

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 62-523

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-26-40

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОПРИВОДНЫХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

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

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

stw0411@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Обеспечение безопасного функционирования действующего объекта при возникновении внештатных ситуаций, таких как недопустимое изменение момента двигателя в процессе выполнения технологической операции. *МЕТОДЫ.* Поставленные при исследовании задачи решены путем математических моделирований в среде Matlab Simulink и практических исследований. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Введение в стандартные системы управления блоков коррекции на базе нечеткой логики позволило обеспечить остановку объекта при критическом изменении момента двигателя. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование блоков коррекции, разработанных на базе нечеткой логики на промышленных многоприводных агрегатах, по сравнению с применением традиционных систем управления, позволяет обеспечить безопасность работы оборудования при возникновении внештатных ситуаций, приводит к снижению появления факторов в результате которых может возникнуть массовый брак продукции, выход оборудования из строя. Предлагаемый регулятор позволяет использовать на объектах установленные преобразователи, в которых не предусмотрена реакция на аварийные ситуации, такие как недопустимое снижение или превышение момента двигателя.

Ключевые слова: нечеткий регулятор; момент; скорость; остановка двигателя; частотный преобразователь; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Синюков А.В. Использование нечеткого регулятора в качестве элемента управления в многоприводных системах промышленных механизмов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 26-40. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-26-40.

USING A FUZZY CONTROLLER AS A CONTROL ELEMENT IN MULTI-DRIVE SYSTEMS OF INDUSTRIAL MECHANISMS

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

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

stw0411@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Ensuring the safe operation of an operating facility in the event of emergency situations, such as an unacceptable change in engine torque during a technological operation. *METHODS.* The tasks set during the study were solved by means of mathematical modeling in the Matlab Simulink environment and practical research. *RESULTS.* The introduction of fuzzy logic-based correction blocks into standard control systems made it possible to ensure that the object would stop when the engine torque changed critically. *CONCLUSION.* The use of correction units developed on the basis of fuzzy logic on industrial multi-drive units, compared to the use of traditional control systems, allows ensuring the safety of equipment operation in the event of emergency situations, leads to a decrease in the

occurrence of factors that may result in mass defects in products, equipment failure. The proposed regulator allows the use of converters installed at facilities that do not provide for a response to emergency situations, such as an unacceptable decrease or excess of engine torque.

Keywords: fuzzy controller; torque; speed; motor stop; frequency converter; asynchronous motor; Matlab Simulink.

For citation: Sinyukova T.V., Gracheva E.I., Sinyukov A.V. Using a fuzzy controller as a control element in multi-drive systems of industrial mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (5): 26-40. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-26-40.

Введение (Introduction)

На предприятиях разного профиля в технологических процессах занято весомое количество промышленных механизмов, при функционировании которых возникает необходимость в создании условий, при которых обеспечивается точный контроль за выполняемыми операциями [1-4]. Степень сложности системы управления на прямую зависит от сложности выполняемых агрегатом операций, его конструктивных особенностей и т.д. Применяемые на механизмах стандартные решения не всегда позволяют получить отклик от системы управления, который будет направлен на остановку объекта при значительных критических изменениях параметров двигателя или системы управления. Использование программируемых логических контроллеров, как дополнительных объектов для существующих систем управления, позволяет сформировать ответную реакцию всей сложной системы, обеспечивая корректировку работы имеющихся исполнительных механизмов. Помимо описанной функции, контроллеры также обеспечивают анализ данных, получаемых с объекта и, при необходимости, выдачу команды на безопасную остановку механизма в случае, если наблюдается критическое изменение параметра, для исключения аварийных ситуаций и массового брака продукции [5, 6].

На предприятиях металлургического профиля для получения качественного листа стали необходимой толщины используются натяжные станции в состав которых входит несколько натяжных роликов. Для управления, которыми в последнее время наибольшее распространения получили системы типа «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель», которые позволяют осуществлять надлежащее регулирование скорости и момента на валу двигателя [7, 8].

Многодвигательные системы управления представляют наибольший интерес для исследования, так как они обладают большей сложностью, по сравнению с одноприводными механизмами. Рассматриваемая натяжная станция в своем составе содержит четыре натяжных ролика, на каждом из которых имеется отдельный электродвигатель со своей системой управления.

Значительное количество работ посвящено усовершенствованию действующих объектов за счет изменения алгоритмов систем управления или путем внесения изменений в комплектацию механизма [9, 10].

Для решения рассматриваемой проблемы, в последнее время, наибольшее распространение получили блоки, работающие на базе нечеткой логики, нечеткого регулирования и нейронных сетей [11, 12].

Материалы и методы (Materials and methods)

Сведения о рассматриваемом промышленном объекте

Натяжные станции получили применение на предприятиях металлургического профиля для поддержания натяжения и транспортировки полосы из стали различных марок. Кинематическая схема рассматриваемого объекта отражена на рисунке 1, из нее видно, что станция является многоприводной, а связь электроприводов с исполнительными механизмами, которыми являются натяжные ролики, реализована с помощью редукторов с указанным на рисунке передаточным числом (u) для каждого из роликов.

На рисунке 2 приведены данные с реального объекта, отражающие:

– верхний рисунок – представлено изменение во времени нагрузки в виде обратной связи по моменту, также показана величина необходимого добавочного момента для поддержания одинаковой скорости роликов;

– средний рисунок – показана тахограмма, выведенная как обратная связь по скорости относительно сигнала задания на скорость всей технологической части

«Vzad_centр», в ее функции входит осуществление управления скоростью всех приводов, которые реагируют на изменение данного параметра;

– нижний рисунок – показаны тахограммы четырех роликов, имеющихся на станции. Наличие разницы скорости роликов обусловлено присутствием внешних воздействий и проблем, которые могут возникнуть в процессе формирования полосы, такими как, проскальзывание стальной полосы стали по поверхности ролика, что приводит к снижению воздействующей на него механической нагрузки.

Четыре электропривода установленные на натяжной станции имеют разную мощность, как правило, работают одновременно в режиме выравнивания нагрузки относительно «ведущего» или «ведомого» привода.

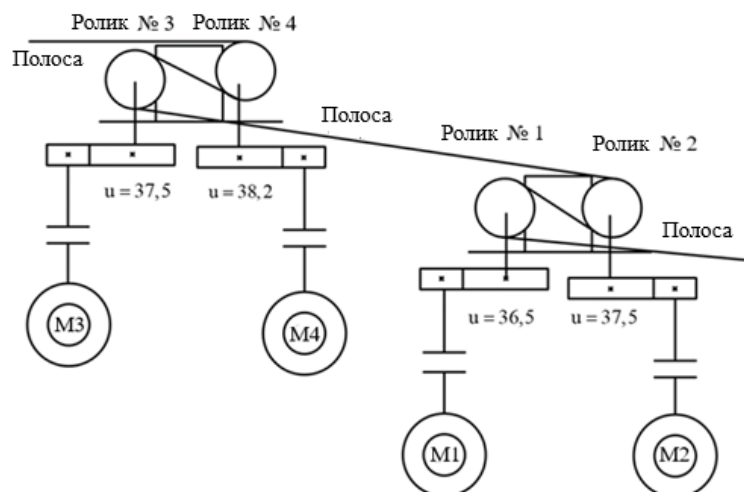


Рис. 1. Кинематика натяжной станции, отражающая заправку полосы между роликами

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



Рис. 2. Процессы, происходящие на действующем объекте

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

Система, обеспечивающая управление роликами натяжной станции, включает в себя четыре асинхронных двигателя управляемых четырьмя преобразователями частоты, с помощью которых помимо управления работой двигателей, происходит мониторинг натяжения полосы. К преобразователям частоты подключены датчики температуры и энкодеры, осуществляющие контроль за состоянием двигателей. На протяжении всего процесса работы механизма не предполагается глубокое изменение скорости вращения

двигателей и ограничение момента, поэтому применяются векторные системы управления приводами. Функции «ведущего» ролика возложены на двигатель ролика № 1, это связано с тем, что данный двигатель имеет наибольшую мощность из четырех установленных на станции, так как он осуществляет процесс вытягивания полосы из предыдущей секции, где происходила предварительная обработка полосы.

Исследование, с целью выявления оптимальной системы управления, проходило в три этапа:

- на первом этапе была изучена работа существующей системы управления роликами натяжной станции посредством ее математического моделирования в среде Matlab Simulink, позволяющего отследить работу системы многодвигательного электропривода на базе системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»;
- на втором этапе, была разработана система управления с блоком нечеткой логики для коррекции возможных не стандартных сценариев работы двигателей;
- на третьем этапе, была разработана система, демонстрирующая работу нечеткой логики для контроля скорости «ведомых» роликов натяжной станции относительно «ведущего» ролика.

Моделирование

А. Действующая система управления

Представленная на объекте многодвигательная (многоприводная) система не связана между собой механической связью, следовательно модель в среде моделирования будет составлена в виде четырех блоков, внутри которых будет реализована структура типа «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель». На рисунке 3 приведена полная модель натяжной станции в среде математического моделирования.

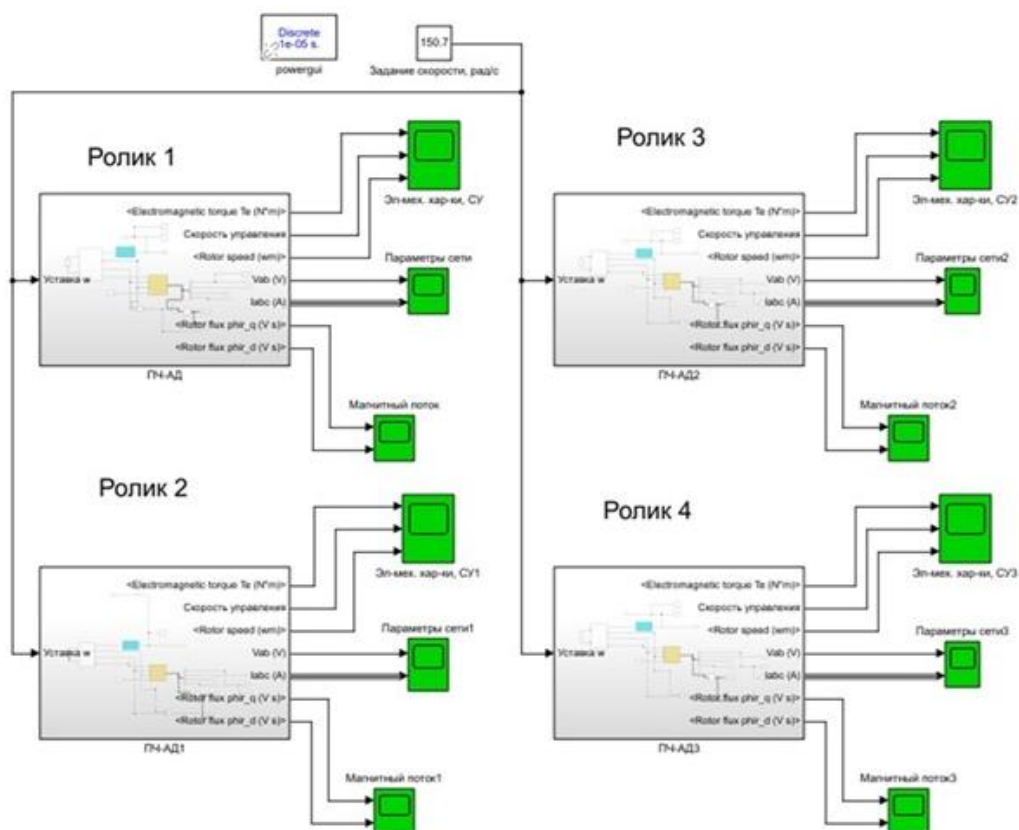


Рис. 3. Полная модель рассматриваемого объекта в Matlab

Fig. 3. Full model of the object under consideration in Matlab

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

На рисунке 4 представлена реализация системы управления для ролика №1. Системы управления для остальных роликов по своей структуре являются идентичными системе управления для ролика №1. В структуре модели можно выделить блок электродвигателя обозначенный в среде Matlab как Asynchronous Machine, блок реализующий функции инвертора, который получает питание от источника постоянного тока. Для упрощения процесса моделирования выпрямитель представлен в виде источника постоянного тока, так как он в рассматриваемом частотном преобразователе

является неуправляемой частью. Сигнал задания скорости формируется с блока Constant, он поступает на блок Vector Control, который реализует векторную систему управления, с него на инвертор на вход g , осуществляя управление ключами и работой IGBT транзисторов, и как следствие функционированием двигателя. В системе реализованы обратные связи по изменению показателей тока и скорости.

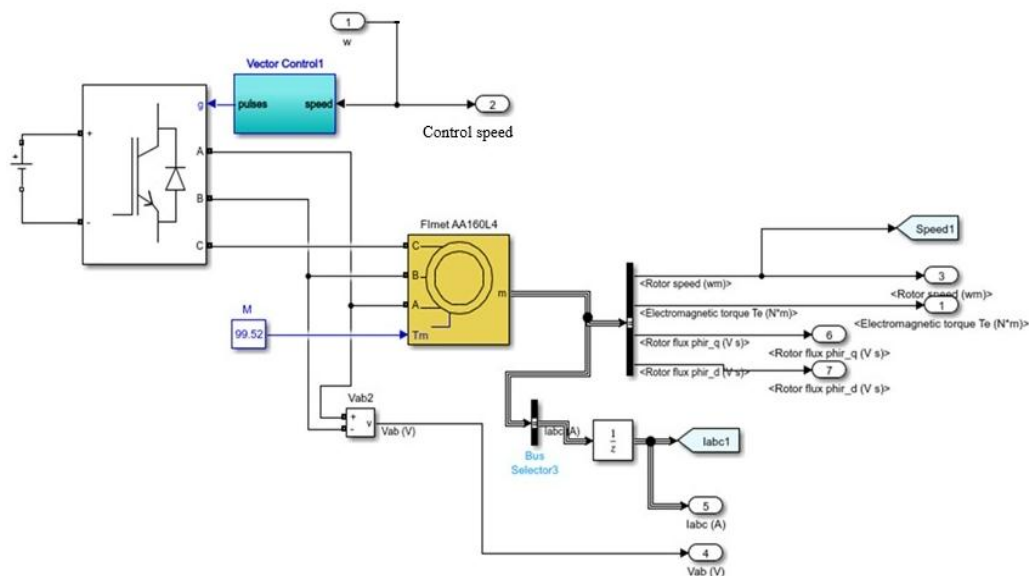


Рис. 4. Реализация в среде Matlab действующей системы управления роликом №1

Fig. 4. The current control system of roller №1

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

На рисунке 5 отражены полученные при моделировании зависимости момента (верхний) и скорости (нижний) двигателя ролика №1 от времени.

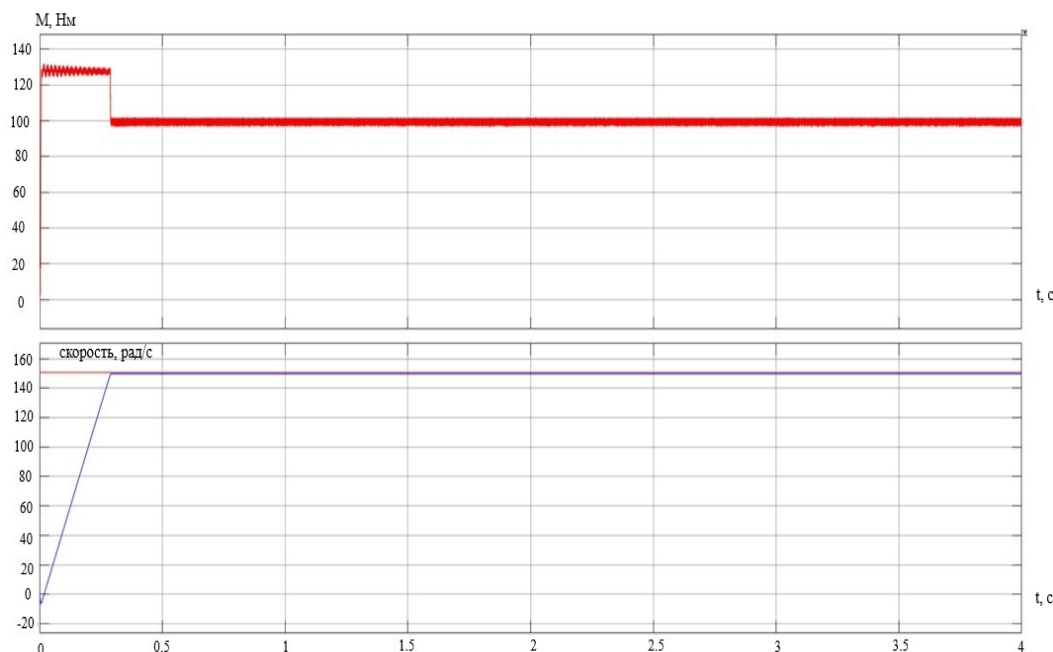


Рис. 5. Моделирование процессов в действующей системе управления

Fig. 5. Modeling of processes in the current control system

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

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что используемая стандартная векторная система управления позволяет с незначительной погрешностью осуществлять отработку задания по скорости. Но при возникновении нестандартной ситуации, к которой можно отнести потерю момента или его превышение, остановка работы двигателя возможна при условии, что в системе управления прописаны алгоритмы выхода из

данной ситуации, в остальных случаях продолжение работы двигателя может повлечь появление необратимых процессов в механизме, вызвать брак, разрыв, смятие, проходящей через ролики полосы.

На рисунках 6 и 7 показаны графики переходного процесса при потере момента и превышении момента, соответственно.

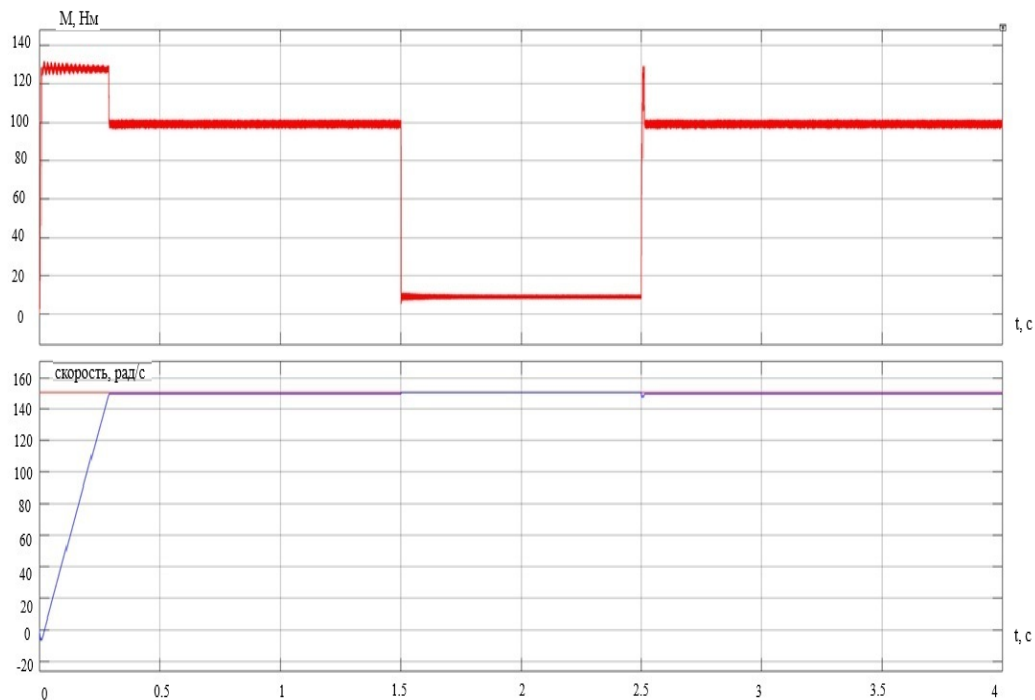


Рис. 6. Графики переходного процесса при потере момента: верхний – зависимость момента от времени, нижний – зависимость скорости от времени

Fig. 6. Graphs of the transient process during loss of torque: upper – dependence of torque on time, lower – dependence of speed on time

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

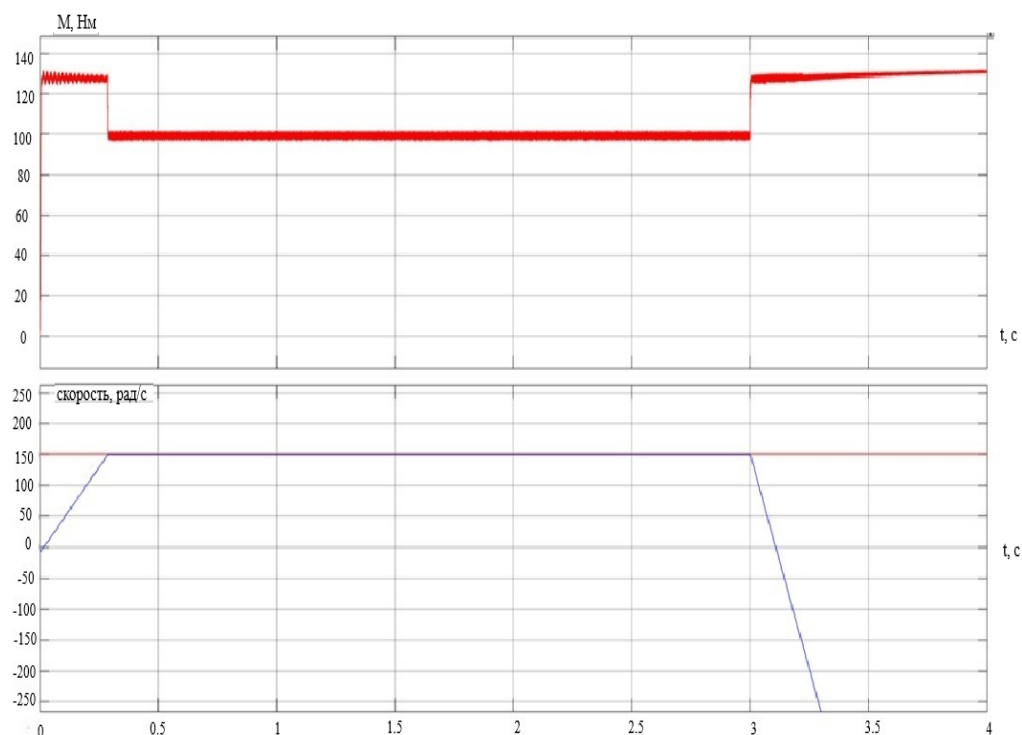


Рис. 7. Графики переходного процесса при превышении момента: верхний – зависимость момента от времени, нижний – зависимость скорости от времени

Fig. 7. Graphs of the transient process when the torque is exceeded: upper – dependence of the torque on time, lower – dependence of the speed on time

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

Б. Система с нечетким регулятором

На рисунке 8 приведена модель системы управления для ролика № 1 с введением в стандартную систему управления нечеткого регулятора. При моделировании рассматриваются две аварийные ситуации, при которых происходит изменение момента до недопустимых значений, это обрыв механической связи, возникающий из-за недопустимого снижения момента и клин, возникающий в следствии скачка момента выше критических значений. Процесс моделирования аварийных ситуаций создается за счет задания в определенные промежутки времени положительных и отрицательных значений момента, что позволяет симетировать развитие клина и обрыва механической связи, все это происходит в пределах одной итерации. Чтобы произвести компенсацию при критическом снижении момента (обрыв) при выявлении значений момента входящих в диапазон входной функции M_{obriv} в пределах $\{-10; 15\}$, выходной функцией, обозначенной как w_{korr} имеющей диапазон $\{0; 150.7\}$ формируется сигнал коррекции скорости, появившееся значение суммируется с данными сигнала задания на скорость, а затем поступает в качестве сигнала управления в блок, имитирующий работу векторной системы управления, а затем в блок имитирующий работу ключей инвертора, на выходе которого формируется сигнал приводящий к остановке асинхронного двигателя при формировании аварийной ситуации (обрыв). Чтобы выполнить корректировку момента при возникновении клина, необходимо чтобы его значение M_{klin} оказалось в диапазоне $\{127; 128; 139; 140\}$, при этом происходит формирование сигнала коррекции ($-w_{korr}$) в диапазоне $\{0; -150.7\}$, который приводит к появлению суммарного компенсирующего воздействия с положительным значением, что позволяет показатели скорости асинхронного двигателя свести к нулевому значению.

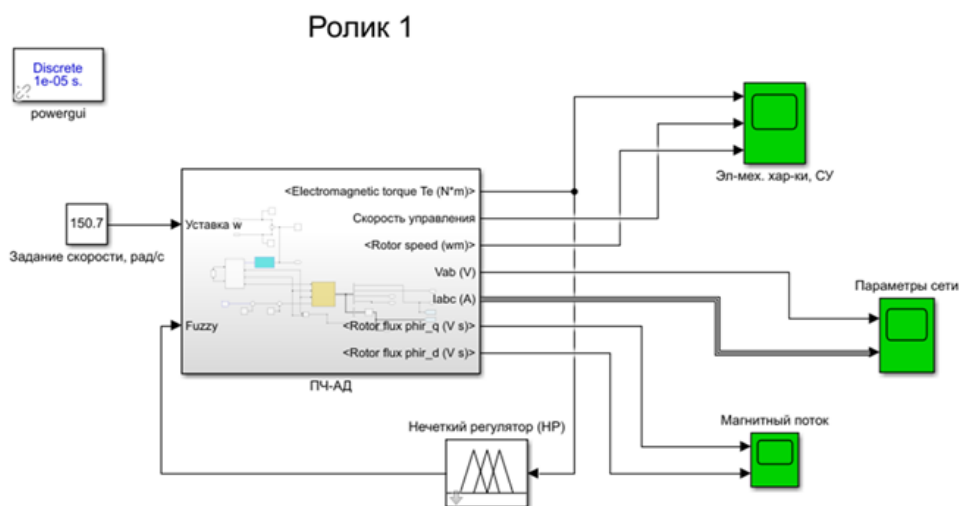


Рис. 8. Модель системы управления роликом № 1 с нечетким регулятором

Fig. 8. Roller Control System Model № 1 with Fuzzy Controller

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

В представленной модели разработанный нечеткий регулятор предназначен для осуществления контроля за критическими изменениями момента. Разработанные для функционирования нечеткого регулятора правила, отражающие зависимость скорости от момента приведены на рисунке 9. Представленный набор из правил для нечеткого регулятора дает возможность приводить к снижению скорости до показателей близких к нулевому значению, при выходе параметров момента за допустимые для работы двигателя пределы. При разработке нечеткого регулятора использовался метод Сугено, который дает возможность получать данные на выходе регулятора в линейной форме, что позволяет также в линейном виде изменять данные на выходе блока имитирующего векторную систему управления. График, отражающий переходную функцию для нечеткого регулятора, позволяет отследить реакцию системы управления на управляющее воздействие. Сигнал коррекции, формирующийся на выходе нечеткого регулятора, при введении в векторную систему управления является для системы отрицательной обратной связью.

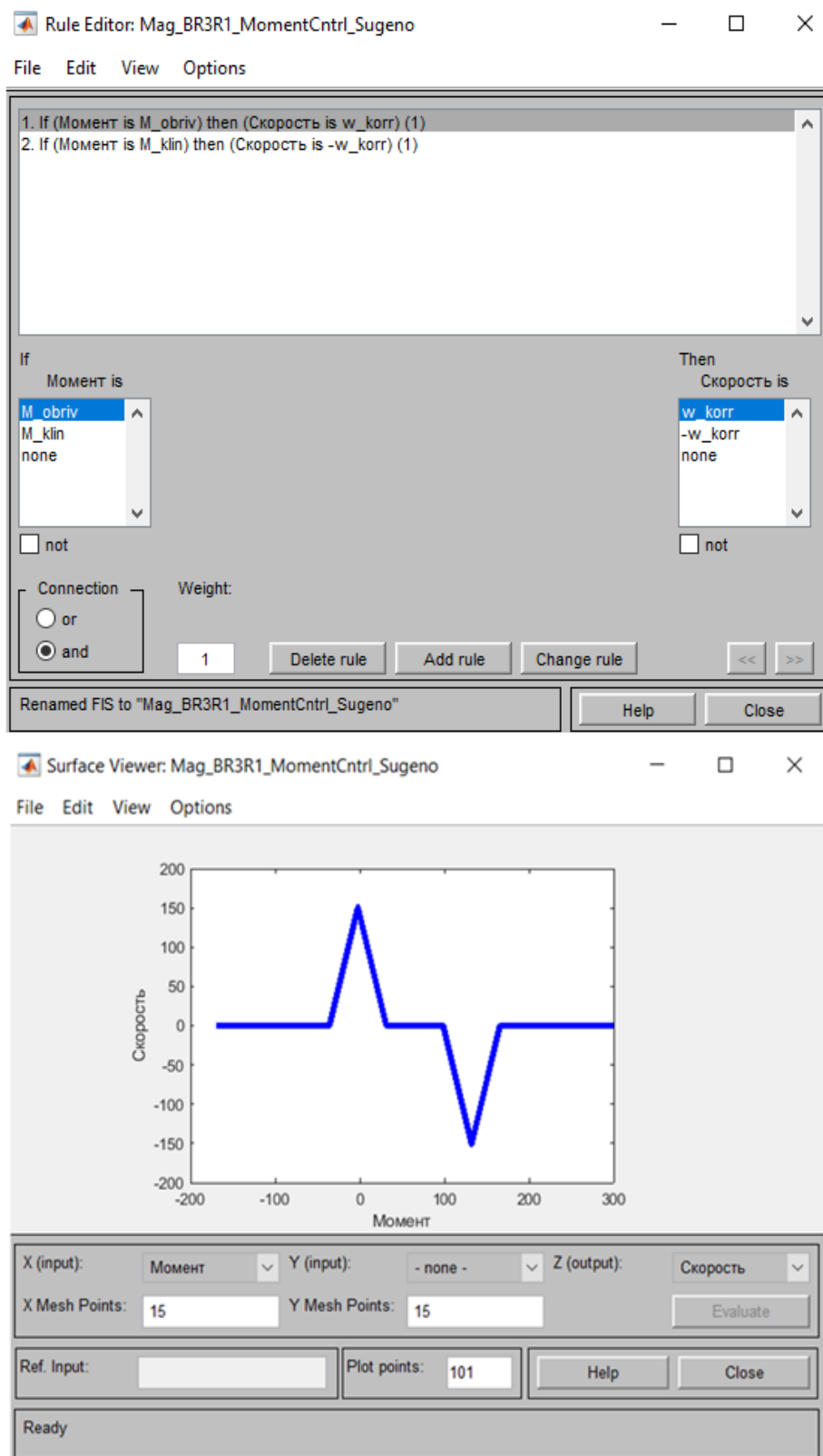


Рис. 9. База правил и переходная функция нечеткого регулятора *Fig. 9. Rule base and transition function of fuzzy controller*

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

На рисунке 10 представлена полученная в результате моделирования характеристика асинхронного двигателя при использовании в системе управления нечеткого регулятора для выдачи корректирующего воздействия в случае возникновения аварийных ситуаций, таких как превышения момента и недопустимое снижение момента.

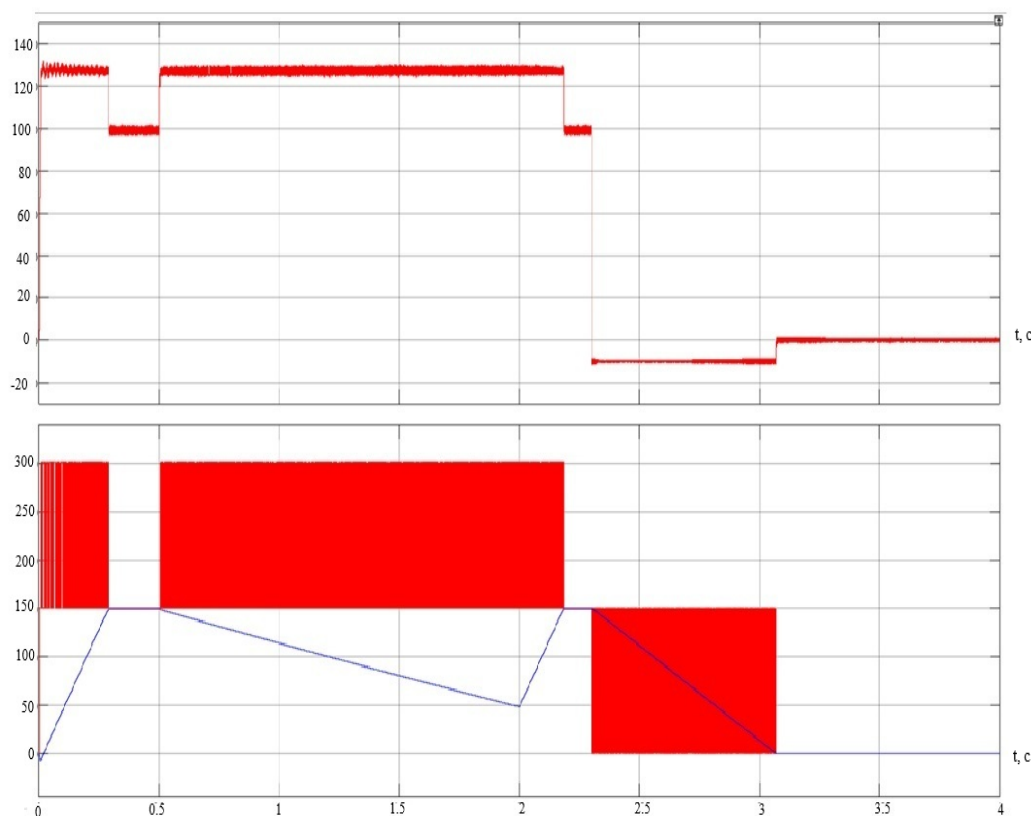


Рис. 10. Переходные процессы в асинхронном двигателе в системе с нечетким регулятором *Fig. 10. Transient processes in an asynchronous motor in a system with a fuzzy controller*

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

Проведя анализ полученных в результате моделирования характеристик, было выявлено, что имеющаяся на объекте векторная система управления обеспечивает качественную работу натяжной станцией. Положительной составляющей по организации процесса работы натяжной станции также является то, что на каждом из роликов установлен отдельный электродвигатель, управляемый индивидуальным частотным преобразователем. Однако, при возникновении аварийной ситуации такой как критическое превышение или снижение момента, средствами только частотного преобразователя не возможно организовать безопасность оборудования и анализ данных в виде обратной связи по изменению момента от электродвигателя, следовательно введение в систему управления нечеткого регулятора, а в устройство объекта программируемого логического контроллера является оптимальным решением возникающих при эксплуатации натяжной станции проблем.

В. Система с блоком нечеткой логики для осуществления контроля показателей скорости «ведомых» роликов относительно показателя скорости «ведущего» ролика

На следующем этапе была разработана модель многоприводной системы управление которой осуществляется с помощью блока, функционирующего на базе нечеткой логики (рис. 11). В данной системе функции «ведущего» ролика возложены на ролик № 1, следовательно, задание скоростей «ведомых» роликов № 2, № 3 и № 4 будет происходить относительно скорости ролика № 1.

Разработанная система нечеткого регулирования для натяжной станции представлена на рисунке 12. Входным сигналом каждого из нечетких регуляторов является текущая линейная скорость соответствующего ролика из которой вычтено текущее значение скорости ролика №1. В нечетких регуляторах на основании составленных правил (рис. 13) происходит анализ полученных данных за счет чего происходит формирование выходных сигналов в виде значений необходимой коррекции скорости на каждый из «ведомых» роликов.

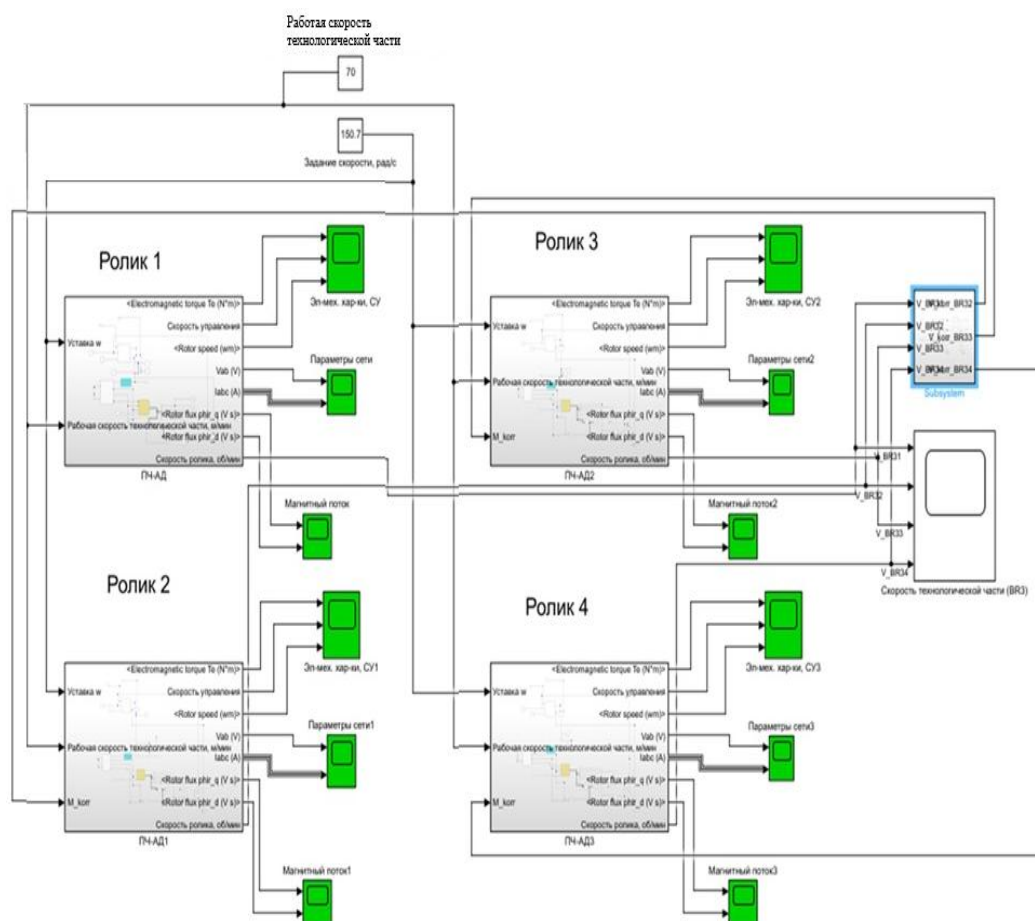


Рис. 11. Многоприводная система, управляемая нечетким регулятором

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

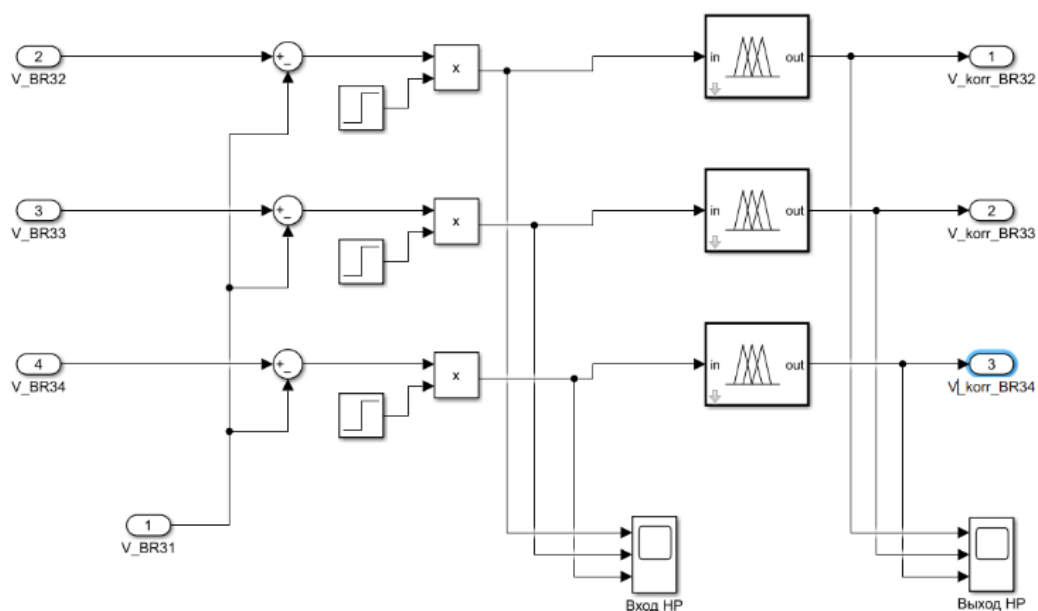


Рис. 12. Реализация системы нечеткого регулирования

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

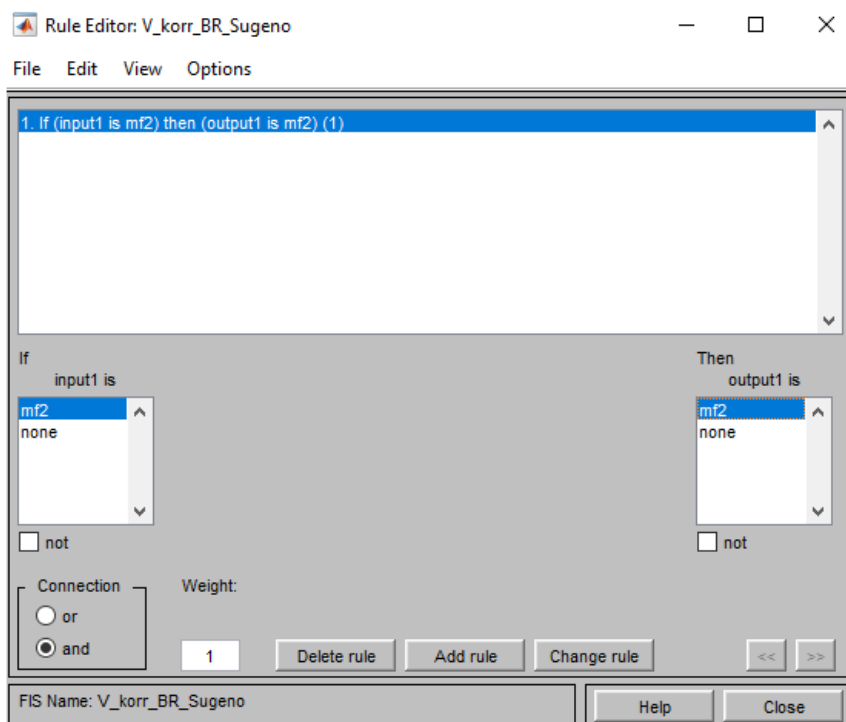


Рис. 13. Правила

Fig. 13. Rules

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

На рисунках 14 и 15 приведены графики, отражающие рабочие скорости роликов № 1, № 2, № 3, № 4 при моделировании случая, когда происходит повышение скорости «ведущего» ролик в двух системах: исходной и предлагаемой.

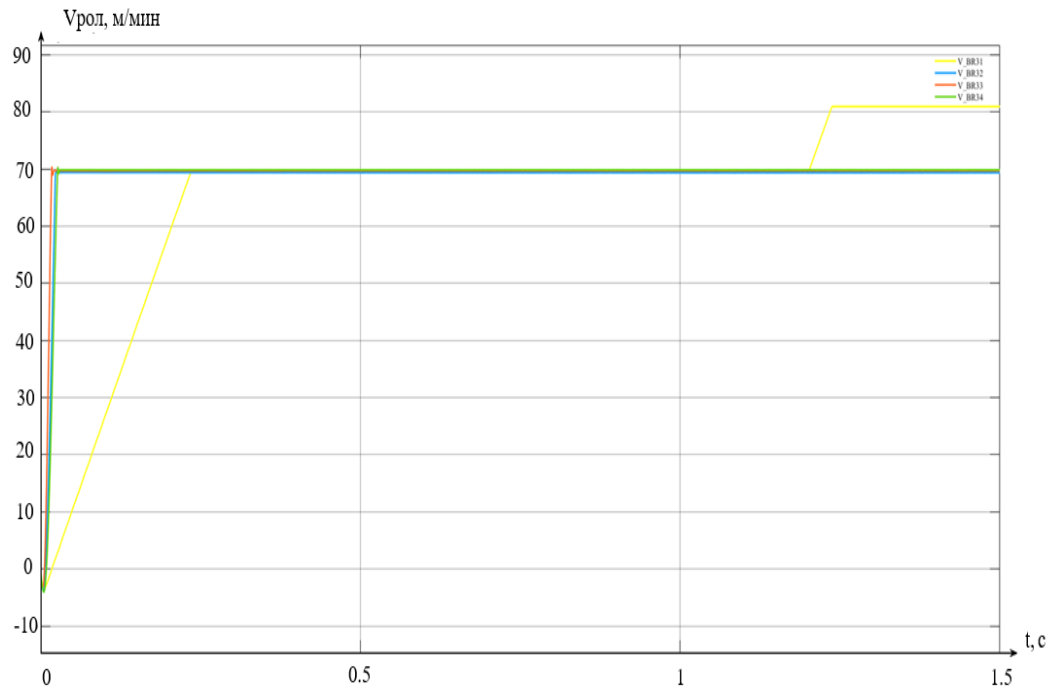


Рис. 14. Рабочие скорость 1-4 натяжных роликов (векторная система)

Fig. 14. Working speed 1-4 tension rollers (vector system)

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

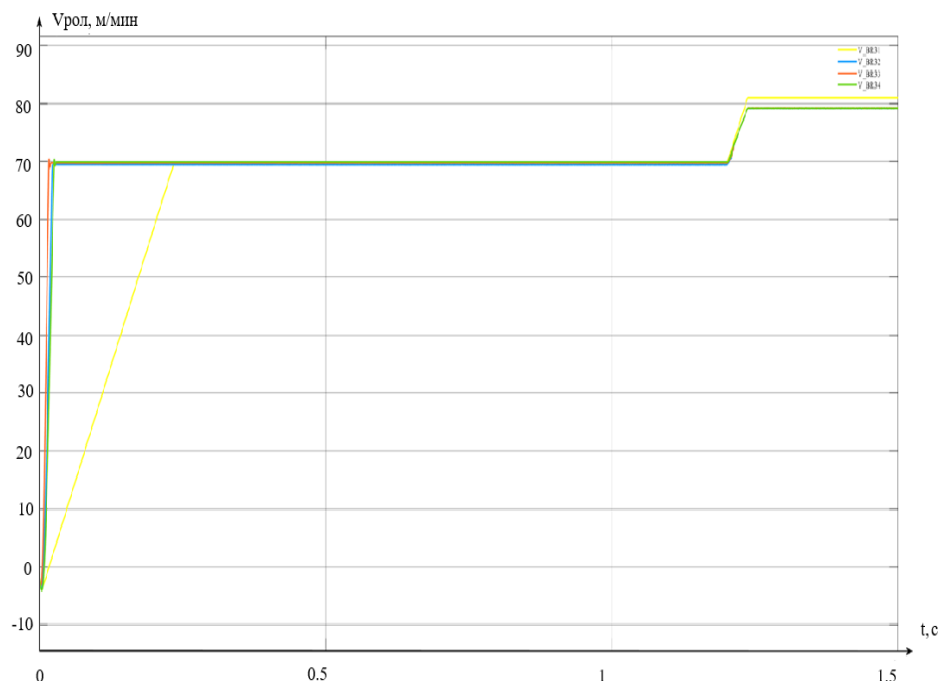


Рис. 15. Рабочие скорость 1-4 натяжных роликов (система с регулятором) Fig. 15. Working speed 1-4 tension rollers (system with regulator)

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

Анализ графиков приводит к выводу, что увеличение показателей скорости «ведущего» ролика в действующей системе управления не находит отклика у «ведомых» роликов, в следствии чего наблюдается механическое рассогласование скоростей «ведомых» роликов натяжной станции. При введении в системы управления «ведомыми» роликами нечетких регуляторов наблюдается реакция их систем на изменения скорости «ведущего» ролика, контроль данного процесса реализуется на уровне промышленного контроллера.

Практическая реализация

Практическая реализация предложенного решения возможна в программной среде TIA Portal. Архитектура системы с блоком, осуществляющим регулирование аналогично блоку, работающему на базе нечеткой логики представлена на рисунке 16. Она включает программируемый логический контроллер фирмы Siemens модель S7-1517 имеющий серийный номер 6ES7 517-3AP00-0AB0, который используется для подачи сигналов управления на частотный преобразователь, при разработке проекта был выбран преобразователь фирмы Siemens Micromaster 440 имеющий серийный номер 6SE640X-1PB00-0AA0. Также, в состав проекта программы, для обеспечения взаимосвязи между оператором и устройством входит панель TP900 Comfort имеющая серийный номер 6AV2 124-0JC01-0AX0.

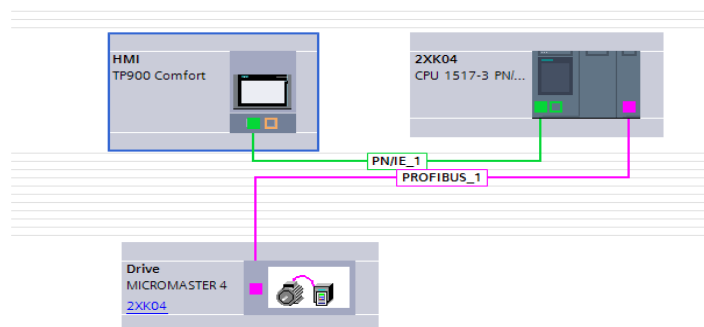


Рис. 16. Проект программы (архитектура) Fig. 16. Program design (architecture)

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

На рисунке 17 представлен блок коррекции задания частоты на электродвигатель.

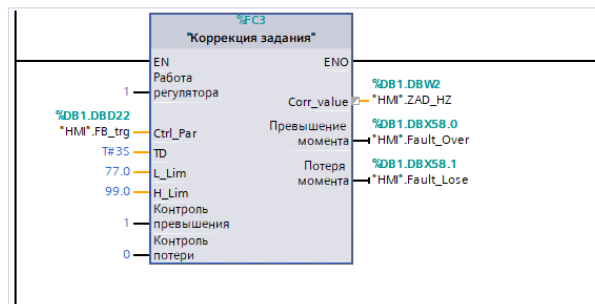


Рис. 17. Реализация блока коррекции сигнала задания Fig. 17. Implementation of the task signal correction block

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

Так как управление двигателем от частотного преобразователя является типовым, то оно не рассматривается. Рассмотрим принцип работы блока коррекции сигнала задания. Процесс происходит следующим образом, при нахождении момента двигателя в указанном в настройках диапазоне в работу включается блок коррекции задания частоты. При настройке блока необходимо определить его входные и выходные параметры. Входным контролируемым параметром служащим индикатором на разрешение работы нечеткого регулятора является момент двигателя, в зависимости от его значений происходит настройка времени задержки на включение регулятора, нижний предел срабатывания и верхний предел срабатывания. Также предусмотрен выбор режима, в котором будет осуществляться контроль момента: превышение или недопустимое снижение. В качестве выходных сигналов выступают корректирующий сигнал и сигнал о появившемся режиме: превышение или недопустимое снижение момента.

На рисунке 18 приведен алгоритм работы рассматриваемого регулирования.

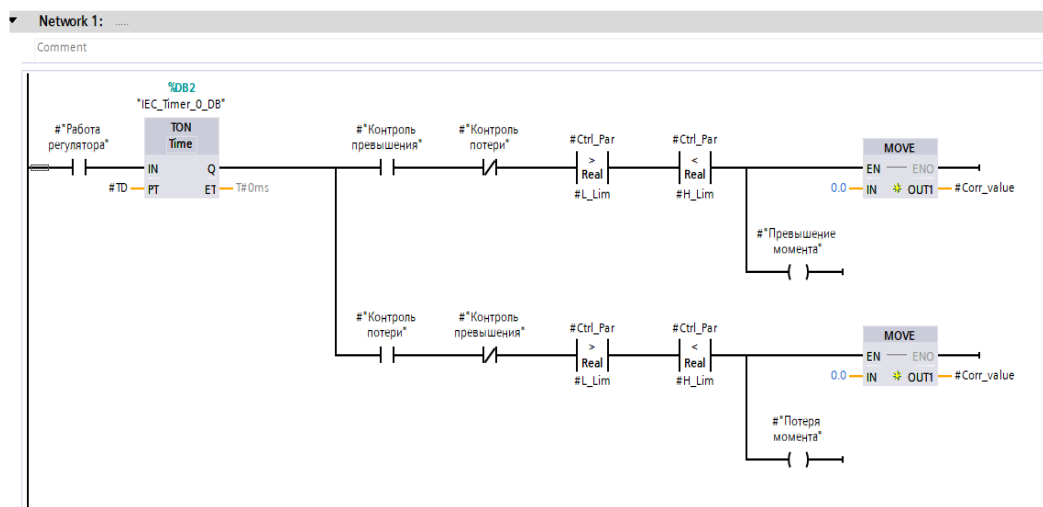


Рис. 18. Структура блока коррекции Fig. 18. Structure of the correction block

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

Последовательность работы программы: проверка наличия разрешения на ввод блока в работу, включение таймера для формирования задержки на ввод блока в работу (привод за указанное время должен выйти на рабочую характеристику), проверка выбора режима (исключает одновременное включение двух режимов). При выходе значения момента за установленные параметры, принудительно выдается нулевой сигнал на задание частоты, что приводит к остановке двигателя. Преимуществом приведенного алгоритма является то, что он не зависит от модели применяемого программируемого логического контроллера, частотного преобразователя, его реализация возможна в любой доступной системе.

Выводы (Conclusions)

Полученные при моделировании результаты позволяют сделать вывод о том, что применение блоков коррекции на базе нечеткой логики в системе управления многоприводным агрегатом, по сравнению с традиционной системой управления, позволяет создать универсальную систему управления, которая становится не зависимой

от параметров и типа преобразователя частоты, она может быть заведена на любой программируемый контроллер, имеющийся в структуре многоприводного агрегата. Становится возможным использование на объекте преобразователей, в которых рассматриваемые проблемы не предусмотрены для решения на заводе-изготовителе.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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>
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. Фирсов К.С. The assessment of the cost-effectiveness of using controllers with reduced bit depth for electric drive management // Молодой ученый. 2023. № 51 (498). С. 44-46.
6. Архангельский О. Д., Сютков Д. В., Кузнецов А. В. Практические подходы к созданию инфраструктуры промышленного киберполигона // Автоматизация в промышленности. 2020. № 11. С. 52-57.
7. Литвиненко А.М., Баранов Д.С. Адаптивная система управления электроприводом моталки // Российская электротехника. 2020. Т. 91. № 10. С. 620-625.
8. Литвиненко А.М., Баранов Д.С. Адаптивная система управления электроприводом моталки // Электротехника. 2020. № 10. С. 31-36.
9. Храмшин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник МГЭУ. 2012. № 6. С. 100-104.
10. Белоусов А.С., Мещеряков В.Н., Баранов Д.С. Моделирование системы управления электроприводом подъёмной машины для последующей настройки // Электрические системы и комплексы. 2022. № 1 (54). С. 11–18.
11. Yuxiang NIU, Hui LI, Feiyang LIU. A Loss-aware Continuous Hopfield Neural Network (CDN)-based Mapping Algorithm in Optical Network-on-Chip (Noc) // 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICON). 2022. 22115387.
12. Синюков А.В., Синюкова Т.В., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Мещеряков В.Н., Valtchev S. Нечеткие технологии в системах управления подъемно-транспортными механизмами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. 25(1). С. 105-117. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117>.

Авторы публикации

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

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

Синюков Алексей Владимирович – канд. техн. наук, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия, технический писатель ООО «Грин-АПИ», г. Химки, Россия. zeitsn@yandex.ru

References

1. 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.

2. 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.

3. 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>.

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. Firsov K.S. The assessment of the cost-effectiveness of using controllers with reduced bit depth for electric drive management // The young scientist. 2023. vol. 51 (498). pp. 44–46.

6. Arkhangelsky O. D., Syutov D. V., Kuznetsov A. V. Ractical approaches to establishing infrastructure for an industrial cyber polygon // Automation in Industry. 2020. vol. 11. pp. 52-57.

7. Litvinenko A.M., Baranov D.S. An adaptive control system for a winding-machine electric drive // Russian Electrical Engineering. 2020. vol. 91. n. 10. pp. 620-625.

8. Litvinenko A.M., Baranov D.S. Adaptive Control System for the Electric Drive of a Winding Machine // Electrical Engineering. 2020. № 10. pp. 31-36.

9. Khramshin V.R. Development and implementation of automated electric drives and systems for regulating the technological parameters of a broadband hot rolling mill // Bulletin of ISEU. 2012. № 6. pp. 100-104,

10. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Baranov D.S. Simulation of winding machine electric drive control system for subsequent adjustment // Electrical systems and complexes. 2022. № 1 (54), pp. 11–18.

11. Yuxiang NIU, Hui LI, Feiyang LIU. A Loss-aware Continuous Hopfield Neural Network (CDN)-based Mapping Algorithm in Optical Network-on-Chip (Noc) // 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICON). 2022. 22115387.

12. Sinyukov A.V., Sinyukova T.V., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Meshcheryakov V.N., Valtchev S. Fuzzy technologies in control systems of lifting and transport mechanisms // Power engineering: research, equipment, technology. 2023. 25(1). pp. 105-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117>.

Authors of the publication

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

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

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, ООО «Grin-API», Khimki, Russia. zeitsn@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 22.08.2025 г.

Отредактировано 24.09.2025 г.

Принято 02.10.2025 г.