



РАЗРАБОТКА БЛОКА КОРРЕКЦИИ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА МОСТОВОГО КРАНА

Синюков А.В.¹, Синюкова Т.В.¹, Грачева Е.И.², Сафронов А.А.³

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
г. Санкт-Петербург, Россия
zeitsn@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Снижение упругих колебаний в ферме моста за счет введение в систему управления приводами перемещения моста блока синхронизации движения опор моста, на базе нечеткой логики, в функции которого также входит устранение перекоса моста возникающего вследствие перемещения тележки вдоль моста груза на гибком подвесе. *МЕТОДЫ.* Поставленные в исследовании задачи достигнуты за счет использования математического моделирования в среде Matlab Simulink и практических исследований. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Использование блоков коррекции, в том числе и на базе нечеткой логики привело к устранению перекоса моста, сведению его практически до нулевого значения, уменьшению амплитуды упругих колебаний в ферме моста до 45 процентов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование систем управления с блоками коррекции, в том числе и на базе нечеткой логики позволяет устранить рассинхронизацию скоростей перемещения опор моста мостового крана, что снижает нагрузку на металлоконструкцию крана, уменьшает истирание реборд колес и крановых путей, повышает надежность крана.

Ключевые слова: нечеткая логика; блок коррекции; перекос моста; имитационное моделирование; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Сафронов А.А. Разработка блока коррекции на базе нечеткой логики для системы управления механизмом перемещения груза мостового крана // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 30-41. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-30-41.

DEVELOPMENT OF A CORRECTION UNIT BASED ON FUZZY LOGIC FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE LOAD MOVEMENT MECHANISM OF AN OVERHEAD CRANE

Sinyukov A.V.¹, Sinyukova T.V.¹, Gracheva E.I.², Safronov A.A.³

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Saint-Petersburg,
Russia
zeitsn@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Introduction into the bridge movement drive control system of a bridge support movement synchronization unit, developed in stages on the basis of fuzzy logic to eliminate bridge tilt arising as a result of the movement of a flexible suspension load along the bridge by a trolley. *METHODS.* The objectives set in the study were achieved through the use of mathematical modeling in the Matlab Simulink environment and practical research. *RESULTS.* The use of correction units, including those based on fuzzy logic, led to the elimination of the bridge tilt, reducing it to almost zero, and reducing the amplitude of elastic vibrations in the bridge truss to 45 percent. *CONCLUSION.* The use of control systems with correction units,

including those based on fuzzy logic, allows eliminating the desynchronization of the speeds of movement of the bridge supports of the bridge crane, which reduces the load on the metal structure of the crane, reduces the wear of the wheel flanges and crane tracks, and increases the reliability of the crane.

Keywords: *fuzzy logic; correction unit; bridge skew; simulation; asynchronous motor; Matlab Simulink.*

For citation: Sinyukov A.V., Sinyukova T.V., Gracheva E.I., Safronov A.A. Development of a correction unit based on fuzzy logic for the control system of the load movement mechanism of an overhead crane. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 30-41. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-30-41.

Введение (Introduction)

Механизмы, выполняющие перемещение груза с помощью гибкой сцепки, испытывают воздействие от раскачивающегося груза в виде формирования нагрузки на металлическую конструкцию объекта, осуществляющего транспортировку груза. При перемещении моста мостового крана возможно появление такого явления, как неравномерное движение опор моста, которое возникает из-за отклонения тележки с гибко подвешенным грузом от центрального положения при перемещении груза в точку назначения. Данное явление приводит к формированию повышенной нагрузки на одну из сторон моста, вызывая истончение подкранового пути и реборд колес, также данный процесс приводит к возникновению упругих колебаний в ферме моста.

В работе [1] для борьбы с рассматриваемым явлением предлагается внедрение в систему управления механизмом перемещения блоков, производящих сравнение значений абсолютных перемещений опор крана, полученных с помощью энкодера, установленного на прижимном ролике на каждой опоре. Полученные данные поступают в систему управления объектом, при выявлении рассогласования происходит формирование корректирующего сигнала до тех пор, пока движение опор не станет равномерным.

В исследовании [2] в систему управления предложено введение задатчиков интенсивности и датчиков, формирующих величину схода колес моста мостового крана относительно рельсов по двум осям. Формирование сигнала на датчиках говорит о наличии перекоса, что вызывает возникновение сигнала коррекции. Также в рассматриваемой системе учитывается положение тележки относительно центра моста в каждый текущий момент времени, что позволяет более точно осуществлять управляющее воздействие на показатели скорости перемещения опор.

В связи с тем, что передаточные механизмы передней и задней опор не идентичны, характеристики приводов указанных опор также будут отличаться, соответственно, данные обстоятельства также приводят к формированию перекосных явлений, избавиться от которых в материале [3] предлагается с помощью замены двух двигателей на один, который посредством кинематических цепей будет иметь связи с опорами. Также в систему управления предлагается введение датчиков, фиксирующих появление перекоса и двигателя, в функции которого входит корректировка положения моста.

Если в систему управления завести сигналы с индуктивных датчиков приближения, установленных у места сцепления опоры с колесом, фиксирующих расстояние до рельса, то по суммарным данным с датчиков с каждой из опор можно осуществить корректирующие воздействие на скорость движения опор, выравнивая их движение [4].

В работе [5] рассматривается структурная схема, содержащая совокупность устройств, в том числе и микропроцессорный блок, что позволяет привести к устранению возникновения не только перекоса, но и поперечного схода крана с рельсов. Данные с установленных на объекте бесконтактных датчиков по отклонению каждого из колес относительно центра и по направлению перемещения объекта поступают в микропроцессорный блок, откуда в качестве сигнала корректировки воздействуют на частоту вращения приводов правой и левой опор. При данном способе управления используется скалярная система управления, на ряде промышленных устройств получили широкое применение векторная система управления и прямое управление моментом [6-8]. Недостатком данной методики является громоздкий математический аппарат.

Для корректировки показателей поперечного смещения движения моста в работе [9]. В предлагаемой конструкции присутствуют датчики измерения частоты вращения электродвигателей, сигналы с которых заведены на частотный преобразователь, их

значения оказывают корректирующее воздействие на скорость движения обеих опор моста.

В работе [10] в качестве датчиков, фиксирующих появление отклонения от центрального положения колес моста, используются индуктивные датчики, установленные на передних и задних опорах моста, при появлении разницы в показаниях с датчиков, происходит подача в систему управления корректирующего сигнала с некоторым коэффициентом, его значение прямо пропорционально величине появившегося перекаса.

Для современного этапа развития промышленного производства характерным является комплексная автоматизация, проводимая с использованием интеллектуальных систем электропривода. Крановые механизмы, хотя и являются вспомогательным оборудованием, обеспечивающим работу основного технологического оборудования, в ряде случаев встроены в технологический процесс, и их безаварийная качественная работа является непременным условием выполнением всего технологического цикла.

Для обеспечения высокоточной и ответственной работы требуется, помимо высокой квалификации машиниста крана, обеспечение системами электроприводов всех крановых механизмов, выполнение скоростных режимов и демпфирование раскачивания груза до минимального уровня, а также минимизация колебаний фермы моста, связанных с его возможным перекасом, что требует совершенствования существующих систем электропривода.

Рассматриваемый объект, как и большинство технологических механизмов, является многомассовой системой [11].

Методам оптимизации систем управления посвящено значительное количество работ [12, 13].

Использование блоков коррекции на базе нечеткой логики и нейросетевых технологий в настоящее время является оптимальным методом обеспечения надлежащего управления объектом [14, 15].

Материалы и методы (Materials and methods)

Механические процессы

На мостовых кранах присутствие в устройстве перемещающихся механизмов, осуществляющих транспортировку на гибком подвесе груза, формирует создание дополнительной нагрузки на металлоконструкцию моста. На данном объекте таким механизмом является тележка мостового крана, осуществляющая перемещение груза вдоль пролета моста. Оказавшись под действием описанной нагрузки, опоры моста становятся неравномерно нагруженными из-за смещения тележки от центральной точки моста (рис. 1). Данное явление вызывает формирование перекаса моста.

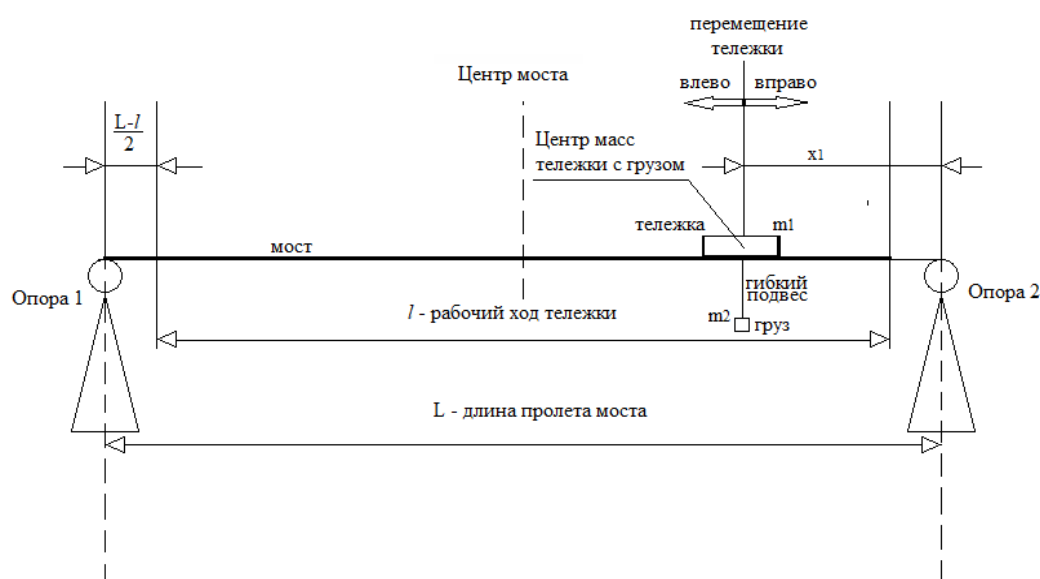


Рис. 1. Отражение процесса формирования разных нагрузок на опоры моста Fig. 1. Reflection of the process of forming different loads on bridge supports

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В работе, при исследовании, были приняты следующие допущения – не учитывались упругие деформации вала соединяющего привода с колесами, так как его длина не значительная, следовательно, данную связь можно принять за абсолютно жесткую.

На рассматриваемом объекте привод, служащий для перемещения моста мостового крана, приводится в движение за счет двух двигателей, установленных вблизи концевых балок.

Учитывая принятое допущение, взаимовлияние всех механизмов моста представляет собой трехмассовую систему (рис. 2). В рассматриваемой схеме можно выделить приведенную массу моста J_5 (1/2 часть моста, имеющая соединение с двигателем М5), приведенную массу моста J_6 (1/2 часть моста, имеющая соединение с двигателем М6), приведенную жесткость C_m отражающая связь между J_5 и J_6 , вес моста m_m , моменты M_5 , M_6 на валу двигателей М5 и М6, статические моменты M_{c5} и M_{c6} двигателей М5 и М6, скорости ω_5 и ω_6 двигателей М5 и М6.

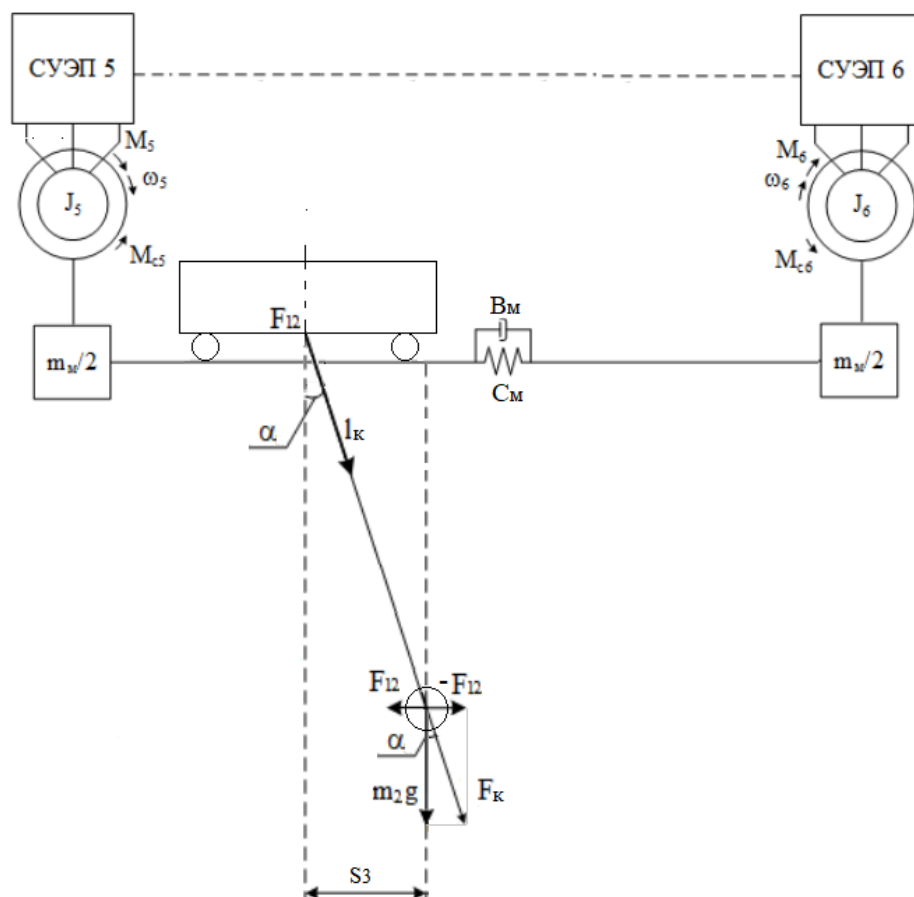


Рис. 2. Механические взаимосвязи в механизмах мостового крана Fig. 2. Mechanical relationships in bridge crane mechanisms

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В приведенной системе могут возникнуть момент перекоса M_{Π} вызванный колебанием груза ближе к одной из опор и моменты $M_{\Pi 5}$, $M_{\Pi 6}$ возникающие из-за движения тележки с раскачивающимся грузом по пролету моста.

Приведенная на рисунке 2 взаимосвязь отражена в виде функциональной схемы, представленной на рисунке 3.

Устранение перекоса или достижение его минимизации возможно за счет введения в систему управления блоков коррекции. Использование корректирующих структур позволяет достичь синхронизации в работе приводов моста благодаря формированию сигнала коррекции, показатели которого напрямую зависят от значения перекоса моста. Указанный сигнал оказывает воздействие на скорость движения каждой из опор моста, притормаживая одну из них и разгоняя вторую.

Рассмотрим процессы, происходящие на реальном объекте в ферме моста, их фиксация осуществлялась с помощью тензодатчиков, которые были установлены на пролетной балке механизма моста мостового крана. Полученные данные по формированию упругого момента усиливались, а затем передавались в схему измерительного моста. Вывод параметров происходил с помощью промышленного самописца. Представленная на рисунке 4 тензограмма отражает возникающую в металлической конструкции мостового крана

нагрузку, исследование, выполненное в данной работе, направлено на достижение ее минимизации. Отраженные на тензограмме низкочастотная и высокочастотная составляющие колебаний вызваны, первая – присутствующими в системе колебаниями перемещаемого груза, вторая – перекосными явлениями в ферме моста. На начальном этапе видно, что происходит разгон механизма, затем зафиксирован установившийся процесс и торможение.

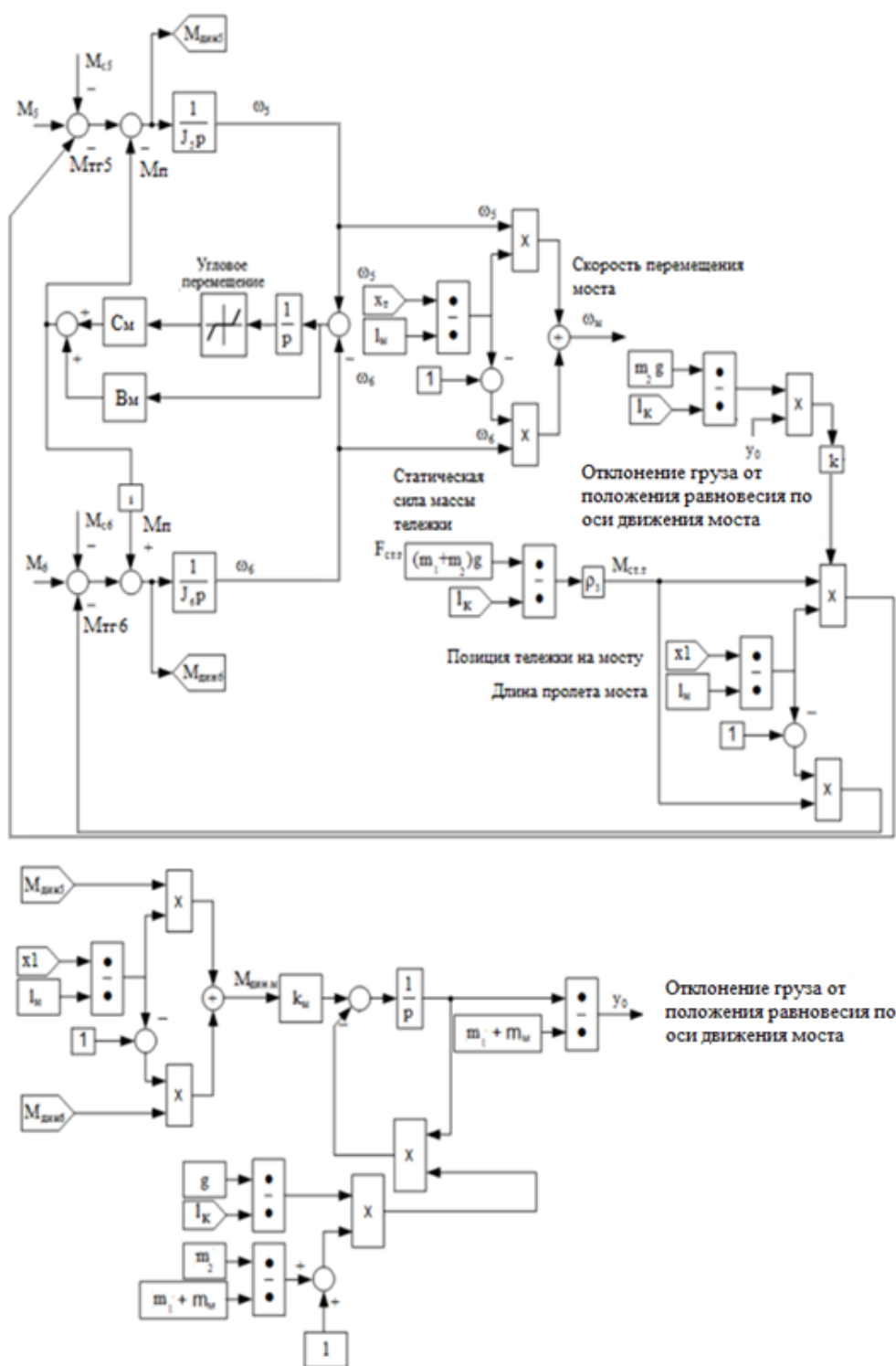


Рис. 3. Математический аппарат, описывающий процессы, происходящие при перемещении механизма моста мостового крана при наличии в структуре груза на гибком подвесе

Fig. 3. A mathematical apparatus that describes the processes occurring when the bridge mechanism of a bridge crane is moved when there is a load on a flexible suspension in the structure

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

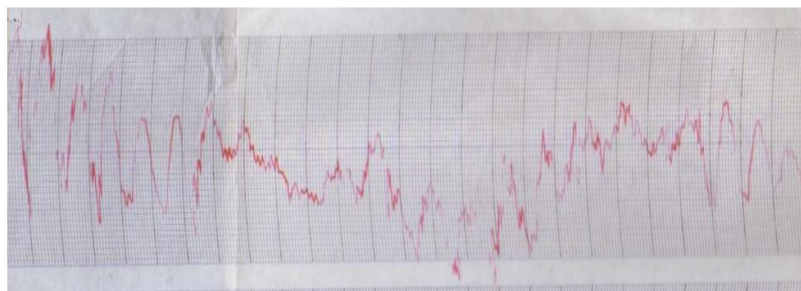


Рис. 4. Тензограмма

Fig. 4. Tensogram

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Алгоритм отслеживания формирования перекося моста и разработка блока коррекции на базе нечеткой логики

В качестве блока коррекции предлагается внедрение в систему регулятора, функционирующего на основании нечетких правил, процесс создания предлагаемого блока, в отличие от стандартных нечетких регуляторов происходил поэтапно, без использования уже готовых специальных библиотек, имеющихся в Matlab. Предлагаемый вариант позволит снизить нагрузку на вычислительный ресурс, повысит точность настройки корректируемых параметров. Этапы разработки предлагаемого регулятора происходили с созданием блоков на каждой из ступеней согласно работе [16], в отличие от стандартного регулятора, структура которого уже реализована в Matlab, в нее необходимо ввести только правила, задать параметры, к которым будет в процессе работы обращаться стандартный нечеткий регулятор.

Функционирование предлагаемого регулятора происходит на основании формирования определенных этапов, прежде чем начинать разработку нечеткого регулятора, необходимо определиться с методикой, на основании которой он будет функционировать, приводя к ограничению перекося моста. Процесс обеспечения синхронизации скоростей двигателей моста возможен за счет формирования сигнала коррекции в каждой из систем управления двигателями. Установка на опоры индуктивных датчиков позволит на основании данных с них формировать представление о смещении перемещающегося моста относительно центральной оси. Аналоговые сигналы с датчиков формируют пропорциональные данные на основании замера расстояния от датчика до рельса, по которому движутся каждая из опор (рис. 5).

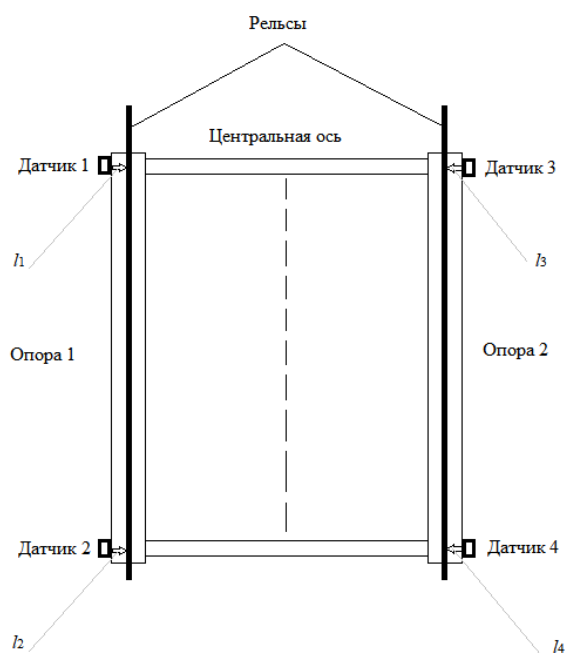


Рис. 5. Структура процесса передвижения моста по рельсам

Fig. 5. Structure of the process of moving a bridge along rails

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Чем меньше нагружена опора, тем быстрее она будет двигаться, опора ближе к которой происходит смещение относительно центральной оси тележки с грузом будет отставать. При перемещении моста, в зависимости от показателей с датчиков возможны следующие варианты движения моста:

– отсутствует перекося, если:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 = 0 \text{ и } \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 = 0;$$

– мост движется вперед, повышенная нагрузка формируется на опору 1:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 > 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 < 0;$$

– мост движется назад, повышенная нагрузка формируется на опору 2:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 > 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 < 0;$$

– мост движется вперед, повышенная нагрузка формируется на опору 2:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 < 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 < 0;$$

– мост движется назад, повышенная нагрузка формируется на опору 1:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 < 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 > 0.$$

Под V_m принято направление в котором перемещается мост, в математическом аппарате описывающем устранение перекося оно отражается знаком, если перемещении происходит вперед, то с блока sign выдается 1, при движении назад минус 1 (рис. 6).

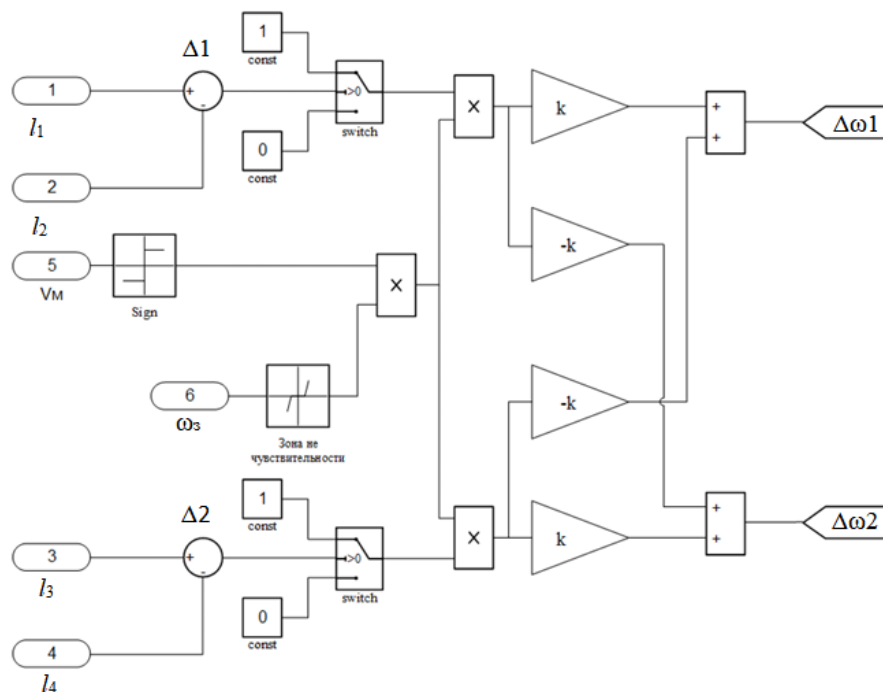


Рис. 6. Методика устранения перекося

Fig. 6. Method for correcting skew

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все корректирующие мероприятия формируются в установившемся режиме. Входными сигналами в рассматриваемой методике являются данные полученные с датчиков l_1, l_2, l_3, l_4 , направление перемещения моста V_m , сигнал формирующий задание на скорость перемещения моста ω_3 , на выходе формируются данные с корректирующими сигналами на изменение скорости первой $\Delta\omega_1$ и второй $\Delta\omega_2$ опоры.

Для разработанного нечеткого регулятора на основании [16] входными сигналами являются данные с датчиков l_1, l_2, l_3, l_4 , а выходными сигналами величина корректировки скорости первой $\Delta\omega_1$ и второй $\Delta\omega_2$ опоры.

В среде Matlab собрана разработанная двухдвигательная система управления (рис. 7).

Моделирование проводилось без использования блока коррекции перекося моста и с наличием в системе управления системы коррекции, функционирующей на основании рассмотренного метода снижения перекося моста (рис. 6) и с разработанным поэтапно нечетким регулятором (рис. 8). Представленные графики показывают, что процесс разгона формируется без ввода в систему управления блока коррекции, это видно по формирующемуся рассогласованию в движении первой и второй опоры, как только система переходит в установившийся режим, происходит введение блока коррекции, что позволяет постепенно свести к минимуму рассогласование в движении опор моста.

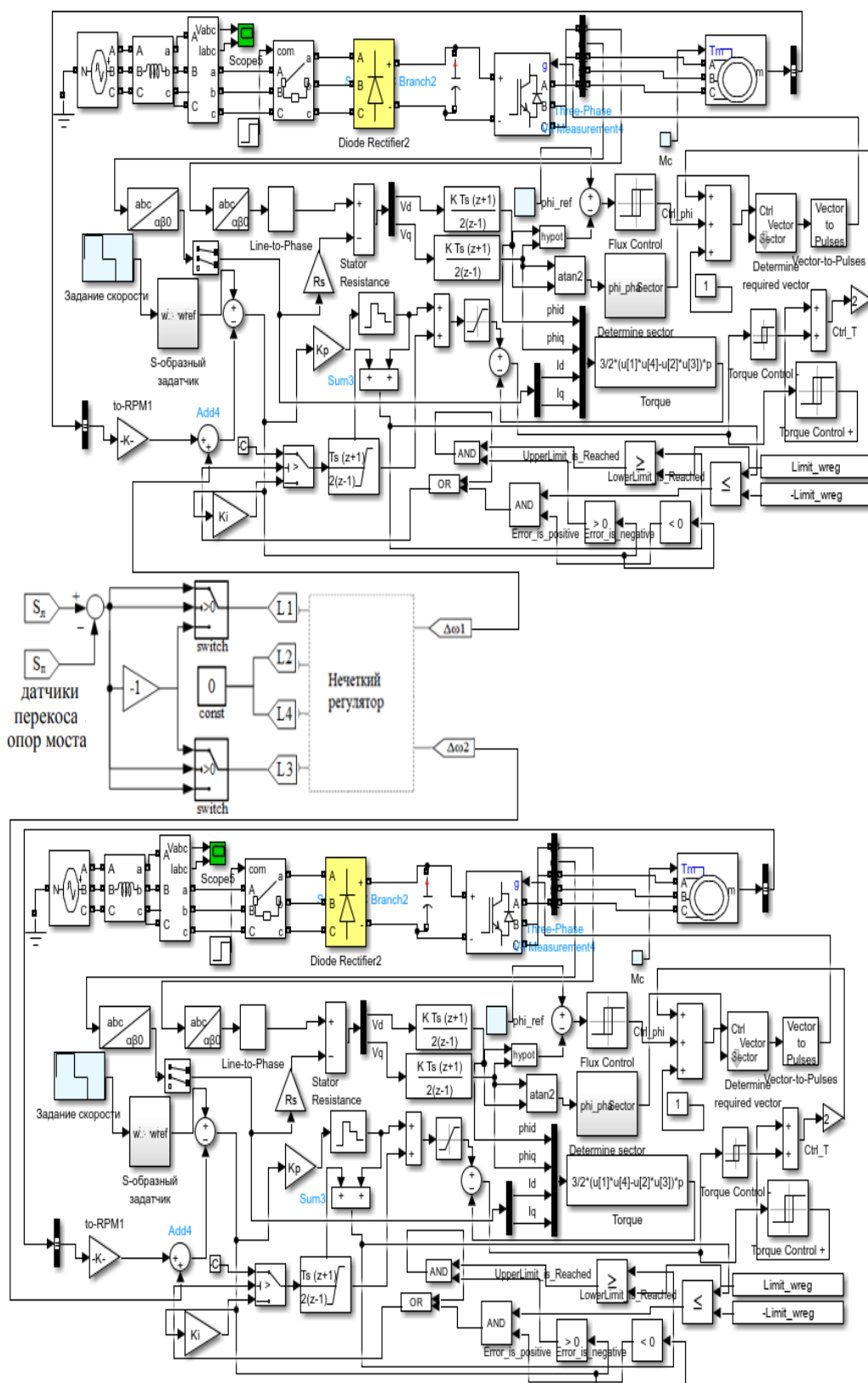


Рис. 7. Двухдвигательная система с блоком Fig. 7. A system with an unadaptive observer коррекции

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

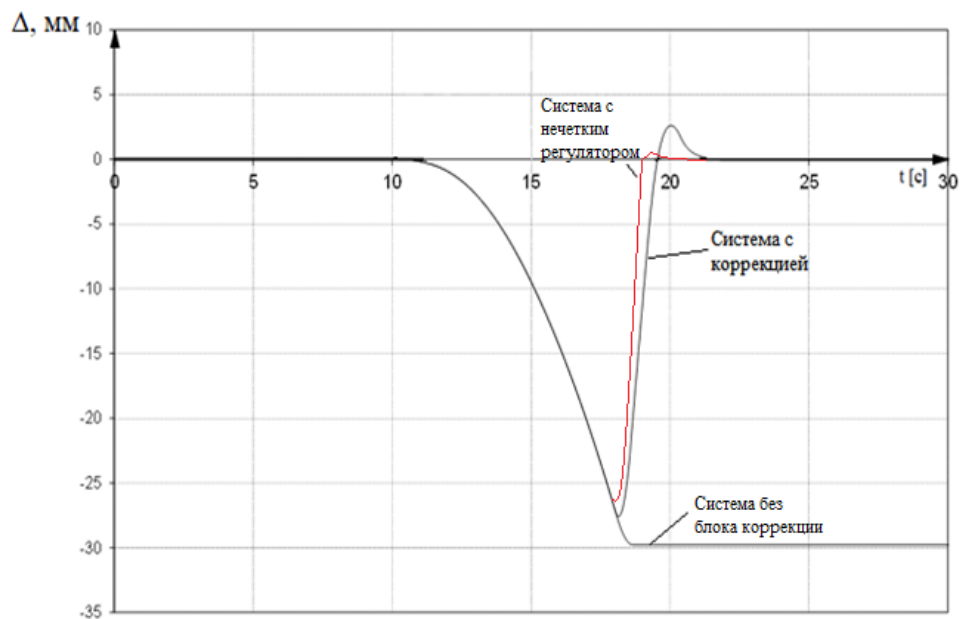


Рис. 8. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах
Fig. 8. Characteristics showing the nature of velocity formation in the studied systems

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Рассмотрим графики формирования перекоса моста M_{Π} и приводного момента M_1 и M_2 (рис. 9) при внедрении в системы управления приводами моста блока коррекции. При пуске блок коррекции не включен, как только система выходит на установившийся режим, блок синхронизации скоростей вводится в систему управления, приблизительно на 20 секунде, что приводит к устранению перекоса и выравниванию моментов.

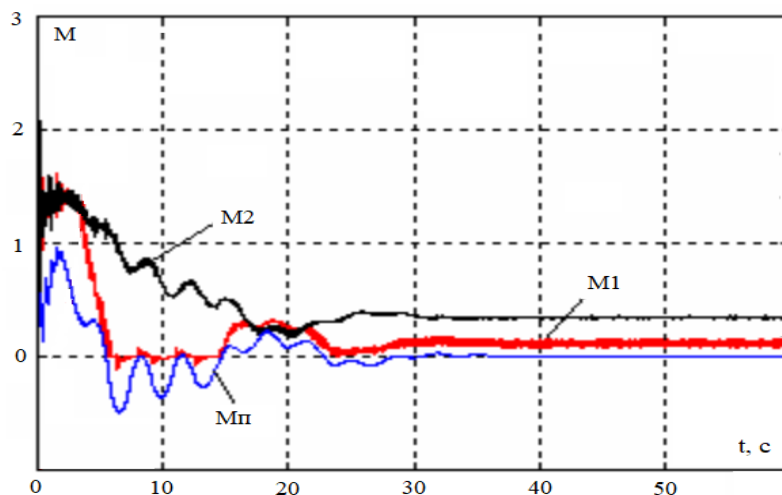


Рис. 9. Кривые, показывающие формирование перекоса моста (M_{Π}), приводных моментов (M_1 и M_2) в системе с блоком коррекции
Fig. 9. Curves showing the formation of the bridge misalignment (M_{Π}), driving torques (M_1 and M_2) in a system with a correction unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На реальном объекте также были проведены исследования при отсутствии и наличии в системе управления блоков синхронизации скоростей опор крана (рис. 10).

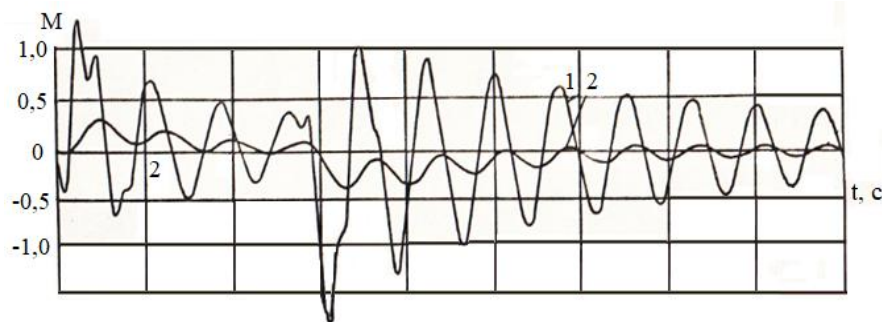


Рис. 10. Формирование упругих усилий возникающих в ферме моста в системе, не имеющей блок коррекции скоростей (1) и в системе с блоком коррекции скоростей (2)

Fig. 10. Formation of elastic forces in the bridge farm in a system without a speed correction unit (1) and in a system with a speed correction unit (2)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленные кривые позволяют сделать вывод о работоспособности предлагаемого решения, направленного на достижение синхронизации скоростей за счет внедрения в систему управления блоков коррекции скоростей движения правой и левой опор. Происходит заметное снижение амплитуды упругих колебаний до 45 процентов, что ведет к повышению безаварийной работы электромеханической системы, за счет снижения нагрузки на нее.

Выводы (Conclusions)

Внедрение в систему управления блока устранения перекоса на базе разработанного нечеткого регулятора позволило устранить рассогласование в движении опор моста и снизить нагрузку на металлоконструкцию моста.

Литература

1. Пат. 97971 Российская Федерация, МПК В60L15/20. Устройство автоматического ограничения перекоса опор мостового крана, Щедринов А. В.; заявитель: Щедринов А.В., Коврыжкин А.А., Колмыков В.В. № 2010109170/22; заявка от 11.03.2010; опубл. 27.09.2010. Бюл. № 27. с.
2. Либерман Я.Л. Современные системы автоматического устранения перекоса моста при эксплуатации кранов // Сб. докладов и сообщений V Уральского конгресса ПТО. – Екатеринбург: Уральский экспертный центр. 2012.
3. Пат. 127374 Российская Федерация, МПК В66С 17/00. Система управления перемещением мостового крана, Либерман Я.Л.; заявитель: Либерман Я.Л. № 2012150896/11; заявка от 27.11.2012; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.
4. Пат. 119734 Российская Федерация, МПК В66С 13/18. Устройство ограничения перекоса мостового крана, Кочевин Д.В.; заявитель: Кочевин Д.В., Федяева Г.А. № 2012115599/11; заявка от 18.04.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.
5. Пат. 119734 Российская Федерация, МПК В66С 13/18. Устройство ограничения перекоса мостового крана, Кочевин Д.В.; заявитель: Кочевин Д.В., Федяева Г.А. № 2012115599/11; заявка от 18.04.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.
6. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. – 2019. №3. С. 33-37.
7. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O.. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
8. Ning Z.M., Demkin V., Lin Y.H., Soe Win K. Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system // In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. 2020. pp. 2591-2594.
9. Пат. 164799 Российская Федерация, МПК В66С 9/105В 19/02, H02P 5/52, H02P 21/06, G. Система автоматического управления асинхронным электроприводом передвижения с коррекцией поперечного смещения, Федяева Г.А.; Заявитель: Федяева Г.А., Кочевин Д.В., Смородова Т.В., Конохов Д.В., Бойко В.Н. № 2015127272/11; заявка от 07.07.2015; опубл. 20.09.2016. Бюл. № 26.
10. Мещеряков В.Н., Колмыков В.В., Ласточкин Д.В. Разработка системы автоматического ограничения перекоса фермы мостового крана // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век:

материалы XVI международной научно-практической конференции. Орел, 26-28 сентября 2018 г. С. 30-37.

11. Дмитриева В.В., Дзюин Д.В. Математическая и компьютерная модель многомассовой системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 3-12. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-2-3-12>

12. Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. No.10. pp. 1-11.

13. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, P.D. Shendge, Phadke S. B. Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).

14. Синюков А.В., Абдуллазянов Э.Ю., Заруцкий Н.Н., Синюкова Т.В., Грачева Е.И. Использование аппарата на базе нечеткой логики для демпфирования колебаний гибкоподвешенного груза. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024; 26(3): 33-49. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49>.

15. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022. 22186939.

16. Вълчев С., Синюков А.В., Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В. Разработка нечеткого регулятора для демпфирования колебаний гибкоподвешенного груза в электромеханических системах крановых механизмов // Электричество. – 2025 г. № 4. С. 13-27.

Авторы публикации

Синюков Алексей Владимирович – ассистент, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия, технический писатель ООО «Грин-АПИ», г. Химки, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, E-mail: zeitsn@yandex.ru

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированного электропривода и робототехники» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. E-mail: stw0411@mail.ru

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия.

Сафронов Алексей Анатольевич – д-р техн. наук, член-корр., профессор, заведующий отделением плазменных устройств и технологий, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

1. Pat. 97971 Russian Federation, IPC B60L15/20. Device for automatic limitation of bridge crane support tilt, Shchedrinov A. V.; applicant: Shchedrinov A. V., Kovryzhkin A. A., Kolmykov V. V. No. 2010109170/22; application dated 11.03.2010; published 27.09.2010. Bulletin No. 27. p.

2. Liberman Ya. L. Modern systems for automatic elimination of bridge tilt during crane operation // Collection of reports and communications of the V Ural Congress of Industrial and Technical Equipment. – Ekaterinburg: Ural Expert Center. 2012.

3. Pat. 127374 Russian Federation, IPC B66C 17/00. Overhead Crane Movement Control System, Liberman Ya.L.; applicant: Liberman Ya.L. No. 2012150896/11; application dated 27.11.2012; published 27.04.2013. Bulletin No. 12.

4. Pat. 119734 Russian Federation, IPC B66C 13/18. Overhead Crane Skew Limitation Device, Kochevinov D.V.; applicant: Kochevinov D.V., Fedyaeva G.A. No. 2012115599/11; application dated 18.04.2012; published 27.08.2012. Bulletin No. 24.

5. Pat. 119734 Russian Federation, IPC B66C 13/18. Device for limiting the tilt of an overhead crane, Kochevinov D.V.; applicant: Kochevinov D.V., Fedyaeva G.A. No. 2012115599/11; application dated 18.04.2012; published 27.08.2012. Bulletin No. 24.

6. Kozyaruk A.E. Modern efficient electric drives of production and transport mechanisms // Electrical Engineering. - 2019. No. 3. P. 33-37.

7. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O.. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives

(SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.

8. Ning Z.M., Demkin V., Lin Y.H., Soe Win K. Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system // In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. pp. 2591-2594.

9. Pat. 164799 Russian Federation, IPC B66C 9/105B 19/02, H02P 5/52, H02P 21/06, G. Automatic control system for an asynchronous electric travel drive with lateral displacement correction, Fedyaeva G.A.; Applicant: Fedyaeva G.A., Kochevinov D.V., Smorudova T.V., Konokhov D.V., Boyko V.N. No. 2015127272/11; application dated 07.07.2015; published 20.09.2016. Bulletin No. 26.

10. Meshcheryakov V.N., Kolmykov V.V., Lastochkin D.V. Development of a system for automatic limitation of the truss tilt of an overhead crane // Energy and resource saving - XXI century: materials of the XVI international scientific and practical conference. Orel, September 26-28, 2018. Pp. 30-37.

11. Dmitrieva V.V., Dzyuin D.V. Mathematical and computer model of a multi-mass system of a multi-motor electric drive of a belt conveyor // Mining equipment and electromechanics. 2024. No. 2 (172). Pp. 3-12. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-2-3-12>.

12. Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. No.10. pp. 1-11.

13. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, P.D. Shendge, Phadke S. B. Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).

13. Abdelaal AK, Shaheen AM, El-Fergany AA, et al. Sliding mode control based Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation. Results in Engineering. 2024; 24(102936):1-12. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936.

14. Sinyukov A.V., Abdullazyanov E.Yu., Zarutsky N.N., Sinyukova T.V., Gracheva E.I. Using a fuzzy logic-based device to dampen oscillations of a flexibly suspended load. News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2024; 26(3): 33-49. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49>.

15. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022. 22186939.

16. Valchev S., Sinyukov A.V., Meshcheryakov V.N., Sinyukova T.V. Development of a fuzzy controller for damping oscillations of a flexible-suspended load in electromechanical systems of crane mechanisms // Elektrichestvo. – 2025. No. 4. Pp. 13-27.

Authors of the publication

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, ООО «Grin-API», Khimki, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, E-mail: zeitsn@yandex.ru

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: stw0411@mail.ru

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksei A. Safronov – Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 22.07.2025 г.

Отредактировано 27.07.2025 г.

Принято 12.08.2025 г.