

УДК 004.89

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.016](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.016)

Система автоматического управления движением транспортных средств в колонне

Н.Н. Чернышев✉, А.Ю.А Альфара, Т.В. Ниженец

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. В статье представлена разработка системы автоматического управления продольным движением транспортных средств в колонне на основе методов нечеткой логики. Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в эффективных и безопасных решениях для автоматизации грузоперевозок. Научная новизна работы заключается в разработке и верификации системы управления, на основе принципа «лидер – ведомый» и нечеткого регулятора со специфической базой правил, адаптированной для управления тяжело нагруженными грузовыми автомобилями (на примере КАМАЗ-65111) с программной реализацией в средах численного и визуального моделирования. В отличие от универсальных подходов, предложенная база правил формализует экспертные стратегии вождения, учитывая высокую инерционность объекта управления. Система, реализующая принцип «лидер – ведомый», была реализована и протестирована в двух различных средах: математическое моделирование в MATLAB/Simulink и интерактивная 3D-симуляция в Unity. Проведено комплексное тестирование в четырех сценариях движения: равномерное движение, разгон-торможение, экстренное торможение и движение по пересеченной местности. Результаты моделирования показали высокую точность (среднеквадратичная ошибка дистанции не превышает 1,21 м) и безопасность (минимальная дистанция в критических сценариях – более 6,3 м). Высокая корреляция результатов между двумя платформами подтверждает адекватность и робастность предложенной модели. Разработанная система демонстрирует потенциал для применения в беспилотном транспорте и может быть усовершенствована внедрением адаптивных механизмов настройки параметров нечеткого регулятора. Отмечено, что совершенствование разработанной системы управления может быть реализовано за счет использования гибридных нейро-нечетких правил или создания интеллектуальных систем управления дорожным движением.

Ключевые слова: автомобильная колонна, автоматическое управление, лидер – ведомый, нечеткий регулятор, MATLAB, Unity, КАМАЗ-65111.

Для цитирования: Чернышев Н.Н., Альфара А.Ю.А., Ниженец Т.В. Система автоматического управления движением транспортных средств в колонне. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1997> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.016

Automatic control system for vehicle platoon movement

N.N. Chernyshev✉, A.Y.A. Alfara, T.V. Nizhenec

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. This article presents the development of an automatic longitudinal motion control system for vehicle platoons based on fuzzy logic methods. The relevance of the study stems from the growing need for efficient and safe solutions for freight transportation automation. The scientific novelty of the work lies in the development and verification of a control system implementing the leader – follower principle with a specialized fuzzy controller rule base, adapted for heavy-duty truck control (exemplified by the KAMAZ-65111) and implemented in software within numerical and visual modeling environments. Unlike universal approaches, the proposed rule base formalizes expert driving strategies while accounting for the control object's high inertia. The leader – follower system was implemented and tested in two distinct environments: mathematical modeling in MATLAB/Simulink and interactive 3D

simulation in the Unity game engine. Comprehensive testing covered four driving scenarios: uniform motion, acceleration-braking, emergency braking, and off-road driving. Simulation results demonstrated high accuracy (distance root mean square error not exceeding 1.21 m) and safety (minimum distance exceeding 6.3 m in critical scenarios). The strong correlation of results between both platforms confirms the adequacy and robustness of the proposed model. The developed system demonstrates potential for use in autonomous vehicles and can be improved by implementing adaptive mechanisms for adjusting the fuzzy controller parameters. It is noted that the developed control system can be further improved through the use of hybrid neuro-fuzzy rules or the creation of intelligent traffic management systems.

Keywords: vehicle platoon, automatic control, leader – follower, fuzzy controller, MATLAB, Unity, KAMAZ-65111.

For citation: Chernyshev N.N., Alfara A.Y.A., Nizhenec T.V. Automatic control system for vehicle platoon movement. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1997> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.016

Введение

Стремительное развитие технологий беспилотного транспорта и увеличение объемов грузоперевозок определяют необходимость создания эффективных систем автоматического управления движением транспортных средств в колонне (платунинг). Данная технология позволяет группе автомобилей двигаться согласованно с минимальной, но безопасной дистанцией, что ведет к снижению расхода топлива за счет уменьшения аэродинамического сопротивления, повышению пропускной способности дорог и снижению нагрузки на водителя [1].

Актуальность разработки таких систем обусловлена рядом факторов [2, 3]: ростом интенсивности грузопотоков и необходимостью повышения эффективности использования дорожной инфраструктуры, стремлением к снижению расхода топлива и вредных выбросов в атмосферу, необходимостью повышения безопасности дорожного движения, тенденцией к снижению нагрузки на водителей грузовых автомобилей при длительных перевозках.

Системы управления колонной разрабатываются ведущими автопроизводителями (Volvo, Daimler, Scania), технологическими компаниями (Peloton Technology, Waymo) и научно-исследовательскими организациями в рамках крупных проектов, таких как SARTRE, KONVOI, COMPANION [4, 5]. Однако несмотря на значительный прогресс, остаются нерешенными вопросы разработки надежных и адаптивных алгоритмов управления, способных функционировать в условиях неопределенности дорожной обстановки.

Классические подходы к управлению, такие как ПИД-регуляторы и методы оптимального управления, широко изучены, но обладают рядом недостатков при использовании в системах автоматического управления движением транспортных средств в колонне, а именно: не являются робастными к значительным изменениям параметров системы (например, массы груза, коэффициента сцепления с дорогой и пр.) [6]; гарантируют удовлетворительное качество управления только для одного типа движения транспортного средства, для которого рассчитаны параметры регулятора на основе линеаризованной модели (например, движение по прямой с постоянной скоростью), но при маневрировании, смене полосы или резком торможении система может стать неустойчивой [7]; не учитываются физические ограничения системы (например, максимальный угол поворота колес, максимальное тормозное усилие) [8].

В качестве альтернативы выступают методы интеллектуального управления, в частности, нечеткая логика (Fuzzy Logic), предложенная Л. Заде. Нечеткое управление позволяет формализовать знания и опыт эксперта (в данном случае – опытного водителя) в виде набора лингвистических правил «ЕСЛИ ... ТО ...». Такой подход не требует точной

математической модели и способен эффективно работать в условиях неопределенности, что делает его перспективным для задач управления автомобильной колонной [9, 10].

Целью данной работы является разработка и исследование системы автоматического управления, решающей ключевую задачу поддержания безопасной и стабильной дистанции в колонне тяжелонагруженных грузовых автомобилей в различных дорожных сценариях с использованием методов нечеткой логики. Научная новизна исследования состоит заключается в разработке и верификации системы управления, на основе принципа «лидер – ведомый» и нечеткого регулятора со специфической базой правил, адаптированной для управления тяжелонагруженными грузовыми автомобилями (на примере КАМАЗ-65111) и подтверждении ее эффективности путем кроссплатформенного моделирования в MATLAB и Unity.

Материалы и методы

Математическая модель движения автомобиля в колонне может быть представлена уравнениями для продольного и поперечного движения. Так, например, продольное движение приближенно можно описать следующими уравнениями [6].

Уравнение движения:

$$m \frac{dv}{dt} = F_t - F_r - F_a - F_g - F_b, \quad (1)$$

где m – масса автомобиля; v – скорость автомобиля; F_t – сила тяги двигателя; F_r – сила сопротивления качению; F_a – сила аэродинамического сопротивления; F_g – составляющая силы тяжести при движении по уклону; F_b – тормозная сила.

Сила тяги двигателя:

$$F_t = \frac{T_e \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_w}, \quad (2)$$

где T_e – крутящий момент двигателя; i_g – передаточное число коробки передач; i_0 – передаточное число главной передачи; η_t – КПД трансмиссии; r_w – радиус колеса.

Сила сопротивления качению:

$$F_r = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

где f_r – коэффициент сопротивления качению; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона дороги.

Схема моделирования продольной динамики автомобиля приведена на Рисунке 1.

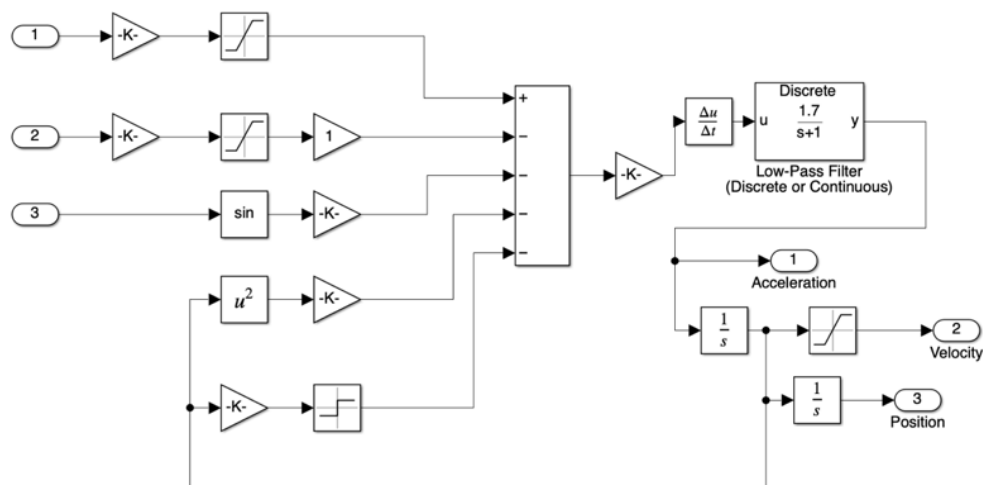


Рисунок 1 – Схема математической модели продольной динамики автомобиля
Figure 1 – The scheme of a mathematical model of the longitudinal dynamics of the car

Сила аэродинамического сопротивления:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха; C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления; A – лобовая площадь автомобиля.

Математическая основа нечеткого регулятора для управления дистанцией включает следующие этапы:

1. Фаззификация – преобразование четких входных величин в нечеткие множества:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1], \quad (5)$$

где $\mu_A(x)$ – функция принадлежности элемента x нечеткому множеству A .

2. База правил – совокупность правил вида «ЕСЛИ условие, ТО заключение»:

$$R_i: \text{Если } x = A_i \text{ И } y = B_i \text{ ТО } z = C_i. \quad (6)$$

3. Нечеткий вывод – процесс, в ходе которого система на основе нечетких входных данных и набора нечетких правил определяет нечеткие выходные значения. В автомобильных колоннах важна интерпретация правил управления движением с точки зрения эксперта (водителя) для обеспечения безопасности. Поэтому предлагается использовать метод Мамдани поскольку правила вида «ЕСЛИ ... ТО ...» легко адаптируются под реальные дорожные и водительские ситуации.

4. Дефаззификация – преобразование нечетких множеств в четкое значение методом центроида:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}, \quad (7)$$

где z_i – центр нечеткого множества C_i .

Входными переменными нечеткого регулятора дистанции являются ошибка регулирования дистанции e (разность между целевой и фактической дистанцией): $e = d_{target} - d_{current}$ (диапазон [10, 50] м) и относительная скорость Δv (разность скоростей между лидирующим и ведомым автомобилем): $\Delta v = v_{leader} - v_{follower}$ (диапазон [–20, 20] м/с).

Выходной переменной нечеткого регулятора дистанции является требуемое изменение скорости u – управляющее воздействие, представляющее собой требуемое ускорение/замедление в м/с² (диапазон [–6, 6] м/с²). Это значение затем преобразуется в команды для исполнительных механизмов (дрессельной заслонки и тормозной системы).

Лингвистические термы для переменных и их сокращения приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Лингвистические термы для переменных и их сокращения

Table 1 – Linguistic terms for variables and their abbreviations

Переменная	Термы и расшифровка
Ошибка дистанции (e)	NB (сильно отрицательная), NS (слабо отрицательная), Z (нулевая), PS (слабо положительная), PB (сильно положительная)
Относительная скорость (Δv)	NV (сильно отрицательная), N (отрицательная), Z (нулевая), P (положительная), PV (сильно положительная)
Изменение скорости (u)	NB (сильное торможение), NS (слабое торможение), Z (без изменений), PS (слабое ускорение), PB (сильное ускорение)

Для фаззификации входных переменных используются гауссовы функции принадлежности, как обеспечивающие хороший компромисс между эффективностью вычислений и гладкостью регулирования (Рисунок 2):

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

где c – центр функции, σ – параметр ширины.

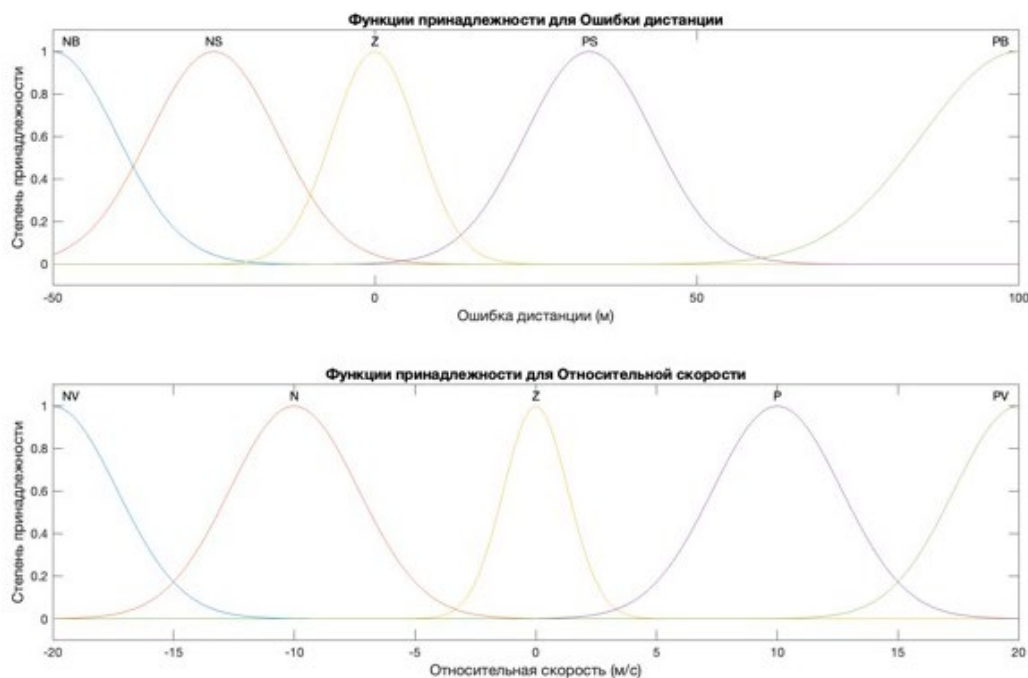


Рисунок 2 – Графики функций принадлежности для входных переменных (ошибка дистанции и относительная скорость)

Figure 2 – Graphs of membership functions for input variables (distance error and relative speed)

Ядром системы является база правил, формализующая опыт водителя. Она состоит из 25 правил вида «ЕСЛИ e есть A И Δv есть B , ТО u есть C ».

Таблица 2 – Фрагмент базы правил нечеткого регулятора

Table 2 – Fragment of the fuzzy controller rule base

$e/\Delta v$	$NV (-20)$	$N (-10)$	$Z (0)$	$P (10)$	$PV (20)$
NB (очень близко)	-1,0	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4
NS (близко)	-0,9	-0,7	-0,3	0,1	0,4
Z (оптимально)	-0,5	-0,2	0,0	0,3	0,6
PS (далеко)	0,0	0,4	0,7	0,9	1,0
PB (очень далеко)	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0

База правил, адаптированная для управления тяжелым грузовиком, представлена в Таблице 2. Значения в ячейках представляют собой нормированный выходной сигнал от -1,0 (максимальное торможение) до +1,0 (максимальное ускорение).

Например, правило в первой строке и первом столбце Таблицы 2 («ЕСЛИ дистанция очень большая И сближение очень быстрое, ТО применить максимальное торможение») отражает стратегию предотвращения столкновения путем резкого торможения.

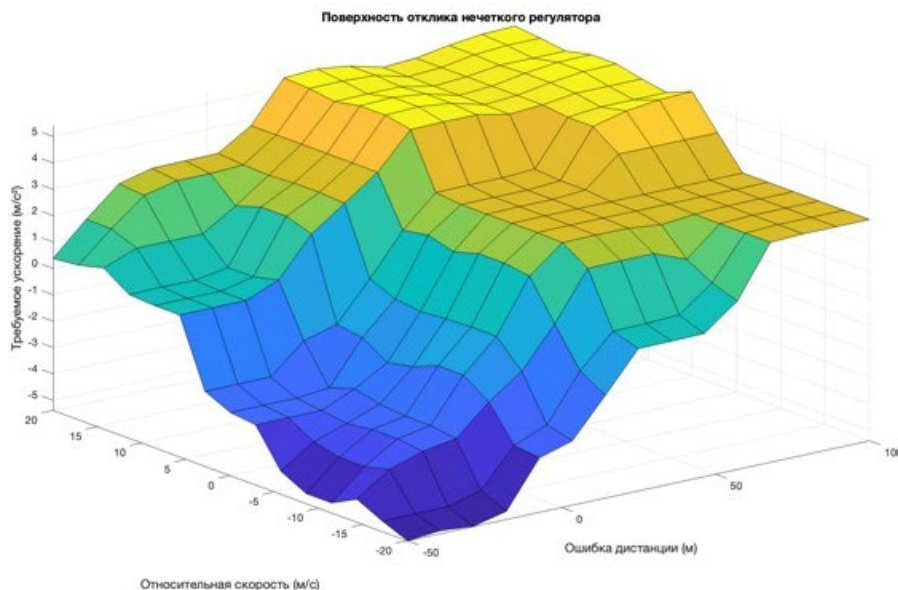


Рисунок 3 – Поверхность отклика нечеткого регулятора
Figure 3 – The response surface of the fuzzy controller

В работе предлагается использовать принцип «лидер – ведомый» организации движения в колонне. Первый автомобиль (лидер) управляется водителем или по заданной программе, остальные (ведомые) следуют за ним, поддерживая заданную дистанцию. Данный подход отличается простотой реализации и высокой надежностью, поскольку каждый ведомый автомобиль ориентируется только на непосредственно впереди идущее транспортное средство.

Для реализации системы автоматического управления движением в колонне в среде MATLAB и Unity разработана модульная архитектура, состоящая из следующих основных компонентов: управления отдельным транспортным средством, управления движением в колонне, компонентом реализации нечеткого регулятора (Рисунок 4).

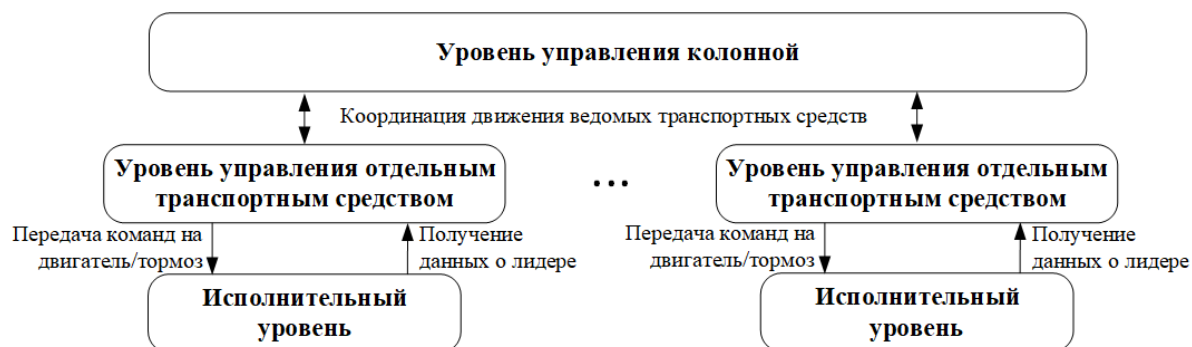


Рисунок 4 – Модульная структура системы автоматического управления движением транспортных средств в колонне
Figure 4 – Modular architecture of the automatic control system for vehicle platoon movement

Архитектура системы построена по модульному принципу и включает три основных уровня:

1. Уровень управления колонной отвечает за координацию движения группы транспортных средств. Реализует стратегию «лидер – ведомый», где каждый ведомый автомобиль получает данные только от непосредственно предшествующего

транспортного средства (Vehicle-to-Vehicle коммуникация). Основная задача — поддержание заданной дистанции и синхронизация скорости.

2. Уровень управления отдельным транспортным средством включает в свой состав нечеткий регулятор дистанции, принимающий на вход ошибку расстояния и относительную скорость, и выдающий требуемое ускорение, а также блок управления дроссельной заслонкой и тормозной системой транспортного средства на основе управляющего воздействия нечеткого регулятора.

3. Исполнительный уровень включает модели датчиков (расстояние, скорость лидера) и исполнительных механизмов (двигатель, тормоза), а также интерфейсы связи с внешней средой (в MATLAB – Simulink-блоки, в Unity – C#-скрипты и PhysX).

Взаимодействие между компонентами организовано по принципу слабой связанности с использованием событийной модели и интерфейсов. Такая архитектура обеспечивает четкое разделение задач между компонентами, дает возможность независимого тестирования каждого модуля, придает гибкость при модификации и расширении функциональности.

Для всесторонней верификации системы использовался двухплатформенный подход: MATLAB/Simulink: для разработки и верификации математических моделей, точной настройки параметров нечеткого регулятора; Unity: для создания интерактивной 3D-визуализации, симуляции с использованием реалистичного физического движка PhysX и проведения пользовательских тестов.

Результаты

Для комплексной проверки работоспособности разработанной системы автоматического управления движением в колонне созданы тестовые сценарии (Рисунки 5, 6, 7): равномерное движение колонны с постоянной скоростью, разгон и торможение при периодическом изменении скорости лидирующего автомобиля, экстренное торможение при резком торможении лидирующего автомобиля, табл движение по пересеченной местности с изменением угла наклона дороги.

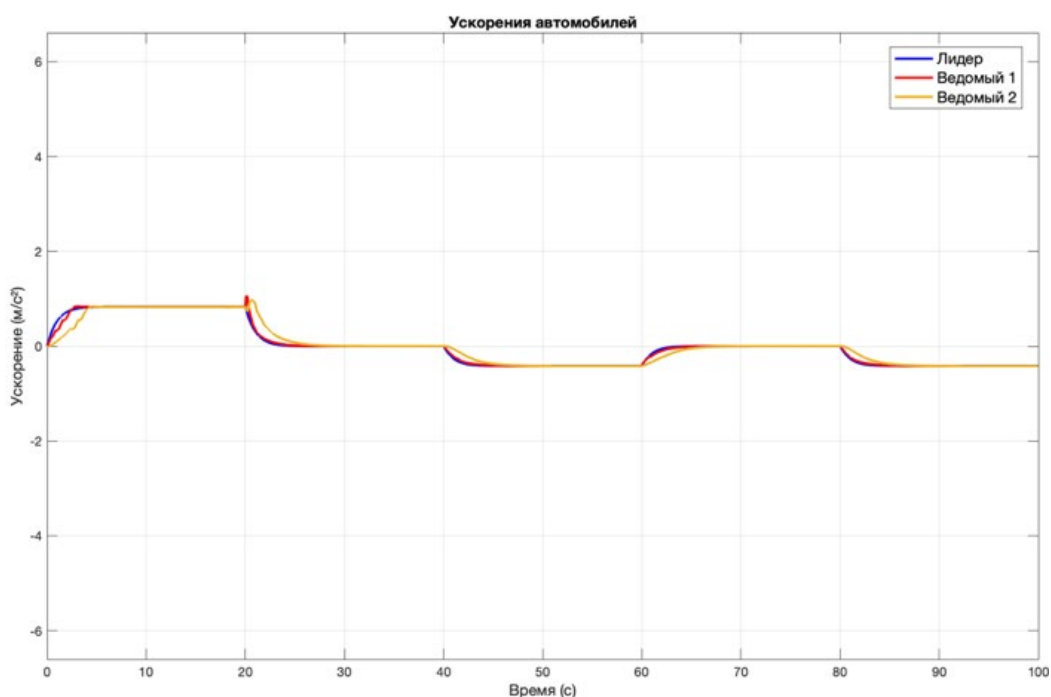


Рисунок 5 – Графики изменения ускорения автомобилей в колонне
Figure 5 – Graphs of changes in the acceleration of cars in a convoy

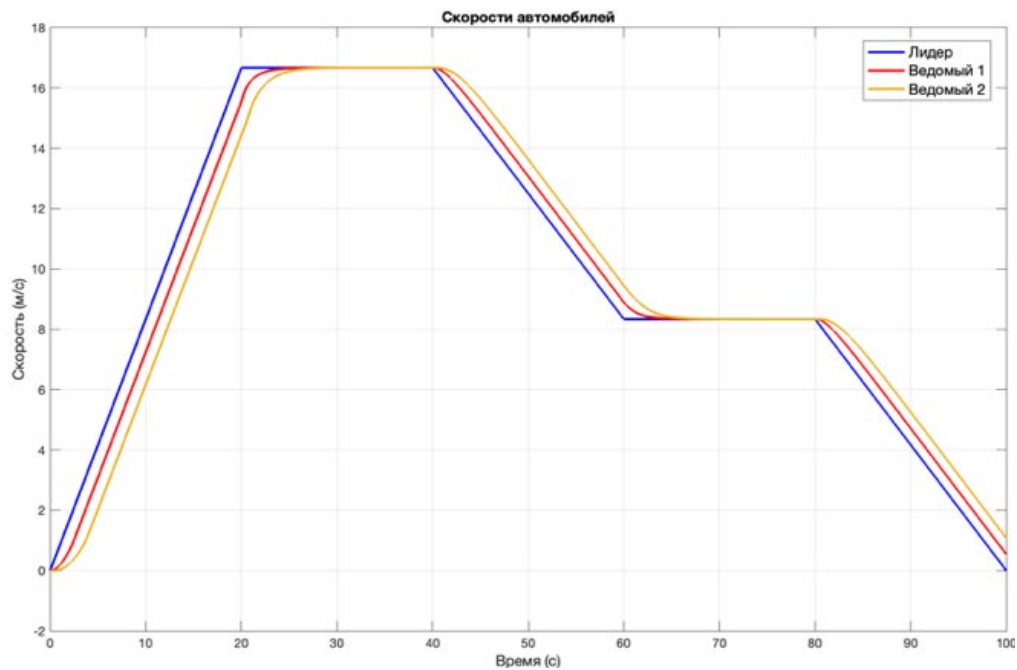


Рисунок 6 – Графики изменения скорости автомобилей в колонне
Figure 6 – Graphs of changes in the speed of cars in a convoy

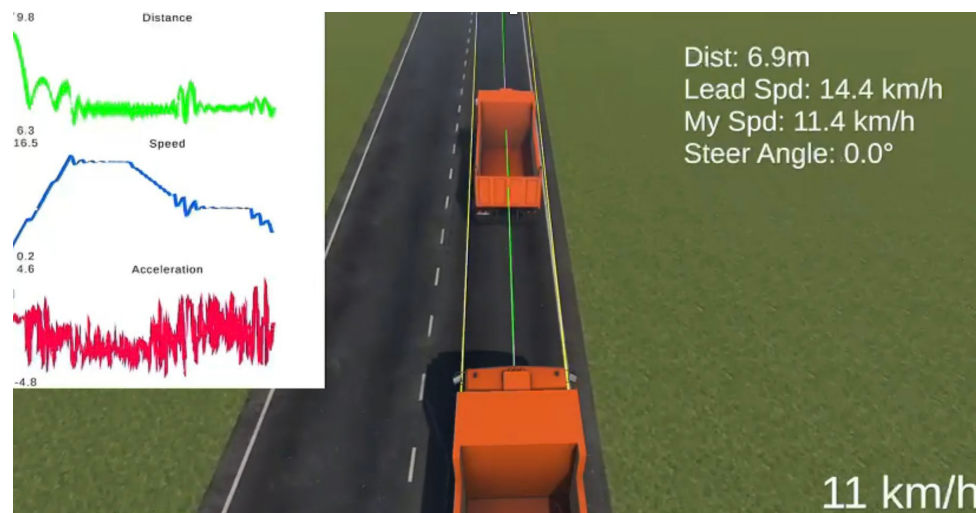


Рисунок 7 – Скриншот сцены Unity с колонной грузовых автомобилей
Figure 7 – Screenshot of the Unity scene with a convoy of trucks

Сравнение результатов моделирования в Unity с результатами, полученными в MATLAB/Simulink, показало близкие значения основных метрик (Таблица 3).

Таблица 3 – Сравнительная оценка результатов моделирования
Table 3 – Comparative evaluation of simulation results

Метрика	MATLAB	Unity
Минимальная дистанция (экстренное торможение), м	6,7	6,3
Максимальное ускорение (разгон и торможение), м/с ²	5,17	5,52
СКО ошибки дистанции, м	0,48	0,53
СКО ускорения, м/с ²	1,82	1,99

Наблюдаемые различия объясняются особенностями реализации нечеткого регулятора в C# по сравнению с Fuzzy Logic Toolbox. Общие характеристики поведения системы демонстрируют хорошее соответствие (отклонение 6–11 %), что подтверждает корректность переноса модели из MATLAB/Simulink в Unity.

Анализ полученных результатов подтверждает эффективность нечеткого регулятора для поддержания дистанции в колонне. Система демонстрирует хорошую устойчивость и безопасность в различных режимах движения:

1. Точность поддержания дистанции. Во всех тестах в MATLAB/Simulink среднеквадратичное отклонение не превышает 1,2 м, что значительно лучше технических требований ± 2 м.

2. Безопасность. В критических сценариях минимальная дистанция остается выше 6,5 м, что обеспечивает безопасность движения с достаточным запасом.

3. Синхронизация. Высокая корреляция профилей скорости (выше 0,97) подтверждает эффективность координации движения колонны.

4. Комфорт. Среднеквадратичные значения ускорений не превышают $2,5 \text{ м/с}^2$, что соответствует приемлемому уровню комфорта для грузовых перевозок.

Обсуждение

В рамках исследования разработана виртуальная модель системы управления колонным движением в среде Unity, включающая физическую модель грузового автомобиля с реалистичным поведением, контроллер колонны для управления дистанцией и рулением, и нечеткий регулятор для адаптивного управления дистанцией между автомобилями.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что реализованная модель продемонстрировала работоспособность системы в условиях, близких к реальным, с учетом физических эффектов и возмущений.

Стоит отметить, что дальнейшее совершенствование системы может быть достигнуто за счет использования адаптивных функций принадлежности и динамической корректировки правил нечеткого вывода, например, с помощью гибридных нейро-нечетких правил или создания интеллектуальных систем управления дорожным движением [11, 12].

Заключение

Проведенное исследование подтвердило возможность применения методов нечеткой логики для разработки системы управления дистанцией между транспортными средствами в колонне, обеспечивающей адаптивность к изменяющимся условиям движения. Предлагаемый подход отличается от традиционных решений на базе ПИД-регуляторов более высокой робастностью и отсутствием необходимости в точной математической модели объекта управления.

Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейших исследований в области применения методов интеллектуального управления движением транспортных средств в колонне. Разработанная система может найти применение в беспилотном транспорте при перевозке грузов, а также в образовательных целях в процессе подготовки специалистов по системам управления в технических системах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Хронусова Т.В., Асанов А.З., Назаренко М.А. Бортовые информационно-управляющие системы, обеспечивающие автоматизацию движения автомобилей в

- колонне на примере большегрузных автомобилей. *Кибернетика и программирование*. 2019;(2):30–43. <https://doi.org/10.25136/2306-4196.2019.2.21490>
- Khronusova T.V., Asanov A.Z., Nazarenko M.A. On-Board Information and Control Systems That Automate the Movement of Vehicles in a Column Using the Example of Heavy Vehicles. *Cybernetics and Programming*. 2019;(2):30–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.25136/2306-4196.2019.2.21490>
2. Solyom S., Idelchi A., Salamah B.B. Lateral Control of Vehicle Platoons. In: *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 13–16 October 2013, Manchester, UK*. IEEE; 2013. P. 4561–4565. <https://doi.org/10.1109/SMC.2013.776>
3. Чернышев Н.Н., Ниженец Т.В. Программная модель обработки сигналов с электронной напольной педали автомобиля. В сборнике: *Актуальные проблемы науки и техники: Материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 19–21 мая 2022 года, Саранул, Россия*. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; 2022. С. 472–476.
Chernyshev N.N., Nizhenets T.V. Software Model for Processing Signals from the Electronic Floor Pedal of a Car. In: *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu IMI – IzhGTU i 60-letiyu SPI (filial) FGBOU VO "IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova", 19–21 May 2022, Sarapul, Russia*. Izhevsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University; 2022. P. 472–476. (In Russ.).
4. Badnava S., Meskin N., Gastli A., et al. Platoon Transitional Maneuver Control System: A Review. *IEEE Access*. 2021;9:88327–88347. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089615>
5. Bayuwindra A., Lefeber E., Ploeg J., Nijmeijer H. Extended Look-Ahead Tracking Controller with Orientation-Error Observer for Vehicle Platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020;21(11):4808–4821. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2947348>
6. Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*. New York: Springer; 2012. 498 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
7. Lee T., Jeong Yo. A Tube-Based Model Predictive Control for Path Tracking of Autonomous Articulated Vehicle. *Actuators*. 2024;13(5). <https://doi.org/10.3390/act13050164>
8. Zhou Zh., Tao M., Qiu J., Zhang P., Xu M., Chen Ju. Autonomous Vehicle Path Tracking Using Event-Triggered MPC with Switching Model: Methodology and Real-World Validation. *IET Control Theory & Applications*. 2025;19(1). <https://doi.org/10.1049/cth2.70046>
9. Asanov A.Z., Demyanov D.N., Myshkina I.Yu. Comparative Analysis of Fuzzy Controllers in a Truck Cruise Control System. In: *Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems: Third International Scientific and Practical Conference, ITIDMS 2023, 12–14 December 2023, Moscow, Russia*. Cham: Springer; 2024. P. 68–79. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60318-1_6
10. Zhou H., Huang H., Zhang P., Shi H., Long K., Li X. Online Physical Enhanced Residual Learning for Connected Autonomous Vehicles Platoon Centralized Control. In: *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 02–05 June 2024, Jeju Island, Korea*. IEEE; 2024. P. 16–22. <https://doi.org/10.1109/IV55156.2024.10588534>
11. Zheng Ya., Wang Q., Cao D., Fidan B., Sun Ch. Distance-Based Formation Control for Multi-Lane Autonomous Vehicle Platoons. *IET Control Theory & Applications*. 2021;15(11):1506–1517. <https://doi.org/10.1049/cth2.12139>

12. Zhao Ju., Ma X., Yang W., Li H., Wang D. Platoon Intelligence: Edge Learning in Vehicle Platooning Networks. *Urban Lifeline*. 2025;3(1). <https://doi.org/10.1007/s44285-024-00035-y>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чернышев Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: chernyshev@mirea.ru

ORCID: [0000-0003-3057-9140](https://orcid.org/0000-0003-3057-9140)

Chernyshev Nikolay N., Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Альфара Адам Юсеф Али, студент, кафедра автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: alfara.a.y@edu.mirea.ru

Alfara Adam Yusef Ali, Student, Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Ниженец Татьяна Владимировна, аспирант, старший преподаватель кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: nizhenec@mirea.ru

ORCID: [0000-0001-6230-469X](https://orcid.org/0000-0001-6230-469X)

Nizhenets Tatyana Vladimirovna, Postgraduate, Senior Lecturer at the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian University of Technology, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 25.09.2025; принята к публикации 09.10.2025.

The article was submitted 23.06.2025; approved after reviewing 25.09.2025; accepted for publication 09.10.2025.