

# Развитие автомобильного интеллекта: новые направления развития ANFIS и гибридных мягких вычислений в автономных транспортных средствах

Эзе Чуквука Деннис

*Кафедра компьютерных наук  
и техники*

*Санкт-Петербургский  
государственный*

*электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

*им. В.И. Ульянова (Ленина)*

ezedennis9@gmail.com

Адейе Адебусола Ияну

*Кафедра компьютерных наук  
и техники*

*Санкт-Петербургский  
государственный*

*электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

*им. В.И. Ульянова (Ленина)*

adebusolayeye@gmail.com

Яна А. Бекенева

*Кафедра компьютерных наук  
и техники*

*Санкт-Петербургский  
государственный*

*электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

*им. В.И. Ульянова (Ленина)*

yabekeneva@etu.ru

Прешиоус Огенеоро

Отуазохор

*Кафедра компьютерных наук  
и техники*

*Санкт-Петербургский  
государственный*

*электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

*им. В.И. Ульянова (Ленина)*

potuazokhor@stud.etu.ru

**Аннотация.** Стремительная эволюция искусственного интеллекта (ИИ) в автомобильных системах требует постоянного совершенствования адаптивных нейронечетких систем вывода (ANFIS) и гибридных моделей мягких вычислений. По мере того, как автономные транспортные средства (AV) и усовершенствованные системы помощи водителю (ADAS) становятся все более сложными, интеграция чипсетов ИИ следующего поколения, улучшение объединения датчиков и улучшение принятия решений в реальном времени остаются критическими задачами. В этой статье рассматриваются будущие направления исследований и новые приложения ANFIS и связанных с ним гибридных моделей ИИ в автомобильных системах в соответствии с возникающими технологическими тенденциями до 2035 года. Ключевые области внимания включают оптимизацию оборудования ИИ, объяснимый ИИ (XAI) для соблюдения нормативных требований, энергоэффективное управление электромобилями (EV) и надежные отказоустойчивые архитектуры. Также подчеркиваются пробелы в исследованиях в области квантово-усовершенствованного нечеткого вывода, управляемой ИИ связи «транспортное средство со всем» (V2X) и оптимизации мобильности как услуги (MaaS). Результаты исследования предоставляют исследователям и представителям отрасли дорожную карту для продвижения приложений ИИ в автомобильных системах следующего поколения.

**Ключевые слова:** ANFIS, гибридный ИИ, автономные транспортные средства, слияние датчиков, объяснимый ИИ, квантовый ИИ, предиктивное обслуживание

## I. ВВЕДЕНИЕ

Автомобильная промышленность переживает преобразующий сдвиг с интеграцией искусственного интеллекта (ИИ), особенно в решения для автономного вождения, предиктивного обслуживания и интеллектуальной мобильности. Адаптивные нейронечеткие системы вывода (ANFIS) и гибридные нейронечеткие модели продемонстрировали значительный потенциал в управлении неопределенностью, улучшении принятия решений в реальном времени и улучшении адаптивности системы [1]. По мере того, как автономные транспортные средства продвигаются к уровням SAE 4–5, такие проблемы, как сверхнизкая задержка обработки ИИ, надежное слияние датчиков и энергоэффективные вычисления, становятся все более важными [2]. В этой статье определяются будущие направления исследований для применения моделей ANFIS и гибридного ИИ в автомобильных системах, с акцентом на новые тенденции, такие как чипсеты ИИ следующего поколения, квантовые вычисления и объяснимый ИИ. Эти направления организованы в категории: интеграция оборудования ИИ, восприятие и управление, предиктивное обслуживание, V2X-коммуникация и новые исследования в области квантового ИИ и отказоустойчивости.

## II. ANFIS И ГИБРИДНЫЕ МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В АВТОМОБИЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

### A. Обзор ANFIS

Адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS) – это гибридная интеллектуальная система, которая объединяет возможности обучения искусственных нейронных сетей (ANN) с качественным рассуждением систем нечеткого вывода (FIS) [3]. ANFIS обычно использует структуру нечеткого вывода типа Сугено, применяя алгоритмы обучения нейронных сетей, такие как обратное распространение и оценка наименьших квадратов для оптимизации параметров. Такое сочетание позволяет ANFIS моделировать сложные нелинейные взаимосвязи и обрабатывать неопределенность, что делает ее очень подходящей для задач управления и прогнозирования в динамических средах, таких как автономные транспортные средства. ANFIS состоит из нескольких слоев, которые сопоставляют четкие входные данные с четкими выходными данными посредством нечетких функций принадлежности и рассуждений на основе правил, с параметрами, адаптирующимися посредством обучения для интеграции экспертных знаний и оптимизации на основе данных [4].

### B. Гибридные подходы к мягким вычислениям

Гибридные мягкие вычисления сочетают в себе несколько интеллектуальных парадигм, таких как нейронные сети, нечеткая логика и эволюционные алгоритмы, для решения сложных задач реального мира [5]. В автомобильных системах гибридные подходы часто интегрируют ANFIS с метаэвристическими алгоритмами оптимизации (например, генетическими алгоритмами, оптимизацией роя частиц) для повышения производительности в управлении энергопотреблением, слиянии датчиков и управлении транспортным средством [6]. К основным преимуществам относятся адаптивность к изменяющимся условиям, надежность, эффективное моделирование нелинейных систем и возможность сочетания экспертных знаний с эмпирическими данными [7]. Эти характеристики позиционируют гибридные мягкие вычисления как краеугольную технологию для автономных транспортных средств и интеллектуальных транспортных систем следующего поколения.

## III. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### A. Применение ANFIS в автономных транспортных средствах

Недавние исследования подчеркивают эффективность ANFIS в автомобильных приложениях. В области управления энергопотреблением контроллеры на основе ANFIS оптимизируют распределение энергии в электрических и гибридных автономных автомобилях, превосходя традиционные подходы на основе нечеткой логики или нейронные сети, адаптируясь к условиям вождения в реальном времени [3]. В области управления транспортными средствами ANFIS успешно применяется для отслеживания траектории, контроля устойчивости и адаптивного круиз-контроля, обучаясь на основе данных для обеспечения надежной работы [1]. Кроме того, ANFIS обеспечивает безопасное и эффективное планирование пути в динамических условиях со статическими и динамическими препятствиями, что критически важно для автономной навигации [4]. Эти приложения подчеркивают

универсальность ANFIS в управлении сложными беспилотными системами.

### B. Гибридные мягкие вычисления в автомобильных системах

Гибридные мягкие вычисления набирают популярность в автомобильной отрасли. В оценке состояния и диагностике неисправностей сочетание нейронных сетей с нечеткой логикой и физическими моделями повышает надежность, что является жизненно важным фактором для безопасного автономного вождения [8]. Оптимизация систем питания электромобилей с использованием генетических алгоритмов, интегрированных с нечеткой логикой или ANFIS, позволяет устранить неопределенности в реальных сценариях, улучшая динамические и экономические показатели [6]. Более того, нейро-нечеткие контроллеры для гибридных силовых агрегатов автомобилей демонстрируют онлайн-адаптацию, отказоустойчивость и выполнение в режиме реального времени, предлагая масштабируемое решение для различных условий вождения [9]. Эти достижения иллюстрируют растущую зависимость гибридных моделей от требований современных автомобильных систем.

### C. Сравнительные исследования и пробелы в исследованиях

В литературе показано, что методы ANFIS и гибридных мягких вычислений, как правило, превосходят методы, основанные на одной парадигме, в управлении сложностью и неопределенностью автономных транспортных систем [2]. Заметной тенденцией является интеграция ANFIS с глубоким обучением и метаэвристической оптимизацией для решения задач расширенного восприятия, управления и управления энергопотреблением [7]. Тем не менее, сохраняются значительные пробелы в исследованиях, включая отсутствие стандартизированных протоколов тестирования для обеспечения согласованности между исследованиями, необходимость лучшей координации между управлением на основе ИИ и потоками данных в реальном времени, а также неисследованный потенциал нейро-нечетких моделей с квантовым усилением для автомобильного интеллекта следующего поколения [10]. Устранение этих пробелов может ускорить разработку более надежных и эффективных беспилотных технологий.

## IV. БУДУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### A. Интеграция ИИ нового поколения Чипсетов

Развивающееся аппаратное обеспечение ИИ, такое как квантовые ИИ-чипы, нейроморфные процессоры и 3D-системы на кристалле (SoC), открывает возможности для оптимизации моделей ANFIS для автомобильных приложений реального времени [11]. Исследования должны быть сосредоточены на совместной разработке аппаратного и программного обеспечения для адаптации архитектур ANFIS к ускорителям ИИ, что позволит использовать периферийные вычисления в транспортных средствах. Кроме того, оптимизация моделей нечеткого вывода для маломощных чипсетов может продлить срок службы аккумулятора электромобиля, обеспечивая при этом сверхнизкую задержку обработки данных для критически важных для безопасности функций ADAS [12].

## В. Объединение данных датчиков и восприятие с помощью ИИ

Слияние данных нескольких датчиков (лидар, радар, камеры, ультразвук) сталкивается с трудностями, связанными с шумом, окклюзией и изменчивостью окружающей среды. Фреймворки на основе ANFIS могут повысить надёжность, используя нечёткую логику для моделирования неопределённости и интегрируясь со сверточными нейронными сетями (CNN) и LSTM для извлечения пространственно-временных признаков [13]. Такой подход обещает улучшить восприятие в различных условиях вождения.

## С. Адаптивное и персонализированное управление автомобилем

Будущие беспилотные автомобили должны быть адаптивными к поведению водителя, дорожным условиям и состоянию транспортного средства. Исследования должны изучать мониторинг водителя в режиме реального времени с использованием обнаружения эмоций и усталости для корректировки стратегий управления, а также динамическую адаптацию управления на основе исторических и текущих данных [8]. Такая персонализация может повысить безопасность и комфорт.

## Д. Прогностическое обслуживание и диагностика неисправностей

Гибридные модели ANFIS могут улучшить предиктивное обслуживание, обеспечивая бортовую диагностику с непрерывным обучением на основе данных всего парка транспортных средств для раннего обнаружения неисправностей [10]. Использование чипсетов с искусственным интеллектом для диагностики в реальном времени снижает зависимость от облачных технологий, повышая эксплуатационную эффективность.

## Е. V2X-коммуникация на базе искусственного интеллекта

Кооперативное автономное вождение основано на безопасной коммуникации V2X. Алгоритмы на основе ANFIS могут оптимизировать транспортный поток и оценку опасностей, а нечёткие модели доверия повышают кибербезопасность в сетях связи [11]. Это направление способствует повышению безопасности и эффективности транспортных систем.

## Ф. Новые исследования и пробелы в исследованиях

- Гибридные модели квантового искусственного интеллекта и ANFIS: квантовые вычисления могут ускорить обучение и вывод ANFIS, улучшая принятие решений в динамических средах [10].
- Объяснимый ИИ (XAI) для автономного вождения: интерпретируемые нечёткие правила и проверяемые модели обеспечивают соблюдение нормативных требований и доверие потребителей [12].
- Энергоэффективный ИИ для электромобилей: ANFIS может оптимизировать управление аккумулятором и рекуперативным торможением [12].
- МaaS на базе искусственного интеллекта: динамическая маршрутизация парка транспортных средств и прогнозируемое

планирование технического обслуживания улучшают совместное использование автопарков беспилотных автомобилей [13].

ТАБЛИЦА I. ОБЗОР ТАБЛИЦЫ БУДУЩИХ НАПРАВЛЕНИЙ

| Область                                                         | Описание                                                                                                                                                   | Новизна/разрыв в исследованиях                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Интеграция чипсетов ИИ следующего поколения                     | Оптимизация моделей ANFIS для квантовых ИИ-чипов, нейроморфных процессоров и 3D-систем на кристалле для периферийных вычислений в реальном времени         | Совместная разработка аппаратного и программного обеспечения для сверхнизкой задержки и энергоэффективного ИИ |
| Слияние датчиков и восприятие с поддержкой ИИ                   | Фреймворки ANFIS для слияния данных нескольких датчиков (лидар, радар, камеры, ультразвук) с интеграцией глубокого обучения                                | Обработка шума, окклюзии и изменчивости окружающей среды с нечеткой неопределенностью                         |
| Адаптивное и персонализированное управление автомобилем         | Контроллеры ANFIS адаптируются к поведению водителя, дорожным условиям и состоянию транспортного средства с помощью мониторинга в режиме реального времени | Динамический контроль на основе обнаружения эмоций/усталости и исторических данных                            |
| Прогностическое обслуживание и диагностика неисправностей       | Гибридная система ANFIS для бортовой диагностики с непрерывным обучением по всему автопарку                                                                | Диагностика в реальном времени с использованием чипсетов ИИ для повышения точности                            |
| V2X-коммуникация на базе искусственного интеллекта              | Принятие решений на основе ANFIS для совместного вождения с нечеткими моделями доверия                                                                     | Оптимизация транспортных потоков и оценка опасностей с учетом кибербезопасности                               |
| Гибридные модели квантового ИИ и ANFIS                          | Слияние квантовых вычислений с ANFIS для более быстрого обучения и вывода                                                                                  | Квантовый нечеткий вывод для динамических сред                                                                |
| Объяснимый ИИ (XAI) для автономного вождения                    | Интерпретируемые модели ANFIS для прозрачного принятия решений                                                                                             | Соблюдение нормативных требований и доверие потребителей с помощью проверяемых моделей                        |
| Энергоэффективный ИИ для электромобилей                         | Оптимизация ANFIS для управления аккумулятором и рекуперативного торможения                                                                                | Интеграция маломощного ИИ-чипсета для продления срока службы батареи                                          |
| Мобильность как услуга на базе искусственного интеллекта (MaaS) | ANFIS для динамической маршрутизации автопарка и планирования предиктивного технического обслуживания                                                      | Адаптивное управление городским трафиком и предпочтениями пользователей в режиме реального времени            |

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие ANFIS и гибридных моделей ИИ, похоже, станет переломным моментом в будущем автомобильного интеллекта, особенно в преддверии массового появления беспилотных автомобилей и передовых систем помощи водителю (ADAS) на дорогах к 2035 году. Представьте себе: чипсеты ИИ следующего поколения, такие как квантовые и нейроморфные процессоры, могут кардинально изменить скорость и эффективность обработки информации этими системами, сделав их идеальными для критически

важных моментов безопасности. Улучшение взаимодействия датчиков с фреймворками ANFIS поможет автомобилям лучше справляться с неблагоприятными погодными условиями или перекрытым обзором, а персонализированные системы управления, адаптирующиеся к вашему настроению, состоянию дороги или состоянию автомобиля, сделают вождение более естественным и комфортным.

Вдобавок ко всему, интеллектуальные системы технического обслуживания, использующие обучение всего парка автомобилей, могут продлить срок службы автомобилей и сэкономить деньги за счет раннего выявления проблем. Развитие V2X-коммуникаций на базе ИИ позволит автомобилям объединяться на дороге, выравнивая движение и обеспечивая безопасность благодаря интеллектуальным проверкам доверия. Захватывающие новые области, такие как квантово-усовершенствованный ANFIS и объяснимый ИИ (XAI), ускорят процесс и укрепят доверие с помощью четких, понятных решений, на которые могут положиться регулирующие органы и водители. Для электромобилей (EV) энергосберегающий ИИ может продлить срок службы батареи, в то время как платформы «мобильность как услуга» (MaaS) могут сделать совместные поездки более интеллектуальными с помощью динамических маршрутов. А благодаря отказоустойчивым конструкциям автомобиля останутся в безопасности, даже если что-то пойдет не так.

Всё это требует командной работы исследователей, инженеров и представителей отрасли. Устранение таких пробелов, как интеграция квантового ИИ или установление стандартов испытаний, приблизит нас к будущему надёжных и экологических беспилотных автомобилей. К 2035 году эта дорожная карта может привести к созданию более безопасного, взаимосвязанного и готового к решению грядущих этических и практических задач транспортного рынка, сохраняя при этом человеческую ориентацию и надёжность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sheikhsamad, M., & Puig, V. (2024). Learning-Based Control of Autonomous Vehicles Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and the Linear Matrix Inequality Approach. *Sensors*, 24(8), 2551. DOI:10.3390/s24082551.
- [2] Awasthi, A., & Samieiyan, B. A Novel Anfis-Based Approach for Optimizing Energy Efficiency in Autonomous Vehicles. Available at SSRN 5239905.
- [3] Machavaram, R. (2025). Intelligent path planning for autonomous ground vehicles in dynamic environments utilizing adaptive Neuro-Fuzzy control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 144, 110119.
- [4] Stavrinidis, S., & Zacharia, P. (2024). An ANFIS-based strategy for autonomous robot collision-free navigation in dynamic environments. DOI: 10.20944/preprints202407.0439.v1.
- [5] Foroughi, B., Nhan, P. V., Iranmanesh, M., Ghobakhloo, M., Nilashi, M., & Yadegaridehkordi, E. (2023). Determinants of intention to use autonomous vehicles: Findings from PLS-SEM and ANFIS. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 70, 103158.
- [6] Hossain, M. N. (2024). Artificial Intelligence Revolutionising the Automotive Sector: A Comprehensive Review of Current Insights, Challenges, and Future Scope. *Challenges*, and Future Scope (December 02, 2024).
- [7] Arshad, M. W., & Lodi, S. (2025). Quantum computing in the automotive industry: survey, challenges, and perspectives. *The Journal of Supercomputing*, 81(10), 1-45.
- [8] Nwakanma, C. I., Ahakonye, L. A. C., Njoku, J. N., Odirichukwu, J. C., Okolie, S. A., Uzundu, C., ... & Kim, D. S. (2023). Explainable artificial intelligence (XAI) for intrusion detection and mitigation in intelligent connected vehicles: A review. *Applied Sciences*, 13(3), 1252.
- [9] Tahir, H. A., Alayed, W., Hassan, W. U., & Haider, A. (2024). A novel hybrid XAI solution for autonomous vehicles: Real-time interpretability through LIME-SHAP integration. *Sensors*, 24(21), 6776.
- [10] Al Shukairi, H., & Cardoso, R. C. (2023, May). ML-MAS: A hybrid AI framework for self-driving vehicles. In *AAMAS'23: Proceedings of the 2023 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (IFAAMAS).
- [11] Putranto, D. S. C., Wardhani, R. W., Ji, J., & Kim, H. (2024). A Deep Inside Quantum Technology Industry Trends and Future Implications. *IEEE Access*.
- [12] Bharadiya, J. P. (2023). Artificial intelligence in transportation systems a critical review. *American Journal of Computing and Engineering*, 6(1), 35-45.
- [13] Baliyan, A., Dhatteval, J. S., Kaswan, K. S., & Jain, V. (2022). Role of AI and IoT techniques in autonomous transport vehicles. In *AI enabled IoT for Electrification and connected transportation* (pp. 1-23). Singapore: Springer Nature Singapore.