место защиты: Сам. гос. техн. ун-т].

⁴ Иванов Г.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока / Иванов Г. М., Левин Г. М., Хуторецкий В. М.; Под ред. Г. М. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.

⁵ Кухтенко А. И., Проблема инвариантности в автоматике. – Киев: Гостехиздат УССР, 1963.

⁶ Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.

⁷ И. Б. Рубашкин. Адаптивные системы взаимосвязанного управления электроприводами. Л., «Энергия», 1975.

⁸ Омельчук, А. А. Компьютеризированная система управления судоподъемным комплексом типа слип. ПИТ, 01 (017). С. 1-232. ISSN 1998-7005

⁹ Унгру Ф., Иордан Г. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. Л.: Энергия, 1971. –182 с.

¹⁰ Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2001. – 616 с.: ил.

осуществляется с помощью сложной многоприводной системы, сопряжен с определенными трудностями, обусловленными наличием внешних и внутренних факторов случайного характера. В настоящее время для оперативного управления современными техническими комплексами широко внедряются системы на новой элементной базе.

Все элементы электротехнического комплекса «слип» (судовозные тележки, трансбордеры, рельсовые пути, тросы, редукторы, полиспасты, электродвигатели, компоненты силовой части) с момента постройки и до сегодняшнего дня практически не обновлялись, имеют соответствующий износ, связанный с интенсивными нагрузками во время эксплуатации и разрушающим воздействием окружающей среды, однако, они еще не выработали свой ресурс. С другой стороны, системы управления, которыми оснащались слипы при постройке, уже морально устарели и не справляются с задачами, стоящими перед современным судоподъемным оборудованием. Несмотря на существование нормативных правил технической эксплуатации слипов и эллингов, пошагово описывающих необходимую последовательность действий при подготовке и производстве судоподъемных работ, в процессе реальной эксплуатации поперечных слипов возникают такие проблемы, как перекося судна, сход судовозных тележек с рельсовых путей, как следствие, возникновение нештатных и аварийных ситуаций, число которых со временем возрастает. Основной причиной этого является неравномерность нагрузки на электроприводы, и, соответственно, перегрузка электродвигателей и тросов, износ оборудования.

Капитальный ремонт слипа предполагает существенные финансовые затраты, в то время как стоимость модернизации системы управления на несколько порядков ниже. Развитие электронных и электротехнических компонентов позволяет создавать более совершенные, сравнительно недорогие электротехнические комплексы, обладающие высокими технико-экономическими показателями.

Оптимальной модернизацией слипа с целью снижения стоимости и повышения надежности является замена приводных машин с фазным ротором на машины с короткозамкнутым ротором [71].

Исследуемые комплексы разрабатывались на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым роторами, которые, имея целый ряд достоинств, являются наиболее распространенными машинами в электротехнической промышленности, поэтому создание на их основе надежных, экономичных схем является важной задачей в современных условиях развития промышленности страны. Взаимосвязанными системами согласованного управления в диссертационной работе названы сложные электротехнические комплексы, которые могут состоять из двух и более взаимосвязанных асинхронных электроприводов, приводящих в согласованное движение отдельные двигатели, технологически связанные в системе производственного агрегата.

Объектом исследования является электротехнический судоподъемный комплекс «слип», представляющий собой многодвигательный электропривод, работающий в согласованном режиме для перемещения судна при спуске на воду и подъеме на сушу.

Предметом исследования являются системы согласованного управления асинхронными двигателями, входящими в состав многодвигательного электротехнического комплекса «слип», а также соответствующие математические модели этих систем и комплексов.

Целью диссертационной работы является улучшение динамических характеристик многодвигательного электротехнического комплекса «слип».

Задачи диссертационного исследования:

1. Исследование существующих электротехнических слиповых комплексов.
2. Разработка и исследование элементов многодвигательного электропривода слипового комплекса, а именно: коммутатора-регулятора, асинхронного двигателя с двумя комплектами статорных обмоток.

3. Разработка и исследование моделей системы согласованного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутыми роторами, входящими в состав электротехнического комплекса «слип».
4. Исследование работы макета исследуемого электропривода слипового комплекса в различных режимах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложены новые алгоритмы управления взаимосвязанными электроприводами слипового электротехнического комплекса, основанные на новых схемотехнических решениях, обеспечивающие требуемые режимы работы.
2. Разработаны математические модели многодвигательного электропривода слипового электротехнического комплекса, включающие новые элементы (коммутатор-регулятор, асинхронный двигатель с разделенными статорными обмотками).
3. Предложена методика синтеза многодвигательного электропривода слипового комплекса на базе асинхронных двигателей, отличающихся новой схемой включения статорных обмоток.
4. Предложена структура построения многодвигательного электропривода слипового комплекса, отличающегося возможностью электронной редукции.

Основные положения, выносимые на защиту. Автором защищаются следующие положения:

1. Алгоритм управления многодвигательным электроприводом слипового комплекса, обеспечивающий возможность согласования по статорной обмотке асинхронных двигателей и обеспечивающий более высокие технико-экономические характеристики слипа.
2. Математические модели многодвигательного электропривода слипового комплекса, включающие новые элементы (коммутатор-регулятор, асинхронный двигатель с разделенными статорными обмотками).

3. Методика синтеза многодвигательного электропривода слипового комплекса на базе асинхронных двигателей, отличающихся новой схемой включения статорных обмоток.

4. Структура построения многодвигательного электропривода слипового комплекса, отличающегося возможностью электронной редукиции.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны новые алгоритмы управления многодвигательным электроприводом слипового комплекса.

2. Разработаны математические модели многодвигательного электропривода слипового комплекса, включающие новые элементы: асинхронный двигатель с двумя комплектами статорных обмоток и коммутатор-регулятор.

3. Предложена методика синтеза многодвигательного электропривода слипового комплекса на базе асинхронных двигателей, отличающихся новой схемой включения статорных обмоток.

5. Предложена структура построения многодвигательного электропривода слипового комплекса, отличающегося возможностью электронной редукиции.

4. Результаты диссертации внедрены в работы по договору №4244ГУ1/2014 «Разработка системы управления многодвигательными электроприводами».

5. Результаты работы использованы в документации на модернизацию электрооборудования слипа ОАО «Криушинский судостроительно-судоремонтный завод».

6. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» УлГТУ.

Методы исследования заключаются в применении основных положений теории автоматического управления, теории электропривода и электрических цепей, а также математического и физического моделирования. Анализ работы системы проведен на ЭВМ с использованием программного комплекса МВТУ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих НТК:

1. I Международная научно-техническая конференция «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике», г. Пермь, 2015 г.
2. IX Международная (XX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, 2018, г. Пермь.
3. Международные научно-технические конференции (Бенардосовские чтения), г. Иваново, 2015, 2016, 2017 г.г.
4. Молодежные инновационные форумы Приволжского федерального округа, г. Ульяновск, 2015, 2016 г.г.
5. 12 Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017», г. Иваново, 2017 г.
6. XV Международная научная конференция «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве – 2017», г. Калининград, 2017 г.
7. Международные научные конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ», г. Санкт-Петербург, 2017, 2018 г.г.
8. Внутривузовские научно-технические конференции УлГТУ, г. Ульяновск, 2014-2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК, 3 статьи в журналах, рецензируемых базами данных Scopus и Web of Science, получены 2 патента на изобретения.

Личный вклад автора. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Диссертация выполнена в соответствии с паспортом специальности **05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»** и соответствует пунктам:

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.

3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Во введении аргументирована актуальность темы исследования, определена цель диссертационной работы, сформулированы задачи, намечен круг рассматриваемых вопросов, изложена краткая аннотация работы в целом.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрены основные виды электроприводов с параметрическим управлением и элементов, на основе которых они построены, а также структурные и функциональные схемы взаимосвязанных согласованных электроприводов и элементов их управления. Приведены основные типы взаимосвязанных электроприводов, преимущества их применения, а также дан анализ недостатков работы существующего электротехнического комплекса «слип», построенного на базе асинхронных двигателей с фазными роторами.

Во второй главе представлены разработанные элементы управления взаимосвязанных электроприводов и их модели, а также схемы и модели электропривода с «пассивным» режимом управления. Проведен анализ работы электропривода слипа с «пассивным» управлением.

Третья глава посвящена синтезу активных взаимосвязанных электроприводов и их элементов в различных режимах работы. Проведен анализ колебательности и влияния случайных сигналов на работу электропривода. Предложена схема многодвигательного электропривода с электронной редукцией, определены возможности коррекции работы системы.

Четвертая глава. Эксперимент. Для проведения исследования была изготовлена экспериментальная установка, на которой проводилось испытание электродвигателя с двумя комплектами статорных обмоток в широком диапазоне

скоростей и напряжения, подаваемого на первичную обмотку. Получены зависимости тока первичной цепи и напряжения вторичной цепи от тока вторичной цепи для различных значений скорости двигателя. Также проведено испытание взаимосвязанной системы электропривода на базе асинхронных машин с измененной обмоткой. Получены осциллограммы ошибки по скорости при включении цепи согласования и ошибки по скорости после отключения питания одного из двигателей, входящих в систему.

В **приложении** представлены акты об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе в виде учебного пособия для бакалавров и магистрантов направления «Электроэнергетика и электротехника», а также в документации на модернизацию электрооборудования слиповой установки ОАО «Криушинский судостроительно-судоремонтный завод». Результаты диссертации внедрены в работы по договору №4244ГУ1/2014 «Разработка системы управления многодвигательными электроприводами»

Структура и объем работы. Объем диссертации – 138 страниц. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка литературы из 154 наименований и 2 приложений.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

1.1. Электроприводы с параметрическим управлением, их основные элементы и области применения

Параметрические системы представляют собой системы, управление которыми происходит изменением параметров элементов самой системы и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений [30,147]) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок.

К основным достоинствам таких систем можно отнести высокую надежность, простоту конструкции, а также возможность наращивания числа согласованных элементов [36, 38, 57].

Параметрическое регулирование скорости взаимосвязанной системы – регулирование скорости, связанное с изменением каких-либо параметров: сопротивления в якорной цепи электродвигателя постоянного тока, активных или активно-индуктивных сопротивлений в цепи статора или ротора асинхронного электродвигателя. В системах с асинхронным двигателем параметрическое регулирование скорости возможно за счет изменения числа пар полюсов.

1.1.1. Параметрическая схема резистивного регулирования скорости

Существуют различные способы резистивного регулирования скорости асинхронных двигателей. Возможен вариант последовательного с обмотками статора или ротора включения регулировочных резисторов. В этом случае добавочные резисторы могут быть как симметричными, то есть одинаковыми во всех трех фазах, так и несимметричными [53, 99].

Для асинхронных двигателей с контактными кольцами используется способ регулирования скорости посредством изменения сопротивления в роторной цепи [53], как это показано на рис. 1.1, а, а для асинхронных двигателей с

короткозамкнутым ротором применяются сопротивления в цепи статора [123, 142].

При добавлении одинаковых во всех фазах сопротивлений в цепь ротора критический момент не изменяется, а изменяется критическое скольжение [53, 120]. С увеличением $R'_{2П}$ растет и критическое скольжение S_K :

$$\frac{S_{KI}}{S_{KE}} = \frac{(R'_2 + R'_{2П})}{R'_2}$$

где S_{KE} - критическое скольжение на естественной характеристике.

При постоянном значении I'_2 момент АД $M = const$ и не зависит от сопротивления цепи ротора, а значит, и от скорости [39, 67]. В частности, при $I'_2 = I'_{2НОМ}$

$$M_{доп} = \frac{3I_{2НОМ}^2}{\omega_0 A} = M_{НОМ}$$

т. е. при регулировании скорости асинхронного двигателя с фазным ротором изменением сопротивления в цепи ротора допустимый момент равен номинальному и остается постоянным [67, 119].

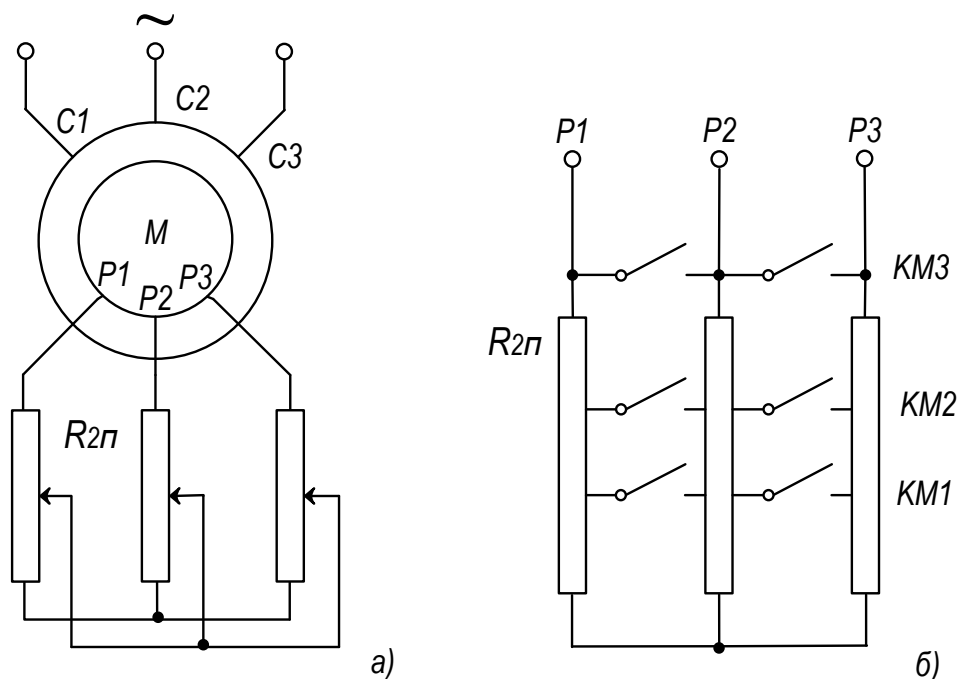


Рис 1.1. Схемы включения в цепь ротора плавно-регулирующих резисторов (а) и ступеней резисторов (б), переключаемых контактами

Для одного и того же значения тока ротора, а значит, и момента справедливо соотношение [122]

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{R'_2 + R'_{2\Pi I}}{R'_2 + R'_{2\Pi II}}$$

где S_I, S_{II} — значения скольжения при заданном значении момента и включении в цепь ротора добавочных сопротивлений соответственно $R'_{2\Pi I}$ и $R'_{2\Pi II}$.

При реостатном регулировании скорости [122], если момент постоянен, то остаются неизменными коэффициент мощности двигателя и коэффициент мощности цепи ротора.

Рассматриваемый случай отличается от регулирования двигателя постоянного тока [24, 69, 103] необходимостью регулирования сопротивлений в трех цепях одновременно. Это значит, что для переключения ступеней скорости с помощью контакторов аппараты должны иметь не менее двух пар контактов ($KM1-KM3$ на рис. 1.1, б).

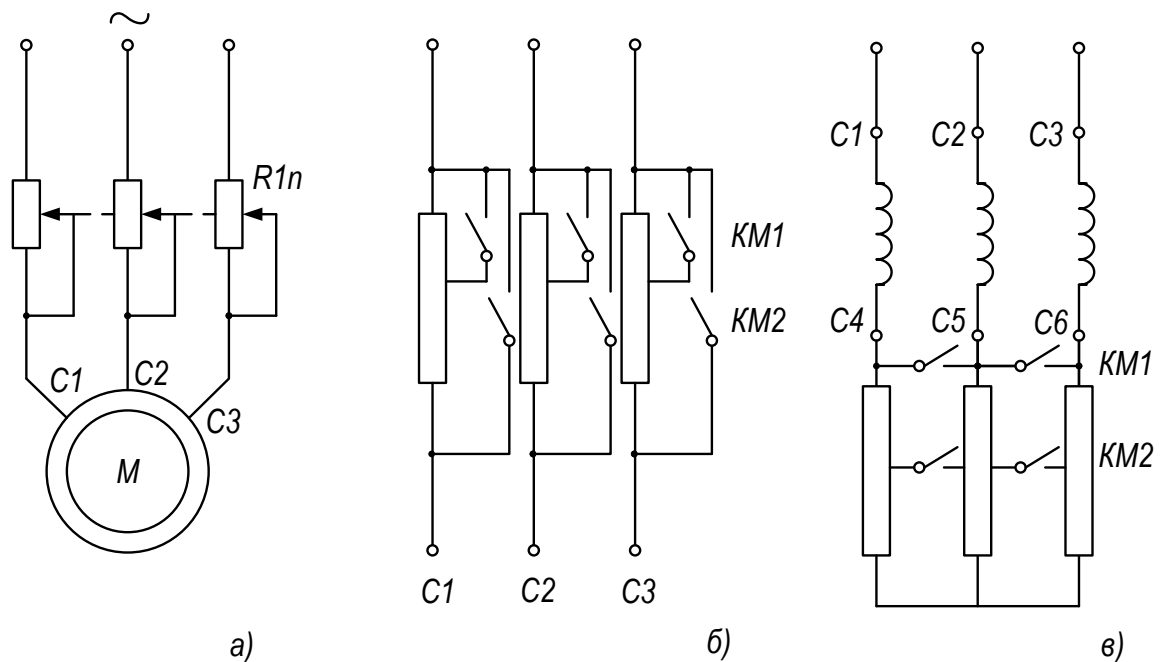


Рис. 1.2. Схемы включения резисторов в цепи статора для регулирования скорости АД с короткозамкнутым ротором (а), при плавном изменении (б), при ступенчатом изменении (в)

При введении симметричных добавочных сопротивлений $R_{1\Pi}$ в фазы обмотки статора (рис 1.2) будут уменьшаться значения S_k и M_k , что соответствует

сокращению рабочего участка механической характеристики асинхронного двигателя [122], как показано на рис. 1.3.

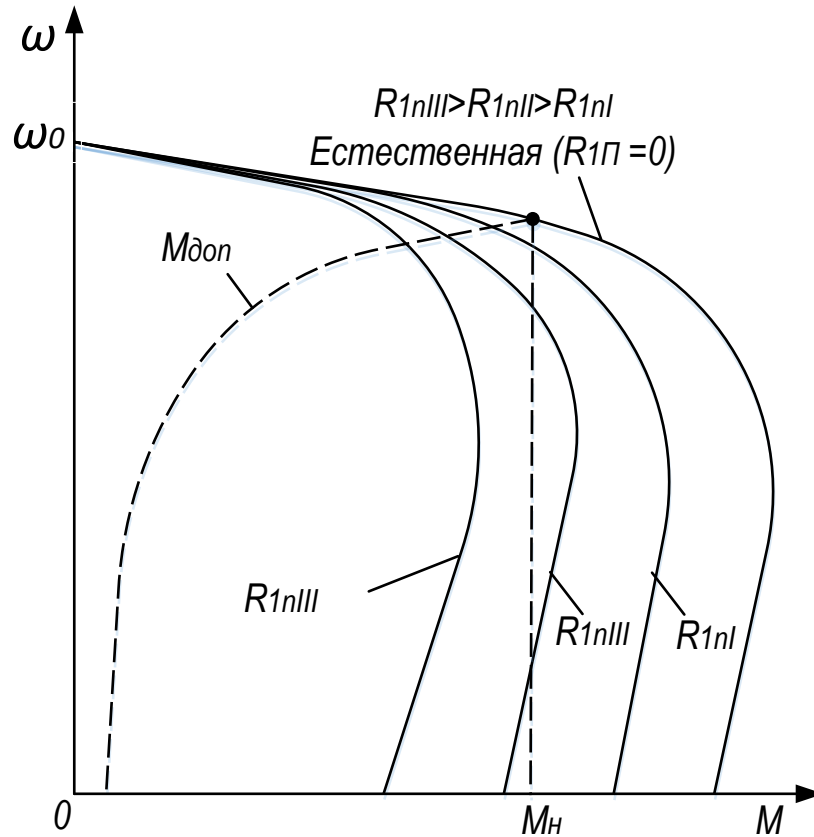


Рис. 1.3. Механические характеристики АД при регулировании скорости изменением сопротивления цепи статора

На рис. 1.3 штриховой линией показана зависимость допустимых нагрузок двигателя при регулировании скорости:

$$M_{доп} = M_{ном} \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0 - \omega}$$

Из полученных выражений можно сделать вывод, что допустимый момент двигателя значительно снижается с уменьшением скорости [122, 150]. В частности, для неподвижного АД $M_{доп} = M_{ном} S_{ном} = (0.03 \div 0.13) M_{ном}$. Поэтому более целесообразно данный метод регулирования применять для двигателей с достаточно большим номинальным скольжением. Помимо этого, необходимо, чтобы по мере уменьшения скорости снижался момент статической

нагрузки, как и $M_{доп}$. В противном случае возникнет необходимость завышения установленной мощности асинхронного двигателя [122, 113].

1.1.2. Параметрическая схема регулирования скорости АД изменением числа пар полюсов

Существует способ регулирования скорости АД путем изменения числа пар полюсов. Этот способ регулирования скорости используется для АД с короткозамкнутым ротором. Его принцип следует непосредственно из выражения для синхронной скорости [58, 72, 108]

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

Переключением обмотки статора производится изменение числа пар полюсов p . При этом число пар полюсов короткозамкнутого ротора изменяется автоматически. Данный способ регулирования обеспечивает ступенчатое регулирование скорости, так как p может быть только целым числом [72,108].

Для осуществления данного способа регулирования (а именно изменения числа пар полюсов) необходимо наличие на статоре нескольких независимых обмоток с различным числом p либо имелась возможность изменения схемы соединений при наличии одной статорной обмотки [108]. При наличии на статоре нескольких обмоток заметно увеличиваются масса и габариты асинхронного двигателя, но при этом возможно практически любое соотношение чисел пар полюсов обмотки. Как правило, такие асинхронные двигатели выполняются с двумя обмотками с соотношением чисел пар полюсов от 3:1 до 12:1.

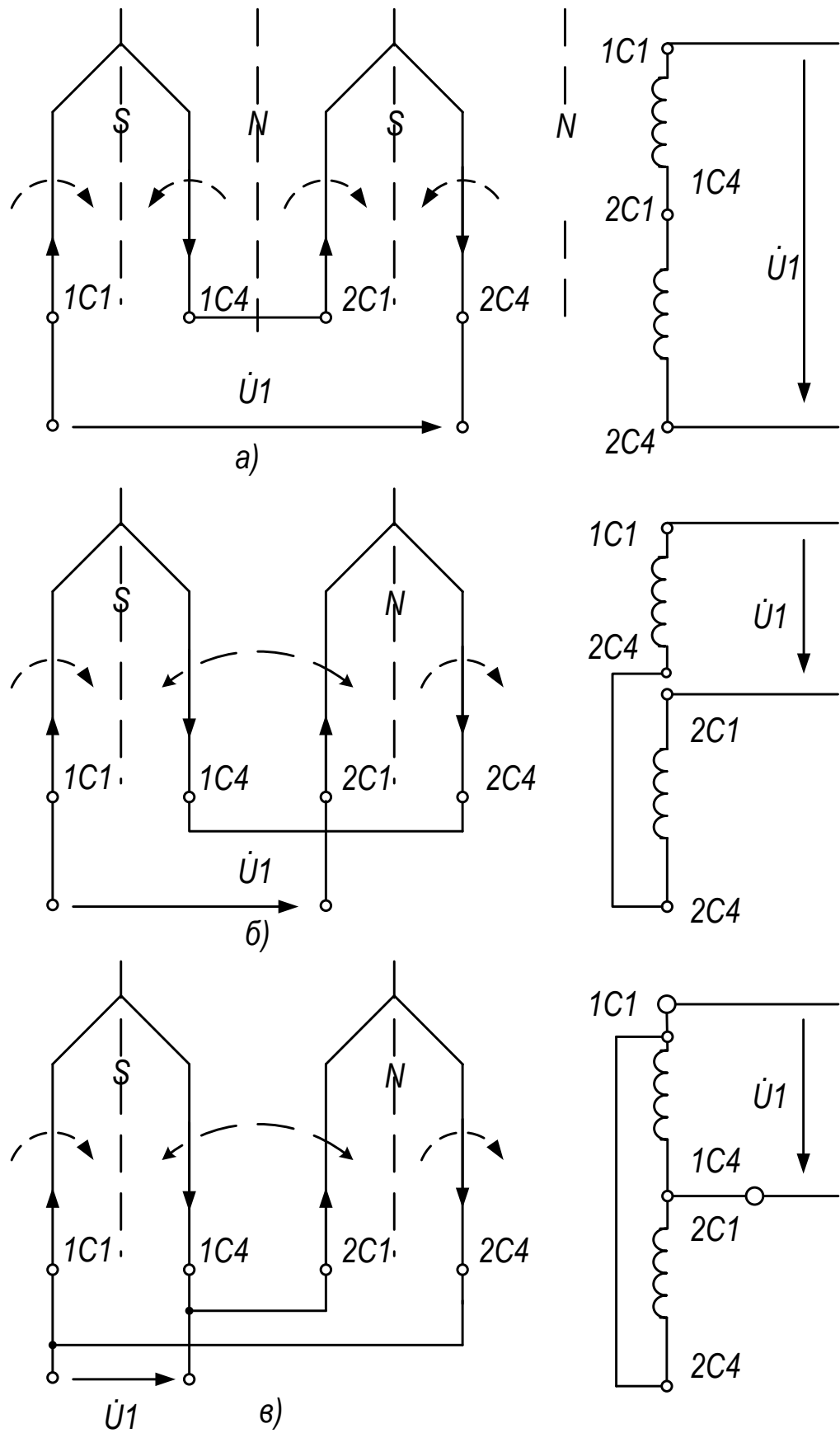


Рис. 1.4. Принципиальные схемы включения секций одной фазы обмотки статора, обеспечивающие изменение числа пар полюсов.

Для оценки свойств двухскоростного АД введем следующие обозначения [72, 108, 122, 134]: p_I – число пар полюсов при последовательно-согласном соединении секций обмотки статора; p_{II} – число пар полюсов при встречном соединении секций обмотки статора; $p_I = 2p_{II}$; $R_{1c}, x_{1c}, R'_{2c}, x'_{2c}$ – активное и индуктивное сопротивления секций обмоток статора и ротора (приведенные к обмотке статора); $\omega_{0I}, \omega_{0II}$ – значения синхронной скорости, соответствующие p_I и p_{II} ; $\omega_{0II} = 2\omega_{0I}$.

Если учесть, что переключение числа пар полюсов оставляет неизменным допустимый ток в секции обмотки статора $I_{1доп} = I_{1ном}$, то можно записать [108, 146]:

$$P_{1доп} = 3U_1 I_{1ном} \cos \varphi_1$$

для схемы рис. 1.4, а

$$P_{п1доп} = 3U_1 I_{1ном} \cos \varphi_{п1}$$

для схемы рис. 1.4, б

$$P_{п2доп} = 3U_1 2I_{1ном} \cos \varphi_{п2}$$

для схемы рис. 1.4, в

Следовательно, при переходе от схемы рис. 1.4, а к схеме рис. 1.4, б (когда встречно включенные секции соединены последовательно) допустимая мощность на валу двигателя не меняется [86, 97, 113] $P_{1доп} = P_{п1доп} (\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_{п1})$, в то время, как переход к схеме 1.4, в (когда встречно включенные секции соединены параллельно) допустимая мощность практически удваивается $P_{п2доп} \approx 2P_{1доп} (\cos \varphi_{п2} \approx \cos \varphi_1)$. При этом допустимый момент на валу двигателя [86, 97, 113]:

$$M_{доп} = \frac{P_{доп}}{\omega_0}$$

при увеличении скорости в первом случае уменьшается вдвое:

$$M_{п1доп} \approx \frac{1}{2} M_{1доп}$$

а во втором случае остается неизменным [72]:

$$M_{\text{п2доп}} \approx M_{\text{Iдоп}}.$$

Таким образом, с уменьшением числа пар полюсов и соответственно с увеличением скорости регулирование скорости при последовательном соединении секций производится с постоянным значением допустимой мощности на валу двигателя (рис. 1.5, а), а при параллельном соединении секций – с постоянным допустимым моментом [34, 72, 84] (рис. 1.5, б).

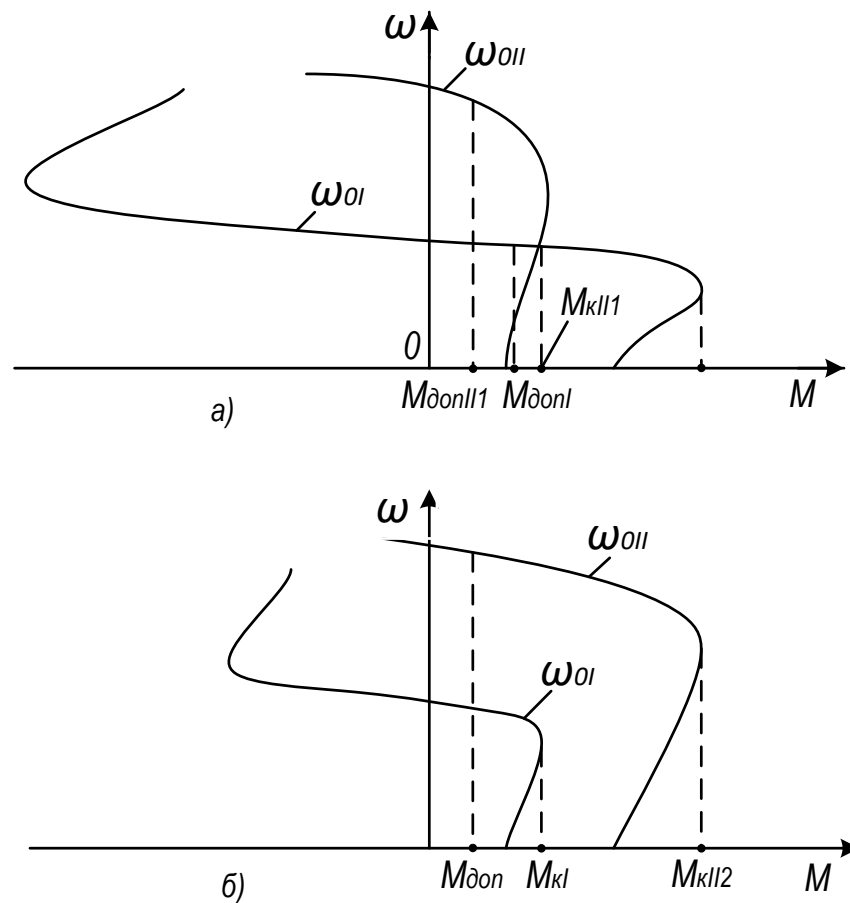


Рис. 1.5. Механические характеристики АД при регулировании скорости изменением числа пар полюсов путем изменения схемы включения обмотки статора в случае перехода от согласно-последовательного включения секций к встречно-последовательному (а) и встречно-параллельному (б).

В случае последовательного соединения секций независимо от числа пар полюсов сопротивления в схеме замещения двигателя не меняются. Из этого следует, что критическое скольжение также остается неизменным, т.е. $S_{k1} = S_{kII1}$, а критический момент снижается вдвое при переходе к встречному включению

последовательно соединенных секций из-за изменения синхронной скорости (рис. 1.5, а). Из этого может быть сделан вывод, что при регулировании скорости в рассмотренном случае сохраняется одинаковая перегрузочная способность асинхронного двигателя [72, 34, 114] (рис. 1.5, а)

$$\lambda_1 = \frac{M_{кI}}{M_{IДOP}} = \frac{M_{кП1}}{M_{П1ДOP}} = \lambda_{П1}$$

При параллельном соединении секций изменяются параметры схемы замещения: при последовательном соединении секций $R_{1I} = 2R_{1c}$; $x_{к1} = 2(x_{1c} + x'_{2c}) = 2x_{кc}$; $R'_{2I} = 2R'_{2c}$, а при параллельном соединении

$$R_{IP2} = \frac{R_{1c}}{2}; x_{кП2} = \frac{x_{кc}}{2}; R'_{2П2} = R'_{2c2}$$

Критическое скольжение не меняется и равно:

$$S_{кП2} = S_{кI} = \frac{R'_{2c}}{\sqrt{R_{1c}^2 + x_{кc}^2}}$$

Критические моменты определяются по формулам:

$$M_{кI} = \frac{3U_1^2}{4\omega_{0I}(R_{1c} \pm \sqrt{R_{1c}^2 + x_{кc}^2})}$$

$$M_{кП2} = \frac{3U_1^2}{\omega_{0П}(R_{1c} \pm \sqrt{R_{1c}^2 + x_{кc}^2})}$$

Так как $\omega_{0II} = 2\omega_{0I}$, то $M_{кП2} = 2M_{кI}$.

В данном случае значение допустимого момента остается неизменным, поэтому полученное выражение позволяет сделать вывод, что с увеличением скорости асинхронного двигателя (при параллельном соединении встречно включенных секций обмотки статора (рис. 1.5, б)) его перегрузочная способность увеличивается в два раза [35, 72, 114, 154].

На основе двухскоростного АД без существенных изменений, меняя лишь схему включения статорных обмоток, можно создать эффективные системы согласованного управления.

1.2. Взаимосвязанные электроприводы, их основные элементы и области применения

Многие производственные механизмы, в которых необходимо обеспечивать согласованную работу нескольких электроприводов, построены на базе систем согласованного вращения. Примерами подобных механизмов могут служить виброплощадки, металлорежущие станки и волочильные станы, многодвигательные насосные станции, грузоподъемные и транспортные механизмы и т.д. Еще одно название таких систем – уравнильные, согласование моментов вращения или скорости в них производится по параметрам самих двигателей в системе [30, 44, 122, 144]. Уравнильные схемы, построенные на базе двигателей переменного тока, в первую очередь, системы классического "электрического вала", используются в рабочих механизмах, требующих синхронного вращения нескольких двигателей, не связанных между собой механически. Подобные системы также применяются, если соотношение скоростей должно быть строго регламентировано, что может быть достигнуто различными передаточными редукторами от привода согласованного вращения [30, 77, 122].

Существует целый ряд вариантов систем электрического вала с различными статическими и динамическими свойствами [117, 126], которые можно выгодно использовать при проектировании. Наряду с этим необходимо также исследовать конструктивные особенности установки, чтобы заранее исключить факторы, вызывающие помехи и неполадки.

1.2.1. Электроприводы с электрической синхронизацией

В настоящее время многодвигательные приводы с механическим валом, обеспечивающим синхронное перемещение нескольких механизмов, повсеместно заменяются приводами, в которых синхронное перемещение обеспечивается системами регулирования, или так называемыми системами электрической

синхронизации [42, 111]. Имеются приводы, к которым наряду с требованием синхронного перемещения предъявляется требование отдельного перемещения механизмов [11, 130, 148]. Для этих целей находили широкое применение электромагнитные муфты, обеспечивающие сцепление двух валов при совместном перемещении и расцепление при отдельной работе. Системы с электромагнитными муфтами также вытесняются системами электрической синхронизации с устройствами, обеспечивающими запоминание взаимного положения механизмов при переходе от отдельной работы к совместной [109, 143].

Приводы с электрической синхронизацией имеют следующие преимущества перед приводами с механическим валом:

1. Уменьшение стоимости установки за счет упрощения механического оборудования и увеличение надежности в работе [133].
2. Более быстрый переход от режима совместной работы к отдельной и наоборот, так как электромагнитные муфты имеют сравнительно большое время включения [21].
3. Улучшенные динамические характеристики привода из-за снижения момента инерции, приведенного к валу двигателя [66, 108].

Если в режиме отдельной работы движение проходило в разных направлениях, то при сцеплении электромагнитной муфты, установленной между валами двигателей, и последующем совместном движении взаимное положение выходных валов механизмов будет отличаться от исходного на значение зазора в механической передаче. В этом случае предъявляются высокие требования к точности изготовления механической передачи, обеспечивающей минимальный зазор [66, 108, 135]. При электрической синхронизации непосредственно на выходных валах механизмов устанавливаются датчики взаимного положения, изменение которого возможно только во время переходного процесса [6, 108, 149].

Примером могут служить механизмы нажимных винтов листовых прокатных станов [101]. Для этих механизмов синхронное перемещение

обеспечивает одинаковую толщину полосы по ширине, и режим раздельной работы вызывается необходимостью правки полосы при неодинаковых технологических параметрах подката по ширине. Система управления строится таким образом, что преимущественным управлением является управление по каналу электрической синхронизации, а не по каналу совместного перемещения [109, 110]. Такое построение системы регулирования обеспечивает синхронное перемещение механизмов в переходных режимах. На рис. 1.6 приведена структурная схема системы регулирования нажимными винтами современного листового прокатного стана [74, 152]. В этой системе каждый двигатель имеет собственную систему регулирования частоты вращения и общий регулятор положения 6, на вход которого подается сигнал задания на перемещение S_{31} , от управляющей машины и регулятора толщины и обратная связь по полусумме перемещений. Такое построение системы исключает противоречие между контуром регулирования положения и контуром электрической синхронизации. Предпочтение управлению по контуру электрической синхронизации обеспечивается тем, что сигнал ошибки ΔS_0 через параболический регулятор синхронизации [10] 5 подается на промежуточный усилитель 2 с коэффициентом усиления k_1 , а сигнал с выхода регулятора частоты вращения 3 ограничен по величине. В этом случае при достаточно больших коэффициентах усиления k_2 и k_1 величина сигнала на выходе регулятора частоты вращения 3 в режиме его насыщения намного меньше приведенного сигнала по контуру синхронизации.

В режиме насыщения регулятора 3 обратная связь по частоте вращения оказывается разомкнутой, поэтому для оптимальной отработки заданий по каналу синхронизации S_{32} вводится сигнал разности частот вращения Δn . Ограничения регулятора 3 и промежуточного усилителя 2 выбираются равными, так что при насыщении регулятора частоты вращения в режиме совместного разгона сигнал ошибки по контуру электрической синхронизации воздействует на снижение частоты вращения одного из двигателей.

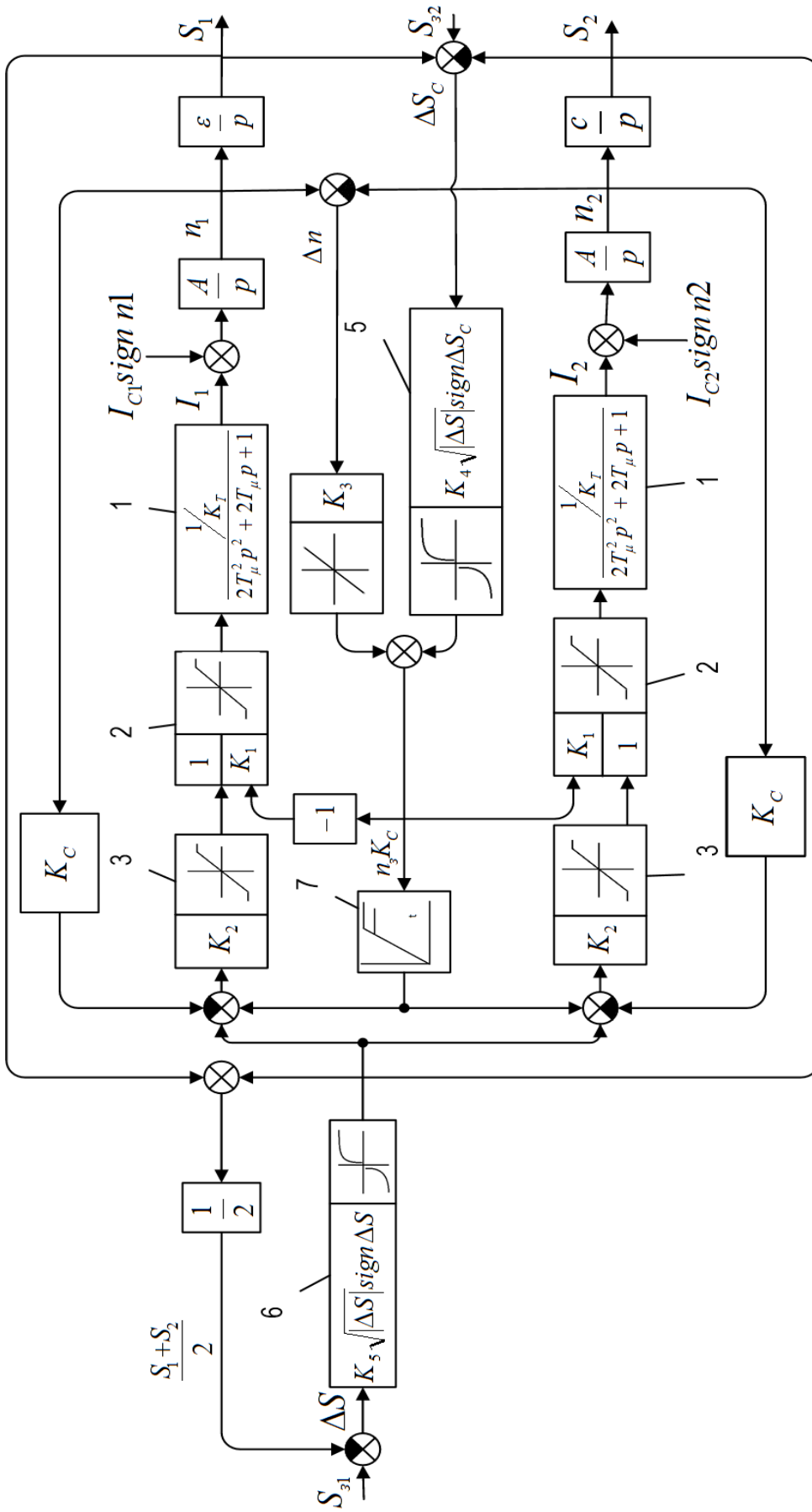


Рис. 1.6. Структурная схема систем регулирования нажимными винтами листовых прокатных станов

1 – контур регулирования тока; 2 – промежуточный усилитель; 3 – регулятор частоты вращения; 4 – регулятор разности частот вращения; 5 – регулятор электрической синхронизации; 6 – регулятор положения; 7 – задачник интенсивности; $\Delta S, \Delta S_c$ – ошибки по положению и синхронизации; $\Delta S_{31}, \Delta S_{32}$ – задания по положению и синхронизации

Ручное управление совместным перемещением осуществляется подачей сигнала на вход регуляторов частот вращения через задатчик интенсивности 7. При этом контур регулятора положения 6 размыкается, и отработанная полусумма положений переносится в память задания S_{31} .

Регуляторы положения и электрической синхронизации выполняются с зоной нечувствительности, исключающей выбор зазора при перерегулировании и протекание тока при неподвижном якоре при наличии реактивного момента сопротивления [109].

1.3. Особенности конструкции и работы судоподъемного комплекса «слип»

На многих отечественных и зарубежных судостроительных (судоремонтных) предприятиях для перемещения судна при спуске на воду и подъеме на сушу используются судоподъемные комплексы типа слип. Вид судоподъемного комплекса «слип» представлен на рис. 1.7 (общий вид) и рис.1.8 (вид сбоку).

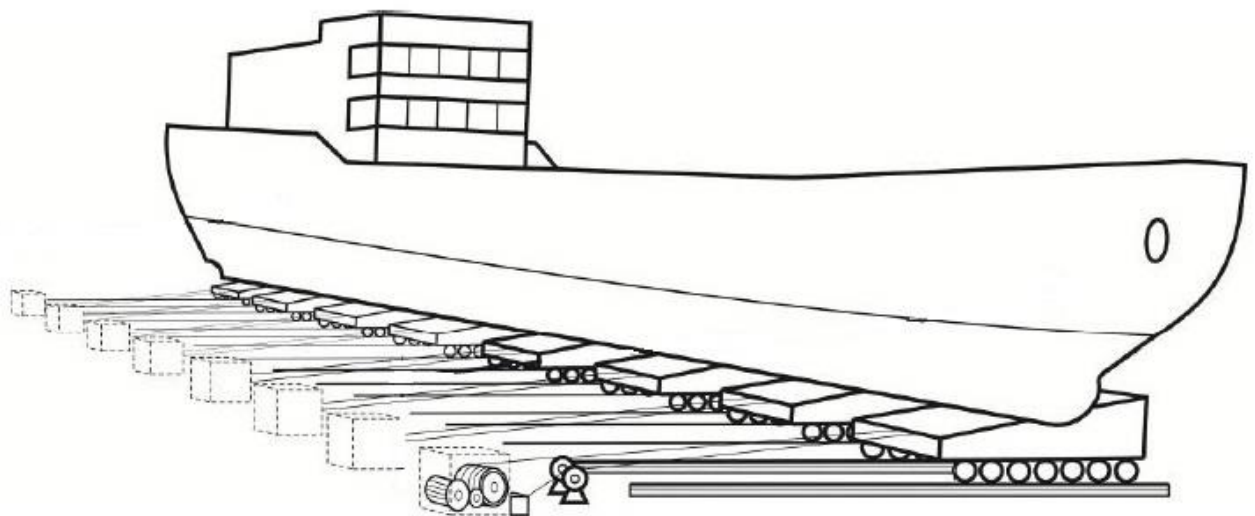


Рис. 1.7. Общий вид судоподъемного комплекса «слип»

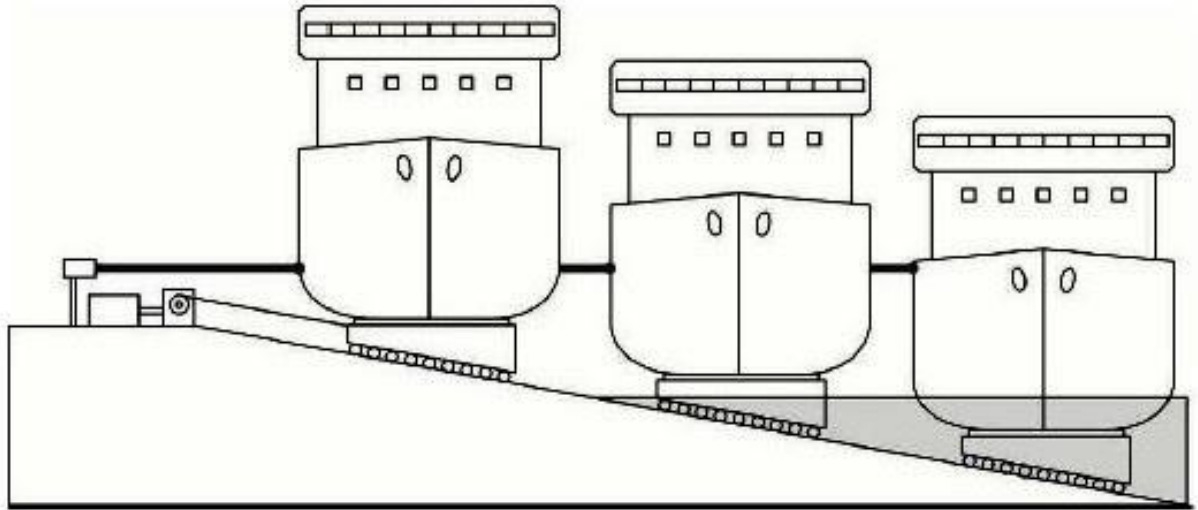


Рис.1.8. Судоподъемный комплекс «слип» (вид сбоку)

Судоподъемный комплекс – это сложная электромеханическая система, для управления которой целесообразно использовать средства автоматизированных систем. На рис.1.9. представлена схема работы слипа.

Для спуска или подъема с помощью слипа судно устанавливается на специальные спусковые косяковые тележки (6), которые передвигаются по рельсовым путям (7), расположенным на наклонной плоскости под углом $6^{\circ} - 10^{\circ}$. Каждая судовозная тележка приводится в движение отдельным электроприводом (1) с помощью стального троса (5). Тележки имеют возможность независимо друг от друга двигаться по рельсам вниз (вверх), при этом основной задачей при спуске (подъеме) судна является согласованное движение судовозных тележек, при котором судно должно равномерно перемещаться с заданной скоростью без перекосов. Затем судно переставляется на стапельные тележки, после чего откатывается на стапельное место. Под судно подводятся боковые клетки и кильблоки, затем с помощью гидравлических домкратов, которые позволяют поднимать судно при его перекладке на постоянные кильблоки, освобождаются тележки [71, 112, 138].

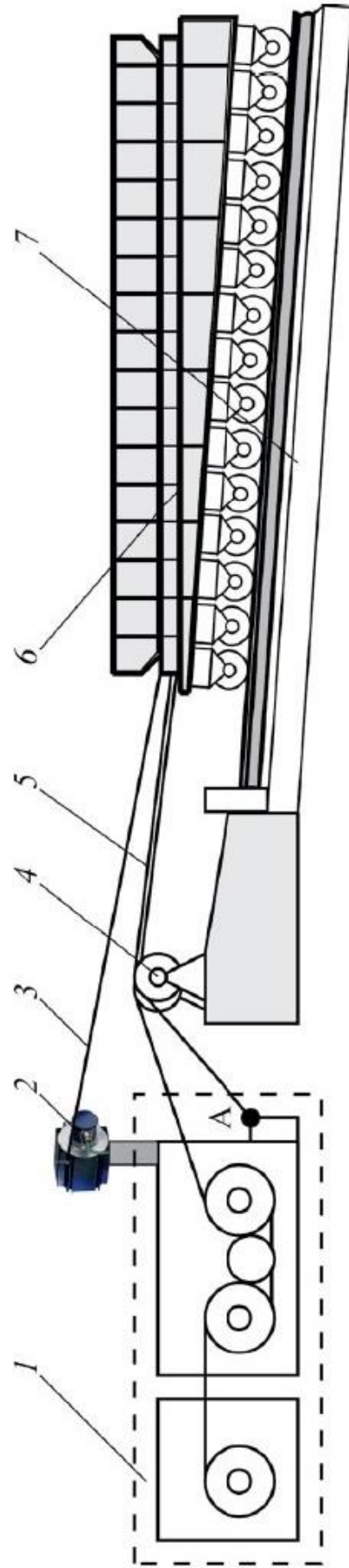


Рис. 1.9. Схема работы слипа: 1 – блок электропривода; 2 – энкодер; 3 – измерительный трос энкодера; 4 – подвижные блоки; 5 – тросы лебедки; 6 – спусковая тележка; 7 – рельсовые пути слипа; А – место расположения датчика натяжения троса

Недостатком всех действующих слипов является отсутствие у лебедок устройств, которые бы показывали действительное тяговое усилие на их канатах и автоматически выключали лебедки при достижении усилий, превышающих установленную величину.

Лебедки производства 60-х годов снабжались специальным динамометрическим устройством на пальце, крепящем коуш обратной ветви каната [68, 95]. При достижении усилия в канате, превышающего допустимое, рычаг на эксцентрике поворачивается и своим упором нажимает на рычаг конечного выключателя, который и отключает электропривод лебедок.

Передача показаний величины тягового усилия в канате и угла поворота рычага эксцентрика коушного пальца на ось контактного рычага переменного сопротивления, соединенного по схеме потенциометра, осуществляется с помощью системы тяг и тросиков.

Величина падения напряжения на переменных сопротивлениях передается на вольтметры, шкалы которых проградуированы в тоннах тягового усилия. Эти вольтметры размещаются на пульте управления и позволяют наблюдать за нагрузками всех лебедок, участвующих в подъеме судна.

При подъеме судна с большим дифферентом группа подъемных тележек, расположенных под кормой, может оказаться загруженной в 1,5—2 раза больше, чем группа носовых тележек. Такая нагрузка подъемных тележек приводит к отставанию группы кормовых и забеганию носовых тележек, т. е. к перекосу оси судна. Так как судно силой трения прочно связано с кильблоками подъемных тележек, то перекося его оси вызывает –перекося осей катков подъемных тележек. При этом возможен сход тележек с рельсов. Удерживают тележки от схода реборды колес, которые передают значительные боковые усилия на головки рельсов. Эти усилия, как правило, приводят к сдвигу всего верхнего строения пути, а часто и к обрыву реборд.

Для своевременного обнаружения перекося судна большинство построенных и эксплуатируемых на предприятиях слипов снабжены специальной

системой, которая передает на пульт управления слипом сигналы либо об абсолютной величине пройденного подъемной тележкой пути, либо о разнице пройденного крайними тележками пути относительно средней подъемной тележки (сигнальные лампочки перекосов и экраны со световыми зайчиками).

Применяемые на слиповых электротехнических комплексах системы указания перекосов [49, 107] подъемных тележек вследствие проскальзывания роликов сельсинов-датчиков, установленных на тяговых тросах лебедок, работают неудовлетворительно.

Чтобы восстановить работу систем указания перекосов подъемных тележек, необходимо перемонтировать узлы сельсинов-датчиков на лебедках.

На гребенчатых слипах и эллингах применяются электродвигатели с фазным и короткозамкнутым ротором.

Принцип работы установки контроля и предупреждения перекосов в процессе подъема судна на слип основан на сравнении скоростей наматывания тросов двух крайних лебедок электропривода.

Для предупреждения перекоса уменьшается число оборотов электродвигателей лебедок забегающего конца судна путем включения, в цепь электродвигателей статорных сопротивлений. Для этого рукоятка переключателя ПР одного или нескольких электродвигателей лебедок устанавливается в положение «повышенное скольжение» [14, 71, 98].

В настоящее время на судоремонтных и судостроительных заводах возникает необходимость в модернизации используемых электротехнических комплексов «слип». При действующем оборудовании слипы не обеспечивают требуемых параметров качественного управления процессами подъема и спуска судов [14, 71, 98]. Недостатки качественного управления электротехническим комплексом «слип» сводятся к основным, касающимся используемого оборудования и средств автоматики. Управление асинхронными двигателями с фазными роторами, которые приводят в движение подъемные тележки, осуществляется на каждом своим командоконтроллером. Управление происходит

только в ручном режиме. Системы управления представляют собой в основном «индикаторную» автоматику, и, в совокупности с применением асинхронных двигателей с фазными роторами в качестве приводных, морально и физически устарели. Известно, что применение асинхронного двигателя с фазным ротором предполагает частого контроля и обслуживания [4, 22, 47, 71, 94]. Слабой частью АД с ФР является токосъемный узел ротора. При выходе из строя роторных обмоток зачастую оказывается нецелесообразным или невозможным ремонт двигателя. В то же время стоимость ремонта АД с ФР может превысить по стоимости замену старого двигателя на АД с короткозамкнутым ротором. В процессе подъема и спуска судна с помощью электротехнического комплекса «слип» запуск ледок производится оператором до максимальной скорости. Корректировку перемещения лебедок оператор производит вручную, визуально и при помощи наблюдателей определяя отклонения перемещения отдельных тележек. Таким образом, влияние человеческого фактора оказывает решающую роль в управлении процессом перемещения сложного объекта при помощи электротехнического комплекса «слип». На практике зачастую происходит значительный перегруз части двигателей, в то время как остальная часть двигателей работает на неполную мощность. [2, 13, 71, 100]. Это связано с неравномерным ходом лебедок, а также ручной корректировкой их перемещения. Эксплуатация лебедок с перегрузкой отрицательно влияет на срок службы приводных механизмов и двигателей.

Одним из возможных способов эффективной модернизации электротехнического комплекса «слип» является замена используемых в качестве приводных электрических двигателей с фазными роторами на АД с короткозамкнутыми роторами [15, 72].

1.4. Анализ работы существующего электротехнического комплекса «слип»

На гребенчатых слипах и эллингах применяются электродвигатели с фазным и короткозамкнутым ротором.

Электропривод подъемных лебедок слипов типа Г-150 осуществляется асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором мощностью 11 кВт при 970 об/мин с повышенным скольжением [26, 55, 124].

Электропривод лебедок обеспечивает:

а) одновременный пуск всех электродвигателей лебедок (для слипов с количеством лебедок до 8) или пуск их двумя группами (для слипов с количеством лебедок свыше 8) с автоматическим включением электродвигателей лебедок второй группы после разгона электродвигателей первой группы;

б) реверс электродвигателей (одновременно всех) с помощью главного переключателя *ПГ* (рис. 1.10);

в) возможность пуска и остановки в отдельности каждого электродвигателя;

г) одновременное (аварийное) отключение электродвигателей всех лебедок при отключении линейного контактора *КЛ* любого из электродвигателей вследствие его перегрузки, обрыва цепи втягивающей катушки линейного контактора и при ошибочном отключении оператором одного из электродвигателей в процессе работы остальных (установка переключателя *ПР* в положение «отключено»);

д) измерение напряжения питающей сети (вольтметром на контакторном щите или пульте управления), тока нагрузки каждого электродвигателя (амперметрами *1А* - *11А*) и суммарного тока каждой группы электродвигателей (амперметрами *1А* и *11А*);

е) сигнализацию: наличия напряжения на шинах контакторного щита контрольной лампой пульта управления (лампа *ЛК*); включения электродвигателей при работе с нормальным и повышенным скольжением (лампы

ЛР и ЛС); аварийной остановки с помощью sireны аварийного сигнала АС с одновременным указанием blinkером 1БЛ - 11БЛ того электродвигателя, который явился причиной аварийной остановки электропривода слипа; предупреждающую о начале работы тяговых лебедок (сирена С);

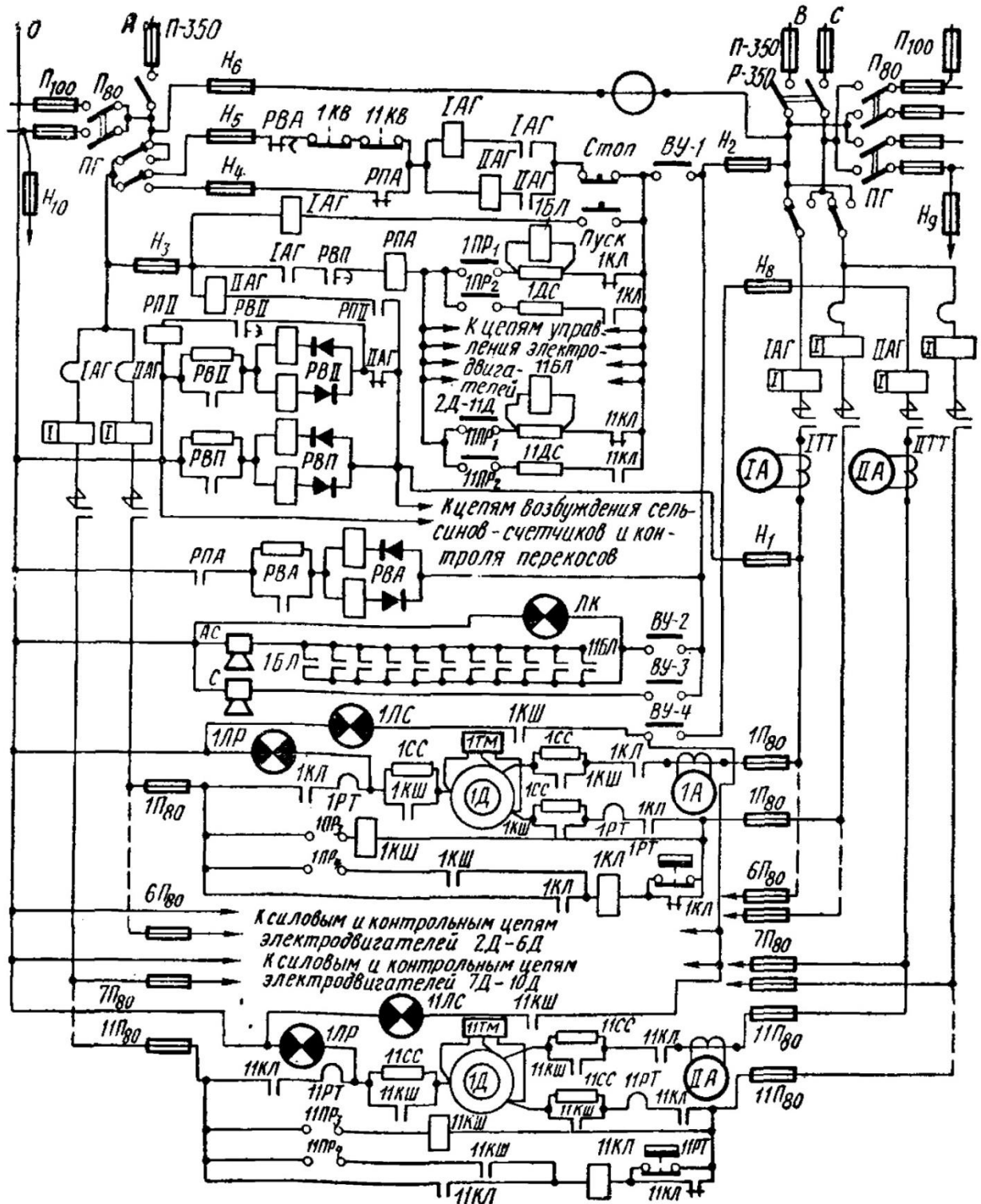


Рис. 1.10. Схема электропривода слипа с одиннадцатью лебедками

ж) защиту: от перегрузки и коротких замыканий каждого электродвигателя с помощью тепловых реле PT линейных контакторов и плавких предохранителей $1П_{80}$ - $11П_{80}$; от коротких замыканий всего электропривода слипа (предохранители $П$ на 350 А); от понижения напряжения питающей сети ниже 85% номинального (минимальные расцепители автоматических выключателей $1АГ$ и $11АГ[151]$);

з) автоматическое отключение всего электропривода слипа при достижении хотя бы одной из подъемных тележек предельного верхнего положения (конечные выключатели $1КВ$ - $11КВ$) [26, 55, 124].

Характеристики отечественных и зарубежных аналогов (взаимосвязанные системы электропривода на базе АД и частотных преобразователей [41, 145] и системы электропривода по типу «электрический вал») приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Сравнительный анализ существующих решений

Параметры	Существующие аналоги		Предлагаемое решение
	Системы «электрического вала»	Взаимосвязанные системы на базе частотных преобразователей	
Ориентировочная стоимость, руб.	40000	50000	17000
Простота конструкции	+	-	+
Энергопотребление	100%	58-63%	60-65%
Весогабаритные показатели	100%	100%	85%
Возможность раздельного управления	-	требует изменения схемы	возможно без изменения схемы
Диапазон согласованного вращения	1:10	1:100	1:10
Надежность	низкая	средняя	высокая

Выводы к главе 1

Существующие схемы построения многодвигательных систем электроприводов, построенные на базе асинхронных машин с фазными и короткозамкнутыми роторами, позволяют производить управление согласованием машин, входящих в систему, по углу поворота вала двигателя или углу рассогласования. Подобные способы регулирования не обеспечивают выполнение задачи согласованного управления с возможностью оперативной корректировки процесса.

Для решения существующих проблем необходимо решить ряд научно-технических задач:

- разработать схемы многодвигательного электропривода, в которых управление согласованием машин, входящих в систему, может быть осуществлено регулированием разности скоростей машин;
- разработать элементы электропривода, обеспечивающие выполнение поставленной задачи (согласованное управление с возможностью оперативной корректировки процесса);
- провести моделирование электроприводов на базе разработанных схем, а также получить результаты моделирования в виде графиков статических и динамических характеристик;
- провести анализ результатов моделирования и корректировку моделируемых электроприводов с целью снижения ошибки рассогласования по скорости;
- провести физическое моделирование на испытательном стенде, сравнить результаты физического и программного моделирования;
- на основе полученных результатов предложить оптимальные варианты построения систем многодвигательного электропривода, регулирование согласованием машин в которых осуществляется посредством управления разностью скоростей.

Схемы построения подобных систем, а также синтез элементов управления этими системами, подробно представлены во 2 и 3 главе. В качестве исполнительной машины предлагается использовать асинхронный двигатель, отличающийся наличием двух комплектов обмоток на статоре. Разделение этих обмоток на рабочую и обмотку согласования позволяет создать эффективную многодвигательную систему электропривода, работающую на общую нагрузку. Выравнивание скоростей машин, входящих в систему, будет осуществляться в автоматическом режиме за счет протекания по обмоткам согласования уравнивающих токов.

2. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ И СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

2.1. АД с двумя комплектами статорных обмоток – элемент (звено) параметрической схемы

В качестве исполнительных электрических машин в рассматриваемых системах предлагается использовать асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами, имеющие на статоре два комплекта обмоток. Наиболее близким аналогом можно считать двухскоростные асинхронные двигатели (ДСАД). В условиях реальной эксплуатации ДСАД используются в основном для работы на двух механических характеристиках. Переключение секций фазных обмоток позволяет осуществлять изменение режима работы двигателя [27, 31], таким образом, меняя скорость его вращения. При этом нет необходимости в применении силовых электронных устройств: регуляторов напряжения и преобразователей частоты. В то же время возникает необходимость регулирования частоты вращения ДСАД в ограниченном диапазоне в области основных механических характеристик. Наличие на статоре ДСАД двух комплектов равнозначных обмоток дает возможность эффективного управления двигателем за счет изменения схемы включения этих обмоток (рис.2.1) [27, 31].

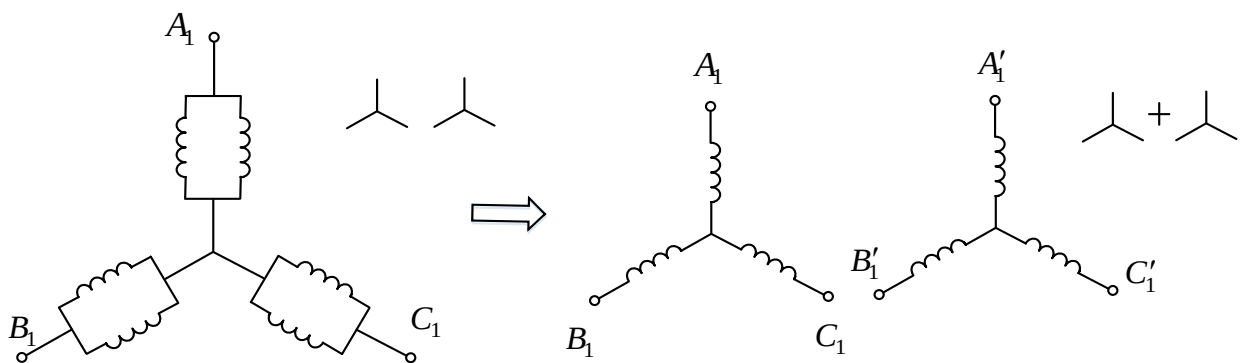


Рис.2.1. Схема включения обмоток статора двигателя

В этом случае один комплект статорных обмоток служит для питания ДСАД (A_1, B_1, C_1), а второй комплект обмоток (A'_1, B'_1, C'_1) можно использовать для регулирования его скорости [27, 31].

Для анализа работы ДСАД составлена схема замещения. Для этого использовался метод комплексных амплитуд [4, 52, 105]. Комплексные уравнения, связывающие потокосцепления, токи и напряжения, принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1.1} &= R_{1.1} \dot{I}_{1.1} + j\omega_0 \dot{\Psi}_{1.1} \\ \dot{U}_{1.2} &= R_{1.2} \dot{I}_{1.2} + j\omega_0 \dot{\Psi}_{1.2} = Z \dot{I}_{1.2} \\ \dot{U}_2 &= 0 = R_2 \dot{I}_2 / S + j\omega_0 \dot{\Psi}_2 \\ \dot{\Psi}_{1.1} &= (L_M + L_{1.1\sigma}) \dot{I}_{1.1} + L_M (\dot{I}_{1.2} + \dot{I}_2) \\ \dot{\Psi}_{1.2} &= (L_M + L_{1.2\sigma}) \dot{I}_{1.2} + L_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_2) \\ \dot{\Psi}_2 &= (L_M + L_{2\sigma}) \dot{I}_2 + L_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_{1.2}) \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

где $\dot{U}_{1.1}$, $\dot{U}_{1.2}$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_{1.1}$, $\dot{I}_{1.2}$, $\dot{I}_2$, $\dot{\Psi}_{1.1}$, $\dot{\Psi}_{1.2}$, $\dot{\Psi}_2$ - векторы напряжения, тока и потокосцепления первого и второго комплектов статорных обмоток и роторной обмотки соответственно; S - скольжение; ω_0 - угловая скорость поля статора; Z - внешняя нагрузка на второй комплект статорных обмоток.

Принимая во внимание равенство параметров статорных обмоток ($R_{1.1} = R_{1.2}$, $L_{1.1\sigma} = L_{1.2\sigma}$), а так же исключая из рассмотрения $\dot{\Psi}_{1.1}$, $\dot{\Psi}_{1.2}$, $\dot{\Psi}_2$, можно преобразовать систему уравнений (2.1) [39]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{U}_{1.1} &= (R_1 + jX_{1\sigma}) \dot{I}_{1.1} + jX_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_{1.2} + \dot{I}_2) \\ \dot{U}_{1.2} &= (R_1 + jX_{1\sigma}) \dot{I}_{1.2} + jX_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_{1.2} + \dot{I}_2) = Z \dot{I}_{1.2} \\ \dot{U}_2 &= 0 = \left(R_2 / S + jX_{2\sigma} \right) \dot{I}_2 + jX_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_{1.2} + \dot{I}_2) \end{aligned} \right. \quad (2.2)$$

где $X_M = \omega_0 L_M$ - индуктивное сопротивление намагничивающего контура; $X_{1\sigma} = \omega_0 L_{1\sigma}$ - индуктивное сопротивление рассеивания фазы статора; $X_{2\sigma} = \omega_0 L_{2\sigma}$ - индуктивное сопротивление рассеивания фазы ротора.

На основании системы уравнений (2.2) построена схема замещения ДСАД.

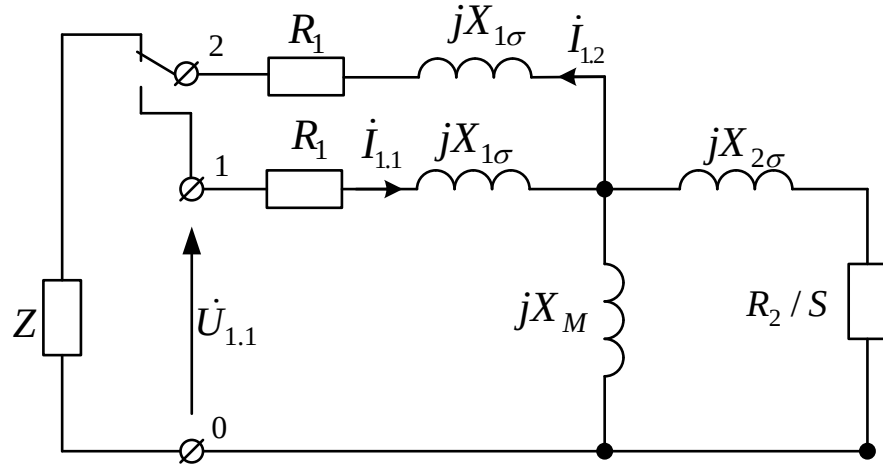


Рис.2.2. Схема замещения ДСАД

Далее более подробно рассмотрены уравнения, описывающие второй комплект статорных обмоток. Если нагрузка отсутствует, то ток по второму комплекту статорных обмоток не протекает ($\dot{I}_{1.2} = 0$). В этом случае, опираясь на систему уравнений (2.2), получим:

$$\Psi_{1.2} = L_M(\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_2); \quad \dot{U}_{1.2} \rightarrow \dot{E}_{1.2} = j\omega_0 \Psi_{1.2} \quad (2.3)$$

С учетом (2.2 - 2.3) получим:

1) в режиме холостого хода ($S \approx 0$) ЭДС второго комплекта статорных обмоток будет определяться соотношением:

$$E_{1.2XX} = \dot{U}_{1.1} \frac{jX_M}{R_1 + j(X_M + X_{1\sigma})}$$

2) в режиме торможения двигателя $S = 1$, в этом случае ЭДС примет вид:

$$\dot{E}_{1.2K3} = \dot{U}_{1.1} \frac{jX_M X_{2\sigma}}{(R_1 + jX_{1\sigma})(X_M + X_{2\sigma}) + jX_M X_{2\sigma}}$$

В процессе экспериментальных исследований двигателя было получено: $E_{1.2XX} \approx 0.5U_{1.1}$; $E_{1.2K3} \approx 0.05U_{1.1}$. В этом случае зависимость $E_{1.2} = f(n)$ примет вид:

$$E_{1.2} = (0.05 + 0.45(1 - S))U_{1.1} \quad (2.4)$$

Исходя из схемы замещения (рис.2.2) можно сделать вывод, что есть возможность регулирования скоростью ДСАД через второй комплект статорных обмоток [39]:

- параметрическим способом (при изменении сопротивления Z);

- регулированием напряжения, подаваемого на второй комплект статорных обмоток.

Для расчета и анализа статических характеристик АД пользуются упрощенной схемой замещения (пренебрегая цепью намагничивания) [25, 63, 90]. При работе вращающимся магнитным полем передается электромагнитная мощность ротору двигателя $P_{эм} = M\omega_0$, которая тратится на электрические потери в роторе $\Delta P_{эл2} = 3I_2^2 R_2$ а также создание механической мощности $P_M = M\omega$ [63]. Из последних уравнений получено соотношение:

$$M = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_0 S} \quad (2.5)$$

В соответствии с упрощенной схемой замещения двигателя (не учитывая второй комплект статорных обмоток) получим:

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{S}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}} \quad (2.6)$$

По соотношениям (2.5 - 2.6) составлена формула [63] для нахождения момента АД:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2 / S}{\omega_0 \left[\left(R_1 + R_2 / S \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2 \right]} \quad (2.7)$$

По аналогии, с учетом формулы (2.4) можно получить уравнения статических механических характеристик ДСАД. Второй комплект статорных обмоток можно включить в двух предельных режимах (рис.2.2):

- 1) при соединении точки (2) с точкой (1) сопротивление Z отсутствует. Такое соединение соответствует режиму «двойной звезды»;
- 2) при соединении точки (2) точкой (0) соединение соответствует режиму «подтормаживания».

Для таких включений уравнения механических характеристик примут вид [39]:

$$M_1 = \frac{3U_1^2 R_2 / S}{\omega_0 \left[\left(\frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + \left(\frac{X_{1\sigma}}{2} + X_{2\sigma} \right)^2 \right]} \quad (2.8)$$

$$M_2 = \frac{3U_1^2 R_2 / S}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{(2-S)R_2}{S} \right)^2 + (X_{1\sigma} + (2-S)X_{2\sigma})^2 \right]} \quad (2.9)$$

На основании зависимостей (2.7-2.9) построены механические характеристики (рис.2.3).

Проанализировав графики (рис. 2.3) можно сделать вывод, что [39]:

- при включении режима «двойной звезды» критический и пусковой моменты будут наибольшими;
- при включении режима «звезды» (при отключении второго комплекта статорных обмоток) критический и пусковой моменты будут в 1,5 раза меньше, критическое скольжение также уменьшится примерно втрое;
- при включении режима «подтормаживания» пусковой момент будет соответствовать режиму «звезда». Это можно объяснить тем, что при нулевой скорости ЭДС обмотки близко к нулю, в этом случае тормозной момент создаваться не будет.

В рассмотренном случае принималось, что в схеме действует активная нагрузка на второй комплект статорных обмоток ($Z = R$). Однако, есть возможность использовать реактивную нагрузку, в частности емкостную ($Z = -j/\omega_0 C$). Последовательное с обмоткой двигателя включение емкостной нагрузки позволит изменять режим работы и его характеристики. Проанализировав режим включения емкостной нагрузки, было получено приближенное уравнение механических характеристик ДСАД. В расчетах принято условие $\omega_0 L_{1\sigma} = 1/\omega_0 C$. Для режима подключения второго комплекта статорных обмоток через емкости к сети уравнение механической характеристики примет следующий вид [39]:

$$M_{1c} \approx \frac{\frac{3U_1^2 R_2}{S}}{\omega_0 \left[\left(\frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + X_{2\sigma}^2 \right]} \quad (2.10)$$

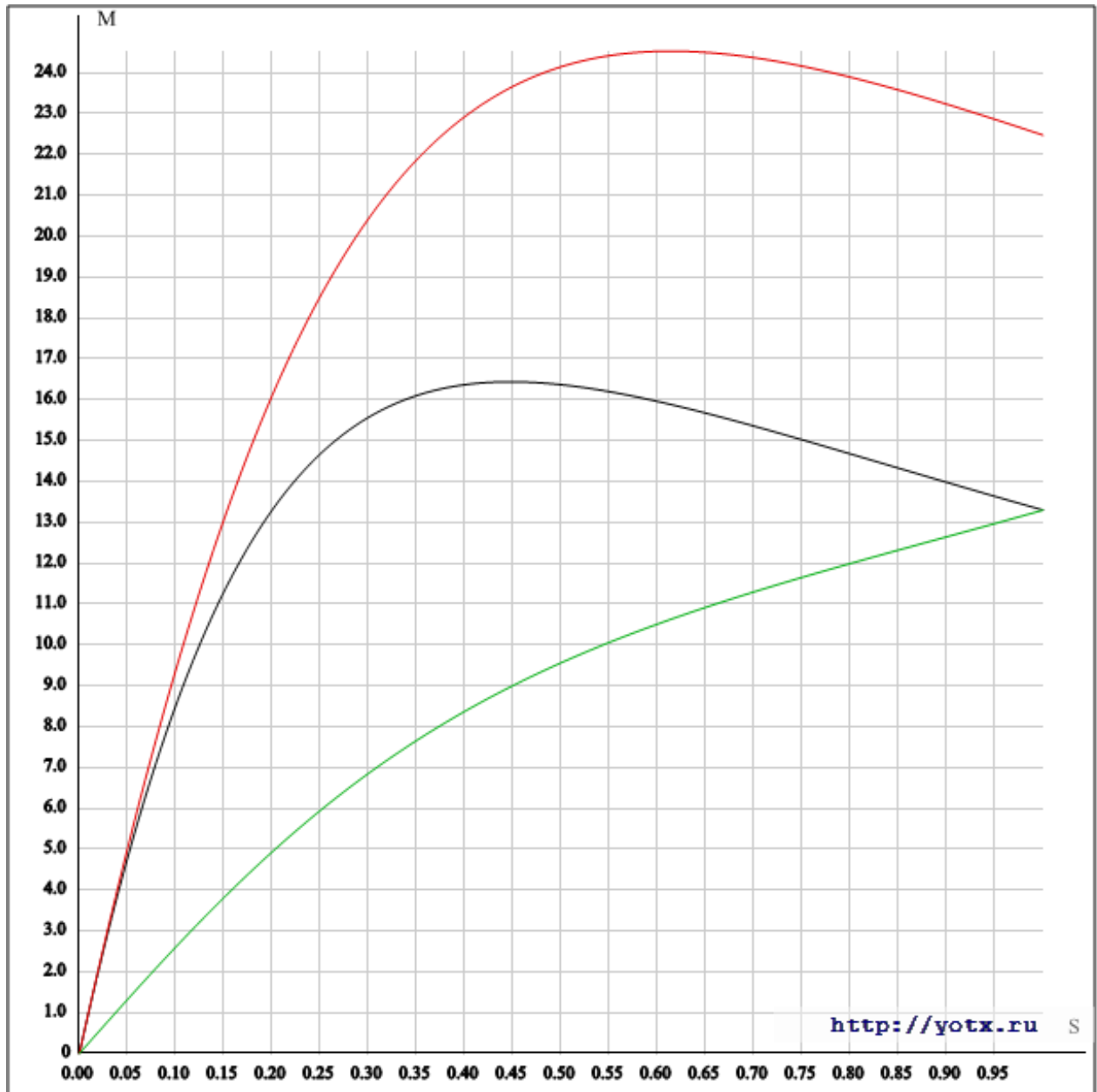


Рис. 2.3. Механические характеристики ДСАД в предельных режимах

(— двойная звезда; — звезда; — «подтормаживание»)

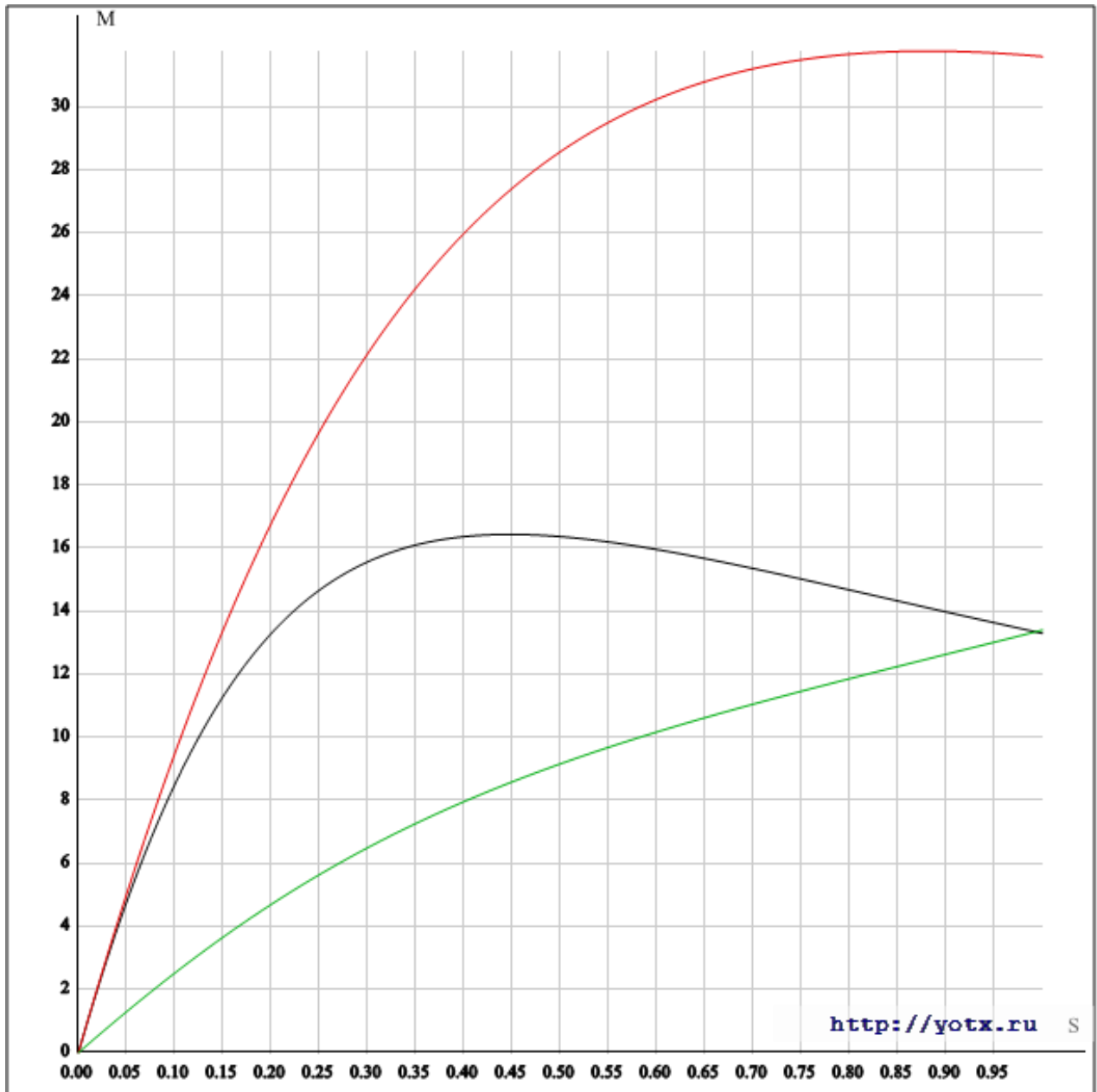


Рис. 2.4. Механические характеристики ДСАД в предельных режимах при $Z = -j/\omega_0 C$

(— двойная звезда (C); — звезда; — «подтормаживание»)

Для режима «подтормаживания» при включении емкостей выражение механической характеристики примет вид [39]:

$$M_{2c} \approx \frac{\frac{3U_1^2 R_2}{S}}{\omega_0 \left[\left(1.5R_1 + \frac{(2-S)R_2}{S} \right)^2 + ((2.5-S)X_{2\sigma})^2 \right]} \quad (2.11)$$

По уравнениям (2.7, 2.10, 2.11) построены механические характеристики (рис. 2.4). Проанализировав графики (рис. 2.4) можно сделать вывод, что [39]:

- в режиме «двойная звезда» при включении емкостей в цепь второго комплекта статорных обмоток пусковой момент в 2,5 раза выше по сравнению со схемой «звезда» [39];
- при закорачивании второго комплекта статорных обмоток через конденсаторы пусковой момент остается таким же, как в схеме «звезда».

На основе систем уравнений (2.1, 2.2) построена векторная диаграмма ДСАД (рис. 2.5). На диаграмме вектор тока намагничивания равен сумме векторов токов статорных и роторной обмоток

$$\dot{I}_M = \dot{I}_{1.1} + \dot{I}_{1.2} + \dot{I}_2$$

Уравнения для определения векторов потокоцепления [39]:

$$\dot{\Psi}_{1.1} = \dot{\Psi}_M + \dot{\Psi}_{1.1\sigma}$$

$$\dot{\Psi}_{1.2} = \dot{\Psi}_M + \dot{\Psi}_{1.2\sigma}$$

$$\dot{\Psi}_2 = \dot{\Psi}_M + \dot{\Psi}_{2\sigma}$$

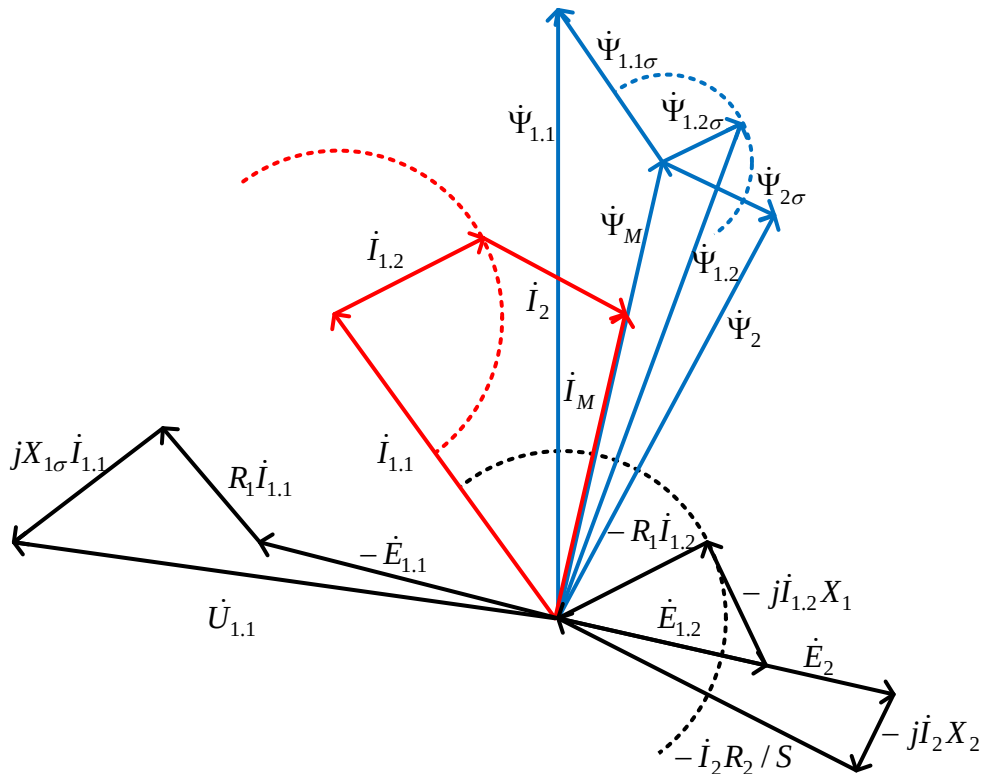


Рис. 2.5. Векторная диаграмма ДСАД

На векторной диаграмме пунктирными линиями показаны возможные изменения направления вектора тока $\dot{I}_{1,2}$, что делается возможным путем изменения характера нагрузки (Z) на второй комплект статорных обмоток [39].

На рис.2.6 представлена схема системы управления асинхронным двигателем по второму комплекту статорных обмоток. На схеме цифрой 1 обозначен первый комплект статорных обмоток, подключенный к питающей сети 2, цифрой 2 – второй комплект статорных обмоток, подключенный к регулятору 4. Схема работает следующим образом: регулятор 4 изменяет ток во втором комплекте трехфазных обмоток 3, что приводит к изменению скорости асинхронного двигателя. Это позволяет заменить ступенчатое регулирование частоты вращения на плавное регулирование в заданном диапазоне [39].

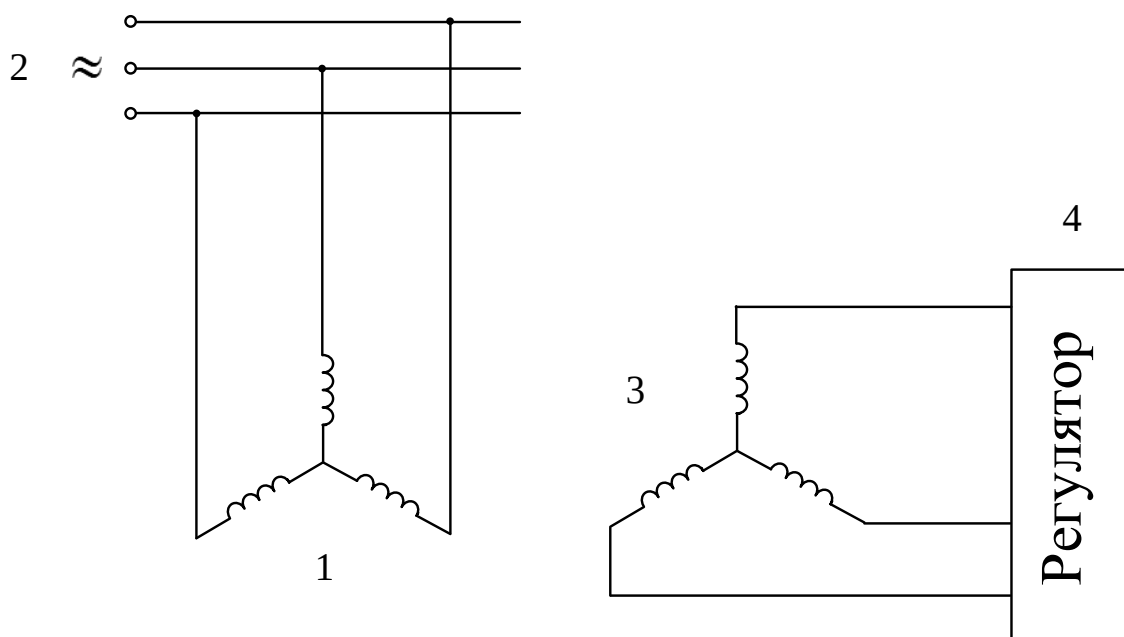


Рис.2.6. Функциональная схема системы управления ДСАД

2.2. Электропривод с пассивным режимом управления

Переключение числа пар полюсов обмотки статора асинхронного двигателя приводит к изменению характера вращающегося поля. На этом принципе основан способ регулирования скорости асинхронного двигателя [20, 78]. Регулирование скорости трехфазного асинхронного двигателя таким

способом осуществляется при наличии на статоре, по меньшей мере, еще одной трехфазной обмотки. При этом изменение характера вращающего магнитного поля производится путем отключения части одной из статорных обмоток, придавая одному из вращающихся в двигателе магнитных полей эллиптический характер.

На рис.2.7 показан способ подключения к источнику напряжения катушек обмотки статора трехфазного АД при неподвижном роторе [20, 78].

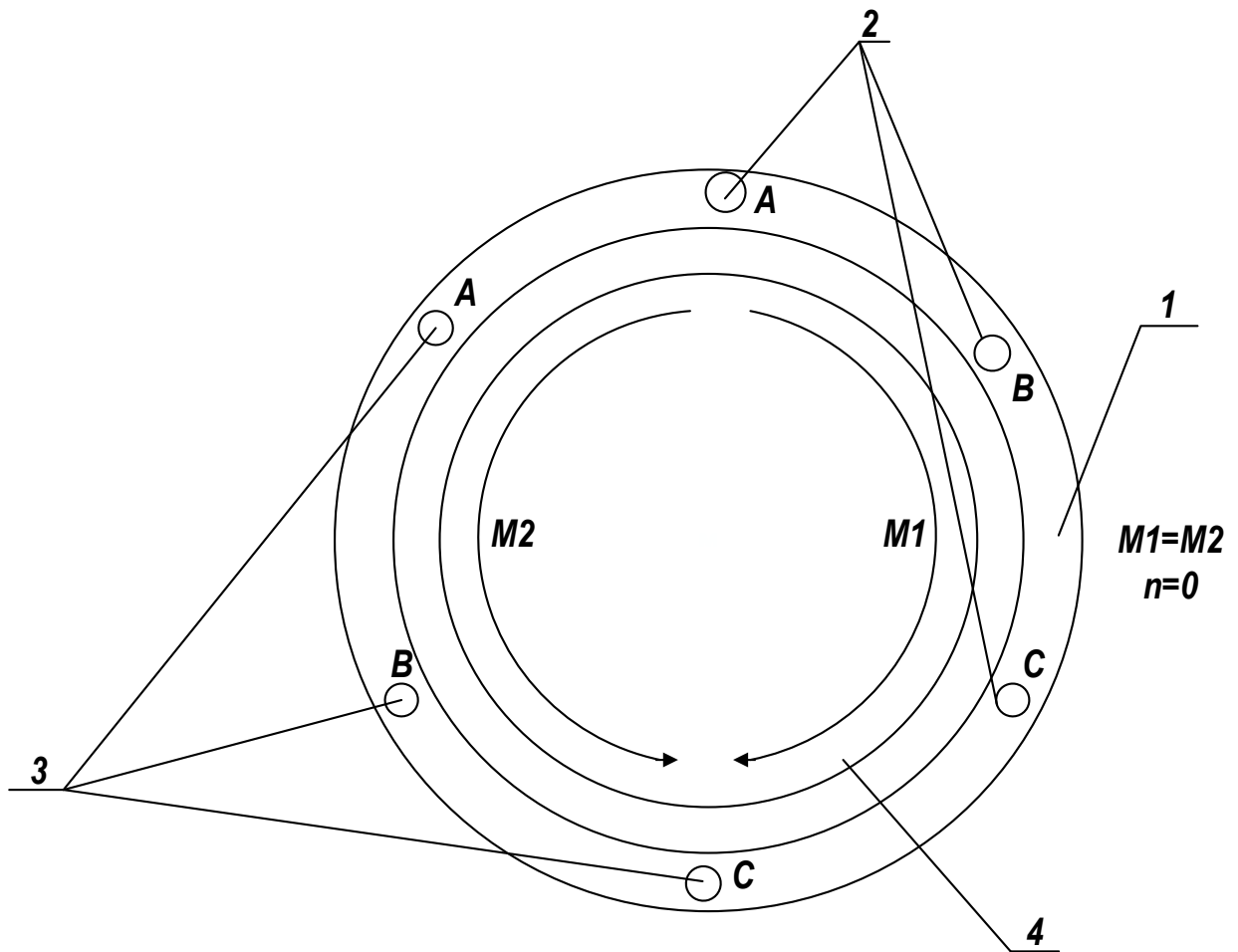


Рис.2.7. Способ подключения к источнику напряжения катушек обмотки статора трехфазного АД при неподвижном роторе

Рис.2.7 схематично отображает конструкцию АД: статор, вращающий магнитопровод с размещенными на нем катушками трехфазных обмоток. Буквами *A*, *B* и *C* обозначены фазы источника напряжения. Ротор (как

правило, с короткозамкнутой обмоткой) расположен во внутренней расточке статора.

На рис.2.8 показана схема подключения к источнику напряжения катушек обмоток статора АД через коммутирующее устройство. На схеме представлено коммутирующее устройство (5), через которое катушки обмоток подключаются к источнику напряжения [20, 78].

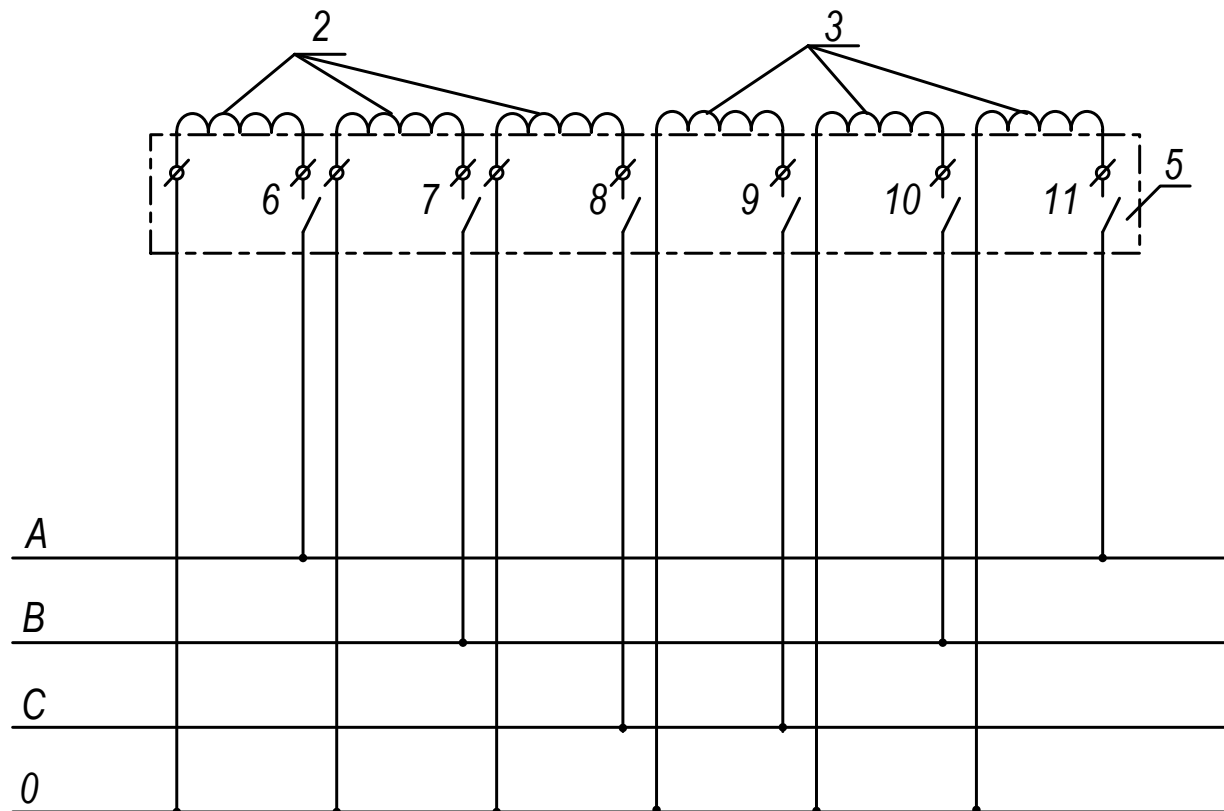


Рис.2.8. Схема подключения к источнику напряжения катушек обмоток статора АД через коммутирующее устройство

Замыкание контактов коммутирующего устройства 6, 7, 8, 9, 10 и 11 происходит в случае, если катушки обмотки 2 и 3 подключены к источнику напряжения в порядке следования фаз, который показан на рис.2.7. Эти обмотки включаются так, что одна половина длины внутренней расточки статора представляет собой обратный порядок следования фаз (C, B, A), а вторая половина – прямой (A, B, C). Таким образом, создаются два

равнозначных круговых вращающихся магнитных поля, которые направлены навстречу друг другу. Эти поля, пересекаясь с обмоткой ротора, наводят в ней токи и ЭДС. Роторные токи, в свою очередь, индуцируют уравнивающие друг друга и равные по величине моменты M_1 и M_2 . При этом ротор АД остается неподвижен.

Для отключения одной из катушек обмотки статора 3 (к примеру, катушки, соединенной с фазой А), необходимо при помощи коммутирующего устройства разомкнуть контакт 11. При этом обмотка 2 будет по-прежнему создавать круговое вращающееся магнитное поле, а поле на оставшихся катушках обмотки 3 примет эллиптическую форму [20, 78, 131]. Так же, как и в первом случае, эти поля, пересекаясь с обмоткой ротора, наведут в ней токи и ЭДС. Взаимодействие роторных токов с круговым полем обмотки 2 создаст момент M_1 , такой же по величине, как и ранее. В то время, как взаимодействие роторных токов с эллиптическим полем обмотки 3 создаст момент M_2 , который меньше момента M_1 , встречно ему направленного. Разность моментов M_1 и M_2 заставит ротор медленно вращаться.

Регулирование скорости АД происходит следующим образом: при помощи коммутирующего устройства все катушки трехфазной обмотки 3 отключаются от источника напряжения, размыкая контакты 9-11. Таким образом, к источнику напряжения остается подключенной только статорная обмотка 2. При этом обмотка 2 будет по-прежнему создавать круговое вращающееся магнитное поле, которое, пересекая роторную обмотку, наводит в ней токи и ЭДС. Роторные токи индуцируют момент M_1 , под действием которого ротор будет вращаться [20, 78].

На базе описанной схемы включения обмоток двигателя в процессе исследования был разработан коммутатор-регулятор, схема которого представлена на рис. 2.9. На схеме первый комплект статорной обмотки подключен к сети переменного тока, а второй комплект, в зависимости от требуемого режима работы схемы, может быть подключен к сети через

коммутатор-регулятор 4. Ко вторым концам обмотки 2 через выпрямитель подключен реостат 5, с помощью которого можно регулировать токи, протекающие через обмотку. Таким образом, есть возможность регулирования механической характеристики в диапазоне между режимами звезда и двойная звезда (рис. 2.3) [22, 39].

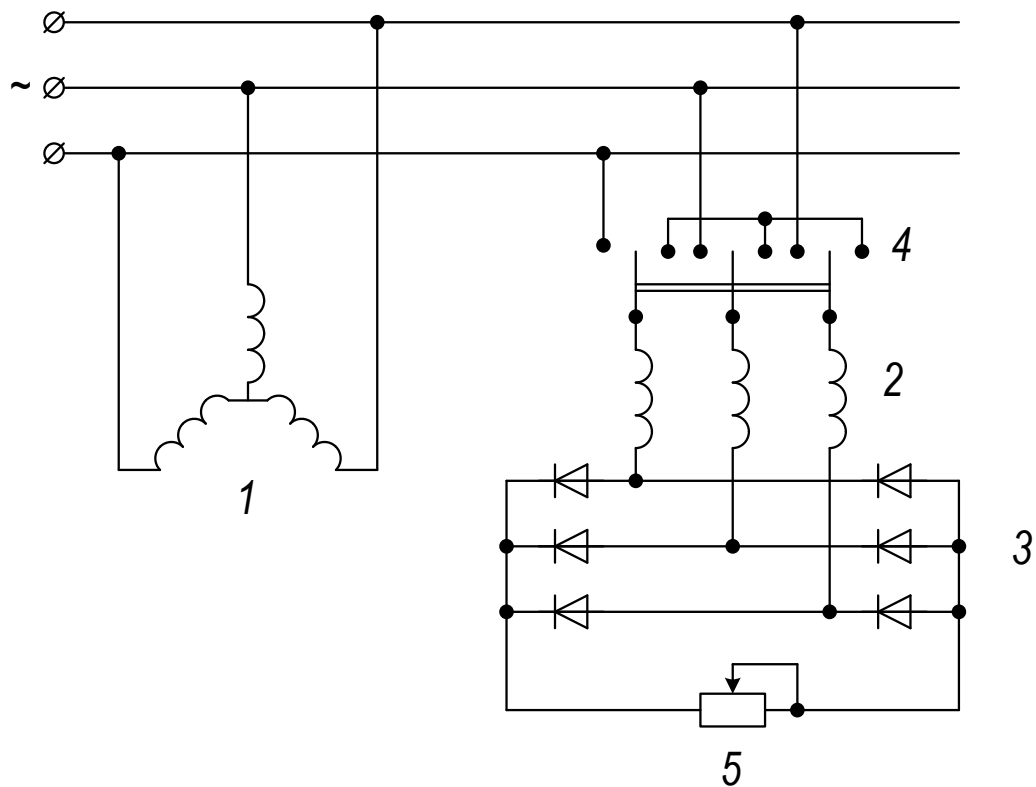


Рис. 2.9. Схема коммутатора-регулятора

Переключение коммутатора позволяет отключить от сети и замкнуть второй комплект статорной обмотки. Таким образом, возможно регулирование механической характеристики в диапазоне от звезды до подтормаживания (рис. 2.3).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- разделение статорных обмоток АД на два комплекта делает возможным создание автоматизированной параметрической системы управления с широкими функциональными возможностями;
- включение конденсаторных батарей в цепь второго комплекта статорных обмоток обеспечивает увеличение пускового момента на 25-30% (рис. 2.3, 2.4);

- пусковой момент схемы звезда сохраняется и в режиме подтормаживания;
- по полученным уравнениям механических характеристик, схеме замещения и векторной диаграмме можно провести анализ различных режимов работы предлагаемой системы;
- предлагаемая схема управления, в сравнении с другими схемами параметрического регулирования АД, имеет ряд преимуществ [22, 39].

2.3. Исследование «пассивного» взаимосвязанного электропривода

Существует большое количество систем регулирования и стабилизации скорости асинхронного двигателя [3,4, 22, 65, 116]. Скорости нескольких АД возможно согласовывать созданием астатических систем, применением перекрёстных связей, а также другими способами. В этих случаях возможно достижение высокой точности и широкого диапазона регулирования. Подобные способы построения таких систем требуют использования датчиков координат (в частности датчиков скорости), а также регулируемых преобразователей. Однако, на практике большое количество систем электропривода не требует высокой точности и широкого диапазона регулирования [121, 132], поэтому в данном случае более целесообразным будет использование параметрических систем электропривода, отличающихся простотой и не требующих использования дополнительных датчиков и преобразователей. Выше была рассмотрена параметрическая система управления скоростью АД, имеющего два комплекта независимых и равноценных статорных обмоток, соединенные каждая в звезду. Первый комплект статорных обмоток подключается к сети, при этом на втором комплекте обмоток наводится ЭДС, пропорциональная скорости вращения двигателя.

При таком включении асинхронного двигателя возможно создание на его основе систем электроприводов, согласованных по скорости. Рис.2.10.

иллюстрирует включение статорных обмоток электрических двигателей, входящих в такую систему [3, 4, 22].

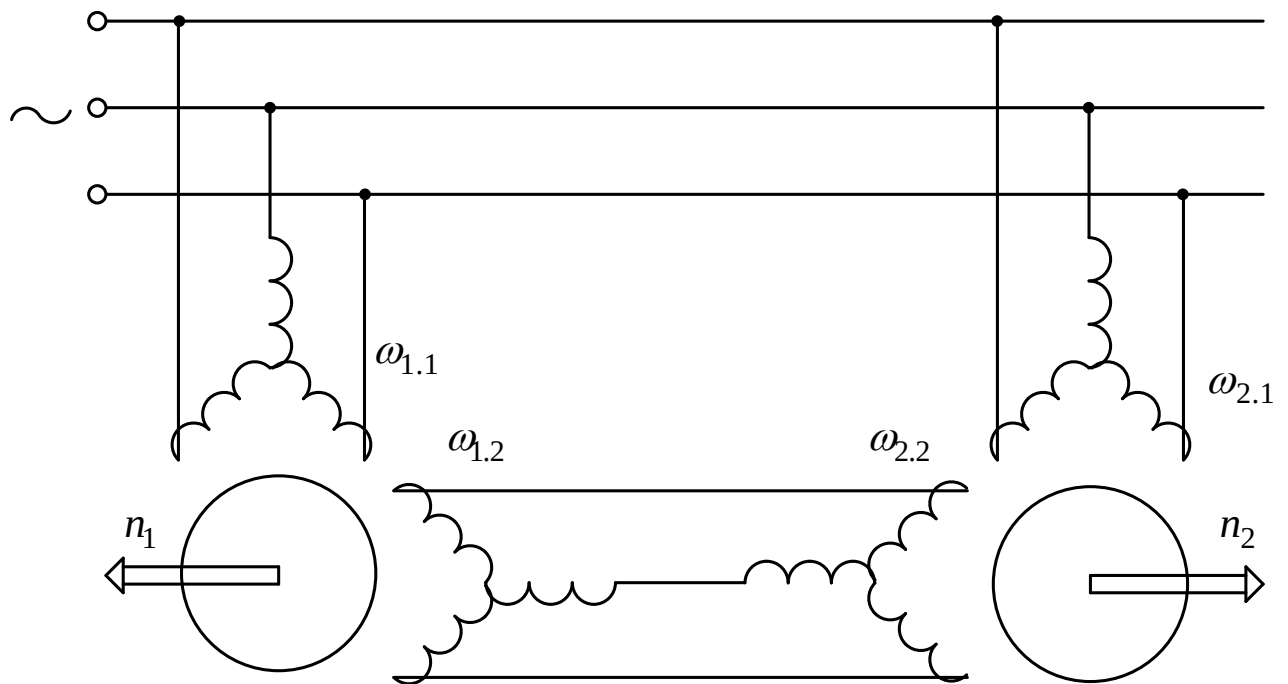


Рис. 2.10. Схема включения статорных обмоток двигателей, входящих в систему

Если двигатели работают с одинаковыми скоростями вращения ($n_1 = n_2$), ЭДС на обмотках согласования $\omega_{1.2}$ и $\omega_{2.2}$ так же равны ($E_1 = E_2$), и токи по линиям связи между этими обмотками не протекают. Как только меняется скорость одного из двигателей, входящих в систему ($n_1 \neq n_2$), соответственно нарушается равенство ЭДС ($E_1 \neq E_2$), и по линиям связи начинают протекать уравнивающие токи.

Для двигателя с меньшей скоростью вращения ротора эти токи будут создавать двигательный момент, а для двигателя с большей скоростью – тормозящий. Таким образом, создаваемые моменты действуют как согласующие. Преимущество данной схемы заключается в низкой стоимости и при этом высокой надежности, а так же простоте в обслуживании и наладке.

Рассматриваемая схема имеет отличительную особенность: согласующий момент не зависит от скорости, а зависит только от абсолютной разности скоростей вращения.

Рассмотрим динамические характеристики работы такой системы. Переходные процессы согласования скоростей вызваны разностью ЭДС на согласующих обмотках двигателей. Отсюда можно сделать вывод, что данная схема работает по аналогии со схемой управления АД путем изменения напряжения на статоре [1, 3, 6, 18, 46, 87, 136]. На основании этого составим структурную схему системы согласованных по скорости вращения АД (рис.2.11).

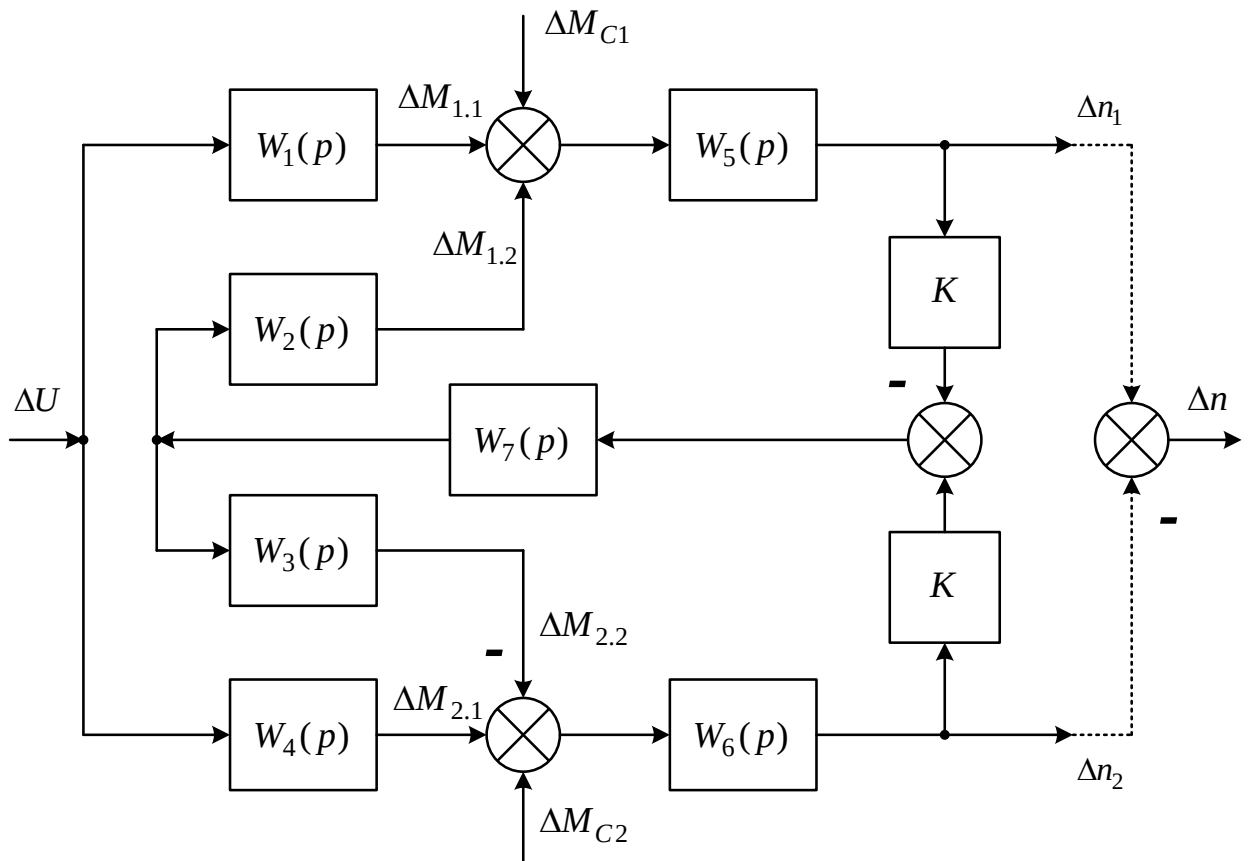


Рис. 2.11. Структурная схема системы согласованных по скорости вращения АД

Анализ такой системы из-за сложности описания АД затруднен. Во время пуска и регулирования напряжения асинхронных двигателей имеют место слабозатухающие колебания скорости и момента [64, 118]. При этом передаточную функцию АД приближенно можно представить в виде [7, 62]:

$$W_{\text{АД}}(p) = \frac{\Delta M_{\text{Д}}(p)}{\Delta U_1(p)} = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\gamma_1 T_0 p + 1)}$$

где T_1 - постоянная времени, характеризующая апериодическую составляющую момента; T_0 - постоянная времени затухания периодической составляющей, γ_1 - коэффициент демпфирования.

На структурной схеме (рис .2.11)

$$W_{\text{АД}}(p) = W_1(p) = W_2(p) = W_3(p) = W_4(p)$$

Передаточная функция, связывающая момент и скорость с учетом вентиляторной нагрузки имеет вид

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_M p + 1} = \frac{\Delta n(p)}{\Delta M(p)}$$

Соответственно на структурной схеме [1, 3, 6, 18, 46, 87, 136].

$$W_M(p) = W_5(p) = W_6(p)$$

На согласующих обмотках АД наводятся пропорциональные скоростям n_1 и n_2 ЭДС E_1 и E_2 , на схеме это звенья с коэффициентами K . Различие ЭДС индуцирует уравнивающий ток на согласующих обмотках двигателей. При этом внутренние падения напряжения на обмотках и их постоянные времени учитываются звеном

$$W_7(p) = \frac{K_7}{T_7 p + 1} = \frac{\Delta n(p)}{\Delta M(p)}$$

Принимаем, что система работает в установившемся режиме. При этом скорости и ЭДС равны ($n_1 = n_2$ и $E_{1.2} = E_{2.2}$). Кроме этого, считаем, что $T_{M_1} = T_{M_2}$. При этом схема становится полностью симметричной по отношению к выходным координатам Δn_1 и Δn_2 . Определим передаточную функцию:

$$W_{n1}(p) = \frac{\Delta n_1(p)}{\Delta M_{c1}(p)} = W_5(p) \frac{1 + W_2(p)W_5(p)W_7(p) \cdot K}{1 + 2 \cdot W_2(p)W_5(p)W_7(p) \cdot K} \quad (2.12)$$

На основании структурной схемы (рис.2.11) была составлена модель системы согласованного вращения. На рис.2.12 приведены результаты моделирования. За первую секунду происходит разгон двух двигателей, при этом $n_1 = n_2$. В момент времени $t = 1 \text{сек}$ подается нагрузка на второй двигатель и его скорость n_2 снижается [1, 22, 141]. Одновременно с этим снижается и скорость первого двигателя n_1 . На графике также приведено значение Δn .

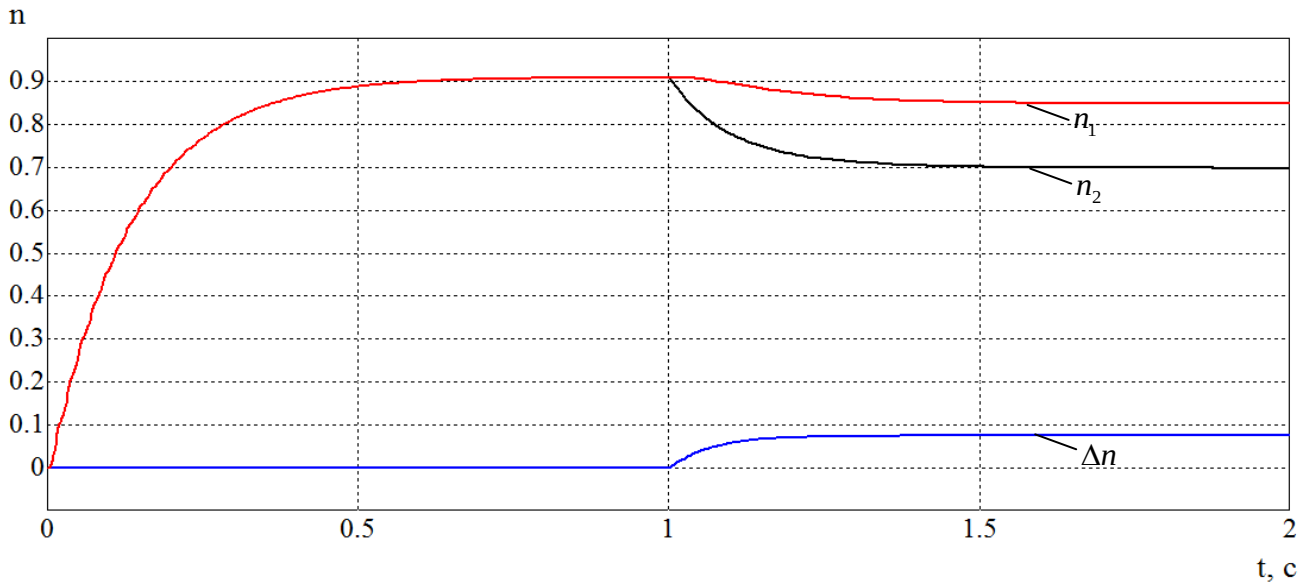


Рис. 2.12. Переходные процессы пуска и наброса нагрузки на второй двигатель

Для сравнения было проведено моделирование этой же схемы без компенсирующих связей (рис.2.13).

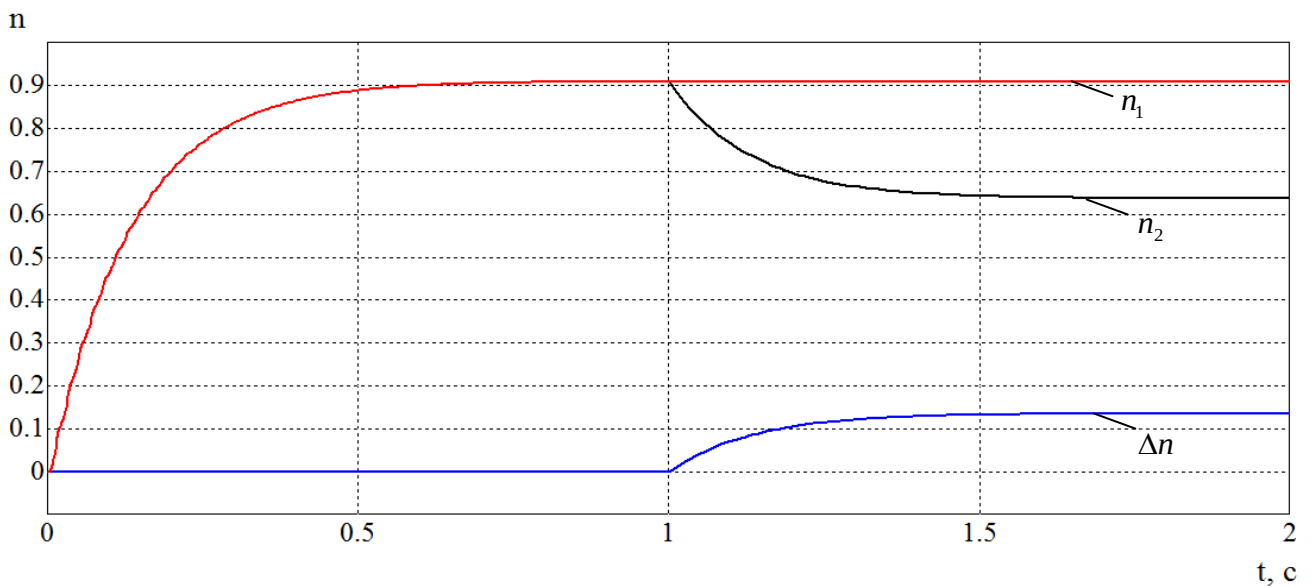


Рис. 2.13. Переходные процессы пуска и наброса нагрузки на второй двигатель при обрыве цепи синхронизации

Видно, что скорость первого двигателя n_1 не меняется, в то время как снижение скорости второго двигателя n_2 более существенно. В то же время анализ уравнения (2.12) и полученных переходных процессов показывает, что рассматриваемая система – статическая [85]. Поэтому для более полной

компенсации $\Delta n = n_1 - n_2$ необходимо увеличить коэффициент в контуре компенсации.

Следующим шагом осуществляем пуск двухдвигательной системы при условии, что моменты инерции двигателей различаются вдвое. Из графика (рис.2.14) видно, что есть различия для режима пуска, а наброс нагрузки отрабатывается так же, как и в первом случае.

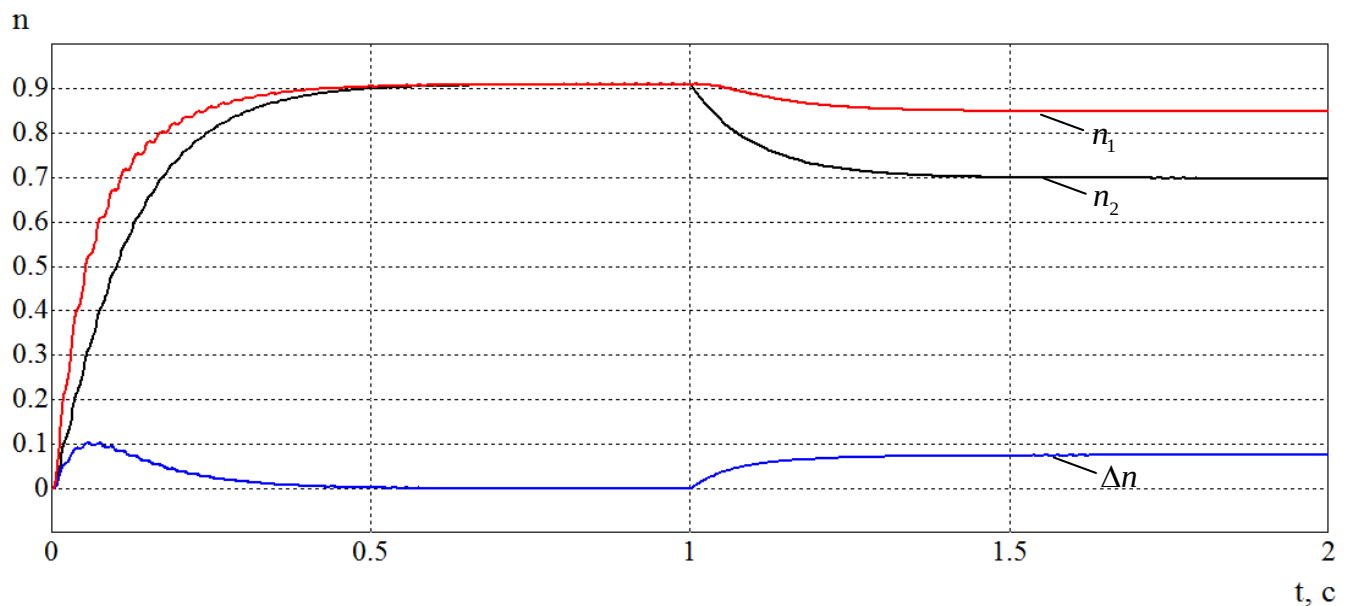


Рис. 2.14. Переходные процессы пуска и наброса нагрузки для электроприводов с разными значениями момента инерции

В подобных электроприводах необходимо решить две задачи:

- создать систему с минимальными статическими ошибками Δn_1 и Δn_2 при действии моментов нагрузки ΔM_{c1} и ΔM_{c2} ;
- выполнить настройку таким образом, чтобы $\Delta n = \Delta n_1 - \Delta n_2$ была в пределах допуска.

Выполнение первой задачи косвенно решает и вторую — чем меньше статические ошибки электроприводов системы, тем меньше разность этих ошибок. Снижения статических ошибок можно достичь увеличением контурного коэффициента системы и применением дополнительных корректирующих связей. Отсюда можно сделать вывод, что эту задачу нельзя решить только параметрическими методами [73, 102].

В то же время, если приоритетной является вторая задача без условия минимизации ошибок отдельных электроприводов, возможно решение на основе параметрических систем регулирования. Для этого найдем передаточную функцию

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{\Delta n(p)}{\Delta M_1(p)}$$

Она может быть вычислена по выражению [22]:

$$W_{\Delta n}(p) = W_{n1}(p) - W_{n2}(p), \quad (2.13)$$

где $W_{n1}(p)$ определена ранее (2.12),

$$W_{n2}(p) = \frac{\Delta n_2(p)}{\Delta M_1(p)}$$

передаточная функция изменения скорости второго электропривода при изменении момента на первом имеет вид

$$W_{n2}(p) = \frac{W_1(p)W_5(p)W_7(p)}{1 + KW_1(p)W_5(p)W_7(p)} KW_1(p).$$

В соответствии с выражением (2.13) получаем

$$\begin{aligned} W_{\Delta n}(p) &= W_{n1}(p) - W_{n1}(p)K \frac{W_1(p)W_5(p)W_7(p)}{1 + KW_1(p)W_5(p)W_7(p)} \\ &= W_1(p) \frac{1}{1 + KW_1(p)W_5(p)W_7(p)} = \frac{W_5(p)}{1 + 2W_1(p)W_5(p)W_7(p)K} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Анализ уравнения (2.14) для статического режима показывает, что разность Δn будет минимальной при соблюдении условий:

$$\begin{aligned} K_1, K_7, K &\rightarrow \max \\ K_5 &\rightarrow \min \end{aligned}$$

При прочих равных условиях K_5 принимает минимальное значение при низких номинальных скоростях двигателей, т.е. в тихоходных машинах.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- для создания согласованных по скорости систем эффективно могут быть применены асинхронные двигатели, имеющие на статоре два комплекта обмоток;
- на основе таких двигателей можно создать простые параметрические системы согласованного вращения;

- наиболее подходящими для подобных систем являются машины с большим числом пар полюсов (тихоходные).

Результатом проведенных исследований стала разработка «пассивной» схемы согласованного управления на базе АД с двумя комплектами статорных обмоток (рис. 2.15) [24].

На схеме цифрами 1 и 2 обозначены два асинхронных двигателя с короткозамкнутыми роторами, каждый из которых содержит по два комплекта независимых и равноценных статорных обмоток. Одни их комплектов статорных обмоток каждого двигателя подключены к питающей сети. Вторые комплекты обмоток обоих двигателей соединены между собой посредством четырехпроводной линии связи 7 [30]. Кроме того, в схеме имеются трехфазный коммутатор и блок переменных резисторов. Первый комплект неподвижных контактов трехфазного коммутатора подключен к сети, а контакты второго комплекта соединены между собой и с нулевым проводом линии связи.

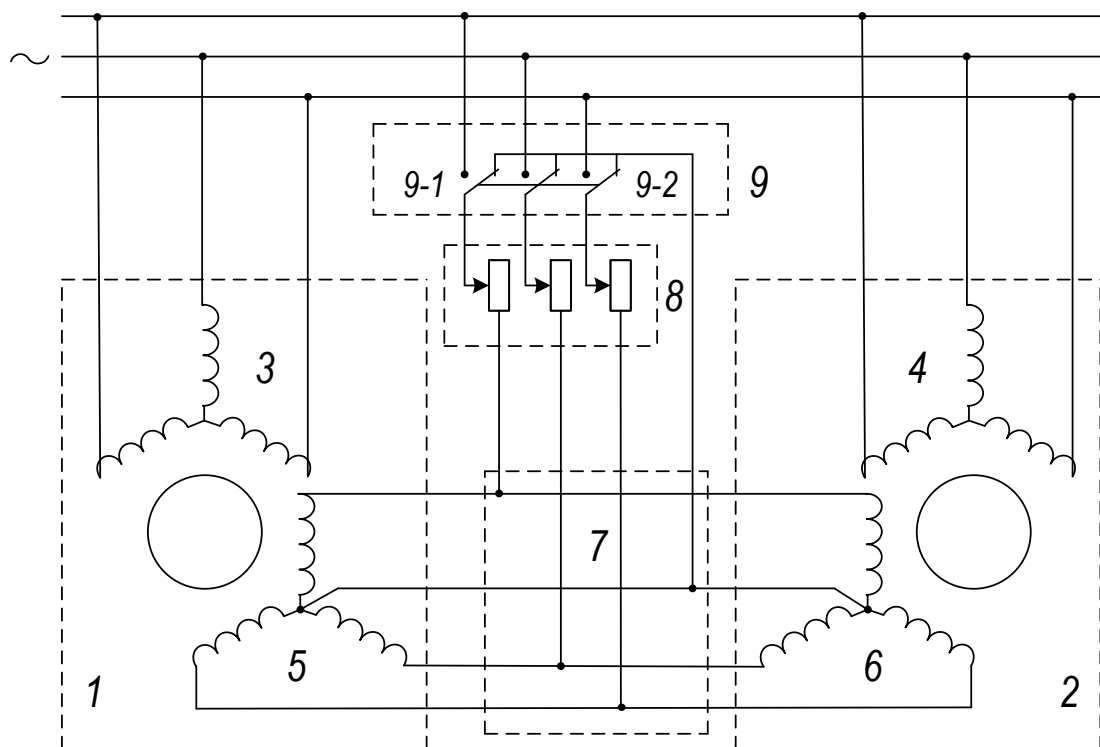


Рис. 2.15. «Пассивная» схема согласованного управления асинхронными двигателями

Схема работает следующим образом: как только меняется скорость одного из двигателей, входящих в систему ($n_1 \neq n_2$), соответственно нарушается

равенство ЭДС ($E_1 \neq E_2$), наведенных на обмотках 5 и 6, и по линиям связи 7 начинают протекать уравнивающие токи. Для двигателя с меньшей скоростью вращения ротора эти токи будут создавать двигательный момент, а для двигателя с большей скоростью – тормозящий. Таким образом, создаваемые моменты действуют как согласующие, и скорости асинхронных двигателей, входящих в систему, выравниваются.

Регулирование скоростей двигателей [30] в схеме согласованного вращения реализуется за счет изменения режима работы вторых групп обмоток 5 и 6. Если в трехфазном коммутаторе 9 подвижные контакты замкнуты с группой контактов 9-1, напряжение сети через переменные резисторы 8 и линию 7 связи поступает на группы обмоток 5 и 6, при этом протекает ток, увеличивая момент, развиваемый асинхронными двигателями 1 и 2, что приводит к возрастанию их скорости. Если в трехфазном коммутаторе 9 подвижные контакты замкнуты с группой контактов 9-2, фазы групп обмоток 5 и 6 через линию 7 связи и переменные резисторы 8 замыкаются между собой и подсоединяются к нулевым точкам звезд этих обмоток. При этом по группам обмоток 5 и 6 будет протекать ток, создающий тормозящий момент на асинхронных двигателях 1 и 2, что приводит к снижению скорости.

Анализ работы подобных систем согласованного вращения в пассивном режиме работы позволяет сделать вывод о целесообразности и необходимости исследования системы в активном режиме, когда регулирование работы системы осуществляется посредством активных элементов.

2.4. Анализ работы электропривода с пассивным управлением

Рассмотрим работу электроприводов слипа на основе предложенной пассивной схемы согласованного вращения. На базе известных структурных схем асинхронных двигателей была составлена модель (рис.2.16).

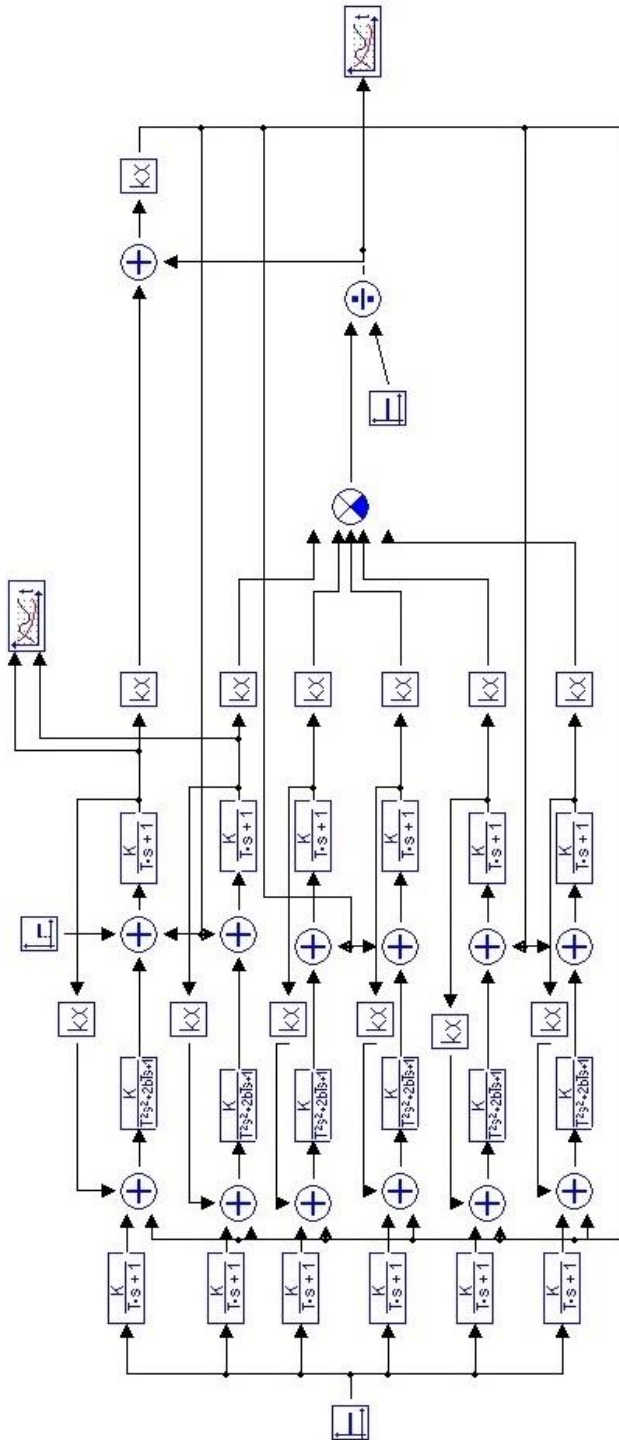


Рис. 2.16. Модель шестипроводной системы согласованного управления

Модель (рис.2.16) содержит шесть электроприводов, объединенных для согласованного управления по вторым обмоткам статоров двигателей. На рис.2.17 приведены фрагменты переходных процессов для двух двигателей, работающих

раздельно, на один из которых подается нагрузка в момент времени $t = 1$ сек. В этом случае ошибка по скорости первого двигателя составляет $\Delta n_{1.1}$.

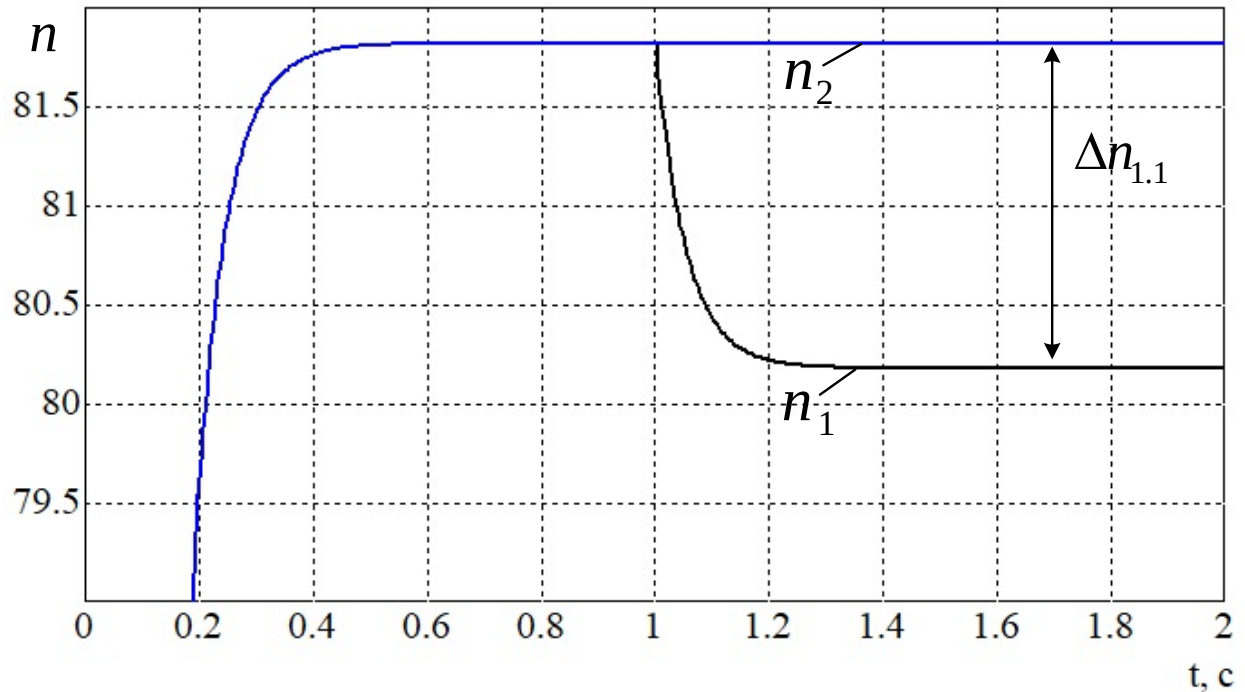


Рис. 2.17. Фрагменты переходных процессов для двух двигателей, работающих раздельно, на один из которых подается нагрузка в момент времени $t = 1$ сек

На рис.2.18 приведены фрагменты переходных процессов для двух двигателей, работающих в согласованном включении. Ошибки по скорости в этом случае составляют $\Delta n_{1.2}$ – для первого двигателя и $\Delta n_{2.2}$ – для второго (не нагруженного) двигателя.

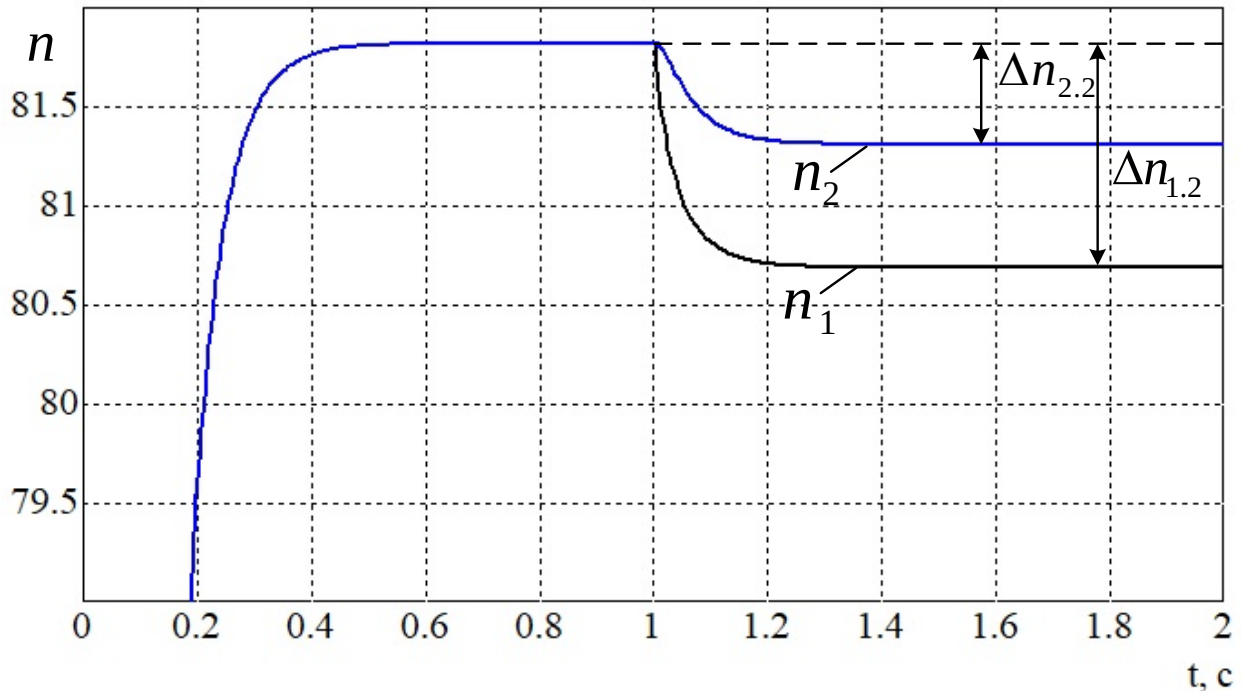


Рис. 2.18. Фрагменты переходных процессов для двух двигателей, работающих в согласованном включении, на один из которых подается нагрузка в момент времени $t = 1$ сек

Анализ рис.2.17 и рис.2.18 показывает, что

$$\Delta n_{1.1} = \Delta n_{1.2} + \Delta n_{2.2} \quad (2.15)$$

Таким образом, в согласованном режиме работы второй двигатель:

- снижает свою скорость при нагрузке первого двигателя;
- по цепям согласования (объединение свободных статорных обмоток) передает энергию первому двигателю, в результате чего снижается его ошибка по скорости.

Важным показателем работы конкретных двигателей в пассивном согласованном режиме является отношение ошибок:

$$K = \frac{\Delta n_{2.2}}{\Delta n_{1.2}} \quad (2.16)$$

На рис.2.19 приведены фрагменты переходных процессов для двух двигателей при условии, что в схеме согласованной работы участвуют шесть машин.

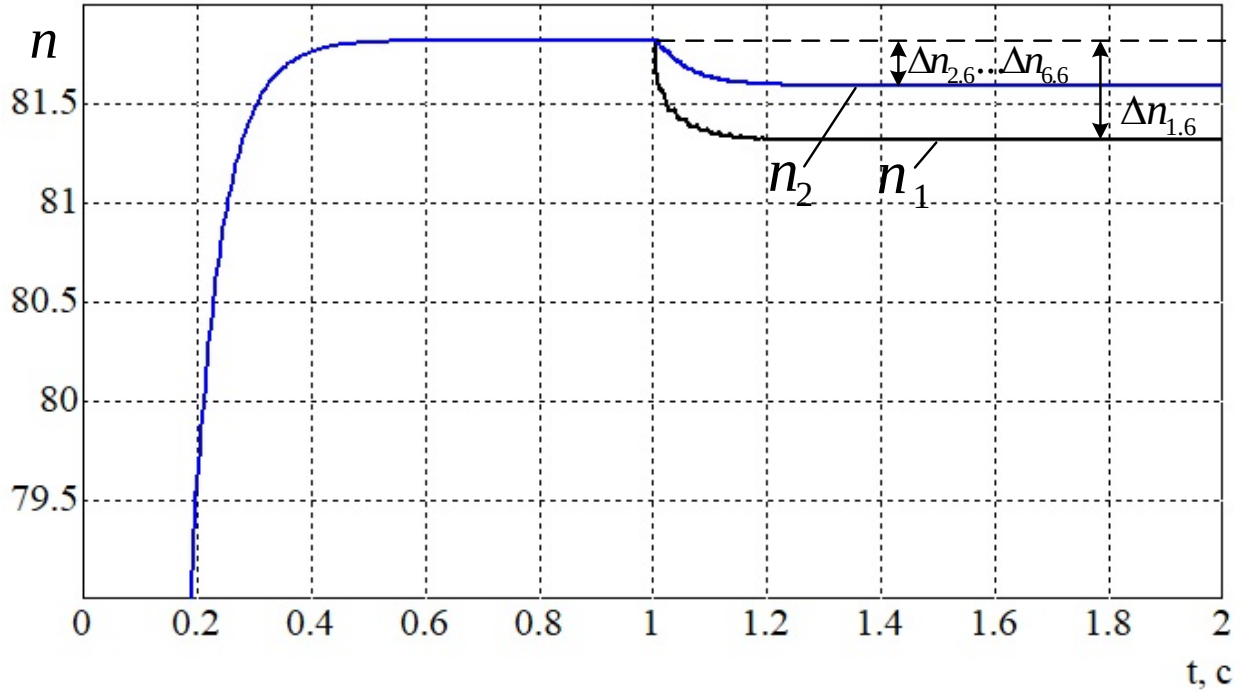


Рис.2.19. Фрагменты переходных процессов для двух двигателей при условии, что в схеме согласованной работы участвуют шесть машин

Видно, что при этом соблюдается условие:

$$\Delta n_{1.1} = \sum_{i=2}^6 \Delta n_{i.6} = const \quad (2.17)$$

Таким образом, выражение (2.15) является частным случаем формулы (2.17).

Условие (2.16) также соблюдается:

$$K = \frac{\Delta n_{i.m}}{\Delta n_{1.m}} = const \quad (2.18)$$

На основании выражений (2.17) и (2.18) можно получить формулу для расчета ошибок $\Delta n_{1.m}$:

$$\Delta n_{1.m} = \frac{\Delta n_{1.1}}{1 + (m - 1)K}, \text{ при } m > 1 \quad (2.19)$$

На основании выражения (2.19) составлена таблица значений ошибки по скорости в зависимости от количества одновременно работающих машин и построен график этих зависимостей (рис.2.20).

Таблица 2.1.

Значения ошибки по скорости в зависимости от количества одновременно работающих машин

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta n_{1m}/\Delta n_1$	1	0,7	0,56	0,45	0,38	0,33	0,27	0,24	0,22	0,2	0,18

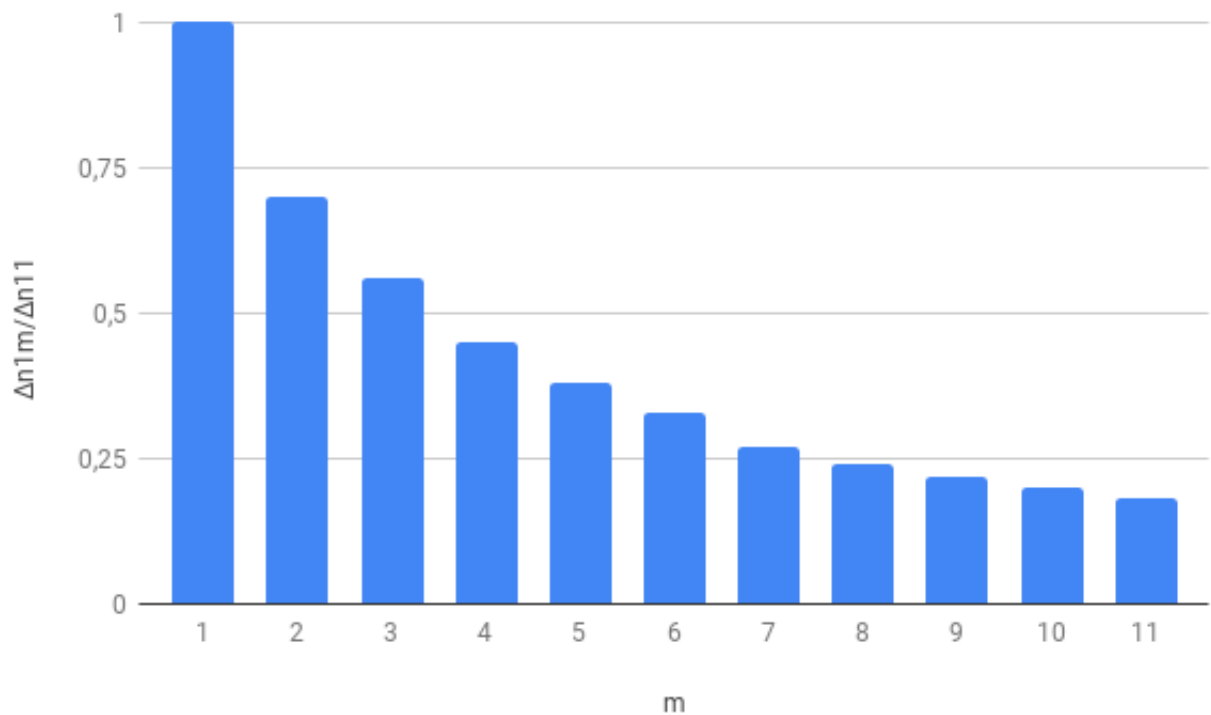


Рис. 2.20. Значения ошибки по скорости в зависимости от количества одновременно работающих машин

Важным показателем является величина рассогласования скоростей двигателей, работающих в согласованном режиме (ΔP):

$$\Delta P = \frac{\Delta n_{1.m} - \Delta n_{i.m}}{\Delta n_{1.1}} \quad (2.20)$$

С учетом формул (2.15-2.19) выражение (2.20) принимает вид:

$$\Delta P = \frac{1 - K}{1 + K(m - 1)} \quad (2.21)$$

На основании формулы (2.21) составлена таблица значений величины рассогласования скоростей двигателей в зависимости от количества одновременно работающих машин и построен график этих зависимостей (рис.2.21).

Таблица 2.2.

Значения величины рассогласования скоростей двигателей в зависимости от количества
одновременно работающих машин

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΔP	1	0,4	0,33	0,27	0,23	0,2	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12

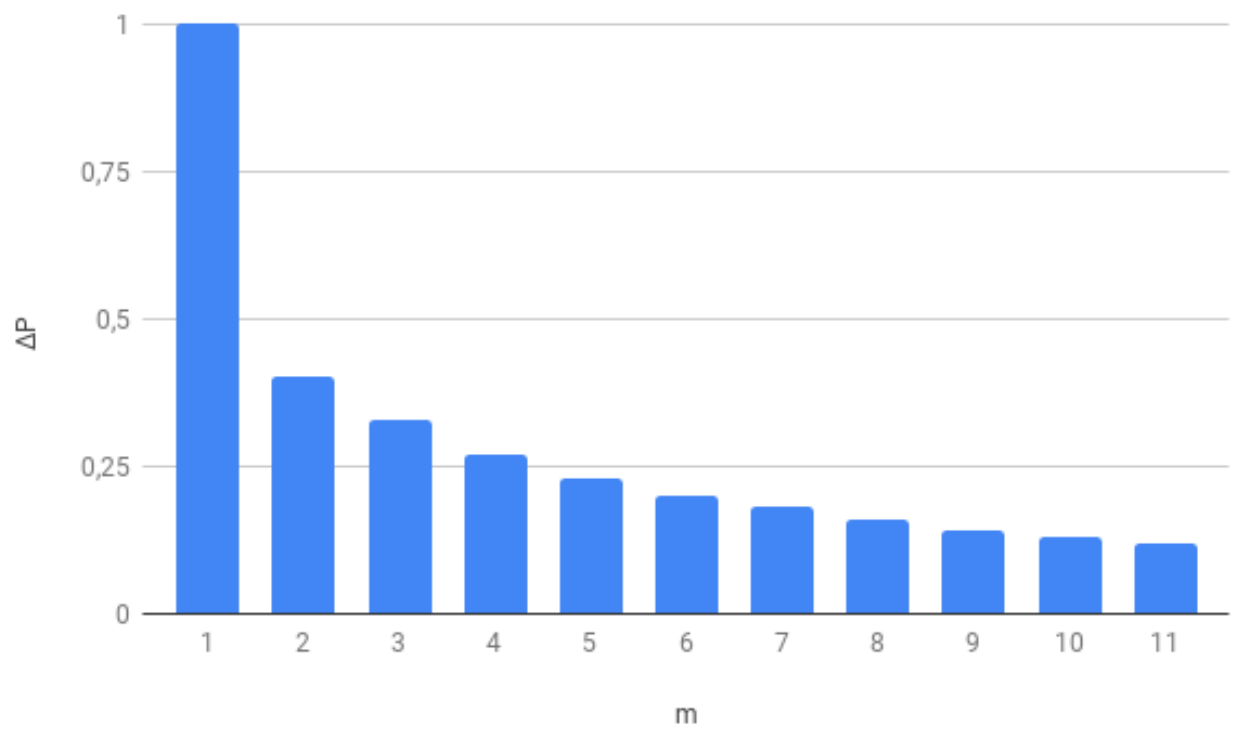


Рис. 2.21. Значения величины рассогласования скоростей двигателей в зависимости от количества одновременно работающих машин

Выводы к главе 2

Был выполнен анализ возможности использования АД с двумя комплектами статорных обмоток и создание на его основе взаимосвязанных систем (ВСС), согласованных по скорости.

Подробно рассмотрена схема замещения АД и исследованы режимы работы в различных схемах включения обмоток АД, в том числе механические характеристики.

Разработана конструкция коммутатора, обеспечивающего работу АД во всех возможных режимах эксплуатации.

На основе АД построена ВСС, проведен анализ её работы, получена структурная схема ВСС.

Составлена и исследована модель электропривода слипа на основе ВСС. Получены уравнения, позволяющие определить значения ошибок ВСС в зависимости от числа используемых электроприводов.

Проведенные во второй главе исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На основе АД с двумя комплектами обмоток на статоре есть возможность создавать эффективные ВСС.
2. Применение коммутатора позволяет реализовать регулирование режимов работы ВСС.
3. Исследование модели электроприводов слипа на основе предлагаемых ВСС позволяет снизить ошибки рассогласования. Показано, что значение ошибок снижается с ростом числа электроприводов в составе ВСС.

3. СИНТЕЗ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

3.1. Синтез «активного» взаимосвязанного электропривода

На основе параметрических систем, которые просты, надежны, но в ряде случаев не обладают требуемыми качественными показателями, можно создать "активные" взаимосвязанные системы с высокими техническими показателями за счет включения активных элементов, таких как усилители, регуляторы, вычислители и др.

Электрооборудование слипа содержит несколько электроприводов, работающих в согласованном режиме. Один из возможных вариантов систем электроприводов слипа может быть выполнен на основе АД с двумя комплектами статорных обмоток. В третьей главе подробно рассмотрена возможность применения АД с двумя комплектами статорных обмоток в «активных» системах согласованного вращения двигателей. При этом по сравнению со схемой-аналогом на базе АД с ФР имеется возможность улучшить качественные показатели системы. Один из вариантов «активной» схемы согласования скоростей двигателей, входящих в систему, представлен на рис.3.1.

На схеме изображены два АД с КЗ роторами, на статоре каждого из которых имеется два комплекта независимых и равнозначных обмоток.

Первые комплекты статорных обмоток каждого двигателя (3 и 7) одними концами подключаются к сети, а другими концами – через трехфазные выпрямители (4 и 8), к полярным выходам которых подключены транзисторы (5 и 9), подключаются к выходам широтно-импульсных модуляторов (6 и 10) [27, 31, 87].

Вторые комплекты статорных обмоток обоих электрических двигателей, соединенные по схеме «звезда», объединены между собой, включая их нулевые точки, посредством четырехпроводной линии связи (12) [27, 31, 87].

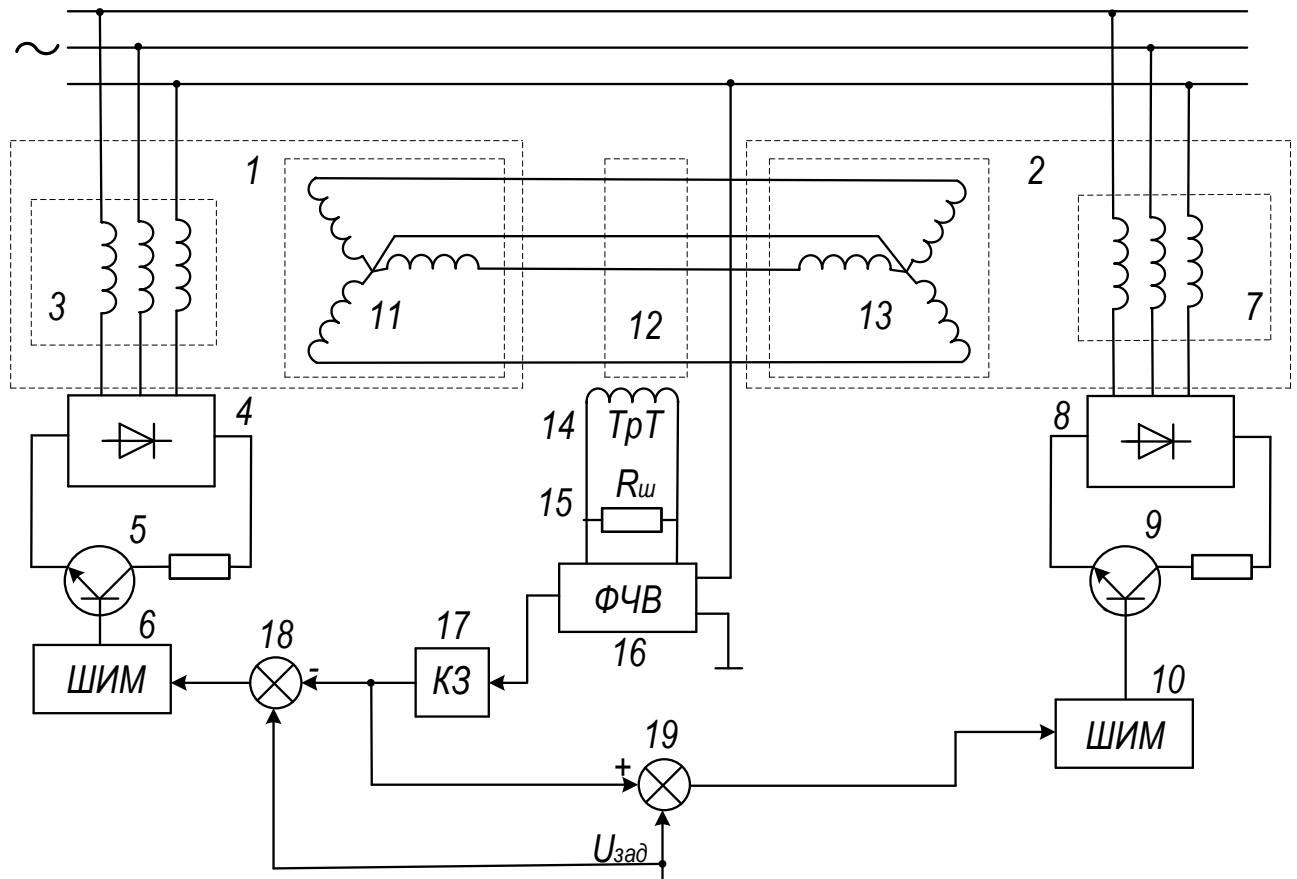


Рис. 3.1. «Активная» схема согласованного управления асинхронными двигателями

К одной из линий связи (12) первичной обмоткой подключен трансформатор тока (14), а вторичной обмоткой через шунтовой резистор – к сигнальному входу фазо-чувствительного выпрямителя. На синхронизирующий вход фазо-чувствительного выпрямителя подается фазное напряжение питающей сети, а выход соединен с первыми входами сумматоров (18 и 19) через корректирующее звено КЗ. На вторые входы сумматоров подается задающее напряжение, а сигналы с их выходов подаются на входы широтно-импульсных модуляторов (6 и 10).

Система работает следующим образом: на ШИМ через сумматоры поступает задающий сигнал $U_{\text{зад}}$. В свою очередь, ШИМ формируют импульсные сигналы управления на переключение транзисторов. При этом величина скважности импульсов пропорциональна сигналу задания $U_{\text{зад}}$. Таким образом, изменяя скважность импульсов, можно регулировать действующее значение напряжения,

подаваемого на обмотки электрических двигателей 3 и 7. При этом происходит изменение скоростей вращения двигателей, входящих в систему [70]. Если скорости обоих двигателей равны, соответственно ЭДС на обмотках 11 и 13 также будут равны, и токи по линиям связи не протекают. Нарушение равенства скоростей приводит к разности ЭДС обмоток 11 и 13. Таким образом, по линиям связи начинают протекать уравнивающие токи, для электродвигателя с меньшей скоростью вращения создающие двигательный момент, для электродвигателя с большей скоростью – тормозящий момент [27, 31, 70, 87].

Так как значения коэффициентов передачи звеньев системы ограничены, имеют место статическая ошибка и остаточный ток в линиях связи. На вторичной обмотке трансформатора индуцируется ток, пропорциональный току на первичной обмотке. Проходя через шунтовой резистор, этот ток наводит напряжение, пропорциональное остаточному уравнивающему току. Это напряжение является сигналом, подающимся на вход фазо-чувствительного выпрямителя. В зависимости от амплитуды и фазы тока, протекающего по линии связи, на выходе фазо-чувствительного выпрямителя будет формироваться сигнал рассогласования, который, проходя через корректирующее звено, усиливается и поступает на сумматоры 18 и 19. Для электрического двигателя с меньшей скоростью этот сигнал будет представлять собой сигнал положительной обратной связи (ОС) и увеличит скважность коммутации соответствующего транзистора, а для двигателя с большей скоростью вращения – сигналом отрицательной ОС и приведет к уменьшению скважности коммутации соответствующего транзистора [27, 31, 70, 87].

Таким образом, произойдет снижение величины статической ошибки, пропорциональное коэффициенту усиления КЗ [83]. На основе схемы (рис.3.1.) была составлена структурная схема системы согласованного вращения двигателей (СВД) на основе АД с двумя комплектами статорных обмоток (рис.3.2.).

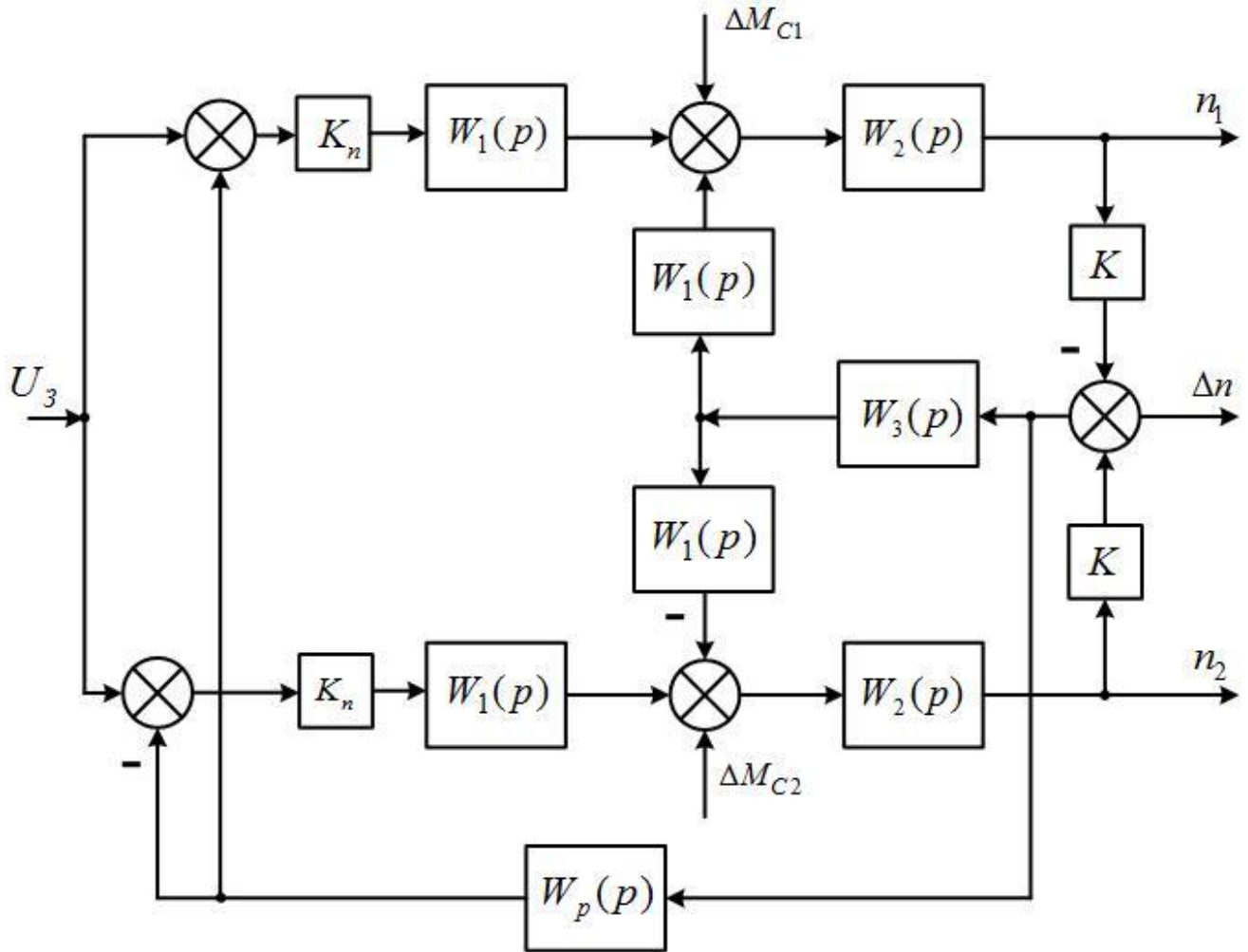


Рис. 3.2. Структурная схема системы СВД на основе АД с двумя комплектами статорных обмоток

Рассмотрим работу системы с отключенной цепью коррекции. Примем, что система работает в установившемся режиме $n_1 = n_2$ и $E_{1.2} = E_{2.2}$. Кроме этого считаем, что $T_{M1} = T_{M2}$. При этом схема становится полностью симметричной по отношению к выходным координатам n_1 и n_2 [59, 106]. Определим передаточную функцию:

$$W_{\Delta n} = \frac{W_2(p)}{1 + 2W_1(p)W_2(p)W_3(p)K}, \quad (3.1)$$

Для удобства расчета преобразуем структурную схему (рис.3.3) [27, 31].

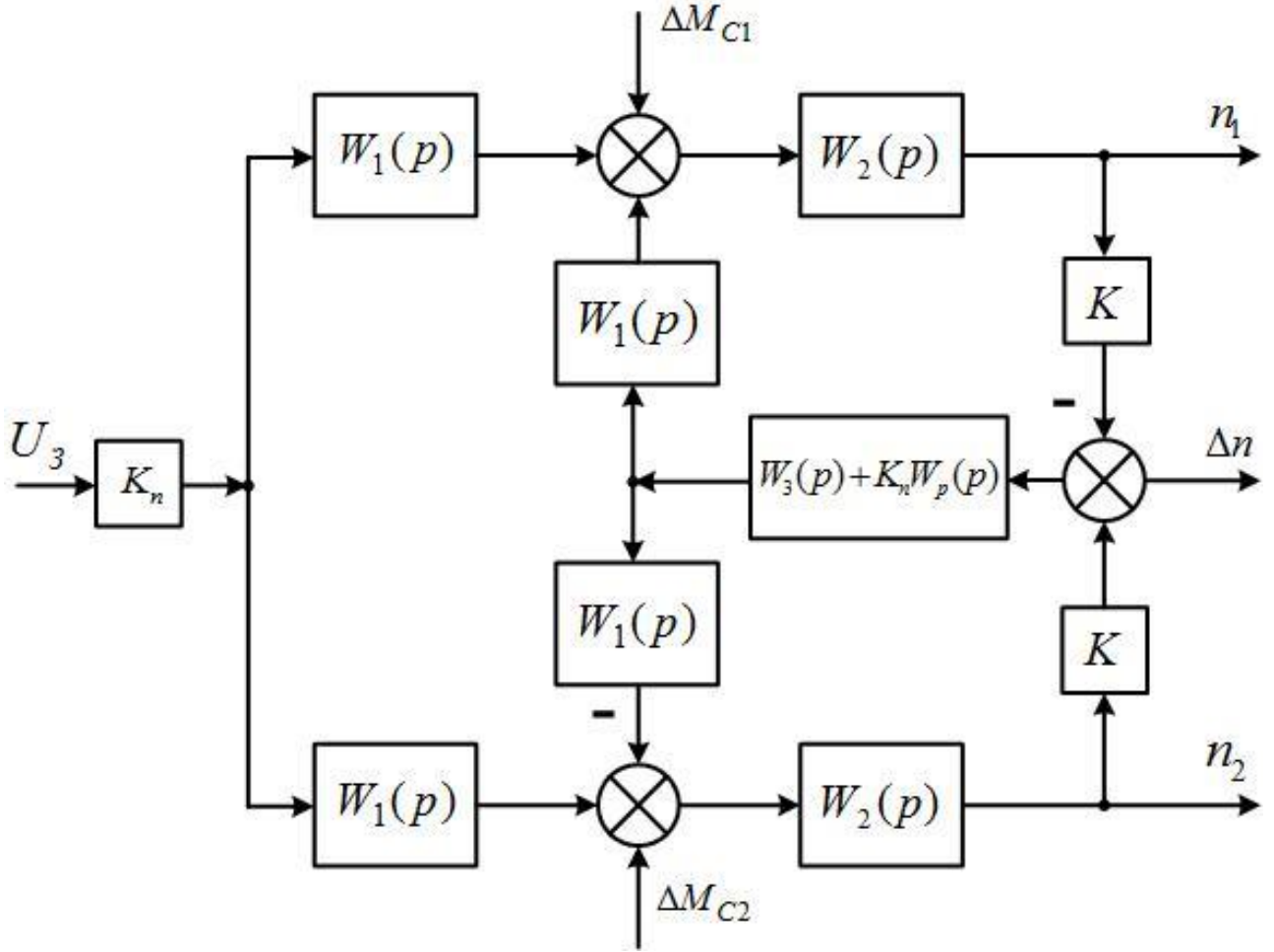


Рис.3.3. Преобразованная структурная схема системы СВД

С учетом цепи коррекции передаточная функция $W_{\Delta n}(p)$ принимает вид:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{W_2(p)}{1 + 2 \cdot W_1(p)W_2(p)[W_3(p) + K_n W_p(p)]K}, \quad (3.2)$$

Проведем расчет корректирующего звена из условия настройки системы на технический оптимум (ТО). Подставим передаточные функции звеньев в (3.2) и, пренебрегая малыми величинами [82], получим выражение:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{(\tau_1 p + 1) \cdot K_M \cdot T_p p}{\tau_2 T_p p^2 + 2K_d K_M T_p K_{\Sigma} p + 2K_d K_M K_n}, \quad (3.3)$$

где $\tau_1 = T_1 + T_3$; $\tau_2 = T_1 + T_M$; $K_{\Sigma} = K_1 + K_n K_p$.

Для настройки на ТО знаменатель передаточной функции (3.3) должен иметь вид [60]:

$$2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1, \quad (3.4)$$

С учетом выражения (3.4) получаем выражение для выбора T_p :

$$T_p = \frac{\tau_2 K_n}{K_d K_M K_\Sigma^2} = \frac{\tau_2 K_n}{K_d K_M (K_3 + K_n K_p)^2}, \quad (3.5)$$

В данной схеме используется ПИ-регулятор с передаточной функцией [43]:

$$W_p(p) = K_p \frac{T_p + 1}{T_p p}$$

На основании формул (3.3-3.5) в итоге получаем:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{p \cdot (\tau_1 p + 1) T_\mu / K_d K_\Sigma}{2 T_\mu^2 p^2 + 2 T_\mu p + 1}, \quad (3.6)$$

$$\text{где } T_\mu = \frac{\tau_2}{2 K_d K_M K_\Sigma} = \frac{\tau_2}{2 K_d K_M (K_3 + K_n K_p)}.$$

Постоянную времени T_μ можно изменять в широких пределах за счет изменения коэффициента регулятора K_p (звено $\boxed{W_p(p) + K_n W_p(p)}$).

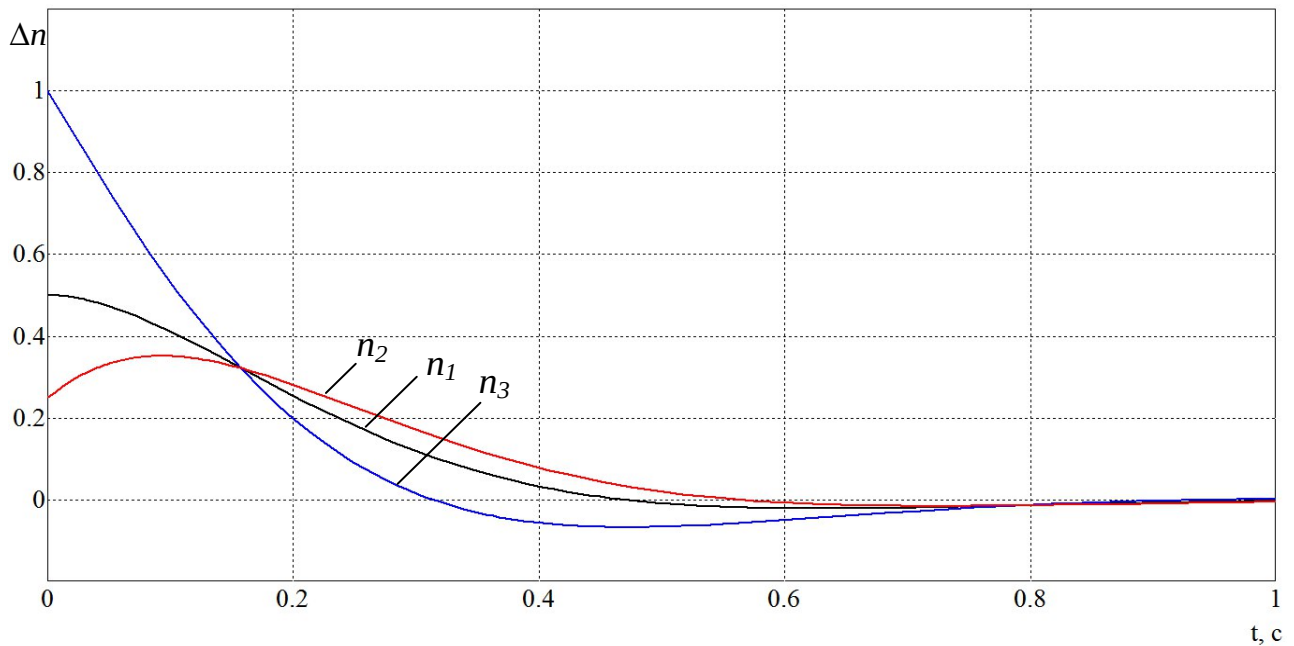


Рис.3.4. Анализ влияния постоянной времени τ_1

$$n_1 - \tau_1 = T_\mu; \quad n_2 - \tau_1 = 0,5 T_\mu; \quad n_3 - \tau_1 = 2 T_\mu;$$

Анализ передаточной функции (3.6) показывает, что динамические характеристики системы зависят от соотношения постоянных времени τ_1 и T_μ . На рис.3.4 приведены графики переходных процессов при моделировании передаточной функции (3.6) для различных значений τ_1 [27, 31].

Из графиков (рис.3.4) видно:

- при $\tau_1 > T_\mu$ колебательность и ошибка в системе возрастают;
- при $\tau_1 < T_\mu$ значение ошибки снижается;
- при $\tau_1 \approx T_\mu$ идет монотонное протекание переходного процесса.

В процессе моделирования исследовался режим, когда $T_{M1} \neq T_{M2}$. В этом случае возрастает ошибка от возмущающего воздействия, а так же появляется ошибка от задающего воздействия (рис.3.5) [27, 31].

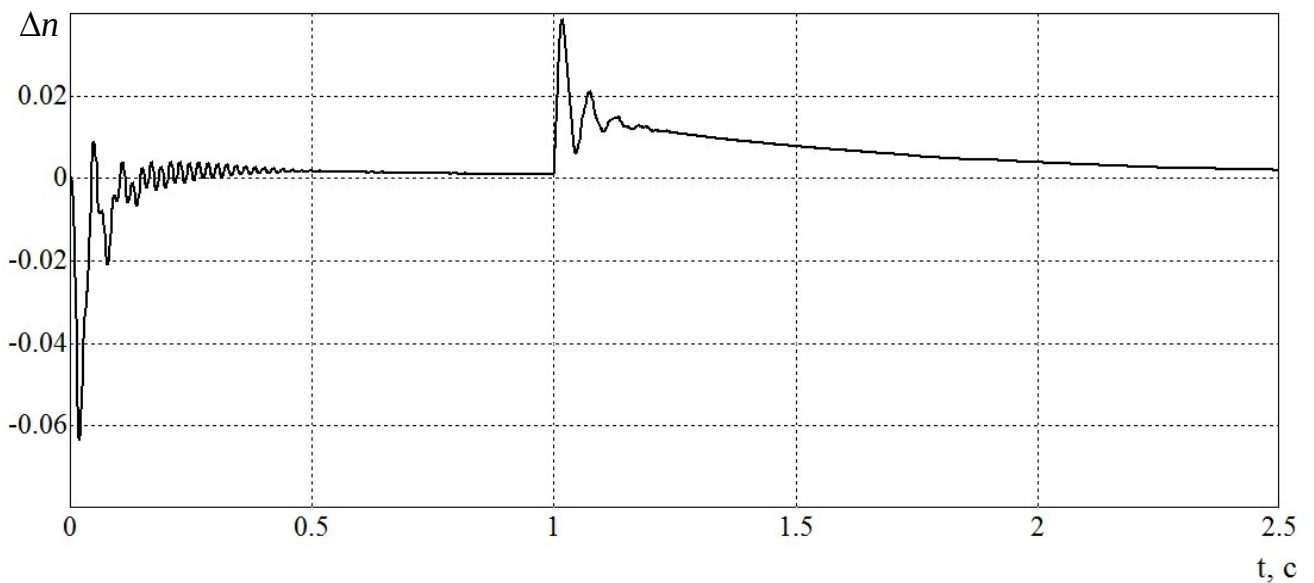


Рис.3.5. Переходный процесс с ПИ-регулятором при $2T_{M1} = T_{M2}$

Для улучшения динамических характеристик системы взамен ПИ-регулятора предлагается использовать ПИД (звено $W_p(p)$). График переходного процесса для этого случая приведен на рис.3.6.

Сравнение графиков 3.5 и 3.6 позволяет сделать вывод о том, что применение ПИД-регулятора позволит увеличить быстродействие системы и снизить ошибки [37, 153].

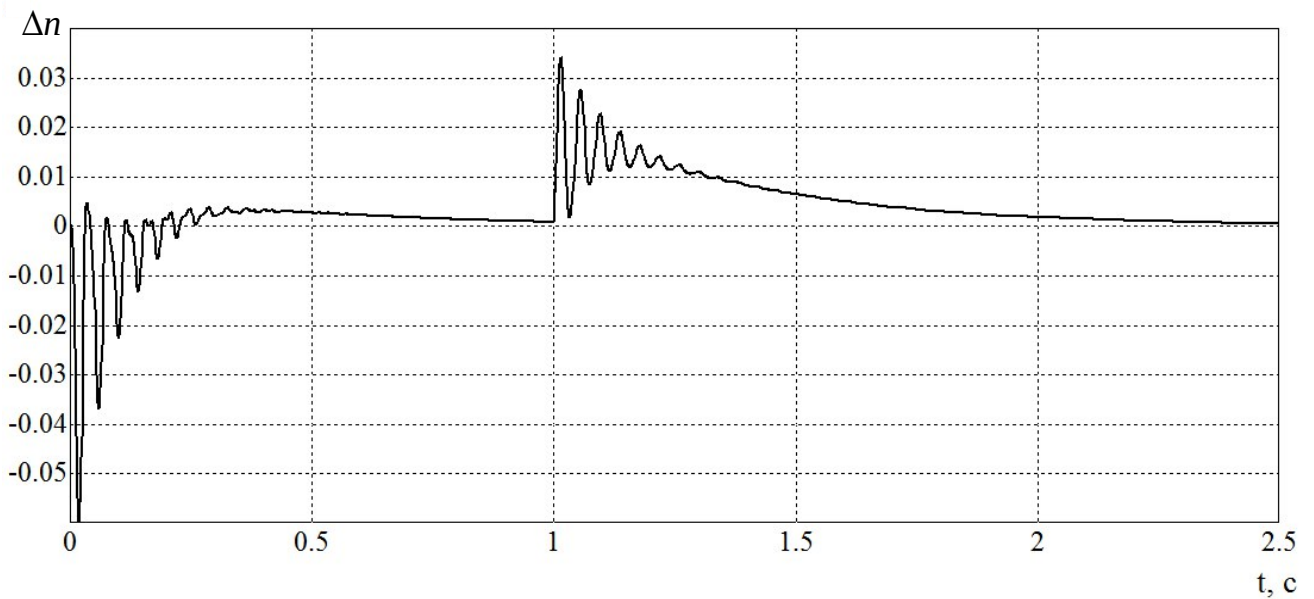


Рис.3.6. Переходный процесс с ПИД-регулятором при $2T_{M1} = T_{M2}$

Проведенные исследования позволили получить: математическую модель электрического двигателя, математическую модель системы согласованного управления асинхронными двигателями, формулы для настройки системы, а также графики переходных процессов при моделировании передаточной функции для различных значений τ_1 [27, 31].

3.1.1 Анализ колебательности электропривода с «активным» управлением

Определение качественных показателей во взаимосвязанных системах [33], к которым относятся системы согласованного вращения, является важным процессом в анализе и синтезе. Одним из наиболее информативных является показатель колебательности M [64], который определяется по формуле:

$$M = \frac{A(\omega_p)}{A(0)} \quad (3.7)$$

где $A(\omega_p)$ – значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте ω_p ;

$A(0)$ – значение амплитудно-частотной характеристики при $\omega = 0$.

В соответствии с (3.6) передаточная функция содержит дифференцирующее звено, что затрудняет определение M . Оценим работу и определим показатель колебательности для случая, когда на систему действует линейно нарастающий сигнал, описываемый в операторной форме интегрирующим звеном.

При этом преобразованная передаточная функция (3.6) принимает вид:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{K(\tau_1 p + 1)}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} \quad (3.8)$$

$$\text{где } K = \frac{T_\mu}{K_d K_\Sigma}$$

Амплитудно-частотная характеристика [81] для (3.8) определяется выражением:

$$A(\omega) = \frac{K\sqrt{1+(\tau_1\omega)^2}}{\sqrt{(1-2T_\mu^2\omega^2)^2+(2T_\mu\omega)^2}} \quad (3.9)$$

На частоте резонанса ω_p АЧХ принимает экстремальное значение и может быть определена приравниванием нулю производной от (3.9) по ω :

$$\frac{\partial A(\omega)}{\partial \omega} = 0 \quad (3.10)$$

Для упрощения вычислений введем обозначения:

$$x = T_\mu\omega, \tau_1\omega = \alpha x \quad (3.11)$$

С учетом (3.9-3.11) получаем:

$$\omega_p = \frac{\sqrt{1+\sqrt{1+\alpha^4/4}}}{\alpha T_\mu} \quad (3.12)$$

Для ω_p (3.6) АЧХ принимает значение:

$$A(\omega_p) = \sqrt{\frac{1+Z^2}{1+\frac{4}{\alpha^4}Z^4}} \quad (3.13)$$

$$\text{где } Z = \sqrt{1+\sqrt{1+\alpha^4/4}}.$$

Известно [64], что рекомендуется выбирать показатель колебательности в определенных пределах

$$M = 1 \div 1,8 \quad (3.14)$$

Если поставить условие $M = 1$, то можно определить конкретное значение α :

$$\alpha = \sqrt[4]{12} = 1,86$$

На рис (3.7) приведен график $M = f(\alpha)$. Видно, что для указанных пределов изменения M (3.14) можно принять $M \approx 0,5\alpha$.

Полученное соотношение может быть использовано при анализе и синтезе рассматриваемых систем.

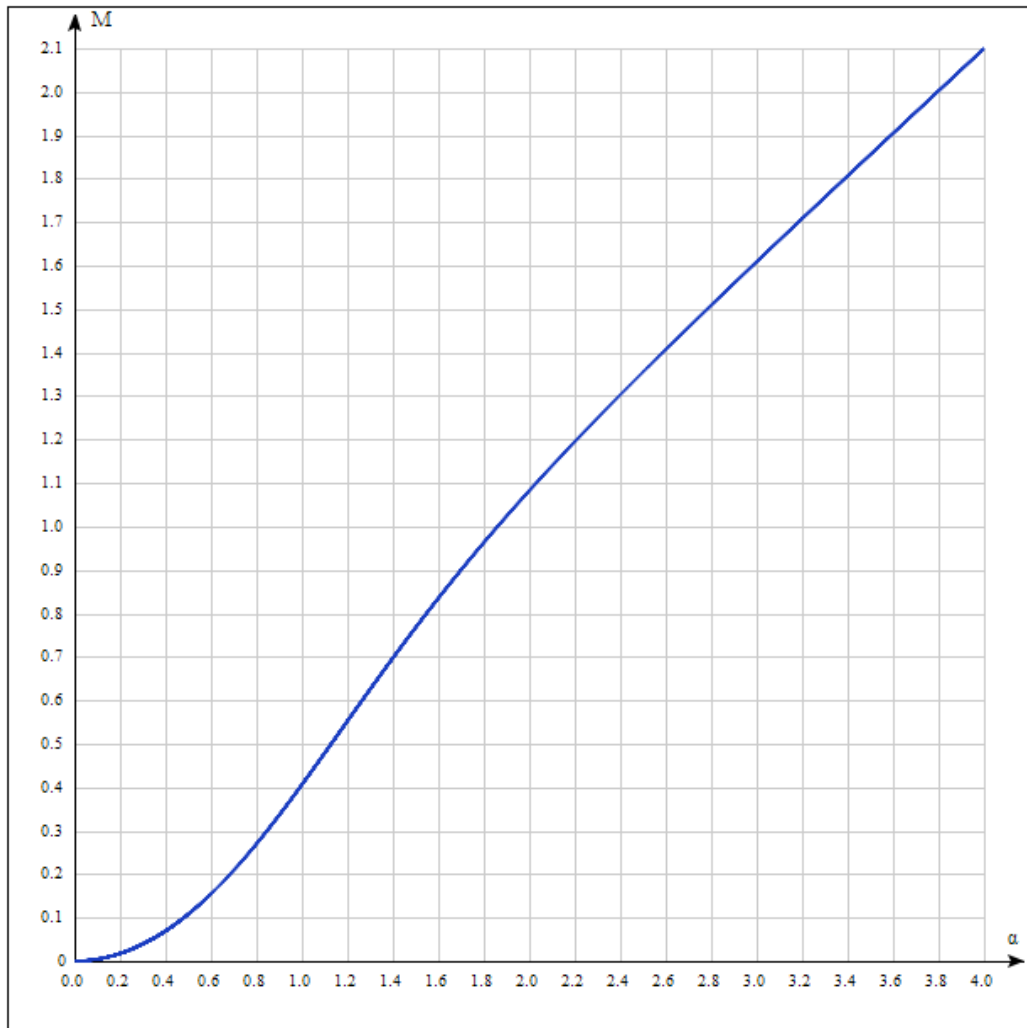


Рис.3.7. График зависимости $M = f(\alpha)$

3.2. Электропривод с электронной редукцией, возможности коррекции

При проектировании взаимосвязанных систем электропривода слипа в ряде случаев, например при возникновении внештатной ситуации (перекос судна во время движения) [128], возникает необходимость вводить регулируемый коэффициент редукции для одного или нескольких согласованных электроприводов. При этом необходимо сохранение принципа согласованности: изменение скорости на одном электроприводе должно быть отражено вторым с учетом установленного коэффициента редукции [36, 38]. В этом случае система будет работать как вариатор, но без механического соединения ведомой и ведущей осей [36, 38].

В качестве исполнительных двигателей в исследовании использовались двухскоростные асинхронные двигатели, на основе которых созданы различные системы регулирования скорости. Приведенная схема позволяет простыми способами обеспечить регулирование скорости рассматриваемого асинхронного двигателя, дает возможность повысить его энергоэффективность и улучшить коэффициент мощности.

На рис.3.8. представлена структурная схема электропривода с электронной редукцией [36, 38]. Входными сигналами в системе являются:

- $\omega_{\text{зад}}$ – сигнал задания скорости;
- $K_{\text{ред}}$ – сигнал задания редукции;
- M_1 и M_2 – моменты нагрузки на первый и второй двигатель, соответственно;

Выходные сигналы представляют собой:

- ω_1 и ω_2 – скорости вращения первого и второго двигателя, соответственно;
- ω'_2 – сигнал по скорости модели второго двигателя .

Звено $W_1(p)$ представляет из себя электрическую часть ЭП, $W_2(p)$ – механическую часть ЭП, $W_3(p)$ – корректирующее звено [36, 38].

Нижняя ветвь на структурной схеме (рис.3.8.) характеризует электронную модель электроприводов первой и второй оси (при этом делается допущение, что их характеристики идентичны) [36, 38].

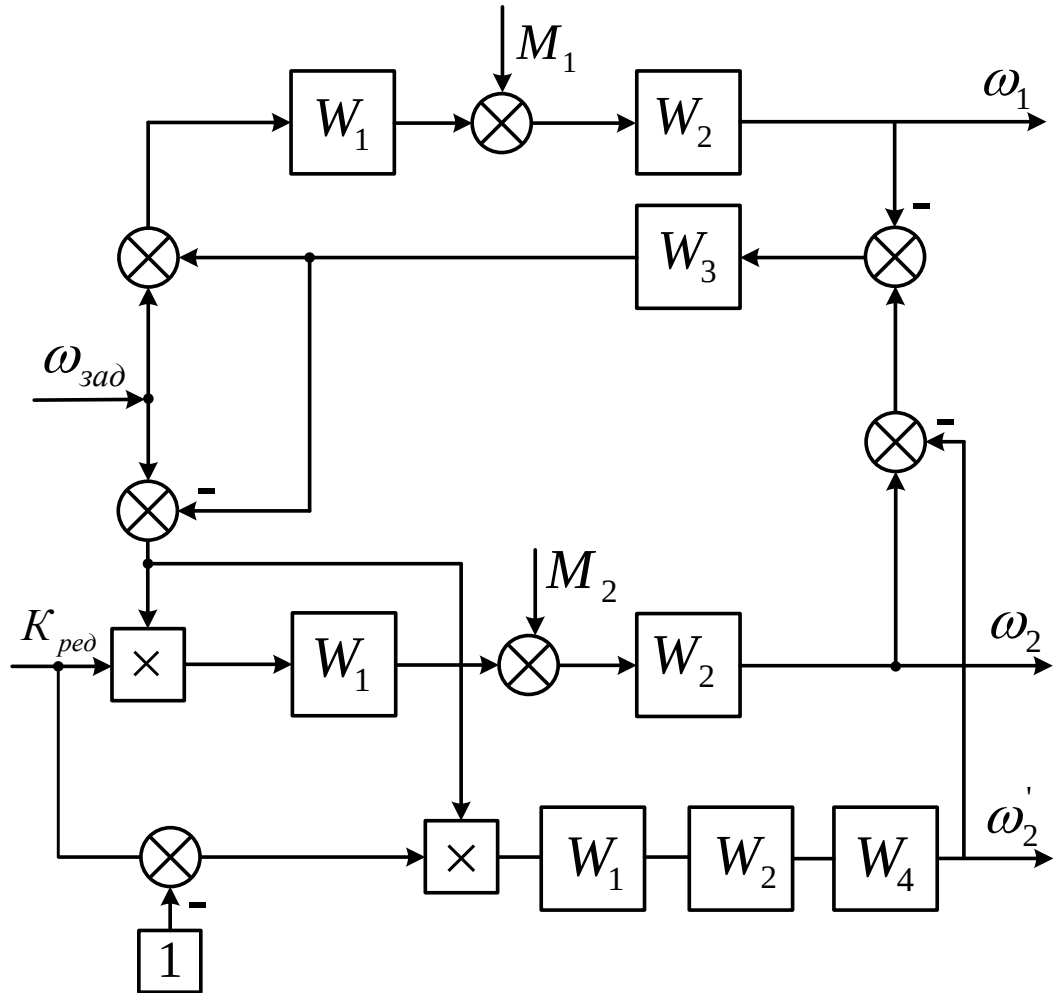


Рис.3.8. Структурная схема электропривода с электронной редукцией

Система уравнений для передаточных функций от задающего сигнала имеет вид [36, 38]:

$$\begin{cases} \omega_1 = W_1(p) \cdot W_2(p) [\omega_{\text{зад}} - W_3(p) \Delta\omega] \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} \omega_2 = K_{\text{ред}} W_1(p) \cdot W_2(p) [\omega_{\text{зад}} - W_3(p) \Delta\omega] \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \omega_2' = (K_{\text{ред}} - 1) W_1(p) \cdot W_2(p) W_4(p) [\omega_{\text{зад}} - W_3(p) \Delta\omega] \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\begin{cases} \Delta\omega = \omega_2 - \omega_2' - \omega_1 \end{cases} \quad (3.18)$$

Подстановка уравнений (3.15-3.17) в (3.18) дает $\Delta\omega = 0$ при условии, что $W_4(p) = 1$.

Исходя из этого, передаточные функции системы от задающего сигнала $\omega_{\text{зад}}$ примут вид [36, 38]:

$$\omega_1 = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \omega_{\text{зад}} \quad (3.19)$$

$$\omega_2 = K_{\text{ред}} W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \omega_{\text{зад}} \quad (3.20)$$

$$\omega'_2 = (K_{\text{ред}} - 1) W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) \cdot \omega_{\text{зад}} \quad (3.21)$$

Система уравнений для передаточных функций от возмущающего воздействия M_1 имеет вид [36, 38]:

$$\begin{cases} \omega_1 = [W_1 + \Delta\omega \cdot W_3(p) \cdot W_1(p)] \cdot W_2(p) \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \omega_2 = -\Delta\omega \cdot W_3 \cdot K_{\text{ред}} \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\begin{cases} \omega'_2 = \Delta\omega \cdot W_3(p) \cdot (K_{\text{ред}} - 1) W_1(p) \cdot W_2(p) W_4(p) \end{cases} \quad (3.24)$$

Подставив уравнения (3.22-3.24) в (3.18), получим:

$$\omega_1 = W_2(p) \cdot \frac{1 + W_1(p)W_2(p)W_3(p)}{1 + 2W_1(p)W_2(p)W_3(p)} \cdot M_1 \quad (3.25)$$

$$\omega_2 = W_2(p) \cdot \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)K_{\text{ред}}}{1 + 2W_1(p)W_2(p)W_3(p)} \cdot M_1 \quad (3.26)$$

$$\omega'_2 = -W_2(p) \cdot \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)W_4(p)(K_{\text{ред}} - 1)}{1 + 2W_1(p)W_2(p)W_3(p)} \cdot M_1 \quad (3.27)$$

Уравнения (3.19-3.21) также можно использовать в качестве передаточных функций от изменения сигнала задания редукции $K_{\text{ред}}$. Необходимо отметить, что ω_1 не зависит от изменения сигнала задания редукции $K_{\text{ред}}$. Также важно, что в передаточных функциях (3.19-3.21) отсутствует звено $W_3(p)$. Все переходные процессы ω_1 и ω_2 по управляющим воздействиям [36, 38] ($\omega_{\text{зад}}$ и $K_{\text{ред}}$) отличаются только масштабом по амплитуде, который задается $K_{\text{ред}}$. Исходя из этого звено $W_3(p)$ может быть использовано в качестве корректирующего звена для коррекции системы по возмущающему воздействию.

Формирование сигналов ω_1 и ω_2 происходит с помощью реальных электромеханических звеньев. Сигнал ω'_2 формируется с помощью электронной модели. Во время работы в реальных звеньях или модели могут произойти изменения. Это приведет к изменению работы электроприводов. Для оценки этого

изменения введем звено W_4 в цепь модели, характеризующее возможные изменения:

$$W_4 = K_4 \frac{T_{41}p+1}{T_{42}p+1} \quad (3.28)$$

Проанализировав (3.28) можно сделать вывод, что нарушение условия $K_4=1$ приводит к нарушению работы схемы, в частности это приводит к искажению сигнала задания редукции $K_{ред}$. Для рассматриваемого случая не будет соблюдаться условие, полученное на основе выражений (3.15-3.18) [36, 38], $\Delta\omega = 0$. Введение звена W_4 (3.28) в выражения (3.15-3.18) дает формулу:

$$\Delta\omega = \frac{(K_{ред}-1)[1-W_4(p)]}{1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)[K_{ред}((1-W_4(p)+(1+W_4(p)))]} \cdot \omega_{зад} \quad (3.29)$$

В этом случае $\Delta\omega = 0$ при условиях:

$$K_{ред}=1 \text{ или } W_4(p)=1 \quad (3.30)$$

Для оценки системы электроприводов относительно рассматриваемых [36, 38] изменений параметров и выбора пути повышения "грубости" системы были использованы функции чувствительности [11]. Функции чувствительности $S_{W_i}^W$ передаточной функции $W(p)$ к звену $W_i(p)$ определяются выражением:

$$S_{W_i}^W = \frac{dW(p)}{dW_i(p)} \cdot \frac{W_i(p)}{W(p)} \quad (3.31)$$

На основании формулы (3.31) получаем выражения [36, 38]:

$$S_{W_1}^{W_M} = \frac{-W_1(p)W_2(p)W_4(p)}{[1+2W_1(p)W_2(p)W_3(p)][1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)]} \quad (3.32)$$

$$S_{W_2}^{W_M} = \frac{1+2W_1(p)W_2(p)W_3(p)[1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)]}{[1+2W_1(p)W_2(p)W_3(p)][1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)]} \quad (3.33)$$

$$S_{W_i}^{W_M} = C_M \int_{W_1}^{W_M} \quad (3.34)$$

$$S_{W_1}^{W_{ред}} = \frac{1}{1+2W_1(p)W_2(p)W_3(p)} \quad (3.35)$$

$$S_{W_2}^{W_{ред}} = \frac{2[1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)]}{1+2W_1(p)W_2(p)W_3(p)} \quad (3.36)$$

$$S_{W_3}^{W_{ред}} = C_M S_{W_1}^{W_{ред}} \quad (3.37)$$

На основе анализа соотношений (3.32-3.37) видно, что:

- у всех есть общий множитель; $W(p) = \frac{1}{1+2W_1(p)W_2(p)W_3(p)}$
- функции чувствительности по звену $W_3(p)$ равны $S_{W_3}^{W_M} = S_{W_3}^{W_{ред}}$;
- функции чувствительности по звену $W_2(p)$ равны $S_{W_2}^{W_M} = S_{W_2}^{W_{ред}}$;
- увеличение коэффициентов K_1, K_2, K_3 позволит снизить функции чувствительности.

Структура, приведенная на рис.3.8, была промоделирована в пакете MBTU [36, 38]. На рис.3.9. приведены графики переходных процессов пуска ($t=0$), изменения коэффициента редукции на втором электроприводе ($t=2c$), действия момента M_1 ($t_1=1c$; $t_2=3c$) [36, 38].

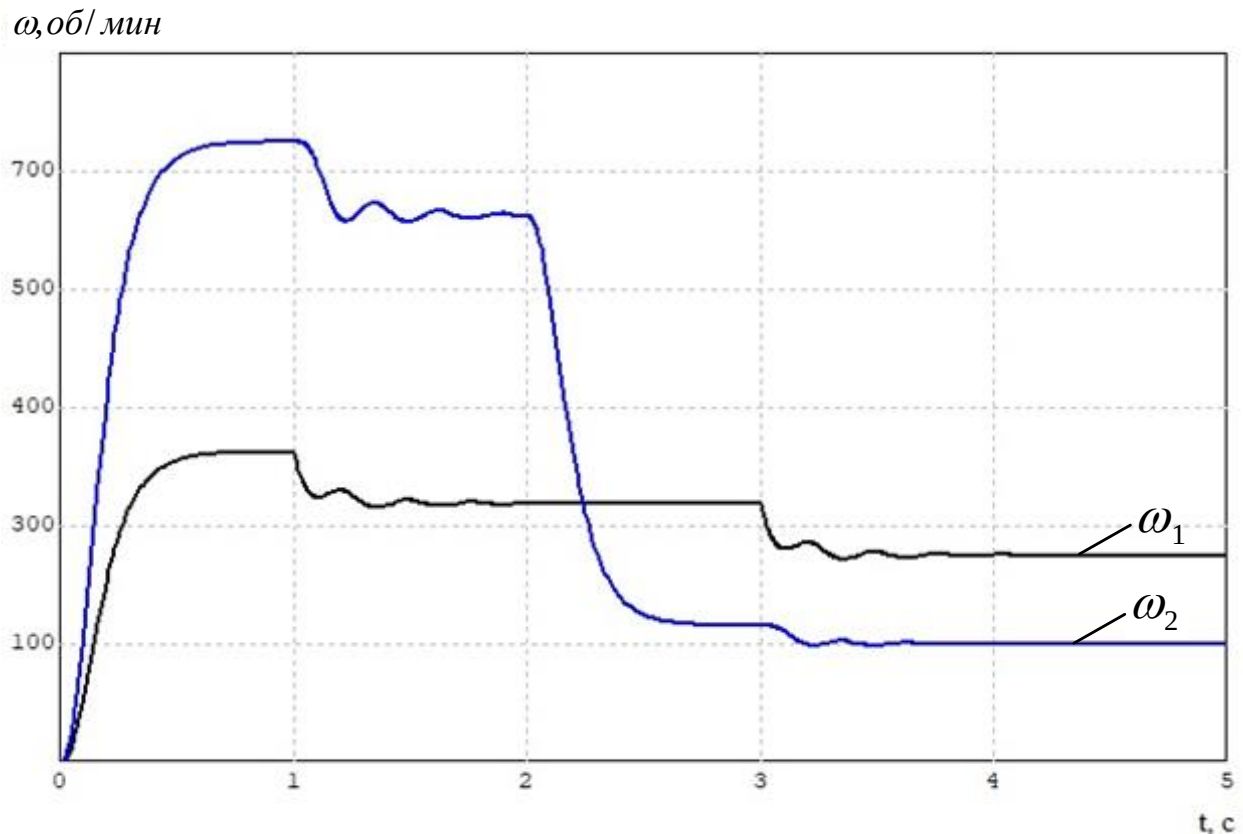


Рис.3.9. Переходные процессы скоростей вращения первого и второго двигателей ω_1 и ω_2 при действии момента нагрузки M_1

Анализ полученных графиков показывает, что при пуске переходные процессы ω_1 и ω_2 протекают идентично. Изменение коэффициента редукции на

втором электроприводе в момент времени $t=2c$ не отражается на первом ЭП. Действие момента нагрузки на первый ЭП M_1 отражается и вторым электроприводом с учетом установленного коэффициента редукции [36, 38].

На рис.3.10 приведены графики переходных процессов при действии возмущающих и управляющих сигналов, с условием, что параметры модели не согласованы с реальными параметрами электроприводов (включено звено $W_4(p)$). Переходные процессы соответствуют условию $2T_2 = T_1$ [36, 38].

$\omega, \text{об/мин}$

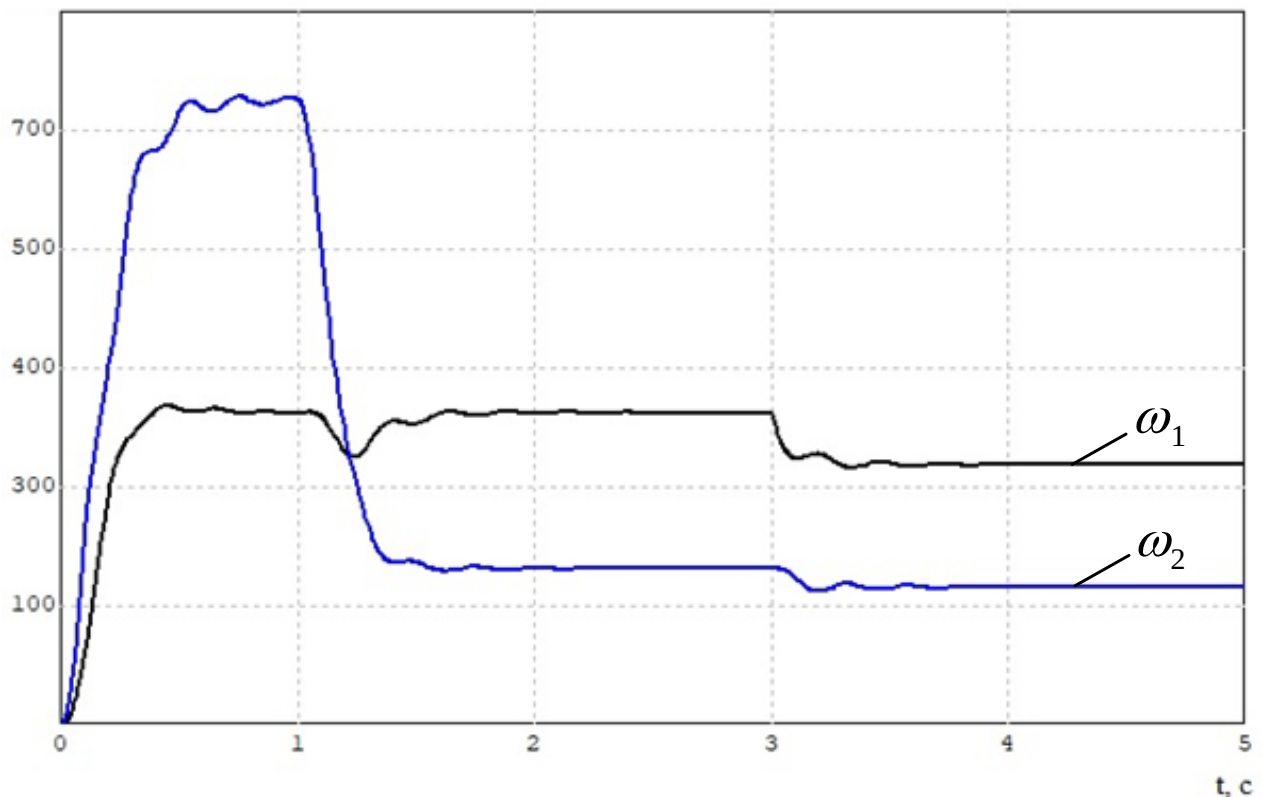


Рис.3.10. Переходный процесс при рассогласовании в цепи модели ($2T_2 = T_1$)

Один из вариантов подобных систем управления согласованным вращением асинхронных двигателей с электронной редукцией представлен на рис.3.11.

Устройство обеспечивает согласованное по скорости вращения управление двумя электроприводами на основе АД с короткозамкнутыми роторами [86, 87].

Особенностью является то, что устройство содержит блок задания редукции, узел смещения, два перемножителя и блок вычисления скорости [75].

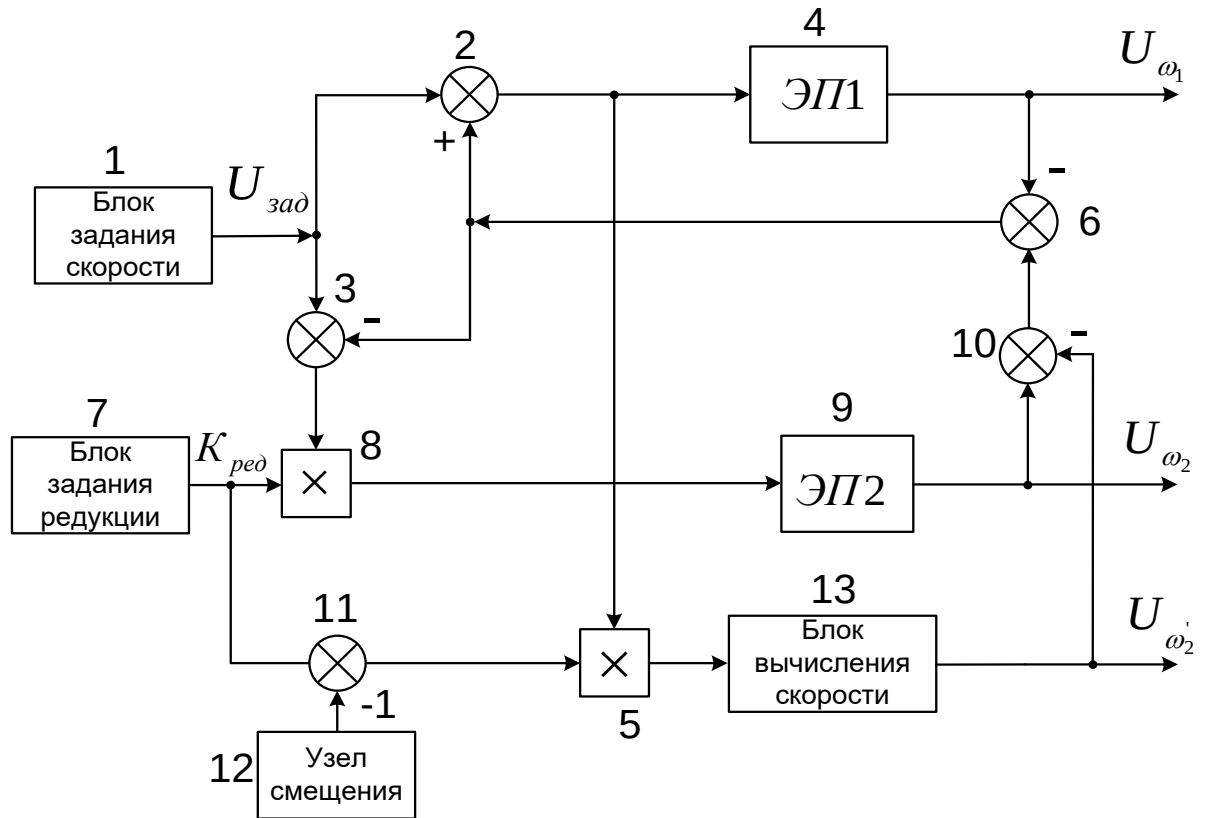


Рис.3.11. Устройство согласованного управления электроприводами с электронной редукцией

Устройство работает следующим образом: сигнал задания скорости складывается с сигналом положительной обратной связи и поступает на вход первого электропривода, а также складывается с сигналом отрицательной обратной связи и поступает на множительное звено, куда подается также сигнал с блока задания редукции [27, 31]. С помощью блока задания редукции задается коэффициент редукции между первым и вторым электроприводом. С блока задания редукции также сигнал суммируется с сигналом смещения и поступает на множительное звено, куда также поступает сигнал с входа первого электропривода. Выходной сигнал с множительного звена поступает на блок вычисления скорости, который определяет скорость второго электропривода без влияния момента нагрузки на него. Сигнал с блока вычисления скорости вычитается из сигнала датчика скорости второго электропривода. Из полученного сигнала затем вычитается сигнал датчика скорости первого электропривода.

Результирующий сигнал является обратной связью для всей системы. Узел смещения предназначен для отключения работы блока вычисления скорости при $K_{ред}=1$.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- предложенная схема позволяет реализовать режим согласования скоростей вращения двигателей;
- схема дает возможность реализовать режим управляемой электронной редукции второго электропривода;
- предложенная схема согласованного управления дает "отражение" момента нагрузки на ненагруженном электроприводе с учетом установленного коэффициента редукции;
- анализ функций чувствительности даёт пути её снижения [36, 38];
- при изменении коэффициента редукции в переходном процессе первого электропривода появляется динамическая ошибка, если параметры звена модели отличаются от реальных значений [36, 38];
- для устранения ошибок, появляющихся при расхождении постоянных времени модели и электропривода можно использовать апериодическое звено или задатчик интенсивности, установив его на выходе блока задания коэффициента редукции;
- в случае различия коэффициентов передачи в цепях модели и электропривода необходимо использовать вычислитель реального коэффициента редукции и ввести в схему поправочные коэффициенты.

3.2.1 Влияние случайных сигналов на работу электропривода

В большинстве литературы [2, 51, 92] по этому вопросу принято разделять все помехи на внешние и внутренние. При такой градации к внешним помехам относятся:

1. Колебания питающей сети.
2. Воздействия внешних электрических и магнитных полей.
3. Помехи, вызванные вибрациями и т.д.

Рассмотрим более подробно каждую группу помех.

Колебания напряжения силовой цепи – явления весьма распространенные. В основном эти изменения напряжения укладываются в пределы $\pm 3\%$. Кроме того возможны кратковременные «выбросы» выходящие за указанные пределы. Анализ показывает, что это наиболее сильно отражается на работе систем управления электроприводами, в частности операционных усилителей [48, 125]. Известно, что даже незначительные изменения питающего напряжения приводит к разбалансу усилителя и изменению его коэффициента усиления. Для устранения этого влияния рекомендуется использовать электронные стабилизаторы напряжения с большими коэффициентами стабилизации и запасом по току нагрузки [137].

Воздействие внешних полей на работу систем автоматики сказывается в основном в создании наводок в слаботочных цепях. При этом, как известно, основная гармоника наведенного напряжения кратна частоте питающей сети [28, 76, 115]. Устранение или существенное ослабление наводок производится в основном с помощью монтажа:

1. Экранируются слаботочные цепи.
2. Силовые провода и провода управления располагаются по возможности в стороне друг от друга.
3. Пересечение монтажа силовых и слаботочных цепей производится под прямым углом.

4. Производится скрутка монтажных проводов в жгуте.

Помехи, вызванные вибрациями, включают в себя изменение параметров при колебаниях подвижных элементов машин и датчиков. Они не оказывают такого существенного влияния как другие группы. Снижение влияния этого типа помех производят с помощью механических демпферов, более качественной стыковкой вращающихся элементов и их балансировкой.

Внутренними помехами называют такие, которые возникают внутри системы автоматического управления, к ним можно отнести следующие:

1. Помехи датчиков обратных связей: тахогенераторов, индуктосинов и т.д.
2. Помехи от дрейфовых изменений параметров схемы.
3. Помехи задатчика сигналов.
4. Помехи в работе электродвигателей.

Рассмотрим в отдельности каждую группу помех.

Помехи датчиков ОС [50] являются одним из наиболее весомых в группе внутренних помех. Если рассматривать тахогенератор постоянного тока [61], то помехами следует считать пульсации напряжения. Эти пульсации определяются конструкцией датчика и содержит в себе гармоники, кратные числу коллекторных пластин (K), числу зубцов якоря (Z), числу пар полюсов ($2P$) и частоте вращения ($n \frac{\text{об}}{\text{мин}}$); частота гармоник определяется формулами:

$$f_1 = \frac{Zn}{60}; f_2 = \frac{kn}{60}; f_3 = \frac{2Pn}{60}; f_4 = \frac{n}{60};$$

Наибольшим весом в пульсациях тахогенераторов обладают гармоники с частотами f_3 и f_4 . Заводы изготовители чаще всего гарантируют величину пульсаций в пределах 1% [139].

Дрейфовые помехи обусловлены тем, что в процессе работы происходит изменения параметров элементов в основном из-за температуры [80]. Следует отметить, что влиянию температуры менее подвержены элементы, работающие в ключевом режиме. Наиболее подвержены температурному влиянию

операционные усилители. Уход нуля может внести ошибку в работу всей системы.

В реальных САУ кроме детерминированных всегда присутствуют случайные сигналы. Особую важность приобретает изучение сигналов, имеющих случайный характер, при анализе высококачественных и быстродействующих систем с большими коэффициентами усиления [54, 89, 140].

Одним из критериев качества в этом случае можно считать уровень дисперсии выходного сигнала [17, 45, 93, 129] при воздействии на систему случайного сигнала. Практика показывает, что большая часть помех поступает в системы с датчиков сигналов [17, 93].

Примем, что помеха – центрированный сигнал случайного характера, типа «белого шума» [88], то есть

$$m=0 ; S(\omega) = N \quad (3.38)$$

где m – математическое ожидание,

$S(\omega)$ – спектральная плотность.

Дисперсия выходного сигнала определяется по формуле [32, 96]:

$$D_x = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty (W_{\text{замк}}(j\omega)^2) * S(\omega) d\omega \quad (3.39)$$

В том случае, если входной сигнал случайного характера представляет собой «белый шум» [32, 96], формула принимает вид:

$$I = \int_0^\infty \left(\frac{a_0 x^m + a_1 x^{m-1} + \dots + a_m}{b_0 x^n + b_1 x^{n-1} + \dots + b_n} \right) dx \quad (3.40)$$

Известна формула [3,16], позволяющая с помощью статистических показателей оценить действующее значение момента, развиваемое исполнительным двигателем, вызванного помехами. При этом момент пропорционален значению интеграла вида:

$$\tilde{I} = \int_0^\infty S(\omega) (\omega^2 W_{\text{замк}}(j\omega)^2) d\omega \quad (3.41)$$

Рассмотрим влияние случайного сигнала на работу согласованной системы с электрической редукцией. Будем считать, что в формуле (3.25) $W_3(p) = K_3$. В этом случае

$$W_{U1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M_1(p)} = W_2 * \frac{1 + W_1 W_2 K_3}{1 + 2W_1 W_2 K_3} \quad (3.42)$$

Для (3.42) найдем значение интеграла I_3

$$I_3 = \frac{C_2^2 d_0 d_1 + (C_1^2 - 2C_0 C_2) d_0 d_3 + C_0^2 d_2 d_3}{2d_0 d_3 (d_1 d_2 - d_0 d_3)} \quad (3.43)$$

Для рассматриваемого случая

$$\begin{cases} C_0 = 1 + K, \\ C_1 = T_1 + T_2, \\ C_2 = T_1 T_2, \\ d_0 = 1 + 2K, \\ d_1 = T_1 + 2T_2, \\ d_2 = T_2(T_2 + 2T_1), \\ d_3 = T_1 T_2^2 \end{cases} \quad (3.44)$$

Для (3.42) условием устойчивости является выражение

$$d_1 d_2 - d_0 d_3 > 0$$

При подстановке (3.36) получаем

$$\frac{(T_1 + T_2)^2}{T_1 T_2} > K \quad (3.45)$$

Введем замену

$$T_2 = \alpha T_1 \quad (3.46)$$

В этом случае (3.46) принимает вид

$$\alpha + 2 + \frac{1}{\alpha} > K \quad (3.47)$$

Выражение (3.47) определяет границу устойчивости системы.

Можно определить условие минимизации значения интеграла I_3

$$\frac{dI_3}{dK} = 0$$

Используя выражения (3.43, 3.44, 3.46) получаем

$$K = \frac{\alpha^2 - 3\alpha - 4}{\alpha - 4} \quad (3.48)$$

По выражениям (3.47, 3.48) построены соответствующие графики (рис. 3.12). На графике видно, что линия, соответствующая $I_3 = \min$ находится в зоне устойчивости системы на величину $\Delta K = 1 \div 1,5$ от границы устойчивости.

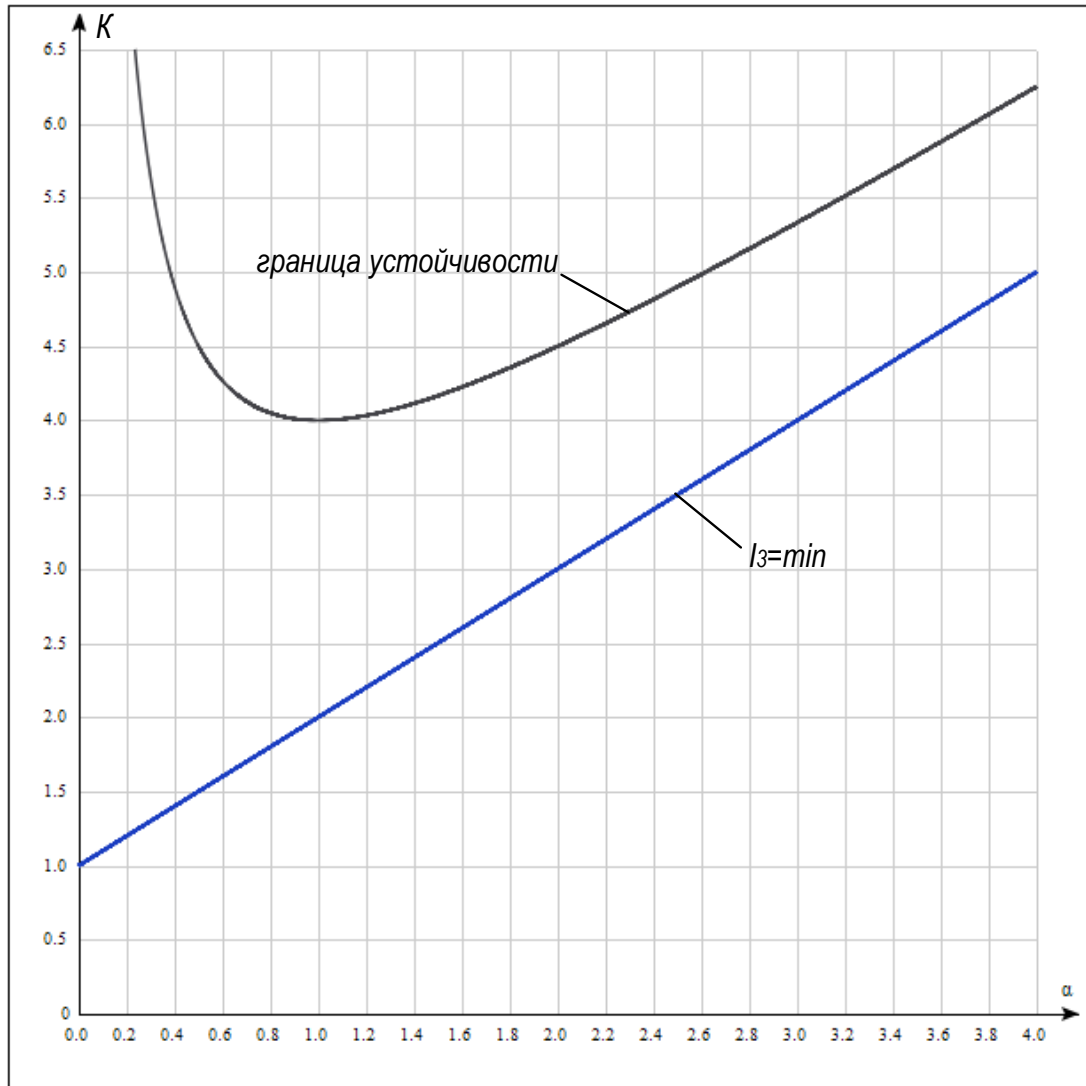


Рис. 3.12. Граница устойчивости системы и линия настройки на минимум дисперсии

3.3. Обоснование необходимости идентификации параметров

При создании систем согласованного управления подразумевается, что параметры каждого электропривода одинаковы. Однако, на практике весьма часто возникают условия, приводящие к изменению параметров отдельных электроприводов (изменение моментов инерции и трения, нагрев сопротивления обмотки [40, 79] и др.). В этом случае появляются ошибки в согласованности работы. Эти ошибки можно компенсировать адаптивными (перестраиваемыми) компенсирующими звеньями [3, 91]. Для формирования сигналов адаптации необходимо осуществить оценку расхождения параметров между отдельными

электроприводами (идентификация различия $\rightarrow \Delta$ – индентификация). Выравнивание статических и динамических характеристик отдельных электроприводов следует проводить в следующем порядке:

1. В тестовом режиме (без нагрузки) на систему согласованного управления подается скачок задающего сигнала и фиксируется $\Delta n = n_2 - n_1$.
2. Выполняется анализ полученных данных, на основе которого определяется электропривод и параметр, требующий корректировки.
3. В контур регулирования настраиваемого электропривода включается адаптивное корректирующее звено, обеспечивающее подстройку параметров в системе согласованного управления.

Предположим, что в схеме (рис.2.11)

$$W_5(p) \neq W_6(p) \quad (3.49)$$

В этом случае передаточная функция $W_{\Delta n}(p) = \frac{\Delta n(p)}{\Delta U(p)}$ принимает вид

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{W_1(p)[W_6(p) - W_5(p)]}{1 + W_1(p)W_7(p)[W_5(p) + W_6(p)]} \quad (3.50)$$

Считаем, что все звенья в передаточной функции (3.50) апериодические [5]. Так как исследуется в первую очередь реакция системы на изменение момента нагрузки, колебательностью можем пренебречь.

Для анализа влияния различия звеньев $W_5(p)$ и $W_6(p)$ принимаем, что

$$K_6 = \alpha K_5, T_6 = \beta T_5 \quad (3.51)$$

С учетом (3.51) и отбрасывания малых величин передаточная функция $W_{\Delta n}(p)$ (3.50) будет иметь вид:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{K_1 K_5 [T_5(\alpha - \beta)p + (\alpha + 1)]}{\beta T_5^2 p^2 + K_1 K_5 K_7 [T_5(\alpha - \beta)p + (\alpha + 1)]} \quad (3.52)$$

В соответствии с выражением (3.52) определим дисперсию ошибки [4, 29], если во входном сигнале присутствует случайная помеха типа "белый шум":

$$D = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K(j\omega)|^2 \cdot S_x(\omega) d\omega = I_n \quad (3.53)$$

Интеграл, стоящий в правой части выражения, табулирован.

Для передаточной функции (3.52) имеем:

$$I_2 = \frac{C_1^2 d_0 + C_0^2 d_2}{2d_0 d_1 d_2} \quad (3.54)$$

где

$$C_0 = (\alpha - 1), C_1 = T_5(\alpha - \beta), d_0 = K_1 K_5 K_7 (\alpha + 1),$$

$$d_1 = K_1 K_5 K_7 T_5 (\alpha + \beta), d_2 = \beta T_5^2.$$

После подстановки получаем:

$$I_2 = \frac{(\alpha - \beta)^2 K_1 K_5 K_7 (\alpha + 1) + \beta (\alpha - 1)^2}{2\beta (K_1 K_5 K_7)^2 T_5 (\alpha + \beta) (\alpha + 1)} \quad (3.55)$$

Анализ выражения (3.55) показывает, что дисперсия случайной ошибки будет равна нулю при условии

$$\alpha = \beta = 1 \quad (3.56)$$

Условие (3.56) соответствует режиму, когда параметры электроприводов, работающих в согласованном режиме, полностью равны друг другу. В то же время уравнение (3.55) позволяет оценить степень влияния изменения α (коэффициент усиления) и β (постоянной времени). График влияния изменения α и β на величину дисперсии представлен на рис. 3.13.

На графике вертикальная ось представляет собой значение интеграла, а горизонтальные оси – значения коэффициента усиления α и постоянной времени β , соответственно.

Анализ графика показывает, что существенный рост дисперсии наступает при:

- увеличении α больше 1;
- уменьшении β меньше 1.

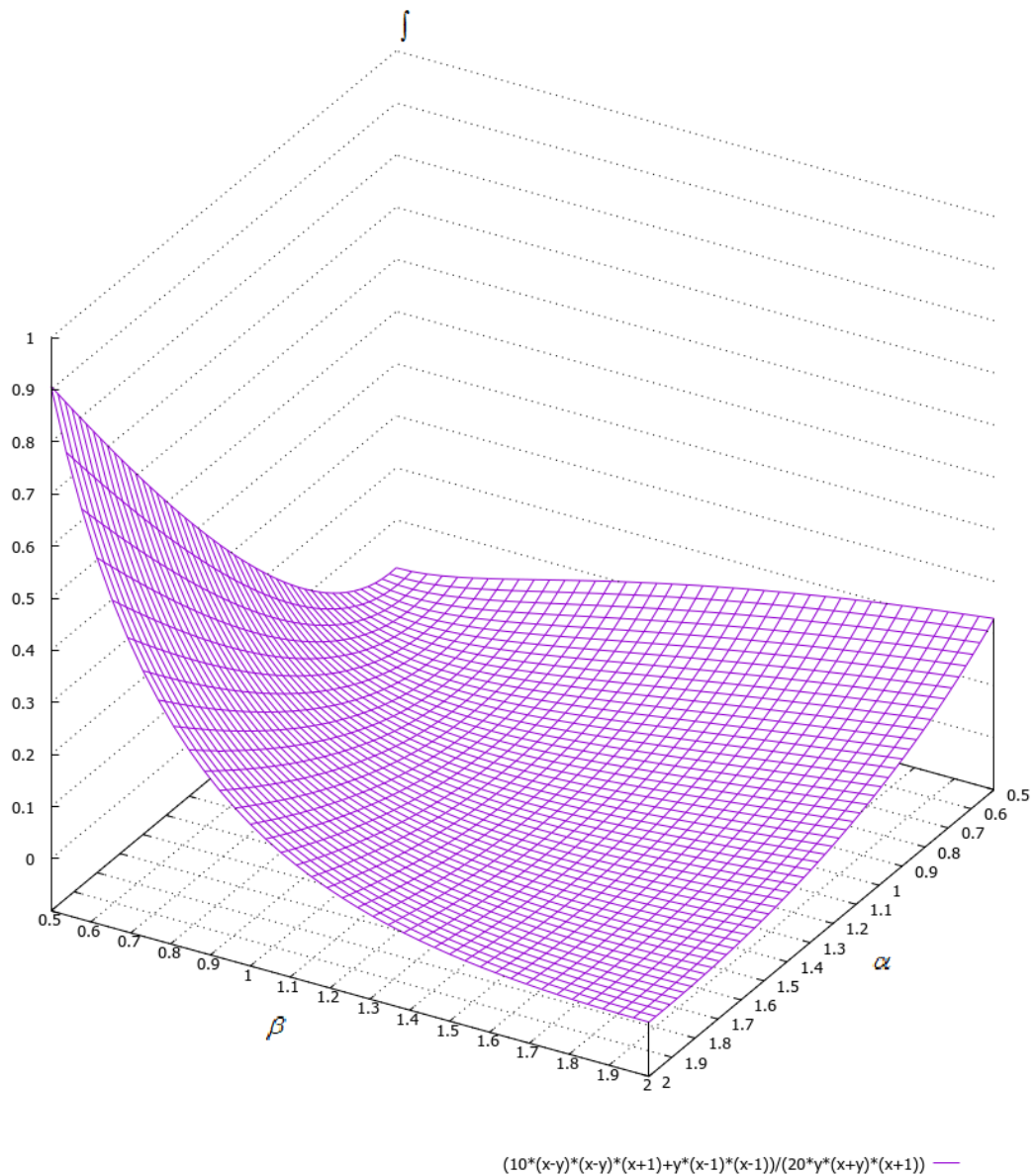


Рис.3.13. График влияния изменения коэффициента усиления α и постоянной времени β на величину дисперсии

Рассмотрим более подробно работу системы на каждом этапе.

1 этап. Тестовый режим.

На этом этапе необходимо определить наличие рассогласования параметров в исследуемой системе. Для этого анализируется переходный процесс разности скоростей на скачок задающего воздействия.

На рис. 3.14-3.15 приведены переходные процессы, полученные на модели (рис. 2.11) для различных вариантов рассогласования.

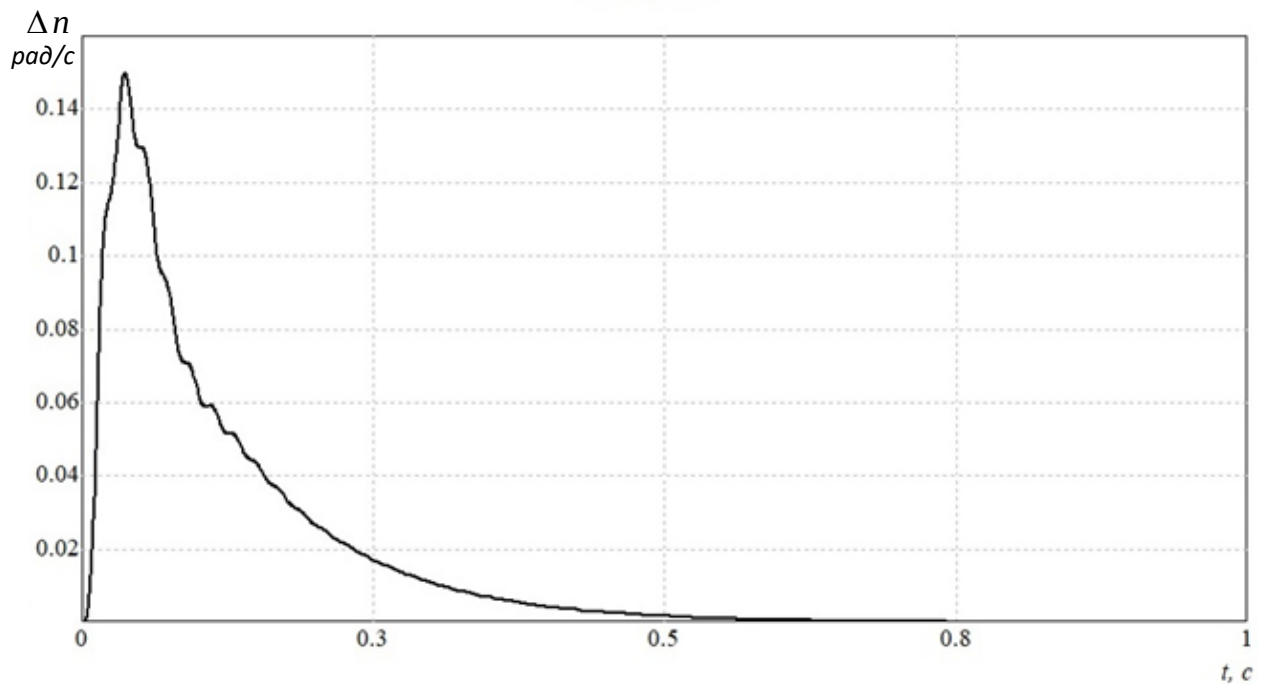


Рис. 3.14. Переходный процесс при разных значениях моментов инерции электроприводов

2 этап. Анализ данных

По результатам тестового режима были получены данные (рис.3.14 и 3.15). Анализ исследуемой схемы показывает, что:

- динамическая ошибка (рис.3.14) соответствует рассогласованию постоянных времени между отдельными электроприводами;
- процесс со статической ошибкой связан с различием коэффициентов усиления;
- знак переходного процесса (рис.3.14 и 3.15) позволяет определить электропривод, требующий настройки.

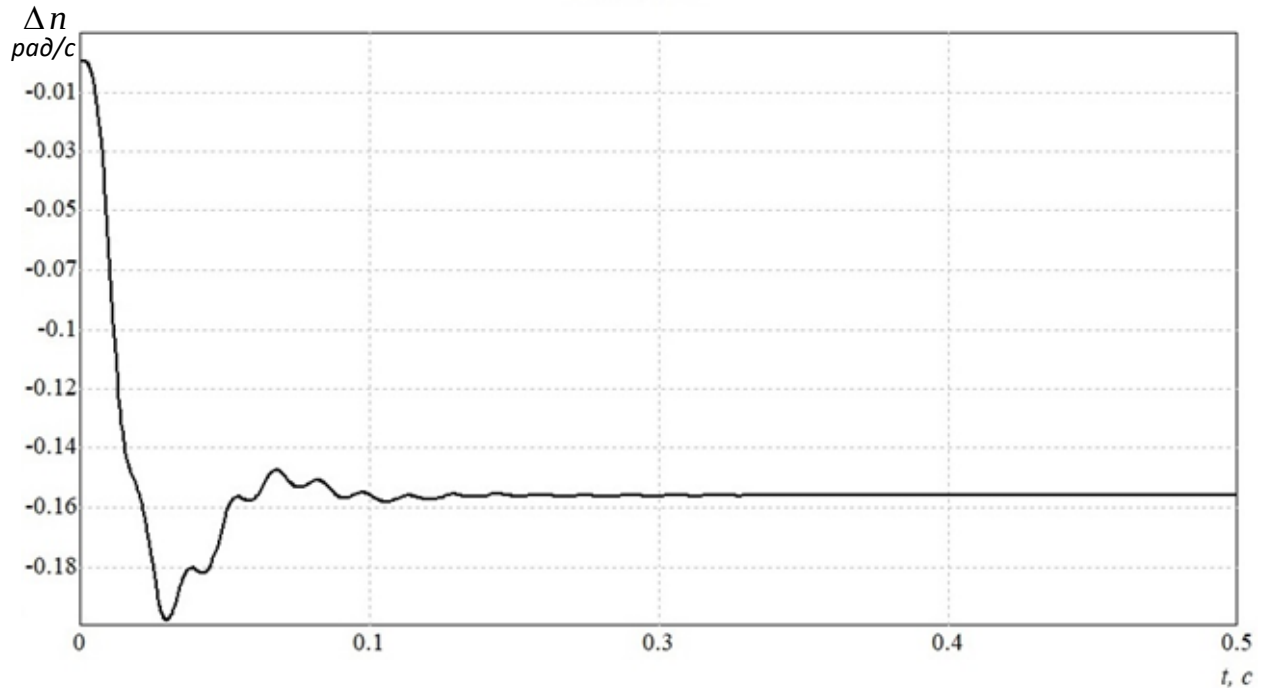


Рис. 3.15. Переходный процесс с учетом различия коэффициентов усиления

Для согласования параметров необходимо определить уровень расхождения параметров и очередность их настройки. В первую очередь определяется корректируемый электропривод. Если знак переходного процесса отрицательный, то параметры первого электропривода преобладают над вторым. С учетом естественных ограничений в этом случае следует корректировать параметры первого электропривода.

Величина статической ошибки (рис.3.15) характеризует уровень различия коэффициентов усиления и может быть использована в качестве настраивающего сигнала адаптивного регулятора [8, 12]. В результате адаптации настраиваемого электропривода статическая ошибка должна быть полностью компенсирована.

Величину динамической ошибки необходимо преобразовать в настраивающий сигнал адаптивного регулятора. Это можно выполнить с помощью интегрирующего звена.

3 этап. Включение адаптивного корректирующего звена

Наиболее общим по выполняемым функциям можно считать ПИД – регулятор с передаточной функцией [56, 127]

$$W(p) = K_1 + K_2 p + \frac{K_3}{p} \quad (3.57)$$

Он может быть реализован по известной схеме [56, 127] на трех операционных усилителях. В случае применения перестраиваемого регулятора (ПР) на базе ПИД – регулятора схема принимает вид [56, 127] (рис.3.16)

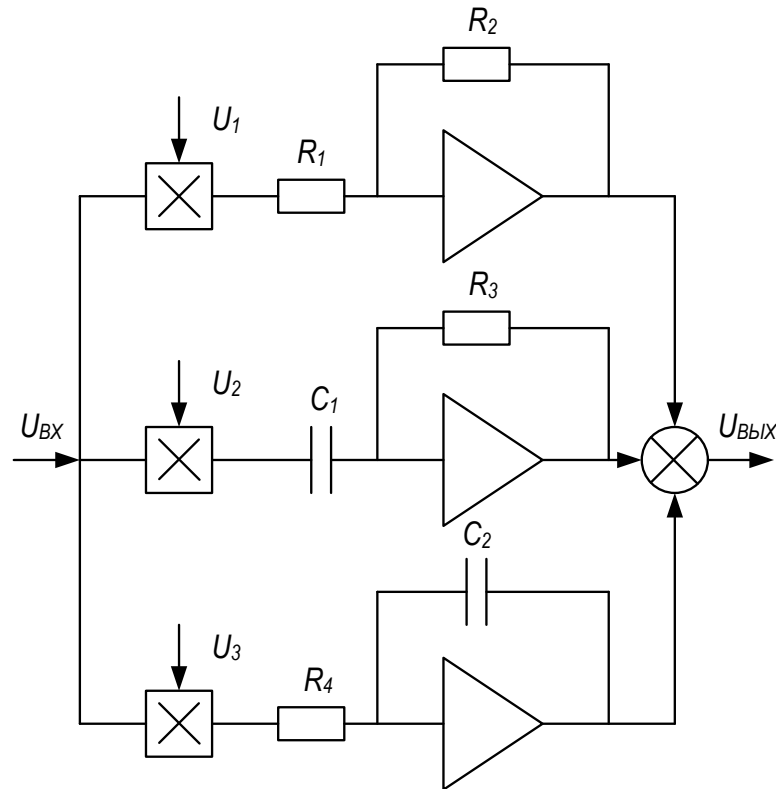


Рис. 3.16. Перестраиваемый ПИД-регулятор

3.4. Синтез элементов и моделирование электропривода

На основе описания элементов системы управления был смоделирован электропривод в ПК MBTU и проведен анализ возможности коррекции статической и динамической ошибок при рассогласовании параметров электроприводов (рис.3.17). Для этого были заданы начальные условия разности значений моментов инерции и коэффициентов усиления электроприводов ($T_{M1} \neq T_{M2}$ и $K_{M1} \neq K_{M2}$).

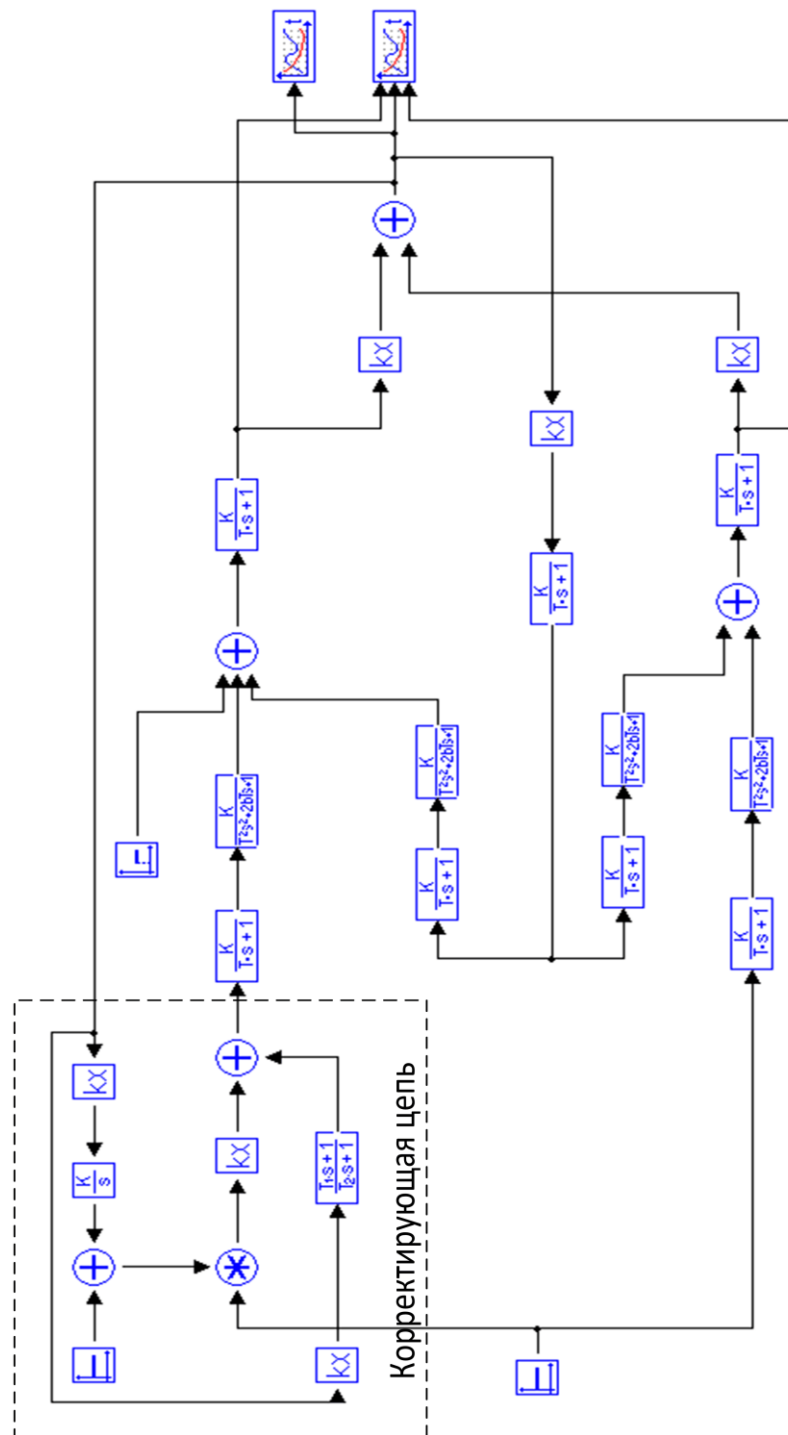


Рис.3.17. Модель системы с цепью коррекции статической и динамической ошибок

В первую очередь определяем корректируемый электропривод. Для этого проводим включение системы без корректирующей цепи. График переходного процесса для этого режима приведен на рис.3.18.

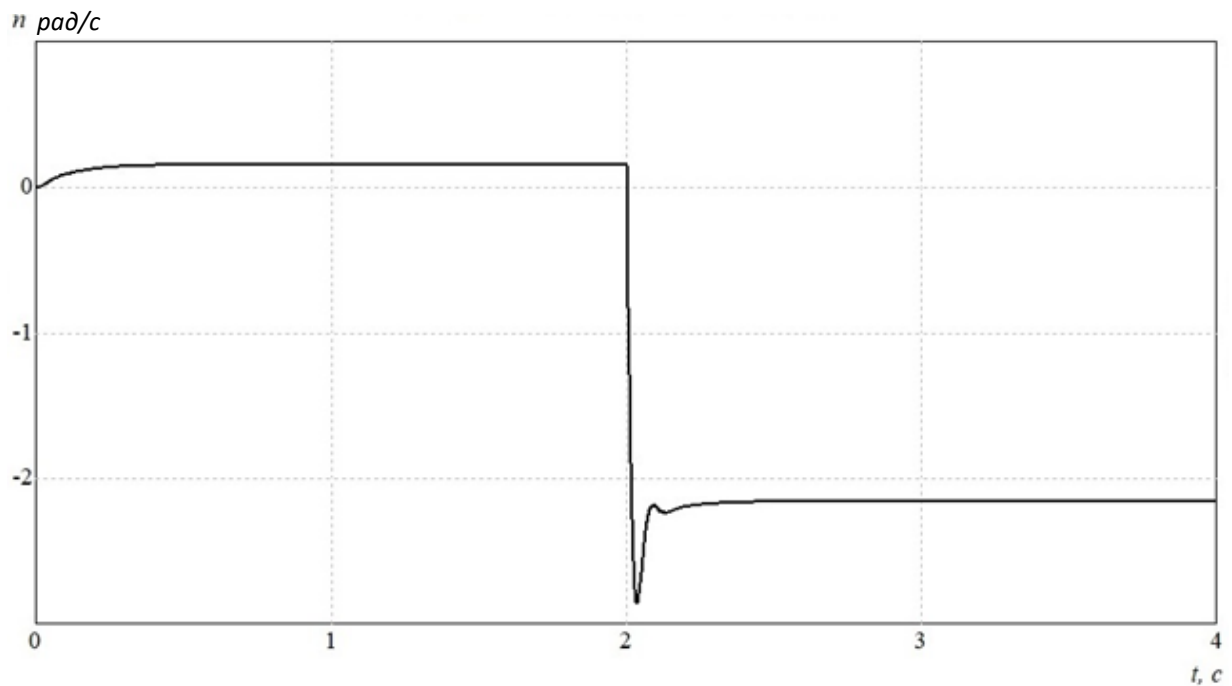


Рис.3.18. График переходного процесса при рассогласовании параметров электроприводов

Так как знак переходного процесса отрицательный, значит параметры первого электропривода преобладают над вторым. С учетом естественных ограничений в этом случае следует корректировать параметры первого электропривода. Для этого включаем цепь коррекции статической и динамической ошибок.

Корректирующая цепь в модели представлена следующими звеньями: "константа", три усилительных звена k_x , интегрирующее звено, а также звено общего вида. Работа корректирующей цепи может быть описана следующим алгоритмом: сигнал обратной связи по Δ -скорости через усилительное звено k_x поступает на вход интегратора, тем самым происходит интегрирование сигнала ошибки регулирования. Тот же сигнал обратной связи по Δ -скорости, усиливаясь во втором звене k_x , поступает на вход звена общего вида.

На рис.3.19 и рис.3.20 представлены графики переходных процессов при включении цепи коррекции статической ошибки и цепи коррекции динамической ошибки соответственно.

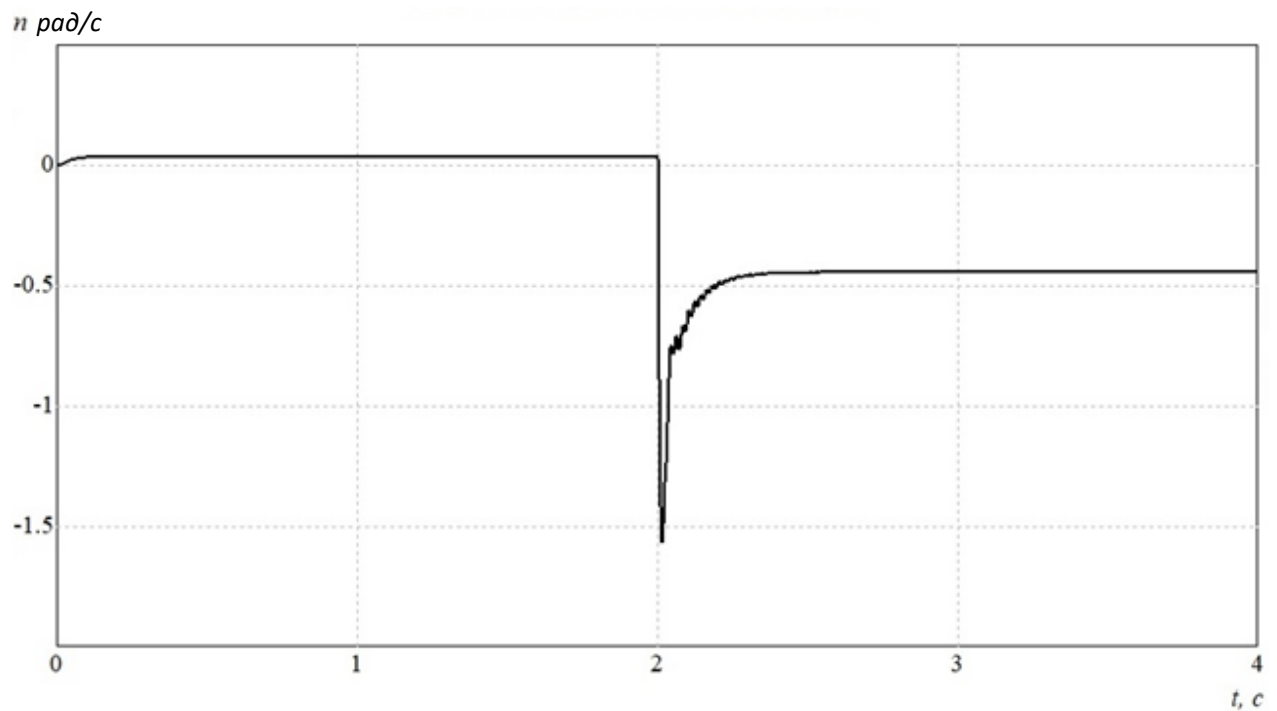


Рис.3.19. График переходного процесса при включении цепи коррекции статической ошибки

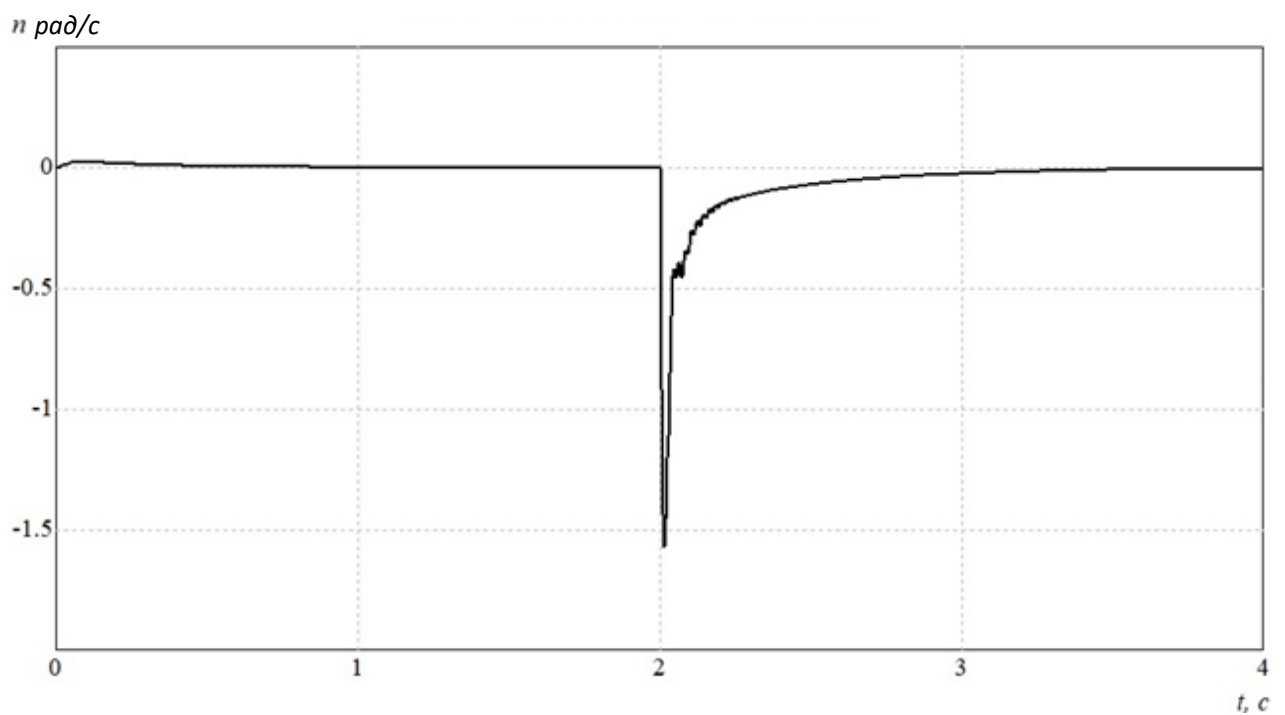


Рис.3.20. График переходного процесса при включении цепи коррекции динамической ошибки

Анализ графиков показывает эффективность коррекции статической и динамической ошибок при условии рассогласования параметров электроприводов.

Выводы к главе 3

Выполнен синтез "активной" взаимосвязанной системы (ВСС), содержащей в своем составе силовые преобразователи и регуляторы. Определены уравнения для настройки такой системы. Рассчитан показатель колебательности ВСС в зависимости от параметров электропривода. Разработана схема ВСС с электронной редукцией. Для неё проведен анализ воздействия помех, носящих случайных характер. Определены условия настройки на минимум дисперсии выходного сигнала. Обоснована необходимость предварительной настройки электроприводов ВСС для согласования их статических и динамических параметров. Проведено моделирование этого процесса.

Проведенные в третьей главе исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. "Активная" схема ВСС на основе АД с двумя комплектами статорных обмоток позволяет снизить уровень ошибок рассогласования.
2. Увеличение контурного коэффициента ВСС за счет применения преобразователей и регуляторов приводит к возрастанию показателя колебательности и дисперсии. В связи с этим необходимо при настройке ВСС определять условия, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к этим показателям.
3. Условия эксплуатации электроприводов слипа приводят к появлению различий в статических и динамических характеристиках отдельных электроприводов. В связи с этим целесообразно до работы (перемещение судна) провести настройку отдельных ЭП по согласованию этих параметров.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Описание экспериментальной установки

Для проведения эксперимента использовалась двухскоростная асинхронная машина с короткозамкнутым ротором типа АИР 90L8/4Е [9]. В ходе работы было произведено разделение обмоток на две независимые: рабочую обмотку (РО) и обмотку согласования (ОС) (рис.4.1).

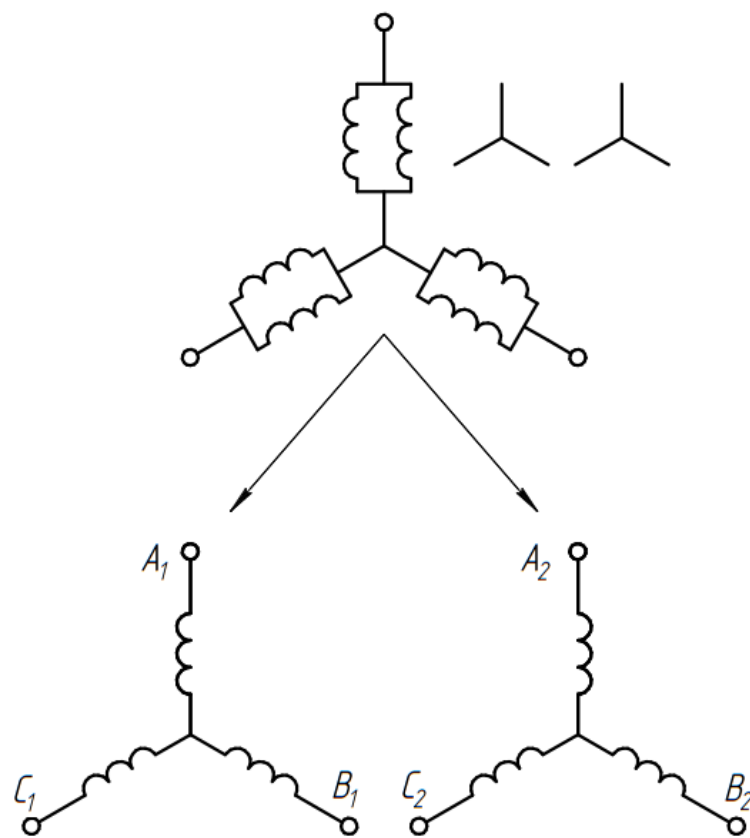


Рис.4.1. Изменение схемы включения обмоток двигателя



Рис.4.2. Вид экспериментального асинхронного двигателя с измененной клеммной колодкой

Для изучения характеристик двигателя с измененной схемой статорных обмоток была составлена функциональная схема электропривода, которая представлена на рис.4.3.

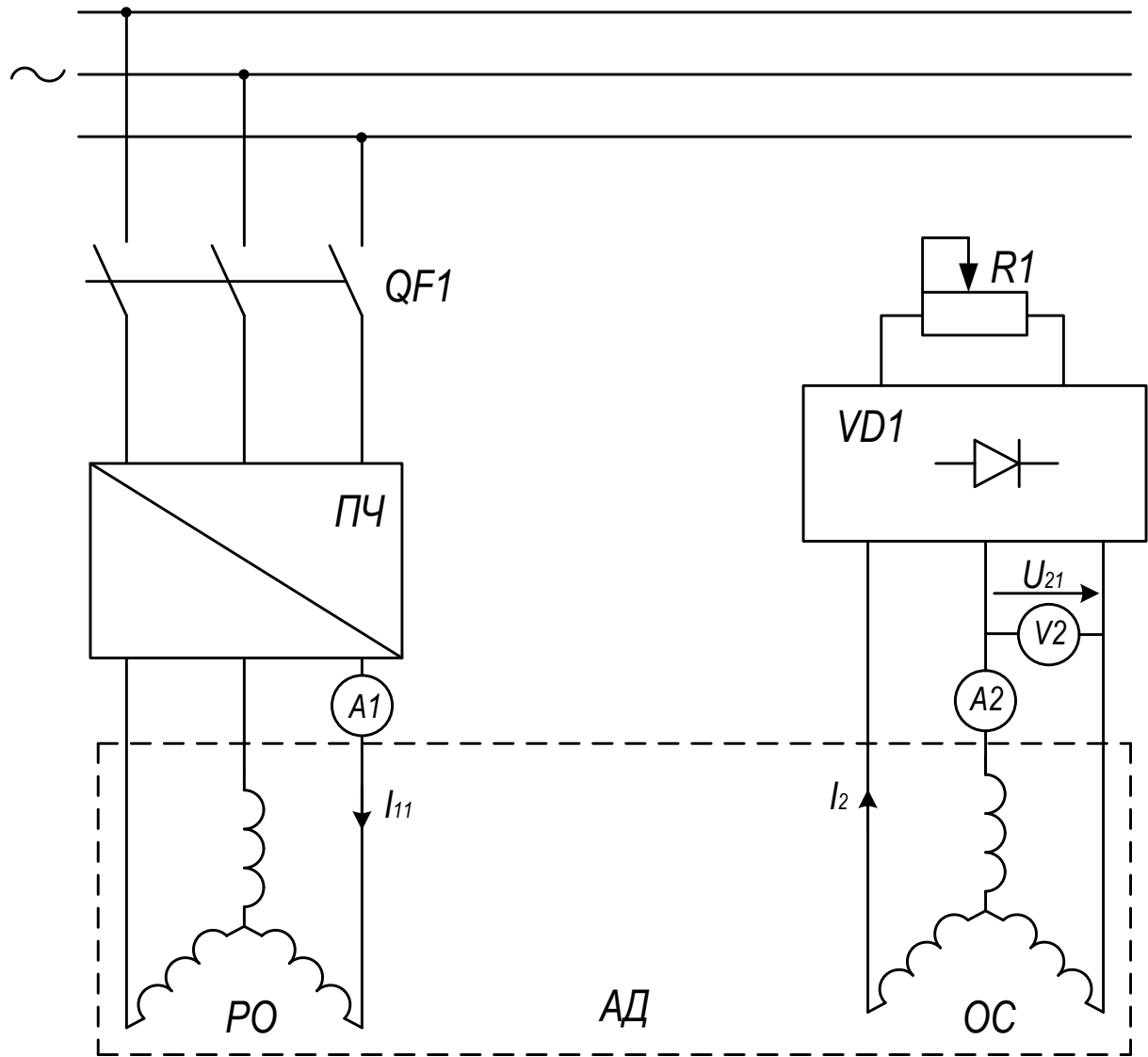


Рис.4.3. Функциональная схема испытательного стенда для изучения характеристик двигателя с измененной схемой статорных обмоток

Для измерения токов и напряжений были установлены измерительные приборы в цепи рабочей обмотки и обмотки согласования ($A1$, $A2$ и $V2$). Нагрузка реализована реостатом $R1$, подключенным через трехфазный диодный мост $VD1$. Для полноты картины проводимого исследования в опытах использовались различные значения питающего напряжения, подаваемого на обмотку

возбуждения и соответствующего различным скоростям вращения двигателя, а также изменяемая нагрузка.

Для проведения исследования была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис.4.4), на которой производилось испытание электропривода в широком диапазоне скоростей и напряжения, подаваемого на первичную обмотку.

В состав экспериментальной установки (рис.4.4) входят:

- станина, муфты;
- приводной двигатель – АД;
- частотный преобразователь (ПЧ);
- трехфазный диодный мост (VD1);
- нагрузка – реостат (R1);
- электроизмерительные приборы (A, V);
- защитные устройства – автоматические выключатели (QF)

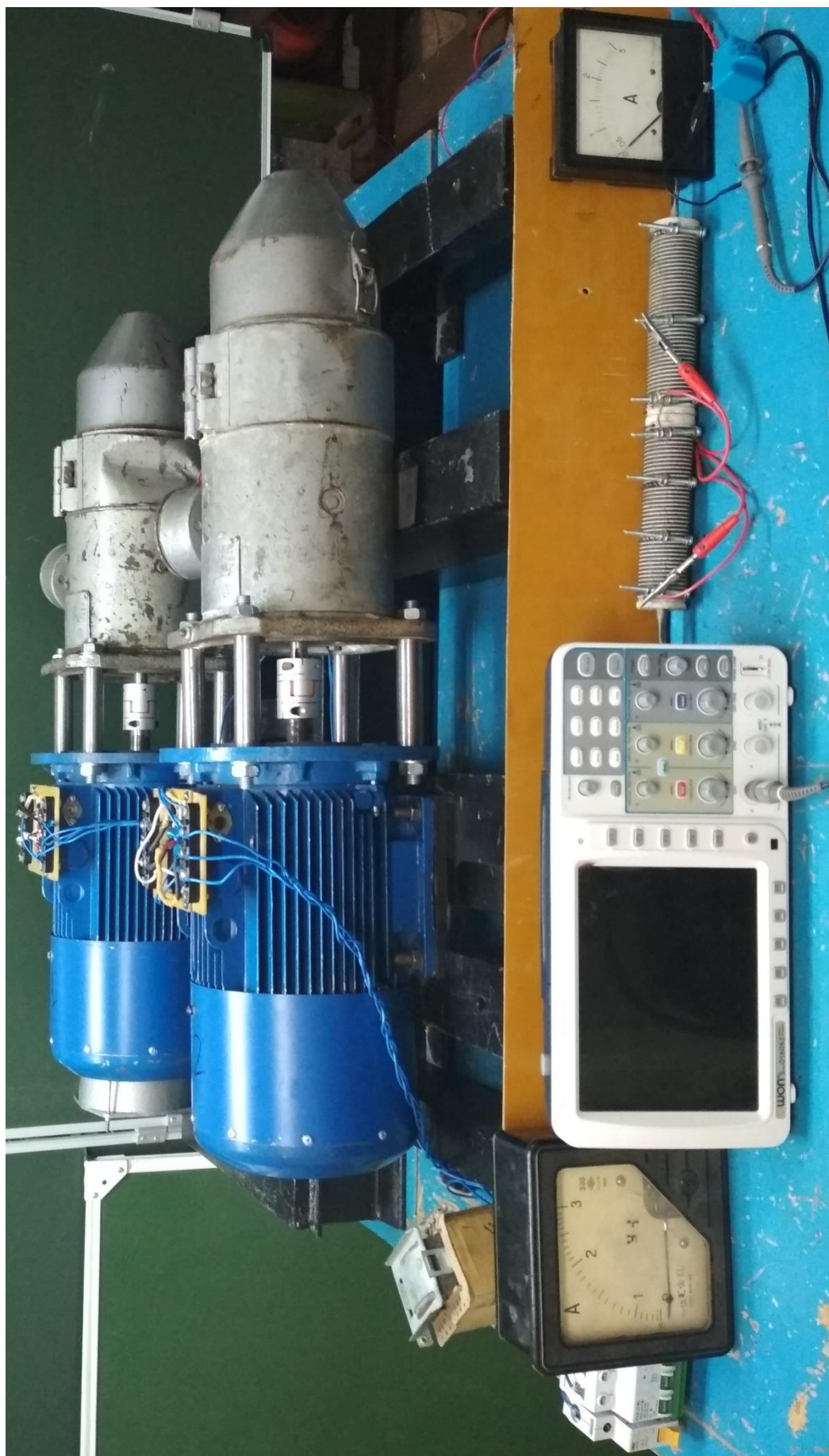


Рис.4.4. Экспериментальная установка для исследования электропривода

В таблицах 4.1.-4.3 представлены значения тока первичной цепи и напряжения вторичной цепи от тока вторичной цепи для трех значений питающего напряжения и скорости двигателя. На рис.4.5-4.6 представлены графики этих зависимостей.

Таблица 4.1

Зависимости тока первичной цепи и напряжения вторичной цепи от тока вторичной цепи при скорости вращения двигателя 1200 об/мин

I_{11}	1,27	2,3	2,49	2,65	2,83	3,06	3,43
I_2	0	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
U_{21}	135	80	73	67	59	49	33

Таблица 4.2

Зависимости тока первичной цепи и напряжения вторичной цепи от тока вторичной цепи при скорости вращения двигателя 900 об/мин

I_{12}	1,25	1,89	2,01	2,17	2,33	2,58	2,87	3,4
I_2	0	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,55
U_{22}	100	63	59	52	47	38	28	10

Таблица 4.3

Зависимости тока первичной цепи и напряжения вторичной цепи от тока вторичной цепи при скорости вращения двигателя 600 об/мин

I_{13}	1,22	1,55	1,64	1,76	1,9	2,09	2,42
I_2	0	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
U_{23}	68	43	40	35	30	25	15

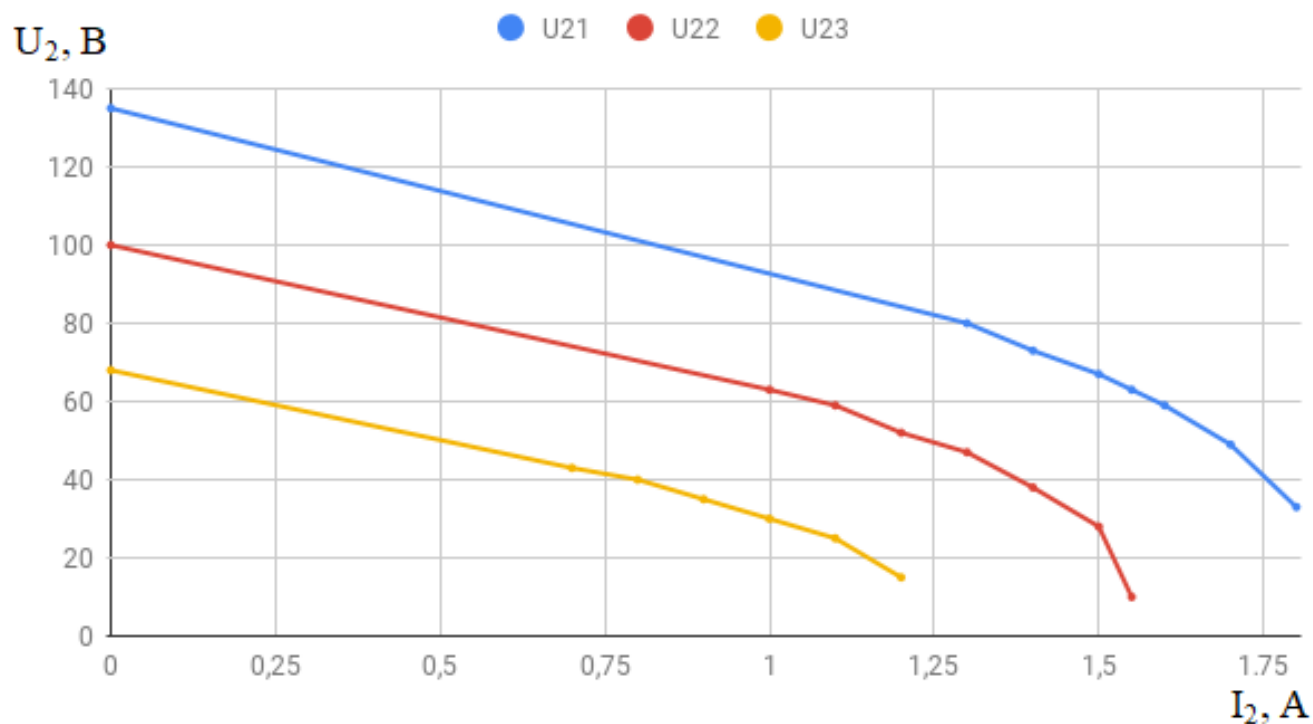


Рис.4.5. Графики зависимости напряжения от тока вторичной цепи

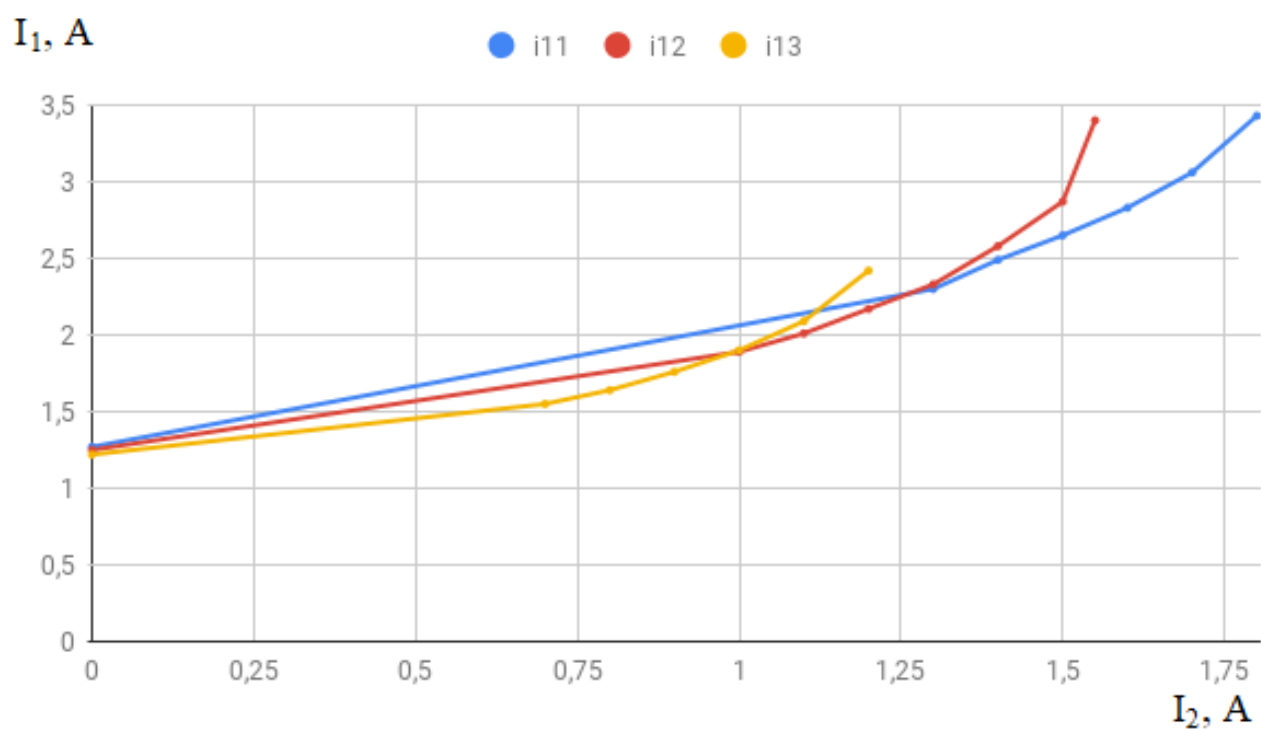


Рис.4.6. Графики зависимости токов первичной цепи от тока вторичной цепи

Анализ графиков показывает, что увеличение тока вторичной цепи дает увеличение тока первичной цепи и снижение напряжения вторичной цепи.

Отсюда можно сделать вывод, что с увеличением момента корректируемого электропривода увеличивается уравнильный ток, протекающий в обмотке согласования.

Полученные результаты позволяют получить эмпирическую формулу расчета ошибки по скорости при включении пассивной цепи согласования:

$$\Delta n_c \approx \Delta n \frac{K_{TP}^I}{N}$$

где $K_{TP}^I = \frac{I_{11}}{I_2}$ – коэффициент трансформации двигателя по току на линейном участке, Δn – ошибка без включения цепи согласования, Δn_c – ошибка при включении цепи согласования, N – количество согласованно работающих двигателей, I_{11} – ток рабочей обмотки, I_2 – ток обмотки согласования (табл. 4.2).

Значения отношений ошибок приведены на рис.4.7.

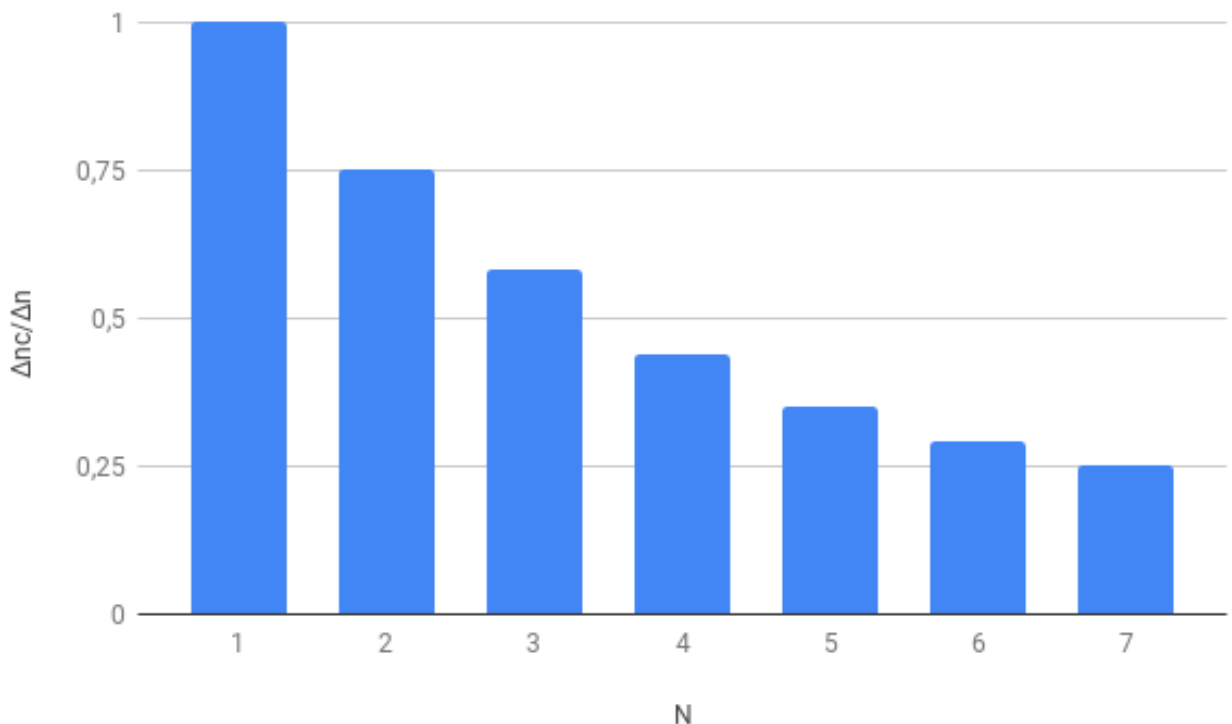


Рис. 4.7. Зависимость отношения ошибок по скорости от количества согласованно работающих двигателей

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при увеличении количества параллельно работающих двигателей отношение ошибок

уменьшается. Соответственно предлагаемая схема включения двигателя позволяет создавать простые и эффективные системы многодвигательного электропривода, реализующие согласованную работу.

Для исследования взаимосвязанной системы была разработана и изготовлена экспериментальная установка, функциональная схема которой приведена на рис.4.8.

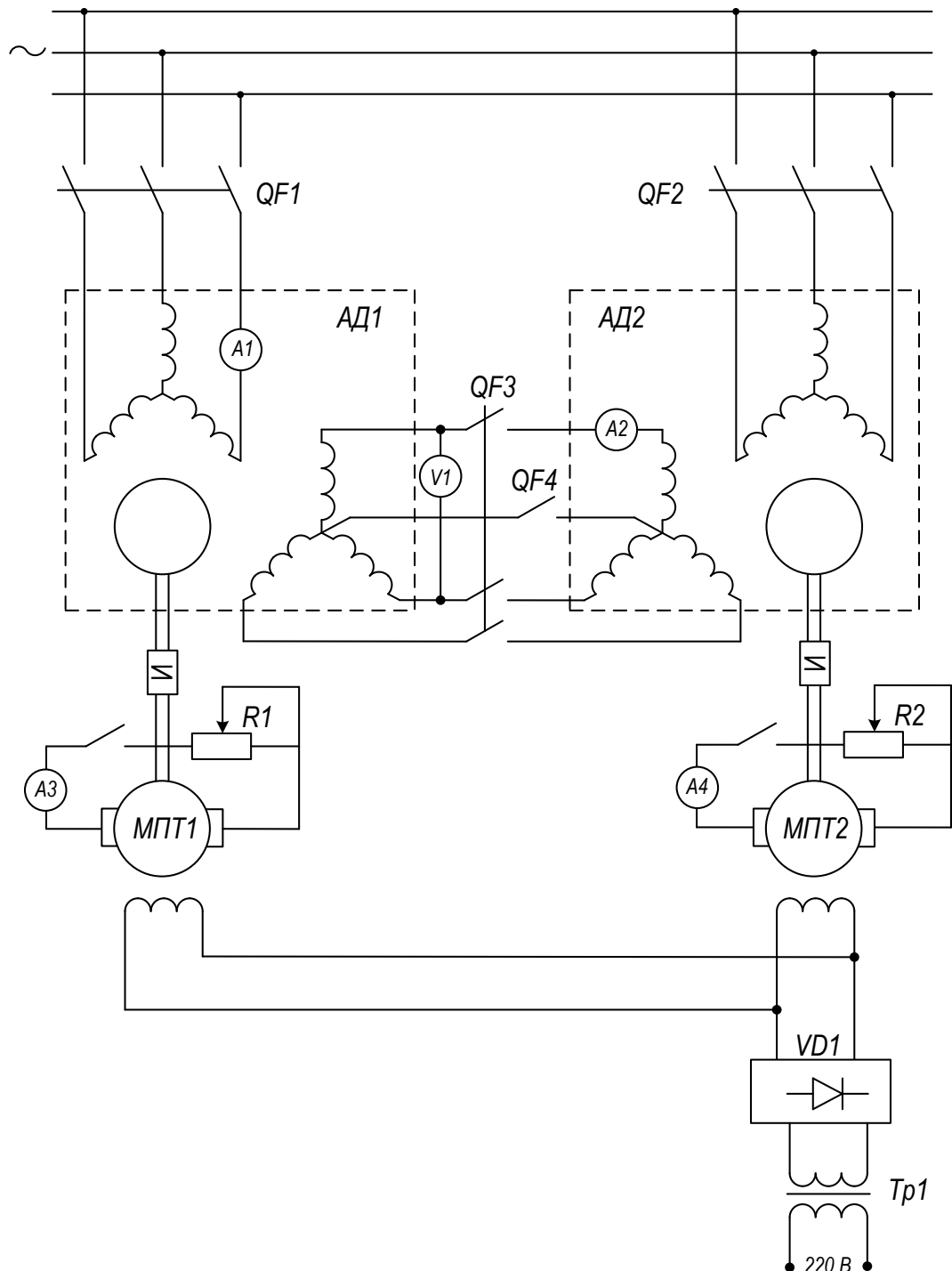


Рис. 4.8. Функциональная схема экспериментальной установки

Машины постоянного тока действуют в системе в качестве нагрузки на асинхронные двигатели. Нагрузка подается на один из двигателей через 2 секунды с начала работы системы, после чего включается цепь синхронизации, снижая ошибку рассогласования скоростей асинхронных двигателей (рис.4.9).

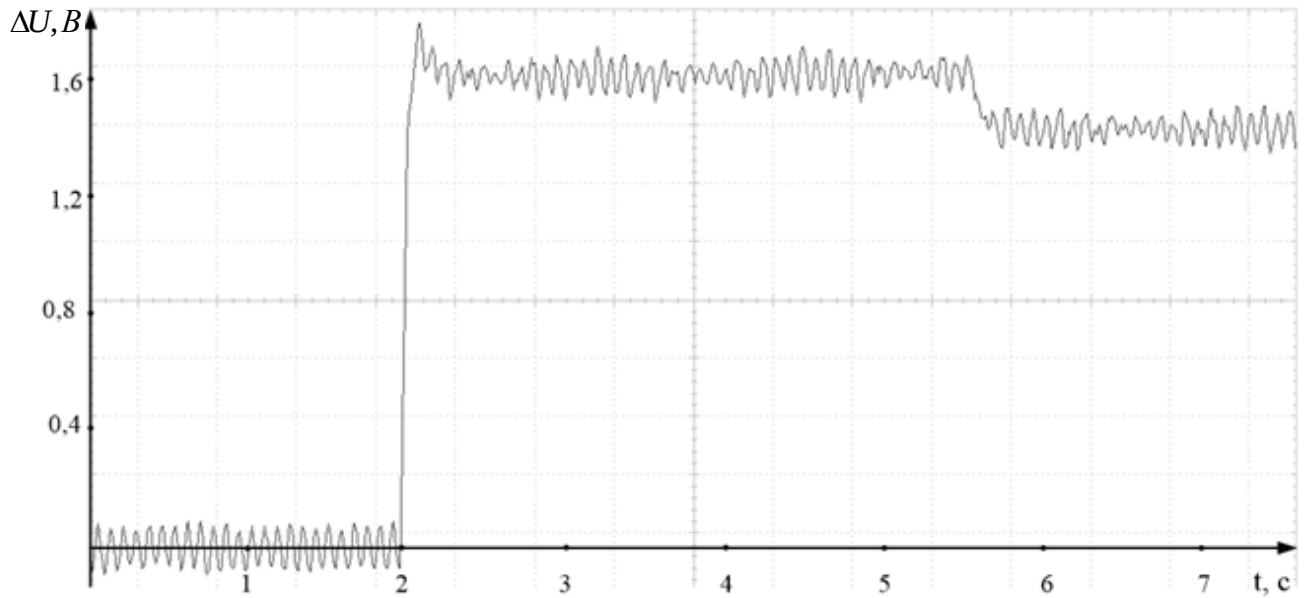


Рис.4.9. График зависимости разности напряжений на тахогенераторах

В ходе эксперимента был получен график ошибки по скорости после отключения питания одного из двигателей, входящих в систему (рис.4.10).

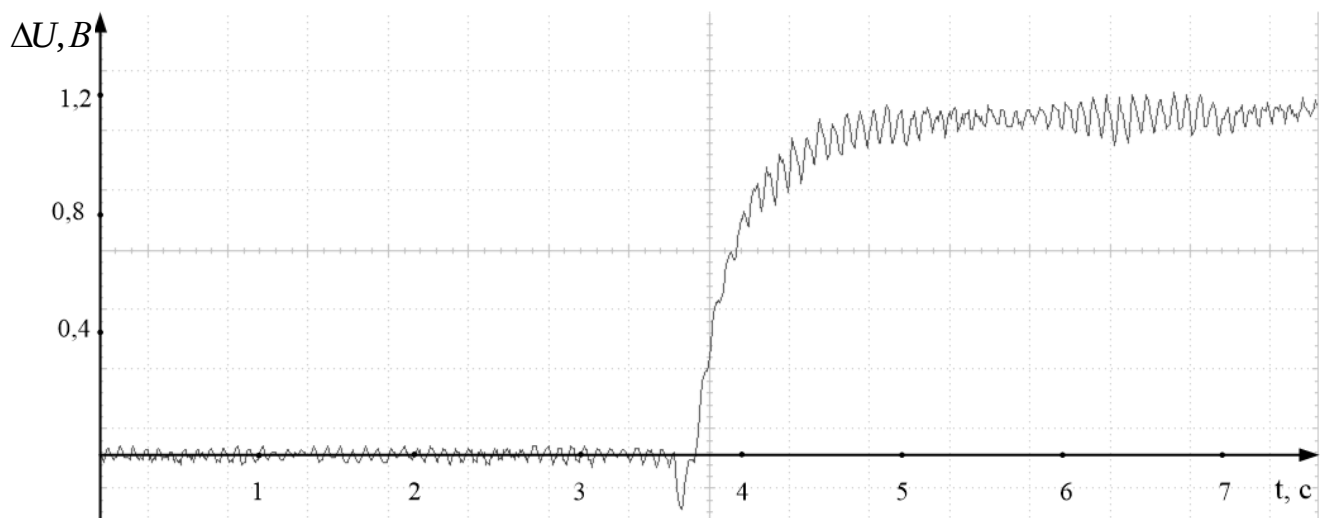


Рис.4.10. График зависимости разности напряжений на тахогенераторах при отключении питания одного из двигателей

Видно, что при отключении питания одного из двигателей, входящих в систему, он продолжает вращаться за счет напряжения, поступающего через цепь согласования, то есть исследуемая система остается работоспособной.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- нивелирование ошибки в согласованности работы отдельных электроприводов можно достичь, используя компенсирующие звенья;
- выравнивание статических и динамических характеристик отдельных электроприводов следует проводить поэтапно: тестовый режим, анализ данных и выявление электропривода, требующего корректировки и включение корректирующего звена;
- в качестве исполнительной машины эффективно может быть использован двухскоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АИР 90L8/4Е.

4.2. Моделирование электротехнического комплекса «слип»

В процессе исследования было проведено моделирование системы электропривода судоподъемного устройства типа слип, рассчитанного на подъем/спуск судна размерами 75х8 м, грузоподъемностью 500 т [19]. Для судна данного размера рассчитанное количество судоподъемных тележек слипа равно 5 [104].

На рис. 4.11 представлена функциональная схема слипа, состоящего из пяти электроприводов.

Работа модели системы, представленной на рис. 4.11, проанализирована в пакете MBTU (рис. 4.12).

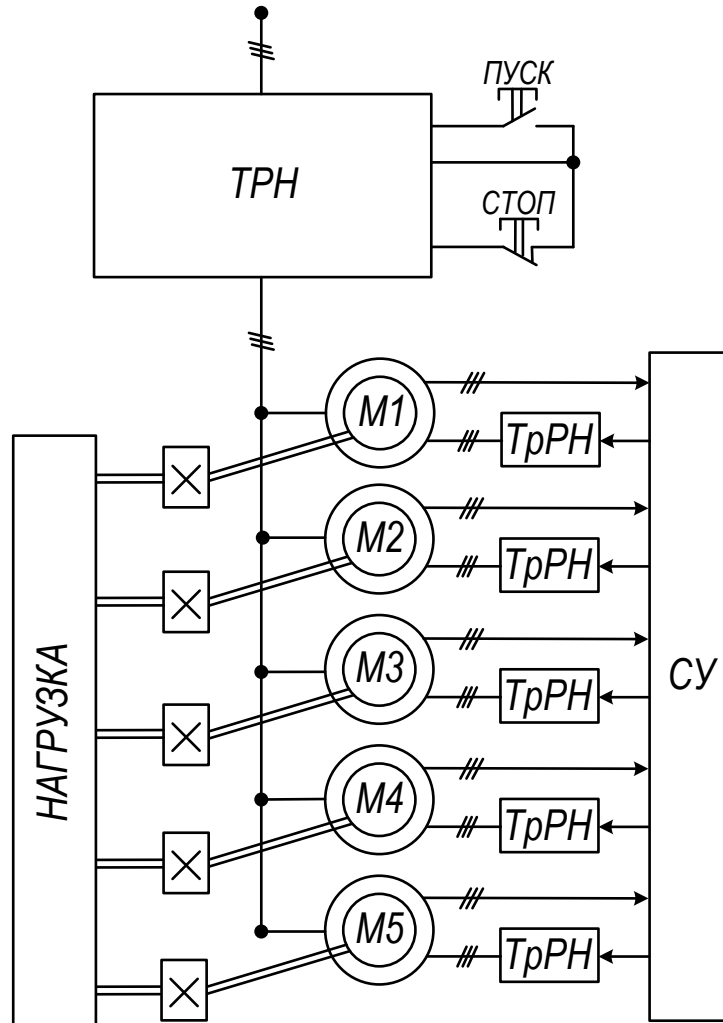


Рис. 4.11. Функциональная схема слипа, состоящего из пяти электроприводов

Для сравнения способов управления системой моделирование было проведено в пяти режимах работы:

- система электроприводов разомкнута;
- управление всеми пятью электроприводами общим ПИ-регулятором;
- каждый электропривод управляется своим П-регулятором;
- каждый электропривод управляется своим И-регулятором;
- каждый электропривод управляется своим ПИ-регулятором.

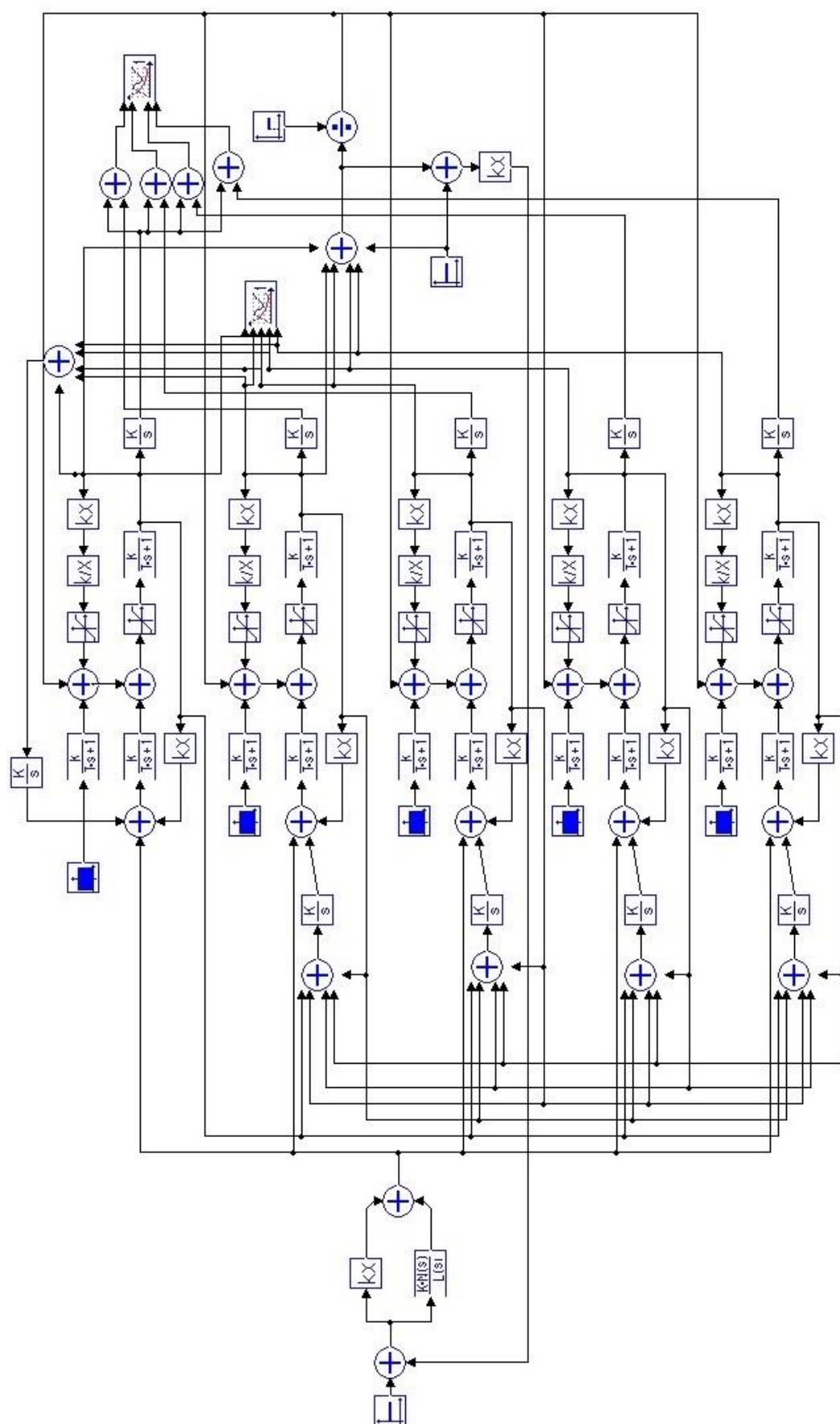


Рис. 4.12. Модель системы слюпа, состоящей из пяти электроприводов

Графики скоростей электроприводов, а также графики ошибок по положению при условии, что система электроприводов разомкнута, представлены на рис. 4.13 и рис. 4.14 соответственно.

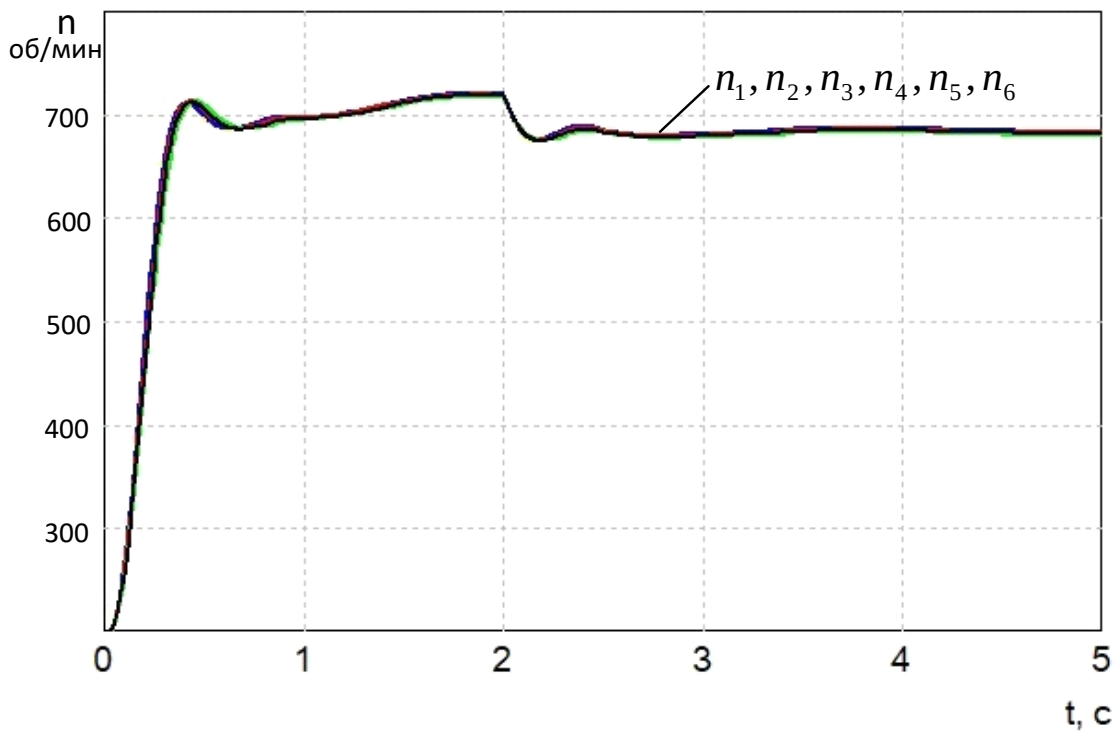


Рис. 4.13. График скоростей электроприводов при моделировании системы в разомкнутом состоянии

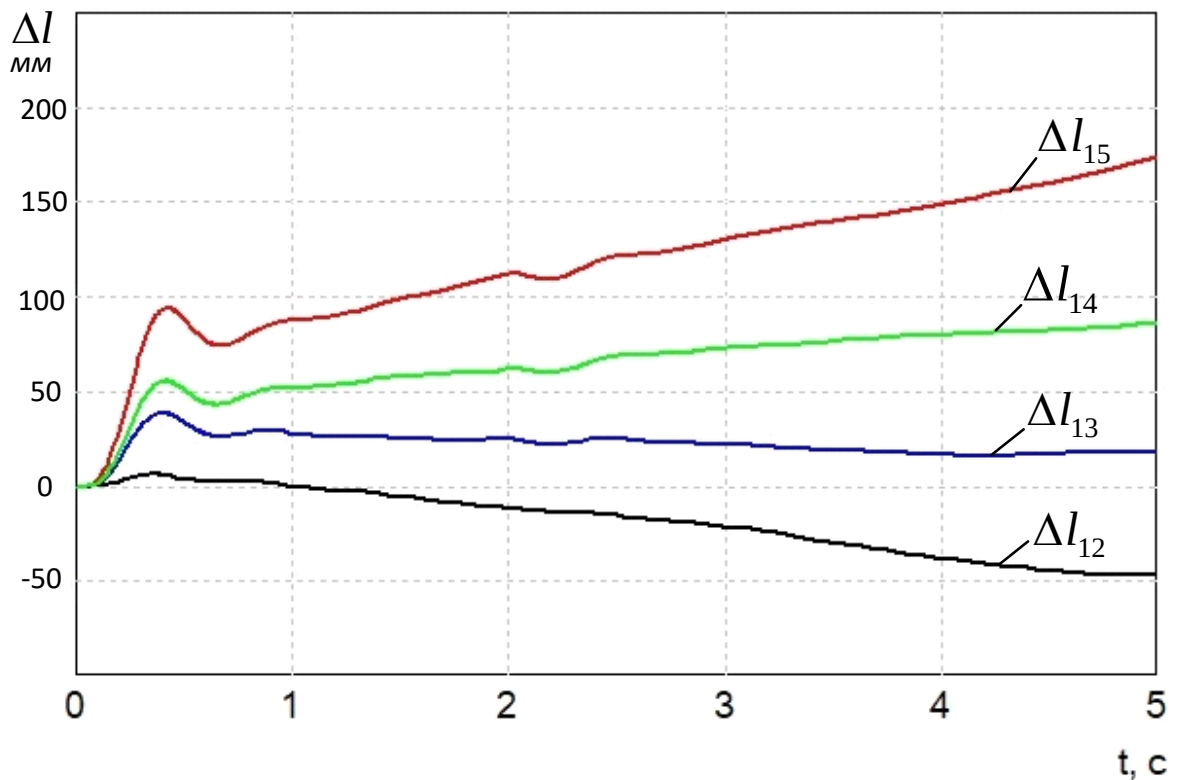


Рис. 4.14. График ошибок по положению при моделировании системы в разомкнутом состоянии

Из графиков видно, что время переходного процесса устанавливается на уровне 1 секунды, однако не представляется возможным определить установившееся значение статической ошибки.

Моделирование системы при управлении электроприводами общим ПИ-регулятором позволяет сделать вывод, что подобный способ управления увеличивает ошибку, однако нивелирует влияние нагрузки в момент времени $t=2\text{с}$, что показано на рис. 4.15 и рис. 4.16.

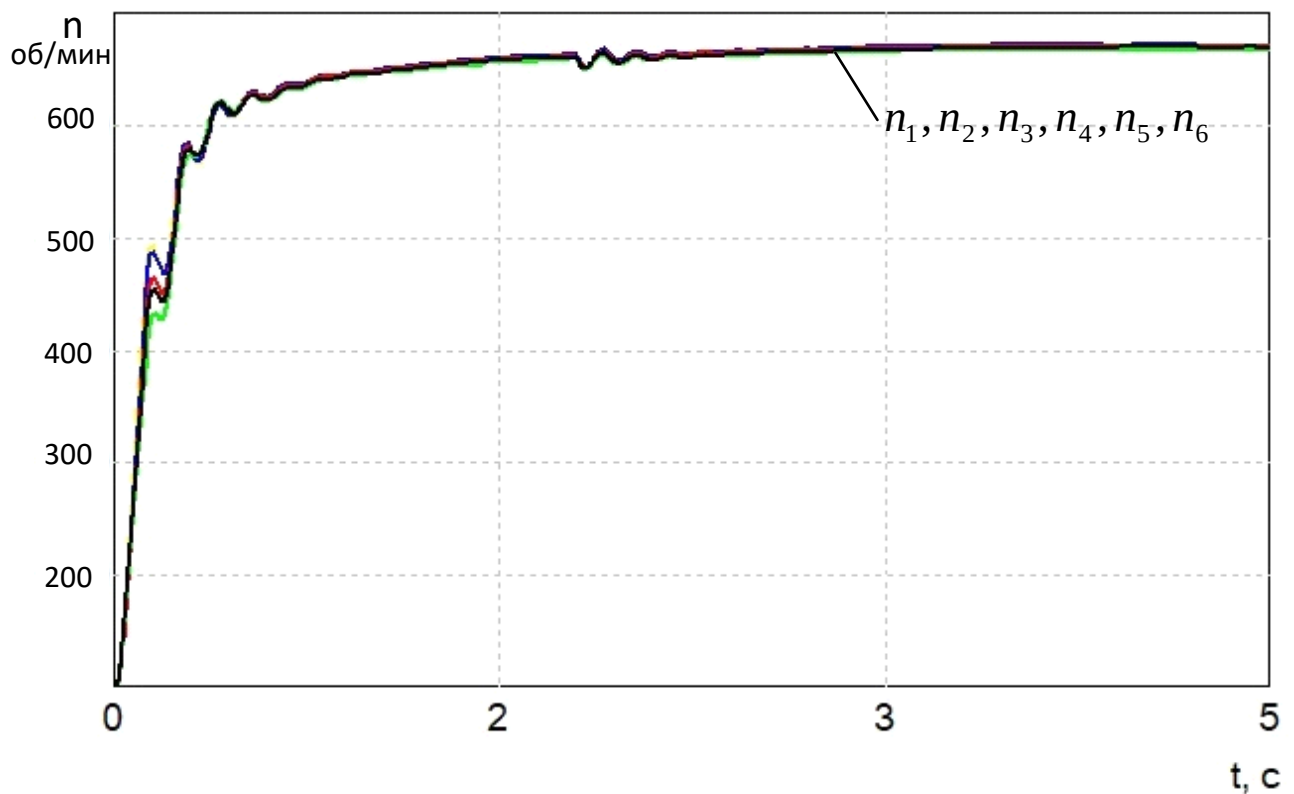


Рис. 4.15. График скоростей электроприводов при управлении всеми электроприводами общим ПИ-регулятором

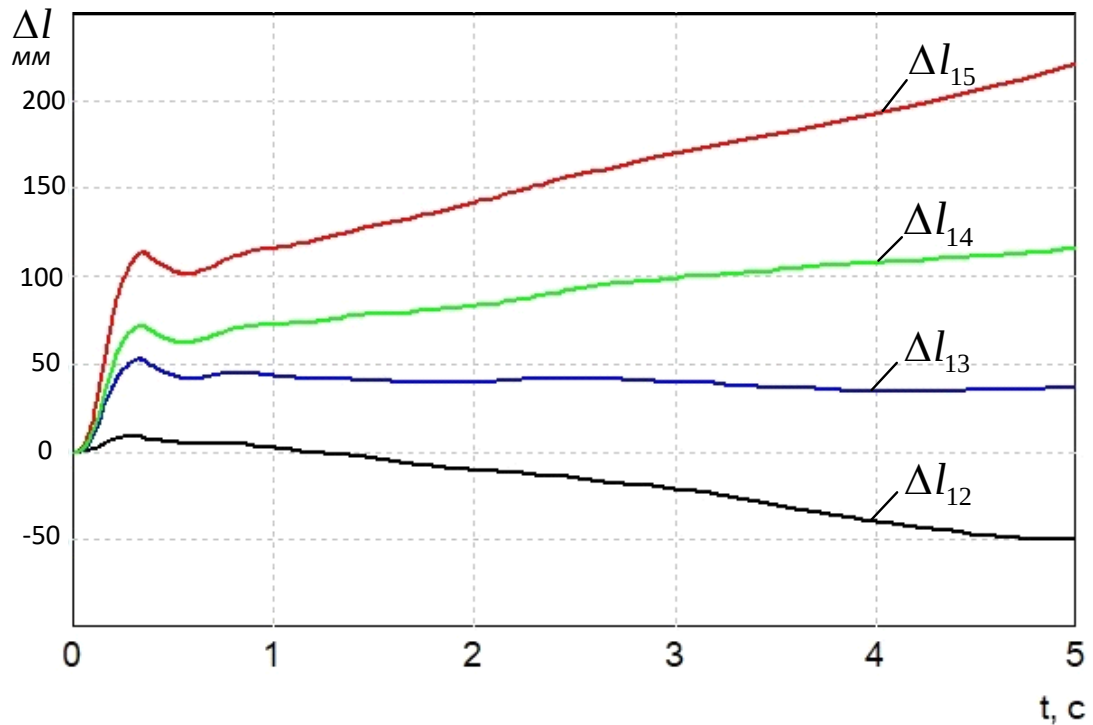


Рис. 4.16. График ошибки по положению при управлении всеми электроприводами общим ПИ-регулятором

На рис. 4.17 и рис. 4.18 представлены графики скоростей электроприводов и ошибки по положению при условии, что каждый электропривод управляется своим П-регулятором.

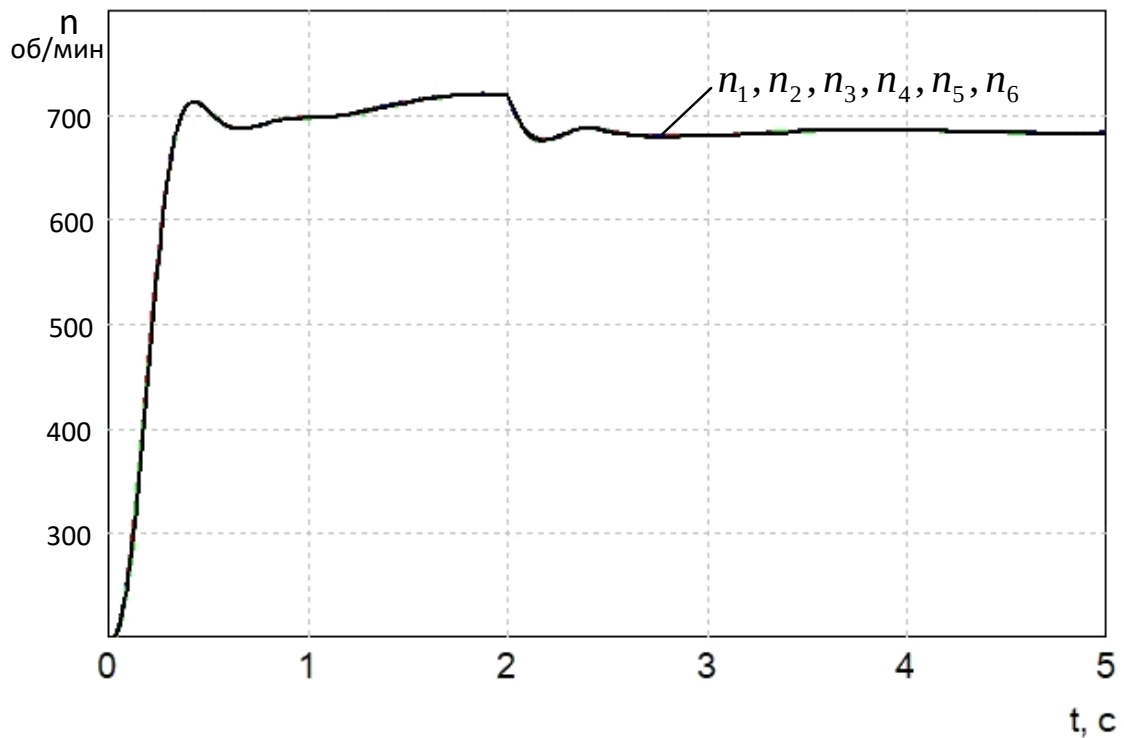


Рис. 4.17. График скоростей электроприводов при условии, что каждый электропривод управляется своим П-регулятором

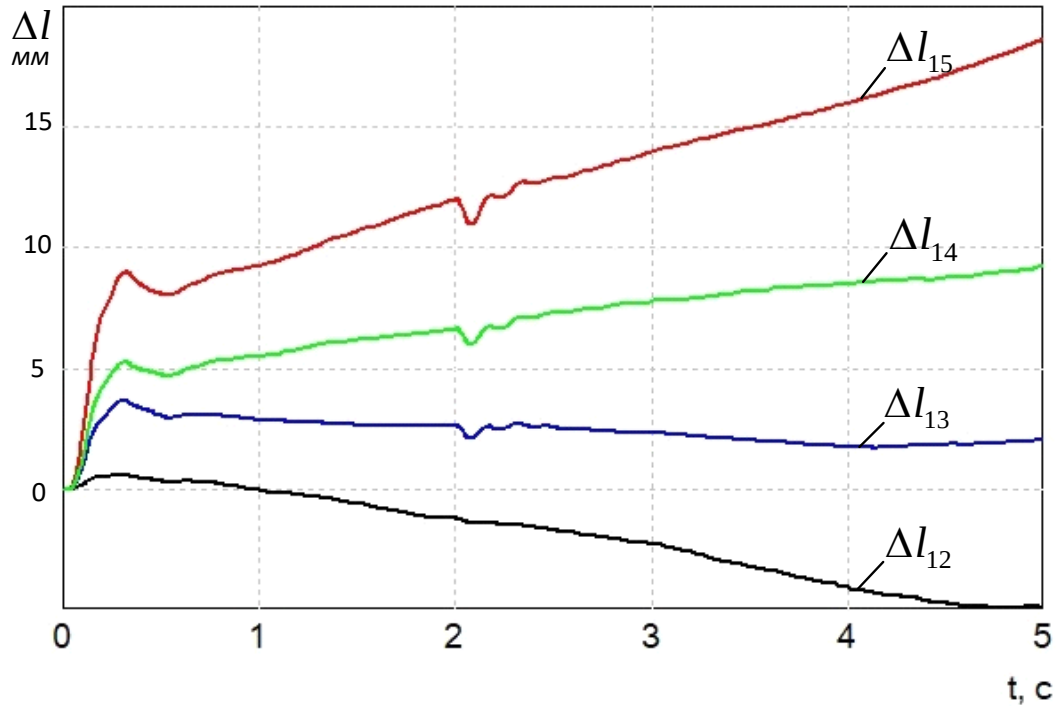


Рис. 4.18. График ошибок по положению при условии, что каждый электропривод управляется своим П-регулятором

Графики на рис. 4.19 и рис. 4.20 позволяют сделать вывод, что применение И-регуляторов взамен П-регуляторов для раздельного управления электроприводами позволит снизить время отработки системы, а также уменьшить ошибку.

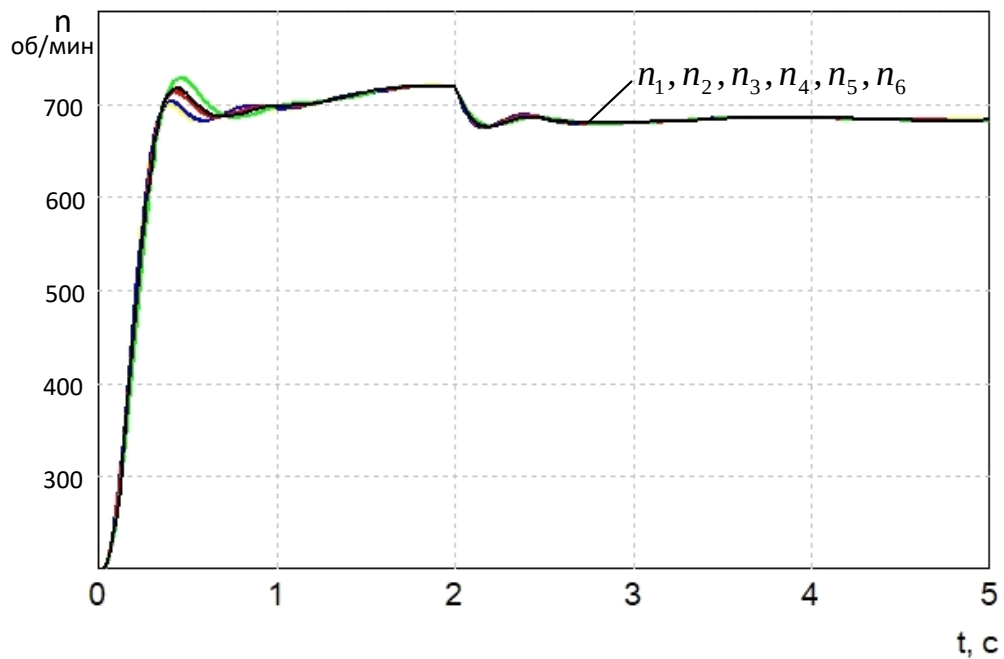


Рис. 4.19. График скоростей электроприводов при условии, что каждый электропривод управляется своим И-регулятором

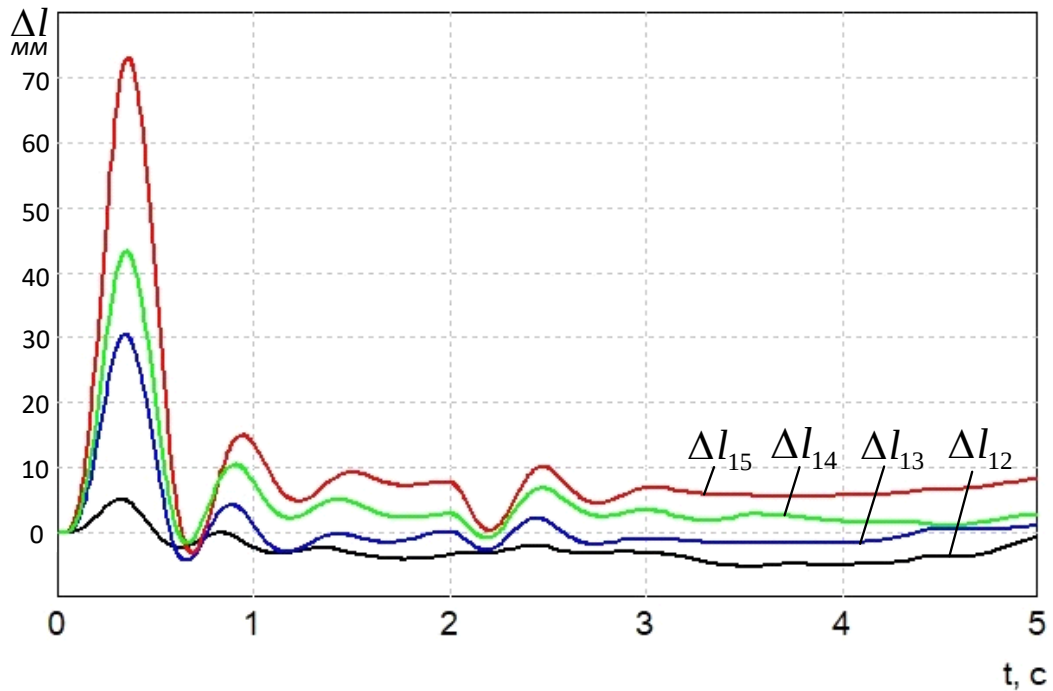


Рис. 4.20. График ошибок по положению при условии, что каждый электропривод управляется своим И-регулятором

Для снижения амплитуды и времени переходного процесса, а также уменьшения статической ошибки по положению оптимальным режимом является управление ПИ-регуляторами в каждом электроприводе. Графики скоростей электроприводов и ошибок представлены на рис. 4.21 и рис. 4.22.

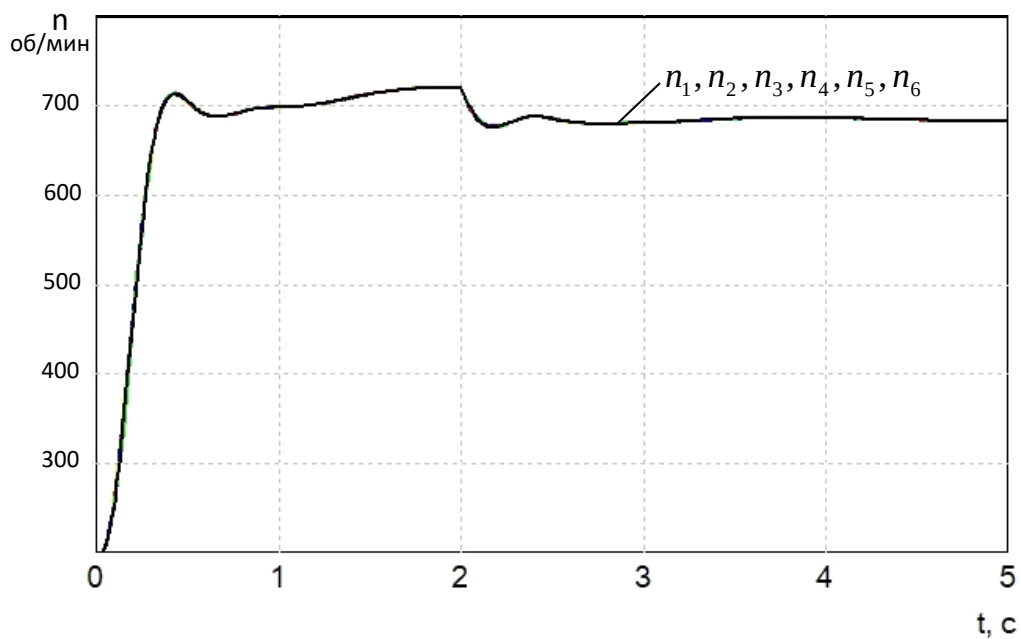


Рис. 4.21. График скоростей электроприводов при условии, что каждый электропривод управляется своим ПИ-регулятором

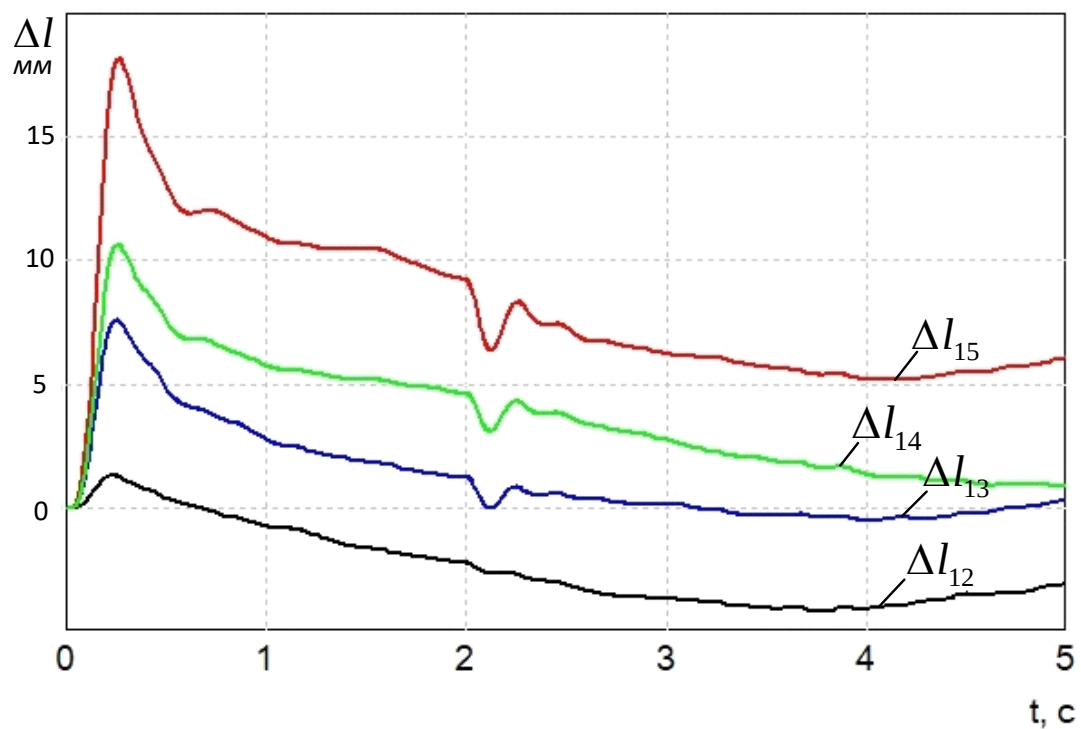


Рис. 4.22. График ошибок по положению при условии, что каждый электропривод управляется своим ПИ-регулятором

Выводы к главе 4

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что применение индивидуальных ПИ-регуляторов для управления электроприводами, входящими в систему, позволяет снизить ошибку рассогласования скоростей и достичь требуемых значений ошибки.

Для создания multifunctionальных систем электропривода слипа в качестве исполнительной машины может быть эффективно использован двухскоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Различия статических и динамических характеристик электропривода можно устранить посредством компенсирующих цепей.

Предложенные системы электропривода слипа могут быть успешно применены как для обеспечения согласованного движения судоподъемных тележек, так и для обеспечения синхронного перемещения стапельных тележек.

Предложенные схемы электропривода слипа могут быть одинаково успешно реализованы на различном количестве используемых судоподъемных и стапельных тележках, в зависимости от размеров судна.

При необходимом диапазоне регулирования $(85 \div 100\%)n_{\text{ном}}$ предложенные схемы являются наиболее подходящими для создания систем электропривода слипа, представляя собой минимально затратную модернизацию существующего слипового электрооборудования.

Применение индивидуальных ПИ-регуляторов для управления электроприводами, входящими в систему, позволяет снизить ошибку рассогласования скоростей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в процессе работы результаты позволяют сделать вывод о целесообразности проведенных исследований в области разработки и анализа работы многодвигательных систем электропривода электротехнического комплекса «слип», а также дают основу для дальнейшего проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в этом направлении. Предложенные и исследованные схемы многодвигательного электропривода слипа отвечают требованиям, предъявляемым к электрооборудованию судоподъемных установок, а также отрабатывают все требуемые режимы работы электротехнического комплекса «слип». Проведенные исследования показывают возможность создания многодвигательных систем на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами, отличающихся наличием на статоре двух комплектов обмоток, один из которых можно использовать для согласования скоростей двигателей, входящих в систему.

Полученные результаты позволили получить формулу расчета ошибки по скорости при включении пассивной цепи согласования. Расчет разности ошибок при включенной и выключенной цепи согласования в зависимости от количества одновременно работающих двигателей позволяет сделать вывод, что при увеличении количества параллельно работающих двигателей отношение ошибок уменьшается. Соответственно предлагаемая схема включения двигателей позволяет создавать простые и эффективные системы многодвигательного электропривода, реализующие согласованную работу.

На основе полученных математических моделей и результатов моделирования созданы надежные и эффективные схемы многодвигательного электропривода электротехнического комплекса «слип» с улучшенными динамическими характеристиками.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных в диссертационной работе исследований были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих электротехнических слиповых комплексов, на основе которого сделан вывод об актуальности проведения исследований в области разработки новых схмотехнических решений многодвигательных электроприводов слипового комплекса из-за наличия ряда недостатков в работе существующих аналогов.

2. Проведено исследование работы макета электропривода слипового комплекса в различных режимах, которое показало эффективность принимаемых решений. Определена зависимость величины ошибки по скорости от количества одновременно работающих электроприводов в составе слипового оборудования по предлагаемой схеме: при работе двух двигателей в согласованном режиме ошибка уменьшается на 25-30%, при одновременной работе 10-12 ЭП в согласованном режиме уменьшение ошибки происходит на 80%.

3. Разработаны и исследованы элементы многодвигательного электропривода слипового комплекса, а именно: коммутатор-регулятор, асинхронный двигатель с разделенными статорными обмотками, на основе которых созданы эффективные системы управления многодвигательным электроприводом для слипового оборудования, позволяющие исключить использование дорогостоящего оборудования (преобразователей частоты). Сравнительный анализ существующих решений позволяет сделать вывод, что создание предлагаемой системы электропривода в 2,3 раза дешевле аналогов.

4. Разработаны модели системы согласованного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутыми роторами, входящими в состав многодвигательного электропривода электротехнического комплекса «слип», исследование которых позволило определить условия их устойчивости и оценить влияние случайных сигналов на их работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адкинс, Б. Общая теория электрических машин / Б. Адкинс. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 272 с.
2. Аксенов, М.И. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов: учебное пособие / М.И. Аксенов, А.И. Нитиевская, Г.Б. Онищенко. – М.: МГОУ, 2001 – 105 с.
3. Андреев, В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
4. Антонов, А.В. Системный анализ / А.В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
5. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / А.С. Анучин. – М.: Московский энерг. ун-т., 2015. – 373 с.
6. Аполлонский, С.М. Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике / С.М. Аполлонский. – СПб.: Питер, 2012. – 352 с.
7. Балыков А.Н., Дрючин В.Г., Логинов Г.В. Устройство для управления двухдвигательным электроприводом постоянного тока // Патент СССР № 658691. 24.04.1979.
8. Башарин, А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
9. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для высших учебных заведений / М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов – 3-изд. – М.: Академия, 2007. — 576 с.
10. Белошабский В.В., Вейнгер А.М., Михайлов В.В. Способ управления многодвигательным электроприводом и устройство для его осуществления // Патент РФ № 94016897. 06.05.1994.
11. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: из-во «Профессия», 2003. – 752 с.

12. Борисов, А.В. Закономерности формирования и управление потоками мощности в многодвигательных дифференциальных приводах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Тула, 2003. – 174 с.
13. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АСАДЕМА, 2004. – 256 с.
14. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
15. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 256 с.
16. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
17. Волков, Е.А. Численные методы / Е.А. Волков. – М.: Наука. гл. ред. Физ-мат. лит., 1987. – 248 с.
18. Волков, Н.И. Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Миловзоров. – М.: Высшая школа, 1986. – 335 с.
19. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек – Л.: Энергия, 1974 г. – 824 с.
20. Вулих, Б.З. Введение в функциональный анализ / Б.З. Вулих. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. – 416 с.
21. Гаврилова, С.В. Системы согласованного вращения асинхронных двигателей / С.В. Гаврилова, В.И. Доманов, А.В. Доманов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 2 (4). – С. 732-735.
22. Гаврилова, С.В. Анализ и синтез схем регулирования двухскоростных асинхронных двигателей / С.В. Гаврилова, В.И. Доманов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2015. – № 1. – С. 57-59.

23. Гаврилова, С.В. Математическая модель многодвигательного электропривода на базе асинхронных двигателей с управлением по статорным цепям / С.В. Гаврилова, И.А. Соколова, В.И. Доманов // V Международный Балтийский морской форум: Мат. форума; сост. Н.А. Кострикова. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – С. 594-600.
24. Гаврилова, С.В. Математическое моделирование двухдвигательного электропривода согласованного вращения / С.В. Гаврилова, В.И. Доманов // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 23. – С. 88-91.
25. Гаврилова, С.В. Математическое моделирование многодвигательного электропривода / С.В. Гаврилова, И.А. Соколова, В.И. Доманов // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: Мат. междунар. научно-техн. конф.; науч. ред. В.Я. Копп. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2017. – С. 63-64.
26. Гаврилова, С.В. Моделирование согласованной системы вращения асинхронных двигателей / С.В. Гаврилова, Н.В. Байрамов // Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. – С. 84-88.
27. Гаврилова, С.В. Новые перспективы грузоподъемных механизмов / С.В. Гаврилова // Электротехнические и электромеханические системы: Мат. I Крымской студ. научно-техн. конф. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014. – С. 31.
28. Гаврилова, С.В. Разработка устройства согласованного управления электроприводами с электронной редукцией / С.В. Гаврилова, И.А. Соколова, В.И. Доманов // Всероссийский форум научной молодежи «Богатство России»: Сб. докл. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 341 с.
29. Гаврилова, С.В. Синтез математической модели системы согласованного управления электроприводами / С.В. Гаврилова, В.И. Доманов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016. – № 4. – С. 51-55.

30. Гаврилова, С.В. Система управления двухдвигательным электроприводом / С.В. Гаврилова, Н.В. Байрамов // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в энергетических системах: Мат. междунар. науч.-техн. конф.; науч. ред. А.М. Олейников. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. – С. 75-77.
31. Гаврилова, С.В. Создание и внедрение в существующие технологические комплексы многодвигательного электропривода на базе двухскоростных асинхронных двигателей / С.В. Гаврилова, И.А. Соколова, В.И. Доманов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: Сб. научн. тр. III Междунар. (VI Всерос.) науч.-техн. конф.; отв. ред. В.А. Шабанов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – 701 с.
32. Гаврилова, С.В. Устройство согласованного вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами / С.В. Гаврилова, Э.И. Михайлов, Н.В. Байрамов // Энергетические и электротехнические системы: Междунар. сб. научн. тр. Вып. 2; под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2015. – С. 254-258.
33. Гноенский, Л.С. Математические основы теории управляемых систем / Л.С. Гноенский, Г.А. Каменский, Н.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
34. Гончаров В.П. Многодвигательный электропривод с регулируемым соотношением скоростей // Патент СССР № 1774456. 07.11.1992.
35. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л., Крицштейн А.М. / Двухдвигательный электропривод для перемещения ленточных материалов // Патент РФ № 2204881. 20.05.2003
36. Доманов В.И., Доманов А.В., Гаврилова С.В. Устройство согласованного вращения асинхронных двигателей // Патент РФ № 2596216. 12.05.2015.
37. Доманов В.И., Доманов А.В., Гаврилова С.В. Устройство согласованного вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами // Патент РФ № 2601740. 15.06.2015.

38. Доманов В.И., Доманов А.В., Халиуллов Д.С. Автономная генераторная установка на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором // Патент РФ № 2629552. 15.12.2015.
39. Доманов, В.И. Анализ системы согласованного вращения асинхронных двигателей / В.И. Доманов, С.В. Гаврилова, Д.С. Халиуллов // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы междунаро. научно-техн. конф. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2015. – Т. 2. – С. 285-288
40. Доманов, В.И. Исследование идентификации элементов системы многодвигательного электропривода слипа судостроительного завода/ В.И. Доманов, А.В. Доманов, С.В. Гаврилова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 9. – С. 18-24.
41. Доманов, В.И. Параметрическая автоматизация двухскоростного асинхронного двигателя / В.И. Доманов, А.В. Доманов, С.В. Гаврилова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – №3. – С. 3-7.
42. Доманов, В.И. Параметрические системы управления многодвигательного электропривода грузоподъемных механизмов / В.И. Доманов, А.В. Доманов, С.В. Гаврилова // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. - №4. – С. 35-38.
43. Доманов, В.И. Синтез системы согласованного управления электроприводами с электронной редукцией / В.И. Доманов, С.В. Гаврилова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2017. – №9. – С. 29–32.
44. Доманов, В.И. Синтез системы управления согласованным вращением асинхронных двигателей / В.И. Доманов, С.В. Гаврилова, А.В. Доманов // Тр. IX Междунар. (XX Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: ПНИПУ, 2016. – С. 143-146.
45. Дорф, Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 592 с.

46. Егупов, Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Н.Д. Егупов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
47. Елисеев, В.А. Системы непрерывного управления электроприводов переменного тока / В.А. Елисеев. – М.: Мос.энерг.ин-т, 1985. – 96 с.
48. Елисеев, В.А. Справочник по автоматизированному электроприводу / В.А. Елисеев, А.В. Шинанский. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
49. Елсуков, В.С. Структурно-параметрический синтез нелинейных систем управления с дифференциальными бинарно-операторными связями: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. – Новочеркасск, 2009. – 280 с.
50. Задеренко В.А. Способ торможения двухдвигательного асинхронного электропривода // Патент РФ № 2384922. 11.08.2008.
51. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учеб. для вузов / В.С. Зарубин, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с.
52. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
53. Ибрагимов, Н.Х. Практический курс дифференциальных уравнений и математического моделирования. Классические и новые методы. Нелинейные математические модели. Симметрия и принципы инвариантности / Н.Х. Ибрагимов, И.С. Емельяновой. – Нижний Новгород: ННГУ, 2007. – 421 с.
54. Иванов, Г.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока / Г.М. Иванов, Г.М. Левин, В.М. Хуторецкий. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
55. Иванов, Г.М. Разработка, исследование и промышленное внедрение многосвязных систем электроприводов технологических линий: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. – М., 1979. – 443 с.
56. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 1184 с.

57. Ивахненко, А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. — М.: Радио и связь, 1987. — 120 с.
58. Исаков, А.С. Современные системы управления асинхронным электроприводом / А.С. Исаков, А.П. Баев // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. — 2006. — № 33. — С. 30-34.
59. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кель-тон, А. Лоу. —СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. — 847 с.
60. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 704 с.
61. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. — Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 744с.
62. Кононенко, В.В. Электротехника и электроника / В.В. Кононенко, В.И. Мишкович, В.В. Муханов, В.Ф. Планидин, П.М. Чеголин. — Изд. 4-е. — Ростов н/Д: Феникс, 2008. — 778 с.
63. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических ма-шин: Учебник для вузов / И.П. Копылов. — М.: Высш. шк., 2001. — 327 с.
64. Копылов, И.П. Электромеханические преобразователи энергии / И.П. Копылов. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.
65. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1978. — 832 с.
66. Коробко, А.В. Автоматизированный электропривод металлорежущих станков: Методические указания к выполнению контрольных работ и курсового проекта для студентов направления 18.04 / А.В. Коробко, И.Н. Белов. — Ульяновск: УлГТУ, 2001. — 74 с.
67. Коробко, А.В. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов: методические указания и задания к курсовой

- работе для студентов специальности 14060465 всех форм обучения / А. В. Коробко. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 87 с.
68. Коротин П.П., Корниенко В.Д., Иевлев О.В. Многодвигательный электропривод бумагоделательной машины // Патент СССР № 1698332. 15.11.1989.
 69. Коротин П.П., Корниенко В.Д., Прядкин В.А. Цифровой регулятор для многодвигательного электропривода // Патент РФ № 2071635. 10.06.1992.
 70. Краснощеченко, В.И. Нелинейные системы: геометрические методы анализа и синтеза / В.И. Краснощеченко, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 520 с.
 71. Кузнецов, П.К. Методы построения и исследования динамики цифровых систем идентификации движения яркостных полей в реальном времени: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.14. – М., 1995. – 35 с.
 72. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: Учеб. Пособие / Г.Т. Кулаков. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.
 73. Лимонов Л.Г., Рудаков В.П., Дрозд И.Г. Устройство для управления многодвигательным электроприводом тянущей станции // Патент СССР № 743151. 25.06.1980.
 74. Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Шнаперман И.Л., Воронин Р.А., Ходунов В.В., Ранио Г.Ф. Взаимосвязанный электропривод агрегата непрерывной обработки полосового материала // Патент СССР № 1718361. 07.03.1992.
 75. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т.; Гл. ред. К.В. Фролов. Т. IV-2. Кн. 1: Электропривод; под общ. ред. Л.Б. Масандилова. – М.: Машиностроение, 2012. – 520 с.
 76. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т.; Гл. ред. К.В. Фролов. Т. IV-2. Кн. 1: Электропривод; под общ. ред. Л.Б. Масандилова. – М.: Машиностроение, 2012. – 520 с.

77. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.
78. Мирошниченко Л.С., Литвинский А.Н., Мирошниченко И.С., Яценко А.А. Способ управления согласованным вращением двух двигателей в широтно-импульсном приводе постоянного тока // Патент СССР № 674179. 15.07.1979.
79. Молчанова, С.Ю. Исследование законов управления асинхронным электроприводом с частотным управлением на компьютерных моделях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – М., 2009. – 117 с.
80. Морговский, Н.Я. Взаимосвязанные системы электропривода / Н.Я. Морговский, М.Б. Рубашкин, Я.Г. Гольдин. – М.: Энергия, 1972. – 204 с.
81. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Высшая школа. 1991 – 430 с.
82. Мышкис, А.Д. Элементы теории математических моделей / А.Д. Мышкис. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
83. Нос, О.В. Математическая модель асинхронного двигателя в линейных пространствах, связанных со статором и ротором / О.В. Нос // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 14-20.
84. Омельчук, А.А. Компьютеризированная система управления судоподъемным комплексом типа слип / А.А. Омельчук // Проблемы информационных технологий. – 2015. – № 17. – С. 181-186.
85. Онищенко, Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
86. Оськин, С.В. Электропривод и средства автоматизированного управления поточно-транспортными линиями в сельском хозяйстве / С.В. Оськин. – М.: Информэлектро, 1983. – 59 с.

87. Павленко С.В., Маклаков В.Е., Хомяков С.Ф., Гончаров Е.Д. Способ обеспечения "мягкого" режима работы сетевых синхронных электродвигателей на карьерных экскаваторах (экг) // Патент РФ № 22760242. 15.12.2003.
88. Патент на изобретение SU 1762378 A1 от 15.09.1992. Мещеряков В.Н. Двухдвигательный электропривод // Патент СССР № 1762378. 15.09.1992.
89. Пен, Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства / Р.З. Пен. – К.: Издательство красноярского университета, 1982. – 192 с.
90. Петров, Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 164 с.
91. Петухов, О.А. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: учеб. пособие / О.А. Петухов, А.В. Морозов, Е.О. Петухова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 288 с.
92. Попов П.Л., Федотова Л.А. Устройство для централизованного управления группой электродвигателей-вибраторов // Патент РФ № 2263389. 24.02.2004.
93. Постников Ю.В., Соколовский Г.Г., Стасовский В.М., Шустов Д.А. Устройство для управления двухдвигательным электроприводом // Патент СССР № 678621. 05.08.1979.
94. Прошин, И.А. Математическое моделирование и компонентный портрет в оценке оборудования в едином пространстве состояний / И.А. Прошин, Р.Д. Прошина, Г.Г. Долгов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 05. – С. 260-266.
95. Прошин, И.А. Программная платформа для построения интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2009. – Т. 11. – № 5-2. – С. 531-536.

96. Пупков, К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 13 с.
97. Радионов, А.А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, И.Ю. Андрияшин и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 59-73.
98. Решмин, Б.И. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов / Б. И. Решмин, Д. С. Ямпольский. – М.: «Энергия», 1975. – 184 с.
99. Розенвассер, Е.Н. Чувствительность систем автоматического управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – Л.: Энергия, 1969. – 208 с.
100. Рубашкин, И.Б. Адаптивные системы взаимосвязанного управления электроприводами / И.Б. Рубашкин. – Л.: «Энергия», 1975. – 158 с.
101. Рябинин А.И., Большедворский В.В., Комиссаров П.А., Олейник В.М., Перепелица Н.Г., Раушенбах И.М. Многодвигательный электропривод многократного прямоточного волочильного стана // Патент РФ № 2158469. 10.06.1997.
102. Рябов, О.А. Моделирование процессов и систем. Учебное пособие / О.А. Рябов. – Красноярск.: «Красноярск», 2008. – 122 с.
103. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с.
104. Самарский, А.А. Численные методы математической физики / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Научный мир, 2003. – 315 с.
105. Свердлик Г.В., Тихомиров В.А. Система управления многодвигательным электроприводом многосекционных агрегатов // Патент РФ № 2386740. 23.12.2008.

106. Серков О.А. Электрический вал // Патент ПНР № 89511. 1977.
107. Смольянинов, А.В. Асинхронный электропривод управляемых многодвигательных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Воронеж, 2003. – 163 с.
108. Советов, Б.Я. Моделирование систем: Учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
109. Соколова, И.А. Разработка и исследование взаимосвязанной системы управления электроприводами / И.А. Соколова, С.В. Гаврилова // Новые достижения по приоритетным направлениям науки и техники: Мат. междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и иссл. – Пенза: ПГУАС, 2018. – С. 68-70.
110. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / Г.Г. Соколовский. – М.: АСАДЕМА, 2006. – 272 с.
111. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
112. Тарарыкин С.В., Иванков В.А., Тютиков В.В., Красильникъянц Е.В. Способ управления взаимосвязанными электроприводами (варианты) // Патент РФ № 2316886. 27.04.2006.
113. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Способ управления многодвигательным электроприводом // Патент РФ № 2185019. 06.04.2001.
114. Тарарыкин, С.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами: Учеб. пособие / С.В. Тарарыкин, В. В. Тютиков. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2002. — 212 с.
115. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: Учеб. для вузов / В.П. Тарасик. – Мн.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
116. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 304 с.

117. Трусов, П.В. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / П.В. Трусов. – М.: Логос, 2005. – 440 с.
118. Унгру, Ф. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей / Ф. Унгру, Г. Иордан. – Л.: Энергия, 1971. – 182 с.
119. Устинов Г.В., Короп С.П. Устройство для регулирования многодвигательного электропривода // Патент СССР № 699641. 25.11.1979.
120. Цыпкин, Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: издательство «Наука», 1977. – 560 с.
121. Цытович Л.И., Гафитятуллин Р.Х., Тазетдинов В.И., Шкаликов С.И., Вольберг И.И., Мыльников А.Ю., Шахматов В.В., Габорик А.А., Скляр С.И. Система управления группой асинхронных электроприводов водяных насосов // Патент РФ № 2251206. 20.05.2003.
122. Цытович Л.И., Терещина О.Г. Система управления группой электроприводов // Патент РФ № 2276449. 07.02.2005.
123. Цытович Л.И., Терещина О.Г., Дудкин М.М. Система управления группой электроприводов водяных насосов // Патент РФ № 2312452. 05.06.2006.
124. Чернышов, В.Н. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов. – Тамбов: Издательство Тамбовского государственного университета, 2008. – 96 с.
125. Чикуров, Н.Г. Моделирование технических систем: Учеб. пособие / Н.Г. Чикуров. – Уфа: УГАТУ, 2009. – 357 с.
126. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. Пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
127. Чураков, Е.П. Оптимальные и адаптивные системы / Е.П. Чураков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
128. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

129. Шёнфельд, Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.
130. Шестаков В.М., Васильев А.Б., Куценко Б.Н., Подовинников И.С., Поляхова В.А., Сулова О.В., Тупикова Л.И. Многодвигательный электропривод суперкаландра // Патент РФ № 2131641. 10.06.1999.
131. Шестаков, В.М. Автоматизированные электроприводы бумаго- и картоноделательных машин / В.М. Шестаков. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 176 с.
132. Шестаков, В.М. Системы электропривода бумагоделательного производства / В.М. Шестаков. – М., Лесная промышленность, 1989. – 240 с.
133. Шохин, В.В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана / В.В. Шохин, О.В. Пермякова, Е.В. Короткова // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 70-75.
134. Ярославцев М.И. Двухдвигательный электропривод // Патент СССР № 1705997. 29.05.1989
135. Bahram, A. Induction Motors / A. Bahram. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. – 262 p.
136. Chapra, S.C. Numerical Methods for Engineers. Sixth Edition / S.C. Chapra, R.P. Canale. – New York: McGraw-Hill, 2010. – 994 p.
137. Crowder, R.M. Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control / R.M. Crowder. – Oxford: Elsevier science & technology, 2006. – 312 p.
138. Domanov V.I., Gavrilova S.V. Operation analysis of the induction motor coordinated rotation control system. In: 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). – Chelyabinsk, 2017. – P. 893-897.
139. Domanov V., Gavrilova S., Sokolova I. Parametric Automation of a Two-Speed Induction Motor. In: 2018 14th international scientific-technical conference on

- actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). – Novosibirsk, 2018, - P.
140. Feuer A., Morse A. Adaptive control of single-input, single-output linear systems // IEEE Trans. on Automat. Control. – 1978. – Vol.23. – №4. – P. 557-569.
 141. Sokolova I.A., Gavrilova S.V., Domanov V.I. Synthesis of system of coordinated control of electric drives with electronic reduction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No 1. – P. 29-32.
 142. Leonard, W. Control of Electrical Drives / W. Leonard. – Berlin: Springer, 1996. – 420 p.
 143. Ludtke, I. The Direct Control of Induction Motor / I. Ludtke. – Glamorgan: University of Glamorgan, 1998. – P. 4-6
 144. Lyshevski, S.E. Electromechanical Systems and Devices / S.E. Lyshevski. – Bosa Roca: Taylor & Francis Inc, 2008. – 584 p.
 145. Lyshevski, S.E. Electromechanical Systems, Electrical Machines and Applied Mechatronics / S.E. Lyshevski. – Bosa Roca: Taylor & Francis Inc, 1999. – 800 p.
 146. Mesarovic M.D. Views of General Systems Theory / M.D. Mesarivic. – Sydney: John Willy and Sons, 1964. – 178 p.
 147. Miller, R. Industrial Electricity and Motor Controls / R. Miller, M. Miller. – Hill Education, 2013. – 512 p.
 148. Moritz, F.G. Electromechanical Motion Systems: Design and Simulation / F.G. Moritz. – New York: John Wiley & Sons Inc, 2014. – 308 p.
 149. Narendra K.S., Lin Y.-H., Valavani L.S. Stable adaptive controller design. Part II: proof of stability // IEEE Trans. on Automat. Control. – 1980. Vol.25. – №3. – pp. 440-448.
 150. Nokata M., Ikuta K., Ishii H. Safety optimizing method of human care robot design and control. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Singapor, 2002. - vol.2. - P. 1991-1996.
 151. Rockis, G. Electrical Motor Controls / G. Rockis, G. Mazur. – Orland: American Technical Publishers, 2001. – 544 p.

152. Rockis, G. Electrical Motor Controls for Integrated Systems / G. Rockis, G. Mazur. - Orland: American Technical Publishers, 2013. – 770 p.
153. Takahashi I., Nogushi T. New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of Induction Motor // IEEE Trans. Industry Application. –1986. – P. 820-827.
154. Trzynadlowski, A.M. Control of Induction Motors / A.M. Trzynadlowski. – New York: Academic Press, 2000. – 228 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Открытое акционерное
общество
«КРИУШИНСКИЙ
СУДОСТРОИТЕЛЬНО-
СУДОРЕМОНТНЫЙ ЗАВОД»**

433303 Россия, Ульяновская область,
г.Новоульяновск, с.Криуши
Тел. (8422) 24-12-16; Факс (8422) 24-12-15
E-mail: kck62@mail.ru
ОКПО 03143237

«Утверждаю»:

Генеральный директор
Открытого акционерного
Общества «Криушинский
судостроительно-
судоремонтный завод»

Н.А. Исмаилов

«17» 08 2019г.

27.08.2019 № 0164-У
На № _____

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Гавриловой Светланы Владимировны

«Улучшение динамических характеристик электротехнического
многодвигательного судоподъемного комплекса «слип», представленной на
соискание учёной степени кандидата технических наук.

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер Эртель М. И. и главный энергетик Зинатуллин З. А., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Гавриловой С.В. использованы в документации на модернизацию электрооборудования слиповой установки.

Использование при модернизации предлагаемой системы управления позволяет:

- реализовать согласованное управление машинами в составе слипа;
- стабилизировать динамические показатели электропривода в различных режимах работы.

Гл. инженер (должность)		(подпись)
Гл. энергетик (должность)		(подпись)

Эртель М. И.
(ФИО)

Зинатуллин З. А.
(ФИО)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(УлГТУ)
Северный Венец ул., д.32,
г. Ульяновск, 432027, Россия
Тел.: (8422) 43-06-43; факс (8422) 43-02-37
e-mail: rector@ulstu.ru http://www.ulstu.ru
ОКПО 02069378, ОГРН 1027301160226
ИНН/КПП 7325000052/732501001

12.11.2019 № 1856/19-03
На _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

Вр.и.о ректора УлГТУ

Н.Г. Ярушкина

«12» 11 2019 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Гавриловой С.В.
«Улучшение динамических характеристик электротехнического
многодвигательного судоподъемного комплекса «слип»
в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», кандидат технических наук, доцент Доманов В.И. и декан энергетического факультета, кандидат технических наук, доцент Дубов А.Л. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Гавриловой С.В. внедрены в разделы учебного пособия по дисциплине «Автоматизация типовых производственных механизмов» для бакалавров и магистрантов направления «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электропривод и автоматика») 13.03.02, 13.04.02.

Заведующий кафедрой
«Электропривод и АПУ»

В.И. Доманов

Декан энергетического факультета

А.Л. Дубов