На правах рукописи

Typul

B recaso (14.03.17

#### ГУСЕВ Алексей Владимирович

# АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОДЪЕМА КРАНА В РЕЖИМЕ «С ПОДХВАТОМ»

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

# АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, **Завьялов Валерий Михайлович.** 

Официальные оппоненты:

**Мещеряков Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой электропривода;

**Орлов Юрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», доцент кафедры общей электротехники и автоматики.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск).

Защита состоится «25» мая 2017 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 58-33-80, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте:

http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2017/gus/Dissertation.pdf

Авто	ped	рерат	разослан	<b>(( )</b>	>	2017 г

Ученый секретарь диссертационного совета

Семыкина Ирина Юрьевна

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 транспортнологистических 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 подъема «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 «с подхватом», является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Изучением динамики крановых механизмов занимались такие ученые, как Герасимяк Р. П., д.т.н., профессор; Казак С. А., д.т.н., профессор, член Академии подъемнотранспортных 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 работы «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 долговечность 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 научнотехнической конференции, посвященной памяти Г. А. Сипайлова, (г. Томск, 2011 г.); Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012 (г. Кемерово, 2012 г.); ІХ Международной научно-практической конференции Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования (г. Вологда, 2014 г.); ІІ 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.

**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.

Соответствие Паспорту номенклатуры специальностей. Содержание диссертационной работы соответствует областям исследования 1 и 3 специальности 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы» Паспорта номенклатуры специальностей научных работников (технические науки).

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень её разработанности, определяются цели и задачи, описывается теоретическая и практическая значимость исследования.

Первая глава диссертации посвящена анализу вариантов снижения динамических нагрузок в режиме работы «с подхватом». В результате проведенного обзора делается вывод о том, что 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.

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 подъемно-транспортных работ и увеличивает количество отказов. Для устранения негативного влияния режима работы «с подхватом», система управления приводом подъема крана должна обеспечивать снижение 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 случае стопорения крюкового подвеса. Поэтому, система управления должна обеспечивать поддержание заданной скорости подъема с одновременным ограничением скорости устранения провисания каната.

Вторая глава диссертации посвящена выбору математической модели электромеханической системы, определению требований к системе управления и формированию необходимой структуры электропривода. В структуре электропривода выделены электрическая и механическая подсистемы. За основу электрической подсистемы принят асинхронный электродвигатель (АД), питающийся от автономного инвертора напряжения (АИН) с векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В качестве математической модели АД рассматривается модель, основанная на базе двухфазной обобщенной электрической машины, представленная в неподвижной системе координат α-β (1). Модель АД идеализирована и построена с учетом общеизвестных допущений.

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

где  $u_{I\alpha}$ ,  $u_{I\beta}$  — составляющие вектора напряжения статора, B;  $\psi_{I\alpha}$ ,  $\psi_{I\beta}$ ,  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\psi_{2\beta}$  — составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора соответственно, B6;  $R_1$ ,  $R_2$  — активные сопротивления статора и ротора, Oм;  $L_1 = L_{\sigma I} - L_m$ ,  $L_2 = L_{\sigma 2} - L_m$  — полные индуктивности обмоток статора и ротора, Гн;  $L_{\sigma I}$ ,  $L_{\sigma 2}$  — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора, Гн;  $L_m$  — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, Гн;  $\omega$  — угловая скорость вала двигателя, рад/с; p — число пар полюсов; M — электромагнитный момент, H · м.

Механическая подсистема привода подъема предназначена для передачи механической энергии от вала двигателя к грузовому крюку. Типовая кинематическая схема привода подъема крана представлена на рисунке 1. При рассмотрении механической подсистемы привода подъема, для построения математической модели, были сделаны следующие допущения:

- 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. Механические связи от вала электродвигателя до вала барабана принимаются абсолютно жесткими.

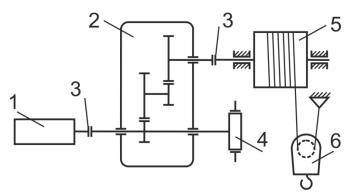


Рисунок 1 — Типовая кинематическая схема привода подъема крана

- 4. Все имеющиеся в механической подсистеме потери, учитываются путем введения момента сопротивления первой массы.
- 5. Потери от сил трения в блоках полиспаста и на вязкое трение в канате не учитываются.
- 6. Масса каната не учитывается, а деформация его линейна с величиной жесткости, зависящей от длины каната.

На рисунке 1 приняты следую-

щие обозначения: 1 — ротор электродвигателя, 2 — редуктор, 3 — муфта, 4 — механический тормоз, 5 — канатный барабан, 6 — крюковой подвес.

Математическая модель механической подсистемы электропривода подъема крана с учетом приведенных допущений и нелинейности передаваемого канатом усилия, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{1} = \frac{1}{J_{1}}(M - M_{C1} - M_{12}); \\ \dot{\omega}_{2} = \frac{1}{J_{2}}(M_{12} - M_{C2}); \\ \dot{\varphi}_{1} = \omega_{1}; \\ \dot{\varphi}_{2} = \omega_{2}; \\ \dot{M}_{12} = 0, \qquad \text{при } \varphi_{1} \leq \varphi_{2}; \\ \dot{M}_{12} = C_{12}(L_{k})(\omega_{1} - \omega_{2}) \text{ при } \varphi_{1} > \varphi_{2}, \end{cases}$$

$$(2)$$

где  $\varphi_1, \varphi_2$  — соответственно угловые положения первой и второй массы, рад;  $\omega_1, \omega_2$  — соответственно угловые скорости первой и второй массы, рад/с;  $J_1, J_2$  — соответственно моменты инерции первой и второй массы, кг · м²;  $M, M_{12}, M_{C1}, M_{C2}$  — соответственно электромагнитный момент двигателя, момент приближенно эквивалентный упругому усилию в канате, момент сопротивления первой массы, момент сопротивления второй массы,  $H \cdot M$ ;  $C_{12}(L_k)$  — приведенная жесткость каната в зависимости от его длины,  $H \cdot M$ /рад;  $L_k$  — длина каната, м. Параметры всех элементов механической подсистемы приводятся к валу двигателя.

Момент сопротивления, действующий на вторую массу, имеет нелинейный характер. Поэтому 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 массой груза. В случае, когда груз поднят над опорой,  $M_{C2}$  имеет активный харак-

тер, т. е. препятствует поднятию груза вверх и способствует опусканию груза вниз.

**Третья глава** диссертации посвящена разработке концепции управления, модификации модели механической подсистемы, определению зависимости для расчета максимально допустимой скорости устранения провисания каната, разработке алгоритма управления скоростью подъема груза на основе ПИ-регулятора с подчиненным регулятором упругого момента (РУМ), разработке алгоритма управления скоростью подъема груза по методу АКАР, оценке влияния снижения уровня динамической нагруженности каната, а также оценке экономической эффективности внедрения разработанных алгоритмов управления.

В данной научной работе концепция управления заключается в построении алгоритмов управления приводом подъема на основе метода АКАР, для применения которого необходимо заменить непрерывную кусочно-линейную аппроксимацию усилия в канате от взаимного положения двух масс на непрерывную нелинейную функцию. В результате анализа различных функциональных зависимостей, предлагается аппроксимировать усилие в канате композицией функций вида:

$$M_{12} = \frac{C_{12}(L_k)}{a} \ln(e^{a(\varphi_1 - \varphi_2)} + 1) = \frac{C_{12}(L_k)}{a} \ln(e^{a\Delta(\varphi)} + 1), \tag{3}$$

где a — настроечный параметр. На рисунке 2 представлены графики зависимостей  $M_{12} = \mathrm{f}(\Delta(\varphi))$  согласно выражению (3) при различных значениях параметра a. Анализируя графики, можно констатировать, что нелинейная зависимость (3) аппроксимирует момент в трансмиссии с погрешностью от-

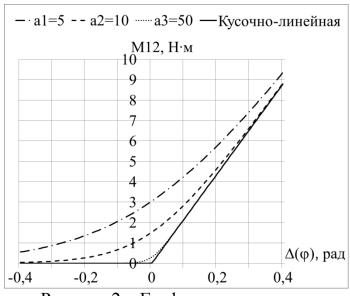


Рисунок 2 – Графики зависимости  $M_{12}=\mathrm{f}(\Delta(\varphi))$  при  $C_{12}=22~\mathrm{H}\cdot\mathrm{m/pag}$  и параметре a1=5, a2=10, a3=50

кусочно-линейной носительно Максимальная аппроксимации. погрешность аппроксимации присутствует в точке  $\Delta(\varphi) = 0$ , которая соответствует ненатянутому канату. Величина погрешности уменьшается ПО натяжения каната и зависит от настроечного параметра а и приведенной жесткости каната  $C_{12}(L_k)$ .

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. С другой стороны, малая скорость устранения провисания каната снижает производительность крана. Исходя из вышесказанного, используя энергетические характеристики механической подсистемы, была определена зависимость для вычисления величины максимальной скорости устранения провисания каната. В случае необходимости ограничения усилия в канате при стопорении, приложение максимального тормозного электромагнитного момента  $M_{Tmax}$  приведет к повороту вала электродвигателя на угол  $\Delta \phi_1^{\rm orp}$ , рад:

$$\Delta \varphi_1^{\text{orp}} = \frac{M_{12max}^{\text{доп}} - M_{12min}^{\text{orp}}}{C_{12}},\tag{4}$$

где  $M_{12max}^{\text{доп}}$  — максимальный момент в трансмиссии, приближенно эквивалентный максимальному натяжению каната,  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{m}$ ;  $M_{12min}^{\text{огр}}$  — минимальный момент в трансмиссии, определяющий начало режима ограничения,  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{m}$ ;  $C_{12}$  — приведенная жесткость каната,  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{m}$ /рад. При достижении максимального натяжения вал двигателя провернется на угол  $\Delta \phi_{12max}$ , рад:

$$\Delta \varphi_{12max} = \frac{M_{12max}^{\text{Jon}}}{C_{12}}.$$
 (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:

$$\frac{J_1 \omega_{1max}^2}{2} = \frac{C_{12} \Delta \varphi_{12max}^2}{2} + \frac{M_{Tmax} \Delta \varphi_1^{\text{orp}}}{2},\tag{6}$$

где  $\omega_{1max}$  — максимальная скорость устранения провисания, рад/с;  $M_{Tmax}$  — максимальный тормозной момент двигателя, Н · м. На основании выражения (6) можно определить максимальную скорость устранения провисания каната, обеспечивающую ограничение упругого момента на уровне  $M_{12max}^{\text{доп}}$ :

$$\omega_{1max} = \sqrt{\frac{M_{12max}^{\text{don}} \Delta \varphi_{12max} + M_{Tmax} \Delta \varphi_{1}^{\text{orp}}}{J_{1}}}.$$
 (7)

Таким образом, задаваясь значениями величин  $M_{12max}^{\text{доп}}, M_{12min}^{\text{огр}}, M_{Tmax}$  можно определить величину максимальной скорости устранения провисания.

На основании моделей электрической и механической подсистем электропривода подъема были получены переходные процессы в режиме работы «с подхватом». На рисунке 3 приведен переходный процесс электропривода подъема при прямом управлении моментом и стабилизации скорости  $\omega_1$ . При моделировании были использованы параметры асинхронного кранового электродвигателя МТВ 312-6 ( $P_H$ =16 кВт;  $n_H$ =960 об/мин). В модели механической подсистемы использовались параметры привода подъема мостового крана двухбалочного опорного, грузоподъёмностью 3,2 тонны и высотой

подъёма 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  $\pm 100$  H · м.

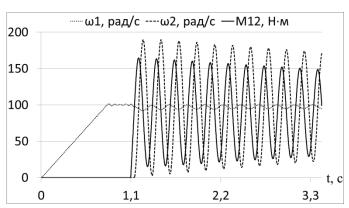


Рисунок 3 – Переходный процесс привода подъема при прямом управлении моментом и регулировании ω<sub>1</sub>

Для снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом» необходимо уменьшить, а как максимум устранить колебания  $M_{12}$  средствами системы управления, а именно, путем формирования величины и характера электромагнитного момента по некоторому алгоритму, одновременно обеспечивая заданную скорость подъема (или опускания) груза. Для снижения динамических нагрузок в режиме «с подхватом» было синтези-

ровано управление приводом подъема на основе ПИ-регулятора скорости с подчиненным РУМ. Система управления приводом подъема построена в соответствие со структурной схемой, представленной на рисунке 4.

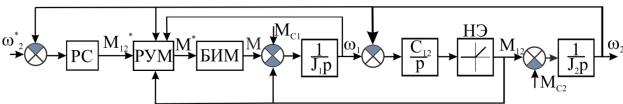


Рисунок 4 – Структурная схема с ПИ-регулятором скорости и РУМ

Обозначения, принятые на рисунке 4: PC — ПИ-регулятор скорости, РУМ — регулятор упругого момента, БИМ — безынерционный источник момента. Алгоритм функционирования РУМ, полученный методом АКАР, имеет вид:

$$M^* = M_{12} + M_{C1} + \frac{J_1}{J_2} (M_{12} - M_{C2}) -$$

$$-J_1(\omega_1 - \omega_2) \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} - ae^{-a\Delta(\varphi)} \frac{(M_{12} - M_{12}^*)}{T_1 C_{12}} \right) -$$

$$-\frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}} \tau(\varphi) (M_{12} - M_{12}^*)$$
где  $M^*_{12}$  – задание для РУМ, H·м;  $M^*$  – требуемое значение электромагнит-

где  $M^*_{I2}$  — задание для РУМ, Н · м;  $M^*$  — требуемое значение электромагнитного момента, Н · м;  $\tau(\varphi) = (1 + e^{-a\Delta(\varphi)})$  — функция, учитывающая нелинейный характер передачи усилия канатом;  $T_I$ ,  $T_2$  — постоянные времени РУМ, с.

Структурную схему рисунка 4 целесообразно привести к упрощенному

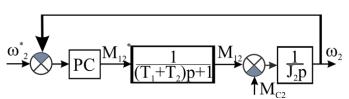


Рисунок 5 – Упрощенная структурная схема привода подъема

виду, изображенному на рисунке 5. На упрощенной схеме РУМ совместно с БИМ, а также первой массой механической подсистемы, представлены 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  $M_{12}$ . Для уменьшения времени переходного процесса выберем настройку ПИ-регулятора на симметричный оптимум. В качестве некомпенсируемой инерционности принята сумма постоянных времени РУМ ( $T_1 + T_2$ ). В результате передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{PC}}^{\text{CO}} = \frac{J_2}{2(T_1 + T_2)} \left( 1 + \frac{1}{4(T_1 + T_2)p} \right). \tag{9}$$

Моделирование работы полученного алгоритма управления скоростью груза (второй массы) с подчиненным РУМ производилось для того же мостового крана, что и ранее. 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  $\pm 200$  H·м. На рисунках 6 и 7 приведены результаты моделирования.

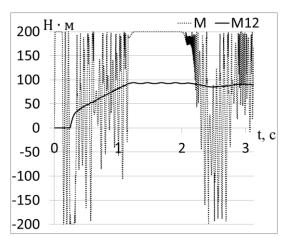


Рисунок 6 — Переходный процесс электромагнитного момента (M) и момента в трансмиссии  $(M_{12})$  при моделировании работы ПИрегулятора скорости с подчиненным РУМ

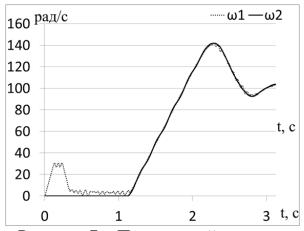


Рисунок 7 — Переходный процесс скорости первой  $(\omega_1)$  и второй массы  $(\omega_2)$  при моделировании работы ПИ-регулятора скорости с подчиненным РУМ

Анализ рисунков 6 и 7 показывает, что 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 5), является допустимым при синтезе управления. Таким образом, алгоритм управления скоростью с подчиненным РУМ, в режиме работы «с подхватом», обеспечивает устранение провисания каната на малой скорости, достижение заданной скорости подъема и способствует снижению динамической нагрузки подъемного каната на 98%.

Рассмотрим построение регулятора скорости на основе метода АКАР, применительно к структуре системы управления, приведенной на рисунке 8: электрическая подсистема привода представлена как БИМ, что позволяет осуществлять синтез регулятора скорости (РС), основываясь только на математической модели механической подсистемы.

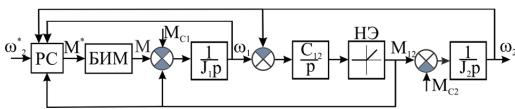


Рисунок 8 – Структурная схема электропривода подъема крана

Алгоритм функционирования регулятора скорости, полученный методом АКАР, имеет вид:

$$\begin{split} &M^{*} = \\ &= M_{12} + M_{C1} + \left[ \frac{1}{J_{2}} - \frac{\tau(\varphi)}{T_{1}T_{2}C_{12}} \right] J_{1}(M_{12} - M_{C2}) - J_{1}(\omega_{1} - \omega_{2}) \times \\ &\times \left[ \frac{-ae^{-a\Delta(\varphi)}}{T_{1}T_{2}C_{12}} \Theta(M_{12}, \omega_{2}) + \frac{1}{T_{1}} + \frac{1}{T_{2}} + \frac{1}{T_{3}} \right] - \frac{J_{1}\tau(\varphi)}{T_{1}T_{2}T_{3}C_{12}} \Theta(M_{12}, \omega_{2}), \end{split}$$
(10)

где  $\Theta(M_{12},\omega_2)=(T_1+T_2)(M_{12}-M_{C2})+J_2(\omega_2-\omega_2^*)$ ,  $H\cdot M\cdot c$ ;  $M^*$  — требуемое значение электромагнитного момента,  $H\cdot M$ ;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  — постоянные времени регулятора, c;  $\omega_2^*$  — задание скорости, рад/c.

Моделирование работы алгоритма управления скоростью груза (второй массы), полученного методом АКАР, производилось для того же привода подъема, что и ранее. 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  $\pm 200$  Н · м. На рисунках 9 и 10 приведены результаты моделирования. Анализ рисунков показывает, что

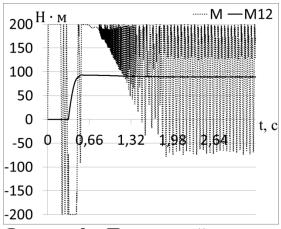


Рисунок 9 — Переходный процесс электромагнитного момента (M) и момента в трансмиссии  $(M_{12})$  при моделировании работы алгоритма регулятора скорости, полученного методом АКАР

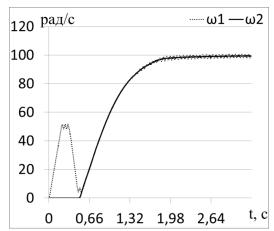


Рисунок 10 — Переходный процесс скорости первой ( $\omega_1$ ) и второй ( $\omega_2$ ) массы при моделировании работы алгоритма регулятора скорости, полученного методом АКАР

после устранения провисания происходит апериодический процесс нарастания момента в трансмиссии. Скорость достигает установившегося значения по апериодическому переходному процессу. Перерегулирование по скорости отсутствует. Таким образом, полученный методом АКАР, алгоритм управления скоростью в режиме «с подхватом» обеспечивает устранение провисания каната на малой скорости, полностью устраняет динамические усилия переменного характера в трансмиссии, что способствует снижению интенсивности её усталостного разрушения, а также обеспечивает апериодический переходный процесс по скорости второй массы.

По результатам моделирования были определены предел выносливости и запас усталостной прочности каната. В таблице 1 представлены данные, отражающие влияние различных регуляторов на величину динамической нагруженности каната и его прочностные характеристики с учетом коэффициента снижения предела выносливости. Установлено, что работа алгоритма ПИ-регулятора скорости груза с подчиненным РУМ, в режиме подъема «с подхватом», в результате снижения уровня динамических нагрузок, будет способствовать увеличению предела выносливости каната в 1,78 раз и увеличению запаса прочности каната в 3,17 раза. Работа алгоритма управления скоростью груза, полученного методом АКАР, в режиме подъема «с подхватом», в результате снижения уровня динамических нагрузок, будет способствовать увеличению предела выносливости каната в 1,81 раза и увеличению запаса прочности каната в 3,26 раза. Увеличение предела выносливости и запаса прочности будет максимальным, при подъеме груза, в режиме «с подхватом», 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.

Tr / 1 D			
Таблица 1 – Влияние у	лпавпения на пг	nouhocthue xar	лактепистики каната
Taomina i Diminine		oo moombie aup	antophothen namata

Система управления	Амплитуда цикла $\sigma_V$ , МПа	Предел выносливости $\sigma_{RД}$ , Мпа	Запас прочности $n_{\sigma_{RA}}$
Без регулирования	222,83	957,75	1,91
ПИ-регулятор с подчиненным РУМ	2,79	1703,75	6,06
Регулятор по АКАР	0	1734,54	6,23

Расчет годовой экономической эффективности производился исходя из максимального увеличения предела выносливости, тем самым найден максимально возможный годовой экономический эффект. Исходя из расчетных данных, при внедрении предложенных алгоритмов управления произойдет увеличение предела выносливости подъемного каната в 1,78 раза, а максимальный годовой экономический эффект при этом составит 44%.

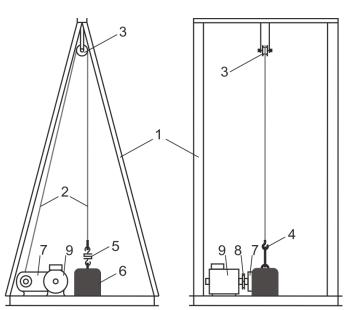


Рисунок 11 – Механическая схема экспериментальной установки

В четвертой главе дис-«Экспериментальная сертации часть» приводятся описание и схемы экспериментальной установки, её техническое оснащение и параметры, а также результаты проведенных экспериментов, с целью подтверждения характеристик динамических электропривода подъема крана, при функционировании разработанных алгоритмов управления. На рисунке 11 представлена механическая схема экспериментальной установки.

На схеме приняты следующие обозначения: 1 – рама, 2 – подъемный канат, 3 – блок, 4 – крю-

ковой подвес, 5 – датчик усилия, 6 – груз, 7 – редуктор, 8 – муфта, 9 – электродвигатель. Экспериментальная установка оснащена АД марки АИР 80. 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  $F_{\rm max}=100~\rm kr$ . Управление электродвигателем осуществлялось с помощью преобразователя частоты фирмы ABB ACS-800. 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 12 и 13. Запись характеристик

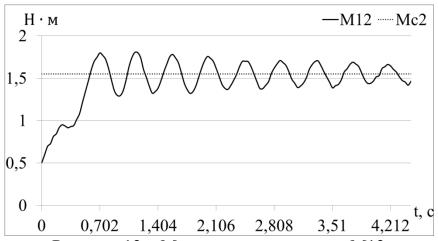


Рисунок 12 – Момент в трансмиссии M12 при подъеме «с подхватом»

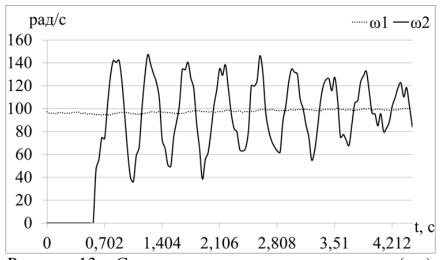


Рисунок 13 — Скорость ротора электродвигателя ( $\omega_1$ ) и приведенная скорость груза ( $\omega_2$ ) при подъеме «с подхватом»

начиналась в момент времени, когда усилие в трансмиссии превышало значение 0,5 H · м. Масса поднимаемого груза составляла 69,5 кг, а задание по скорости подъема принималось равным  $\omega_2^* =$ 100 рад/с. Ограничение электромагмомента нитного двигателя устанавливалось на уровне  $\pm 2.8$  H·m. B moment времени t = 0.56 c, усилие в трансмиссии достигает сопротивлемента действующего ния, вторую массу на  $Mc2 = 1,55 \, H \cdot M$  и в результате, вторая масса начинает движение. На графиках переходных процесэлектропривода подъема в режиме «с подхватом» отчетли-

во наблюдается колебательный процесс с частотой 2,38 Гц.

На рисунках 14 и 15 приведены переходные процессы при работе ПИрегулятора скорости с подчиненным РУМ. Постоянные времени РУМ были установлены со следующими значениями  $T_1 = 0.06 \ c$ ,  $T_2 = 0.005 \ c$ . На рисунке 14 наблюдаются снижение динамической нагрузки подъемного каната на 38%. На рисунке 15 переходный процесс по скорости 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 в трансмиссии.

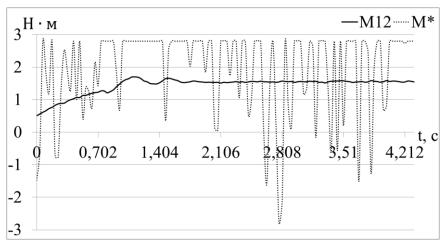


Рисунок 14 — Момент в трансмиссии (M12) и задание электромагнитного момента, вычисленное системой управления (M\*)

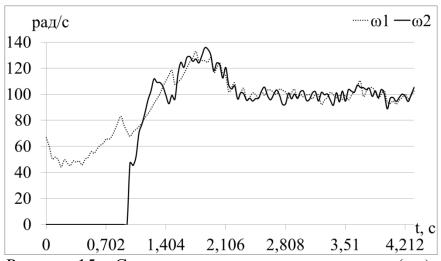


Рисунок 15 — Скорость ротора электродвигателя  $(\omega_1)$  и приведенная скорость груза  $(\omega_2)$ 

На рисунках 16 и 17 приведены переходные процессы при работе регулятора скорости, полученного по методу AKAP. Постоянные времени регулятора были установлены:  $T_1 = 0.012 c$  $T_2 = 0.2 c$ ,  $T_3 =$ 0,1 с. На рисунке 16 переходный процесс имеет приближенно апериодический рактер, без значиколебаний тельных момента в трансмиссии. На этапе разгона второй массы колебания момента трансмиссии отсутствуют. Скорость достигает установившегося значения без перерегулирования. 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, 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 пере-

ходного процесса обладает алгоритм, полученный методом АКАР, поэтому для практического внедрения рекомендуется использовать именно его.

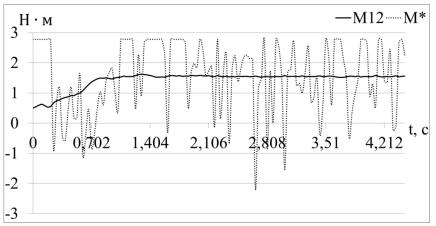


Рисунок 16 — Момент в трансмиссии (M12) и задание электромагнитного момента, вычисленное системой управления (M\*)

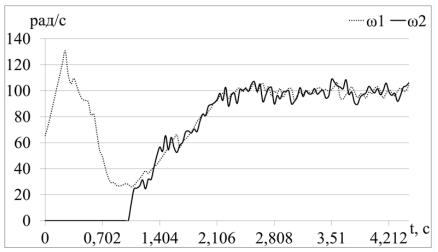


Рисунок 17 — Скорость ротора электродвигателя ( $\omega_1$ ) и приведенная скорость груза ( $\omega_2$ )

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность темы исследования определяется следующими основными факторами:

- 1. Необходимость повышения конкурентоспособроссийских кранов как на внутреннем, так и на мировом рынке. Данный тезис закреплен в стратегии развития тяжелого машиностроения на период до 2020 года принятой Министерством промышленности торговли Российской Федерации.
- 2. В режиме работы «с подхватом» на элементы электропривода подъема наиболее часто действуют максимальные дина-

мические 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 подъемнотранспортных 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 тормозной 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 подъёма 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 подъёма до 16 м, показали 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 увеличения долговечности крана и повышения безопасности ведения подъемно-транспортных работ.

Направления дальнейших исследований: изучение влияния жесткости опорных конструкций привода подъема (для мостовых и козловых кранов) или жесткости стрелы (для стреловых кранов) на качество работы алгоритмов управления; изучение влияния точности наблюдателя параметров механической подсистемы на качество и устойчивость работы алгоритмов управления; разработка методики определения постоянных времени алгоритмов управления.

# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

# Публикации в изданиях, 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.

### Публикации в других изданиях:

- 3. Завьялов В.М. Улучшение динамических характеристик электропривода 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.
- 4. 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 Юбилей-

- ной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г. А. Сипайлова; ТПУ. Томск, 2011, С. 157–160.
- 5. 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 научнопрактической конференции, 1—2 ноября 2012 г. / КузГТУ. Кемерово, С. 36—39.
- 6. **Гусев А.В.** Алгоритм управления электроприводом подъема кранового механизма по методу АКАР / А.В. Гусев // «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования»: материалы IX Международной научно-практической конференции, 18-19 марта 2014 г. / ВоГУ. Вологда, 2014.
- 7. **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.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве: [1], [3], [4] — разработка алгоритма управления, проведение вычислительных экспериментов и обработка полученных результатов; [2] — определении зависимости между максимальной скоростью устранения провисания каната и допустимым усилием в канате, разработка алгоритма управления, проведение вычислительных экспериментов и обработка полученных результатов; [5] — описание процесса предварительной идентификации параметров электропривода подъема.