

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 62-523

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГИБКОПОДВЕШЕННОГО ГРУЗА

Синюков А.В.¹, Абдуллазянов Э.Ю.², Заруцкий Н.Н.¹, Синюкова Т.В.¹, Грачева Е.И.²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

stw0411@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования заключается в необходимости усовершенствования действующих систем управления промышленными механизмами с минимальными вложениями на реконструкцию, а также в востребованности надежных систем управления, использование которых позволяет повысить срок эксплуатации устройства в целом. **ЦЕЛЬ.** Разработать простую и одновременно эффективную систему управления промышленным объектом, позволяющую демпфировать колебания гибкоподвешенного груза. На мостовых кранах одним из механизмов для перемещения груза по территории цеха является механизм тележки. Тележка мостового крана служит для перемещения груза вдоль пролета моста, при этом перемещаемый груз может иметь как жесткий, так и гибкий подвес. Использование гибкого подвеса приводит к появлению колебаний в виде раскачивания перемещаемого груза. Данные колебания являются негативным явлением, оказывающим отрицательное воздействие на механическую конструкцию крана и на электрическую систему управления электроприводом тележки. На рассматриваемом механизме установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, на основании проведенных исследований для управления им выбрана векторная система, в которую, для подавления колебаний груза предложено внедрение регулятора, функционирующего на базе нечеткой логики. Предлагаемый нечеткий регулятор производит корректировку скорости двигателя в зависимости от угла отклонения гибкоподвешенного груза, его уникальность заключается в простоте реализации и минимальном количестве сигналов управления. Регуляторы данного типа хорошо зарекомендовали себя, так как обладают высоким быстродействием, хорошим откликом в динамике, позволяют оптимизировать систему управления при косвенном определении параметров. **МЕТОДЫ.** В ходе исследования, для решения обозначенных задач, была использована методика математического моделирования. Исследование системы управления проводилось в среде моделирования MATLAB в подсистеме Simulink. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье отражена значимость темы исследования, рассмотрены имеющиеся методы гашения колебаний гибкоподвешенного груза. Для исследования была разработана система, содержащая подсистему, в функции которой входит отслеживание динамики перемещения тележки и груза. В данной статье предложен контроллер управления, работающий на базе правил нечеткой логики. Регулятор прост в реализации, имеет один сигнал управления, при этом нечеткая логика позволяет гибко настроить систему управления, что дает возможность получить требуемые характеристики управления. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Моделирование процесса работы тележки в среде MATLAB Simulink происходило с изменением массы груза и длины подвеса, анализ всех вариантов моделирования привел к выводу, предлагаемый контроллер на базе нечеткой логики позволяет погасить колебания груза при различных исходных параметрах.

Ключевые слова: демпфирование колебаний; векторное управление; гибкий подвес; электрический привод; нечеткий регулятор.

Для цитирования: 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. Т.26. № 3. С. 33-49. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-33-33-49.

USING A FUZZY LOGIC-BASED APPARATUS FOR DAMPING VIBRATIONS OF A FLEXIBLE LOAD

Sinyukov ¹ AV., Abdullazyanov ² E.YU., Sinyukova ¹ TV., Zaruckiy ¹ N.N., Gracheva ² EI.

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

stw0411@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the research lies in the need to improve existing control systems for industrial mechanisms with minimal investment in reconstruction, as well as the demand for reliable control systems, the use of which can increase the service life of the device as a whole. THE PURPOSE. To develop a simple and at the same time effective control system for an industrial facility that allows damping vibrations of a flexible load. On overhead cranes, one of the mechanisms for moving cargo around the workshop is the trolley mechanism. The overhead crane trolley is used to move cargo along the bridge span, and the transported cargo can have either a rigid or flexible suspension. The use of a flexible suspension leads to vibrations in the form of rocking of the moved load. These vibrations are a negative phenomenon that has a negative impact on the mechanical structure of the crane and on the electrical control system of the electric drive of the trolley. An asynchronous motor with a squirrel-cage rotor is installed on the mechanism under consideration; based on the research carried out, a vector system was selected to control it, into which, in order to suppress load fluctuations, it was proposed to introduce a controller operating on the basis of fuzzy logic. The proposed fuzzy controller adjusts the engine speed depending on the angle of deflection of the flexible load; its uniqueness lies in its ease of implementation and the minimum number of control signals. Regulators of this type have proven themselves well, as they have high speed, good response in dynamics, and allow optimization of the control system by indirectly determining parameters. METHODS. During the study, mathematical modeling techniques were used to solve the identified problems. The study of the control system was carried out in the MATLAB modeling environment in the Simulink subsystem. RESULTS. The article reflects the significance of the research topic and discusses the available methods for damping vibrations of a flexible load. For the study, a system was developed containing a subsystem whose functions include tracking the dynamics of the movement of the cart and cargo. This article proposes a control controller operating on the basis of fuzzy logic rules. The controller is simple to implement, has one control signal, while fuzzy logic allows you to flexibly configure the control system, which makes it possible to obtain the required control characteristics. CONCLUSION. Simulation of the trolley operation process in the MATLAB Simulink environment took place with a change in the mass of the load and the length of the suspension; the analysis of all modeling options led to the conclusion that the proposed controller based on fuzzy logic makes it possible to dampen load fluctuations for various initial parameters.

Keywords: vibration damping; vector control; flexible suspension; electric drive; fuzzy controller.

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Fund for Assistance to the Development of Small Innovative Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (Innovation Promotion Fund) on the basis of agreement No. 17227GU/2021 dated December 22, 2021.

For citation: Sinyukov AV., Abdullazyanov E.YU., Sinyukova TV., Zaruckiy N.N., Gacheva EI. Using a fuzzy logic-based apparatus for damping vibrations of a flexible load. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 33-49. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49.

Введение (Introduction)

Цель исследования заключается в разработке простой и надежной системы

управления действующим объектом, содержащей блок коррекции, реализованный с использованием правил нечеткой логики, позволяющей гасить колебания гибкоподвешенного груза.

Процесс автоматизации производственных систем и их отдельных агрегатов на действующих предприятиях играет весомую роль. Данные мероприятия влияют на повышение уровня надежности объектов, задействованных в технологических процессах, увеличивают производительность труда, обеспечивают создание максимально безопасной среды, в которой происходит выполнение работ по обслуживанию объектов. Оборудование, используемое для подъема и перемещения груза, в данных технологических системах, играет значимую роль. Безупречное функционирование всех механизмов, установленных на мостовых кранах, напрямую зависит от состояния системы управления данными объектами. На текущий момент наметились тенденции на использование на крановых механизмах принципиально новых, регулируемых систем с обратными связями. Это стало возможно благодаря автоматизации систем управления и постоянно ведущимся разработкам в области электроники и микропроцессорной техники. Использование усовершенствованных систем управления позволило контролировать и корректировать происходящие внутри объекта процессы [1-3].

Системы управления для крановых механизмов, по мере их усовершенствования, прошли путь от систем с двигателями постоянного тока, которые хорошо зарекомендовали себя с позиций обеспечения широкого диапазона регулирования скорости, но при этом, были не лишены недостатков, в виде присутствия в устройстве двигателя щеточно-коллекторного узла, который нуждался в постоянном обслуживании, до использования частотно-регулируемого электропривода [4].

На промышленных предприятиях для механизмов кранового электропривода используются специализированные крановые трехфазные асинхронные электродвигатели переменного тока, которые получили широкое применение на механизмах, режим работы которых является легким или средним. В случае тяжелых условий работы использование асинхронных электродвигателей имело ограничение из-за небольшого допустимого числа включений и сложности регулирования происходящих в электроприводе процессов. Если сравнивать асинхронные двигатели с двигателями постоянного тока, то первые, несомненно, выигрывают, в связи с тем, что они просты в обслуживании, имеют невысокие показатели по стоимости, их ремонт менее трудоемкий [5- 7].

Для регулирования скорости без обеспечения плавности хода длительное время использовались на механизмах перемещения и подъема асинхронные двигатели с фазным ротором. В них изменению скорости способствовало введение или выведение из цепи ротора добавочных сопротивлений, которые, в процессе эксплуатации сильно грелись. На сопротивлениях наблюдались значительные потери энергии, а также возникала из-за описанных процессов постоянная необходимость в обслуживании блоков сопротивлений. Разработка частотного преобразователя позволила создать оптимальную систему управления, которая, при небольших габаритах, по сравнению с рассмотренными системами, обеспечивала плавность и широкий диапазон регулирования скорости [8].

Использование преобразователей частоты для регулирования скорости движения крановых механизмов дало возможность применять асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при различных режимах технологического процесса, также привело к улучшению динамики работы крана в целом [9, 10]. На крановых механизмах используются как скалярные, так и векторные системы управления. Исследованию данных систем с блоками коррекции, позволяющими улучшить исходную систему управления и добиться энергосбережения, улучшения динамических и других показателей электропривода посвящено значительное количество работ [11, 12].

Объектом для исследования и анализа, происходящих на нем процессов, выбрана тележка мостового крана. Рабочий цикл имеет характерную для данных механизмов последовательность. Перед перемещением груза, он зацепляется грузозахватывающим элементом крана, затем крюк (механизм захвата) плавно начинают поднимать до достижения необходимой высоты, о которой свидетельствует момент натяга тросов. По окончании натяжения троса происходит подъем груза на заданную высоту. Из анализа исследований систем управления крановыми механизмами, было выявлено, что чем выше будет поднят груз, тем значительнее диапазон и частота его колебаний [13]. По завершении подъема груза на необходимую высоту, его, посредством тележки,

перемещают в место складирования. По достижении заданного участка, механизм захвата с грузом опускают, отцепляют груз, поднимают механизм захвата на безопасную высоту, а затем тележка возвращается в исходное положение. На основании представленного рабочего цикла тележки можно говорить о том, что ее перемещение имеет повторно-кратковременный характер, с повторяющимися пусками и остановками, а при движении в обратном направлении наблюдается реверс.

Все механизмы мостового крана, при своей работе, подвергаются влиянию динамических нагрузок, вызванных массой перемещаемого груза (раскачивание груза) и воздействием ветровой или снеговой нагрузки. Так как выбранная для исследования тележка мостового крана расположена в цеху, следовательно, воздействие ветровой или снеговой нагрузки на нее не происходит и данный показатель, как воздействующий на систему управления не учитывается. При исследовании не учитывается присутствие неровностей на рельсовых путях, которые также могут стать дополнительным источником колебаний подвешенного на гибком подвесе груза. Влияние динамических нагрузок на механизмы крана сильнее проявляется в периоды неустановившегося движения, такие как пуск и торможение. Также повышаются колебания при остановке тележки по причине наезда на упор [4].

Во время выполнения производственного цикла металлическая конструкция крана и его электропривода подвергаются влиянию динамических нагрузок, показатели которых могут принимать, в отличие от статических нагрузок, большие значения, это связано с присутствием в механизмах весовых движущихся масс. Наибольшим моментом инерции на мостовых кранах обладают роторы двигателей и перемещающиеся части крана. Процесс перемещения тележки крана состоит из нескольких этапов, после пуска механизма происходит его разгон до достижения необходимой скорости, далее характер движения приобретает установившийся вид, что продолжится до момента торможения. Этапы разгона и торможения механизма перемещения груза связаны с затратами кинетической энергии, которые накладывают отпечаток на показатели скорости перемещающихся масс [14, 15].

На показатели динамики движения механизма перемещения груза в горизонтальном направлении и самого груза влияет их приведенный момент инерции, так как он превосходит показатели момента инерции вращающихся частей электрического двигателя, следовательно, от его величины зависит продолжительность времени пуска и производительность крана. Величина оптимального значения ускорения согласно [16] $0,2 \text{ м/с}^2$. В процессе подбора значения ускорения, необходимо учитывать, что согласно [16] у асинхронных электрических двигателей с ротором короткозамкнутого типа время пуска должно быть более 3 секунд, при этом величина ускорения не должна принимать показателей, достижение которых приводит к возникновению нарушения сцепления колес с рельсами. Перечисленные явления могут быть предпосылками, способствующими появлению колебаний груза, которые, в свою очередь, будут дополнительной нагрузкой на все механизмы крана, что негативно скажется на его производительности. Величина угла отклонения элемента, служащего для подвеса груза, говорит о степени раскачивания груза.

Колебания, оказывают негативное влияние на точность выполнения его механизмами производственных задач, их появление приводит нарушению корректности позиционирования. Путем снижения скорости, в работе [17], предлагается демпфировать колебания груза, но использование данной методики вызовет увеличение переходного процесса, что повлияет на производительность грузоподъемного механизма, а для многих объектов, задействованных в технологических процессах, где на каждую операцию выделено строго определенное время, это нежелательное явление.

В работе [18] описаны методы гашения колебаний груза, при которых в задачи оператора входит только выбор направления перемещения механизма передвижения, регулирование скорости перемещения и гашение колебаний отрабатывается автоматизированной системой, причем на устойчивость системы управления не оказывает влияние отсутствие или наличие колебаний груза в момент пуска тележки. Значительным недостатком предлагаемых систем является необходимость присутствия в них сложных и дорогостоящих датчиков, выполняющих определение параметров колебаний груза.

Автоматический метод управления исполнительными механизмами мостового крана, при котором происходит определение текущего места положения груза, в условиях исходной неизвестности параметров перемещаемого груза и внешних возмущающих воздействий, представлен в работе [19]. Предложен подход, который

совмещается в себе возможность определения текущего положения тележки и одновременно позволяет демпфировать колебания подвешенного груза. В основе предлагаемой методики лежит упрощенное адаптивное управление. В схеме присутствует эталонная модель, являющаяся колебательным звеном, которое имеет собственную частоту, показатели которой ниже частоты объекта, управление которым осуществляется. В системе управления задействованы датчики, фиксирующие местоположение и скорость механизма передвижения, данные по величине линейного ускорения груза и величину угла отклонения подвески груза от вертикальной плоскости. Не смотря на явно имеющиеся достоинства, система перегружена датчиками, которые имеют некоторую временную погрешность в измерениях.

В работе [20] предложен универсальный контроллер для демпфирования колебаний груза при установке на объекте, как двигателей переменного тока, так и постоянного тока, который может использоваться в системах управления механизмов передвижения кранов любого типа. Корректность функционирования предлагаемого контроллера проверялась на модели, имитирующей подвешенный на тележке груз, представляющей собой математический маятник, у которого точка подвеса является подвижной. Процесс ускорения или замедления механизма передвижения груза сопровождался ускорением движения груза, величина которого напрямую зависит от значения момента электродвигателя. Так как на перемещаемый груз оказывают воздействие силы инерции, то это явление приводит к отклонению груза от вертикальной оси. Отклонение происходит в противоположную относительно движения тележки сторону. После того, как движение тележки достигнет номинального значения скорости, ускорения будет иметь нулевой показатель, а колебания из-за воздействия сил сопротивления постепенно затухнут.

Использование адаптивного регулятора, работающего на базе нечетких правил для демпфирования колебаний, имеющих место при гибком подвесе транспортируемого груза, рассмотрено в работе [21]. Предлагаемый способ базируется на создании нечеткой модели, функционирующей с использованием параметров механизмов крана по принципу работы нейронной сети. После отладки модели в нее вводится адаптивный алгоритм, в функции которого входит корректировка параметров системы, в частности ее нечеткой части, функционирующей на базе машинного обучения. Предлагаемый метод требует значительных системных ресурсов, так как при таком подходе необходимо хранение информации, в связи с тем, что нейронная сеть постоянно обращается к ней для совершенствования полученных результатов.

Для гашения колебаний поднимаемого на гибком подвесе груза в данной работе предлагается использовать разработанный на основании минимального количества необходимых для функционирования системы параметров блок нечеткой логики, который отличается от рассмотренных выше методов простотой реализации, но при этом выполняет возложенные на него функции. Внедрение в систему управления механизмом перемещения груза нечеткого регулятора позволит значительно снизить показатели динамического момента раскачивающегося груза, также, применение предлагаемого регулятора приведет к повышению устойчивости системы управления при появлении случайного воздействия на перемещаемый груз извне.

Научная значимость исследования состоит в востребованности новых, легко реализуемых систем управления функционирующих в условиях не полной определенности. Величина угла отклонения груза является постоянно меняющимся значением, если в системе управления использовать показатели угла отклонения, полученные с использованием измерительных устройств прямым или косвенным способом, то будет присутствовать постоянно накапливающаяся ошибка по определению сигнала, так как информация приходит с задержкой и не всегда соответствует истинному значению.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предлагаемого решения на действующих механизмах с минимальными затратами, для функционирования предлагаемого решения необходим контроллер, в который программно прописывается нечеткий алгоритм, при недостаточных ресурсах контроллера реализовать предложенный метод гашения колебаний возможно путем реализации нечеткого регулятора с помощью внешней микросхемы.

Материалы и методы (Materials and methods)

За основу, при разработке предлагаемого решения, была взята векторная система управления, которая обладает рядом значимых показателей, по сравнению со скалярной системой управления, важным ее достоинством является более простой математический

аппарат, необходимый для реализации векторного регулирования. Также, к положительной оставляющей векторного управления относится возможность регулирования переходных процессов. Создание предлагаемой системы управления механизмом перемещения тележки началось с разработки ее в среде MATLAB Simulink, на основании типовых зависимостей векторной системы управления и предварительного расчета параметров асинхронного двигателя. При расчетах и моделировании учитывался приведенный момент инерции тележки с грузом. Реализованная в Simulink компьютерная модель системы управления для электропривода тележки мостового крана приведена на рисунке 1.

В схеме, для управления процессами, происходящими в электрическом приводе, задействован трехфазный преобразователь частоты, в составе которого можно выделить инвертор, реализация которого выполнена на базе трехфазной мостовой схемы, содержащей IGBT транзисторы и обратные диоды. Роль выпрямителя в модели играет источник постоянного напряжения. Данная альтернативная замена позволяет несколько упростить процесс моделирования системы управления, но при этом, используемая методика, не отражается на актуальности происходящих при моделировании процессов и не влияет на его качество, это объясняется тем, что представленные на современном рынке частотные преобразователи, в звене постоянного тока обеспечивают стабильные показатели напряжения.

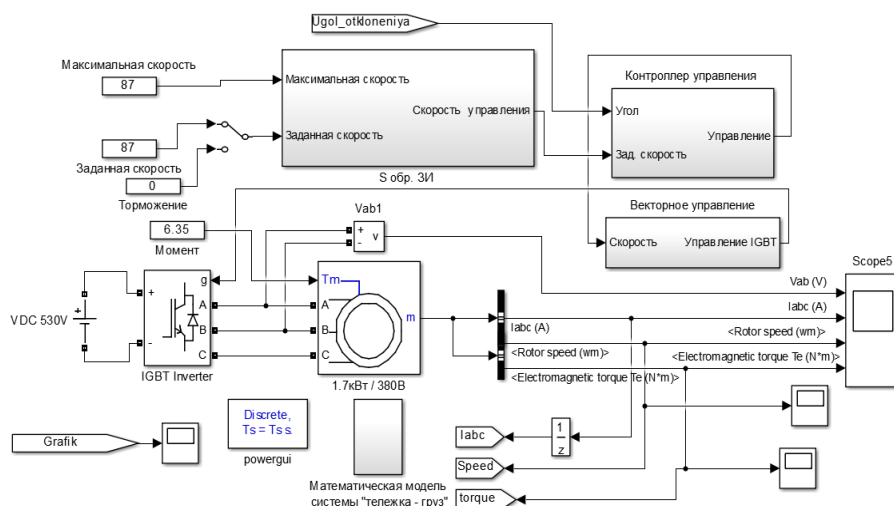


Рис. 1. Реализация в среде Matlab электропривода с векторной системой управления для крановой тележки

Fig. 1. Implementation in Matlab of an electric drive with a vector control system for a crane trolley

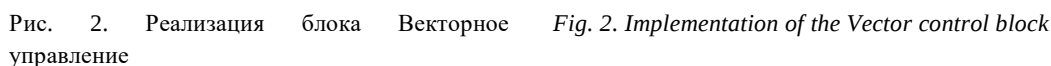
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На элементе VDC530V, являющимся в модели источником питания постоянного тока, задается фиксированное значение величины напряжения, которое формируется следующим образом, из линейного значения величины напряжения источника переменного тока (380 В) умноженного на $\sqrt{2}$ вычитается величина падения напряжения в первом звене инвертора, обеспечивающем преобразование переменного тока в постоянный ток. Падение напряжения обычно составляет около 1,5 В.

В процессе моделирования параметры электрического двигателя, рассчитанные по его номинальным параметрам, введенные в блок 1,7кВт/380В, выполняющий функции асинхронного двигателя остаются неизменными. В качестве управляющего сигнала инвертора, выступает значение импульса, сформировавшегося в системе векторного управления. Поступающий на инвертор сигнал формирует команду на включение определенных ключей IGBT транзистора.

Собранная в среде Matlab векторная система управления, полученная на основании математического аппарата классического векторного управления, отображена на рисунке 2.

В процессе моделирования цикл работы электрического привода тележки формировался следующим образом, по окончании подъема груза механизмом подъема происходит пуск тележки с гибкоподвешенным грузом. Присутствие в схеме S-образного задатчика интенсивности (рис. 3) дает возможность обеспечить плавное



The diagram illustrates a speed control system. It features a feedback loop where the actual speed (output) is compared with a reference speed (input). The error signal is processed by a PI controller, which includes a proportional gain of 1000 and an integral gain of 0.0454. The output of the controller is the control signal, which is then compared with the maximum speed (input) to produce the final control signal. The system includes two integrators (1/s) and two summing junctions. The feedback signal is also used to calculate the average speed, which is then compared with the reference speed to produce the error signal.

1 Максимальная скорость
2 Заданная скорость

Скорость управления

0.0454
k
 $k = t1/(t1 + t2) \cdot 0.5$

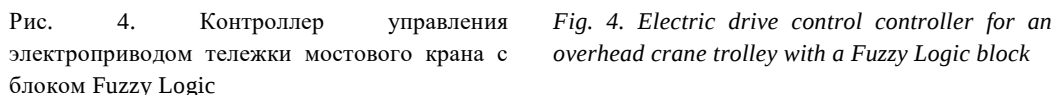
t1
 $\frac{1}{0.5s}$
t2
 $\frac{1}{5s}$

1000

1

Рис. 3. Математический аппарат S-образного задатчика интенсивности скорости движения тележки

В математической модели описанный алгоритм реализуется контроллером, присутствующим в системе управления приводом перемещения тележки (рис. 4).



39

В составе контроллера управления присутствует разработанный блок Fuzzy Logic Controller (рис. 5), функционирующий на базе правил нечёткой логики. Для корректной работы нечеткого контроллера требуются только показатели угла отклонения троса, на котором с помощью грузозахватывающего устройства подвешен груз.

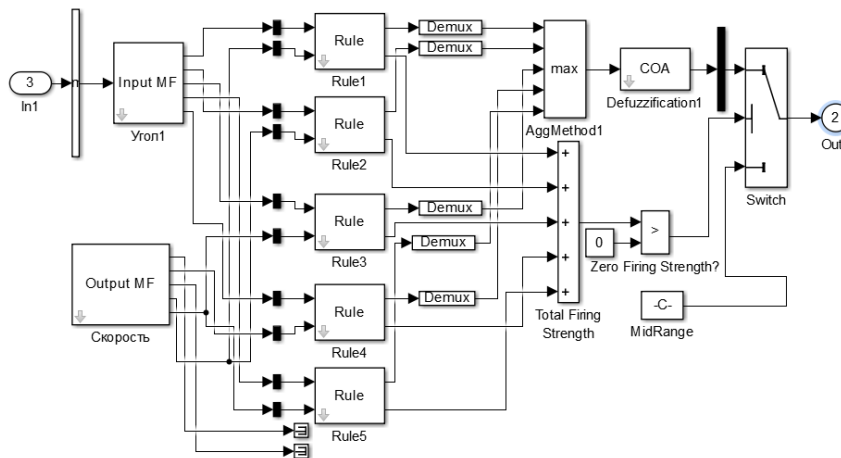


Рис. 5. Внутренне устройство блока Fuzzy Logic Controller

Fig. 5. Internal structure of the Fuzzy Logic Controller block

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

На основании разработанных правил, которые отражены на рис. 6, происходит следующее, в виде выходного сигнала с контроллера выдаётся управляющее воздействие, являющееся одним из входных сигналов сумматора, которое вычитается из второго входного сигнала сумматора, сформированного на S-образном задатчике интенсивности. Полученное на сумматоре значение подаётся на вход блока, реализующего векторную систему управления.

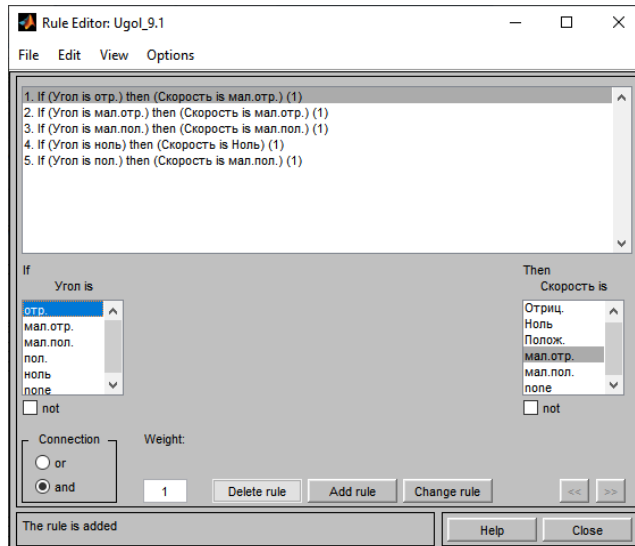


Рис. 6. Состав разработанных правил для контроллера на базе нечёткой логики

Fig. 6. Composition of developed rules for a controller based on fuzzy logic

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

Анализ разработанных правил показывает, что чем сильнее груз пытается отклониться от вертикального положения, тем выше значение управляющего воздействия сформировавшегося на выходе контроллера, реализованного на базе представленных нечетких правил, и тем весомее будет значение сигнала, поступающего на сумматор, за которым происходит формирование сигнала управления.

Процесс разгона тележки, представляет собой две фазы. На первом этапе происходит процесс, когда тележка только начинает своё движение с заданной, через S-образный задатчик интенсивности, скоростью. В самом начале разгона механизма

перемещение происходит отклонение гибкоподвешенного груза на некоторый угол, при обнаружении данного явления, включается в работу нечеткий контроллер. При этом величина сигнала, сформированного на выходе нечеткого регулятора, подается со знаком минус на сумматор, где вторым сигналом будет значение задания на скорость, сформированное на выходе S-образного задатчика интенсивности, данные действия приводят к ограничению темпа набора скорости механизмом перемещения груза. При данном процессе перемещаемый гибкоподвешенный груз при движении тележки будет всегда находиться позади нее. Под следующим этапом принимается процесс, возникающий по окончании периода работы S-образного задатчика интенсивности. За время его функционирования в контроллере накопился скомпенсированный сигнал управления, который поступает в систему регулирования, чем вызывает возвращение груза под тележку, при этом, не давая его движению перейти в колебательный процесс. Теперь темп разгона, который ранее задавал задатчик интенсивности, будет зависеть исключительно от нечеткого контроллера. Механизму перемещения будет присущ более медленный характер набора скорости, то есть плавный её подход к заданному параметру. При происходящих явлениях груз начнёт догонять тележку и, если не будут предприняты меры, то движение подвешенного груза примет колебательный характер. По мере вхождения груза под тележку, контроллер начинает выдавать управляющие сигналы на вход блока, реализующего векторное управление, что приводит к гашению кинетической энергии груза. При этом разница между положением тележки и положением груза в пространстве постепенно компенсируется, и груз принимает вертикальное положение. Торможение тележки с подавлением колебаний груза происходят аналогично описанному принципу.

Процесс работы системы нечеткого ввода осуществляется в следующей последовательности:

- этап фаззификации – процесс, связанный с определением термов. В разработанной модели используются следующие лингвистические термы «отрицательный», «малый отрицательный», «ноль», «малый положительный», «положительный»;
- этап агрегатирования - процесс, направленный на определение весового коэффициента для каждого из перечисленных на предыдущем этапе термов. Для нахождения степени истинности терм выбраны треугольные функции принадлежности, в виду простоты их математического выражения;
- этап активизации – процесс, на котором происходит определение функции принадлежности для подзаключений;
- этап аккумуляции – процесс функционирования базы правил. При «отрицательном» и «малом отрицательном» значении угла формируется сигнал «малая отрицательная» скорость. При «положительном» и «малом положительном» значении угла формируется сигнал «малая положительная» скорость. Если угол отклонения отсутствует, то сигнал коррекции также отсутствует. Диапазон термов задан в границах входных переменных;
- этап дефаззификации – процесс перевода нечетких значений в сигналы управления.

Устройство блока дефаззификации представлено на рисунке 7.

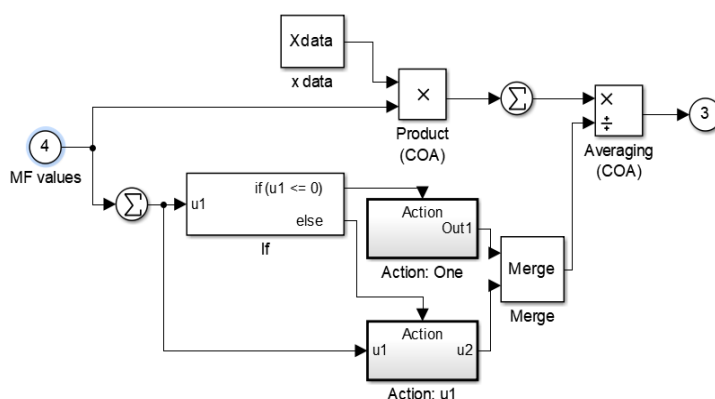


Рис. 7. Реализация блока Defuzzification

Fig. 7. Implementation of the Defuzzification block

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

На рисунке 8 представлена зависимость, демонстрирующая реакцию контроллера

на значение входного сигнала.

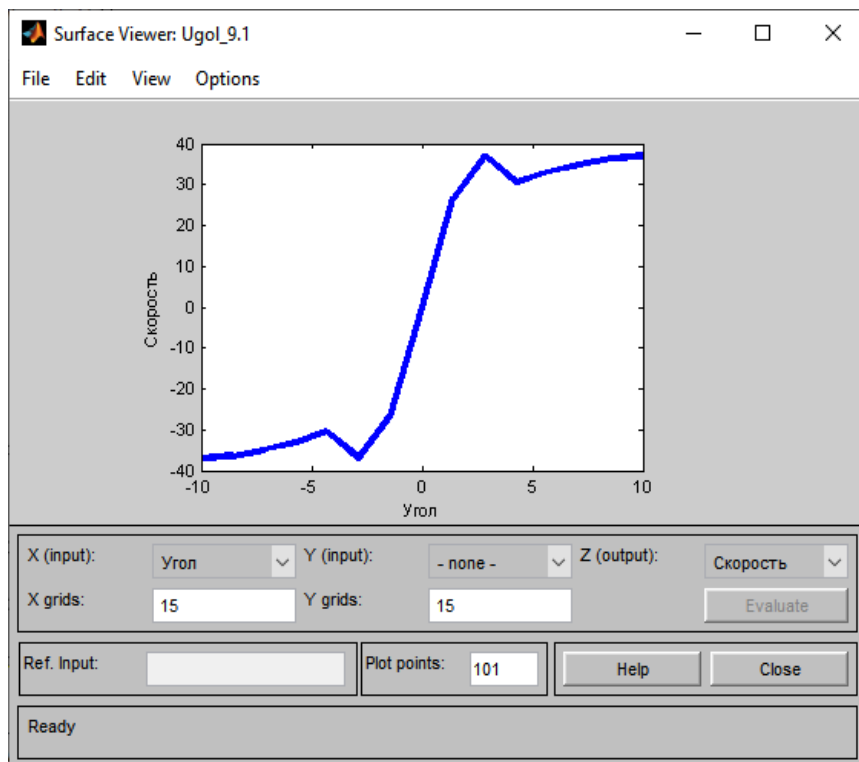


Рис. 8. Окно поверхности отклика выходного сигнала от входного сигнала

Fig. 8. Window of the response surface of the output signal from the input signal

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

Отображение происходящих в контроллере процессов, в виде графических зависимостей между сигналом управления и выходным сигналом, являющимся управляющим воздействием на систему управления можно увидеть на рисунке 9.

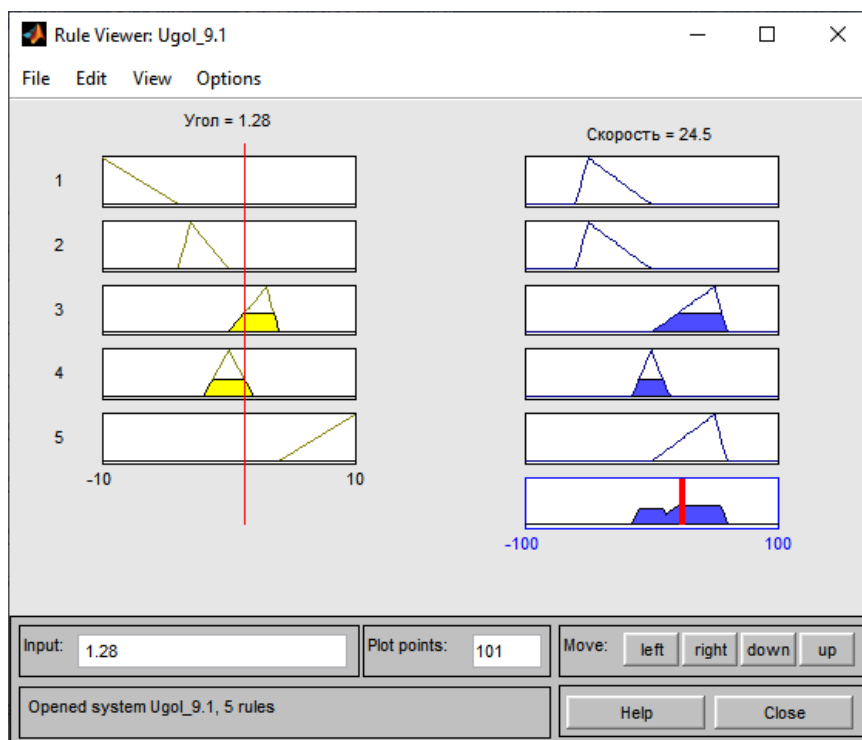


Рис. 9. Экран реализации правил нечеткой логики

Fig. 9. Fuzzy logic rules implementation screen

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

Модель блока «тележка-груз» в среде Simulink, необходимого для получения сигнала углового положения груза, представлена на рисунке 10. Данный блок позволяет отследить динамику перемещения тележки и груза. Схема дает наглядное представление о физических процессах, происходящих в системе при перемещении груза.

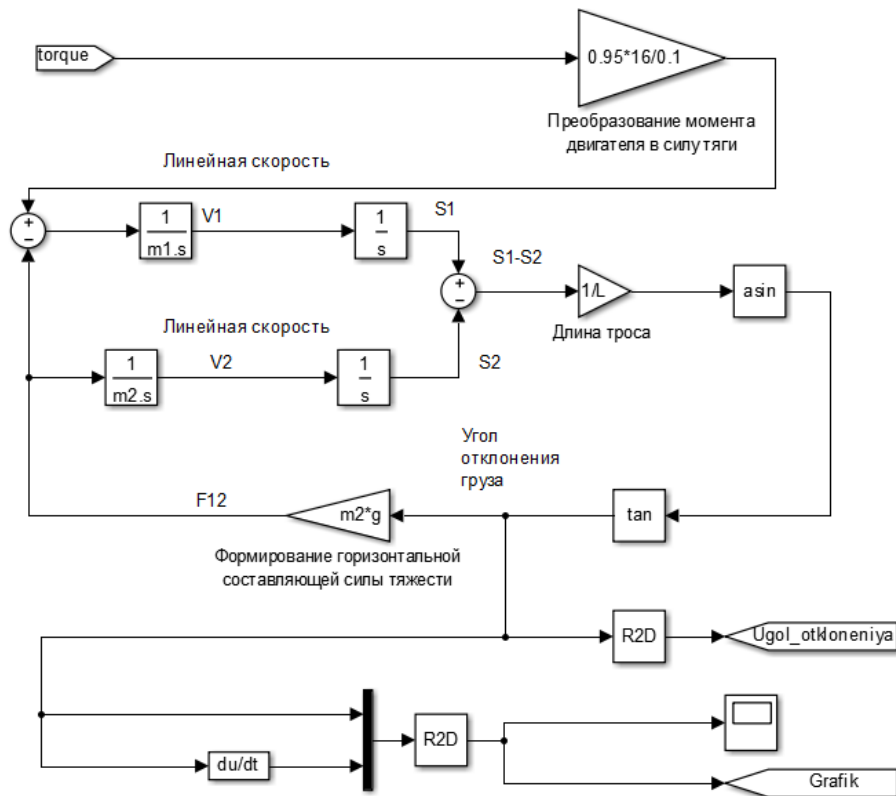


Рис. 10. Представление в виде модели системы «тележка-груз».
Fig. 10. Representation in the form of a model of the “trolley-load” system.

При исследовании, процесс моделирования работы тележки происходил с изменением массы груза от 5 тонн, что соответствует максимально возможной величине загрузки тележки до 150 кг, под которыми понимается масса крюковой подвески и с регулированием длины подвески перемещаемого груза на высоту 10 м, 5 м, 1 м. Во всех случаях, при использовании одновременно с задатчиком интенсивности нечеткого контроллера процесс моделирования был однотипным, т.е. по окончании пуска тележка выходила на заданные показатели скорости, перемещалась на этой скорости некоторое время и потом начинается процесс торможения.

На рисунке 11 приведены полученные при моделировании работы электропривода механизма тележки переходные процессы отображающие угол отклонения груза при заданной массе груза 5 тонн и длине подвеса 10 м при использовании в системе управления блока нечеткой логики.

На рисунке 12 приведены характеристики с такими же исходными данными по массе груза и длине подвеса, как и в предыдущем исследовании, но система управления электроприводом перемещения груза содержит только задатчик интенсивности скорости.

На рисунке 13 приведены полученные при моделировании работы электропривода механизма тележки переходные процессы отображающие угол отклонения груза при заданной массе груза 5 тонн и длине подвеса 5 м при использовании в системе управления блока нечеткой логики.

На рисунке 14 приведены характеристики с такими же исходными данными по массе груза и длине подвеса, как и в предыдущем исследовании, но система управления электроприводом перемещения груза содержит только задатчик интенсивности скорости.

Моделирование с различными параметрами массы груза и длины подвеса процессов происходящих при торможении тележки без использования в системе управления нечёткой логики не актуально, так как колебания, как и при пуске являются

явлениями постоянными, и при отсутствии блока гашения колебаний в системе управления механизмом перемещения груза, они самостоятельно не исчезнут.

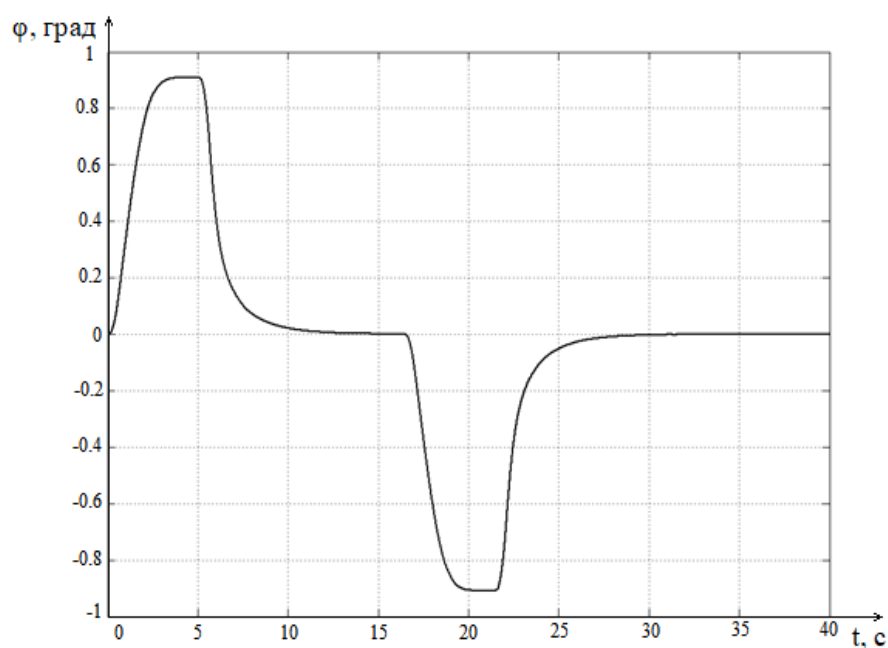


Рис. 11. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 10 м с использованием нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 11. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 10 m using a fuzzy controller in the control system

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

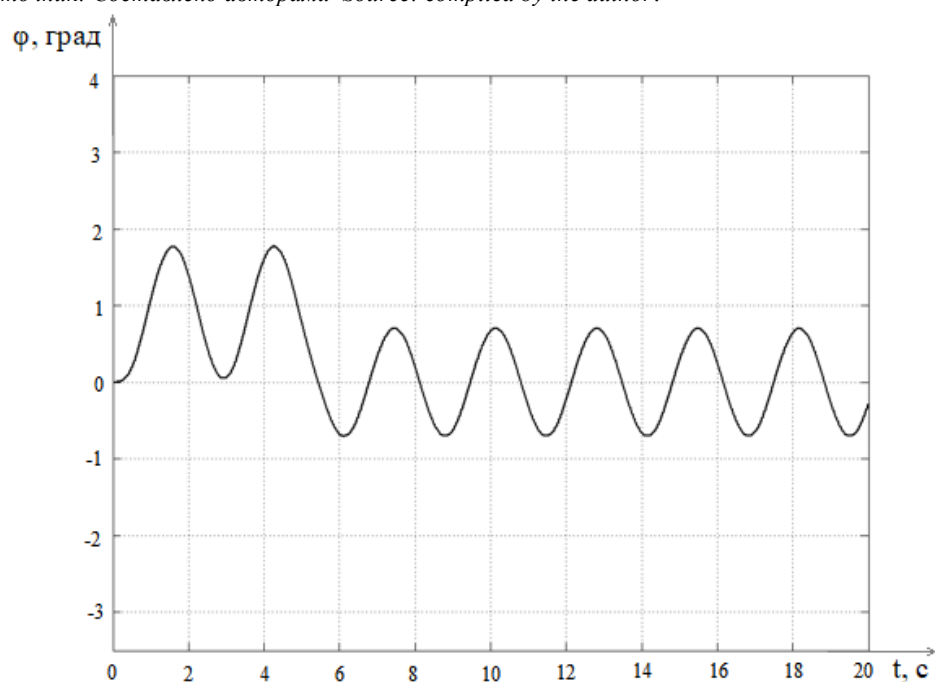


Рис. 12. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 10 м без использования нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 12. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 10 m without using a fuzzy controller in the control system

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

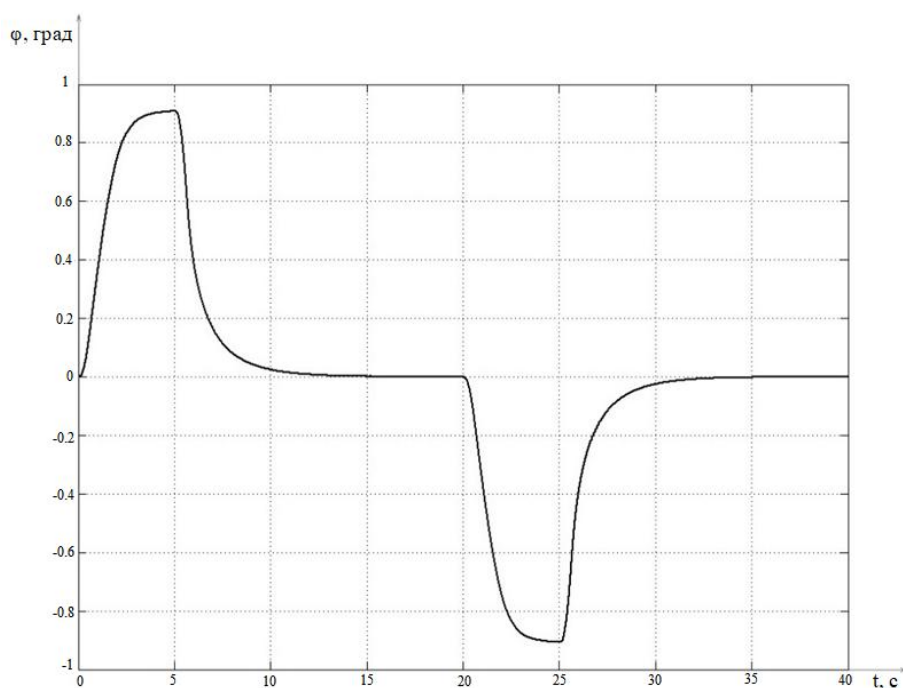


Рис. 13. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 5 м с использованием нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 13. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 5 m using a fuzzy controller in the control system

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

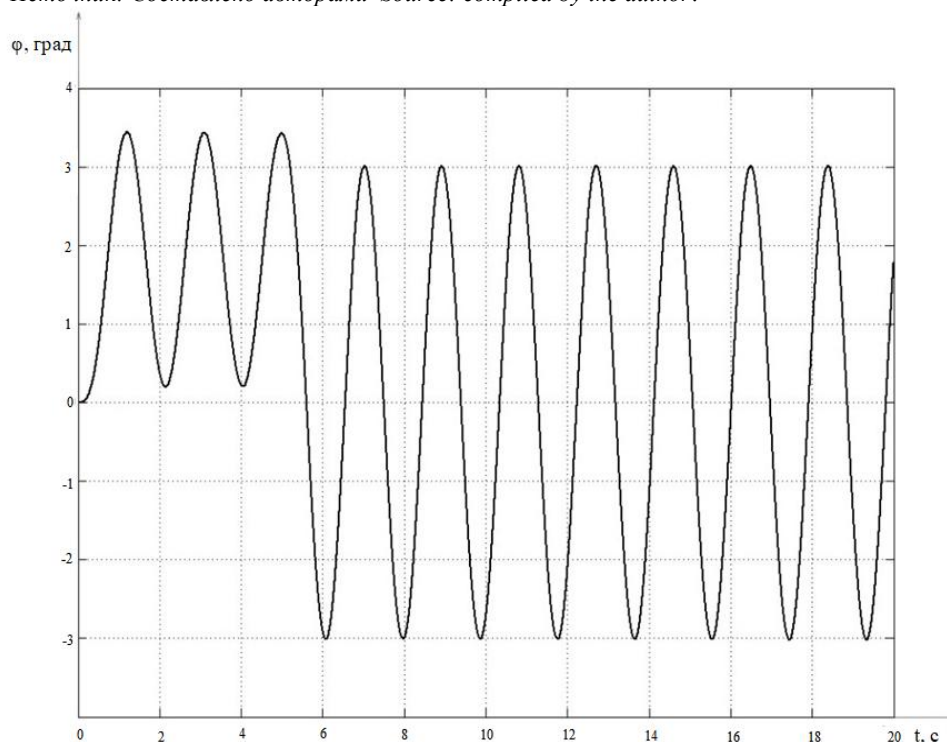


Рис. 14. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 5 м без использования нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 14. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 10 m without using a fuzzy controller in the control system

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

Анализ результатов, представленных рисунках 11, 13 показывает, что использование нечеткого контроллера позволяет погасить колебания

гибкоподвешенного груза, как на этапе пуска, так и в период торможения. В то же время, по характеру переходных процессов, отображенных на рис. 12, 14 можно сказать, что в системе, содержащей только задатчик интенсивности в период разгона видны колебания, которые в два раза превосходят колебания, появляющиеся при использовании нечеткого регулятора, также можно увидеть, что после выхода двигателя на заданные параметры скорости колебания груза также не затухают.

Возможно моделирование рассмотренных систем управления с другими параметрами массы груза и длины подвеса, но оно дало схожие результаты. При всех вариантах регулятор четко отрабатывает возложенные на него задачи, что приводит к гашению колебаний гибкоподвешенного груза.

Обсуждение результатов (Discussions Results)

Предлагаемый нечеткий регулятор показал хорошие демпфирующие способности при применении в системе векторного типа. В процессе исследования происходило изменение длины подвеса груза и массы груза. Изменение указанных параметров не повлияло на работоспособность предлагаемого нечеткого регулятора. На следующем этапе исследование планируется произвести внедрение разработанного нечеткого регулятора в систему с прямым управлением моментом и в скалярную систему управления, а также проанализировать работоспособность регулятора при изменении мощности двигателя.

Заключение или Выводы (Conclusions)

1. Процесс моделирования в среде MATLAB Simulink позволил изменять параметры веса груза и длины подвеса, без дополнительных затрат времени, которые бы потребовались при однотипном исследовании на реальном объекте, также моделирование позволило наглядно проанализировать процессы пуска и торможения механизма перемещения тележки с использованием предлагаемого контроллера в системе управления, внедрение контроллера дало положительные результаты.

2. Разработанная модель нечеткого регулятора в виду своей простоты не требует больших вычислительных мощностей, поэтому актуальна для использования на действующих объектах.

3. Предлагаемая система управления с разработанным нечетким регулятором автоматически реагирует на изменение угла отклонения груза, что позволяет избежать увеличения диапазона раскачивания груза.

4. Меняя параметры двигателя, также можно наглядно анализировать, для какого диапазона мощностей применим рассматриваемый регулятор.

5. Нечёткая логика позволяет гибко настроить систему управления, что позволяет получить требуемые характеристики управления.

Литература

1. Синюкова Т.В., Синюков А.В., Грачева Е.И., Kolcun M.. Нейросетевые технологии в системах управления механизмами перемещения грузов Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022 г. Т. 24. № 2. С. 107-118.
2. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V.. Neural Network Speed Observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, 320-324.
3. 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). 2020, SaintPetersburg, Russia, 220, 01059, October 29-30.
4. 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.
5. Matic P.R., Blanusa B.D., Vukosavic S.N.. A novel direct torque and flux control algorithm for the induction motor drive // IEEE Electric machines and drive conference: proceedings of the International conference. 2003, Madison. Vol. 2, 965-970.
6. Tytiuk V.K., Baranovskaya M.L., Chorny O.P., Burdilnaya E.V., Kuznetsov V.V., Bogatyriov K.N. Online-Identificatin of Electromagnetic Parameters of dn Induction Motor // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2020. Т. 63. № 5, 423-440.
7. Chorna O., Chorny O., Tytiuk V. Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of a Magnetic Field on the Stator Surface //

Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019. 2020, 150-153.

8. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С., Валтчев С., Грачева Е.И. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 116-126.

9. Федяева Г.А., Смородова Т.В., Кочевин Д.В., Конохов Д.В. Частотно-токовая система релейно-векторного управления асинхронным электроприводом механизма передвижения мостового крана // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4 (48). С. 91.

10. Романова Е.И., Заярный С.Л. Математические модели кранового механизма // Наука, техника, образование. 2019. №2 (24), С. 44-49.

11. Климаш В.С., Сколовский М.А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов // Электротехнические комплексы и системы. 2020. № 1 (46). С. 34-40.

12. Антипов А.С. Краснова С.А. Методы демпфирования колебаний груза и робастного управления ходовой тележкой мостового крана с учетом динамики электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24 № 8. С. 412-420.

13. Шимкович Д.Г. Динамические нагрузки при колебаниях груза на канате // Лесной вестник. 2012. № 4. С. 141-146.

14. Кабаков А.М., Орлов А.Н. Пути уменьшения раскачивания груза грузоподъемных машин // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. 2000. Вып. 25. С. 141 -144.

15. Корытов М.С., Щербаков В.С., Шершнева Е.О. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана // Вестник СибАДИ. 2017. № 1(53). С. 12-19.

16. Мещеряков В.Н., Колмыков В.В., Мигунов Д.В. Реализация устройства демпфирования колебаний груза, перемещаемого мостовыми кранами на базе частотного преобразователя SINAMICS S120 // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 3. С. 48-54.

17. Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки // Доклады ТУСУР. – 2022. Т. 25, № 1. С. 86-92.

18. Zhang, M., Ma, X., Rong, X., et al. Adaptive Tracking Control for Double-Pendulum Overhead Cranes Subject to Tracking Error Limitation, Parametric Uncertainties and External Disturbances // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. Vol. 76-77. P. 15-32.

19. Круглов С. П., Аксаментов Д. Н.. Способ адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020, Т. 21, № 12, С. 682-688.

20. Пат. RU 85890 U1 Российская Федерация, МПК B66C 13/06. Устройство для автоматического гашения маятниковых колебаний груза, перемещаемого тележкой мостового крана, Щедринов А. В.; заявитель: Щедринов А. В., Сериков С. А., Колмыков В. В., Коврижкин А. А. № 2009112243/22; заявка от 02.04.2009; опубл. 20.08.2009, Бул. № 23. 2 с.

21. Пат. RU 2744647 C1 Российская Федерация, МПК B66C 13/18. Способ адаптивного управления мостовым краном, Круглов С.П., Ковыршин С.В., Аксаментов Д.Н.; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС). № 2020124779; заявка № 16.07.2020; опубл. 12.03.2021, Бул. № 8. 16 с.

Авторы публикации

Синюков Алексей Владимирович – аспирант кафедры «Электропривода» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6772-5370>, e-mail: zeitnsn@yandex.ru.

Абдуллазянов Эдвард Юнусович - канд. техн. наук, доцент, ректор Казанского государственного энергетического университета.

Заруцкий Николай Николаевич – аспирант кафедры «Электропривода» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: nikolay.zaruckiy@yandex.ru.

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электропривода» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, e-mail: stw0411@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение

References

1. Sinyukova T.V., Sinyukov A.V., Gracheva E.I., Kolcun M. Neural Network Technologies in Control Systems of Cargo Movement Mechanisms. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2022. 24(2). P. 107-118
2. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V.. Neural Network Speed Observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. P. 320-324.
3. 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.
4. 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.
5. Matic P.R., Blanusa B.D., Vukosavic S.N.. A novel direct torque and flux control algorithm for the induction motor drive // IEEE Electric machines and drive conference: proceedings of the International conference. 2003, Madison. Vol. 2. P. 965-970.
6. Tytiuk V.K., Baranovskaya M.L., Chorny O.P., Burdilnaya E.V., Kuznetsov V.V., Bogatyriov K.N. Online-Identification of Electromagnetic Parameters of an Induction Motor // *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2020. 63(5). P. 423-440.
7. Chorna O., Chorny O., Tytiuk V. Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of a Magnetic Field on the Stator Surface // *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019*. 2020. P. 150-153.
8. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S., Valtchev S., Gracheva E.I. Control System for a Frequency Synchronized Asynchronous Electric Drive // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021. 23(3). P. 116-126.
9. Fedyaeva G.A., Smorudova T.V., Kochevinov D.V., Konokhov D.V. Chastotno-tokovaya sistema releino-vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom mekhanizma peredvizheniya mostovogo kрана // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. № 4 (48). P. 91.
10. Romanova E.I., Zayarnyi S.L. Matematicheskie modeli kранового mekhanizma // *Nauka, tekhnika, obrazovanie*. 2019. №2 (24), P. 44-49.
11. Klimash V.S., Skolovskii M.A. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti kompleksa pod"emnykh kранов // *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy*. 2020. № 1 (46). P. 34-40.
12. Antipov A.S., Krasnova S.A. Metody dempfirovaniya kolebaniy gruzа i robastnogo upravleniya khodovoi teleshkoi mostovogo kрана s uchetom dinamiki elektroprivoda // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2023. 24(8). P. 412-420.
13. Shimkovich D.G. Dinamicheskie nagruzki pri kolebaniyakh gruzа na kanate // *Lesnoi vestnik*. – 2012. № 4. P. 141-146.
14. Kabakov A.M., Orlov A.N. Puti umen'sheniya raskachivaniya gruzа gruzopod"emnykh mashin // *Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiya*. 2000. Vyp. 25. P. 141 -144.
15. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O. Obosnovanie znachenii koeffitsientov regulyatorov gasheniya kolebaniy gruzа mostovogo kрана // *Vestnik SibADI*. 2017. № 1(53). P. 12-19.
16. Meshcheryakov V.N., Kolmykov V.V., Migunov D.V. Realizatsiya ustroystva dempfirovaniya kolebaniy gruzа, peremeshchaemogo mostovymi kранami na baze chastotnogo preobrazovatelyа SINAMICS S120 // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2016. № 3. P. 48-54.
17. Kruglov S.P., Aksamentov D.N. Adaptivnoe upravlenie mostovym kранom po skorosti peremeshcheniya teleshki // *Doklady TUSUR*. 2022. T. 25, № 1. P. 86-92.
18. Zhang, M., Ma, X., Rong, X., et al. Adaptive Tracking Control for Double-Pendulum Overhead Cranes Subject to Tracking Error Limitation, Parametric Uncertainties and External Disturbances // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 76-77. P. 15-32.
19. Kruglov S. P., Aksamentov D. N.. Sposob adaptivnogo upravleniya mostovym kранom s pryamym otslezhivaniem peremeshcheniya gruzа // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. – 2020, 21(12). P. 682-688.
20. Pet. RU 85890 U1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B66C 13/06. Ustroystvo dlya

avtomaticheskogo gasheniya mayatnikovyykh kolebaniy gruzha, peremeshchaemogo telezhkoi mostovogo kрана, Shchedrinov A. V.; заявитель: Shchedrinov A. V., Serikov S. A., Kolmykov V. V., Kovrizhkin A. A. – № 2009112243/22; заявка от 02.04.2009; opubl. 20.08.2009, Bul. № 23. 2 s.

21. Pet. RU 2744647 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B66C 13/18. Sposob adaptivnogo upravleniya mostovym kраном, Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Aksamentov D.N.; заявитель: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Irkutskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya (FGBOU VO IrGUPS). – № 2020124779; заявка № 16.07.2020; opubl. 12.03.2021, Bul. № 8. 16 s.

Authors of the publication

Alexey V. Sinyukov - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0001-6772-5370>, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

Edvard Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nikolay N. Zaruckiy - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, e-mail: nikolay.zaruckiy@yandex.ru.

Tatyana V. Sinyukova - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, e-mail: stw0411@mail.ru.

Elena I. Gracheva - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-5379847X>, e-mail: grachieva.i@bk.ru

Шифр научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Получено **12.02.2024 г.**

Отредактировано **21.02.2024 г.**

Принято **28.02.2024 г.**