

На правах рукописи



ЕНИН СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОСТОВОГО КРАНА
ДЛЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПОДВЕШЕННОГО ГРУЗА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Магнитогорск - 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Омельченко Евгений Яковлевич

Официальные оппоненты: **Пятибратов Георгий Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, профессор
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Ишматов Закир Шарифович
кандидат технических наук, доцент, доцент ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита диссертации состоится «05» февраля 2021 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.04 при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 231.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», <http://magtu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Работа мостового крана сопровождается механическими колебаниями груза на гибком подвесе, которые увеличивают время погрузочно-разгрузочных операций, вызывают дополнительные циклические нагрузки в системе электроприводов механизмов подъема, передвижения крана и тележки и усложняют задачу позиционирования груза. На стадии проектирования механического и электрического оборудования мостового крана одним из главных факторов, ограничивающих максимальные рабочие скорости механизмов передвижения, является раскачивание груза.

Демпфирование колебаний груза мостового крана позволяет:

1. снизить амплитуду и продолжительность раскачивания груза, что приводит к увеличению производительности работы мостового крана за счет уменьшения времени погрузочно-разгрузочных работ и повышения точности отработки траектории перемещения груза;
2. увеличить срок службы электрического и механического оборудования мостового крана за счет снижения циклических нагрузок на электромеханическую систему, вызванных механическими колебаниями груза;
3. увеличить производительность работы мостового крана за счет увеличения рабочих скоростей механизмов передвижения.

Таким образом, совершенствование системы управления электроприводами мостового крана для демпфирования колебаний, приводящее к увеличению производительности крана и срока службы, является актуальной научно-технической задачей.

При описании статических и динамических режимов работы мостового крана используются известные уравнения движения для подвешенного груза и механизма передвижения и анализируется изолированная двухмассовая система с жестким механизмом передвижения и гибким подвесом. Данные уравнения подходят для описания процессов только с постоянным значением длины подвеса груза и не учитывают переходные процессы изменения длины, т.е. одновременную работу механизмов подъема и передвижения. Таким образом, влияние изменения длины подвеса (скорость и ускорение механизма подъема) на движение груза и формирование нагрузок в системе электропривода механизмов передвижения не изучено.

Разработкой систем демпфирования колебаний подвешенного груза в настоящее время занимаются крупные мировые машиностроительные компании, такие как Siemens, Demag, ABB, Konecranes, Schneider Electric. Отечественные производители кранного электрооборудования практически не имеют разработок в данной области.

Существующие системы управления электроприводами механизмов передвижения мостового крана для демпфирования раскачивания груза выполняются с косвенным и прямым измерением угла отклонения груза. Для

реализации способа управления с косвенным определением угла отклонения груза требуется применение датчиков длины подвеса и веса груза. На основании полученных с датчиков данных расчётным путем определяется угол отклонения груза и формируется требуемое ускорение механизма передвижения, позволяющее демпфировать колебания. Данный способ не позволяет получить требуемое качество регулирования при ненулевых колебаниях в моменты пуска и торможения, а также при внешних возмущающих воздействиях на систему подвеса груза. Способ управления электроприводом механизма передвижения мостового крана на основании датчика угла отклонения груза позволяет демпфировать колебания с произвольными отклонениями в начале переходного процесса и в установившемся режиме работы. В настоящее время датчики угла отклонения имеют сложную реализацию в виде оптической камеры, устанавливаемой на тележку над подвешенным грузом, и имеет ряд ограничений по применению: необходимость использования больших вычислительных мощностей оборудования для обработки оптического сигнала, неудовлетворительная работа в условиях повышенного содержания пыли, дыма и газа на производственной площадке. Для устранения указанных недостатков требуется разработка новых систем управления электроприводами механизмов мостового крана с применением аппаратно-программных комплексов для измерения угла отклонения груза.

Степень разработанности темы исследования. Изучению раскачивания груза при работе мостового крана, а также способов демпфирования колебаний груза посвящены труды И.И. Абрамовича, М.П. Александрова, Ю.В. Алексеева, А.П. Богословского, Л.Г. Лимонова, Л.Б. Масандилова, Е.М. Певзнера, А.А. Рабиновича, А.Г. Яуре и других ученых. Анализом раскачивания груза и систем устранения раскачивания занимаются зарубежные ученые Y.S. Kim, J. Neupert, E. Arnold, A. Abe, O. Sawodny, H. Aschemann и др. Исследованию систем косвенного определения параметров мостового крана, а также построению адаптивных систем управления посвящены работы Е.Д. Буйвиса, А.А. Коврыжкина, С.А. Серикова, В.М. Терехова и др.

Цель и задачи темы исследования. Целью работы является повышение производительности мостового крана за счет демпфирования колебаний подвешенного груза путем усовершенствования системы управления электроприводов мостового крана.

Для достижения цели исследования сформулированы основные **задачи**:

1. анализ электромеханической системы мостового крана как объекта регулирования, анализ существующих систем управления электроприводами для демпфирования колебаний груза при работе мостового крана;

2. разработка математической и компьютерной моделей электромеханической системы мостового крана, описывающих движение механизмов мостового крана с учетом одновременной работы всех механизмов в динамических и статических режимах работы;

3. разработка структурной схемы усовершенствованной системы управления электроприводами передвижения механизмов для демпфирования механических колебаний груза во всех режимах работы крана по двум осям перемещения;

4. разработка метода расчета и алгоритма определения коэффициента обратной связи по углу отклонения груза;

5. разработка аппаратно-программного комплекса усовершенствованной системы управления электроприводами передвижения мостового крана для интеграции в существующую систему управления;

6. выполнение экспериментальных исследований усовершенствованной системы управления электроприводами мостового крана для демпфирования колебаний груза.

Научная новизна. В результате выполнения работы впервые были получены следующие результаты:

1. разработана математическая модель мостового крана, которая в динамических режимах учитывает влияние изменения длины подвеса на амплитуду и частоту горизонтальных механических колебаний груза и на формирование дополнительной нагрузки в системе механизмов передвижения тележки и крана;

2. разработан метод расчета коэффициента обратной связи по углу отклонения груза, позволяющая автоматически настраивать замкнутую систему управления и обеспечивать постоянные демпфирующие свойства, не зависящие от величины длины подвеса груза;

3. выполнена программная реализация алгоритма расчета коэффициента обратной связи по углу отклонения груза для обеспечения постоянных демпфирующих свойств замкнутой системы регулирования.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные математическая и компьютерная модели мостового крана позволяют исследовать переходные процессы формирования дополнительной статической нагрузки в электромеханической системе электропривода механизмов передвижения с учетом изменения длины подвеса в статических и динамических режимах работы. Указанные модели могут использоваться при проектировании кранов и расчете нагрузок в системе электропривода.

2. Разработанная система управления электроприводами механизмов передвижения на основе программно-аппаратного комплекса определения угла отклонения груза имеет возможность одновременного измерения угла отклонения по двум осям передвижения механизмов мостового крана позволяя демпфировать колебания груза при одновременной работе двух механизмов передвижения.

3. Алгоритм расчета коэффициента демпфирования системы позволяет автоматически настраивать усовершенствованную систему управления для демпфирования колебаний груза по двум осям перемещения без участия машиниста крана в процессе работы.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались положения классической механики, теории систем управления электроприводом, теории автоматического управления. Разработка системы управления выполнялась на основании методов анализа передаточных функций. Для разработки компьютерной модели использовались пакет программ Matlab с библиотекой Simulink и прикладное ПО для решения дифференциальных уравнений Maxima. Экспериментальные исследования выполнялись на основании существующих систем электропривода с возможностью осциллографирования результатов. Применялись программные продукты с набором функций для статистического анализа результатов.

Положения, выносимые на защиту. На защиту диссертации выносятся следующие научные положения:

1. математическая модель механической части мостового крана, позволяющая исследовать влияние изменения длины подвеса на формирование дополнительных нагрузок на механизмы передвижения тележки и крана со стороны груза;

2. компьютерная модель мостового крана, включающая в себя взаимосвязанную систему с перекрестными связями между механизмами подъема, передвижения тележки и крана и системы электроприводов.

3. метод автоматической настройки степени демпфирования колебания груза на основании алгоритма расчета длины подвеса по результатам измерения угла отклонения груза.

Степень достоверности и апробация результатов. По результатам исследований сделаны доклады на International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 (Томский политехнический университет, Томск, Россия, 04-06 декабря 2017 г.); на International Conference on Industrial Engineering (Московский политехнический университет, г. Москва, 15-18 мая 2018 г.); на 76-й и 77-й Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»; на 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, Россия, 4-5 октября 2019 г.).

Публикации: Основные положения диссертации опубликованы в 13 трудах, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях из Перечня ВАК РФ, 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в международную систему цитирования Scopus. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 108 источников. Работа представлена на 150 страницах, содержит 80 рисунков, 17 таблиц и приложение объемом 3 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации раскрывается актуальность темы исследования, определяются задачи для выполнения поставленной цели исследования, анализируется степень проработанности темы исследования, представляются теоретические и практические результаты выполнения работы, а также применяемые теоретические и экспериментальные методы исследования.

В первой главе представлены основные технические и технологические характеристики мостовых кранов, выполнен анализ систем кранового электропривода и систем управления электроприводами и исследована система гибкого подвеса груза.

Для точного математического описания мостового крана как объекта регулирования выполнен анализ характеристик кранов. Определены диапазон изменения параметров и условия работы кранов. Все положения, выносимые на защиту, могут быть применимы для мостовых кранов грузоподъемностью от 1 до 1000 т управляемые с пола или с кабины, а также для магнитных и рейферных мостовых кранов.

Выполнен анализ систем управления электроприводом постоянного и переменного тока мостового крана. Указаны способы и особенности регулирования скорости электродвигателя механизмов крана и определены диапазоны изменения параметров электромеханического оборудования.

При исследовании механизмов передвижения мостового крана установлено, что при работе крана возникают дополнительные упругие динамические нагрузки, которые могут превышать статические нагрузки, действующие на них. Дополнительную нагрузку создают вынужденные колебания подвешенного груза. Они имеют меньшую величину, чем упругие колебания в механических связях, однако влияют на равномерность хода механизма передвижения, на удобство эксплуатации крана, а также на точность позиционирования груза.

При анализе кинематической схемы объекта регулирования выполнен расчет частоты собственных колебаний механических упругих связей и частоты свободных колебаний подвешенного груза. В таблице 1 приведены значения периода колебаний в двух рассматриваемых системах. Значение периода колебаний упругих связей принимается для однодвигательных механизмов передвижения крана с длинными механическими связями (валами) и является максимальным для всех типов мостовых кранов. Период механических колебаний подвешенного груза принимается для минимально возможной рабочей длины подвеса и, соответственно, является минимальным для всех типов мостовых кранов. Установлено, что колебания груза на гибком подвесе имеют более чем в 10 раз меньшую частоту колебаний, чем упругие колебания в механических элементах крана и трансмиссиях.

Таблица 1 – Величины периода колебаний в системах механизма

Наименование показателя	Значение
Период упругих колебания в механических связях, с	0,04, не более
Период колебаний подвешенного груза, с	0,5, не менее

Из этого следует, что влияние одного вида колебаний на другой является минимальным. Поэтому в данной работе система механизма передвижения мостового крана рассматривается как двухмассовая система с жестким механизмом и гибким подвесом.

Для первоначального анализа колебаний груза двухмассовая система механизма и подвешенного груза описывается упрощенным уравнением:

$$\frac{F_d - F_c}{m_{\text{мех}}} + \frac{m_{\text{г}}}{m_{\text{мех}}} \omega_{\text{гп}}^2 S_0 = - \left(\frac{d^2 S_0}{dt^2} + \omega_{\text{гп}}^2 S_0 \right) \quad (1)$$

где F_d – сила со стороны приводного двигателя; F_c – приведенная сила сопротивления; $m_{\text{г}}$ – масса груза; $m_{\text{мех}}$ – масса механизма передвижения; $\omega_{\text{гп}} = \sqrt{g/l}$ – угловая частота собственных колебаний; S_0 – горизонтальная координата груза относительно механизма.

На основании выражения (1) сделан вывод, что характер раскачивания груза, а именно амплитуда и частота колебаний, определяются режимом работы механизма передвижения. В динамическом режиме работы механизма величина отклонения груза зависит от длины подвеса, массы груза и ускорения механизма передвижения и изменяется по гармоническому закону. Период колебаний груза в динамическом режиме работы зависит от массы груза и длины подвеса. В установившемся режиме работы величина угла отклонения груза изменяется по гармоническому закону и зависит от начальных условий: координаты груза и линейной скорости груза при окончании процесса пуска или торможения.

Выполнен анализ основных систем управления крановыми электроприводами для уменьшения раскачивания груза. Исследованы подходы и технические решения в реализации систем, определены преимущества и недостатки каждой рассматриваемой систем. Установлено, что основной задачей рассматриваемых решений является косвенное определение длины подвеса для дальнейшего расчета частоты колебаний и угла отклонения.

Во второй главе выполняется разработка математической и компьютерной моделей электромеханических систем мостового крана. Указанная задача выполняется с применением математического прикладного пакета для решения дифференциальных уравнений Maxima и пакета компьютерного моделирования Matlab с библиотекой Simulink.

Разработана математическая модель механической части мостового крана. Произведен анализ системы с помощью уравнений Лагранжа II рода, которые позволяют описать механизмы системы с учетом взаимного влияния элементов.

Определена кинетическая энергия всей механической системы, которая складывается из кинетических энергий каждого ее элемента. Определены обобщенные силы для каждого элемента системы (как сумма всех воздействий на элемент системы, которые могут вызывать движение данного элемента).

В данной работе мостовой кран рассматривается как система четырех тел и механизмов: механизм подъема, механизм передвижения тележки, механизм передвижения крана, груз по оси движения тележки и по оси движения крана. Кинетическая энергия груза раскладывается на 2 составляющие и определяется по двум осям. В результате получены уравнения движения для четырех тел и механизмов мостового крана.

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} &= -(m_1 g \sin(\alpha) + b_x \dot{x}_t + z_1 (2\dot{\alpha} m_1 z_1 - b_x \sin(\alpha)) + \\ &\quad + z_1 (-m_1 \dot{x}_t \cos(\alpha) - \dot{\alpha} b_x \cos(\alpha))) / m_1 z_1^2 \\ \ddot{\beta} &= -(m_1 g \sin(\beta) + b_y \dot{y}_b + z_1 (2\dot{\beta} m_1 z_1 - b_y \sin(\beta)) + \\ &\quad + z_1 (-m_1 \dot{y}_b \cos(\beta) - \dot{\beta} b_y \cos(\beta))) / m_1 z_1^2 \\ \ddot{z}_1 &= (-F_1 + m_1 g + f_{0z} \text{signature}(z_1) + \\ &\quad + m_1 z_1 ((\dot{\alpha})^2 + (\dot{\beta})^2) + m_1 \dot{y}_b \sin(\beta) + m_1 \dot{x}_t \sin(\alpha)) / m_1 \\ \ddot{x}_t &= (F_2 - m_1 g \sin(\alpha) - f_{0x} \text{signature}(\dot{x}_t) + m_1 \ddot{z}_1 \sin(\alpha) + \\ &\quad + 2\dot{\alpha} m_1 z_1 \cos(\alpha) + m_1 z_1 (\cos(\alpha) \ddot{\alpha} - \sin(\alpha) (\dot{\alpha})^2)) / (m_t + m_1) \\ \ddot{y}_b &= (F_3 - m_1 g \sin(\beta) - f_{0y} \text{signature}(\dot{y}_b) + m_1 \ddot{z}_1 \sin(\beta) + \\ &\quad + 2\dot{\beta} m_1 z_1 \cos(\beta) + m_1 z_1 (\cos(\beta) \ddot{\beta} - \sin(\beta) (\dot{\beta})^2)) / (m_t + m_b + m_1)\end{aligned}\tag{2}$$

При описании параметров и координат системы уравнений используются следующие обозначения: α – угол отклонения груза по оси движения грузовой тележки; β – угол отклонения груза по оси движения крана; z_1 – длина подвеса (отсчет от края барабана механизма подъема); x_t – горизонтальная координата грузовой тележки; y_b – горизонтальная координата крана; F_1, F_2, F_3 – силы, действующие со стороны системы электроприводов механизмов подъема, передвижения грузовой тележки и крана в системе ПЧ-АД; m_1, m_t, m_b – масса груза, грузовой тележки и крана соответственно; f_1, f_{0x}, f_{0y} – сила трения, действующая на механизм подъема, грузовой тележки и крана соответственно; b_x, b_y – коэффициент демпфирования раскачивания груза по осям движения тележки и крана.

Каждое выражение из системы уравнений представляется в виде структурной схемы (в качестве примера на рисунке 1 представлена структурная схема механизма передвижения тележки на основании уравнений (2)) и реализуется в виде компьютерной модели в MATLAB. Уравнения системы (2)

представлены в компьютерной модели отдельными подпрограммами с перекрестными связями между ними. Представленная структурная схема описывает модель только механической системы мостового крана.

Общая компьютерная модель мостового крана включает в себя пять подпрограмм для каждого механизма мостового крана и груза по двум осям с взаимными перекрестными связями между каждой подпрограммой. Каждая подпрограмма дополнена моделью системы кранового электропривода по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

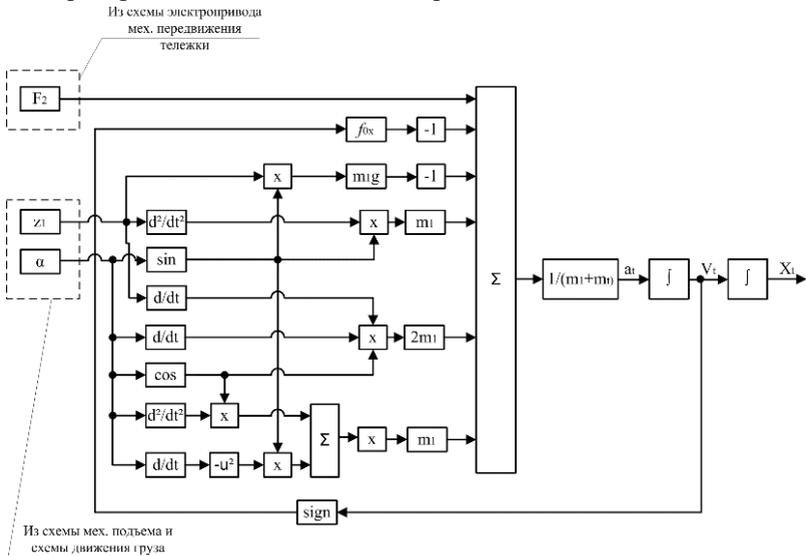


Рисунок 1 – Структурная схема компьютерной модели механизма передвижения грузовой тележки

В качестве объекта моделирования в данной главе принят грейферный кран грузоподъемностью 10 т производства ПАО «УРАЛМАШЗАВОД» с системой управления электроприводами механизмов, выполненной на основе преобразователя частоты. Результаты моделирования работы механизма передвижения грейферной тележки представлены на рисунке 2. В качестве приводного моделируется двигатель мощностью $P_{2н}$ 2,2 кВт и номинальной скоростью вращения $n_n = 1420$ об/мин. Длина подвеса принимается равной 20 м.

Разработанная компьютерная модель мостового крана отличается от известных тем, что она дает возможность учета дополнительных составляющих в уравнениях движения механизмов и груза, возникающих при работе механизма подъема. В уравнениях системы (2) имеются две дополнительные составляющие:

- 1) зависящая от скорости движения груза в вертикальном направлении V_z или \dot{z}_1 ;
- 2) зависящая от ускорения груза в вертикальном направлении a_z или \ddot{z}_1 .

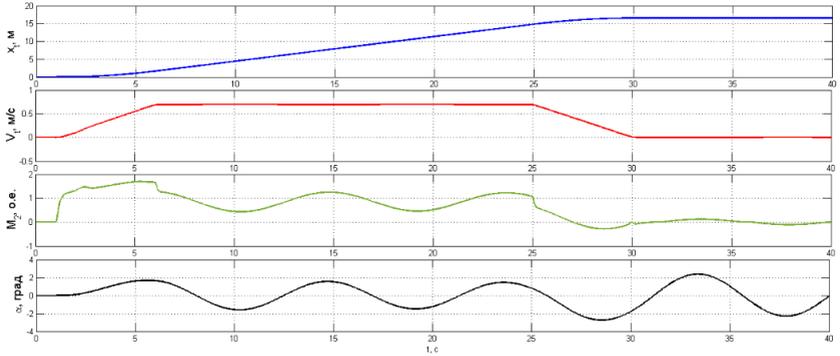


Рисунок 2 – Результаты моделирования работы механизма передвижения тележки

Для анализа влияния указанных выше составляющих на работу механизмов выполнено моделирование процесса разгона, работы на установившейся скорости и торможения механизма передвижения крана с одновременной работой механизма подъема. Для этого в интервале времени 1 – 30 с изменяется длина подвеса с начального значения 20 м до значения около 3 м. На рисунке 3 представлены переходные процессы координаты груза (длины подвеса) и электромагнитного момента для двух случаев: с учетом составляющих, зависящих от V_z и a_z и без их учета.

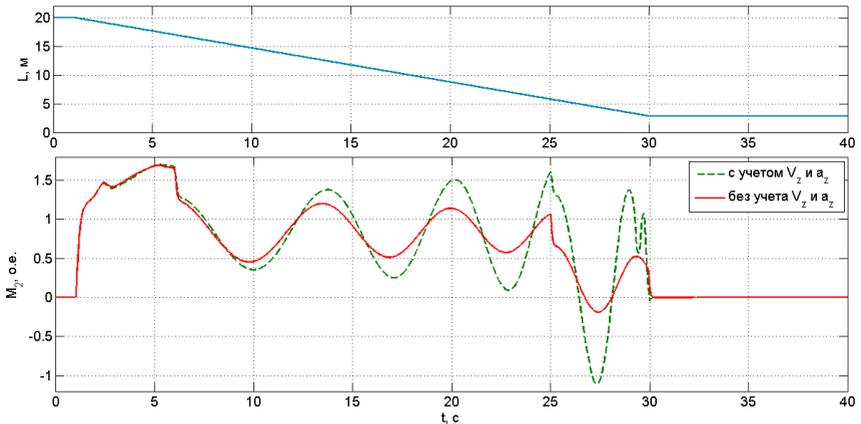


Рисунок 3 – Переходные процессы электромагнитного момента двигателя механизма передвижения крана с учетом производных вертикальной координаты груза и без их учета

Разница в расчете эквивалентного момента для двух смоделированных процессов составляет 9,5% для данного типа мостового крана.

Третья глава посвящена анализу способов устранения раскачивания груза при работе мостового крана.

Выполнен сравнительный анализ четырех способов реализации системы управления электроприводами (СУЭП) для устранения раскачивания груза.

На основании положений теории автоматического управления построена структурная модель двухмассовой системы мостового крана с гибким подвесом. В основе данной модели заложена жесткая отрицательная обратная связь по углу отклонения груза от вертикальной оси для увеличения эквивалентного коэффициента демпфирования замкнутой системы управления.

Для реализации системы управления предусмотрено прямое измерение угла отклонения груза. Выполнение задачи определения угла отклонения груза осуществляется с применением 3-осевого вибрационного MEMS-гироскопа. Структурная схема разработанного технического решения представлена на рисунке 4.

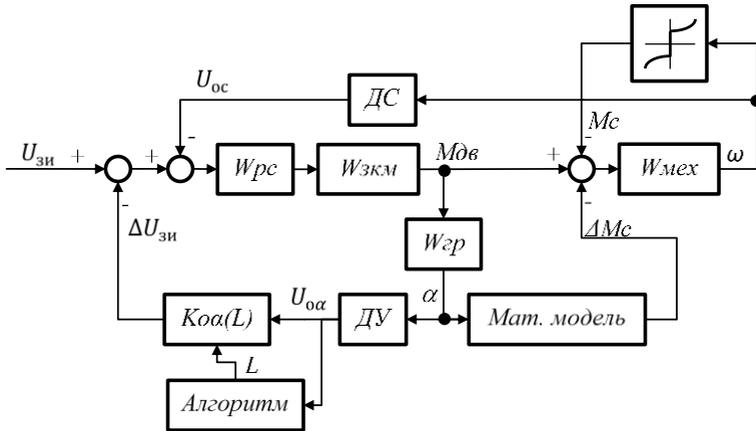


Рисунок 4 - Структурная схема усовершенствованной системы управления электроприводом для демпфирования раскачивания груза

В схеме на рисунке 4 используются следующие условные обозначения: $U_{зи}$ – сигнал задания скорости (после задатчика интенсивности) системы электропривода передвижения; $W_{рс}$, $W_{зкм}$, $W_{гр}$, $W_{мех}$ – передаточные функции регулятора скорости системы электропривода передвижения, замкнутого контура регулирования момента системы электропривода, системы подвешенного груза и механизма передвижения соответственно; M_c – реактивный статический момент, действующий на систему электропривода; ΔM_c – дополнительный статический момент, вызванный раскачиванием груза; $ДС$ – датчик скорости системы

электропривода; U_{oc} – сигнал обратной связи по скорости двигателя; DU – датчик угла отклонения груза; $U_{o\alpha}$ – сигнал обратной связи по углу отклонения груза (коэффициент демпфирования, коэффициент компенсации); ΔU_{zi} – дополнительный сигнал задания скорости для устранения раскачивания груза; $K_{o\alpha}$ – коэффициент обратной связи по углу отклонения груза; L – длина гибкого подвеса; α – угол отклонения груза.

В результате моделирования установлено, что степень демпфирования колебаний груза должна изменяться в зависимости от величины длины подвеса. Проекция величины отклонения груза x_0 на горизонтальную ось зависит от длины подвеса L : $x_0 = L \sin \alpha$. Коэффициент обратной связи по углу отклонения

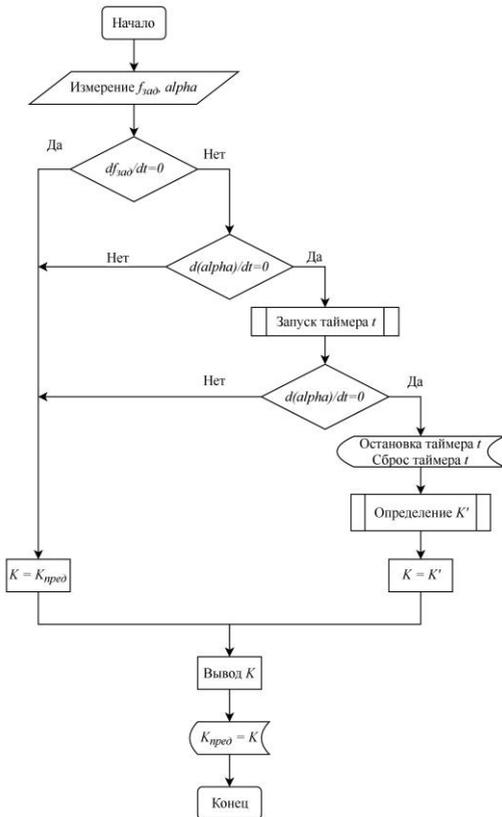


Рисунок 5 – Алгоритм расчета коэффициента обратной связи

(коэффициент демпфирования) должен изменяться в функции длины подвеса.

Для расчета коэффициента обратной связи усовершенствованной СУЭП для демпфирования раскачивания груза определяется период колебаний груза T , который зависит от длины подвеса. Для уменьшения времени, необходимого на измерение периода колебаний груза T используется не величина угла отклонения, а ее производная (угловая скорость). Данный подход позволяет определять длину подвеса за время, равное $1/4$ периода колебаний груза. Описанный алгоритм определения коэффициента обратной связи усовершенствованной СУЭП представлен на рисунке 5.

Выходной величиной, рассчитываемой алгоритмом на рисунке 5, является коэффициент $K_{o\alpha}$ системы. Расчет выполняется на

основании четырёх дополнительных величин, которые определяются на стадии пуско-наладочных работ, а именно, максимальная и минимальная длины подвеса, а также максимальный и минимальный коэффициенты $Ko\alpha$.

Расчет коэффициента обратной связи $Ko\alpha$ системы выполняется по формуле

$$Ko\alpha = \Delta Ko\alpha \cdot T + K_0$$

где $\Delta Ko\alpha = \frac{Ko\alpha_{max} - Ko\alpha_{min}}{T_{max} - T_{min}}$, $K_0 = \frac{T_{max} Ko\alpha_{min} - T_{min} Ko\alpha_{max}}{T_{max} - T_{min}}$ – расчётные

коэффициенты, определяемые в процессе наладки СУРГ; $T_{min} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{min}}{g}}$,

$T_{max} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{max}}{g}}$ - минимальное и максимальное значения периода колебаний груза соответственно; L_{min} , L_{max} – минимальная и максимальная длины подвеса соответственно; T период колебания груза; $Ko\alpha_{min}$, $Ko\alpha_{max}$ – минимальное и максимальное значения коэффициента, полученные в процессе наладки системы.

В четвертой главе описан разработанный аппаратно-программный комплекс для определения угла отклонения груза, обработки и передачи сигналов и реализации необходимых алгоритмов управления.

Основным компонентом усовершенствованной СУЭП механизма передвижения для демпфирования колебаний груза является датчик угла отклонения груза (рисунок 6) с независимым электропитанием.

В состав датчика входят: 32-разрядный ARM® микроконтроллер STM32F103C8T6 (STMicroelectronics N.V., Швейцария) с тактовой частотой 72 МГц; вибрационный 3-осевой MEMS гироскоп MPU-9250 (InvenSense Inc., США) с 16-разрядным АЦП (точность измерения 0,005 градуса); WiFi модуль ESP8266 с встроенным 32-разрядным процессором Tensilica Xtensa L106, работающий на стандартах связи IEEE 802.11 b/g/n.

Датчик устанавливается на крюк, трос или в другое подходящее по условиям работы место на механизме гибкого подвеса и передает данные угла отклонения груза посредством беспроводных протоколов передачи данных. Создание аппаратной части и требования к техническим компонентам системы обусловлены исследованиями на компьютерной модели.

Тестовые испытания усовершенствованной СУЭП

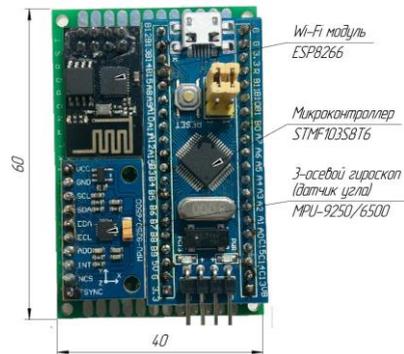


Рисунок 6 – Внешний вид датчика угла отклонения груза

выполнены на кран-балке грузоподъемностью 1 т с системой электропривода на основе преобразователей частоты Altivar 71 фирмы Schneider Electric (цех электромонтажа ООО «Производственное объединение Привод-Автоматика», г. Магнитогорск).

На начальном этапе испытаний произведена проверка работы датчика угла отклонения в существующей СУЭП механизма передвижения тележки. Получены кривые переходных процессов угла отклонения груза. Дополнительно исследована работа кран-балки на компьютерной модели с целью проверки адекватности компьютерной модели и предварительной настройки коэффициентов усовершенствованной СУЭП. С использованием датчика угла отклонения груза выполнено сравнение реальных и смоделированных переходных процессов угла отклонения (рисунок 7). Моделирование и измерение угла отклонения на объекте выполняется на основании одинаковых трапецидальных тахограмм задания скорости. Коэффициент парной корреляции двух кривых составляет 81 %.

На следующем этапе выполнены тестовые испытания работы усовершенствованной СУЭП для демпфирования колебаний подвешенного груза. Для сравнения результатов работы существующей и усовершенствованной СУЭП выполнены тестовые пуски механизма передвижения тележки.

В первом случае рассматривается работа существующей СУЭП механизма передвижения тележки. Опыт включает в себя два цикла работы механизма с временами пуска и торможения 1 с. Разгон выполнялся до синхронной скорости 1500 об/мин (рисунок 8). На момент окончания тестового запуска механизма амплитуда колебаний груза составляла 1,6 градуса. Логарифмический декремент затухания колебаний равен 0,072. Расчетное время переходного процесса затухания угла отклонения груза с момента остановки механизма составляет 2 мин.

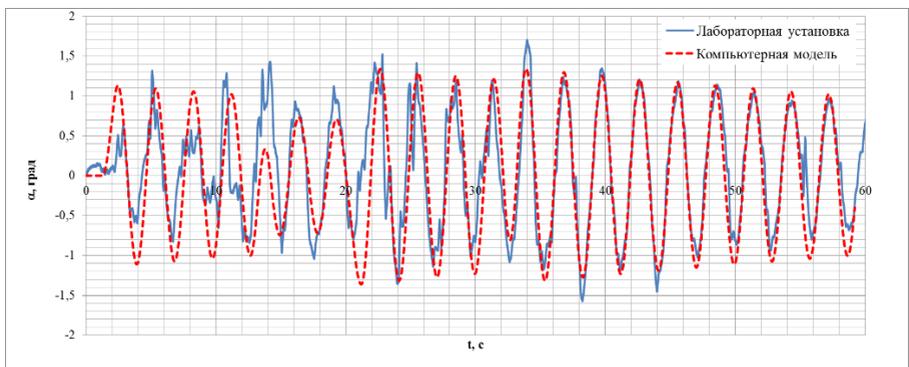


Рисунок 7 – Результаты моделирования и лабораторные данные

В усовершенствованной СУЭП для демпфирования колебаний груза получены переходные процессы частоты вращения двигателя и угла отклонения груза (рисунок 7). Данный опыт осуществлялся при заданной скорости вращения двигателя 1500 об/мин. На момент окончания опыта величина угла отклонения груза составлял 0,6 градуса, что в 2,7 раза меньше по сравнению с предыдущим опытом. Логарифмический декремент затухания в данном опыте равен 0,55, что в 7,6 раза больше, чем в существующей системе. Расчетное время переходного процесса угла отклонения груза составляет 15 с.

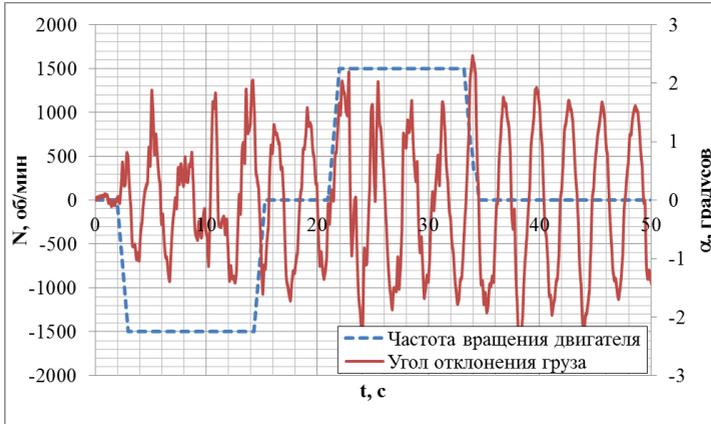


Рисунок 8 – Переходные процессы скорости и угла отклонения груза в существующей СУЭП

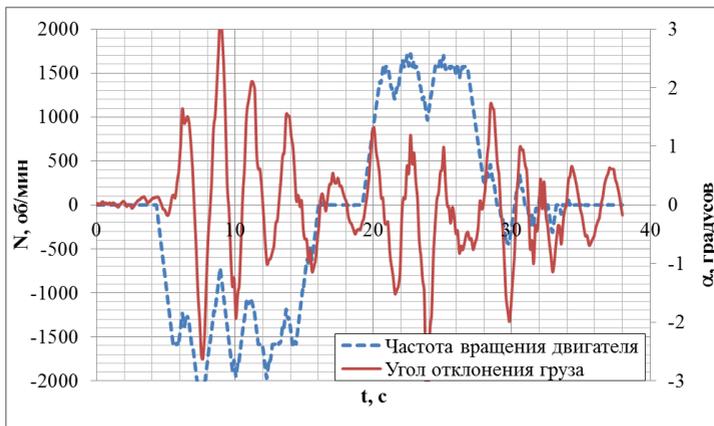


Рисунок 9 – Переходные процессы скорости и угла отклонения груза в усовершенствованной СУЭП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы получены следующие результаты:

1. Электромеханические системы механизмов передвижения с подвешенным грузом нужно рассматривать как двухмассовые системы с жестким механизмом и гибким подвесом, т.к. частоты собственных колебаний упругих элементов и подвешенного груза отличаются более чем в 10 раз, что исключает влияние одного вида колебаний на другой.

2. Разработана математическая модель мостового крана с подвешенным грузом с учетом изменения длины подвеса при формировании дополнительных нагрузок на механизмы передвижения тележки и крана со стороны груза.

3. Разработана компьютерная модель мостового крана, которая включает в себя перекрестные связи между механизмами подъема, передвижения тележки и крана и системы электроприводов. Это позволяет исследовать переходные процессы формирования дополнительной статической нагрузки в электромеханической системе электропривода механизмов передвижения с учетом изменения длины подвеса в статических и динамических режимах работы.

4. Разработанная усовершенствованная система управления для демпфирования колебаний груза построена на применении корректирующей обратной связи по углу отклонения груза. Обратная связь имеет структуру пропорционального звена с изменяющимся коэффициентом усиления в зависимости от длины подвеса, которая определяется косвенным способом на основании данных от датчика угла отклонения груза.

5. Главным звеном аппаратно-программного комплекса для реализации обратной связи по углу отклонения груза является 3-осевой вибрационный MEMS-гироскоп с независимым электропитанием. Обработка сигналов осуществляется микроконтроллером, который посредством беспроводной связи Wi-Fi передает результаты измерения гироскопа в усовершенствованную систему электропривода крана для коррекции скорости в функции угла отклонения груза.

6. Промышленные испытания доказали работоспособность усовершенствованной СУЭП. Логарифмический декремент затухания колебаний системы подвеса груза при работе усовершенствованной СУЭП превышает аналогичный показатель существующей системы в 7,6 раза.

7. Результаты работы внедрены и применяются в ООО «Производственное объединение Привод-Автоматика», г. Магнитогорск.

8. Усовершенствованная СУЭП механизма передвижения для демпфирования колебаний подвешенного груза может применяться не только на мостовых кранах, но и на других подъемно-транспортных механизмах, повышая производительность каждой единицы технологического процесса за счет возможностей точного позиционирования груза и уменьшения времени успокоения раскачиваний груза. Другим перспективным направлением развития

данной темы и предложенного способа является разработка подъемно-транспортных механизмов с увеличенными скоростями передвижения груза.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Омельченко, Е.Я. Характеристики крановых электроприводов с несимметричными сопротивлениями в цепи ротора / Е.Я. Омельченко, Р.Р. Сулейманов, С.С. Енин, А.А. Полетавкин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2014. — №4. — С. 19-23. (Перечень ВАК 2010 г., № 2189).
2. Енин, С.С. Описание движения механизмов мостового крана уравнениями Лагранжа II рода / С.С. Енин, Е.Я. Омельченко, А.В. Белый, Н.В. Фомин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2017. — Т.15. — №3. — С. 68–73.
3. Омельченко, Е.Я. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей / Е.Я. Омельченко, А.В. Белый, С.С. Енин, Н.В. Фомин // Электротехнические системы и комплексы. — 2018. — №3(40). — С. 12-19.

Публикации в материалах международных конференций, входящих в систему цитирования Scopus и Web of Science

4. Enin, S.S. Overhead Crane Computer Model / S.S. Enin, E.Y. Omelchenko, A.V. Belyi, N.V. Fomin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 327. — P. 1-6.
5. Enin, S.S. Crane Anti-Sway Control System with Sway Angle Feedback / S.S. Enin; E.Y. Omelchenko; A.V. Belyi // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — Moscow, Russia. — 2018. — P. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728750.
6. Enin, S. Crane Anti-Sway Control System Algorithm / Enin, S., Omelchenko, E., Maksimov I. // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). — Magnitogorsk, Russia. — 2019. — P. 54-58. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915227.

Публикации в периодических изданиях

7. Енин, С.С. Система компенсации раскачивания груза мостового крана // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной НТК. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. - 2018. - Т.1. - С. 338.
8. Воронов, Е.В. Разработка программно-аппаратного комплекса машинного зрения для определения положения крановых механизмов / Е.В. Воронов, С.С. Енин, Е.Я. Омельченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной НТК. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. - 2019. - Т.1. - С. 260.

9. Омельченко, Е.Я. Механические характеристики крановых электроприводов с несимметричными сопротивлениями в цепи ротора / Е.Я. Омельченко, Р.Р. Сулейманов, С.С. Енин, А.А. Полетавкин // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2014, г. Саранск. - 2014. - Т.1. - С. 488-491.

10. Омельченко, Е.Я. Расчет и анализ механических характеристик крановых механизмов при реостатном регулировании скорости асинхронного двигателя с фазным ротором / Е.Я. Омельченко, А.А. Полетавкин, С.С. Енин // Молодёжь. Наука. Будущее. Вып. 13: сб. науч. Тр. Студентов / под ред. С.В. Пыхтуновой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова. - 2013. - С. 74-76.

Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ РФ

11. Енин, С.С. Компьютерная модель механизмов мостового крана / С.С. Енин, Е.Я. Омельченко, А.В. Белый // Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ РФ № 2019612016; правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; ОБ ПБТ 2019. - №2-2019

12. Омельченко, Е.Я. Динамическая математическая модель системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с векторным регулированием координат / Е.Я. Омельченко, С.С. Енин, В.О. Танич, А.Б. Лымарь // Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ РФ № 2015614458; правообладатель ФГБОУ ВПО «МГТУ»; ОБ ПБТ 2015. - №5(103)

13. Омельченко, Е.Я. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Е.Я. Омельченко, О.А. Тележкин, С.С. Енин, В.О. Моисеев // Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ РФ № 2014617766; правообладатель ФГБОУ ВПО «МГТУ»; ОБ ПБТ 2014. - №8(94)