

УДК 629.421(045)

Регулятор тягового усилия локомотива на основе алгоритма с нечеткой логикой

Ю. В. Бабков¹, К. С. Перфильев¹, С. Н. Журавлев¹, И. А. Уколов^{1,2}

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКИ»), Российская Федерация, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

² Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета, Российская Федерация, 140400, ул. Октябрьской революции, 408

Для цитирования: Бабков Ю. В., Перфильев К. С., Журавлев С. Н., Уколов И. А. Регулятор тягового усилия локомотива на основе алгоритма с нечеткой логикой // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 87–99. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-87-99

Аннотация

Цель: Разработать алгоритм управления тяговым усилием локомотива для максимизации тяговых свойств при переменном сцеплении и минимизации проскальзывания в системе «колесо — рельс».

Методы: Использование аппарата нечеткой логики, теории нечетких множеств и нечетких логических функций, элементов искусственного интеллекта, теории автоматического управления, методов математического моделирования. **Результаты:** Представлена структурная схема системы регулирования тягового усилия локомотива, реализованная на базе регулятора с нечеткой логикой. Регулятор оптимизирует параметры скольжения колесных пар для обеспечения максимальной силы тяги локомотива в условиях изменяющегося сцепления. Правила нечеткого управления сформированы на основе экспертных лингвистических оценок положения рабочей точки на кривой зависимости коэффициента сцепления. При этом отсутствует необходимость в точной математической модели, описывающей процессы в системе «колесо — рельс». Алгоритм нечеткого управления разработан в среде MATLAB с применением инструментария Fuzzy Logic Toolbox. Проведено математическое моделирование функционирования нечеткого регулятора с использованием ранее разработанной полномасштабной продольно-вертикальной динамической модели тепловоза 2ТЭ25А. **Практическая значимость:** Результаты моделирования доказывают эффективность предложенной системы управления на основе нечеткой логики, показывают высокие тяговые свойства тепловоза при изменении состояния рельсов во всем скоростном диапазоне. Разработанный алгоритм управления тягой локомотива может быть использован при проектировании и внедрении в эксплуатацию перспективных высокоэффективных систем защиты от боксования и юза, позволяющих существенно повысить тяговые свойства локомотивов при оптимальном износе в системе «колесо — рельс».

Ключевые слова: Тепловоз, колесная пара, боксование, сцепление, тяговое усилие, коэффициент сцепления, модель Полаха, условия контакта, нечеткое управление, управление скольжением локомотива.

Введение

Сцепление между колесом и рельсом является решающим фактором для реализации заявленных тяговых качеств любого локомотива. Используемый в настоящее время в технической литературе термин «защита от боксования» в связи с широким внедрением микропроцессорных, высокоинтеллектуальных систем управления тягой, совершенствования силовой части электроприводов, по нашему

мнению, несколько устарел. Более точный термин — «регулируемое скольжение» подразумевает не просто защиту от боксования, а обеспечивает поддержание тяговых свойств локомотива на максимально возможном уровне, при этом не допуская чрезмерного износа в системе «колесо — рельс» [1, 2].

Увеличение тягового усилия представляет собой чрезвычайно сложную проблему из-за различного рода процессов, происходящих в системе «колесо — рельс», их стохастического характера вследствие большого количества эксплуатационных факторов с нелинейными и изменяемыми во времени зависимостями. Для изучения влияния указанных эксплуатационных факторов и синтеза алгоритма управления проскальзыванием локомотива ранее была разработана полномасштабная динамическая модель тепловоза, учитывающая все его основные динамические компоненты [3]. Указанная математическая модель представляет собой динамику локомотива в продольном и вертикальном направлениях, а также модель механики контакта «колесо — рельс», в качестве которой используется модель Полаха [4–6]. Данная модель максимально точно учитывает физические процессы в контакте «колесо — рельс», поскольку была проверена как относительно точная для анализа силы тяги локомотивов и верифицирована путем сравнения с экспериментальными данными [5]. В отличие от традиционно используемых моделей подобного рода [7], данная модель позволяет описать всю доступную в эксплуатации область коэффициентов сцепления и смоделировать величину тягового усилия, создаваемого благодаря такому контакту в зависимости от относительного скольжения колес, скорости локомотива, состояния пути, материала колеса и рельса, геометрии контакта.

Цель данной работы — с помощью нечеткого регулятора (Fuzzy-регулятор) достичь максимально возможной силы тяги локомотива в конкретных условиях эксплуатации при минимально возможном проскальзывании колесных пар.

Структурная схема системы управления тяговым усилием тепловоза с нечеткими регуляторами

На рис. 1. представлена структура системы управления тягой тепловоза с использованием нечетких регуляторов. Задание на момент каждого тягового электродвигателя Мз1–6 поступает на вход сумматора, где к нему добавляется корректирующий момент $dM_{к1-6}$ с выхода нечетких регуляторов. На вход нечетких регуляторов поступают сигналы о текущих значениях скорости относительного скольжения каждой колесной пары и коэффициенте сцепления. В данной работе нечеткие регуляторы работают на основе значений указанных параметров, поступающих из моделей Полаха для каждой колесной пары. На практике для получения информации о коэффициенте сцепления потребуются специальные решения по его идентификации. Один из возможных алгоритмов его идентификации

с использованием информации о значении текущей силы тяги F_t представлен в [8]. Параметр относительного скольжения при этом легко измеряется посредством штатных датчиков частоты вращения колесных пар.

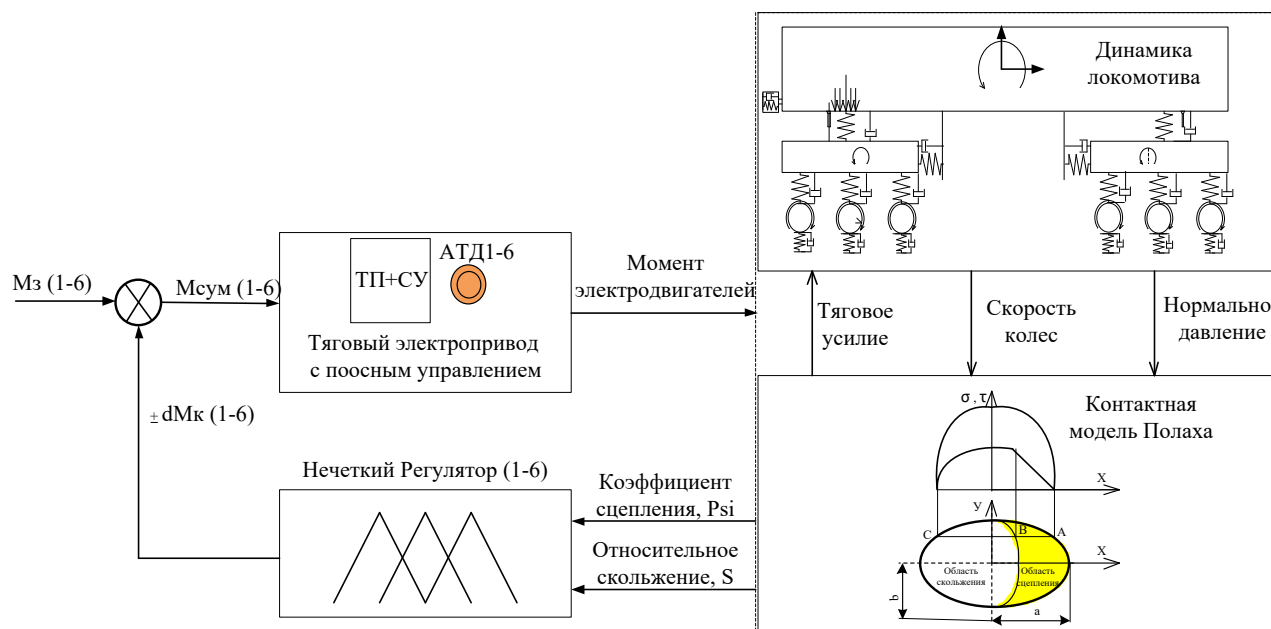


Рис. 1. Структура модели управления тягой тепловоза с использованием нечетких регуляторов

Нечеткие контроллеры имеют множество преимуществ, учитывая, что они разрабатываются с использованием нечетких лингвистических правил, основанных на экспертных знаниях и конкретных числовых данных, без существования подходящей математической модели. Нечеткая логика и теория нечетких множеств лежат в основе многих методов исследования и моделирования систем, относящихся к области искусственного интеллекта. Алгоритмы с нечеткой логикой часто используются для управления сложными процессами в тех случаях, когда с помощью других методов трудно определить существующие зависимости между переменными. По отношению к классическому подходу с четким контролем нечеткое управление представляет собой естественную методологию использования человеческих (эвристических) знаний, поскольку эксперты могут применять свои знания, формируя стратегию управления с использованием лингвистических правил. Кроме того, нечеткие регуляторы более гибкие по сравнению с классическими, так как управляющие переменные можно легко модифицировать по принципу «ошибка и проба». Нечеткая логика представляет собой расширение общепринятой логики (логики Булла), применяемой для работы с точными значениями, существующими между предельными значениями «истина» и «ложь». В ее основе лежит теория нечетких множеств, основные принципы которой были сформулированы американским профессором Лотфи Заде. По сути, нечеткую систему управления следует рассматривать как объект в сфере искусственного

интеллекта, функционирующий в контуре обратной связи регулятора и принимающий решения в режиме реального времени. Нечеткий регулятор воздействует на электромагнитный момент тягового привода, изменяя его величину в соответствии с условиями сцепления.

Описание структуры и правил работы нечеткого регулятора

Предложенный контроллер нечеткой логики использует информацию о скорости изменения относительного проскальзывания и коэффициента сцепления каждой оси. В данной статье нечеткие регуляторы работают строго по выходу модели Полаха. Каждый из нечетких входов производной относительного проскальзывания dS/dt и производной коэффициента сцепления $dPsi/dt$ выражается как пять нечетких функций принадлежности, например положительная большая (Pb), положительная малая (Ps), ноль (0), отрицательная малая (Ns) и отрицательная большая (Nb). Выходом нечеткого логического контроллера является команда на компенсацию (с целью увеличения или уменьшения) крутящего момента для каждого из электродвигателей. Зависимости силы сцепления для типичных сухих и влажных условий по модели Полаха для 2ТЭ25А показаны на рис. 2.

Нечеткие правила разработаны на основе деления кривой коэффициента сцепления на четыре различных зоны в соответствии со значениями производных dS/dt и $dPsi/dt$ (зоны 1–4 представляют кривую состояния сухого контакта, зоны 1*–4* представляют кривую состояния влажного контакта). Характеристики описанных выше процессов в терминах dS/dt и $dPsi/dt$ подробно описаны ниже. В процессах 1 и 1* dS/dt положительна и $dPsi/dt$ положительна. В 2 и 2* dS/dt положительна и $dPsi/dt$ отрицательна. В 3 и 3* dS/dt отрицательна и $dPsi/dt$ положительна. В 4 и 4* dS/dt отрицательна и $dPsi/dt$ отрицательна. Кроме того, учитывается переходное состояние, вызванное изменением состояния контакта колеса с рельсом. Таким образом, были добавлены два дополнительных процесса. Процесс 5 представляет собой переходный процесс от сухой кривой к мокрой кривой с положительным dS/dt и очень большим отрицательным $dPsi/dt$. Процесс 6 представляет собой переход от мокрой кривой к сухой кривой с отрицательным dS/dt и очень большим положительным $dPsi/dt$. Принцип нечеткой логики заключается в поддержании коэффициента сцепления на максимальном значении «Опт» для условий сухого контакта или на «Опт*» для условий влажного контакта путем уменьшения команды крутящего момента, когда значение относительного скольжения находится на правой стороне от максимального значения, и увеличения команды крутящего момента, когда оно находится на левой стороне от максимального значения.

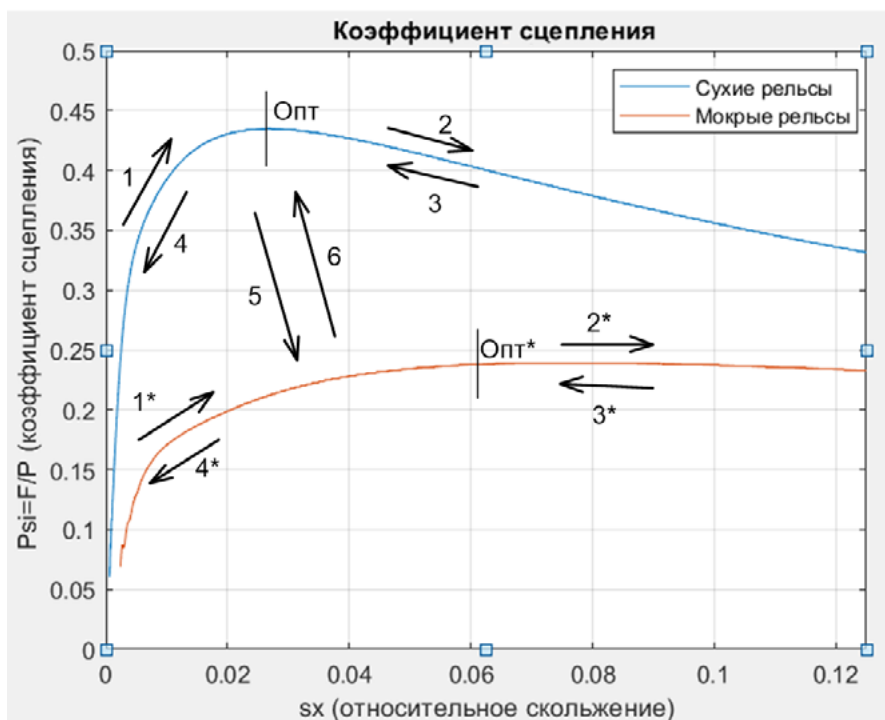


Рис. 2. Иллюстративный график коэффициентов сцепления при сухих и влажных рельсах для нечетких правил

Функции принадлежности входных и выходной переменных представлены на рис. 3, 4. Нечеткие правила управления входов и выхода представлены в таблице.

Нечеткие правила управления входов и выходов

| dS/dt | $dPsi/dt$ | | | | |
|---------|-----------|------|------|------|------|
| | Pb | Ps | 0 | Ns | Nb |
| Pb | Pb | Ps | Ns | Ns | Ns |
| Ps | Ps | Ps | 0 | Ns | Ns |
| 0 | Ps | 0 | 0 | Ps | Ps |
| Ns | Ns | Ns | Ps | Ps | Pb |
| Nb | Ns | Ns | Ps | Ps | Pb |

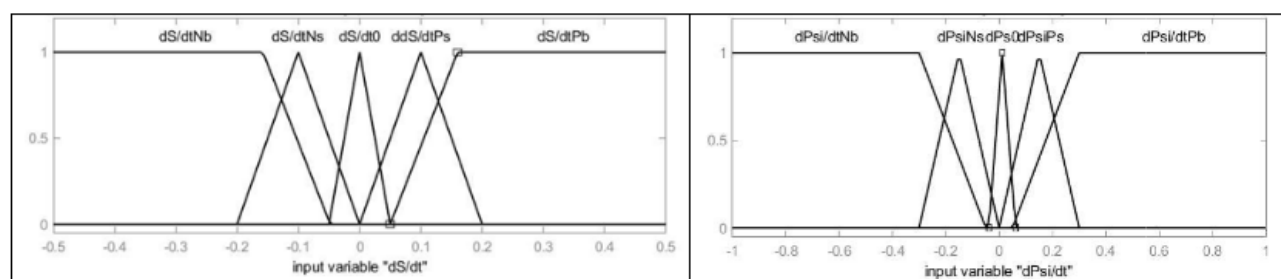


Рис. 3. Функции принадлежности входных переменных

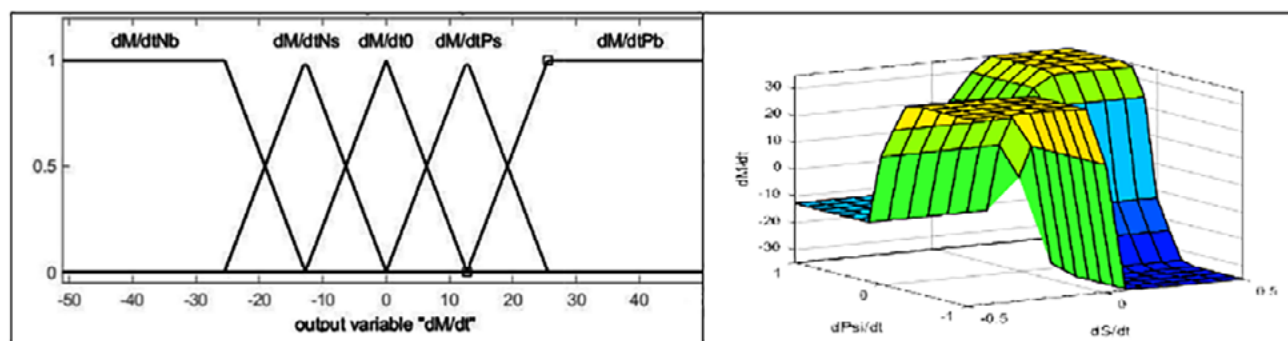


Рис. 4. Функции принадлежности выходной переменной

Реализация нечеткого регулятора

Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде MATLAB предназначен специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox [8]. В рамках этого пакета пользователь может выполнять необходимые действия по разработке и использованию нечетких моделей в интерактивном режиме с помощью графических средств редактирования и визуализации всех компонентов систем нечеткого вывода.

Редактор FIS систем нечеткого вывода является основным средством, которое используется для создания или редактирования систем нечеткого вывода в графическом режиме. Редактор FIS может быть открыт с помощью ввода функции `fuzzy` в командной строке (рис. 5). Эта функция предоставляет пользователю возможность задавать и редактировать на высоком уровне свойства системы нечеткого вывода, такие как число входных и выходных переменных, тип системы нечеткого вывода, используемый метод дефаззификации и т. д.

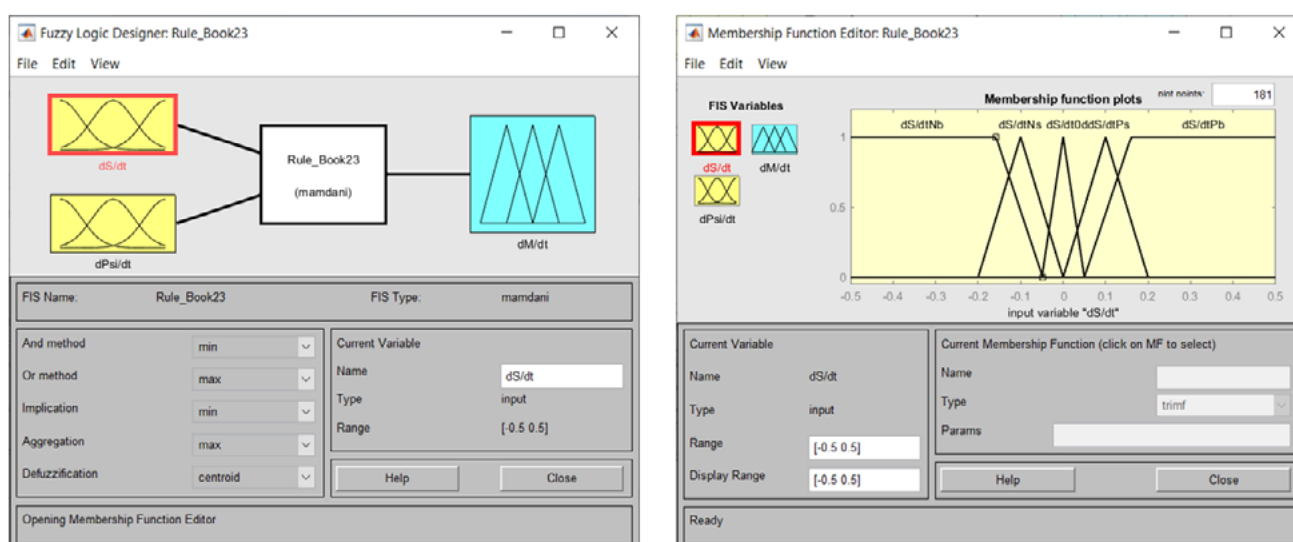


Рис. 5. Графический интерфейс редактора FIS

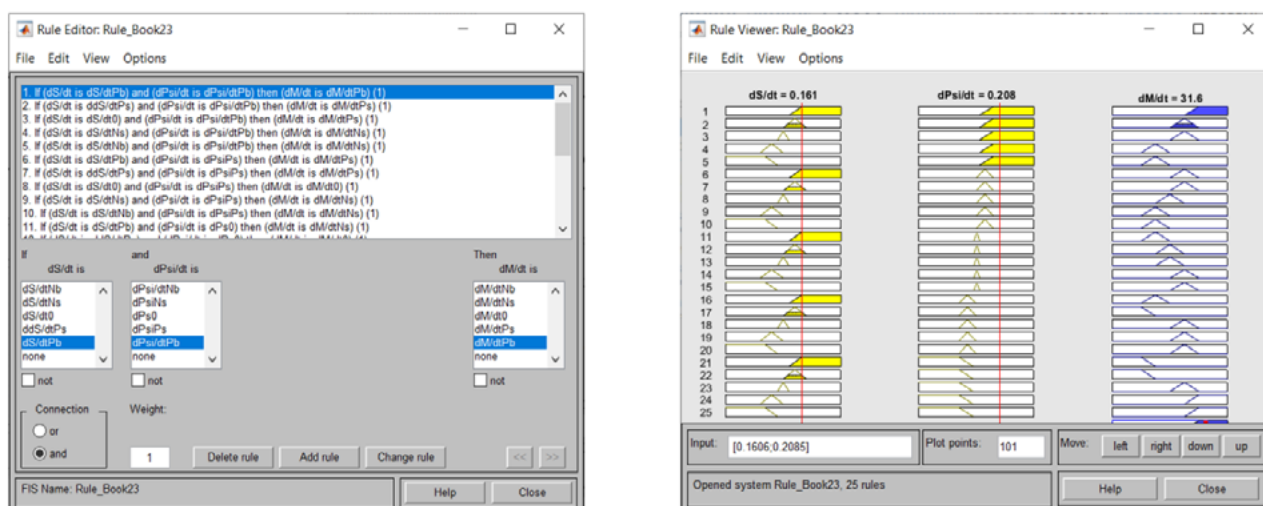


Рис. 6. Графический редактор нечетких правил управления и контроль входов/выходов

После того как с помощью данного редактора сформированы входные и выходные функции нечеткого регулятора (рис. 3), определяются правила обработки входов и получения соответствующих выходов (табл., рис. 6), полученный файл (в нашем случае Rule_Book23.fis) с соответствующим блоком вставляется в моделируемую систему управления проскальзыванием. В реальной системе управления реализация нечетких регуляторов выполняется с использованием стандартного программируемого логического контроллера.

Описание модели тепловоза с управлением на основе нечетких регуляторов

На рис. 7 представлена модель тепловоза, тяговое усилие которого регулируется с использованием разработанного нечеткого регулятора. Общая модель включает в себя динамическую модель тепловоза, шесть моделей механики контакта «колесо — рельс» Полаха, модель автосцепки, модель поезда, упрощенную модель задания тягового усилия для 2–6 колесных пар и модель регулирования тяги с помощью нечеткого регулятора для первой колесной пары, а также саму модель нечеткого регулятора. Кроме того, модель содержит осциллографы для наблюдения за параметрами и имеет блок сохранения моделируемой информации в специальном файле для последующей его обработки. Ввиду ограниченной вычислительной мощности в модели регулированию подвергается только первая колесная пара локомотива. На остальные пять осей поступает плавно нарастающий и затем ограниченный на заданном уровне тяговый момент.

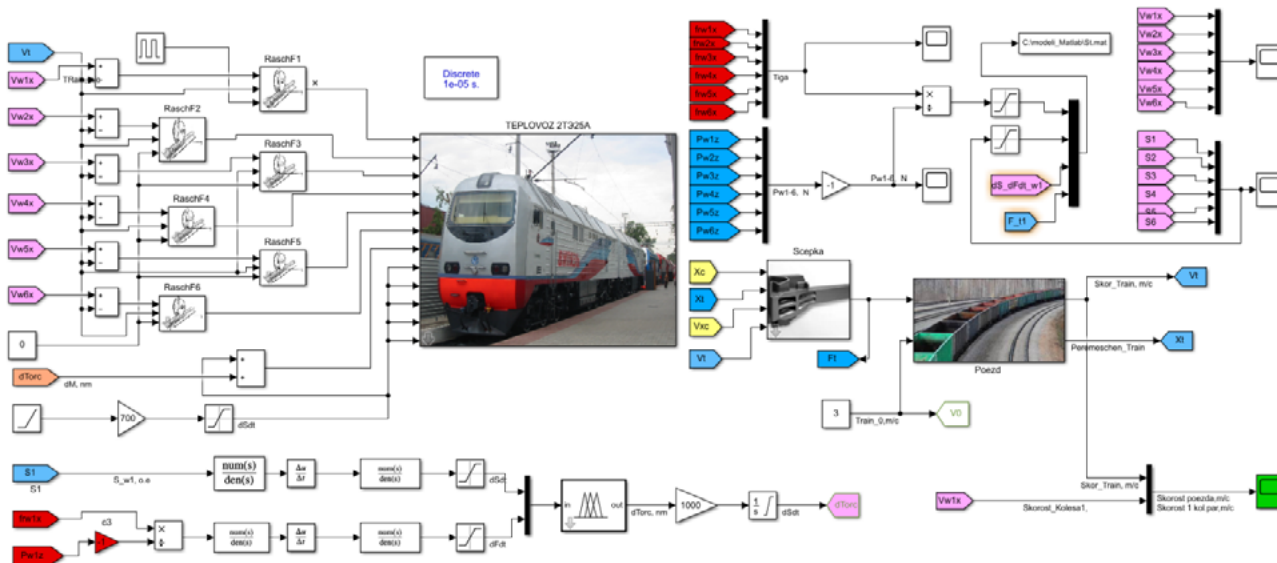


Рис. 7. Модель тепловоза 2ТЭ25А с регулятором проскальзывания первой колесной пары на нечеткой логике

Результаты моделирования

На рис. 8 приведены результаты переходной реакции тепловоза 2ТЭ25А при работе на сухих и мокрых рельсах с предложенным нечетким логическим контроллером, а именно скорость вращения первой колесной пары и скорость поезда. Начальная рабочая скорость была установлена на уровне 10 км/ч. Движение начинается на сухих рельсах, затем на 20-й секунде первая колесная пара наезжает на мокрые рельсы. На 40-й секунде выполняется обратный переход из влажного состояния в состояние сухого контакта, но уже со скорости 16 км/ч. Далее переходы выполняются на 60-й и 80-й секунде при скоростях 20,5 и 23 км/ч.

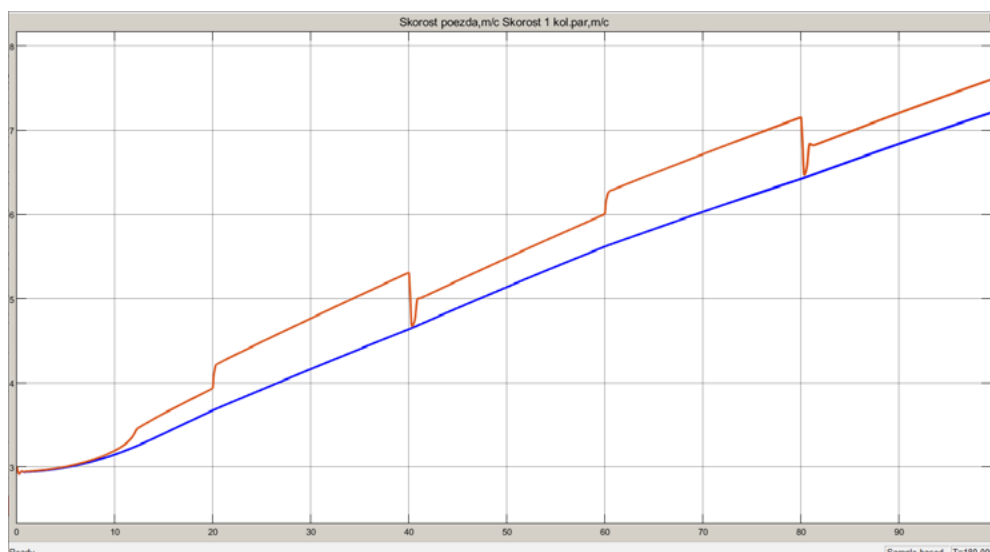


Рис. 8. Скорость вращения первой колесной пары (красный), скорость поезда (синий)

Соответствующая работа нечеткого регулятора представлена на рис. 9, на котором показан реализованный коэффициент сцепления первой колесной пары и соответствующее ему скольжение при переходах с сухих рельсов на мокрые и наоборот. Порядок движения по кривой сцепления от начала движения и до конца обозначен стрелками. Как видно, в установившихся режимах (точки 2–11, 4–9) нечеткий регулятор устанавливает управляющее усилие в соответствии с условиями эксплуатации и достигает максимально доступной тяговой силы, реализуя максимально возможный (оптимальный) коэффициент сцепления колес с рельсами как на сухих, так и на мокрых рельсах. С помощью корректировки нечетких правил, представленных в табл., установившееся положение рабочей точки на кривой сцепления возле оптимума можно слегка сдвигать влево или вправо (кривая «б» на рис. 9). В этом случае можно добиться минимального скольжения при близком к оптимуму коэффициенте сцепления на восходящей, а значит, и более устойчивой части кривой сцепления и при меньшем проскальзывании.

На рис. 10 показано реализованное тяговое усилие по всем осям тепловоза. Видно, что первая (лимитирующая) колесная пара, находящаяся под контролем нечеткого регулятора, реализует на сухих рельсах тяговое усилие на 22 % больше, чем колесные пары 2–6. На осях 2–6 тяговое усилие не изменяется в связи с тем, что в данном численном эксперименте изменение условий сцепления с сухих на мокрые выполняется только для первой колесной пары. Остальные едут непрерывно по сухим рельсам.

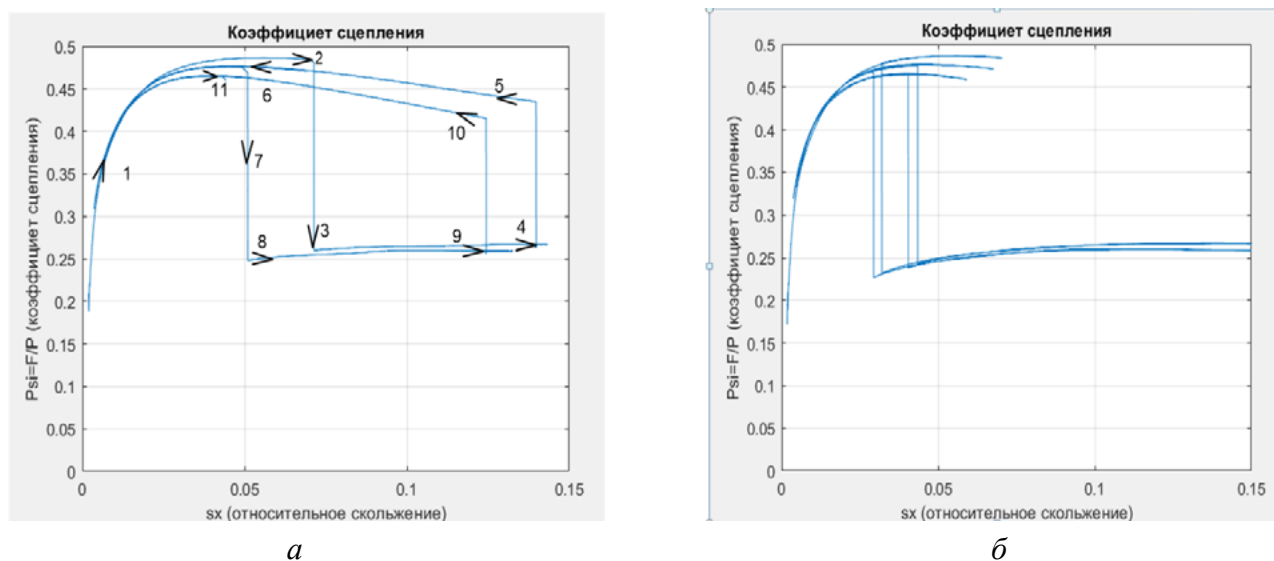


Рис. 9. Реализованный коэффициент сцепления:
нечеткие правила в соответствии с таблицей (а) и скорректированные правила (б)

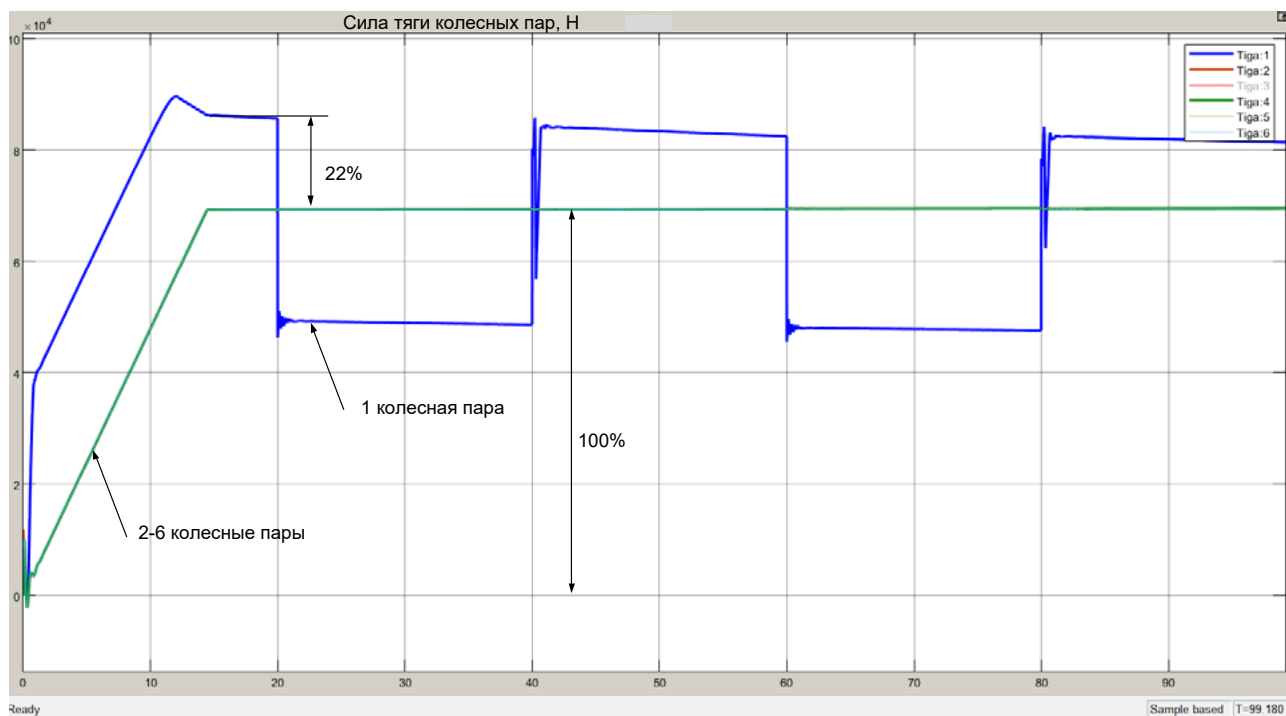


Рис. 10. Реализованные силы тяги колесных пар по шести осям тепловоза

Выводы

1. Выполнена разработка нечеткого регулятора, позволяющего оптимизировать величину силы тяги локомотива и проскальзывания колес в соответствии с изменяющимися условиями сцепления. Преимущество использования нечеткой логики заключается в том, что управляющий регулятор может быть спроектирован с использованием лингвистических знаний, а это означает, что точная математическая модель, описывающая процессы в системе «колесо — рельс», не требуется. Нечеткий регулятор также обеспечивает нелинейное действие управления и может быть легко модифицирован и настроен.

2. Работа нечеткого регулятора была проверена с использованием интегрированной динамической 2D-модели тепловоза 2ТЭ25А. Результаты моделирования подтверждают высокую эффективность предложенного нечеткого регулятора. Сила тяги лимитирующей колесной пары превышает силу тяги, развиваемую остальными колесными парами, не менее чем на 22 %. При этом скольжение колесной пары находится в оптимальной точке характеристики сцепления.

3. Представленная модель нечеткого регулятора может быть эффективно использована в качестве основы для проектирования систем управления с увеличением силы тяги локомотивов и одновременным снижением износа колес и рельсов.

Список источников

1. Космодамианский А. С. Новые методы предотвращения боксования локомотивов и возможность их реализации / А. С. Космодамианский, О. В. Измеров, С. О. Копылов, В. О. Корчагин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием. — Омск, 2016. — С. 182–189.
2. Патент RU 2845291 Российская Федерация. Способ обнаружения боксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей: заявл. 03.02.2025; опубл. 15.08.2025 / К. С. Перфильев, В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др. — 17 с.
3. Волохов Г. М. Разработка двухмерной динамической модели шестиосного тепловоза с учетом условий сцепления в контакте «колесо — рельс» / Г. М. Волохов, К. С. Перфильев // Вестник ВНИКТИ. — 2025. — Вып. 108. — С. 110–128.
4. Polach O. A Fast Wheel — Rail Forces Calculation Computer Code / O. Polach // Vehicle System Dynamics. — 1999. — Vol. 33. — Pp. 728–739.
5. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit / O. Polach // Wear. — 2005. — Vol. 258. — Pp. 992–1000.
6. Polach O. Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail / O. Polach // Vehicle System Dynamics. — 2001. — Vol. 35. — Pp. 7–22.
7. Меншутин Н. Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива / Н. Н. Меншутин // Вестник ВНИИЖТ. — 1960. — № 7. — С. 12–16.
8. Djukic M. A fuzzy model for an increase in locomotive traction force / M. Djukic, S. Rusov, Z. Mitrović // Transport. — 2010. — Vol. 25. — Pp. 36–45.

Дата поступления: 04.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

БАБКОВ Юрий Валерьевич — канд. техн. наук, генеральный директор; babkov@bk.ru

ПЕРФИЛЬЕВ Константин Степанович — канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; perfiliev@vnikti.com

ЖУРАВЛЕВ Сергей Николаевич — канд. техн. наук, зав. НИ КБ ЭМСУ, заместитель главного инженера по перспективным проектам; zuravlev_sn@vnikti.com

УКОЛОВ Иван Александрович — ведущий программист, старший преподаватель; ukolov-ia@vnikti.com

Controlling the Locomotive Traction Effort Using Fuzzy Logic Algorithm

Yu. V. Babkov¹, K. S. Perfilyev¹, S. N. Zhuravlev¹, I. A. Ukolov^{1,2}

¹Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC “VNIKT”), 410, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation

²Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, 408, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140400, Russian Federation

For citation: Babkov Yu. V., Perfilyev K. S., Zhuravlev S. N., Ukolov I. A. Controlling the Locomotive Traction Effort Using Fuzzy Logic Algorithm. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 87–99. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-87-99

Summary

Purpose: To create an algorithm for controlling locomotive traction effort that maximizes locomotive traction performance under varying adhesion conditions while minimizing wheel-rail slip forces. **Methods:** Fuzzy logic systems, fuzzy set and fuzzy logic theory, elements of artificial intelligence, automatic control theory, and numerical modelling techniques. **Results:** The presented flowchart for controlling locomotive traction effort with a fuzzy logic controller enables effectively to maximize locomotive traction effort through optimizing wheel slip control in response to changing adhesion conditions. Fuzzy control rules have been developed based on a linguistic evaluation of setpoint behaviour along the adhesion coefficient curve, eliminating the need for precise numerical modelling of wheel-rail contact. A fuzzy logic-based algorithm has been developed using a specialized MATLAB extension from the Fuzzy Logic Toolbox. Numerical simulations of the fuzzy controller’s performance have been conducted using the established full-scale longitudinal/vertical dynamic model of the 2TE25A diesel locomotive. **Practical significance:** The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed fuzzy logic-based controller, highlighting enhanced traction performance of the diesel locomotive across the entire range of speeds and various railway track conditions. The traction control algorithm can be used to design and implement advanced, high-efficiency wheel slip/slide protection systems, thereby significantly enhancing locomotive traction and optimizing wheel-rail wear.

Keywords: Diesel locomotive, wheelset, slippage, adhesion, traction effort, adhesion coefficient, Polach model, contact conditions, fuzzy control, locomotive slide control.

References

1. Kosmodamianskiy A. S., Izmerov O. V., Kopylov S. O., Korchagin V. O. Novye metody predotvrashcheniya boksovaniya lokomotivov i vozmozhnost’ ikh realizatsii [New methods for preventing locomotive slipping and the possibility of their implementation]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost’ lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy tret’ey vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Operational reliability of the locomotive fleet and improving train traction efficiency: proceedings of the Third All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Omsk, 2016, pp. 182–189. (In Russian)
2. Perfil’ev K. S., Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu. et al. *Sposob obnaru-zheniya boksovaniya i yuza koles transportnogo sredstva s elektricheskoy peredachey* [Method for detecting slipping and skidding of vehicle wheels with electric transmission]. Patent RF, no. 2845291, 2025. (In Russian)
3. Volokhov G. M., Perfil’ev K. S. Razrabotka dvukhmernoy dinamicheskoy modeli shestiosnogo teplovoza s uchetom usloviy stsepleniya v kontakte “koleso — rel’s” [Development of

a two-dimensional dynamic model of a six-axle diesel locomotive considering adhesion conditions in the “wheel — rail” contact]. *Vestnik VNIKTI* [Bulletin of VNIKTI]. 2025, Iss. 108, pp. 110–128. (In Russian)

4. Polach O. A Fast Wheel — Rail Forces Calculation Computer Code. *Vehicle System Dynamics*. 1999, vol. 33, pp. 728–739.

5. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear*, 2005, vol. 258, pp. 992–1000.

6. Polach O. Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail. *Vehicle System Dynamics*. 2001, vol. 35, pp. 7–22.

7. Menshutina N. N. Zavisimost' mezhdru siloy stsepleniya i skorost'yu skol'zheniya kolesnoy pary lokomotiva [Dependence between adhesion force and sliding speed of a locomotive wheelset]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1960, Iss. 7, pp. 12–16. (In Russian)

8. Djukic M., Rusov S., Mitrović Z. A fuzzy model for an increase in locomotive traction force. *Transport*, 2010, vol. 25, pp. 36–45.

Received: June 04, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Yuri V. BABKOV — PhD in Engineering, General Director; babkov@bk.ru

Konstantin S. PERFILIEV — PhD in Engineering, Leading Researcher; perfiliev@vnikti.com

Sergei N. ZHURAVLEV — PhD in Engineering, Head of Research and Design Bureau for Electrical Equipment and Microprocessor Control Systems, Deputy Chief Engineer for Advanced Research Projects; zuravlev_sn@vnikti.com

Ivan A. UKOLOV — Leading Programmer; Senior Lecturer at the Kolomna Institute (Branch) of the Moscow Polytechnic University; ukolov-ia@vnikti.com