

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф.ГОРБАЧЕВА»

на правах рукописи

Гусев Алексей Владимирович

**Алгоритмы управления электроприводом подъема крана в режиме
«с подхватом»**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Завьялов Валерий Михайлович

Кемерово – 2017

Оглавление

Введение	4
1 Обзор литературных источников	11
1.1 Основные особенности электропривода подъема крана	11
1.2 Негативное влияние режима работы «с подхватом»	14
1.3 Варианты управления электроприводом подъема крана	15
1.4 Выводы по разделу и постановка задач исследования	39
2 Структура электропривода подъема крана	42
2.1 Электрическая подсистема электропривода подъема	42
2.2 Механическая подсистема электропривода подъема	48
2.3 Критерии управления и структура исследуемого электропривода	53
2.4 Выводы по разделу	58
3 Разработка алгоритмов управления приводом подъема крана	60
3.1 Концепция управления и модификация модели механической подсистемы электропривода подъема крана	60
3.2 Определение максимально допустимой скорости устранения провисания каната	65
3.3 Управление скоростью подъема груза на основе ПИ-регулятора с подчиненным регулятором упругого момента	68
3.4 Алгоритм управления скоростью подъема, синтезированный по методу АКАР	78
3.5 Оценка влияния снижения уровня динамической нагруженности каната	85
3.6 Оценка экономической эффективности внедрения алгоритмов управления	90

3.7 Выводы по разделу.....	92
4 Экспериментальная часть.....	94
4.1 Описание экспериментальной установки.....	94
4.2 Проведенные эксперименты	98
4.3 Выводы по разделу.....	104
Заключение	106
Список литературы	110

Введение

Актуальность темы исследования. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации приказом №1150 от 9 декабря 2010 года утвердило стратегию развития тяжелого машиностроения на период до 2020 года. В ней, в частности, говорится о том, что для повышения конкурентоспособности продукции тяжелого машиностроения, как на внутреннем, так и на мировом рынке, одним из основных направлений научно-технического развития должно стать совершенствование подъемно-транспортного оборудования.

Крановые механизмы являются неотъемлемой частью большинства технологических процессов, а также активно используются в транспортно-логистических процессах. Объемы промышленного производства и количество перевозимых грузов постоянно растут. Поэтому от безотказности работы крана зачастую зависит как эффективность производства в целом, так и качество работы различных транспортных систем.

Режим подъема груза «с подхватом» возникает в том случае, когда провисание каната не устраняется путем предварительного натяжения, а привод подъема разгоняется до определенной скорости, и после устранения провисания каната происходит отрыв груза от поверхности опоры. Такой режим подъема запрещен правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов по причине снижения безопасности производства работ. Кроме этого, в режиме «с подхватом» наиболее часто на кран действуют максимальные динамические нагрузки, увеличивающие вероятность обрыва каната и способствующие интенсивному накоплению усталостных повреждений в металлоконструкциях крана. Так как подъемный канат является упругой связью одностороннего действия, то на больших скоростях подъема в режиме «с подхватом» может наблюдаться «подскок» груза, когда груз

перемещается быстрее углового движения канатного барабана. В результате чего происходит силовое размыкание кинематической связи и изменение кинематической структуры. «Подскок» груза может привести к нарушению нормальной работы подъемного механизма, иногда даже с аварийными последствиями. Однако в современных кранах отсутствуют эффективные алгоритмы управления, позволяющие снизить негативные последствия режима подъема «с подхватом». Разработка алгоритмов управления приводом подъема крана, способствующих снижению динамических нагрузок в режиме подъема «с подхватом», является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Изучением динамики крановых механизмов занимались такие ученые, как Герасимьяк Р. П., д.т.н., профессор; Казак С. А., д.т.н., профессор, член Академии подъемно-транспортных наук Украины; Лобов Н. А., д.т.н.; Масандилов Л. Б., д.т.н., профессор; Панкратов В. В., д.т.н., профессор; Виноградов А. Б., д.т.н. и ряд других ученых. Произведенный анализ научных работ показывает, что остается недостаточно проработанным вопрос снижения динамических нагрузок в режиме подъема «с подхватом». На разработку этого направления ориентирована данная научная работа.

Цель работы: разработать алгоритмы управления электроприводом подъема крана, снижающие динамические нагрузки в режиме работы «с подхватом».

Идея работы: использование метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) для синтеза алгоритмов управления электроприводом подъема крана.

Задачи исследования:

1. Получить зависимость для расчета максимальной скорости устранения провисания каната, обеспечивающую заданное ограничение динамического усилия в канате.

2. Разработать алгоритмы управления электроприводом подъема крана, автоматически снижающие динамические нагрузки в режиме работы «с подхватом».
3. Разработать компьютерную модель электропривода подъема крана и на ее основе провести анализ функционирования разработанных алгоритмов управления.
4. Оценить экономическую эффективность внедрения разработанных алгоритмов управления.
5. Разработать и смонтировать физическую модель электропривода подъема крана и провести исследование работы полученных алгоритмов управления.

Научная новизна:

1. Впервые получена зависимость для расчета максимальной скорости устранения провисания подъемного каната, при условии ограничения усилия в канате на заданном уровне, учитывающая влияние тормозного момента электродвигателя.
2. Впервые предложена непрерывная нелинейная математическая модель усилия в канате, аппроксимирующая канат как упругую связь одностороннего действия, обеспечивающая возможность нахождения её дифференциала на всем множестве допустимых значений переменных.
3. Впервые получены алгоритмы управления приводом подъема крана по методу АКАР, снижающие динамические нагрузки в режиме работы «с подхватом».

Теоретическая значимость работы:

1. Полученная непрерывная нелинейная математическая модель двухмассовой механической подсистемы привода подъема крана может быть использована для описания процессов различных механических систем, имеющих кинематические связи в

виде канатов, а также при синтезе регуляторов таких механических систем.

2. Определены параметры, влияющие на скорость устранения провисания каната, при условии ограничения величины динамической нагрузки на него, что может быть использовано для разработки способов снижения нагрузки на подъемный канат при устранении его провисания и слабины.

Практическая значимость работы: применение разработанных алгоритмов управления электроприводом подъема крана позволит снижать динамические нагрузки в режиме работы «с подхватом», что повысит безопасность эксплуатации и долговечности работы крана.

Методология и методы исследования. При исследовании применялись положения и методы математического анализа, теории электрических и магнитных цепей, теоретических основ электротехники, методы теории систем управления электроприводами, теории автоматического управления, метод математического моделирования переходных процессов с помощью среды разработки Borland Delphi, метод экспериментального исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Максимальная скорость устранения провисания подъемного каната, при условии ограничения усилия в канате на заданном уровне, может быть увеличена путем формирования тормозного момента электродвигателя, после устранения провисания.
2. Непрерывная нелинейная математическая модель усилия в канате, аппроксимирующая канат как упругую связь одностороннего действия, позволяет находить её дифференциал на всем множестве допустимых значений переменных и может быть использована при синтезе алгоритмов управления электроприводом подъема крана методом АКАР.

3. Разработанные алгоритмы управления электроприводом подъема крана в режиме работы «с подхватом» позволяют существенно снизить периодическую составляющую нагрузки подъемного каната.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается математическим моделированием переходных процессов, проведенными экспериментами с использованием физической модели, сопоставлением результатов математического моделирования и экспериментальных исследований. Результаты данной научной работы были представлены на конференциях: V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г. А. Сипайлова, (г. Томск, 2011 г.); Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012 (г. Кемерово, 2012 г.); IX Международной научно-практической конференции Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования (г. Вологда, 2014 г.); II Всероссийская научно-практическая конференции Энергетика и энергосбережение: теория и практика (г. Кемерово, 2015 г.).

Личный вклад автора заключается в:

- определении зависимости между максимальной скоростью устранения провисания каната и допустимым усилием в канате;
- разработке непрерывной нелинейной математической модели усилия в канате;
- разработке алгоритмов управления электроприводом подъема крана;
- разработке и изготовлении физической модели крана, и проведении испытаний.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 7 работ, в том числе 2 в изданиях ВАК Российской Федерации. Публикации в журналах, рецензируемых ВАК МОиН РФ:

1. Завьялов В.М. Управление скоростью электропривода подъема мостового крана при ограничении динамических нагрузок / В.М. Завьялов, А.В. Гусев. // Вестник КузГТУ. – 2010. – №6 – С. 62–65.

2. Завьялов В.М. Автоматическое ограничение динамических нагрузок электропривода подъема мостового крана / В.М. Завьялов, А.В. Гусев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 151–154.

Другие публикации:

1. Завьялов В.М. Улучшение динамических характеристик электро-привода подъема мостового крана / В.М. Завьялов, А.В. Гусев. // «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2010»: материалы XIII Международной научно-практической конференции, 28–29 октября 2010 г./ КузГТУ. – Кемерово, 2010, Том 2, С. 114–117.

2. Завьялов В.М. Синергетический регулятор скорости электропривода подъема мостового крана с автоматическим ограничением динамических нагрузок в канате / В.М. Завьялов, А.В. Гусев. // «Электромеханические преобразователи энергии»: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г. А. Сипайлова; ТПУ. – Томск, 2011, С. 157–160.

3. Завьялов В.М. Идентификация параметров и состояния электропривода подъема мостового крана / В.М. Завьялов, А.В. Гусев, А.В. Киселёв // «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012»: материалы XI Международной научно-практической конференции, 1–2 ноября 2012 г./ КузГТУ. – Кемерово, С. 36–39.

4. Гусев А.В. Алгоритм управления электроприводом подъема кранового механизма по методу АКАР / А.В. Гусев // «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического про-

изводств, технология и надежность машин, приборов и оборудования»: материалы IX Международной научно-практической конференции, 18-19 марта 2014 г./ ВоГУ. – Вологда, 2014.

5. Гусев А.В. Непрерывная математическая модель подъемного каната / А.В. Гусев // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика»: материалы II Всероссийская научно-практическая конференции, 2–4 декабря 2015 г./ КузГТУ – Кемерово, 2015.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 122 страниц, в том числе 7 таблиц, 34 рисунка. Список использованной информации содержит 99 наименований.

1 Обзор литературных источников

1.1 Основные особенности электропривода подъема крана

Электропривод подъема крана относится к механизмам циклического действия. Каждый цикл работы делится на стадии разгона, движения с постоянной скоростью и торможения. При работе электропривод подъема крана функционирует в 2-х режимах: двигательном и тормозном. В двигательном режиме привод поднимает груз, преодолевая силу тяжести. При опускании большого по массе груза, для ограничения скорости опускания, электропривод работает в тормозном режиме, препятствуя увеличению скорости груза под действием силы тяжести.

Электропривод подъема крана работает в повторно-кратковременном режиме. Число и продолжительность включений влияют на показатели надежности и эксплуатационный ресурс работы крана. Электропривод подъема должен иметь возможность регулирования как скорости подъема груза, так и скорости спуска поднятого груза. Диапазон регулирования скорости подъема (спуска) определяется технологическим применением конкретного типа крана. Основные требования к электроприводу подъема крана сформулированы в [75]:

- механические характеристики электропривода должны быть расположены во всех четырех квадрантах;
- электропривод должен обеспечивать плавный переход приводной электрической машины из двигательного режима работы в генераторный режим при спуске груза;
- диапазон регулирования скорости в большинстве случаев не выше 10:1;

- для выполнения операций по выбору слабины грузового каната необходимо иметь характеристику пониженной скорости;
- электропривод должен обеспечивать жесткие механические характеристики во всем диапазоне нагрузок.

Как отмечается в [89], основным типом электропривода подъемных кранов до недавнего времени был электрический двигатель постоянного или переменного тока с релейно-контакторным управлением, в котором функции управления, защиты и регулирования скорости осуществляются при помощи различного рода крановых и защитных панелей. Регулирование скорости в таких электроприводах реализуется за счет введения в силовые цепи добавочных сопротивлений. Основным недостатком такого способа регулирования является его низкая энергоэффективность, особенно при работе на скоростях ниже номинальной. Кроме того, этот способ требует использования двигателя с фазным ротором, если идет речь о приводе переменного тока. Такого рода двигатели, как и двигатели постоянного тока, имеют в составе щеточный аппарат, что, в свою очередь, требует более тщательного и трудоемкого обслуживания. Кроме того, данный способ не позволяет получить значительного диапазона регулирования скорости. Низкая надежность использования релейно-контакторной аппаратуры общеизвестна.

Там же в [89] отмечается, что в настоящее время самым распространенным двигателем промышленных электроприводов является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Это самый простой, надежный и дешевый электродвигатель с широким диапазоном частоты вращения и мощности. Самым эффективным среди регулируемых асинхронных электроприводов является частотно-регулируемый электропривод на основе преобразователя частоты.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в механизмах подъемно-транспортного оборудования является эффективным методом повышения технологичности производства [33]. Использование таких приводов позволяет:

- значительно (до 40%) снизить энергопотребление крана, что особенно актуально при постоянно растущих тарифах на электроэнергию;
- осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по желаемому закону во времени, при варьировании временем разгона и торможения от долей секунды до десятков минут;
- повысить динамические показатели при движении крана и долговечность механического оборудования благодаря плавности переходных процессов;
- защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, утечек на землю и от обрывов в цепях питания двигателей;
- снизить эксплуатационные расходы на капитальный ремонт оборудования за счет значительного снижения динамических нагрузок в элементах кинематической цепи.
- изменять скорости и ускорения движения механизмов крана применительно к конкретным технологическим задачам и тем самым оптимизировать технологический процесс.

В [88] отмечается, что применительно к электроприводу подъема, экономия электроэнергии может составить до 70 %. Также в статье указывается, что в настоящее время наблюдается тенденция внедрения в подъемно-транспортные механизмы современных регулируемых электроприводов на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР) с преобразователем частоты.

1.2 Негативное влияние режима работы «с подхватом»

Одним из наиболее тяжелых режимов динамического нагружения крана является подъем груза «с подхватом», когда провисание каната не устраняется путем предварительного натяжения, а привод подъема разгоняется до определенной скорости, и после устранения провисания каната происходит отрыв груза от поверхности опоры. Чем больше скорость «подхвата» груза, тем больше величина динамического нагружения. В большинстве случаев минимального провисания канатов достаточно, чтобы привод успел разогнаться до номинальной скорости [58]. В этом режиме наиболее часто на кран действуют максимальные динамические нагрузки [64], ведущие к интенсивному накоплению усталостных повреждений, что одновременно увеличивает вероятность обрыва каната [96]. В [29] указывается, что около 80 % отказов грузоподъемных машин связано с динамическими нагрузками, одной из причин которых, как было отмечено ранее, является подъем груза «с подхватом». Механические нагрузки кинематической передачи определяют её износ, поэтому снижение динамических нагрузок обеспечивает повышение надежности и долговечности механической части привода [44], [45], [95].

Подъемный канат является упругой связью одностороннего действия (неудерживающей связью, освобождающей связью) – это тип связи, передающий усилие только при растяжении [5]. По этой причине, на больших скоростях подъема в режиме «с подхватом» может наблюдаться «подскок» груза, когда груз перемещается быстрее углового движения подъемного барабана, в результате чего происходит силовое размыкание кинематической связи и изменение кинематической структуры. «Подскок» груза может привести к выходу каната из ручьев барабана (или блоков) и нарушению нормальной работы подъемного механизма, иногда даже с аварийными последствиями [38], [97].

Подъем «с подхватом» запрещен правилами технической эксплуатации грузоподъемных кранов [51]. Однако в случае, когда оператор крана лишен возможности непосредственно наблюдать за положением груза, имеют место случаи пуска и разгона механизма подъема при ослабленных канатах, то есть подъем «с подхватом» обусловлен технологией производства работ [48]. Таким образом, режим работы «с подхватом» является самым тяжелым режимом работы и по этой причине способствует интенсивному накоплению усталостных повреждений.

1.3 Варианты управления электроприводом подъема крана

В современных условиях развития техники и технологии, наиболее перспективным из возможных вариантов построения автоматизированного электропривода кранового механизма является электропривод по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ПЧ-АДКЗР). Одним из возможных вариантов построения системы управления электроприводом подъема на базе АДКЗР является скалярное управление.

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода базируется на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, магнитных потоков, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Управляемость АД при этом может обеспечиваться совместным регулированием либо частоты и напряжения, либо частоты и тока статорной обмотки. Первый способ управления принято трактовать как частотное управление, второй – как частотно-токовое управление [74], [81]. Скалярное частотно-токовое управление АД характеризуется малым критическим скольжением и постоянством критического момента при постоянстве питающего АД тока и изменении его частоты [43]. В электроприводах подъ-

ема кранов используется в основном именно частотно-токовое управление [70].

Векторный принцип управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом связан как с изменением частоты подводимого напряжения и текущих значений переменных АД, так и с взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат [84]. При регулировании амплитудных значений переменных и углов между их векторами обеспечивается полное управление АД как в статике, так и в динамике, что дает улучшение качества переходных процессов. Этим обусловлено широкое внедрение систем электропривода с векторным управлением в последние годы.

Основные принципы векторного управления были разработаны в 70-х годах XX века [1]. Прямое управление моментом (Direct Torque Control – DTC) является продолжением развития систем векторного управления АД. Принципы такого управления были опубликованы в 1985 г. Через 10 лет фирмой ABB был выпущен первый промышленный образец электропривода, использующий принципы прямого управления моментом [2]. Анализ работ, проводимых различными исследователями в направлении совершенствования алгоритмов работы систем электропривода с прямым управлением моментом, представлен в [25], [26], [27], [28].

Системы с прямым управлением моментом электропривода отрабатывают стопроцентный скачок задания момента за 1 – 2 мс, обеспечивают точное регулирование момента при низких частотах, включая и нулевую скорость, а также обеспечивают точность поддержания скорости на уровне 10% скольжения АД без использования датчика скорости и 0,01 % с использованием датчика скорости. Задачей прямого управления моментом является обеспечение быстрого формирования электромагнитного момента двигателя в соответствии с величиной заданного управляющего воздействия. В отличие от векторного управле-

ния, где изменение момента производится путем воздействия на ток статора, который, таким образом, является управляемой величиной, в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора. Изменение потокосцепления достигается путем оптимального переключения ключей инвертора напряжения, от которого питается АД [72].

Алгоритмы прямого управления моментом отличает простота (нет преобразования координат), робастность по отношению к неопределенности параметров и высокое быстродействие. Основным недостатком систем с прямым управлением моментом является то, что удовлетворительное качество переходных процессов обеспечивается только в том случае, если погрешность оценки активного сопротивления статора не превышает 5 % [61]. В число недостатков также входит наличие пульсаций в электромагнитном моменте и потокосцеплении, что снижает точность регулирования, повышает электропотребление и увеличивает акустический шум АД.

В [40], для улучшения качества управления кранами предлагается проводить более интенсивное внедрение частотного регулирования электроприводов, что обеспечит:

- высокую плавность движения механизмов;
- возможность использования трехпериодной тахограммы двигателя (разгон – равномерное движение – торможение) с исключением дотягивания;
- номинальный момент на низкой скорости движения;
- выбор оптимальной скорости равномерного движения;
- точное позиционирование;
- снижение массы, габаритов и стоимости приводного асинхронного двигателя;

- снижение суммарного момента инерции механической системы;
- сокращение износа механических тормозов и т.д.

Наиболее высокие требования предъявляются к приводу механизма подъема крана [9]. В этой статье сделан вывод, что только управление с помощью преобразователя частоты обеспечивает устранение ощутимых динамических нагрузок при старте и остановке механизма, точное позиционирование груза. Помимо этого, отмечается, что значительно повышается срок службы основных элементов подъемно-транспортного механизма – тяговых канатов, тормозных колодок, редукторов.

Всех вышеперечисленных качественных показателей электропривода подъема можно достичь только при векторном управлении, а именно регулированием амплитуды и фазы вектора поля двигателя. Преимущества векторного регулирования при использовании в подъемных механизмах [41]:

- точная отработка скорости с компенсацией скольжения (даже без обратной связи по скорости);
- глубокий диапазон регулирования;
- в области малых частот двигатель работает плавно и сохраняет момент вплоть до нулевой скорости;
- быстрая реакция на скачки нагрузки (при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости, вследствие высокой динамики регулирования);
- оптимизация КПД двигателя на низких частотах.

В статье [56] отмечено, что алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами обычно являются многозадачными. Они должны обеспечивать быстроедействие, точность, робастность и, по своей сути, заменять действия высококвалифицированного персонала.

При разработке алгоритмов управления должны учитываться как возможные изменения параметров системы (длина троса, вес груза), так и вопросы практической реализации (величину управляющего воздействия, максимальные ускорения и скорости и др.).

Применительно к электроприводу можно выделить два уровня управления [87]: внешний (верхний) уровень вырабатывает технологическую программу работы электропривода, внутренний (нижний) уровень формирует статические и динамические свойства электропривода. Применительно к приводу подъема крана, для внешнего и внутреннего уровней, используются различные способы управления, представленные на рисунке 1.1. Классическое управление по отклонению с последовательной и параллельной коррекцией послужило основанием для создания таких способов управления, как подчиненное, векторное, адаптивное управление, которые позволяют обеспечить высокие динамические и регулировочные свойства.



Рисунок 1.1 – Способы управления электроприводом подъема крана

В статье [14] рассматривается двухмассовая электромеханическая система с зазором. Даны основные соотношения для определения коэффициента динамичности, характеризующего интенсивность нагрузки

в передачах без учета диссипации. Предложены способы демпфирования всплесков упругого момента во время выбора зазора, основанные на снижении момента, развиваемого двигателем в момент выбора зазора в передаче. Недостатком описанных способов демпфирования является увеличение времени переходного процесса. Системы, учитывающие собственные колебания привода подъема [85], обладают лучшей динамикой разгона (торможения), но также не способны существенно снизить динамические нагрузки на подъемный канат в режиме «с подхватом» в силу отсутствия информации о массе поднимаемого груза.

Подчиненное управление многомассовыми системами. В статье [10] рассмотрены способы построения замкнутых систем управления электроприводами, механическая часть которых может быть представлена в виде двухмассовой подсистемы. Авторами, в частности, рассматривается система подчиненного регулирования шахтной подъемной установкой. Были проанализированы 10 основных способов построения систем управления:

1. Коррекция коэффициента усиления регулятора скорости в системе подчиненного регулирования. Преимущество заключается в том, что результат достигается гораздо проще, чем при использовании других способов. Недостатком является возможность применения способа только при значении коэффициента соотношения масс более 2,5.
2. Создание системы подчиненного регулирования с заведением обратной связи по производной от скорости исполнительного органа. Дает удовлетворительные результаты регулирования при значении коэффициента соотношения масс более 1.
3. Создание системы подчиненного регулирования с заведением обратной связи по второй производной от скорости исполнительного органа. Система обладает меньшим быстродействием по сравнению с первыми двумя, описанными ранее. Вследствие

необходимости уменьшения значения коэффициента регулятора скорости, повышается значение статической погрешности. Способ применим при значении коэффициента соотношения масс близком к 1.

4. Создание системы подчиненного регулирования с введением дополнительных обратных связей по разности скоростей двигателя и исполнительного органа. Характеристики синтезированной системы аналогичны по своим свойствам способу 3. Использование данного способа применяется при невозможности построить систему по способу 3.
5. Создание системы управления с модальным регулятором. Не требуется использование дополнительных корректирующих устройств. Введение модальных обратных связей не нарушает наблюдаемость и управляемость объекта.
6. Создание системы управления с наблюдающим устройством. Способ применим в тех случаях, когда требуемые для осуществления необходимых обратных связей координаты вектора состояния электромеханической системы не поддаются прямому измерению. Если значение момента статической нагрузки изменяется в процессе работы системы, то возможны ошибки при восстановлении значений координат с помощью наблюдающих устройств.
7. Создание электромеханической системы, замкнутой по вектору состояния. Способ позволяет строить системы управления не только по скорости двигателя и исполнительного механизма, но и по упругому моменту.
8. Создание системы управления с использованием полосно-заграждающего фильтра в контуре регулирования скорости. Способ связан с введением настроенного на частоту резонанса системы полосно-заграждающего фильтра. Недостатком являет-

ся высокая чувствительность системы к изменению параметров. Также необходимо отметить, что определение собственных резонансных частот объектов управления крайне затруднительно, а кроме этого, они могут изменяться в процессе работы механизма. В связи с этим в системе необходимо использовать самонастраивающиеся фильтры.

9. Использование параллельной коррекции с косвенным измерением скорости исполнительного органа и с использованием гибкой обратной связи, заведенной на вход регулятора тока. Способ целесообразно использовать в случае если амплитуда упругих колебаний ротора двигателя превосходит амплитуду колебаний исполнительного механизма.
10. Создание системы подчиненного регулирования с использованием дополнительных параллельных корректирующих устройств. Способ подразумевает настройку параметров корректирующих устройств таким образом, чтобы ослабить влияние упругих колебаний в механической части на работу всей системы, практически не меняя характер переходных процессов по задающему воздействию в системе. Степень устойчивости системы повышается. К недостаткам данного способа следует отнести сложность расчета параметров корректирующих звеньев и трудоемкость настройки системы управления.

Рассмотрение указанных выше способов построения систем управления электроприводами с упругими связями говорит о необходимости осуществлять выбор, исходя из конкретной ситуации. В большинстве случаев скорость подъемного устройства не поддается измерению. Следовательно, необходимо восстанавливать значение неизвестной координаты вектора состояния с помощью наблюдающего устройства с целью построения системы автоматического управления.

В управлении электроприводом подъема крана внутренний контур момента подчинен внешнему контуру скорости. [86] Системы подчиненного регулирования содержат блоки ограничения уровней выходных сигналов регуляторов для контроля переменных привода, не превышающих номинальные значения. Входное управляющее воздействие поступает на контур скорости через задатчик интенсивности (ЗИ), который служит для настройки скорости нарастания и спада входного управляющего воздействия и исключает тем самым электрические и механические перегрузки в системе. В электроприводе подъема крана применяются ЗИ, реализующие либо линейное нарастание скорости (линейный ЗИ), либо нарастание скорости по так называемой S-образной зависимости, обеспечивающий плавность переходных процессов в начале и в конце движения крюкового подвеса (S-образный ЗИ).

Модальное управление многомассовыми системами. Данный вид управления связан с формированием обратных связей электропривода с целью придания замкнутой системе необходимых динамических характеристик [57]. В частности, в статье [34] для принудительного демпфирования колебаний электромеханической системы подъёмных механизмов, в систему привода подъема предложено вводить коррекцию – отрицательную обратную связь по разности скоростей двух масс (двигателя и груза). Введение корректирующей связи по разности скоростей обеих масс при правильном выборе коэффициента коррекции K_k приводит к существенному улучшению переходного процесса электромеханической системы механизма подъема (перерегулирование по скорости снижается с 85% до 15%, а по моменту упругости – с 12% до 5,5%). Относительно данной работы можно сказать, что применение указанного метода подразумевает предварительное определение массы поднимаемого груза, чего невозможно сделать в режиме работы «с подхватом».

В статье [77] исследуется трехмассовая электромеханическая система подъемного механизма (двигатель, груз, стрела (мост)), применительно к которой осуществляется выбор оптимального значения коэффициента корректирующей обратной связи K_K по разности скоростей $\omega_1 - \omega_2 - \omega_0$ посредством минимизации интеграла от квадратичной функции (1.1):

$$I_K = \int_0^{\infty} (X^2 + T^2 \dot{X}^2) dt, \quad (1.1)$$

где T – некоторая постоянная времени.

Постоянная времени T определяет экспоненту, к которой можно приблизить переходный процесс, выбирая параметры системы по минимуму интегральной оценки. Автор указывает, что $T=0,2$ с было выбрано после предварительных расчетов, исходя из соображений требуемого качества переходного процесса. Для улучшения показателей качества переходных процессов предлагается использовать жесткую отрицательную обратную связь по разности скоростей с коэффициентом коррекции K_K . Задача оптимизации сводилась к выбору оптимального значения K_K , обеспечивающего наилучшее качество регулирования системы. С увеличением жесткости каната C_{12} значение $K_{K_{\text{опт}}}$ увеличивается; также утверждается, что соотношение $C_{12}/K_{\text{опт}}$ остается постоянным. При введении коррекции с оптимальным коэффициентом усиления, существенно улучшаются все показатели качества регулирования. Если без коррекции время переходного процесса составляло более 45 с, то при введении обратной связи с $K_{K_{\text{опт}}}$ – около 0,7 с. Значительно снижаются колебательность и перерегулирование. Были проведены исследования и при других значениях коэффициента коррекции. Подтверждено, что при $K_K < K_{K_{\text{опт}}}$ качество системы ухудшается быстрее, чем при $K_K > K_{K_{\text{опт}}}$. Рассматривая данную работу, нетрудно заметить, что выбор оптимального коэффициента корректирующей обратной связи осуществляется при условии определенности

массы поднимаемого груза, чего не происходит в режиме работы «с подхватом».

Диссертация [59] посвящена разработке микропроцессорной системы управления электроприводом механизма подъема, позволяющей снизить колебательность, длительность переходного процесса и динамические перегрузки в режиме подъема «с подхватом». В частности, рассмотрена электромеханическая система (ЭМС) с электроприводом тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель (ТПН-АД) и трехмассовой разветвленной механической частью, в которой в качестве третьей массы (кроме двигателя и груза) принята металлоконструкция крана (стрела либо мост). Показано, что переходные процессы в такой системе характеризуются повышенной колебательностью и динамическими перегрузками. Поэтому для повышения демпфирующей способности электропривода предложено применить отрицательную обратную связь по разности скоростей трех масс с коэффициентом коррекции K_k . Установлено, что существует оптимальное значение коэффициента коррекции, при котором демпфирование колебаний максимально. Предложено два метода для поиска оптимального значения K_k : по критерию максимума коэффициента демпфирования колебаний и по критерию минимума квадратичной интегральной оценки. Произведено математическое моделирование процесса подъема. Для реализации корректирующей обратной связи по разности скоростей, разработаны два типа наблюдающих устройств – полного и пониженного порядков. Показано, что наиболее удобным в реализации является редуцированный наблюдатель, поскольку он обладает пониженным порядком и уменьшенными значениями коэффициентов модальной обратной связи. Разработан алгоритм формирования переходного процесса пуска и алгоритм расчета оптимального коэффициента коррекции. Однако, необходимо заметить, что при условии неопределенности массы груза, характерном для режима подъема «с подхва-

том», автором не приводятся данные о величине снижения колебательности переходного процесса и влиянии неопределенности массы груза на параметры переходного процесса. Отсюда следует вывод, что характеристики разработанной системы управления остаются неясными. Ценным результатом работы является подтверждение негативного влияния режима подъема «с подхватом» на механизм крана, ведущего к большим динамическим перегрузкам.

В статье [80] предложено для демпфирования упругих колебаний в механической части привода подъема скиповой подъемной установки синтезировать регулятор электропривода с введением отрицательной обратной связи по скорости груженого скипа. Моделирование переходного процесса с применением программного пакета Simulink – Matlab показало полное демпфирование колебания скорости скипа. В отношении предложенного метода управления необходимо отметить, что определение скорости движения скипа, а также передача этой информации в систему управления является достаточно проблематичной задачей с точки зрения практической реализации.

В статье [60] рассматривались переходные процессы режима подъема груза «с подхватом» в системе с модальным регулятором, замкнутой через наблюдатель. Показано, что применение модального регулятора в значительной мере повышает демпфирующие свойства трехмассовой электромеханической системы. По сравнению с корректирующей обратной связью по разности скоростей трех масс, регулятор позволяет в 3 – 5 раз уменьшить длительность переходного процесса, а также практически полностью исключить перерегулирование и колебательность. Выбор оптимального коэффициента коррекции обратной связи осуществляется по сложному алгоритму, реализующему поиск экстремума функции. Относительно данной работы можно сделать следующее замечание: модальный регулятор, разработанный авторами статьи, не может функционировать при условии неопределен-

ности массы груза, характерного для работы привода в режиме «с подхватом». Авторы не дают разъяснений по данному вопросу.

В статье [76] объектом исследования является электромеханическая система кранового механизма подъема с трехмассовой механической частью, которая представлена взаимодействием двигателя механизма подъема с грузом и неподвижной податливой стрелой (либо мостом). В статье указывается, что автором разработано наблюдающее устройство полного порядка для трехмассовой электромеханической системы, произведена оценка качества его работы и чувствительности к изменениям параметров реальной системы. Синтез наблюдателя производился при использовании метода пространства состояний. По измеренному напряжению двигателя U_d и скорости вращения ротора двигателя ω_1 , зная параметры механической части привода, наблюдающим устройством восстанавливаются координаты скоростей, $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_0$, а также моментов $\dot{M}_{12}, \dot{M}_0, \dot{M}_C$. Выявлено, что наилучшим качеством переходных процессов в режиме «с подхватом», когда за время устранения провисания каната двигатель разогнался до скорости холостого хода, обладает система, форма распределения корней которой минимизирует интеграл I_3 , представляющий собой интеграл от произведения абсолютного значения ошибки $|e(t)| = |1 - x(t)|$ на время t :

$$I_3 = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt. \quad (1.2)$$

Исследование чувствительности наблюдающего устройства к изменениям параметров реальной системы показало, что наибольшее влияние на качество работы наблюдателя оказывает изменение жесткости каната C_{12} . В таблице 1.1 приведены данные из [76], полученные при моделировании.

Таблица 1.1 – Результаты исследования качества работы наблюдающего устройства, настроенного по интегральной форме распределения корней

Параметры	Допустимые пределы изменения параметров	Диапазоны изменения ошибки $\Delta\omega_{2\max}, \%$	Примечания
C_{12}	+ 40 %	0...30	
	– 50 %	0...21	
J_2	4 J_2	0...0,97	Повышенная колебательность $\hat{\omega}_2$
	0,2 J_2	0...10,8	
M_c	2 M_c	0...24	
	0,2 M_c	0...12,6	

Рассматривая данную работу, можно отметить следующее: непонятным остается отдельный анализ влияния на качество оценки параметров таких величин, как J_2 и M_c , когда известно, что эти два параметра связаны между собой соотношением вида (1.3), и соответственно, величина допустимого отклонения этих параметров от реальных параметров привода крана, должна одинаково влиять на качество оценки параметров системы, чего не наблюдается по представленным результатам моделирования.

$$M_c = J_2 \frac{2gi_p}{D_b}, \quad (1.3)$$

где g – ускорение свободного падения, i_p – передаточное число редуктора, D_b – диаметр навивки барабана.

По этой причине сделать заключение о применимости наблюдателя полного порядка для идентификации параметров системы и управле-

ния приводом подъема в условиях неопределенности массы поднимаемого груза, не представляется возможным.

В статье [78] при исследовании чувствительности редуцированного наблюдателя к изменению параметров привода подъема было установлено, что наблюдающее устройство полного порядка, описанное в [76], не дает преимуществ по сравнению с редуцированным наблюдателем. Так, при увеличении жесткости каната на 20% максимальная ошибка по скорости второй массы по отношению к реальному значению для наблюдателя полного порядка составляет 29,2%, для редуцированного – 26%; при уменьшении жесткости на 20% составляют 12% и 7% соответственно. Проведенные исследования показали, что оба наблюдателя (полного порядка и редуцированный) в равной степени работоспособны применительно к приводу подъема крана. Однако в связи с тем, что порядок редуцированного наблюдателя ниже и значение ошибки несколько меньше, на практике рекомендуется применять именно его. Автор статьи не приводит результаты работы редуцированного наблюдающего устройства в условиях неопределенности массы груза, что также не позволяет сделать заключение об эффективности применения его в практических целях.

В статье [53] разработана математическая модель системы управления двухмассовой электромеханической системой с использованием модального регулятора желаемой эталонной формы. В качестве измеряемых переменных авторами выбраны следующие: ЭДС тиристорного преобразователя, ток якоря, скорость вращения якоря, момент в трансмиссии и скорость вращения рабочего органа (второй массы). В результате синтеза модального регулятора были определены коэффициенты передачи по каждому каналу измерения для получения желаемого переходного процесса в механической части электропривода. С помощью программного пакета Matlab Simulink произведено исследование показателей качества переходных процессов при управлении ав-

томатизированной нелинейной двухмассовой электромеханической системой традиционной структуры подчиненного регулирования и с модальным регулятором. Сравнение полученных результатов показало, что система автоматического управления с модальным регулятором по всем показателям существенно превосходит классическую систему подчиненного регулирования: по эффективности сглаживания колебаний, быстродействию (время переходного процесса уменьшилось в 2,5 раза), колебательности (снизилась в 6 раз), перерегулированию (снизилась до 0), статической ошибке (снизилась до 0). Анализируя результаты, полученные в статье, можно отметить, что с помощью моделирования действительно показана высокая эффективность использования модального управления. Остается непонятным один вопрос: как будет измеряться момент в механической трансмиссии? Данный параметр является достаточно сложным для измерения на реальном технологическом объекте.

Адаптивное управление многомассовыми системами. В системах с изменяющимися параметрами объекта управления невозможно осуществлять оптимальное управление и поддерживать заранее заданные динамические свойства выше описанными методами. Для сохранения показателей качества работы электропривода в условиях изменяющихся параметров необходимо приспосабливаться к этому изменению – изменять параметры регуляторов, адаптировать регулятор к новым условиям работы, а также, если необходимо, формировать дополнительные воздействия на объект управления [8].

Реализация адаптивного управления в системе осуществляется блоком адаптивного управления (БАУ), который включает в себя блок обработки информации о текущем состоянии объекта или всей системы и блок перенастройки параметров регуляторов, в соответствии с принятым критерием качества работы адаптивной системы. В частности, в работе [52] предлагается адаптивный алгоритм идентификации

частоты вращения ротора для систем векторного управления электроприводом на базе АДКЗР, имеющий расширенную рабочую область и удовлетворяющий основным требованиям к электроприводам подъемно-транспортных механизмов. Указанный алгоритм функционирования идентификатора частоты вращения ротора АДКЗР не имеет статической ошибки вычисления скорости, так как идея метода оценки частоты вращения ротора заключается в сведении к нулю разности фаз двух оценок потокосцеплений ротора, т. е. $\arg(\hat{\Psi}_r^u) = \arg(\hat{\Psi}_r^c)$ (верхний индекс обозначает по какой модели вычислялась оценка: u – статорной, c – роторной). Также, в работе [52] разработан алгоритм адаптации идентификатора вектора потокосцепления и частоты вращения АДКЗР к изменениям величины активного сопротивления статора, не требующий инъекции тестовых воздействий. Работоспособность полученных алгоритмов во всех 4-х квадрантах механической характеристики была подтверждена на примере электропривода подъема «ЭРАТРОН-М5» с АДКЗР.

Можно выделить два подхода к управлению объектами с изменяющимися свойствами, которыми, в частности, являются крановые установки: самонастройка с использованием максимальных возможностей системы управления и робастность со стабилизацией свойств по неблагоприятному варианту. Самонастройка требует решения в реальном времени задач идентификации объекта, перерасчета и перенастройки системы управления. При этом свойства системы будут близки к оптимальным значениям. Алгоритмы с неизменными параметрами, как правило, реализуют вариант для самого тяжелого случая параметров объекта с допустимыми характеристиками системы. При благоприятном случае регулятор реализует практически тот же вариант управления, однако, не являющийся оптимальным.

Целью работы [65] являлось повышение точности позиционирования двухмассовых электромеханических систем в условиях параметрической неопределенности. В работе рассматривается применение скользящего режима для управления двухмассовыми электромеханическими системами в условиях параметрической неопределенности. Для снижения больших энергетических затрат при управлении по данному подходу предполагается использовать идею настраиваемого скользящего режима Ю. И. Мышляева [66]. Для устранения высокочастотных колебаний в реальном скользящем режиме предполагается использовать метод скользящего режима высшего порядка С. В. Емельянова, заключающийся во введении h -интеграторов после релейного элемента. В работе указывается, что при синтезе закона подстройки параметров, в качестве контура адаптации используется наблюдатель полного порядка для механической подсистемы, расширенной уравнением квазистационарности момента нагрузки.

В работе [67] предложена методика построения не прямых адаптивных систем управления нелинейными нестационарными объектами с мажорирующими функциями, с помощью программного пакета Simulink – Matlab произведен анализ управления объектом с упругими и нелинейными свойствами (двухмассовая система с упругой связью и зазором в механической передаче) с применением прямой адаптивной системы и не прямой адаптивной системы с параметрической настройкой. Показано, что применение для управления прямой и не прямой адаптивных систем для объектов с упругими и нелинейными свойствами позволяет подавить упругие колебания в механической части электропривода, повышает быстродействие и точность управления. Следует отметить, что для работы описанных систем необходима информация о скорости или положении второй массы. В условиях отсутствия указанной информации, в работе системы наблюдается возникновение ошибки управления. К сожалению, автором не приведены данные о ве-

личине возмущающего воздействия, воздействующего на систему при моделировании, поэтому, судить о точности отработки системой управления заданного воздействия не представляется возможным.

Доклад [39] посвящен построению алгоритмов управления сигнальной и параметрической адаптации для подавления упругих колебаний, возникающих в двухмассовых электромеханических системах, имеющих зазор в трансмиссии, при условии неопределенности величины жесткости трансмиссии, а также величины момента инерции второй массы. Система управления содержит наблюдатель, эталонную модель, модальный и адаптивный регуляторы. Для модального регулятора входным воздействием является вектор оцененных наблюдателем параметров, а для адаптивного регулятора – разность между вектором оцененных параметров и вектором параметров, полученных с эталонной модели. Наблюдатель в системе управления получает информацию о скорости вращения первой массы и величине управляющего воздействия. С помощью компьютерного моделирования показано, что переходный процесс в системе с сигнальной адаптацией при увеличении жесткости трансмиссии практически не изменяется. Только при увеличении жесткости в 8 раз в системе появляются автоколебания. При уменьшении жесткости трансмиссии переходный процесс в системе становится более колебательным, и растет величина перерегулирования. Моделирование переходных процессов с параметрической неопределенностью момента инерции второй массы показало, что с увеличением момента инерции возникает перерегулирование в системе с одновременным возрастанием времени регулирования. При уменьшении момента инерции второй массы переходный процесс принимает апериодический вид, при этом время нарастания в 3 раза больше, чем в номинальном режиме. На основании полученных результатов авторами сделан вывод о том, что адаптивный регулятор, в рассматриваемом случае неопределенности параметров, должен быть настроен на

наименьшую жесткость и наибольший момент инерции второй массы для лучшего качества переходных процессов.

В случае замены адаптивного регулятора на нейросетевой [39] происходит значительное увеличение быстродействия системы управления вследствие упрощения операций вычисления управляющего воздействия. С помощью пакета Matlab в тех же условиях неопределенности параметров (проводилось исследование влияния коэффициента упругости трансмиссии и момента инерции второй массы) авторами были смоделированы переходные процессы в системе управления с нейросетевым регулятором. По результатам моделирования произведено сравнение качества переходных процессов в системах управления с адаптивным и нейросетевым регулятором. В результате анализа были сделаны следующие выводы:

1. При уменьшении жесткости трансмиссии обе системы регулирования ведут себя одинаково.
2. При увеличении жесткости трансмиссии система с нейросетевым регулятором имеет более колебательный характер переходного процесса.
3. При отклонении момента инерции второй массы как в большую, так и в меньшую сторону от номинальной, система с нейросетевым регулятором имеет лучшие параметры переходного процесса.

Результаты показали целесообразность замены в условиях параметрической неопределенности адаптивного регулятора, реализующего сложную функцию поиска адаптивного управления на нейросетевой регулятор, обеспечивающий аналогичные динамические характеристики системы управления, позволяющий увеличить быстродействие системы и удешевить её реализацию на практике вследствие возможности использования менее дорогостоящего микропроцессорного вычислителя.

Робастное управление двухмассовыми системами. В статье [6] решается проблема минимально возможного статического и динамического отклонения скорости рабочего органа двухмассовой механической системы от заданного значения при изменении момента нагрузки. Объект управления представлен электрической частью в виде апериодического звена и механической частью в виде двухмассовой механической системы с упругой связью. Для обеспечения стационарной точности регулирования система управления скоростью вращения двухмассовой электромеханической системы дополнительно содержит ПИ-регулятор. При этом ПИ-регулятор рассматривается как предварительный фильтр, который обеспечивает регулирование разницы между заданной и текущей частотами вращения. Предполагается, что объект управления характеризуется динамичностью свойств, нелинейностью, нестационарностью, отсутствует полная информация об объекте управления, что на объект оказывают влияние внутренние и внешние возмущения в широком диапазоне частот. Авторами было поставлено условие: получить апериодический характер переходного процесса в механической подсистеме, обусловленного колебанием момента нагрузки, и обеспечить время протекания переходного процесса не более $0,1 - 0,3$ с.

Решение указанной выше проблемы предполагалось осуществлять с помощью построения робастной системы автоматического управления, которая должна обеспечить необходимые регулировочные свойства, несмотря на существенную неопределенность характеристик объекта управления. Для гашения колебаний вала в качестве внешнего возмущения выбран момент скручивания вала. Построение робастного регулятора производилось методом H_∞ -теории. Основная цель робастного регулятора заключается в такой оптимизации свойств канала регулирования с ПИ-регулятором, в том числе характеристик по заданию и возмущению, а также колебательных характеристик, чтобы замкну-

тый контур регулирования обеспечивал выполнение поставленных требований к качеству регулирования. При моделировании переходных процессов на ЭВМ производилось сравнение показателей работы системы с обычным ПИ-регулятором и системы с ПИ-регулятором, контур регулирования которого дополнен робастным регулятором.

На основании приведенных данных, можно сделать заключение о том, что применение робастного регулятора в контуре ПИ-регулятора позволяет снизить колебательность системы по каналам задание частоты вращения – момент скручивания вала и задание частоты вращения – частота вращения ротора, а также увеличивает колебательность системы по каналу момент нагрузки – крутящий момент на валу. Результаты моделирования переходных процессов при изменении задания частоты вращения на 5 % позволяют сделать заключение о том, что применение робастного регулятора в контуре ПИ-регулятора позволило улучшить динамические характеристики по заданию. Система с робастным регулятором практически не имеет перерегулирования по скорости вращения приводного двигателя и не имеет колебаний скручивающего момента вала. Авторами, к сожалению, не приводится переходный процесс скорости вращения второй массы при изменении задания частоты вращения.

В статье [68] рассказывается о применении стохастического робастного управления для систем, отрабатывающих случайные задающие воздействия, либо компенсирующие случайные внешние возмущающие воздействия широкого спектра частот. Синтез стохастической системы робастного управления осуществляется при условии обеспечения системой управления минимизации анизотропии проектируемой системы. Стенд представляет собой два двигателя постоянного тока, валы которых соединены упругим элементом. Каждый двигатель имел импульсный датчик положения. Регулятор положения управляет первым двигателем по сигналу одного из датчиков положения (первого

или второго двигателя). С помощью второго двигателя создавался момент нагрузки. Для имитации случайного воздействия на вход второго двигателя через преобразователь подавался сигнал типа белого шума от генератора случайных сигналов. Приведены результаты экспериментального исследования работы системы при случайном изменении момента, действующего на вторую массу и поддержании постоянства скорости второй массы, измеряемой соответствующим датчиком. Экспериментальные исследования показали, что стохастическая система робастного управления позволяет уменьшить ошибку регулирования скорости, по сравнению с типовыми регуляторами, в 1,5 – 2,1 раза.

Применение метода АКАР к управлению многомассовыми системами. На современном этапе развития теории автоматического управления всё более широкое распространение получает синергетическая теория управления [47], [82], [83], основанная на науке о самоорганизации сложных систем – синергетике [69], [94], и метод АКАР, основанный на этой теории. Это происходит по целому ряду причин:

1. Синтез закона управления, полученный методом АКАР, естественным образом учитывает нелинейности объектов управления.
2. Синтезируемые управления, как правило, минимальны, что согласуется с известным в механике принципом наименьшего принуждения Гаусса.
3. Системы с регуляторами, полученными по методу АКАР, являются как асимптотически устойчивыми в целом, так и экспоненциально устойчивыми относительно вводимых инвариантных многообразий. Это означает, что такие системы обладают отличительным свойством грубости (робастности) переходных процессов к структурным вариациям и параметрическим возмущениям.

Суть метода АКАР заключается в следующем: желаемые характеристики системы управления, такие как цель управления и характер переходного процесса, задаются первоначально в виде конечных уравнений – так называемых инвариантных интегральных многообразий. Многообразия должны быть непрерывными вместе со своими производными. Разумеется, что многообразия не должны противоречить естественной природной сущности и динамическим свойствам исходного объекта. Задача синтеза сводится к построению дифференциальных уравнений замкнутой системы по заданным инвариантным многообразиям, описывающим программу движения.

В статье [32] рассматривается способ подавления упругих колебаний в механизмах с двухмассовой расчетной схемой, основанный на синергетической теории управления [83]. В частности, получен закон управления (управление моментом приводного двигателя), позволяющий полностью исключить упругие колебания в трансмиссии при случайном характере момента нагрузки, действующего на вторую массу – рабочий орган. Приведены результаты компьютерного моделирования, показывающие, что колебания упругого момента устраняются через 0,15 с после пуска. Анализируя закон управления моментом приводного двигателя, можно заметить, что для реализации данного закона управления, необходимо иметь полную информацию обо всех переменных системы электропривода. В частности, необходимо знать величину упругого момента в трансмиссии, величину момента сопротивления, скорости вращения первой и второй массы. Автором не уточняется, каким способом будет получена информация об этих параметрах механической части электропривода.

В статье [91] предложен подход к синтезу управления электромеханическими системами на основе использования метода АКАР, позволяющего осуществлять ограничение значений координат и отдельную настройку контуров регулирования. Ограничение координат в си-

стеме, построенной по принципам АКАР, осуществляется на основе элементов типа «насыщение». Построенные на основе описанного подхода системы управления обладают более широкими возможностями в обеспечении качества переходных процессов, по сравнению с обычными системами подчиненного регулирования.

1.4 Выводы по разделу и постановка задач исследования

Механическая подсистема привода подъема крана, как объект управления, в режиме подъема «с подхватом», является нелинейной и нестационарной. Нелинейность обусловлена свойством подъемного каната – механической связи одностороннего действия. Также нелинейность объекта связана с реакцией опоры, на которой расположен поднимаемый груз – реакция опоры присутствует и равна весу груза до момента подъема, уменьшается по мере натяжения подъемного каната и становится равной нулю после подъема груза над поверхностью опоры.

В настоящее время проводятся научные работы по совершенствованию алгоритмов управления электроприводами подъема крановых установок. Однако в научных работах либо вообще не учитывается самый тяжёлый из возможных режимов работы крана – подъем груза «с подхватом», либо работа в этом режиме рассматривается, но полученные результаты моделирования функционирования систем управления не обладают хорошими показателями качества переходных процессов, приводя к большим динамическим нагрузкам и, как следствие, – к снижению показателей безопасности и безотказной работы крана. Данная научная работа направлена на дальнейшее развитие тематики управления электроприводом подъема, но с более детальным рассмотрением режима подъема груза «с подхватом».

Режим работы «с подхватом» является самым тяжелым для механизма подъема крана, исходя из уровня динамической нагрузки на элементы механической подсистемы, и по этой причине способствует интенсивному накоплению усталостных повреждений, снижает безопасность проведения работ и увеличивает количество отказов. Для устранения негативного влияния режима работы «с подхватом», система управления приводом подъема крана должна обеспечивать снижение или полное устранение переменных динамических нагрузок на подъемный канат.

Для механизма подъема крана нормируется максимальная скорость подъема груза, но не оговаривается величина скорости устранения провисания каната, влияющая на величину усилия в канате в результате стопорения крюкового подвеса. Поэтому система управления должна обеспечивать поддержание заданной скорости подъема с одновременным ограничением скорости устранения провисания каната.

Указанные выше требования к системе управления, при условии нелинейности и нестационарности объекта управления, можно получить, используя наблюдатель параметров объекта управления и некоторые методы теории управления: метод подчиненного управления; метод адаптивного управления; управление, полученное методом АКАР; комбинации нескольких перечисленных методов. Системы управления, использующие алгоритмы работы, полученные методом АКАР, естественным образом учитывают нелинейности объекта управления, поэтому представляется целесообразным изучить возможность построения, а также проанализировать работу таких систем применительно к электроприводу подъема крана в режиме работы «с подхватом».

Исходя из вышесказанного, можно сформулировать задачи для научного исследования:

1. Получить зависимость для расчета максимальной скорости устранения провисания каната, обеспечивающую заданное ограничение динамического усилия в канате.
2. Разработать алгоритмы управления электроприводом подъема крана, автоматически снижающие динамические нагрузки в режиме работы «с подхватом».
3. Разработать компьютерную модель электропривода подъема крана и на ее основе провести анализ функционирования разработанных алгоритмов управления.
4. Оценить экономическую эффективность внедрения разработанных алгоритмов управления.
5. Разработать и смонтировать физическую модель электропривода подъема крана и провести исследование работы полученных алгоритмов управления.

2 Структура электропривода подъема крана

2.1 Электрическая подсистема электропривода подъема

В электроприводах подъема крановых механизмов используют электродвигатели как постоянного, так и переменного тока. В настоящее время в таких установках чаще используют частотно-регулируемый асинхронный электропривод, что обосновано его высокой надежностью, при относительно небольшой цене, и возможностью регулирования скорости в широких пределах.

Для математического описания процессов, протекающих в электромеханическом преобразователе типа АД, в основном используют три разновидности моделей [62]: модели на основе теории поля, базирующейся на уравнениях магнитного поля Максвелла; модели на основе теории электрических цепей, базирующейся на уравнениях Кирхгофа; модели на основе теории обобщенной электрической машины. Модель АД с использованием уравнений Максвелла является наиболее сложной и используется в основном в процессе проектирования электрических машин. Модель АД с использованием теории электрических цепей нелинейна, так как дифференциальные уравнения содержат переменные коэффициенты, это является её недостатком. На современном этапе наиболее прогрессивным является анализ процессов электромеханического преобразования энергии в АД с помощью теории обобщенной электрической машины, сочетающей в себе теорию поля и теорию электрических цепей [3], [11], [35], [49], [90].

В качестве математической модели АД будем рассматривать модель, основанную на базе двухфазной обобщенной электрической машины [3], представленной в неподвижной системе координат α - β . Применительно к АД данная модель, выраженная через потокосцепления обмоток статора и ротора, будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Psi}_{1\alpha} = u_{1\alpha} - \frac{R_1}{L_1 L_2 - L_m^2} (L_2 \Psi_{1\alpha} - L_m \Psi_{2\alpha}); \\ \dot{\Psi}_{1\beta} = u_{1\beta} - \frac{R_1}{L_1 L_2 - L_m^2} (L_2 \Psi_{1\beta} - L_m \Psi_{2\beta}) \\ \dot{\Psi}_{2\alpha} = -\frac{R_2}{L_1 L_2 - L_m^2} (L_1 \Psi_{2\alpha} - L_m \Psi_{1\alpha}) - p\omega \Psi_{2\beta} \\ \dot{\Psi}_{2\beta} = -\frac{R_2}{L_1 L_2 - L_m^2} (L_1 \Psi_{2\beta} - L_m \Psi_{1\beta}) + p\omega \Psi_{2\alpha} \\ M = p \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}), \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – составляющие вектора напряжения статора; $\psi_{1\alpha}$, $\psi_{1\beta}$, $\psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta}$ – составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора соответственно; R_1 , R_2 – активные сопротивления статора и ротора; $L_1 = L_{\sigma 1} - L_m$, $L_2 = L_{\sigma 2} - L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; ω – угловая скорость вала двигателя; p – число пар полюсов; M – электромагнитный момент двигателя.

Данная модель идеализирована и построена с учетом следующих допущений: распределение магнитного поля вдоль окружности воздушного зазора двигателя считается синусоидальным; статор и ротор имеют трехфазные симметричные обмотки; не учитывается неоднородность магнитной проводимости, обусловленная наличием пазов, неравномерностью воздушного зазора, анизотропией электротехнической стали в отношении магнитного потока; не учитывается гистерезис, насыщение и вихревые токи в магнитопроводе. Несмотря на эти допущения, данная модель используется как для синтеза систем управления АД [84], [86], [92], [98], так и для анализа протекающих в нём процессов [49], [81], что доказывает ее актуальность.

В настоящее время наиболее широко распространены преобразователи частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока по схеме неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор. По типу

автономного инвертора выделяют ПЧ с автономным инвертором тока (АИТ) и автономным инвертором напряжения (АИН). В АИТ присутствует значительное колебание напряжения на выходе при постоянном токе источника, форма кривой напряжения на входе и выходе инвертора зависит от характера нагрузки [42]. При работе АИТ возможны существенные потери мощности и возмущающие моменты в электродвигателе, влекущие за собой колебания скорости. В случае необходимости получения токов электродвигателя, близких к синусоидальным, необходимо значительное усложнение схемы АИТ.

Применение АИН позволяет без усложнения схемы получать высокие энергетические показатели и выходные токи, близкие к синусоидальным [42]. Этими преимуществами АИН обусловлено их широкое применение в частотном электроприводе на современном этапе [71], [72]. Таким образом, за основу электрической подсистемы привода подъема крана принимаем АД, питающийся от АИН. Схема АИН приведена на рисунке 2.1. На диодах $VD1...VD6$ реализован неуправляемый мостовой выпрямитель (В). Конденсатор C является фильтром напряжения. АИН выполнен на шести силовых биполярных транзисторах $VT1...VT6$ и шести обратных диодах $VD7...VD12$. Регулирование напряжения на двигателе осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения постоянного тока ключами $VT1...VT6$.

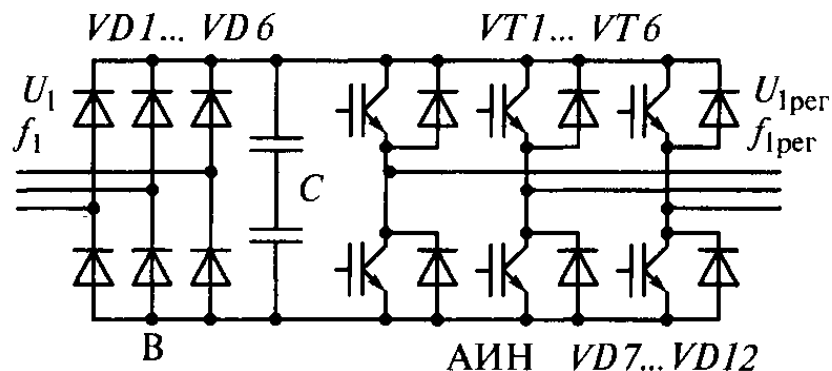


Рисунок 2.1 – Схема преобразователя частоты с АИН

Рассмотрим модель АИН с векторной ШИМ, приведенную в [30]. Математическое описание автономного инвертора напряжения с векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) заключается в определении интервалов времени, в течение которых обмотка двигателя подключена к плюсу или минусу источника питания при помощи силовых ключей К1-К6 (рисунок 2.2).

Рассмотрим способ формирования этих интервалов времени при реализации в АИН векторной ШИМ [36], [37], [55]. Такая ШИМ основывается на переключении между восемью комбинациями состояний ключей, возможными в рабочем режиме АИН. Данные комбинации приведены в таблице 2.1, где «1» соответствует замкнутому состоянию ключа, а «0» – разомкнутому. При этих комбинациях вектор напряжения АД занимает одно из шести возможных положений, как это показано на рисунке 2.3, или одно из двух нулевых положений, когда все фазы двигателя подключены к положительной или отрицательной шине источника питания. Эти положения векторов напряжения называют базовыми. Принцип формирования произвольного заданного вектора напряжения U^* заключается в таком переключении состояния ключей, при котором происходит модуляция вектора напряжения между двумя ближайшими и одним из нулевых базовыми векторами.

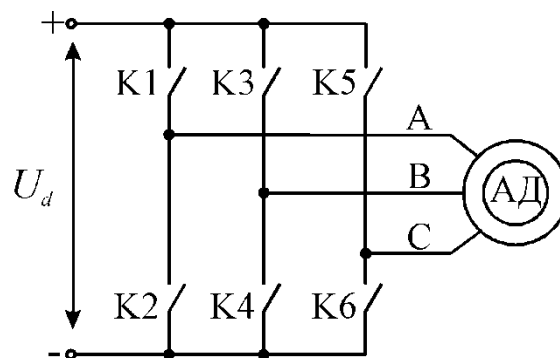


Рисунок 2.2 – АД, питаемый от инвертора напряжения

Таблица 2.1 – Возможные состояния ключей инвертора

Базовый вектор	K1	K2	K3	K4	K5	K6	U_A	U_B	U_C
U_1	1	0	0	1	0	1	$(2/3)U_d$	$-(1/3)U_d$	$-(1/3)U_d$
U_2	1	0	1	0	0	1	$(1/3)U_d$	$(1/3)U_d$	$-(2/3)U_d$
U_3	0	1	1	0	0	1	$-(1/3)U_d$	$(2/3)U_d$	$-(1/3)U_d$
U_4	0	1	1	0	1	0	$-(2/3)U_d$	$(1/3)U_d$	$(1/3)U_d$
U_5	0	1	0	1	1	0	$-(1/3)U_d$	$-(1/3)U_d$	$(2/3)U_d$
U_6	1	0	0	1	1	0	$(1/3)U_d$	$-(2/3)U_d$	$(1/3)U_d$
U_0^+	1	0	1	0	1	0	0	0	0
U_0^-	0	1	0	1	0	1	0	0	0

Для получения произвольного заданного вектора напряжения U^* , показанного на рисунке 2.3, период модуляции T_m разбивается на три временных интервала: T_0 – в течение которого формируется базовый вектор U_0 ; T_1 – в течение которого формируется базовый вектор U_1 ; T_2 – в течение которого формируется базовый вектор U_2 . Время формирования базового вектора U_0 определяется амплитудой заданного вектора в соответствии с зависимостью:

$$T_0 = T_m \frac{\sqrt{u_{\alpha}^{*2} + u_{\beta}^{*2}}}{U_d}. \quad (2.2)$$

Величины T_1 и T_2 вычисляются исходя из углового положения заданного вектора:

$$T_1 = (T_m - T_0) \left(1 - \frac{\varphi}{\pi/3}\right); \quad (2.2)$$

$$T_2 = (T_m - T_0) \frac{\varphi}{\pi/3}. \quad (2.3)$$

В общем случае эти временные интервалы определяются зависимостями:

$$T_n = (T_m - T_0) \left(n - \frac{\varphi}{\pi/3} \right); \quad (2.4)$$

$$T_{n+1} = (T_m - T_0) \left(\frac{\varphi}{\pi/3} - (n - 1) \right), \quad (2.5)$$

где n – номер формируемого базового вектора напряжения в соответствии с рисунком 2.3, φ – угловое положение вектора заданного напряжения по отношению к вектору U_1 , которое рассчитывается по формуле:

$$\begin{cases} \varphi = \arccos \left(\frac{u_\alpha^*}{\sqrt{u_\alpha^{*2} + u_\beta^{*2}}} \right), \text{ при } u_\beta^* \geq 0; \\ \varphi = 2\pi - \arccos \left(\frac{u_\alpha^*}{\sqrt{u_\alpha^{*2} + u_\beta^{*2}}} \right), \text{ при } u_\beta^* < 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

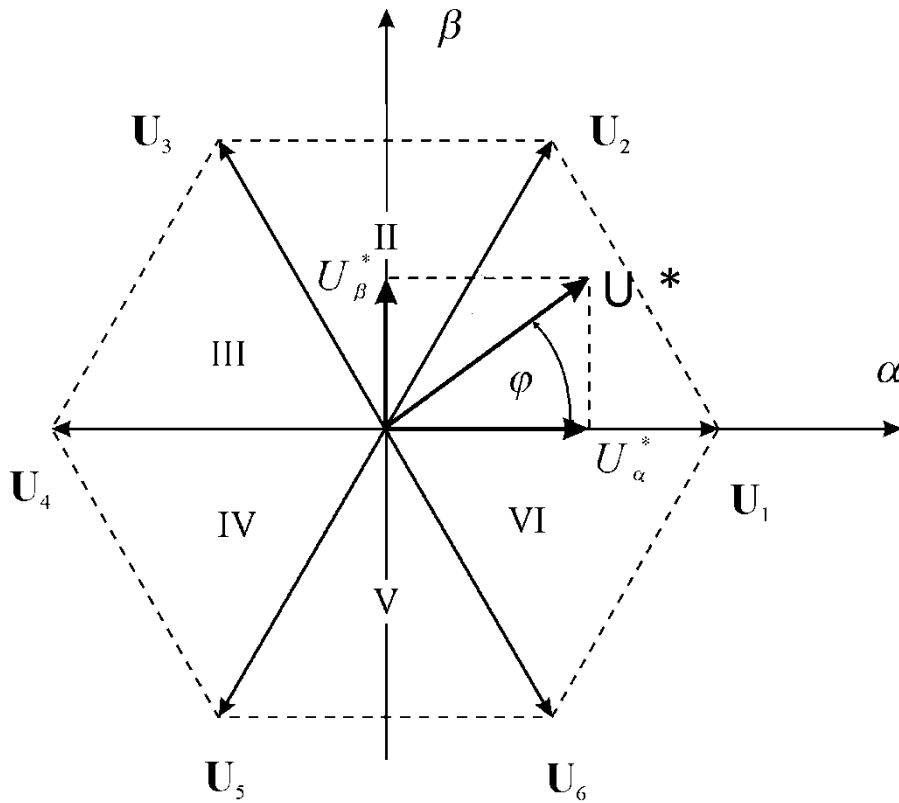


Рисунок 2.3 – Формирование вектора заданного напряжения векторной ШИМ

При моделировании векторной ШИМ, для нахождения вектора заданного напряжения, необходимо в течении времени T_n формировать фазные напряжения, соответствующие базовому вектору n , а в течение времени T_{n+1} – фазные напряжения, соответствующие базовому вектору $n+1$. Величины фазных напряжений, подводимых к двигателю, соответствующие каждому из возможных базовых векторов, приведены в таблице 2.1. В силу того, что при использовании ШИМ возникает асимметрия питающего напряжения, совместно с моделью АИН наиболее удобно использовать представленную в [73] видоизмененную математическую модель АД в неподвижной системе координат α - β , включающую в себя фазные напряжения, подводимые к обмоткам статора. Эта математическая модель имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{1\alpha} = U_a - U_{ka} - U_0 - i_{1\alpha} R_1; \\ \Psi_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_b - U_{kb} - U_c + U_{kc}) - i_{1\beta} R_1; \\ \dot{\Psi}_{2\alpha} = -i_{2\alpha} R_2 - p\omega \Psi_{2\beta}; \\ \dot{\Psi}_{2\beta} = -i_{2\beta} R_2 + p\omega \Psi_{2\alpha}; \\ U_0 = U_a + U_b + U_c - U_{ka} - U_{kb} - U_{kc}; \\ M = p \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}), \end{array} \right. \quad (2.7)$$

где U_a, U_b, U_c – фазные напряжения, подводимые к обмоткам статора; U_{ka}, U_{kb}, U_{kc} – падения напряжения на ключах преобразователя; U_0 – напряжение нулевой последовательности; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}, i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ – составляющие векторов тока статора и ротора соответственно.

2.2 Механическая подсистема электропривода подъема

Механическая подсистема привода подъема предназначена для передачи механической энергии от вала двигателя к грузовому крюку. Механическая подсистема привода подъема крана состоит из: электро-

двигателя; муфты, соединяющей двигатель и редуктор; редуктора; тормозного устройства, находящегося на втором конце быстроходного вала редуктора; муфты, соединяющей тихоходный вал редуктора и барабан для намотки подъемного каната; барабана; полиспаста и грузового крюка. Вал электродвигателя привода подъема соединён через муфту с входным валом редуктора. На этом же валу, с обратной стороны, расположен тормозной шкив. Выходной вал редуктора через муфту соединён с валом барабана, на котором намотан канат. Свисающая вниз часть каната проходит через полиспаст, который в свою очередь, жёстко соединён с грузовым крюком. Кинематическая схема привода подъема крана представлена на рисунке 2.4.

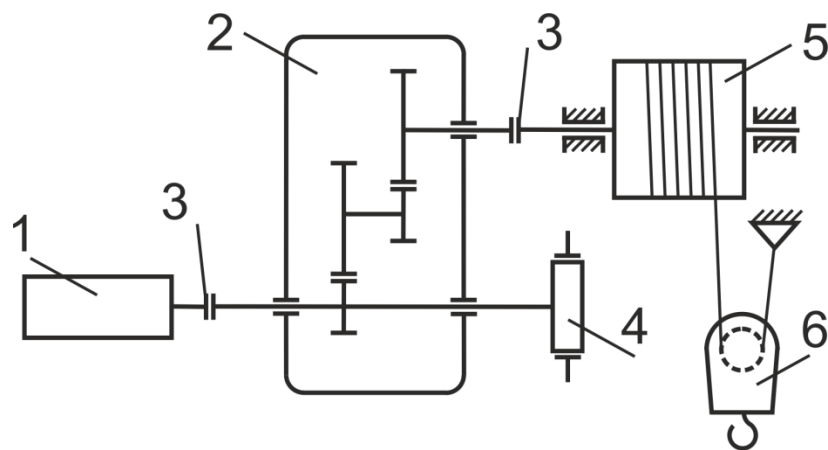


Рисунок 2.4 – Кинематическая схема привода подъема крана

На рисунке 2.4 приняты следующие обозначения: 1 – ротор электродвигателя, 2 – редуктор, 3 – муфта, 4 – механический тормоз, 5 – канатный барабан, 6 – крюковой подвес.

При рассмотрении механической подсистемы привода подъема крана, для построения математической модели, сделаем следующие допущения [13], [48]:

1. Податливость пролетных строений (для мостовых или козловых кранов) или податливость стрелы (для стреловых кранов) не учитывается.
2. Зазоры в механической передаче редуктора и зазоры в соединительных муфтах не учитываются.
3. Жёсткость механических соединений вала электродвигателя с валом редуктора, выходного вала редуктора и вала барабана стремится к бесконечности.
4. Все имеющиеся в механической подсистеме потери, такие как от сил трения в опорах вала двигателя, валов редуктора и вала барабана, в зубчатых передачах редуктора учитываются путем введения в математическое описание модели механической подсистемы величины M_{C1} – статический момент сопротивления первой массы.
5. Потери от сил трения в блоках полиспаста не учитываются.
6. Потери на вязкое трение в канате не учитываются.
7. Масса каната не учитывается, а деформация его линейна с величиной жесткости, зависящей от длины каната.

Также необходимо отметить, что на динамику механической подсистемы электропривода подъема влияют: вид основания, на котором расположен груз; вид строповки груза; вид груза [58]. Наиболее негативная динамика наблюдается при подъеме «с подхватом» монолитного груза с центральной строповкой с бетонного основания.

Для изучения процессов, протекающих в электромеханической системе при работе привода подъема в режиме «с подхватом», т. е. в режиме, когда за счет наличия провисания каната барабан привода разгоняется до определенной скорости, а затем, после устранения провисания, происходит «подхват» груза, необходимо учитывать величину провисания каната в момент начала подъема груза, которую можно рассматривать как зазор в механической передаче. При приведении

всех параметров механической части к валу двигателя, эта величина может быть обозначена как $\Delta\varphi_3$. При подъеме груза, в результате уменьшения длины каната, его жесткость будет увеличиваться. Таким образом, в процессе подъема груза необходимо отслеживать длину подъемного каната для правильной оценки его жесткости в динамике. При приведении всех параметров механической части к валу двигателя, эта величина может быть обозначена как $C_{12}(L_K)$.

Основным фактором негативной динамики переходных процессов в приводе подъема крана является или интенсивное изменение усилия на канатном барабане, или, в режиме работы «с подхватом», – ступенчатое приложение нагрузки в совокупности с упругой податливостью каната [58]. Исследование переходных процессов в электроприводе подъема будем производить, используя двухмассовую расчетную схему механической подсистемы, что правомерно для кранов с малой податливостью пролетов между опорами или малой податливостью стрелы, исходя из рекомендаций в [13], [58]. С учетом вышесказанного, расчетная схема привода подъема крана может быть представлена двухмассовой системой (рисунок 2.5). К первой массе относится вал двигателя, соединительные муфты, тормозной шкив, шестерни и валы редуктора, барабан привода подъема. Второй массой является поднимаемый груз.

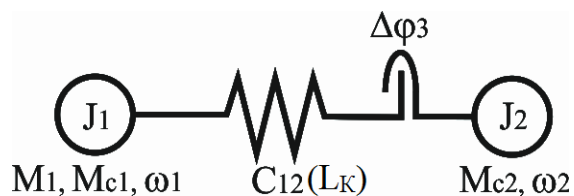


Рисунок 2.5 – Расчетная схема двухмассовой механической подсистемы с зазором

Подъемный канат обладает свойством передачи усилия только при наличии натяжения, т. е. когда координата положения первой мас-

сы φ_1 (угловое положение первой массы) будет больше координаты положения второй массы φ_2 (угловое положение второй массы). В противном случае усилие посредством каната передаваться не может, возникает провисание в канате, которое можно рассматривать как зазор в механической передаче. Другими словами, канат обладает свойством нелинейной передачи усилия, в зависимости от координат положения первой и второй массы. Осуществляя приведение линейного растяжения каната к вращательному движению, получим момент в трансмиссии, приближенно эквивалентный (с учетом принятых ранее допущений) усилию в канате в виде непрерывной кусочно-линейной функции:

$$\begin{cases} M_{12} = 0, & \text{при } \varphi_1 \leq \varphi_2 \\ M_{12} = C_{12}(L_K)(\varphi_1 - \varphi_2), & \text{при } \varphi_1 > \varphi_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

Математическая модель двухмассовой системы с учетом нелинейности передаваемого канатом усилия, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = \frac{1}{J_1}(M - M_{12}); \\ \dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_2}(M_{12} - M_{C2}); \\ \dot{\varphi}_1 = \omega_1; \\ \dot{\varphi}_2 = \omega_2; \\ \dot{M}_{12} = 0, & \text{при } \varphi_1 \leq \varphi_2; \\ \dot{M}_{12} = C_{12}(L_K)(\omega_1 - \omega_2) & \text{при } \varphi_1 > \varphi_2. \end{cases} \quad (2.9)$$

где φ_1, φ_2 – соответственно угловые положения первой и второй массы; ω_1, ω_2 – соответственно угловые скорости первой и второй массы; J_1, J_2 – соответственно моменты инерции первой и второй массы; M, M_{12}, M_{C2} – соответственно электромагнитный момент двигателя, момент эквивалентный упругому усилию в канате и момент сопротивления, действующий на вторую массу; $C_{12}(L_K)$ – приведенная жесткость каната. Для расчетов параметры всех элементов механической системы привода подъема приводятся к валу двигателя [79], [93]. Суммарный момент инерции первой массы:

$$J_1 = J_{\text{д}} + J_{\text{м}} + J_{\text{тш}} + J_{\text{рк1}} + J_{\text{рк2 пр}} + J_{\text{зм пр}} + J_{\text{б пр}}, \quad (2.10)$$

где $J_{\text{д}}$ – момент инерции вала двигателя, $J_{\text{м}}$ – момент инерции соединительных муфт, $J_{\text{тш}}$ – момент инерции тормозного шкива, $J_{\text{рк1}}$ – момент инерции входного колеса редуктора, $J_{\text{рк2 пр}}$ – приведенный момент инерции выходного колеса редуктора, $J_{\text{б пр}}$ – приведенный момент инерции барабана. Приведённый момент инерции массы груза:

$$J_2 = \frac{m_{\text{г}} \times \rho_{\text{б}}^2}{i_{\text{р}}^2} = \frac{m_{\text{г}}}{i_{\text{р}}^2} \times \frac{D_{\text{б}}^2}{4}, \quad (2.11)$$

где $m_{\text{г}}$ – масса груза, $D_{\text{б}}$ – диаметр барабана. Приведенная жесткость каната зависит от длины каната и будет изменяться по мере подъема или опускания груза, в соответствии с выражением:

$$C_{12} = \frac{C_{\text{к}} \times \rho_{\text{б}}^2}{L_{\text{к}} \times i_{\text{р}}^2}, \quad (2.12)$$

где $C_{\text{к}}$ – удельная жёсткость подъемного каната, $L_{\text{к}}$ – длина подъемного каната. Приведённый момент сопротивления:

$$M_{\text{с2}} = \frac{m_{\text{г}} \times g \times \rho_{\text{б}}}{i_{\text{р}}} = \frac{m_{\text{г}} \times g}{i_{\text{р}}} \times \frac{D_{\text{б}}}{2}, \quad (2.13)$$

где g – ускорение свободного падения. Момент сопротивления, действующий на вторую массу, имеет нелинейный характер. Необходимо учитывать, что при нахождении груза на опоре и при наличии провисания каната $M_{\text{с2}} = 0$. В процессе натяжения каната $M_{\text{с2}}$ увеличивается от нуля до величины, определяемой выражением (2.13). В случае, когда груз подвешен на канате, $M_{\text{с2}}$ имеет активный характер, т. е. препятствует поднятию груза вверх и способствует опусканию груза вниз.

2.3 Критерии управления и структура исследуемого электропривода

Электропривод подъема крана работает в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и остановами. Нормируемыми величинами являются установившаяся скорость подъема (опус-

кания) груза и величины ускорения (замедления) [4], [99]. Помимо этого, электропривод подъема должен обеспечивать возможность работы с пониженной скоростью, при устранении провисания каната, и скорость посадки (наименьшую скорость опускания наибольшего поднимаемого груза) в зоне останова, при спуске груза [15]. Таким образом, можно сделать вывод, что в качестве основной регулируемой величины электропривода подъема крана является скорость подъема (опускания) груза. Значение скорости подъема (опускания) груза с допустимыми величинами отклонений для конкретного типа крана определяется соответствующими ГОСТ [16], [17], [18], [21], [23], [24].

Одним из важных аспектов работы электропривода подъема крана является наличие динамических нагрузок, вызванных упругими свойствами подъемного каната, в наибольшей степени проявляющихся в процессе подъема груза «с подхватом». В режиме «с подхватом», вследствие наличия провисания каната при подъеме груза, барабан и ротор электродвигателя, в процессе устранения провисания, достигают определенного значения угловой скорости, а затем происходит ударное приложение нагрузки к подъемному механизму, развитие колебаний механических усилий в канате и всей механической подсистеме. Чем большую кинетическую энергию наберет барабан и ротор (первая масса), и чем большую массу будет иметь поднимаемый груз, тем большая амплитуда колебаний появится в механической подсистеме после устранения провисания каната, и тем более негативное влияние будут оказывать механические колебания на подъемный канат крана. По этой причине происходит интенсивный износ элементов привода подъема, а также накопление усталостных повреждений в подъемном канате, и, следовательно, снижение показателей безотказной работы крана.

Динамические нагрузки могут возникать и в других режимах работы крана: в процессе остановки груза в верхней точке подъема, в

процессе экстренной остановки подъема (опускания) груза. Эти режимы работы также необходимо учитывать при построении системы управления приводом. Величина динамических нагрузок в последнем случае зависит от технических характеристик крана, а также определяется квалификацией оператора, управляющего краном. Система управления электроприводом подъема крана должна обеспечивать формирование задания скорости и направления движения на основе сигналов, поступающих от системы управления электроприводами крана и сигналов с пульта управления оператора. Система управления динамическим состоянием (СУДС) электропривода выделена из системы управления электроприводом подъема с целью уточнения функционала, входящего в объект исследования данной работы. На рисунке 2.6 приведено такое разделение и приняты следующие обозначения: ПО – пульт оператора; СУЭК – система управления электроприводами крана; СУЭП – система управления электроприводом подъема; СУДС – система управления динамическим состоянием; ЭД – электродвигатель; МЧ – механическая часть; ОИ – объект исследования.

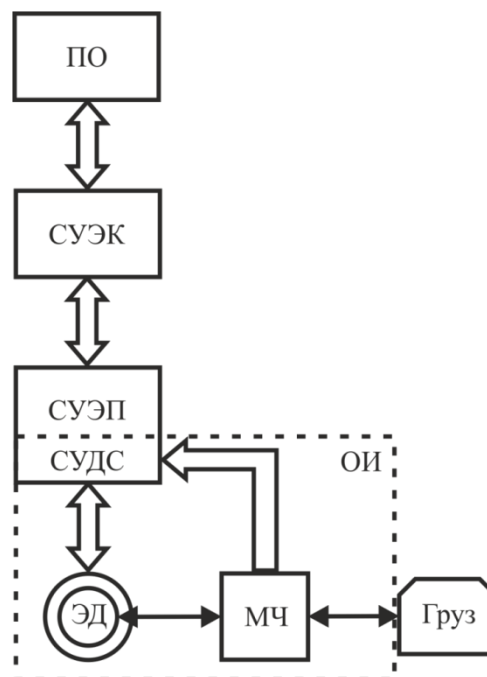


Рисунок 2.6 – Структура системы управления краном

На основании вышеизложенного сформулируем требования к СУДС электропривода подъема крана:

1. Поддержание заданной скорости подъема (спуска) груза в установившемся режиме. Так как точность регулирования скорости не регламентируется, поэтому принимаем её значение на уровне относительной погрешности $\pm 5\%$.
2. Снижение, а как максимум – полное устранение динамических нагрузок на подъемный канат.

Функциональная схема исследуемой части электропривода подъема крана приведена на рисунке 2.7. Предполагается, что СУДС отрабатывает некоторый алгоритм управления, обеспечивающий достижение заданной приведенной скорости движения груза ω_2^* . СУДС формирует вектор напряжения U^* посредством силовых ключей автономного инвертора напряжения АИН, питающего приводной АД.

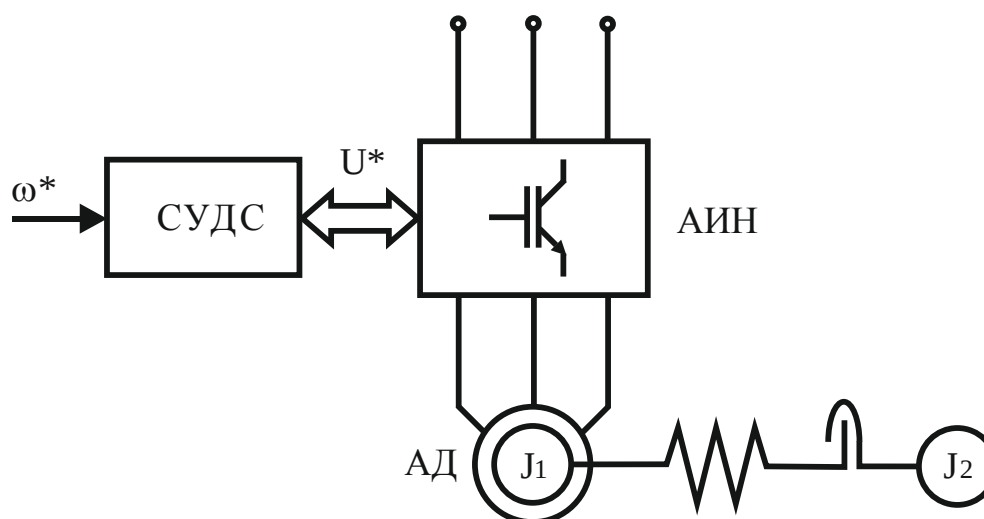


Рисунок 2.7 – Функциональная схема исследуемой части

Для упрощения процедуры синтеза регуляторов воспользуемся приемом, приведенным в [30], представив АД, АИН и регулятор момента, являющийся составной частью СУДС, как безынерционный ис-

точник момента (БИМ), заменив данные элементы системы пропорциональным звеном. Это преобразование схематически представлено на рисунке 2.8. Реализация такой замены приемлема, учитывая, что собственные частоты механической подсистемы электропривода подъема зависят от длины каната, определяется выражением вида:

$$f_0 = \frac{10}{\sqrt{L_k}}, \quad (2.14)$$

и находятся в пределах 0,5 – 5 Гц [64], а БИМ безынерционно отрабатывает заданное значение момента в диапазоне частот до десятков Герц [30]. В результате такого представления, приняв коэффициент пропорциональности БИМ равным единице, структурная схема электропривода подъема примет вид, показанный на рисунке 2.8. Синтез алгоритма работы СУДС является основной задачей данной работы. На рисунке 2.8 приняты следующие обозначения: M^* – заданное значение момента, U^* – заданное значение напряжения для АИН, M – электромагнитный момент на валу двигателя.

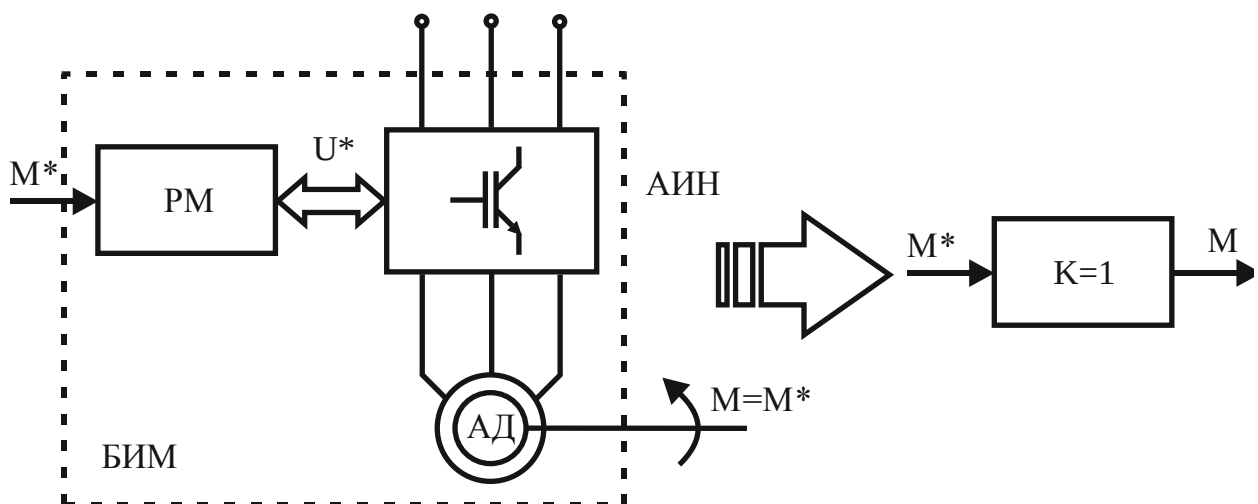


Рисунок 2.8 – Безынерционный источник момента

На рисунке 2.9 представлена структурная схема электропривода подъема. Блок СУДС, получая информацию о переменных привода подъема, реализует определенный алгоритм управления, формируя

управляющее воздействие посредством БИМ, который, в свою очередь, является составной частью СУСД. БИМ объединяет в своем составе АД, АИН и регулятор момента. Управление АИН реализуется по алгоритму векторной ШИМ. Математическая модель АД построена на базе двухфазной обобщенной электрической машины с учетом асимметрии напряжения, возникающей при работе ШИМ. Нелинейный элемент (НЭ) учитывает тот фактор, что канат в механической подсистеме подъема крана способен передавать усилие только при растяжении. Момент сопротивления, действующий на вторую массу, имеет нелинейный характер. Необходимо учитывать, что при нахождении груза на опоре и при наличии провисания каната $M_{C2} = 0$. В процессе натяжения каната M_{C2} увеличивается от нуля до величины, определяемой выражением (2.13). В случае, когда груз подвешен на канате, M_{C2} имеет активный характер, т. е. препятствует поднятию груза вверх и способствует опусканию груза вниз. В качестве расчетной используется двухмассовая схема механической части, при этом величина жесткости связи двух масс зависит от длины подъемного каната $C_{12}(L_K)$.

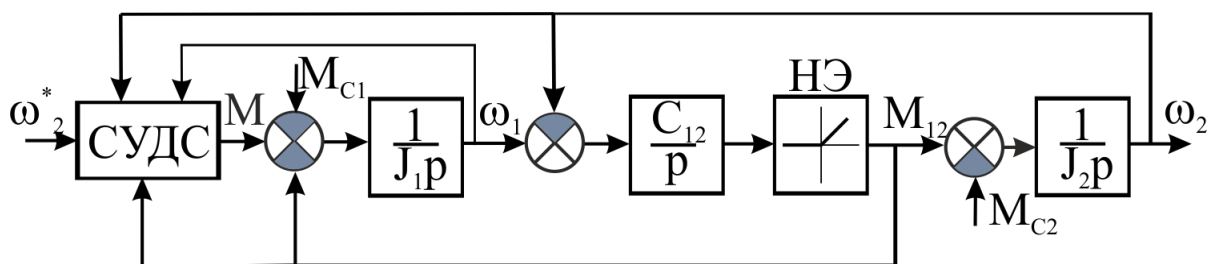


Рисунок 2.9 – Структурная схема электропривода подъема

2.4 Выводы по разделу

Таким образом, в качестве электрической подсистемы электропривода подъема принята система АД-АИН. В качестве механической подсистемы принята двухмассовая система с зазором в механической передаче, непрерывной кусочно-линейной зависимостью момента в

трансмиссии и отсутствием вязкого трения в трансмиссии. Сформулированы требования к системе управления динамическим состоянием (СУСД), заключающиеся в том, что:

1. Система должна обеспечивать поддержание заданной скорости подъема (спуска) груза с точностью $\pm 5\%$ относительной погрешности.
2. Система должна обеспечивать снижение динамических нагрузок на подъемный канат путем снижения величины амплитуд и минимизацию количества колебательных усилий.

Составной частью СУДС будет являться БИМ, объединяющий в своем составе АД, АИН и регулятор момента.

3 Разработка алгоритмов управления приводом подъема крана

3.1 Концепция управления и модификация модели механической подсистемы электропривода подъема крана

Задача разработки алгоритмов управления электроприводом подъема крана, обеспечивающих снижение динамических нагрузок на подъемный канат в режиме «с подхватом», требует построения системы управления, обеспечивающей устранение провисания каната на скорости не более максимально допустимой до минимально различного системой управления усилия в канате, а затем достижение заданной скорости подъема при одновременном снижении величины амплитуд и минимизации количества колебательных усилий в подъемном канате. Как было отмечено в первой главе, системы управления, использующие алгоритмы работы, полученные методом АКАР, естественным образом учитывают нелинейности объекта управления и обладают высокими показателями качества переходных процессов. По этой причине была сформулирована одна из задач научного исследования, заключающаяся в разработке алгоритмов управления электроприводом подъема крана с применением метода АКАР, автоматически снижающих динамические нагрузки в режиме работы «с подхватом».

В методе АКАР используется понятие аттрактор. Нелинейные диссипативные динамические системы обладают свойством притяжения траекторий движения, проходящих через определенную область фазового пространства, к некоторому многообразию, называемого в синергетической теории управления аттрактором. Аттрактор имеет следующие основные свойства: инвариантен относительно действия фазового потока; имеет нулевой объем в n -мерном фазовом пространстве динамической системы; находится в некоторой области ненулевого объема, которая является областью притяжения данного аттрактора,

т.е. в фазовом пространстве системы существует некоторое множество таких точек, что выходящие из них траектории при $t \rightarrow \infty$ всегда устремляются к аттрактору.

Основным недостатком, сдерживающим широкое распространение систем управления, построенных по методу АКАР, является необходимость наличия информации об абсолютно всех значимых параметрах объекта управления, которые, в свою очередь, могут изменяться в процессе его работы. Исходя из вышесказанного, в данной научной работе концепция управления заключается в построении алгоритмов управления приводом подъема на основе метода АКАР. Для применения метода АКАР, при разработке алгоритмов управления, необходимо заменить непрерывную кусочно-линейную аппроксимацию усилия в канате от взаимного положения двух масс (т. к. канат является упругой связью одностороннего действия) на непрерывную нелинейную. В результате анализа различных функциональных зависимостей [50], предлагается аппроксимировать усилие в канате следующей непрерывной нелинейной математической зависимостью:

$$F_K = \frac{C_K(L_K)}{a} \ln(e^{a(x_1 - x_2)} + 1) = \frac{C_K(L_K)}{a} \ln(e^{a \cdot \Delta(x)} + 1), \quad (3.1)$$

где F_K – усилие в канате, a – настроечный параметр, x_1 , x_2 – линейное положение первой и второй массы соответственно, $\Delta(x)$ – разность между линейным положением первой и второй массы, $C_K(L_K)$ – жесткость каната. Эта функциональная зависимость, как будет показано ниже, способна с определенной величиной погрешности, зависящей от настроечного параметра, заменить кусочно-линейную аппроксимацию непрерывной нелинейной. Осуществляя приведение линейного растяжения каната к вращательному движению, получим выражение, аппроксимирующее момент в трансмиссии, приближенно эквивалентный (с учетом принятых ранее допущений) усилию в канате в виде непрерывной нелинейной функции:

$$M_{12} = \frac{C_{12}(L_K)}{a} \ln(e^{a(\varphi_1 - \varphi_2)} + 1) = \frac{C_{12}(L_K)}{a} \ln(e^{a\Delta(\varphi)} + 1), \quad (3.2)$$

где M_{12} – момент в трансмиссии, φ_1, φ_2 – угловое положение первой и второй массы соответственно, $\Delta(\varphi)$ – разность между угловым положением первой и второй массы, $C_{12}(L_K)$ – приведенная жесткость каната. На рисунке 3.1 представлены графики зависимостей $M_{12} = f(\Delta(\varphi))$ согласно выражению (3.2) при различных значениях параметра a .

Анализируя зависимости на рисунке 3.1, можно констатировать, что нелинейная зависимость (3.2) описывает выражение для определения момента в трансмиссии (приблизительно эквивалентный усилию в канате) с погрешностью. Максимальная погрешность аппроксимации по сравнению с непрерывной кусочно-линейной аппроксимацией присутствует в точке $\Delta(\varphi) = 0$ рад, которая соответствует ненатянutoму канату. Величина погрешности уменьшается по мере натяжения каната и зависит от настроечного параметра (a) и приведенной жесткости каната $C_{12}(L_K)$. Величины максимальных погрешностей аппроксимации при различных параметрах a и приведенной жесткости каната C_{12} приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Величина максимальной погрешности аппроксимации в зависимости от параметра a и приведенной жесткости каната C_{12}

Приведенная жесткость каната $C_{12}, \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}}$	Величина максимальной погрешности аппроксимации, Н*м		
	при $a=5$	при $a=10$	при $a=50$
11	1,52	0,76	0,15
22	3,05	1,52	0,30
44	6,10	3,05	0,61

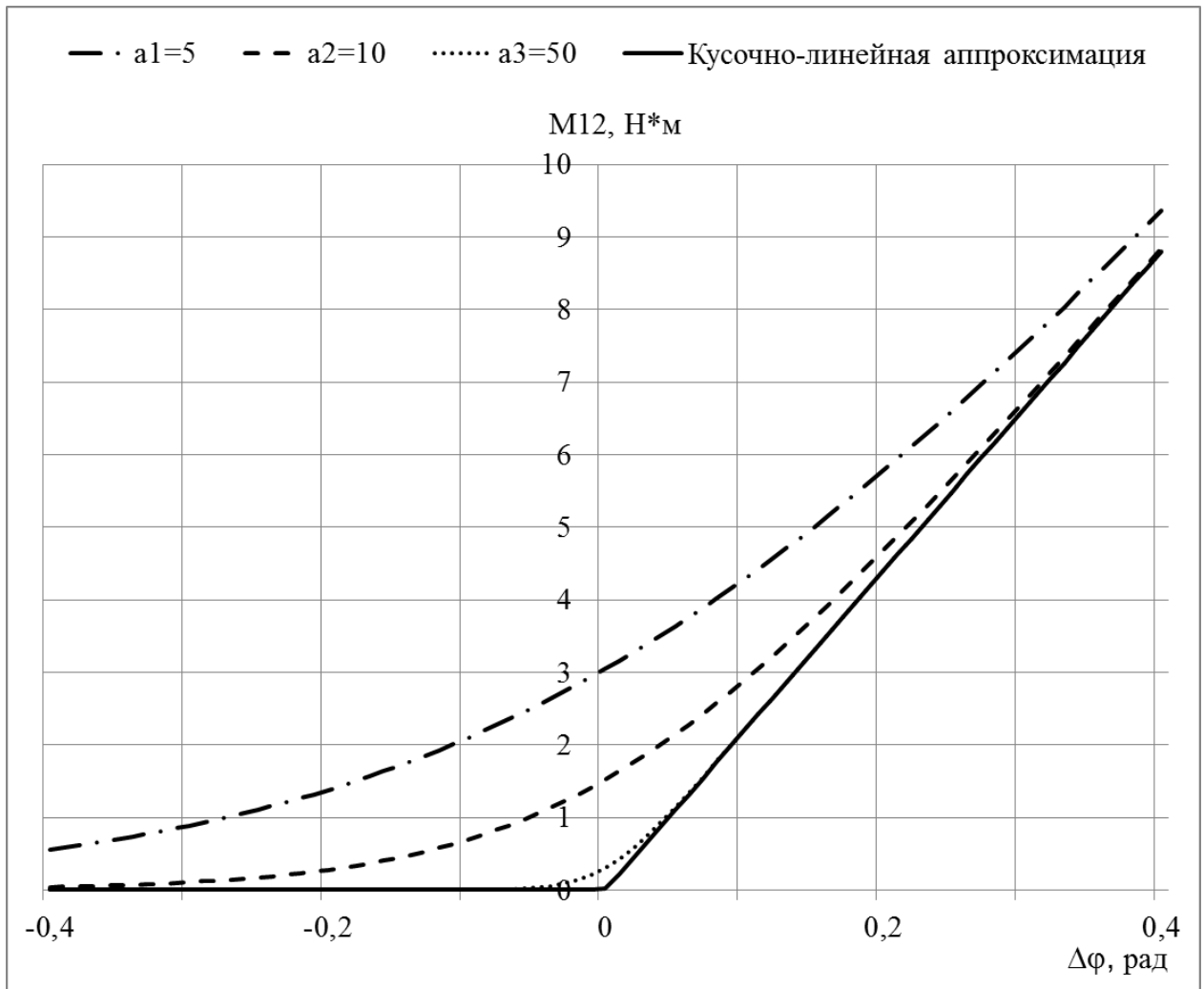


Рисунок 3.1 – Графики зависимости $M_{12} = f(\Delta(\varphi))$ при $C_{12} = 22 \frac{\text{Н*м}}{\text{рад}}$, и параметре $a1=5, a2=10, a3=50$

Таким образом, для механизма подъема с известной приведенной жесткостью каната $C_{12}(L_K)$, исходя из приемлемой максимальной погрешности аппроксимации процесса, протекающего в механизме подъема, можно подобрать необходимую величину параметра a . На основании вышесказанного, математическая модель двухмассовой системы, с учетом нелинейности передаваемого канатом усилия, примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_1 = \frac{1}{J_1} (M - M_{C1} - M_{12}); \\ \dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_2} (M_{12} - M_{C2}); \\ \dot{M}_{12} = C_{12}(L_K) \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{(1 + e^{-a(\varphi_1 - \varphi_2)})} = C_{12}(L_K) \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\tau(\varphi)}; \\ \dot{\varphi}_1 = \omega_1; \\ \dot{\varphi}_2 = \omega_2, \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где $\tau(\varphi) = (1 + e^{-a(\varphi_1 - \varphi_2)}) = (1 + e^{-a\Delta(\varphi)})$ – функция, учитывающая нелинейный характер передачи усилия канатом. Математическая модель механической подсистемы привода подъема крана, ввиду присутствия таких параметров как $C_{12}(L_K), \omega_2, \Delta(\varphi), J_2, M_{C2}$ определяет необходимость наличия в системе управления наблюдателя по параметрам $C_{12}(L_K), \omega_2, \Delta(\varphi)$, а также необходимость в динамической идентификации параметров J_2, M_{C2} . По этой причине в первоначальный момент времени в системе управления отсутствует информация о параметрах $\Delta(\varphi), J_2, M_{C2}$. К сожалению, на современном этапе развития техники и технологии информация об этих параметрах в первоначальный момент времени в режиме «с подхватом» не может быть получена при использовании каких-либо достаточно простых и достоверных методов измерения. В диссертации не рассматривается вопрос динамической идентификации J_2, M_{C2} , а предполагается, что их величина известна заранее. В данной научной работе основное внимание уделяется вопросу синтеза и анализу работы алгоритмов управления приводом подъема, полученных методом АКАР, в режиме работы «с подхватом».

Для исключения фактора неопределенности параметра $\Delta(\varphi)$ в начальный момент подъема груза, предлагается при формировании управляющего воздействия фиксировать в первоначальный момент времени величину $\Delta(\varphi)$ на определенной отрицательной величине (так как присутствует провисание каната и поэтому $\varphi_1 < \varphi_2$). По мере устранения провисания каната, система управления должна отслежи-

вать величину упругого момента, и, при превышении минимального порога чувствительности измерительной системы, фиксировать величину параметра $\Delta(\varphi)$ на уровне, соответствующем величине упругого момента. После чего величина $\Delta(\varphi)$ будет отслеживаться наблюдателем системы управления. Таким образом, концепция управления приводом подъема крана базируется на разработке алгоритмов управления с использованием метода АКАР и динамической идентификацией значимых параметров объекта управления. Для синтеза алгоритма управления по методу АКАР необходимо использовать предложенную непрерывную нелинейную модель механической подсистемы привода подъема.

3.2 Определение максимально допустимой скорости устранения провисания каната

Для увеличения производительности привода подъема, устранение провисания каната $\Delta(\varphi)$ должно осуществляться на максимальной скорости. Однако в случае стопорения крюкового подвеса (при невозможности подъема груза над поверхностью опоры) по окончании устранения провисания, величина броска усилия в канате также будет прямо пропорциональна скорости устранения провисания. Поэтому скорость устранения провисания каната ограничивается снизу минимальной приемлемой производительностью привода подъема, а сверху – величиной максимально-допустимого усилия в канате в случае стопорения крюкового подвеса.

Определение фиксированной максимальной скорости устранения провисания каната будем производить исходя из следующих соображений: при больших скоростях устранения провисания каната, в момент, когда провисание будет устранено, могут возникнуть существенные рывки усилия в канате. Такие рывки способствуют интен-

сивному накоплению усталостных повреждений, что приводит к уменьшению срока эксплуатации каната. С другой стороны, малая скорость устранения провисания каната снижает производительность крана. Исходя из вышесказанного, целесообразно определить зависимость для вычисления максимальной скорости устранения провисания каната.

Определим максимальную скорость устранения провисания каната при наиболее неблагоприятных условиях работы привода подъема, когда произошло стопорение крюкового подвеса. Фактором, влияющим на увеличение скорости устранения провисания каната, может являться величина тормозного момента, развиваемая приводом в конце этапа устранения провисания. Использование тормозного момента позволит погасить часть кинетической энергии первой массы, которая перейдет в потенциальную энергию натяжения каната по окончании устранения провисания, согласно закону сохранения энергии. Чем большую величину тормозного момента разовьет привод, тем на меньшую величину натянется канат. Таким образом, при увеличении скорости устранения провисания, нужно одновременно увеличивать и величину тормозного момента привода. Исходя из вышесказанного, при определении скорости устранения провисания, кроме прочих параметров, целесообразно учитывать величину тормозного момента привода.

Для начала отметим, что в случае необходимости ограничения усилия в канате при стопорении крюкового подвеса, приложение максимального тормозного электромагнитного момента M_{Tmax} приведет к повороту вала электродвигателя на величину угла:

$$\Delta\varphi_1^{огр} = \frac{M_{12max}^{доп} - M_{12min}^{огр}}{C_{12}}, \quad (3.4)$$

где $M_{12max}^{доп}, M_{12min}^{огр}$ – соответственно максимальный момент в трансмиссии, приближенно эквивалентный максимальному натяжению в канате и минимальный момент в трансмиссии, определяющий начало режима

ограничения усилия. При достижении максимального натяжения вал двигателя повернется на угол $\Delta\varphi_{12max}$:

$$\Delta\varphi_{12max} = \frac{M_{12max}^{доп}}{C_{12}}. \quad (3.5)$$

Исходя из закона сохранения энергии, пренебрегая диссипативными силами внутри механической передачи, определим, что кинетическая энергия, накопленная в элементах, жестко связанных с валом двигателя, присутствующая в них на момент устранения провисания каната, частично пойдет на создание потенциальной энергии натяжения каната и частично на работу, совершаемую тормозным моментом двигателя:

$$\frac{J_1\omega_{1max}^2}{2} = \frac{C_{12}\Delta\varphi_{12max}^2}{2} + \frac{M_{Tmax}\Delta\varphi_1^{огр}}{2}. \quad (3.6)$$

На основании выражения (3.6) можно определить максимальную угловую скорость устранения провисания каната, обеспечивающую ограничение упругого момента на уровне $M_{12max}^{доп}$:

$$\begin{aligned} \omega_{1max} &= \sqrt{\frac{C_{12}\Delta\varphi_{12max}^2 + M_{Tmax}\Delta\varphi_1^{огр}}{J_1}} = \\ &= \sqrt{\frac{M_{12max}^{доп}\Delta\varphi_{12max} + M_{Tmax}\Delta\varphi_1^{огр}}{J_1}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Таким образом, задаваясь значениями величин $M_{12max}^{доп}$, $M_{12min}^{огр}$, M_{Tmax} , можно определить величину максимальной угловой скорости устранения провисания каната для конкретного привода подъема крана. Для примера определим максимальную угловую скорость устранения провисания каната для крана грузоподъемностью 3,2 тонны и высотой подъема до 16 м. Привод подъема крана снабжается асинхронным крановым электродвигателем МТВ 312-6 с параметрами: номинальная мощность $P_H=16$ кВт; номинальная частота вращения вала $n_H=960$ об/мин. Момент инерции первой массы составляет $J_1 = 0,4$ кг * м². Развиваемый электроприводом тормозной момент принимаем равным

$M_{Tmax} = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Нормируемое правилами безопасности максимальное значение силы натяжения в канате в 4 или 6 (в зависимости от типа крана) раз меньше временного сопротивления разрыву каната. Исходя из этого и с учетом того, что кран снабжается подъемным канатом двойной свивки типа ЛК-Р с временным сопротивлением разрыву $\sigma_B = 1670 \text{ МПа}$ [22], примем максимальное допустимое натяжение каната $F_{12max}^{доп} = 42 \text{ кН}$. После приведения усилия в канате к валу двигателя получаем величину $M_{12max}^{доп} = 273 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Приведенная жесткость каната при длине 16 м, с учетом кратности полиспаста равной двум, составляет $C_{12} = 22 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$. Величина максимального угла поворота вала двигателя составит $\Delta\varphi_{12max} = 12,4 \text{ рад}$. Минимальный момент в трансмиссии, определяющий начало режима ограничения, примем на уровне $M_{12min}^{огр} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Используя зависимость (3.7), получаем максимальную угловую скорость устранения провисания каната на уровне $\omega_{1max} = 120,2 \text{ рад/с}$.

3.3 Управление скоростью подъема груза на основе ПИ-регулятора с подчиненным регулятором упругого момента

На основании моделей электрической и механической подсистем электропривода подъема были получены переходные процессы в режиме работы «с подхватом». На рисунке 3.2 приведен переходный процесс электропривода подъема при прямом управлении моментом и регулировании ω_1 . При моделировании были использованы параметры асинхронного кранового электродвигателя МТВ 312-6 ($P_H = 16 \text{ кВт}$; $n_H = 960 \text{ об/мин}$). В модели механической подсистемы использовались параметры привода подъема мостового крана двухбалочного опорного, грузоподъемностью 3,2 тонны и высотой подъема до 16 м, с массой поднимаемого груза 3 тонны. Заданная скорость привода принималась

$\omega_1^* = 100$ рад/с. При моделировании устанавливалось ограничение электромагнитного момента двигателя на уровне ± 100 Н·м.

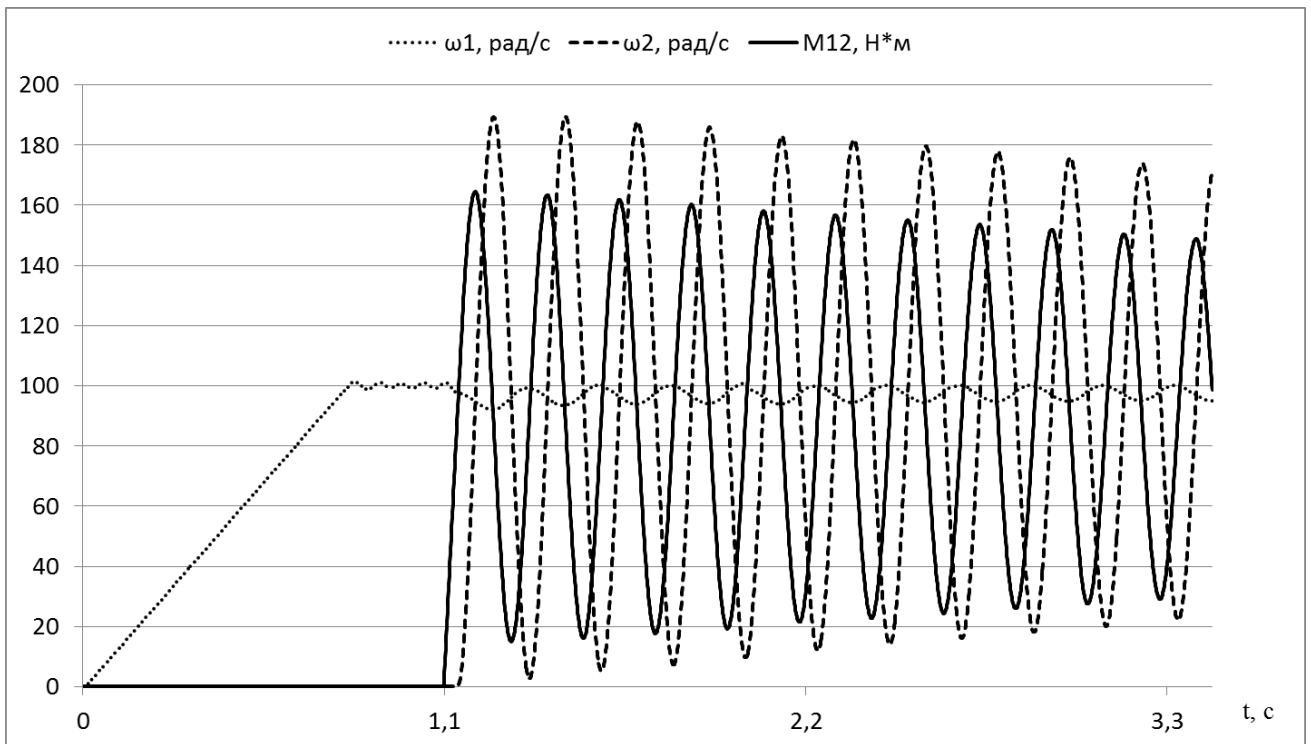


Рисунок 3.2 – Переходный процесс привода подъема при прямом управлении моментом и регулировании ω_1

На рисунке 3.3 приведен переходный процесс электропривода подъема при прямом управлении моментом и использовании ПИ регулятора скорости груза ω_2 . Анализируя полученные графики (рисунки 3.2 и 3.3), можно отметить, что переходные процессы имеют явно выраженный колебательный характер.

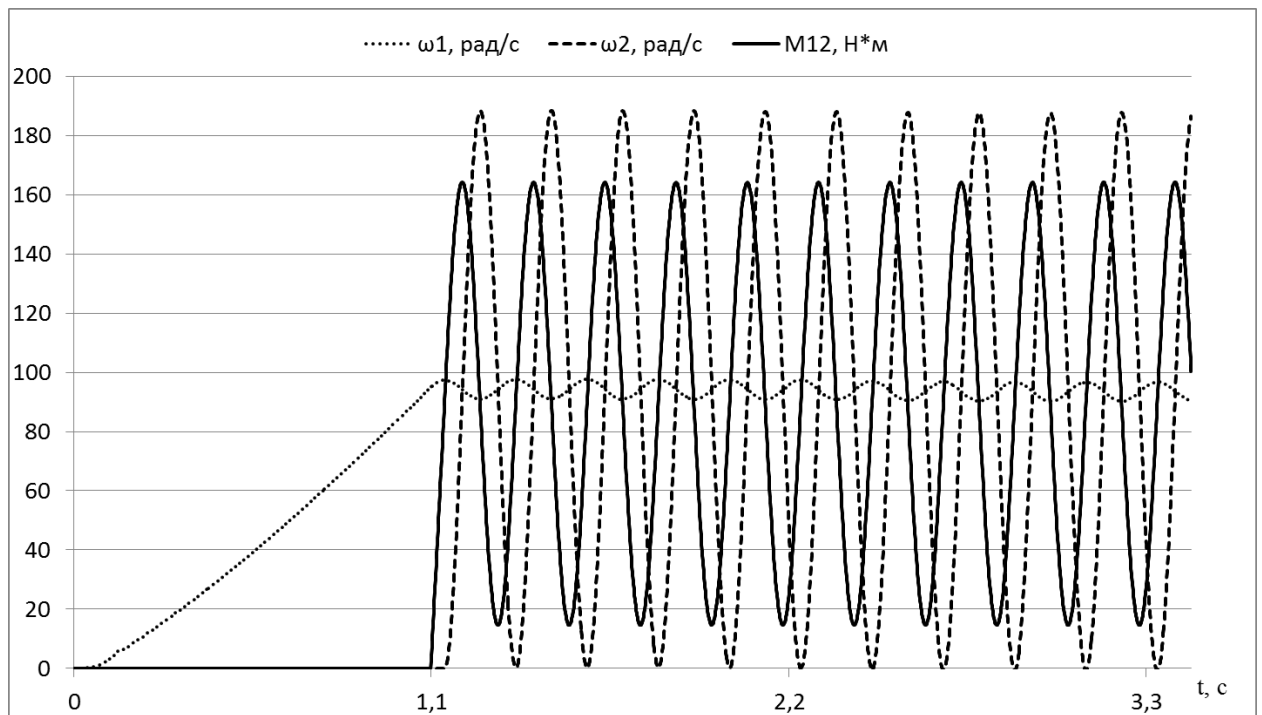


Рисунок 3.3 – Переходный процесс привода подъема с прямым управлением моментом и ПИ-регулятором скорости груза

Для снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом» необходимо уменьшить, а как максимум устранить колебания момента в трансмиссии M_{12} средствами СУДС, а именно, путем формирования величины и характера (двигательный или тормозной) электромагнитного момента по некоторому алгоритму управления, одновременно обеспечивая заданную скорость подъема (или опускания) груза. Для снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом», возможно синтезировать управление приводом подъема на основе ПИ-регулятора скорости с подчиненным регулятором упругого момента (РУМ). Структура системы управления такого электропривода построена в соответствии с подходом, изложенным в [30], в котором электрическая подсистема электропривода на базе АД с АИН рассматривается как безынерционный источник момента (БИМ), а для управления динамическим состоянием механической подсистемы в систему управления введен РУМ, полученный с помощью метода АКАР. Для уменьшения

величины и количества упругих колебаний в подъемном канате, приближенно эквивалентных колебаниям момента в трансмиссии привода подъема, целесообразно разработать алгоритм функционирования РУМ. Предложенный РУМ в работе [30] не учитывает свойство подъемного каната – упругой связи одностороннего действия. Введение в систему управления РУМ позволяет непосредственно воздействовать на величину упругого момента M_{12} . Предлагается построить привод подъема крана в соответствие со структурной схемой, представленной на рисунке 3.4.

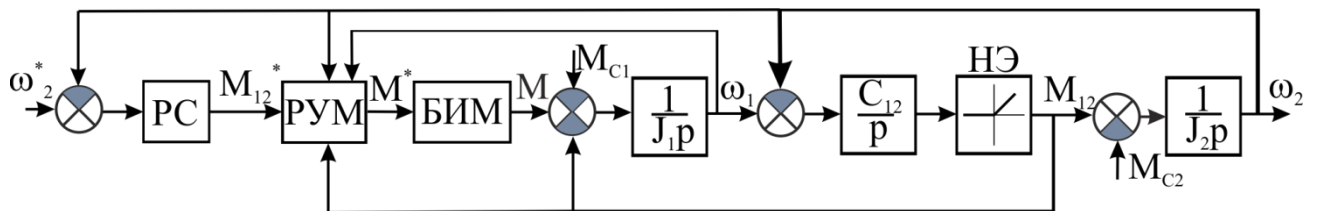


Рисунок 3.4 – Структурная схема с ПИ-регулятором скорости и РУМ

На рисунке 3.4 приняты следующие обозначения: РС – регулятор скорости, РУМ – регулятор упругого момента, БИМ – безынерционный источник момента.

Рассмотрим синтез ПИ-регулятора скорости с подчиненным РУМ применительно к структуре системы управления, приведенной на рисунке 3.4. В ней электрическая подсистема привода построена как БИМ, что позволяет осуществлять синтез регулятора механической координаты, основываясь только на математической модели механической подсистемы. Получим с помощью метода АКАР алгоритм РУМ. В качестве первой целевой функции (инвариантного многообразия) для синтезируемого РУМ выбираем условие равенства упругого усилия в канате его заданному значению, эквивалентом которого является M_{12} :

$$\psi_1 = M_{12} - M_{12}^* = 0; \quad (3.8)$$

где M_{12}^* – заданное значение упругого момента. Функциональное уравнение, определяющее характер движения на аттракторе:

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0, \quad (3.9)$$

где T_1 – постоянная времени, в течение которой система будет двигаться на аттракторе. Из (3.9) находим производную $\dot{\psi}_1$ и подставляем в функциональное уравнение:

$$T_1 \dot{M}_{12} + (M_{12} - M_{12}^*) = 0. \quad (3.10)$$

Подставив выражение $\dot{M}_{12}$ из (2.15), получим уравнение:

$$T_1 \frac{C_{12}(\omega_1 - \omega_2)}{\tau(\varphi)} + M_{12} - M_{12}^* = 0. \quad (3.11)$$

Вторую целевую функцию (инвариантное многообразие) выбираем, исходя из необходимости функциональной связи первой и второй массы:

$$\psi_2 = (\omega_1 - \omega_2) - v_{\omega_1 - \omega_2} = 0, \quad (3.12)$$

где $v_{\omega_1 - \omega_2}$ – внутренняя переменная синтезируемой системы управления, обеспечивающая желаемый характер движения на аттракторе и условие достижения конечной цели управления:

$$v_{\omega_1 - \omega_2} = - \frac{\tau(\varphi)(M_{12} - M_{12}^*)}{T_1 C_{12}}. \quad (3.13)$$

Второе функциональное уравнение выбираем того же вида, что и первое:

$$T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \quad (3.14)$$

где T_2 – постоянная времени, в течение которой система будет двигаться на аттракторе. Из (3.14) находим соответствующую производную $\dot{\psi}_2$ и подставляем в функциональное уравнение. Второе функциональное уравнение, с учетом (3.13), примет вид:

$$\begin{aligned}
& T_2 \left\{ \frac{M - M_{12} + M_{C1}}{J_1} - \frac{(M_{12} - M_{C2})}{J_2} + \right. \\
& \left. + \frac{1}{T_1 C_{12}} \left(-a e^{-a\Delta(\varphi)} (\omega_1 - \omega_2) (M_{12} - M_{12}^*) + C_{12} (\omega_1 - \omega_2) \right) \right\} + (\omega_1 - \omega_2) + \\
& + \frac{\tau(\varphi) (M_{12} - M_{12}^*)}{T_1 C_{12}} = 0.
\end{aligned} \quad (3.15)$$

На основании выражения (3.15) можно определить искомое управляющее воздействие:

$$\begin{aligned}
M^* = & M_{12} + M_{C1} + \frac{J_1}{J_2} (M_{12} - M_{C2}) - \\
& - J_1 (\omega_1 - \omega_2) \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} - a e^{-a\Delta(\varphi)} \frac{(M_{12} - M_{12}^*)}{T_1 C_{12}} \right) - \\
& - \frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}} \tau(\varphi) (M_{12} - M_{12}^*)
\end{aligned} \quad (3.16)$$

где M_{12}^* – задание для РУМ; M^* – требуемое значение электромагнитного момента электродвигателя; T_1 , T_2 – постоянные времени регулятора.

Проанализируем работу регулятора на этапе устранения провисания каната, при этом параметры M_{12} , M_{C2} , ω_2 равны нулю. Выражение управляющего воздействия (3.16), с учетом равенства нулю вышеуказанных параметров, примет вид:

$$\begin{aligned}
M^* = & \\
= & M_{C1} + \frac{M_{12}^* J_1}{T_1 T_2 C_{12}} (1 + e^{-a\Delta(\varphi)}) - \\
& - \left(a e^{-a\Delta(\varphi)} \frac{M_{12}^*}{T_1 C_{12}} + \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) J_1 \omega_1.
\end{aligned} \quad (3.17)$$

В первоначальный момент времени переменная ω_1 будет равна нулю, а управляющее воздействие примет значение, определяемое выражением:

$$M^* = M_{C1} + \frac{M_{12}^* J_1}{T_1 T_2 C_{12}} (1 + e^{-a\Delta(\varphi)}). \quad (3.18)$$

В установившемся режиме устранения провисания каната скорость первой массы будет стремиться к величине:

$$\omega_1 \rightarrow \frac{\frac{M_{C1}}{J_1} + \frac{M_{12}^*}{T_1 T_2 C_{12}} (1 + e^{-a\Delta(\varphi)})}{ae^{-a\Delta(\varphi)} \frac{M_{12}^*}{T_1 C_{12}} + \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}}. \quad (3.19)$$

Проанализируем выражение (3.19) при наличии провисания каната (при $\Delta(\varphi) < 0$). Величина установившейся скорости первой массы зависит от параметров C_{12} , M_{C1} , J_1 , a , T_2 . Таким образом, подбирая постоянную времени регулятора T_2 , можно изменять скорость устранения провисания каната. На рисунке 3.5 представлены зависимости $\omega_1 = f(T_2)$ при $C_{12} = 22 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}}$; $M_{C1} = 0$; $a = 5$.

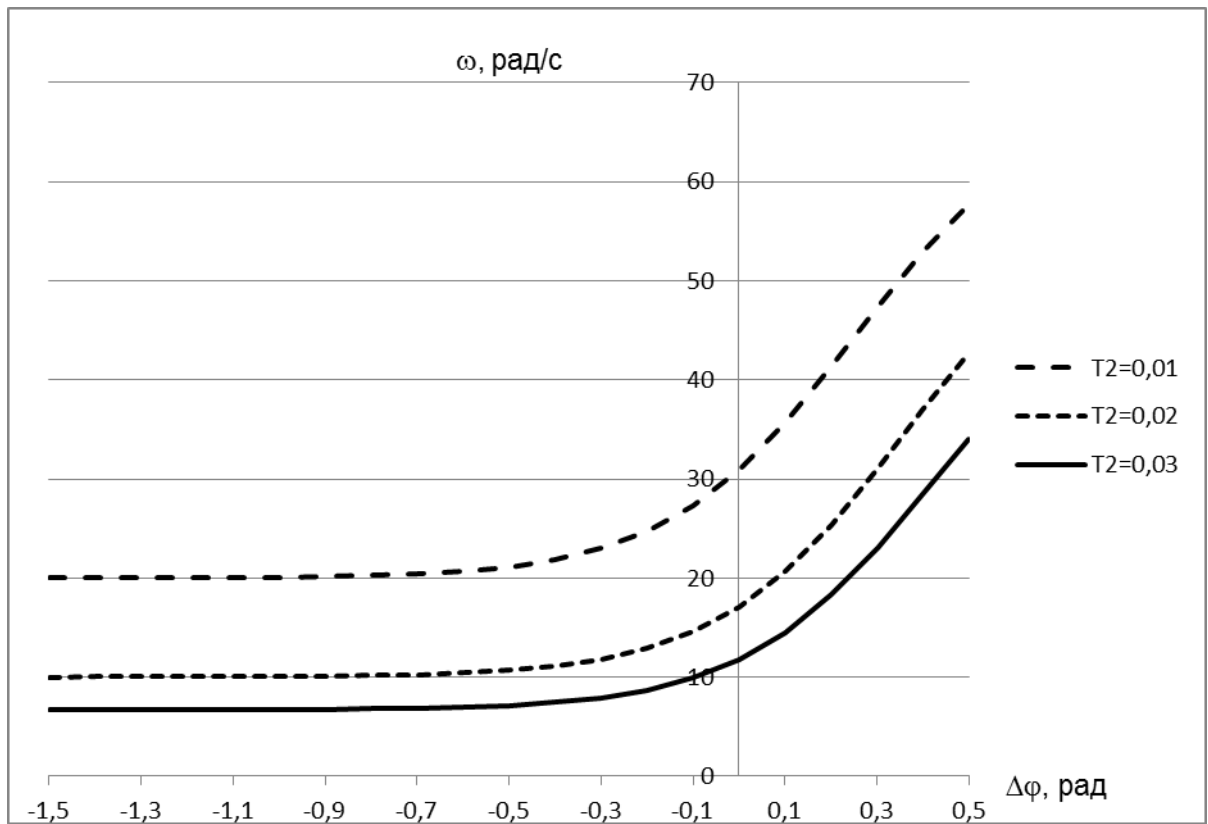


Рисунок 3.5 – Зависимость скорости устранения провисания каната от постоянной времени T_2

Для дальнейшего рассмотрения целесообразно структурную схему системы управления с ПИ-регулятором привести к виду, показанному на рисунке 3.6. На ней РУМ совместно с БИМ, а также первой массой двухмассовой механической подсистемы, представлен в виде апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_\mu = T_1 + T_2$. Это допустимо, так как РУМ, синтезированный по методу АКАР, гарантирует апериодический переходный процесс по отношению к регулируемой величине M_{12} .

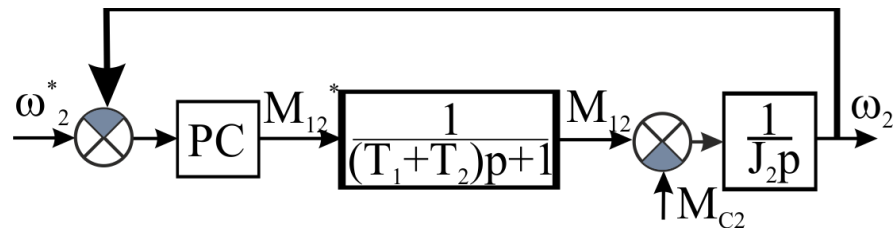


Рисунок 3.6 – Упрощенная структурная схема привода подъема

Для уменьшения времени переходного процесса выберем настройку регулятора скорости (PC) на симметричный оптимум структуры с подчиненным регулированием координат [7], [43]. В качестве некомпенсируемой инерционности примем сумму постоянных времени РУМ ($T_1 + T_2$) и в результате получим ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{PC}^{CO} = \frac{J_2}{2(T_1 + T_2)} \left(1 + \frac{1}{4(T_1 + T_2)p} \right). \quad (3.20)$$

Моделирование работы полученного алгоритма управления скоростью груза (второй массы) с подчиненным РУМ производилось для мостового крана двухбалочного опорного, грузоподъемностью 3,2 тонны и высотой подъема до 16 м, с массой поднимаемого груза 3 тонны. При моделировании были использованы параметры асинхронного кранового электродвигателя МТВ 312-6 ($P_H=16$ кВт: $n_H=960$ об/мин).

Заданная скорость груза принималась $\omega_2^* = 100$ рад/с; параметр $a = 5$; постоянные времени $T_1 = 0,065$ с; $T_2 = 0,007$ с. При моделировании устанавливалось ограничение электромагнитного момента двигателя на уровне ± 200 Н·м. На рисунках 3.7 и 3.8 приведены результаты моделирования.

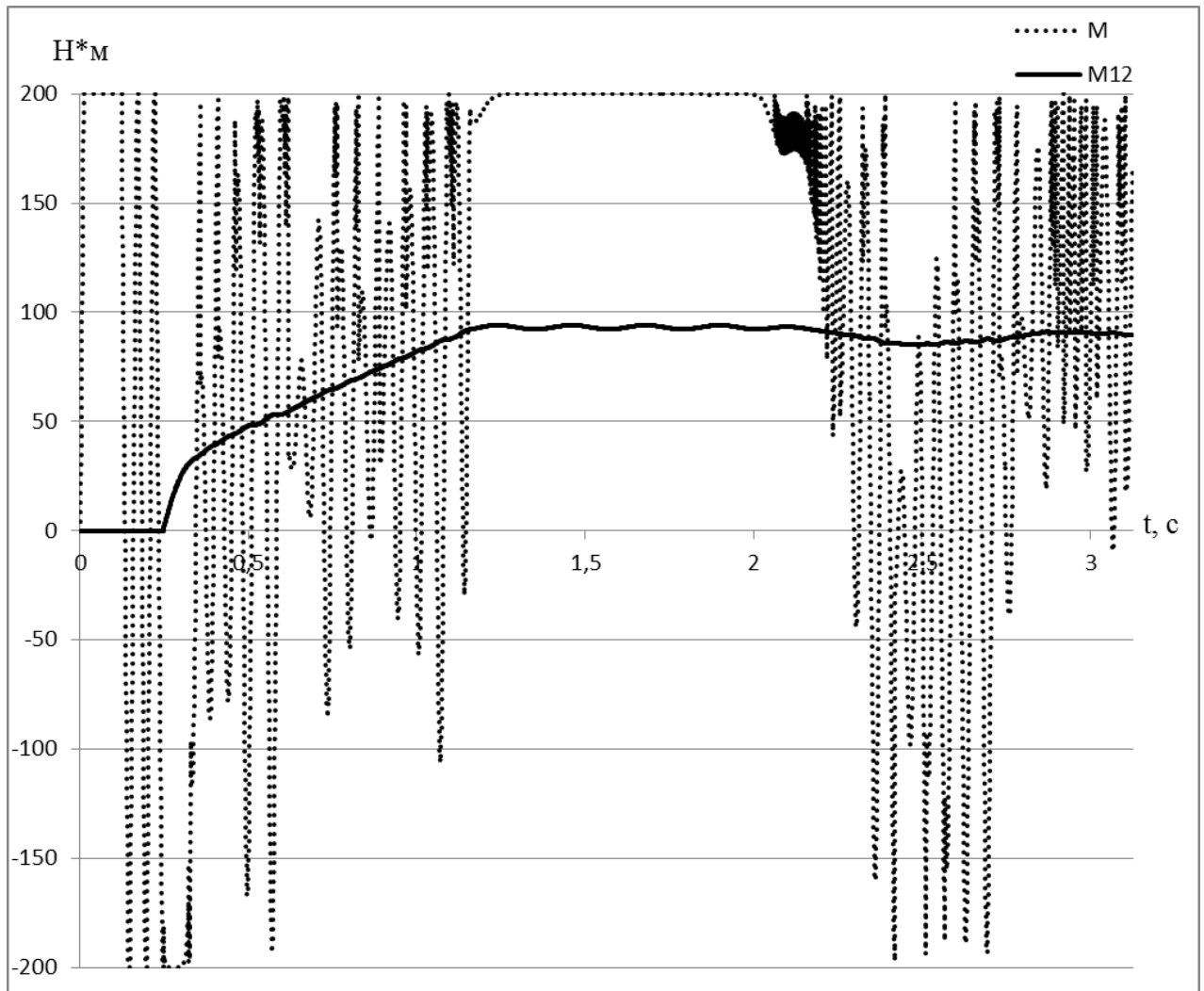


Рисунок 3.7 – Переходный процесс электромагнитного момента (M) и момента в трансмиссии (M_{12}) при моделировании ПИ-регулятора скорости с подчиненным РУМ

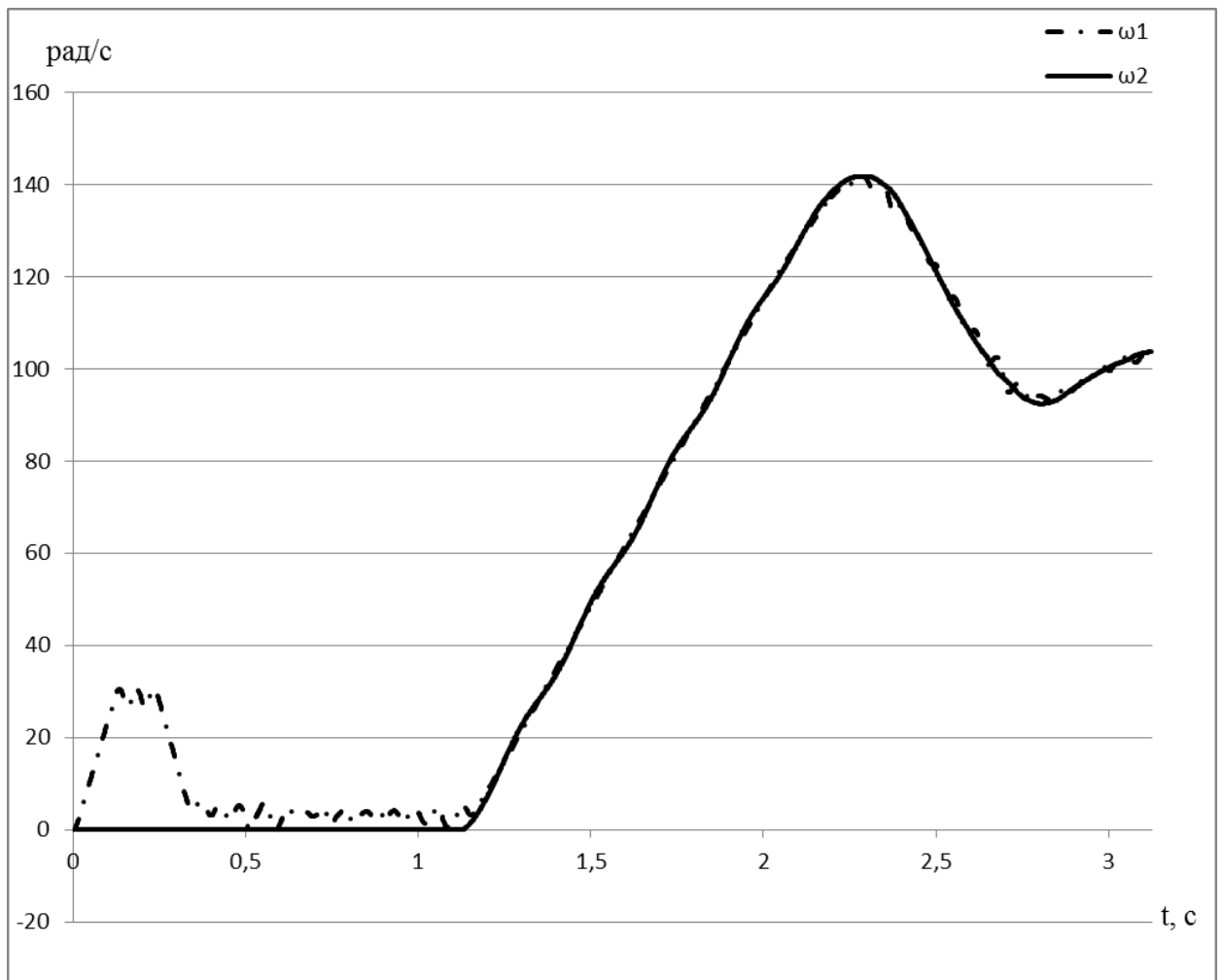


Рисунок 3.8 – Переходный процесс скорости первой (ω_1) и второй массы (ω_2) при моделировании ПИ-регулятора скорости с подчиненным РУМ

Анализ рисунков 3.7 и 3.8 показывает, что устранение провисания каната происходит на скорости $\omega_1 = 28,6$ рад/с, что соответствует выбранной величине постоянной времени $T_2 = 0,007$ с. После устранения провисания происходит апериодический процесс нарастания момента в трансмиссии на скорости около $\omega_1 = 3,2$ рад/с. Разгон второй массы происходит с постоянным по величине ускорением. На этапе разгона второй массы наблюдаются незначительные колебания момента в трансмиссии. Переходный процесс по скорости носит колебательный характер. Перерегулирование по скорости составляет 41%. Результаты моделирования показали, что описанный выше подход по упрощению

структуры системы управления (рисунок 3.6), является допустимым при синтезе управления. Таким образом, для заданных условий, полученный алгоритм управления скоростью второй массы (груза) с подчиненным РУМ, в режиме работы «с подхватом», обеспечивает автоматическое устранение провисания каната на малой скорости, способствует снижению динамической нагрузки подъемного каната на 98%. Переходный процесс по скорости носит колебательный характер с перерегулированием 41%. Полученное управление обеспечивает реализацию сформулированных ранее требований к системе. Упрощение структуры системы позволило рассматривать нелинейную двухмассовую электромеханическую систему как апериодическое звено первого порядка и значительно облегчило синтез управления.

3.4 Алгоритм управления скоростью подъема, синтезированный по методу АКАР

Рассмотрим построение регулятора скорости на основе метода АКАР, применительно к структуре системы управления, приведенной на рисунке 3.9. В ней электрическая подсистема привода представлена как БИМ, что позволяет осуществлять синтез регулятора скорости, основываясь только на математической модели механической подсистемы.

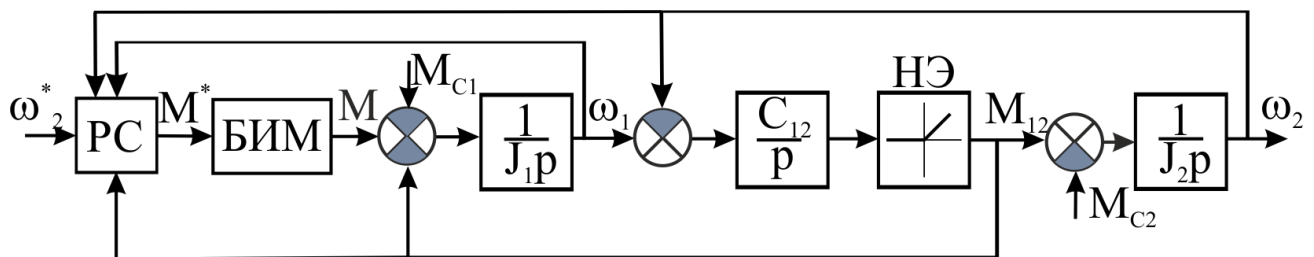


Рисунок 3.9 – Структурная схема электропривода подъема крана

В качестве первой целевой функции, на основании технологических требований, предъявляемых к приводу подъема крана, выбираем условие равенства скорости движения второй массы (груза) её заданному значению:

$$\psi_1 = \omega_2 - \omega_2^* = 0, \quad (3.21)$$

где ω_2^* – заданное значение скорости груза. Первое функциональное уравнение принимаем вида:

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0, \quad (3.22)$$

где T_1 – постоянная времени, в течение которой система будет двигаться на аттракторе. На основании (3.21) находим производную $\dot{\psi}_1$ и подставляем в функциональное уравнение:

$$T_1 \dot{\omega}_2 + (\omega_2 - \omega_2^*) = 0. \quad (3.23)$$

Подставив выражение $\dot{\omega}_2$ из системы (1.4), получим:

$$\frac{T_1}{J_2} (M_{12} - M_{c2}) + (\omega_2 - \omega_2^*) = 0. \quad (3.24)$$

Вторую целевую функцию выберем, исходя из необходимости функциональной связи первой и второй массы:

$$\psi_2 = M_{12} - v_{M12} = 0; \quad (3.25)$$

$$v_{M12} = M_{c2} - \frac{J_2}{T_1} (\omega_2 - \omega_2^*), \quad (3.26)$$

где v_{M12} – внутренняя переменная системы управления, обеспечивающая желаемый характер движения на аттракторе, и условие достижения конечной цели управления. Второе функциональное уравнение принимаем того же вида, что и первое:

$$T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \quad (3.27)$$

где T_2 – постоянная времени, в течение которой система будет двигаться на аттракторе. Находим производную $\dot{\psi}_2$ и подставляем во второе функциональное уравнение, которое с учетом (3.26) примет вид:

$$T_2 \left[C_{12} \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\tau(\varphi)} + \frac{1}{T_1} (M_{12} - M_{C2}) \right] + M_{12} - M_{C2} + \frac{J_2}{T_1} (\omega_2 - \omega_2^*) = 0. \quad (3.28)$$

Для получения функциональной зависимости управляющего воздействия в виде электромагнитного момента двигателя, необходимо в качестве третьей целевой функции выбрать выражение:

$$\psi_3 = \omega_1 - v_{\omega 1} = 0, \quad (3.29)$$

где $v_{\omega 1}$ – внутренняя переменная системы управления, обеспечивающая желаемый характер движения на аттракторе, и условие достижения конечной цели управления:

$$v_{\omega 1} = \omega_2 - \frac{\tau(\varphi)}{T_1 T_2 C_{12}} [(M_{12} - M_{C2})(T_1 + T_2) + J_2(\omega_2 - \omega_2^*)]. \quad (3.30)$$

С учетом выражения (3.30) третья целевая функция:

$$\psi_3 = \omega_1 - \omega_2 + \frac{\tau(\varphi)}{T_1 T_2 C_{12}} [(M_{12} - M_{C2})(T_1 + T_2) + J_2(\omega_2 - \omega_2^*)] = 0. \quad (3.31)$$

Третье функциональное уравнение выбираем того же вида, что и ранее:

$$T_3 \dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0, \quad (3.32)$$

где T_3 – постоянная времени, в течение которой система будет двигаться на аттракторе. С учетом производной третьей целевой функции, функциональное уравнение примет вид:

$$\begin{aligned}
& T_3 \left\{ \frac{1}{J_1} (M - M_{12} - M_{C1}) - \frac{1}{J_2} (M_{12} - M_{C2}) + \right. \\
& + \frac{1}{T_1 T_2 C_{12}} \left[-a e^{-a\Delta(\varphi)} (\omega_1 - \right. \\
& - \omega_2) ((M_{12} - M_{C2})(T_1 + T_2) + J_2(\omega_2 - \omega_2^*)) + \\
& + C_{12}(T_1 + T_2)(\omega_1 - \omega_2) + \tau(\varphi)(M_{12} - M_{C2}) \left. \right] \left. \right\} + \omega_1 - \omega_2 + \\
& + \frac{\tau(\varphi)}{T_1 T_2 C_{12}} [(M_{12} - M_{C2})(T_1 + T_2) + J_2(\omega_2 - \omega_2^*)] = 0.
\end{aligned} \tag{3.33}$$

На основании выражения (3.33) можно определить искомое управляющее воздействие:

$$\begin{aligned}
M &= \\
&= M_{12} + M_{C1} + \left[\frac{1}{J_2} - \frac{\tau(\varphi)}{T_1 T_2 C_{12}} \right] J_1 (M_{12} - M_{C2}) - \\
&- J_1 (\omega_1 - \omega_2) \left[\frac{-a e^{-a\Delta(\varphi)}}{T_1 T_2 C_{12}} \Theta(M_{12}, \omega_2) + \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \right. \\
&+ \left. \frac{1}{T_3} \right] - \frac{J_1 \tau(\varphi)}{T_1 T_2 T_3 C_{12}} \Theta(M_{12}, \omega_2),
\end{aligned} \tag{3.34}$$

где $\Theta(M_{12}, \omega_2) = (T_1 + T_2)(M_{12} - M_{C2}) + J_2(\omega_2 - \omega_2^*)$.

Проанализируем работу регулятора на этапе устранения провисания каната. На протяжении всего этапа $M_{12} = 0$, $M_{C2} = 0$, $\omega_2 = 0$. Выражение управляющего воздействия (3.34) примет вид:

$$\begin{aligned}
M &= \\
&= M_{C1} + \frac{J_1 J_2 \omega_2^* (1 + e^{-a\Delta(\varphi)})}{T_1 T_2 T_3 C_{12}} - \\
&- \left\{ \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} + \frac{J_2 \omega_2^*}{T_1 T_2 C_{12}} a e^{-a\Delta(\varphi)} \right\} J_1 \omega_1.
\end{aligned} \tag{3.35}$$

В первоначальный момент времени переменная $\omega_1 = 0$, а управляющее воздействие примет значение, определяемое выражением:

$$M = M_{C1} + \frac{J_1 J_2 \omega_2^* (1 + e^{-a\Delta(\varphi)})}{T_1 T_2 T_3 C_{12}}. \quad (3.36)$$

В установившемся режиме устранения провисания каната скорость первой массы будет стремиться к величине:

$$\omega_1 \rightarrow \frac{\frac{M_{C1}}{J_1} + \frac{J_2 \omega_2^* (1 + e^{-a\Delta(\varphi)})}{T_1 T_2 T_3 C_{12}}}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} + \frac{J_2 \omega_2^*}{T_1 T_2 C_{12}} a e^{-a\Delta(\varphi)}}. \quad (3.37)$$

Проанализируем выражение (3.37) при наличии провисания каната (при $\Delta(\varphi) < 0$). Величина установившейся скорости первой массы зависит от параметров C_{12} , M_{C1} , J_1 , a , T_3 . Таким образом, подбирая постоянную времени регулятора, можно изменять скорость устранения провисания каната. На рисунке 3.10 представлены зависимости $\omega_1 = f(T_3)$ при постоянных параметрах $C_{12} = 22 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}}$; $M_{C1} = 0$; $a = 5$.

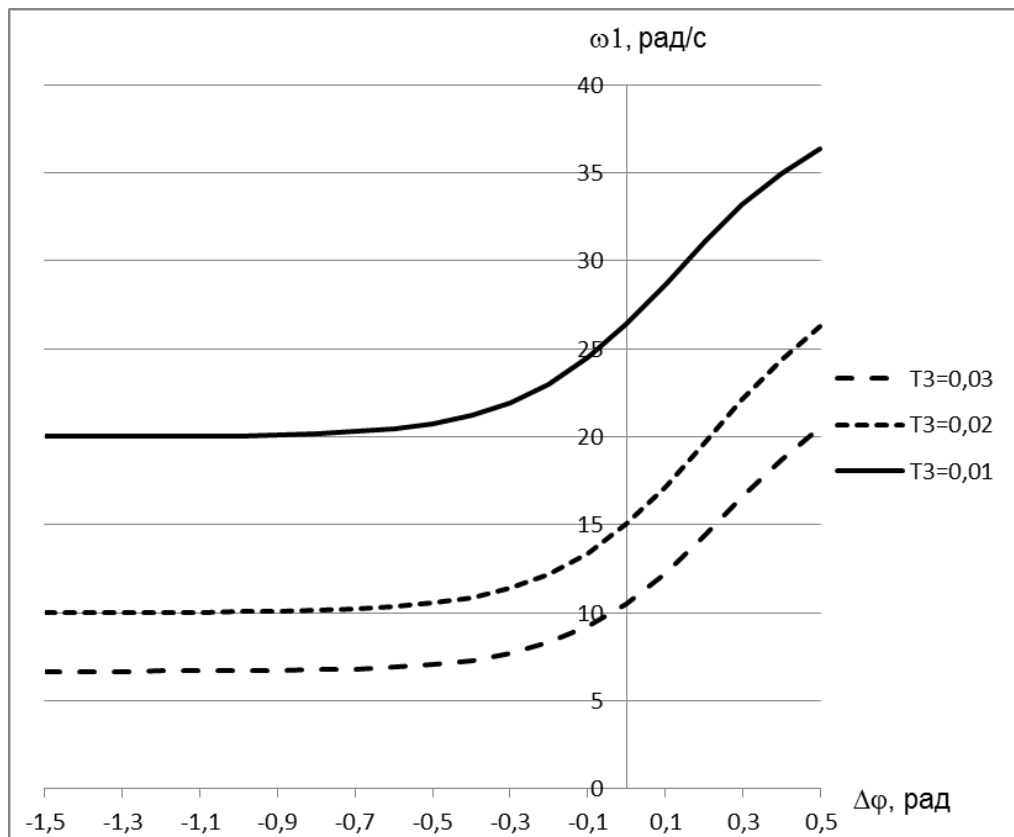


Рисунок 3.10 – Зависимость скорости устранения провисания каната от постоянной времени T_3

Моделирование работы алгоритма управления скоростью груза (второй массы), полученного методом АКАР, производилось для того же привода подъема, что и при исследовании алгоритма управления скоростью груза (второй массы) с подчиненным РУМ (мостовой кран, высота подъема 16 м, масса груза 3 тонны, электродвигатель подъема МТВ 312-6). Заданная скорость груза принималась $\omega_2^* = 100$ рад/с; параметр $a = 5$; постоянные времени $T_1 = 0,04$ с; $T_2 = 0,4$ с; $T_3 = 0,004$ с. При моделировании устанавливалось ограничение электромагнитного момента двигателя на уровне ± 200 Н·м. На рисунках 3.11 и 3.12 приведены результаты моделирования.

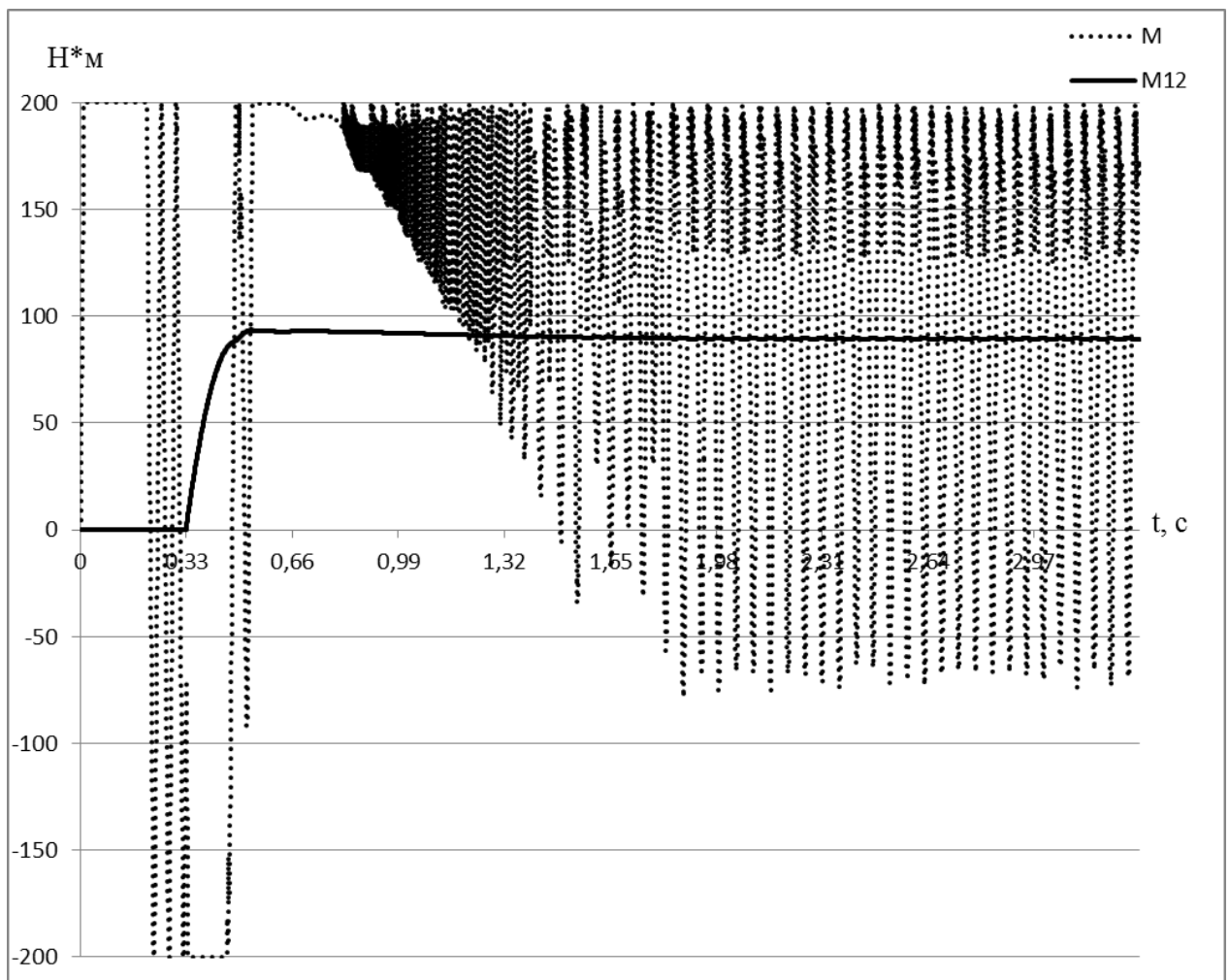


Рисунок 3.11 – Переходный процесс электромагнитного момента (M) и момента в трансмиссии (M_{12}) при моделировании работы алгоритма регулятора скорости, полученного методом АКАР

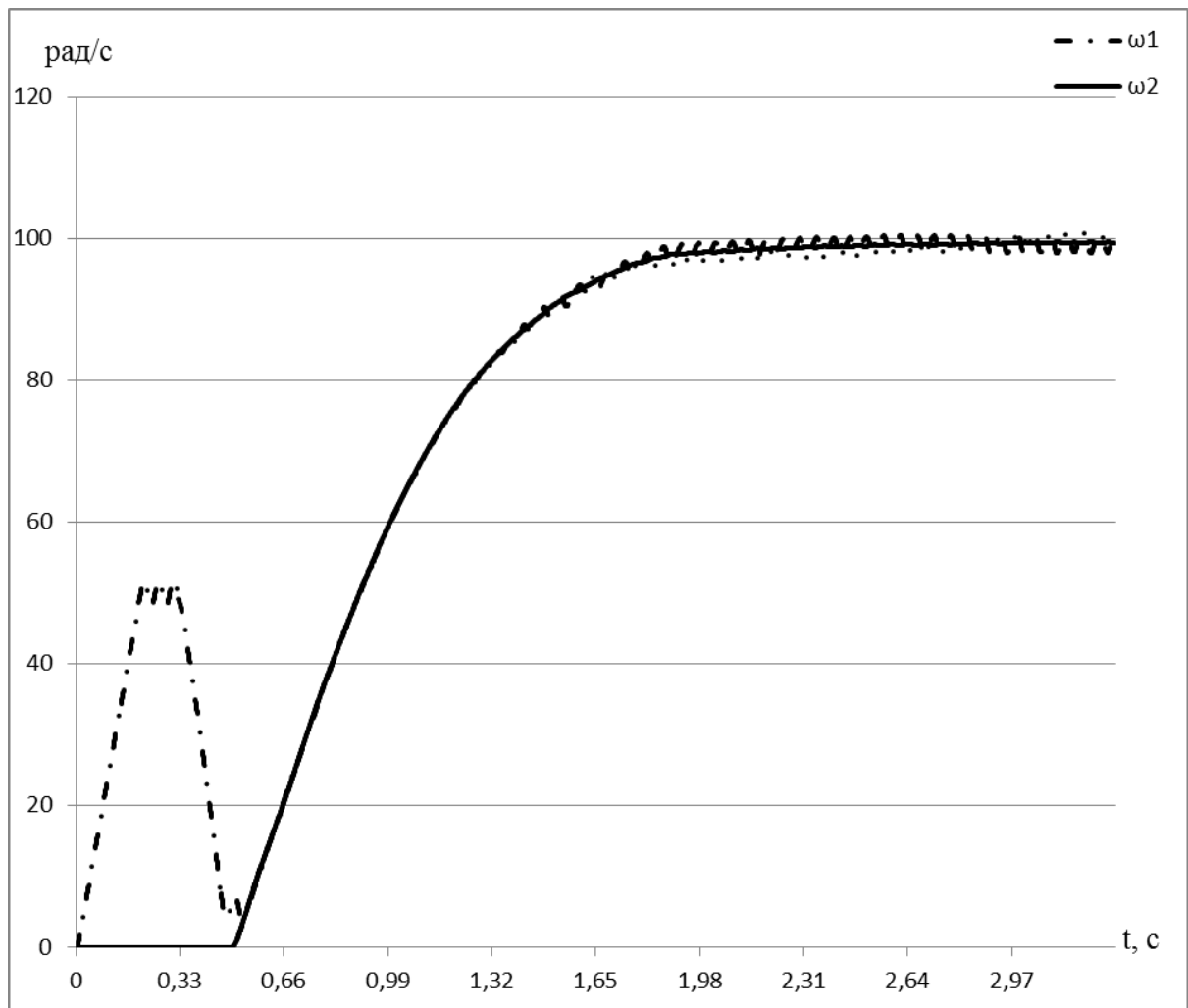


Рисунок 3.12 – Переходный процесс скорости первой (ω_1) и второй массы (ω_2) при моделировании работы алгоритма регулятора скорости, полученного методом АКАР

Анализ рисунков 3.11 и 3.12 показывает, что устранение провисания каната происходит на скорости $\omega_1 = 50$ рад/с, что соответствует выбранной величине постоянной времени $T_2 = 0,004$ с. После устранения провисания происходит апериодический процесс нарастания момента в трансмиссии на скорости около $\omega_1 = 7,7$ рад/с. После того как момент в трансмиссии достигнет значения момента сопротивления M_{c2} , происходит разгон второй массы. На этапе разгона колебания момента в трансмиссии отсутствуют. Скорость достигает установившегося значения по апериодическому переходному процессу. Перерегулирование

по скорости отсутствует. Таким образом, полученный методом АКАР алгоритм управления скоростью второй массы (груза) в режиме работы «с подхватом» обеспечивает автоматическое устранение провисания каната на малой скорости, полностью устраняет динамические усилия переменного характера в трансмиссии (подъемном канате), что способствует снижению интенсивности её усталостного разрушения, а также обеспечивает аperiодический переходный процесс по скорости второй массы.

3.5 Оценка влияния снижения уровня динамической нагруженности каната

Усталостная прочность каната характеризуется пределом выносливости (пределом усталости) σ_R – наибольшим напряжением, которое может выдержать металл без разрушения заданное число раз (для стали 10^7 циклов). Запас усталостной прочности определяется как отношение предела выносливости к максимальному напряжению в течение рабочего цикла. Определим предел выносливости и запас усталостной прочности каната, основываясь на результатах, полученных при моделировании работы привода подъема крана грузоподъемностью 3,2 тонн. Рассматриваемый привод подъема содержит в механической подсистеме стальной канат двойной свивки типа ЛК-Р с параметрами, приведенными в таблице 3.2 [22]. Проволоки каната имеют временное сопротивление разрыву (предел прочности при растяжении) $\sigma_B = 1670$ МПа. Согласно [20] возможно определить предел выносливости при симметричном цикле нагружения σ_{-1} и коэффициент чувствительности к асимметрии цикла ψ_σ по следующим зависимостям:

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001 \cdot \sigma_B) \cdot \sigma_B = 639,61 \text{ МПа}, \quad (3.38)$$

$$\psi_\sigma = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_B = 0,354. \quad (3.39)$$

Таблица 3.2 – Параметры подъемного каната

Диаметр, мм		Расчетная площадь сечения всех прово- лок, мм ²	Маркировочная группа, Н/мм ² (кгс/мм ²)	
каната	Прово- лок		1670 (170)	
			Разрывное усилие, Н, не менее	
			суммарное всех проволок в канате	каната в целом
13,0	0,7 – 0,9	61	101500	86800

При подъеме груза в режиме «с подхватом» процесс нагружения каната можно рассматривать как асимметричный положительный цикл со следующими параметрами [19]:

1. среднее напряжение цикла σ_m , МПа (Н/мм²);
2. наибольшее напряжение цикла σ_{MAX} , МПа (Н/мм²);
3. наименьшее напряжение цикла σ_{MIN} , МПа (Н/мм²);
4. амплитуда цикла σ_v , МПа (Н/мм²);
5. коэффициент асимметрии цикла R.

Предел выносливости каната σ_R , МПа (Н/мм²) можно определить на основании зависимости [12]:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{-1}}{1 - 0,5(1 - \psi_\sigma)(1 + R)}. \quad (3.40)$$

Предел выносливости и запас усталостной прочности элемента механической системы зависят от следующих факторов: концентрации напряжений в области изменения формы; абсолютных размеров поперечных сечений (масштабный фактор); качества обработки поверхности; технологических методов поверхностного упрочнения; эксплуатационных факторов (коррозия, повышенная и пониженная температура, уровень динамических нагрузок, перегибы и трение каната на блоках и

барабане и т. д.). Согласно [46] снижение предела выносливости конкретной детали, по сравнению с лабораторным образцом, учитывается в расчетах при помощи коэффициента K , который называется коэффициентом снижения предела выносливости и отражает влияние основных факторов на сопротивление усталости:

$$\sigma_{RD} = \frac{\sigma_R}{K}. \quad (3.41)$$

Коэффициент K определяется зависимостью [20]:

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_A}, \quad (3.42)$$

где K_σ – коэффициент, учитывающий фактор концентрации напряжений; $K_{d\sigma}$ – коэффициент, учитывающий масштабный фактор; $K_{F\sigma}$ – коэффициент, учитывающий качество обработки поверхности; K_V – коэффициент, учитывающий метод поверхностного упрочнения; K_A – коэффициент, учитывающий анизотропию прочностных свойств материала. При расчете будем принимать следующие величины коэффициентов:

1. $K_\sigma = 1$, так как проволоки каната не имеют концентраторов напряжений;
2. $K_{d\sigma} = 1$, так как влияние этого коэффициента для деталей диаметром менее 1 мм незначительно (диаметры проволок составляют 0,7 – 0,9 мм);
3. $K_{F\sigma} = 1$, так как сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины для проволок каната менее 1 мкм ($R_z < 1$ мкм);
4. $K_V = 1,2$, так как минимальный коэффициент упрочнения поверхности при накатке роликом составляет 1,2 (в процессе волочения проволоки происходит механическое упрочнение поверхности);

5. $K_A = 0,8$, так как ременное сопротивление разрыву для рассматриваемого каната $\sigma_B > 1200$ МПа.

Коэффициент запаса усталостной прочности $n_{\sigma_{RD}}$ определяется зависимостью вида:

$$n_{\sigma_{RD}} = \frac{\sigma_{RD}}{\sigma_{max}^{раб}}, \quad (3.43)$$

где $\sigma_{max}^{раб}$ – рабочее напряжение, действующее в реальных условиях эксплуатации. В таблице 3.3 представлены параметры асимметричного цикла нагружения при подъеме с подхватом груза массой 3 тонны, без применения алгоритмов снижения динамических усилий в подъемном канате.

Таблица 3.3 – Параметры цикла нагружения при подъеме
«с подхватом»

Величина	Значение
Среднее напряжение цикла σ_m , МПа	278,53
Амплитуда цикла σ_V , МПа	222,83
Коэффициент асимметрии цикла R	0,11
Предел выносливости каната σ_{RD} , МПа	957,75
Запас прочности каната $n_{\sigma_{RD}}$	1,91

В таблице 3.4 представлены параметры асимметричного цикла нагружения при подъеме с подхватом груза массой 3 тонны, с применением алгоритма ПИ-регулятора скорости груза с подчиненным РУМ. В таблице 3.5 представлены параметры асимметричного цикла нагружения, а также предел выносливости и запас усталостной прочности каната при подъеме с подхватом груза массой 3 тонны, с применением алгоритма управления скоростью груза, полученного методом АКАР.

Таблица 3.4 – Параметры цикла нагружения при работе алгоритма ПИ-регулятора скорости груза с подчиненным РУМ

Величина	Значение
Среднее напряжение цикла σ_m , МПа	278,53
Амплитуда цикла σ_v , МПа	2,79
Коэффициент асимметрии цикла R	0,98
Предел выносливости каната σ_{RD} , МПа	1703,75
Запас прочности каната $n_{\sigma_{RD}}$	6,06

Таблица 3.5 – Параметры цикла нагружения при работе алгоритма управления скоростью груза, полученного методом АКАР

Величина	Значение
Среднее напряжение цикла σ_m , МПа	278,53
Амплитуда цикла σ_v , МПа	0
Коэффициент асимметрии цикла R	1
Предел выносливости каната σ_{RD} , МПа	1734,54
Запас прочности каната $n_{\sigma_{RD}}$	6,23

Таким образом, анализируя данные таблиц 3.3 – 3.5, можно констатировать:

1. При работе алгоритма ПИ-регулятора скорости груза с подчиненным РУМ в режиме подъема «с подхватом», в результате снижения динамических нагрузок увеличивается предел выносливости каната в 1,78 раз и запас прочности каната в 3,17 раза.
2. При работе алгоритма управления скоростью груза, полученного методом АКАР в режиме подъема «с подхватом», в результате снижения динамических нагрузок увеличивается предел

выносливости каната в 1,81 раза и запас прочности каната в 3,26 раза.

Увеличение предела выносливости и запаса прочности будет максимальным при подъеме в режиме «с подхватом» груза массой, равной грузоподъемности крана. При подъеме груза без «подхвата» или подъеме груза «с подхватом», но меньшей массы, увеличение предела выносливости и запаса прочности произойдет на меньшую величину.

3.6 Оценка экономической эффективности внедрения алгоритмов управления

Экономическую эффективность от внедрения предложенных в работе алгоритмов управления можно оценить, используя следующие основные факторы:

1. Экономия за счет уменьшения количества использованных подъемных канатов за весь срок службы крана, вследствие снижения уровня динамических нагрузок.
2. Экономия за счет сокращения времени простоя крана, связанного с необходимостью замены подъемного каната.
3. Экономия затрат на ремонтные работы по замене подъемных канатов.

Произведем расчет годовой экономической эффективности, принимая во внимание факторы, описанные выше. Расчет экономии будем производить исходя из максимального увеличения предела выносливости, тем самым будет найден максимально-возможный экономический эффект. По данным, приведенным в [63], подъемный канат крана при тяжелом режиме эксплуатации имеет средний срок эксплуатации 3,5 месяца. Таким образом, в среднем, в течение года используется 3,43 канатов, а затраты на приобретение канатов, при цене каната C_K , в годовом выражении составят $3,43 \cdot C_K$. Исходя из расчетных данных, при

внедрении предложенных алгоритмов управления произойдет увеличение предела выносливости подъемного каната в 1,78 раза, что позволит сократить в годовом выражении число используемых канатов до 1,93 канатов, а затраты на приобретение канатов в годовом выражении составят $1,93 \cdot Ц_K$. Экономия за счет уменьшения количества использованных подъемных канатов в годовом выражении составит $(3,43 - 1,93) \cdot Ц_K$.

Обозначим экономические потери от времени простоя крана при замене одного подъемного каната $ВП_K$. Экономические потери от простоя крана при замене каната в течение года в случае эксплуатации привода подъема без алгоритмов снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом» составят $3,43 \cdot ВП_K$. При использовании алгоритмов управления потери составят $1,93 \cdot ВП_K$. Экономия за счет снижения времени от простоя крана составит $(3,43 - 1,93) \cdot ВП_K$.

Стоимость работ по замене подъемного каната обозначим как $СР_3$. Экономические затраты на замену подъемных канатов в течение года, в случае эксплуатации привода подъема без алгоритмов снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом», составят в среднем $3,43 \cdot СР_3$. При использовании алгоритмов управления, затраты по замене канатов составят $1,93 \cdot СР_3$. Экономия за счет снижения затрат по замене подъемных канатов $(3,43 - 1,93) \cdot СР_3$. Таким образом, максимальный годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E} = \frac{(3,43 - 1,93) \cdot (Ц_K + ВП_K + СР_3)}{3,43 \cdot (Ц_K + ВП_K + СР_3)} \cdot 100\% = 44\% \quad (3.44)$$

от затрат на эксплуатацию привода подъема без алгоритмов снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом».

3.7 Выводы по разделу

Подводя итоги результатов, полученных в третьем разделе, необходимо отметить следующие:

1. Получена зависимость для определения максимальной скорости устранения провисания каната, которая, в случае стопорения крюкового подвеса, будет гарантировать величину усилия в канате на заданном допустимом уровне;
2. Предложенная непрерывная нелинейная математическая модель усилия в канате имеет погрешность аппроксимации по сравнению с кусочно-линейной моделью, величина которой максимальна при нулевом натяжении каната. Величина погрешности аппроксимации зависит от настроечного параметра модели и жесткости каната.
3. Полученный алгоритм управления скоростью второй массы (груза) с подчиненным РУМ, в режиме работы «с подхватом», автоматически устраняет провисание каната на малой скорости, работа алгоритма для рассмотренного случая способствует снижению динамической нагрузки в трансмиссии (подъемном канате) на 98% и увеличению предела выносливости и запаса прочности каната. Переходный процесс по скорости носит колебательный характер с перерегулированием 41%.
4. Алгоритм управления скоростью второй массы (груза), полученный методом АКАР в режиме работы «с подхватом», автоматически устраняет провисание каната на малой скорости, полностью устраняет динамические усилия переменного характера в трансмиссии (подъемном канате), способствует увеличению предела выносливости и запаса прочности каната. Переходный процесс по скорости носит апериодический характер.

5. На основе анализа результатов моделирования работы двух алгоритмов управления скоростью груза, лучшими показателями переходного процесса обладает алгоритм, полученный методом АКАР, поэтому для практического внедрения рекомендуется использовать именно его.
6. Максимальный экономический эффект от внедрения предложенных алгоритмов управления составляет 44% в случае, если привод подъема будет работать с грузами, масса которых равна грузоподъемности крана.

4 Экспериментальная часть

4.1 Описание экспериментальной установки

Для проверки теоретических положений была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка. При проектировании установки учитывались следующие технические требования:

1. Кинематическая схема установки должна быть аналогична схеме электропривода подъема крана.
2. Параметры кинематической схемы должны быть таковы, чтобы путем масштабирования возможно было получить режимы работы, аналогичные режимам в реальном электроприводе подъема крана.
3. Рама металлоконструкции установки должна иметь большую жесткость, достаточную для представления её механической части двухмассовой системой;
4. Электропривод подъема должен иметь систему преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД) с прямым управлением моментом.
5. Управляющий микроконтроллер, осуществляющий реализацию алгоритмов управления установкой, должен иметь быстроедействие, достаточное для вычисления управляющего воздействия с периодом, не превышающим период считывания входных переменных системой управления ПЧ.
6. Система управления установкой, как и информационные каналы, должны быть экранированы и иметь фильтры высокочастотных помех по каналам питания, ввиду наличия большого количества электромагнитных помех при работе ПЧ.
7. Система управления установкой должна получать информацию о скорости вращения вала электродвигателя со време-

нем дискретизации не более периода считывания входных переменных системой управления ПЧ.

8. Система управления установкой должна получать информацию о силе в подъемном канате путем косвенного измерения её с помощью тензодатчика, расположенного между поднимаемым грузом и крюком подъемного механизма.

На рисунке 4.1 приведена кинематическая схема экспериментальной установки. На схеме приняты следующие обозначения: 1 – ротор электродвигателя, 2 – муфта, 3 – редуктор, 4 – канатный барабан, 5 – блок, 6 – подъемный канат, 7 – груз.

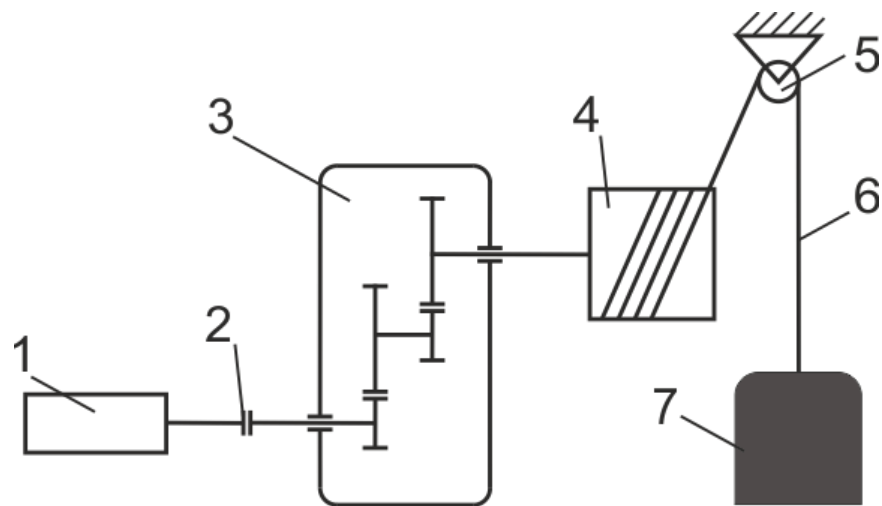


Рисунок 4.1 – Кинематическая схема экспериментальной установки

На рисунке 4.2 представлены фотографии экспериментальной установки. На рисунке 4.3 представлена механическая схема экспериментальной установки. На схеме приняты следующие обозначения: 1 – рама, 2 – подъемный канат, 3 – блок, 4 – крюковой подвес, 5 – датчик усилия, 6 – груз, 7 – редуктор, 8 – муфта, 9 – электродвигатель.



Рисунок 4.2 – Фотографии экспериментальной установки

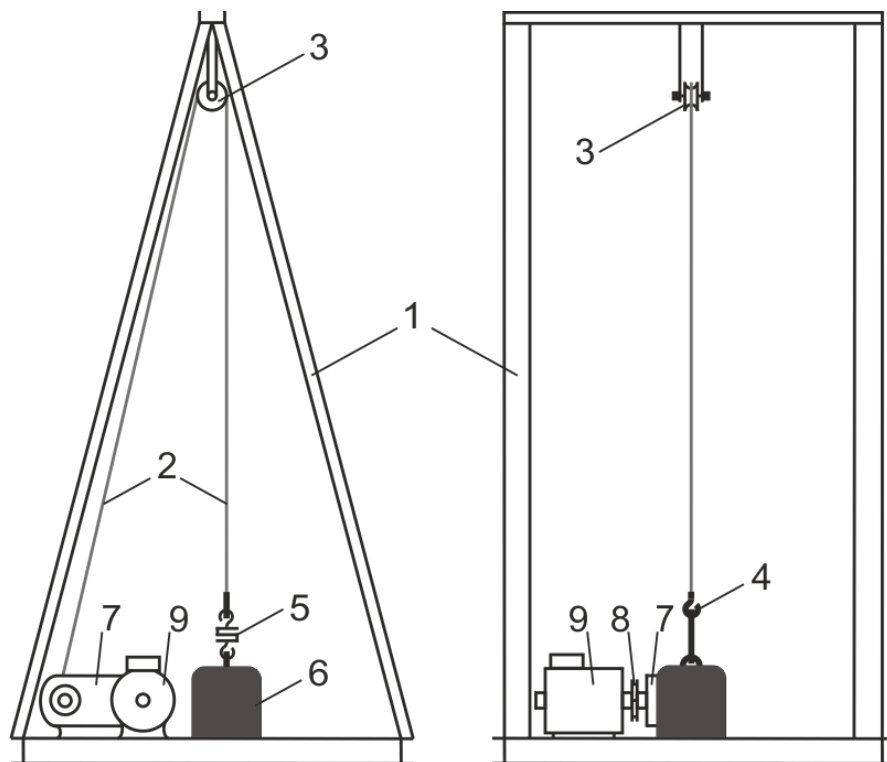


Рисунок 4.3 – Механическая схема экспериментальной установки

На рисунке 4.4 приведена функциональная схема экспериментальной установки. На схеме приняты следующие условные обозначения: СУ – система управления, ACS-800 – частотный преобразователь с функцией прямого управления моментом, ДС – датчик скорости ротора электродвигателя, ДУ – датчик усилия в подъемном канате, МЧ – механическая часть привода подъема крана.

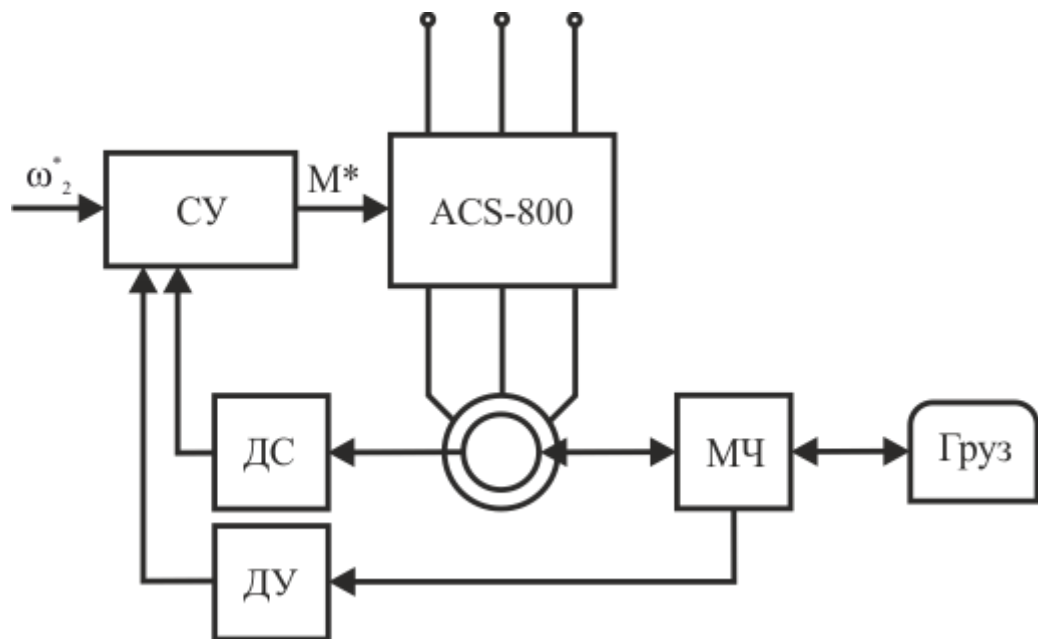


Рисунок 4.4 – Функциональная схема экспериментальной установки

На экспериментальной установке используется АД марки АИР 80 со следующими параметрами: номинальная мощность $P_H = 2,2$ кВт; номинальная скорость вращения $n_H = 2790$ об/мин; номинальный ток $I_H = 4,4$ А. Механическая часть установки содержит редуктор с передаточным числом $i = 22$. Подъемный канат маркировочной группы 1670 имеет диаметр $d_T = 5$ мм. Для измерения усилия в канате использовался тензодатчик STC S-type с максимальной измеряемой нагрузкой $F_{\max} = 100$ кг. Управление электродвигателем осуществлялось с помощью преобразователя частоты фирмы ABB ACS-800. На рисунке 4.5

приведена функциональная схема прямого управления моментом частотного преобразователя ABB ACS-800.

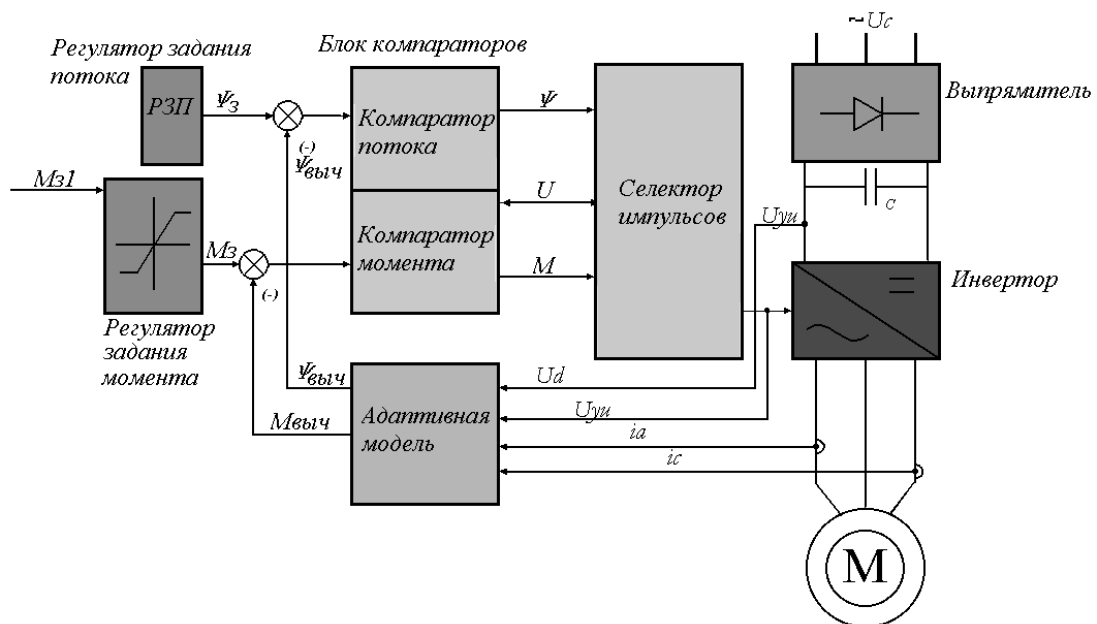


Рисунок 4.5 – Функциональная схема прямого управления моментом преобразователя ACS-800

4.2 Проведенные эксперименты

После изготовления установки были проведены эксперименты по определению параметров механической части. На первом этапе был определен момент сопротивления, действующий на первую массу M_{c1} . Для этого на разных скоростях подъема пустого крюка были получены значения моментов, развиваемых электроприводом, и в последствии построена механическая характеристика, показанная на рисунке 4.6. Представленную характеристику можно описать полиномом третьего порядка вида:

$$M_{c1}(\omega) = -18 \cdot 10^{-8} \cdot \omega_1^3 + 10^{-4} \cdot \omega_1^2 - 0,02 \cdot \omega_1 + 2,18. \quad (4.1)$$

Величина достоверности аппроксимации в этом случае равна $R^2 = 0,9997$ [54]. Момент инерции первой массы J_1 определялся по данным

опытов ускоренного разгона первой массы. В результате обработки полученных данных, было определено значение $J_1 = 0,003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ [31].

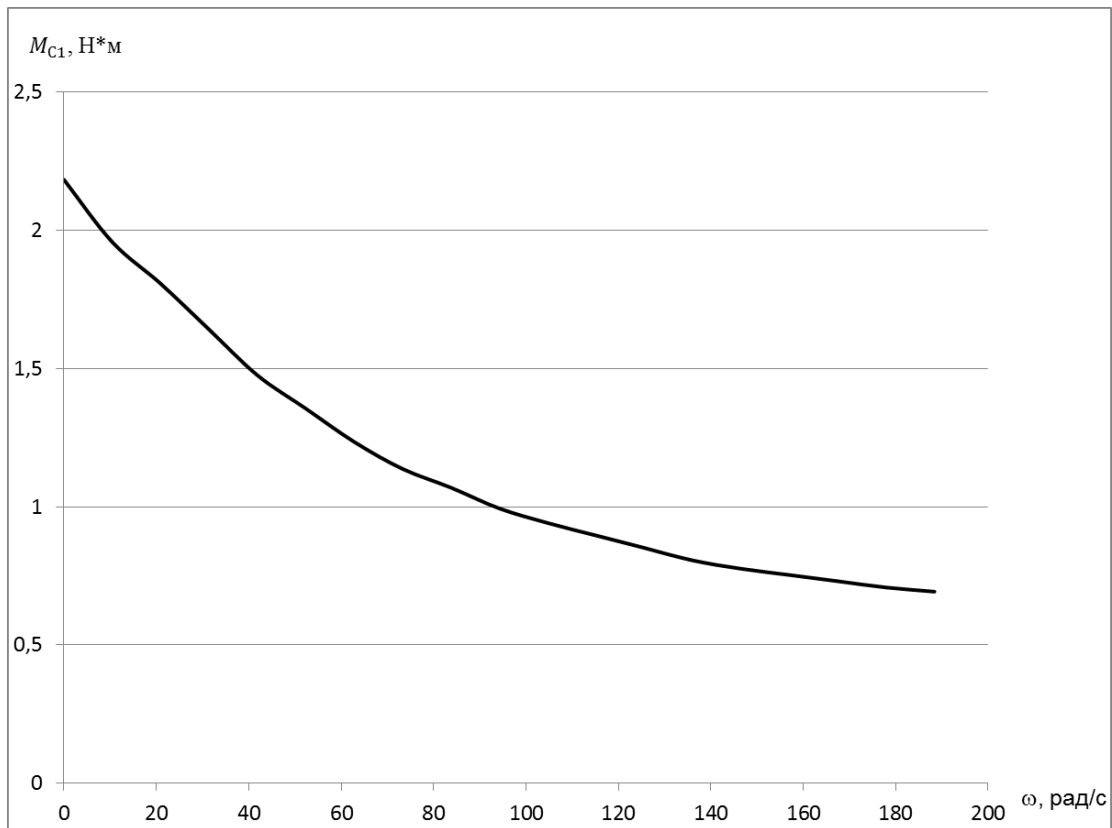


Рисунок 4.6 – Механическая характеристика $M_{C1} = f(\omega_1)$

Приведенная жесткость упругой связи между первой и второй массой C_{12} определялась по времени периода свободных колебаний второй массы, при жестко застопоренной первой массе. Период свободных колебаний груза массой 69,5 кг составил $T_F = 0,4 \text{ с}$, при этом частота собственных колебаний $f_F = 2,5 \text{ Гц}$. Такая частота свободных колебаний соответствует частоте колебаний, происходящих в реальных механических системах привода подъема кранов (0,5 – 5 Гц) [64]. В результате обработки полученных данных, было получено значение приведенной жесткости $C_{12} = 0,09 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$. Необходимо отметить, что для понижения жесткости кинематической связи и получения характеристик механической части привода подъема близких к реальным, использовалась

стальная пружина, устанавливаемая между тензодатчиком и поднимаемым грузом.

При подъеме в режиме «с подхватом» были получены переходные характеристики, приведенные на рисунках 4.7 и 4.8. Запись характеристик начиналась в момент времени, когда усилие в трансмиссии превышало значение $0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Масса поднимаемого груза составляла $69,5 \text{ кг}$, а задание по скорости подъема принималось равным $\omega_2^* = 100 \text{ рад/с}$. Ограничение электромагнитного момента двигателя устанавливалось на уровне $\pm 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В момент времени $t = 0,56 \text{ с}$, усилие в трансмиссии достигает момента сопротивления, действующего на вторую массу $M_{c2} = 1,55 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и после этого, вторая масса начинает движение. На графиках переходных процессов электропривода подъема в режиме «с подхватом» отчетливо наблюдается колебательный процесс с частотой $2,38 \text{ Гц}$. Колебательные усилия переменного характера в подъемном канате приводят к интенсивному накоплению усталостных повреждений и, как следствие, увеличению скорости расходования его ресурса.

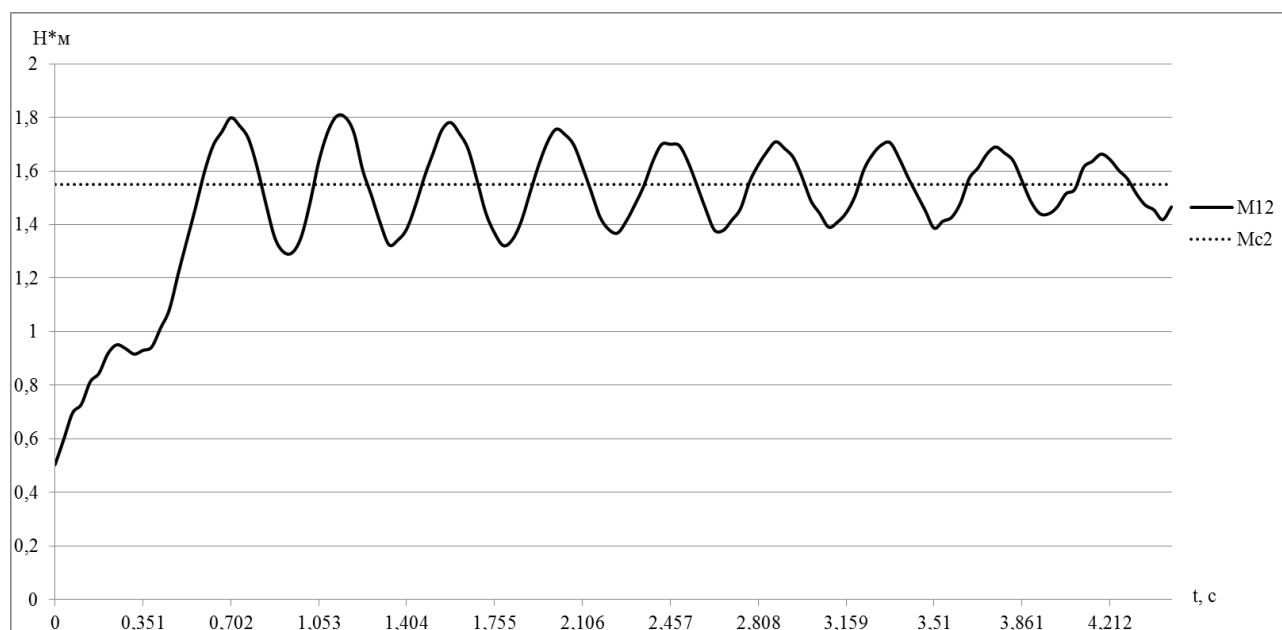


Рисунок 4.7 – Момент в трансмиссии M12 при подъеме «с подхватом»

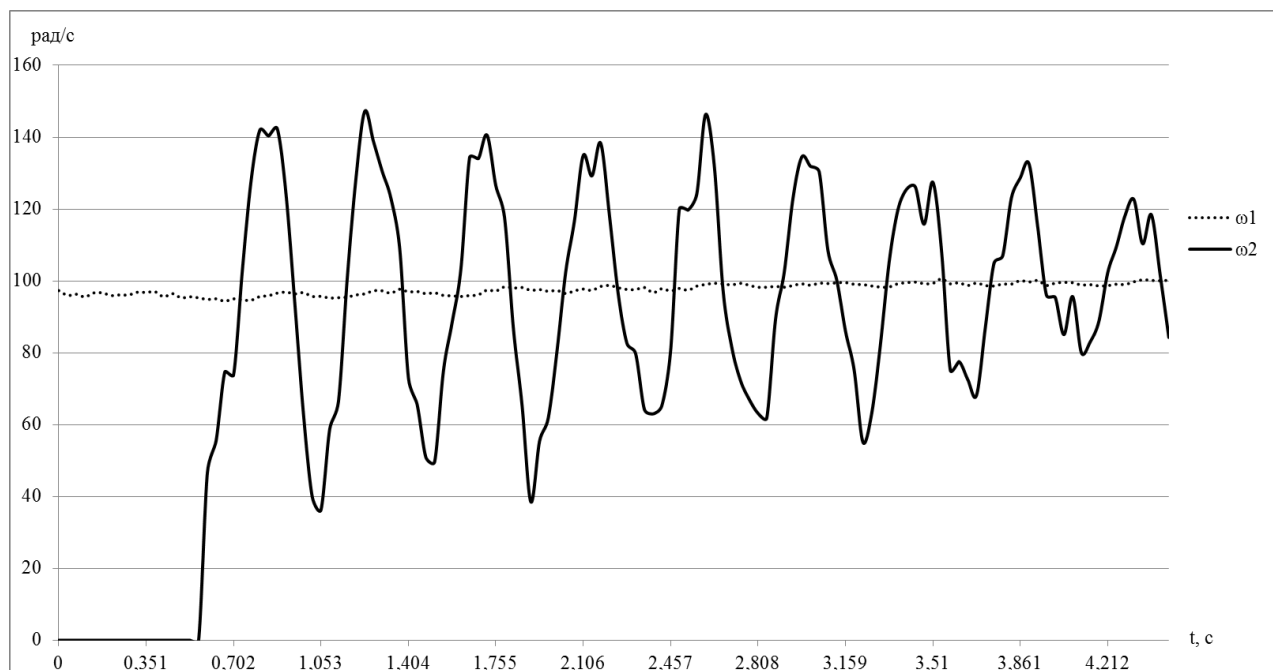


Рисунок 4.8 – Скорость ротора электродвигателя (ω_1) и приведенная скорость груза (ω_2) при подъеме «с подхватом»

При проведении экспериментов была исследована работа двух алгоритмов управления по снижению динамических нагрузок в режиме подъема «с подхватом»:

1. Алгоритм управления скоростью груза с подчиненным контуром РУМ.
2. Алгоритм управления скоростью груза, синтезированный по методу АКАР.

На рисунках 4.9 и 4.10 приведены переходные процессы при работе регулятора скорости с подчиненным РУМ. Постоянные времени РУМ имели следующие значения: $T_1 = 0,06$ с, $T_2 = 0,005$ с.

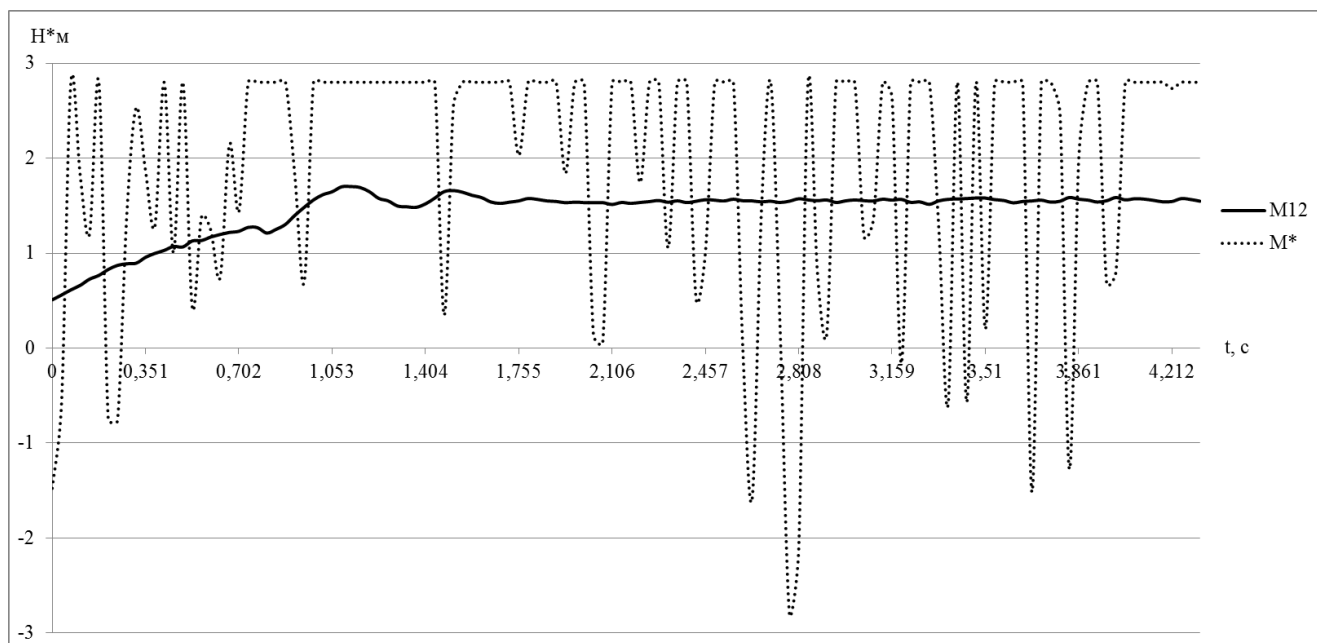


Рисунок 4.9 – Момент в трансмиссии ($M12$) и задание электромагнитного момента, вычисленное системой управления (M^*)

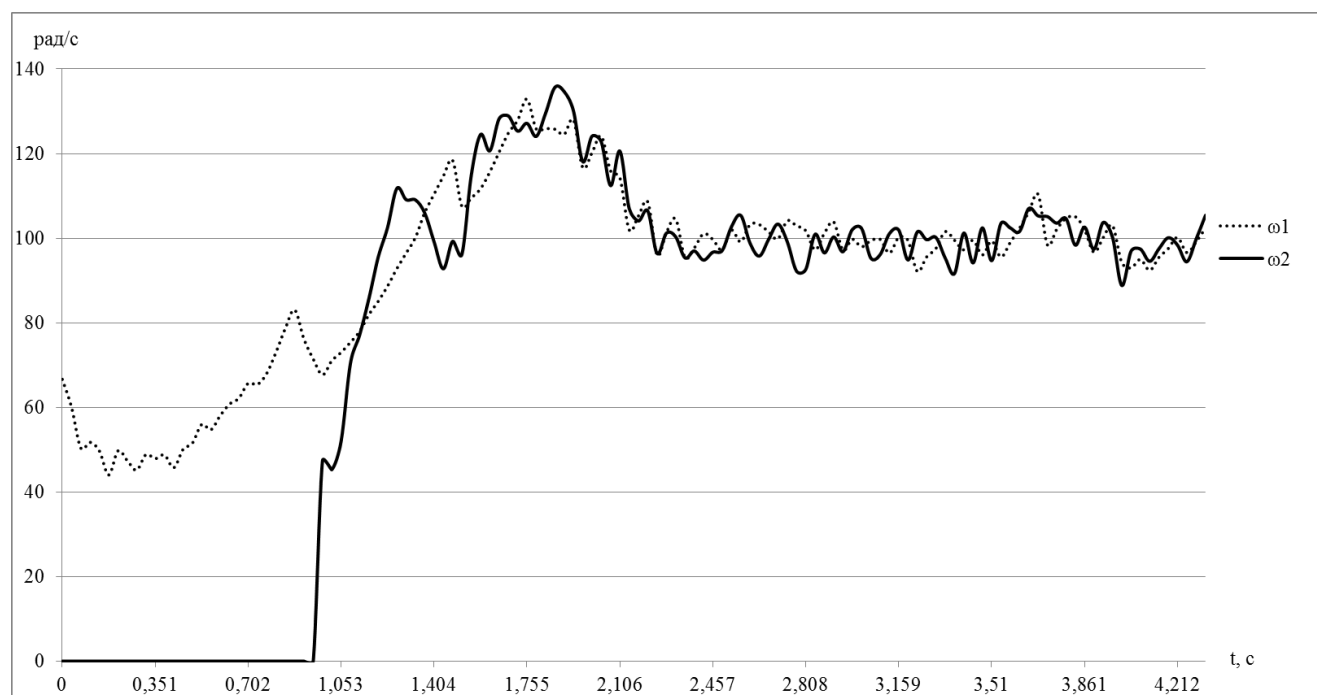


Рисунок 4.10 – Скорость ротора электродвигателя (ω_1) и приведенная скорость груза (ω_2)

На рисунке 4.9 наблюдаются снижение динамической нагрузки подъемного каната на 38%. На рисунке 4.10 переходный процесс по скоро-

сти второй массы имеет перерегулирование 36%. Таким образом, работа алгоритма управления скоростью второй массы (груза) с подчиненным РУМ, в режиме работы «с подхватом», обеспечивает подъем груза с меньшими динамическими усилиями переменного характера в трансмиссии (подъемном канате), что способствует снижению интенсивности её усталостного разрушения.

На рисунках 4.11 и 4.12 приведен переходный процесс при работе регулятора скорости, полученного по методу АКАР. Постоянные времени имели следующие значения: $T_1 = 0,012$ с; $T_2 = 0,2$ с; $T_3 = 0,1$ с.

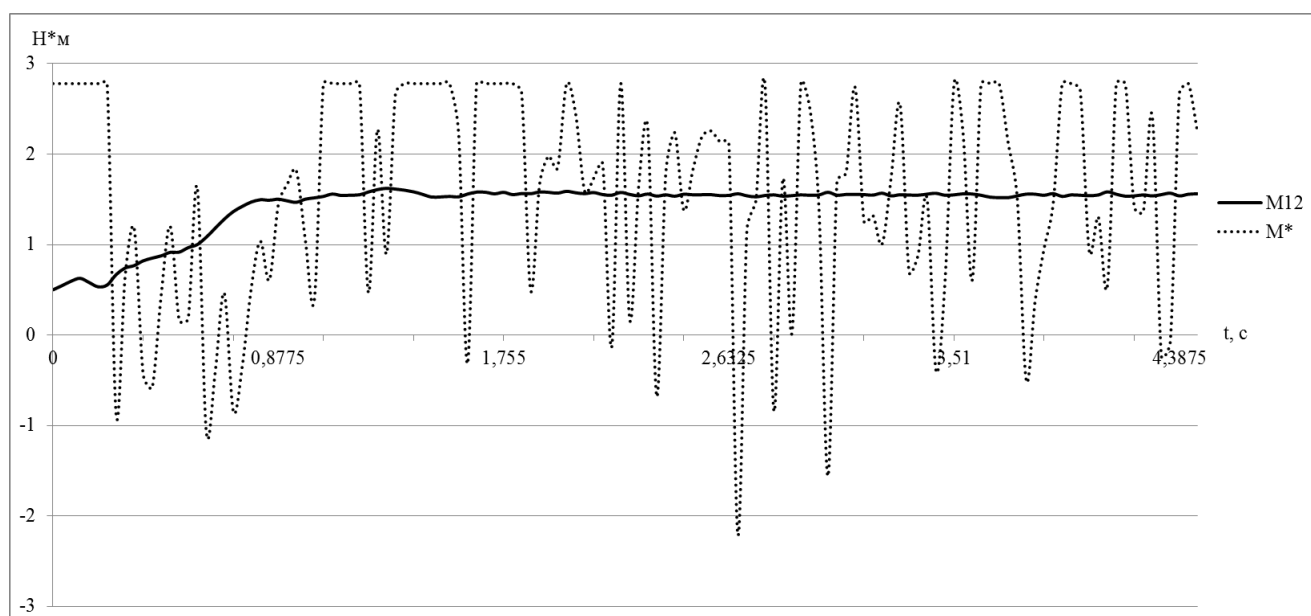


Рисунок 4.11 – Момент в трансмиссии ($M12$) и задание электромагнитного момента, вычисленное системой управления (M^*)

На рисунке 4.11 переходный процесс имеет приближенно апериодический характер, без значительных колебаний момента в трансмиссии. На этапе разгона второй массы колебания момента в трансмиссии отсутствуют. Скорость достигает установившегося значения без перерегулирования.

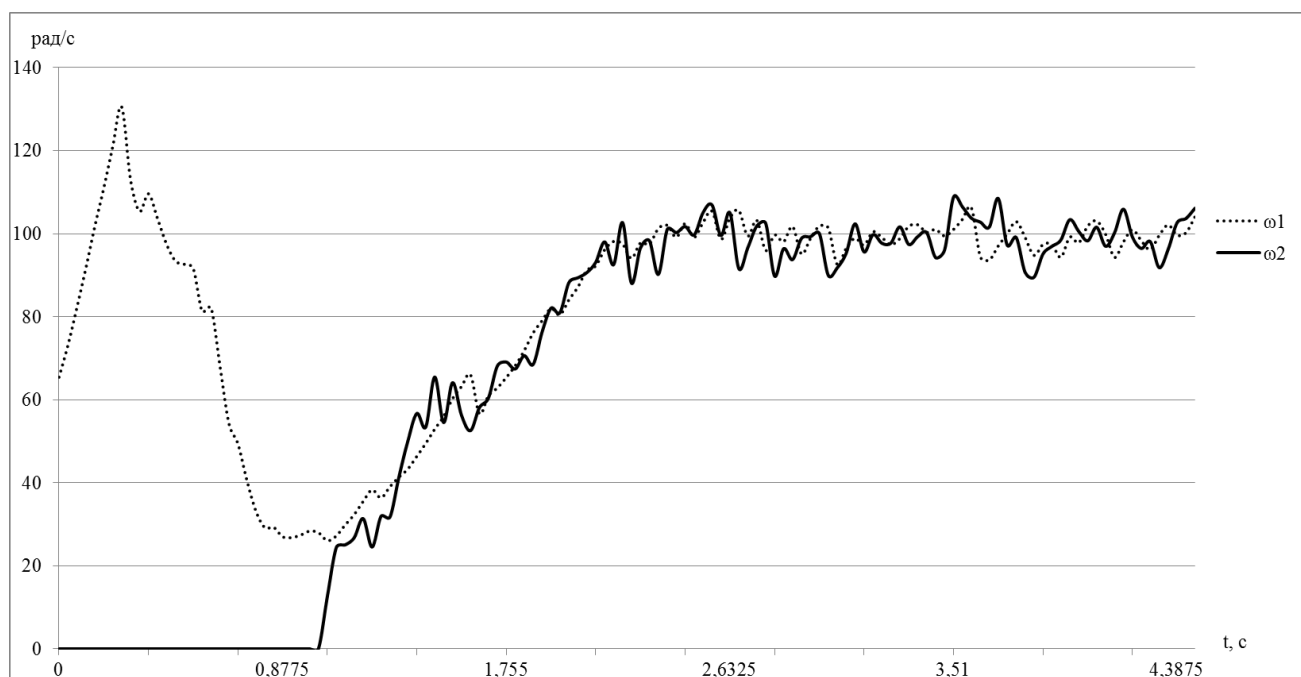


Рисунок 4.12 – Скорость ротора электродвигателя (ω_1) и приведенная скорость груза (ω_2)

Таким образом, работа алгоритма управления скоростью второй массы (груза), полученного методом АКАР в режиме работы «с подхватом», обеспечивает полное устранение динамических усилий переменного характера в трансмиссии (подъемном канате), что способствует снижению интенсивности её усталостного разрушения, а также обеспечивает достижение заданного значения скорости без перерегулирования, что соотносится с результатами, полученными при моделировании. В результате анализа экспериментальных данных работы двух алгоритмов управления скоростью груза, лучшими показателями переходного процесса обладает алгоритм, полученный методом АКАР, поэтому рекомендуется для практического внедрения использовать именно его.

4.3 Выводы по разделу

Спроектированная и изготовленная экспериментальная установка является физической моделью привода подъема крана. Установка поз-

воляет проводить экспериментальные исследования в различных режимах работы (подъем «с подхватом», подъем «с веса», спуск груза, стопорение крюкового подвеса), а также изучать функционирование системы управления с разными алгоритмами. Применение управляющего микроконтроллера позволяет достаточно просто изменять формируемое управляющее воздействие с помощью модификации выполняемого программного кода. В ходе наладки удалось получить колебательный переходный процесс, аналогичный по своим характеристикам процессу, возникающему в реальном электроприводе подъема крана при подъеме груза «с подхватом». В ходе проведенных экспериментов были определены параметры установки, а также проверена работоспособность двух алгоритмов управления по снижению динамических нагрузок в режиме подъема «с подхватом»: алгоритма управления скоростью груза с подчиненным РУМ и алгоритма управления скоростью груза, синтезированного по методу АКАР. В результате анализа полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Результаты экспериментов соответствуют данным, полученным при моделировании в части характера переходных процессов.
2. Работа каждого алгоритма управления приводит к значительному снижению уровня динамических нагрузок в трансмиссии.
3. Лучшими показателями переходного процесса обладает алгоритм управления скоростью груза, полученный методом АКАР, поэтому для практического внедрения рекомендуется использовать именно его.

Заключение

Актуальность темы исследования определяется следующими основными факторами:

1. Необходимость повышения конкурентоспособности российских кранов как на внутреннем, так и на мировом рынке. Данный тезис закреплён в стратегии развития тяжелого машиностроения на период до 2020 года принятой министерством промышленности и торговли Российской Федерации.
2. В режиме работы «с подхватом» на элементы электропривода подъема наиболее часто действуют максимальные динамические нагрузки, способствующие интенсивному накоплению усталостных повреждений и снижающие долговечность работы крана.
3. При подъеме груза «с подхватом» увеличивается вероятность обрыва каната, что снижает безопасность проведения подъемно-транспортных работ.
4. Так как подъемный канат является упругой связью одностороннего действия, то на больших скоростях подъема в режиме «с подхватом» может наблюдаться явление «подскока» груза, приводящее к нарушению нормальной работы подъемного механизма, иногда с аварийными последствиями.

Проведенные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать следующие основные результаты:

1. Получена зависимость для определения максимальной скорости устранения провисания каната, величина которой, в случае стопорения крюкового подвеса, будет гарантировать усилие в канате не более заданного уровня. Выражение для расчета максимальной скорости устранения провисания учитывает тормоз-

ной момент электродвигателя, который способствует повышению значения скорости.

2. Предложенная непрерывная нелинейная математическая модель усилия в канате, аппроксимирует канат как упругую связь одностороннего действия и позволяет находить её дифференциал на всем множестве допустимых значений переменных. Указанная модель имеет погрешность по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией, а величина погрешности зависит от настроечного параметра модели. Применение нелинейной модели может быть использовано для описания процессов различных механических систем, имеющих кинематические связи в виде канатов, а также при построении регуляторов подобных механических систем по методу АКАР.
3. Получен алгоритм управления скоростью груза с подчиненным РУМ. Результаты моделирования работы алгоритма в режиме «с подхватом», для крана грузоподъемностью 3,2 тонны и высотой подъема до 16 м, показали снижение величины динамической нагрузки подъемного каната на 98%, при этом переходный процесс по скорости носит колебательный характер с перерегулированием 41%. При экспериментальном исследовании на физической модели удалось получить снижение динамической нагрузки на 38% и переходный процесс по скорости с перерегулированием 36%. Теоретический расчет показал, что в случае снижения динамической нагрузки подъемного каната на 98%, его предел выносливости увеличится в 1,78 раз, а также увеличится запас прочности каната в 3,17 раза.
4. Получен алгоритм управления скоростью груза по методу АКАР в режиме работы «с подхватом». Результаты моделирования работы алгоритма в режиме «с подхватом», для крана грузоподъемностью 3,2 тонны и высотой подъема до 16 м, по-

казали полное устранение динамических усилий переменного характера в подъемном канате, при этом переходный процесс по скорости носит апериодический характер. При экспериментальном исследовании удалось получить апериодический переходный процесс нарастания усилия в трансмиссии, а также переходный процесс по скорости без перерегулирования. Теоретический расчет показал, что при полученном уровне снижения динамической нагрузки подъемного каната, его предел выносливости увеличится в 1,81 раза, а запас прочности – в 3,26 раза.

5. Теоретически рассчитанный максимальный экономический эффект от внедрения предложенных алгоритмов управления составляет 44% от затрат, связанных с эксплуатацией подъемного каната в случае, если привод подъема будет работать с грузами, масса которых равна грузоподъемности крана. При работе с грузами меньшей массы величина экономического эффекта будет снижена.
6. Спроектирована и изготовлена физическая модель электропривода подъема крана. Модель позволяет проводить экспериментальные исследования в различных режимах работы (подъем «с подхватом», подъем «с веса», спуск груза, стопорение крюкового подвеса), а также изучать функционирование системы управления с разными алгоритмами. Применение управляющего микроконтроллера позволяет достаточно просто изменять формируемое управляющее воздействие с помощью модификации выполняемого программного кода.

В данной научно-квалификационной работе получены алгоритмы управления электроприводом подъема крана существенно снижающие уровень динамических нагрузок на подъемный канат в режиме «с подхватом». Результаты исследования могут быть использованы для уве-

личения долговечности крана и повышения безопасности ведения подъемно-транспортных работ.

Список литературы

1. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens-Zeitschrift. – 1971. – Bd.45. – H.10. – S. 757 – 760.
2. Direkt Torque Control of AC motor drivers. M. Aaltonen, P. Tiitinen, J. Laku. S. Heikkilä // ABB Review – 1995. – №3. – pp. 19–24.
3. Адкинс, В.А. Общая теория электрических машин [Текст] / В.А. Адкинс; пер. с англ. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 272 с.
4. Александров М.П. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов [Текст] / М.П. Александров, М.М. Гохберг, А.А. Ковин и др. – Л.: Машино-строение. Ленинградское отделение, 1988. – 559 с.
5. Аппель П. Теоретическая механика, том 1: Статика. Динамика точки [Текст]. – М.: "Физматгиз", 1960, – 515 с.
6. Балюта С.Н. Синтез робастного управления скоростью двух-массовой электромеханической системы [Текст] / Балюта С.Н., Никитина Т.Б., Копылова Л.А., Татарченко М.О. // Прогрессивные технологии и системы. / ДНТУ. – Донецк, 2013. – №1. – С. 16–24.
7. Башарин, А.В. Управление электроприводами [Текст] / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – М.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
8. Борцов Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным модальным управлением [Текст] / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.

9. Виноградов А.Б., Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов [Текст] / А.Б. Виноградов, С.В. Журавлев, А.Н. Сибирцев // Силовая электроника. – 2007. №1. – С. 78–84.
10. Вишнеревский В.Т. Анализ способов построения замкнутых систем управления электроприводами, содержащими упругие элементы в механической подсистеме [Текст] / В.Т. Вишнеревский, К.В. Овсянников, Г.С. Леневский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 119–125.
11. Вольдек А.И. Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек. – М.: Энергия, 1974. – 340 с.
12. Гаращук Г.Н. Основы расчета деталей машин на прочность: учебное пособие [Текст] / Г.Н. Гаращук, В.А. Литвинова. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. – 92 с.
13. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем [Текст] / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещев. – Одесса: СНИЛ, 2008. – 192 с.
14. Герасимьяк Р.П. Анализ поведения электромеханической системы с двухмассовой механической частью [Текст] / Р.П. Герасимьяк, В.В. Субботин // Электротехн. и компьют. системы. – 2012. – № 8. – С. 17–23.
15. Герасимьяк Р.П. Электроприводы крановых механизмов [Текст] / Р.П. Герасимьяк, В.А. Параил. – М., «Энергия», 1970. – 136 с.
16. ГОСТ 13556-91. Краны башенные строительные. Общие технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 13556-85; введ. 25.12.91. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 52 с.
17. ГОСТ 22045-89. Краны мостовые электрические однобалочные опорные. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ

- 22045-82; введ. 01.01.91. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 27 с.
18. ГОСТ 22827-85. Краны стреловые самоходные общего назначения. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 22827-77; введ. 01.01.87. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 20 с.
19. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения [Текст]. – введ. 01.01.79. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 48 с.
20. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости [Текст]. – введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 55 с.
21. ГОСТ 25711-83. Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т [Текст]. – введ. 12.04.83. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 20 с.
22. ГОСТ 2688-80. Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6х19(1+6+6/6)+1 о. с. [Текст]. – Взамен ГОСТ 2688-69; введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 15 с.
23. ГОСТ 29168-91. Подъемники мачтовые грузовые строительные. Технические условия [Текст]. – введ. 01.07.92. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
24. ГОСТ 7352-88. Краны козловые электрические. Типы [Текст]. – Взамен ГОСТ 7352-81; введ. 01.01.87. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 14 с.
25. Григорьев А.В. Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 1) [Текст] / А.В. Григорьев // Вестник КузГТУ. – 2012. – №2. – С. 53-58.
26. Григорьев А.В. Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 2) [Текст] / А.В. Григорьев // Вестник КузГТУ. – 2012. – №3. – С. 136-138.

27. Григорьев А.В. Оптимальное управление координатами асинхронного электродвигателя [Текст] / А.В. Григорьев // Вестник КузГТУ. – 2008. – №6. – С. 29-32.
28. Григорьев А.В. Управление моментом и потоком электрической машины переменного тока [Текст] / А.В. Григорьев // Вестник КузГТУ. – 2008. – №2. – С. 64-67.
29. Грузоподъемные машины [Текст]: Учебник для вузов по специальности "Подъемно-транспортные машины и оборудование" / М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
30. Завьялов В.М. Снижение динамических нагрузок в трансмиссиях горных машин [Текст]: монография / В.М. Завьялов – Кемерово: КузГТУ, 2008. – 172 с.
31. Завьялов В.М. Идентификация параметров и состояния электропривода подъема мостового крана [Текст] // В.М. Завьялов, А.В. Гусев, А.В. Киселёв // «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012»: материалы XI Международной научно-практической конференции, 1-2 ноября 2012 г./ КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 36–39
32. Завьялов В.М. Подавление упругих колебаний в горных машинах с двухмассовой расчетной схемой [Текст] // Вестн. КузГТУ. – 2005. – № 6. – С. 67-69.
33. Зайцев А.В. Асинхронный электропривод подъемно-транспортных машин: учебн. Пособие [Текст] / А.В. Зайцев. – Саратов: СООО «АН ВЭ», 2011. – 258 с.
34. Здрозис К.П. Повышение качества электромеханических систем с регулируемым асинхронным электроприводом [Электронный ресурс]. URL: http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/emeo/ee_55/7.html (дата обращения 14.01.2017).

35. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины [Текст] / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
36. Изосимов Д.Б. Алгоритмы векторной широтно-импульсной модуляции трехфазного автономного инвертора напряжения [Текст] / Д.Б. Изосимов и др. // Электротехника. – 2004. – №4. – С. 21–31.
37. Изосимов Д.Б. Симплексные алгоритмы управления трехфазным автономным инвертором напряжения с ШИМ [Текст] / Д.Б. Изосимов и др. // Электротехника – 1993. – №12. – С. 14–20.
38. Казак С.А. Динамика мостовых кранов [Текст]. – М.: Машиностроение, 1968. – 331 с.
39. Казаков В.П. Сравнительный анализ аналитического и нейросетевого алгоритмов управления двухмассовым упругим объектом [Текст] / В.П. Казаков, А.В. Путов // Навигация и управление движением: материалы IX конференции молодых ученых. 13-15 марта 2007 г./ ЛЭТИ. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 67 – 74.
40. Калачев Ю.Н. Преобразователи частоты в электроприводе подъемно-транспортного оборудования [Электронный ресурс] URL: http://www.privod-news.ru/october_02/18-4.htm (дата обращения 14.01.2017).
41. Калачев Ю.Н. Управляемый асинхронный электропривод [Электронный ресурс]. URL: http://www.privod.ru/stat_kalchev.htm (дата обращения 14.01.2017).
42. Карлов Б. Современные преобразователи частоты: методы управления и аппаратная реализация [Текст] / Б. Карлов, Е. Есин // Силовая электроника. №1. 2004. С. 50–54.

43. Ключев В.И. Теория электропривода [Текст]: учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
44. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [Текст]: Учебник для вузов / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
45. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода [Текст] / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
46. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст]. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
47. Колесников А.А. Синергетическая теория управления [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
48. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин [Текст] / М.С. Комаров. 2-е изд., перераб. и доп. – М.; Киев: Машгиз, 1962. – 267 с.
49. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
50. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы: пер. с англ. [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – 5-е изд., перевод со 2-го американского переработанного издания. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
51. Корниенко С.В. Математическое описание электромеханической системы подъема груза башенным краном [Текст] / С.В. Корниенко // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика. – 2013. – Вип. 1. – С. 114–117.
52. Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления электроприводами подъемно-транспортных

- механизмов: автореферат [Текст] / Д.А. Котин. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 20 с.
53. Кочнева Т.Н. Синтез модального регулятора и оценка эффективности модального управления для двухмассовых электромеханических систем // Вестник Череповецкого государственного университета [Текст] / Т.Н. Кочнева, А.В. Кожевников, Н.В. Кочнев. Научный журнал. – Череповец: ФБГОУ ВПО ЧГУ. Т.2. – 2013. – № 4 (52). – С. 15–22.
54. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: Учебник для ВУЗов. – М: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.
55. Кузнецов М.С. Пространственно-векторная модуляция напряжения в автономных инверторах с учетом программной реализации системы управления [Текст] // Информационные технологии моделирования и управления. – 2006. – №9(34). – С. 1204–1210.
56. Кузнецов, А.П. Интеллектуальные алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами [Текст] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011): материалы Междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 10-12 февраля 2011г.) / редкол.: В. В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 493–504.
57. Кузовков Н.Г. Модальное управление и наблюдающие устройства [Текст] / Н.Г. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
58. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных кранов [Текст] / Н.А. Лобов – М.: Машиностроение, 1987. – 157 с.
59. Логвиненко Е.С. Повышение качества переходных процессов сложных электромеханических систем крановых механизмов

- [Текст]: Дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Одесский национальный политехнический ун-т. – О., 2003. – 129 с.
60. Логвиненко Е.С. Синтез модального регулятора трехмассовой электромеханической системы в пакетах simulink и control system toolbox [Электронный ресурс]. URL: http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/emeo/ee_62/14.pdf (дата обращения 14.01.2017).
 61. Макаров А.М. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока [Текст]: учеб. пособие / А.М. Макаров, А.С. Сергеев, Е.Г. Крылов, Ю.П. Сердобинцев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 192 с.
 62. Макаров В.Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения [Электронный ресурс] // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №6. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-asinhronnogo-elektroprivoda-i-metody-ih-resheniya> (дата обращения: 14.01.2017).
 63. Мархель И.И. Крановые канаты [Текст]: Пособие механику / И.И. Мархель. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 128 с.
 64. Масандилов Л.Б. Электропривод подъёмных кранов [Текст] / Л.Б. Масандилов. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 100 с.
 65. Мишаков В.В. Управление двухмассовыми электромеханическими системами в условиях параметрической неопределенности [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.13.01) / В.В. Мишаков; Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана – Тула, 2010. – 22 с.
 66. Мышляев Ю.И. Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределенности на основе

- настраиваемого скользящего режима [Текст] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №2. – С. 111–116.
67. Нгуен К.Ч. Разработка и сравнительное исследование адаптивных систем управления электроприводами с упругими и нелинейными свойствами [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.09.03) / Нгуен Кьем Чьен; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) – Санкт-Петербург, 2012. – 19 с.
68. Никитина Т.Б. Разработка и экспериментальное исследование стенда стохастической двухмассовой электромеханической системы / Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко // Вестник НТУ ХПИ. – 2013. – №19 (992) [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-eksperimentalnoe-issledovanie-stenda-stohasticheskoy-dvuhmassovoy-elektromehanicheskoy-sistemy> (дата обращения: 14.01.2017).
69. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах [Текст] / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
70. Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок [Текст] / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов, М.Н. Зарицкий, А.В. Куприков, А.И. Нитиевская. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
71. Панкратов В.В. Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники [Текст] // Силовая интеллектуальная электроника. – 2005. – №2. – С. 27–31.
72. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока [Текст] / В.М. Перельмутер. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.

73. Петров А.П. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением [Текст] / А.П. Петров, В.А. Ладензон и др. – М.: Энергия, 1977. – 200 с.
74. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах [Текст]. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
75. Попов Е.В. Проектирование электроприводов крановых механизмов [Текст] / Е. В. Попов Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №12, 2009. – 52 с.
76. Пуртова Е.С. Наблюдающее устройство полного порядка для трехмассовой электромеханической системы [Электронный ресурс]. http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/emeo/ee_55/6.html (дата обращения 14.01.2017).
77. Пуртова Е.С. Оптимизация качества переходных процессов трехмассовой электромеханической системы [Электронный ресурс]. URL: http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/emeo/ee_58/Pyrtova/Pyrtova.htm (дата обращения 14.01.2017).
78. Пуртова Е.С. Синтез редуцированного наблюдающего устройства для трехмассовой электромеханической систем [Электронный ресурс]. http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/emeo/ee_57/5.htm (дата обращения 14.01.2017).
79. Расчеты крановых механизмов и их деталей [Текст]: В 2-х т. Т.1. / Под ред. Р.А. Лалаянца. – М.: ВНИИПТМаш, 1993. – 187 с.
80. Ребенков Е.С. Синтез цифрового регулятора многомассового электропривода с упругими связями [Текст] / Е.С. Ребенков //

Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. / ТГУ. – Тула, 2014. – №2. – С. 225–231.

81. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями [Текст] / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
82. Синергетика: процессы самоорганизации и управления. В 2 ч. [Текст] / Под общ. Ред. А. А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – Ч. I. – 360 с.
83. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления [Текст] / Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТГУ, Ч II, 2000. – 559 с.
84. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
85. Степанов А.Г. Динамика машин [Текст] / А.Г. Степанов, Рос. акад. наук. Уральское отделение. Горный институт. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН (УрО РАН), 1999. – 391 с.
86. Терехов В.М. Системы управления электроприводов [Текст]: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: 2005. – 304 с.
87. Терехов В.М. Современные способы управления и их применение в электроприводе [Текст] / В.М. Терехов // Электротехника. – 2000. – №2. – С. 25–31.
88. Теряев Е. Модернизация электрооборудования крановых механизмов [Текст] / Е. Тетяев // РСП ЭКСПЕРТ. – 2013. – №1. С. 22–23.

89. Тетяев Е. Частотно регулируемый электропривод крановых механизмов [Текст] / Тетяев Е., Волегов А., Таран А. // Силовая электроника. – 2007. – №4(14). – С. 40–42.
90. Трещев, И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока [Текст] / И.И. Трещев. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.
91. Тютиков В.В. Подчиненное регулирование координат электромеханических систем на базе метода АКАР [Текст] / В.В. Тютиков., А.И. Воронин // Известия ЮФУ. Технические науки. / ЮФУ. – Таганрог, 2010. – №5. – С. 155–164.
92. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями [Текст]: Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
93. Усольцев А.А. Электрический привод [Текст] / Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 238 с.
94. Хакен Г. Синергетика [Текст]. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
95. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода [Текст] / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандле. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
96. Швачунов А.С. Исследование состояния полиспастной системы при подъеме груза во время обрыва каната [Текст] / А.С. Швачунов, Н.Ю. Дорохов, А.В. Периг, А.Н. Стадник // Подъемно-транспортная техника. – 2014. – № 2. – С. 63–70.
97. Шеффлер М. Грузоподъемные краны: в 2-х кн. Кн. 2 [Текст] / М. Шеффлер, Х. Дресиг, Ф. Курт. Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1981. – 287 с.
98. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст]. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

99. Яуре А.Г. Крановый электропривод [Текст]: Справочник / А.Г. Яуре, Е.Я. Певзнер. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.