



TECH SCIENCE

ISSN 3030-3702

**TEXNIKA FANLARINING
DOLZARB MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL
SCIENCES**



№ 4 (4) 2026

TECHSCIENCE.UZ

№ 4 (4)-2026

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES
OF TECHNICAL SCIENCES**

TOSHKENT-2026

BOSH MUHARRIR:

KARIMOV ULUG'BEK ORIFOVICH

TAHRIR HAY'ATI:

Usmankulov Alisher Kadirkulovich - Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax politexnika universiteti

Fayziyev Xomitxon – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Rashidov Yusuf Karimovich – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Adizov Bobirjon Zamirovich– Texnika fanlari doktori, professor, O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti;

Abdunazarov Jamshid Nurmuxamatovich - Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Umarov Shavkat Isomiddinovich – Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax davlat pedagogika universiteti;

Bozorov G'ayrat Rashidovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Maxmudov Muxtor Jamolovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Asatov Nurmuxammat Abdunazarovich – Texnika fanlari nomzodi, professor, Jizzax politexnika universiteti;

Mamayev G'ulom Ibroximovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Jizzax politexnika universiteti;

Ochilov Abduraxim Abdurasulovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Buxoro muhandislik-texnologiya instituti.

OAK Ro'yxati

Mazkur jurnal O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi Rayosatining 2025-yil 8-maydagi 370-son qarori bilan texnika fanlari bo'yicha ilmiy darajalar yuzasidan dissertatsiyalar asosiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA**FANLARINING DOLZARB**

MASALALARI elektron jurnali

15.09.2023-yilda 130343-sonli

guvohnoma bilan davlat ro'yxatidan o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.

Elektron manzil:

scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huquqlar himoyalangan.

© Scienceproblems team, 2026-yil

© Mualliflar jamoasi, 2026-yil

MUNDARIJA

<i>Atajonov Muzaffar</i> O'ZBEK TILIDA YASHIRILGAN SPAM XABARLARNI ANIQLASH UCHUN K O'P BOSQICHLI FILTR ALGORITMI	5-10
<i>Yakubov Maksadkhan, Shihnazarova Guzal</i> SUN'IY INTELLEKT ASOSIDA BOLALARDA ONKOLOGIK KASALLIKLARNI ERTA TASHXISLASH JARAYONINING AXBOROT MODELI	11-16
<i>Лазарев Амир, Шахобиддинов Алишер</i> УСТОЙЧИВОСТЬ VANET ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА: ОБЗОР АРХИТЕКТУР V2X, МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКОЙ	17-28
<i>Турениязова Асия, Сарсенбаева Хурлиха</i> PROTEINSYNC: МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ФРЕЙМВОРК ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ С АДАПТИВНОЙ ПЕРЕБАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ	29-34
<i>Babadjanov Elmurod, Maxamatdinov Abdul-Aziz, Gaipnazarova Lobar</i> SAVDO MARKAZLARIDA SHUBHALI SHAXSLARNI ANIQLASH TIZIMLARINING TAHLILI	35-41
<i>Daliyev Sherzod</i> G'OVAK MUHITDA SIZOT SUV SATNI DINAMIKASI VA TUZ MIGRATSIYASINING MATEMATIK MODELI	42-52
<i>Ережепов Кеулимжай, Исаков Искандер, Хиясов Ислам</i> АДАПТИВНОЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ ГАПТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ: НОВЫЙ ФРЕЙМВОРК ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ЗАДЕРЖКИ В РОБОТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕХИРУРГИИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВ LEO	53-63
<i>Турениязова Асия, Абилжанова Маншук</i> ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ И ИТ-УПРАВЛЕНИЯ	64-69
<i>Narkulov Akram, Erkinov Javoxir, Oqmirzayev Abbos</i> ELASTIKLIK NAZARIYASI VA DIFFERENSIAL TENGLAMALAR ASOSIDA TO'G'RI TO'RTBURCHAK PLASTINKA EGILISHINI ANSYS YORDAMIDA KOMPYUTERLI TAHLIL QILISH	70-77
<i>Rashidov Jakhongir, Zokirov Islomjon</i> SMART ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS TO IMPROVE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF THE DISTRIBUTION NETWORK: A COMPREHENSIVE REVIEW	78-94
<i>Xidirov Muso, Otamurodov G'ayrat, Zaxirov Bobomurod, Ravshanov Hamqroqul, Irgashev Dilmurod</i> PLUGLARNI AGREGATLASHNING NAZARIY ASOSLARI VA ULARNING ISH SAMARADORLIGIGA TA'SIRI	95-102

<i>Xodjaeva Zulfiya, Allaberganova Munira</i> PESHTOQ ELEMENTLARINING 3D MODELI: TARIXIY OBIDALAR MISOLIDA HISOB VA TAHLIL	103-108
<i>Shukurova Karomat, Tolipova Munira</i> METHODS OF STRENGTHENING BRICK WALLS WITH MODERN COMPOSITE MATERIALS	109-116

УСТОЙЧИВОСТЬ VANET ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА: ОБЗОР АРХИТЕКТУР V2X, МОДЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ И МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКОЙ

Лазарев Амир Пишембаевич

Ташкентский университет информационных технологий имени

Мухаммада ал-Хоразмий, ассистент

E-mail: amirlazarev@gmail.com

Шахобиддинов Алишер Шопатхиддинович

Ташкентский университет информационных технологий имени

Мухаммада ал-Хоразмий, начальник управления

E-mail: a.shakhobiddinov@tuit.uz

Аннотация. Vehicular Ad Hoc Networks (VANET) представляют собой специализированный класс мобильных самоорганизующихся сетей, ориентированных на поддержку интеллектуальных транспортных систем (ITS). Основное назначение VANET заключается в обеспечении надежной и минимально задержанной передачи критически важной информации, в частности сообщений безопасности типа Basic Safety Message (BSM), между транспортными средствами и элементами дорожной инфраструктуры. В данной работе выполнен систематизированный обзор архитектурных решений VANET, используемых коммуникационных стандартов, протоколов маршрутизации, вероятностных и стохастических моделей функционирования сети, а также методов повышения надежности передачи данных. Особое внимание уделено моделированию перегрузки радиоканала, анализу вероятности коллизий при доступе к среде и адаптивной оптимизации параметров MAC-уровня. Рассмотрены современные научные вызовы и перспективы развития VANET в контексте интеграции с сетями 5G/6G и распределёнными edge-вычислениями.

Ключевые слова: VANET, интеллектуальные транспортные системы, IEEE 802.11p, C-V2X, BSM, надежность передачи, оптимизация MAC, стохастическое моделирование, QoS.

STABILITY OF VANET UNDER HIGH TRAFFIC DENSITY: A REVIEW OF V2X ARCHITECTURES, RELIABILITY MODELS, AND CONGESTION CONTROL MECHANISMS

Lazarev Amir Pishembaevich

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi,

Assistant

Shakhobiddinov Alisher Shopatkiddinovich

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi,

Head of Department

Annotation. Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) represent a specialized class of mobile self-organizing networks designed to support Intelligent Transportation Systems (ITS). The primary purpose of VANETs is to ensure reliable and low-latency transmission of safety-critical information, particularly Basic Safety Messages (BSMs), between vehicles and roadside infrastructure elements. This paper presents a systematic review of VANET architectural solutions, communication standards, routing protocols, probabilistic and stochastic models of network operation, as well as methods for improving data transmission reliability. Special attention is given to radio channel congestion modeling, analysis of collision probability during medium access, and adaptive

optimization of MAC-layer parameters. Contemporary scientific challenges and future development prospects of VANETs are examined in the context of integration with 5G/6G networks and distributed edge computing.

Keywords: VANET, Intelligent Transportation Systems, IEEE 802.11p, C-V2X, Basic Safety Message (BSM), transmission reliability, MAC optimization, stochastic modeling, Quality of Service (QoS).

DOI: <https://doi.org/10.47390/ts-v4i4y2026N03>

Введение

Интенсивная цифровизация транспортной отрасли и переход к концепции кооперативных интеллектуальных транспортных систем (C-ITS) обусловили возрастание интереса к сетям межтранспортного взаимодействия Vehicular Ad Hoc Networks (VANET). В современных условиях вопросы безопасности дорожного движения и снижения аварийности приобретают глобальный характер: по оценкам международных организаций, дорожно-транспортные происшествия остаются одной из ведущих причин смертности и экономических потерь, что стимулирует внедрение коммуникационных технологий реального времени для предупреждения критических ситуаций [1]. В этой связи VANET рассматриваются как ключевой технологический компонент инфраструктуры V2X (Vehicle-to-Everything), обеспечивающий обмен сообщениями безопасности между транспортными средствами и объектами дорожной инфраструктуры [2].

Функционирование VANET характеризуется высокой динамикой топологии, нестационарностью трафика и строгими требованиями к задержке передачи сообщений. Передача Basic Safety Messages (BSM) и Cooperative Awareness Messages (CAM) требует латентности менее 100 мс и высокой вероятности доставки, что существенно отличает данные сети от традиционных MANET [3]. Однако увеличение плотности транспортного потока приводит к перегрузке радиоканала, росту вероятности коллизий и снижению показателя Packet Delivery Ratio (PDR), особенно в сценариях интенсивного городского движения [4]. Эти факторы формируют научную проблему обеспечения устойчивости сети при сохранении требуемых параметров качества обслуживания (QoS).

Развитие стандартов IEEE 802.11p (DSRC) и Cellular V2X (C-V2X), а также интеграция с инфраструктурой 5G/6G существенно расширили функциональные возможности V2X-коммуникаций [5]. Тем не менее исследования последних лет показывают, что ни одна из существующих технологий не обеспечивает универсального решения проблемы масштабируемости и адаптации к переменной нагрузке [6]. В частности, фиксированные параметры окна конкуренции и механизмы CSMA/CA демонстрируют снижение эффективности в условиях высокой плотности узлов, что требует разработки адаптивных алгоритмов управления доступом к среде и стохастических моделей прогнозирования нагрузки [7].

Дополнительную актуальность теме придают вопросы кибербезопасности и доверия в распределённой транспортной среде. Атаки типа Sybil, подмена сообщений и отказ в обслуживании способны привести к нарушению корректности принятия решений автономными системами, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к анализу архитектуры VANET [8].

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью системного анализа архитектурных решений, моделей функционирования и механизмов повышения надежности передачи сообщений безопасности в VANET с учетом современных требований к масштабируемости, устойчивости и интеграции с сетями нового поколения. Настоящая работа направлена на обобщение актуальных научных результатов и формирование целостного представления о текущем состоянии и перспективах развития технологий VANET.

Обзор литературы

Эволюция стандартов V2X. Развитие стандартов V2X-коммуникаций отражает последовательный переход от децентрализованных WLAN-решений к интегрированным сотовым архитектурам, ориентированным на поддержку кооперативного и автоматизированного вождения. Первоначально широкое распространение получил стандарт IEEE 802.11p (DSRC/ITS-G5), предназначенный для прямой V2V/V2I-коммуникации в диапазоне 5,9 ГГц. Данный стандарт базируется на механизме CSMA/CA и обеспечивает низкую задержку передачи при умеренной плотности трафика [9]. Однако многочисленные исследования показали, что при высокой плотности транспортных средств эффективность 802.11p снижается вследствие роста коллизий и перегрузки канала [10].

С целью преодоления ограничений 802.11p был разработан стандарт IEEE 802.11bd, ориентированный на обеспечение обратной совместимости и повышение устойчивости к замираниям и доплеровским эффектам. В 802.11bd реализованы усовершенствованные схемы модуляции, улучшенные механизмы кодирования и повышенная спектральная эффективность [11]. Исследования демонстрируют, что 802.11bd способен обеспечивать более стабильный Packet Reception Ratio (PRR) в условиях высокой мобильности по сравнению с предшествующей версией [12].

Параллельно с WLAN-направлением активно развивалась сотовая линия V2X, инициированная 3GPP. В рамках Release 14 была представлена LTE-V2X технология, включающая централизованный режим (Mode 3) и автономный распределённый режим (Mode 4) [13]. Последующие релизы 3GPP (Release 16 и далее) ввели NR-V2X - решение на базе 5G, обеспечивающее поддержку ultra-reliable low-latency communications (URLLC) и более гибкое распределение ресурсов в sidelink-канале [14].

Исследования последних лет показывают, что NR-V2X демонстрирует более высокую масштабируемость и устойчивость в сценариях высокой плотности транспорта по сравнению с LTE-V2X и 802.11p [15]. Вместе с тем сохраняются проблемы коэкзистенции различных технологий в одном частотном диапазоне, что может приводить к дополнительным интерференционным эффектам [16].

С точки зрения архитектурной эволюции можно выделить три этапа:

1. IEEE 802.11p (DSRC/ITS-G5) - полностью децентрализованная ad hoc архитектура;
2. LTE-V2X - гибридная модель с поддержкой централизованного управления;
3. 5G NR-V2X - интеграция с URLLC, edge-инфраструктурой и поддержкой автоматизированного вождения уровня L3-L5.

Современные публикации подчёркивают, что выбор технологии зависит от сценария применения: в условиях умеренной плотности и низкой инфраструктурной зависимости 802.11p остаётся конкурентоспособным, тогда как NR-V2X демонстрирует

преимущества в сценариях кооперативного восприятия и автоматизированного движения [17], [18].

Управление перегрузкой канала. Одной из ключевых проблем функционирования VANET является перегрузка общего радиоканала при высокой плотности транспортных средств. Периодическая генерация сообщений безопасности (BSM/CAM) с частотой до 10 Гц каждым узлом приводит к существенному увеличению нагрузки на среду передачи. В условиях интенсивного трафика наблюдается рост Channel Busy Ratio (CBR), увеличение вероятности коллизий и снижение Packet Delivery Ratio (PDR), что напрямую влияет на эффективность кооперативных приложений [19].

Формализация проблемы перегрузки. Пусть: N - число активных транспортных средств в зоне покрытия, λ - интенсивность генерации сообщений одним узлом, T - длительность передачи пакета, R - пропускная способность канала. Тогда суммарная нагрузка на канал может быть приближённо оценена как:

$$\rho = \frac{N\lambda T}{R} \quad (1)$$

При $\rho \rightarrow 1$ система переходит в состояние насыщения, где вероятность коллизии:

$$P_{\text{коллизия}} = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (2)$$

становится значительной величиной (здесь τ — вероятность передачи узла в произвольный слот).

В реальных сценариях перегрузка проявляется через показатель коэффициента занятости канала (CBR, Channel Busy Ratio):

$$CBR = \frac{T_{\text{занят}}}{T_{\text{общий}}} \quad (3)$$

Если $CBR > 0.6-0.7$, эффективность передачи сообщений безопасности существенно снижается [21].

Подходы к управлению перегрузкой. В литературе выделяют три основные группы методов DCC (Decentralized Congestion Control):

1. Адаптация частоты генерации сообщений, снижение частоты передачи BSM при росте CBR:

$$\lambda = \lambda_{\text{макс.}} * (1 - CBR) \quad (4)$$

Данный метод уменьшает нагрузку, но может привести к снижению информативности системы при резком сокращении интервала передачи [19];

2. Управление мощностью передачи, регулирование радиуса покрытия за счёт изменения мощности:

$$P_{tx} = f(CBR, d_{\text{безоп.}}) \quad (5)$$

Снижение мощности уменьшает зону интерференции и вероятность коллизий, однако может привести к ухудшению дальности обнаружения событий

3. Адаптация MAC-параметров, изменение размера окна конкуренции (CW, Contention Window):

$$CW = CW_{\text{min}} * (1 + a * CBR) \quad (6)$$

где a - коэффициент чувствительности алгоритма.

Увеличение CW снижает вероятность одновременной передачи, однако увеличивает задержку доступа к среде [24].

Управление перегрузкой в LTE-V2X и NR-V2X. В сотовых V2X-системах используется semi-persistent scheduling (SPS), при котором ресурсы резервируются на несколько

периодов. Однако при высокой плотности возможны конфликты выбора одинаковых ресурсов (resource collision) [13].

В NR-V2X внедрены:

- гибкая конфигурация sidelink-ресурсов;
- динамическое перераспределение ресурсов;
- HARQ с улучшенной повторной передачей.

Тем не менее исследования показывают, что при высокой плотности транспорта автономный режим распределения ресурсов остаётся чувствительным к ошибкам оценки занятости спектра [14].

Интеллектуальные методы управления перегрузкой. Современные исследования предлагают применение:

- машинного обучения для прогнозирования CBR;
- reinforcement learning для адаптации CW;
- стохастических моделей Марковских процессов для оценки состояния канала.

Такие подходы позволяют учитывать динамику транспортного потока и предсказывать приближение к состоянию насыщения [15,18].

Сравнительный анализ методов управления перегрузкой представлено в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительный анализ методов управления перегрузкой

Метод	Преимущества	Ограничения
Адаптация частоты	Быстро снижает нагрузку	Потеря информативности
Управление мощностью	Снижает интерференцию	Ограничение дальности
Адаптация CW	Уменьшает коллизии	Рост задержки
SPS (C-V2X)	Стабильность ресурса	Возможны конфликты
ML-подходы	Адаптивность	Высокая сложность

Перегрузка канала является нелинейной функцией плотности транспорта. Фиксированные параметры доступа не обеспечивают устойчивости. Децентрализованные алгоритмы DCC эффективны при умеренной плотности. Интеллектуальные адаптивные механизмы демонстрируют наибольший потенциал в условиях высокой динамики.

Моделирование надежности и задержки передачи сообщений в VANET

Надежность функционирования VANET определяется способностью сети обеспечивать доставку сообщений безопасности с заданной вероятностью и в пределах допустимой задержки. Ключевыми метриками являются:

- коэффициент доставки пакета (PDR);
- коэффициент приема пакетов (PRR);
- сквозная задержка (E2E Delay);
- вероятность коллизии;
- коэффициент загрузки канала (CBR).

Особенность VANET заключается в том, что эти параметры взаимосвязаны и зависят от плотности транспортного потока, интенсивности генерации сообщений и характеристик радиоканала.

Рассмотрим систему с N активными узлами, каждый из которых генерирует сообщения с интенсивностью λ .

При использовании CSMA/CA вероятность коллизии может быть выражена как (2). Средняя вероятность успешной передачи:

$$P_{\text{усп.}} = (1 - P_{\text{коллизия}}) * P_{\text{канал}} \quad (7)$$

где $P_{\text{канал}}$ - вероятность успешного прохождения радиоканала с учётом замираний.

В условиях высокой плотности транспорта наблюдается нелинейный рост $P_{\text{коллизия}}$, что подтверждается экспериментальными и имитационными исследованиями.

Для оценки задержки передачи часто применяется модель M/M/1 или M/G/1. Средняя задержка обслуживания (W):

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (8)$$

где μ - интенсивность обслуживания канала, λ - интенсивность поступления сообщений. При $\lambda \rightarrow \mu$ задержка стремится к бесконечности, что соответствует состоянию перегрузки. В более реалистичных моделях учитывается приоритетная обработка сообщений безопасности (M/M/1 с приоритетами), что позволяет снизить задержку критических пакетов [15].

Надежность передачи зависит не только от MAC-уровня, но и от условий радиораспространения. Используются модели:

- потеря сигнала на пути логарифмического расстояния;
- замирание Накагами- m ;
- замирание Рэлея.

Вероятность успешного приема определяется как:

$$P_{rx} = P(SINR > \gamma_{th}) \quad (9)$$

где $SINR$ - отношение сигнал/интерференция+шум, γ_{th} - порог декодирования. Современные исследования показывают, что влияние NLOS-сценариев существенно снижает PRR в городских условиях [12].

Комплексная вероятность успешной доставки сообщения может быть представлена как:

$$P_{\text{доставка}} = P_{\text{успех}} * P_{rx} * P_{\text{очередь}} \quad (10)$$

где $P_{\text{успех}}$ - отсутствие коллизии, P_{rx} - успешное прохождение канала, $P_{\text{очередь}}$ - отсутствие потерь в буфере.

Такой подход позволяет оценивать устойчивость сети как функцию плотности транспорта:

$$S(N) = f(P_{\text{доставка}}, W) \quad (10)$$

Оценка устойчивости сети представлена на рисунке 1.

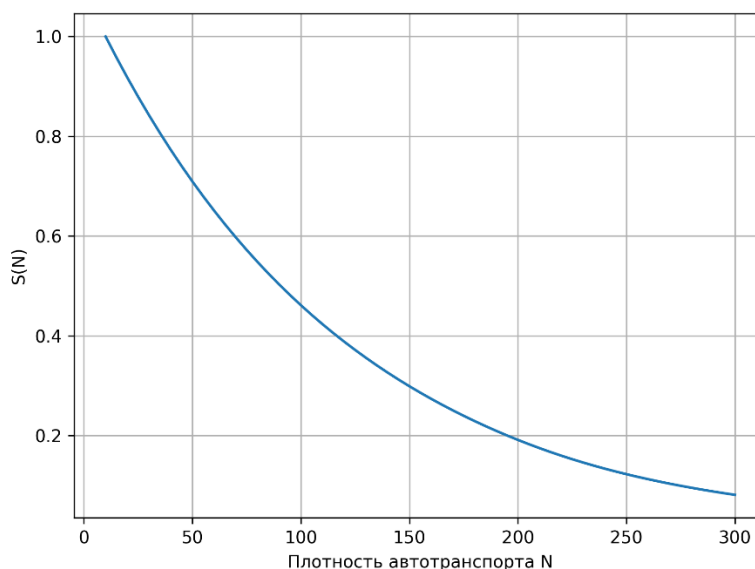


Рисунок 1. Зависимость нормированного показателя устойчивости сети $S(N)$ от плотности автотранспорта при передаче периодических сообщений безопасности (10 Гц, 350 байт, 6 Мбит/с, IEEE 802.11p).

Рисунок 1 демонстрирует монотонное и нелинейное снижение устойчивости сети при увеличении плотности автотранспорта. Это обусловлено ростом вероятности коллизий, увеличением CBR и замедлением процедуры доступа к среде. В диапазоне высокой плотности (условно > 180–200 узлов в зоне конкуренции) наблюдается ускоренное снижение $S(N)$, что свидетельствует о переходе сети в режим квазинасыщения. Полученная зависимость $S(N)$ подтверждает, что устойчивость сети IEEE 802.11p является функцией плотности транспортного потока и демонстрирует нелинейную деградацию при приближении к режиму насыщения канала. Это указывает на необходимость применения адаптивных механизмов управления доступом к среде и контроля перегрузки для обеспечения надежной передачи сообщений безопасности в условиях высокой плотности транспорта.

Сравнительный анализ технологий и выявление исследовательских пробелов

Развитие V2X-коммуникаций привело к сосуществованию нескольких технологических подходов, каждый из которых обладает специфическими преимуществами и ограничениями. Сравнение IEEE 802.11p, IEEE 802.11bd, LTE-V2X и NR-V2X позволяет выявить их применимость в различных сценариях плотности транспортного потока и требований к задержке.

IEEE 802.11p демонстрирует ограниченную масштабируемость из-за использования механизма CSMA/CA. При высокой плотности транспорта рост вероятности коллизий приводит к деградации PRR и увеличению CBR.

LTE-V2X и NR-V2X используют полустационарное распределение ресурсов, что обеспечивает более предсказуемое поведение при увеличении числа узлов. Однако автономный режим распределения ресурсов также подвержен конфликтам выбора одинаковых временно-частотных блоков.

NR-V2X обеспечивает более гибкую конфигурацию sidelink-ресурсов и поддержку URLLC, что повышает устойчивость при высоких нагрузках.

В контексте сообщений безопасности (BSM) надёжность трактуется как вероятность успешной доставки пакета в пределах допустимой временной задержки при заданных условиях плотности транспортного потока и радиосреды. Ниже на таблице 1.2 представлен сравнительный анализ технологий по надёжности передачи.

Таблица 1.2

Надёжность передачи

Технология	Устойчивость при высокой плотности	Задержка	Масштабируемость
802.11p	Низкая	Низкая при малой нагрузке	Ограниченная
802.11bd	Средняя	Улучшенная	Повышенная
LTE-V2X	Высокая	Средняя	Высокая
NR-V2X	Очень высокая	Низкая (URLLC)	Наивысшая

Анализ сравнительной таблицы надёжности передачи показывает, что эффективность V2X-технологий существенно зависит от плотности транспортного потока и применяемого механизма распределения ресурсов. IEEE 802.11p демонстрирует высокую надёжность в условиях разреженного трафика, однако характеризуется ограниченной масштабируемостью вследствие экспоненциального роста вероятности коллизий при увеличении числа узлов. Стандарт IEEE 802.11bd частично компенсирует данные ограничения за счёт улучшений на физическом уровне, повышая устойчивость к замираниям и мобильности. В свою очередь, LTE-V2X и особенно NR-V2X обеспечивают более стабильные показатели доставки пакетов благодаря механизмам полустационарного резервирования и гибкому управлению ресурсами, что снижает влияние случайных коллизий. Таким образом, при переходе от децентрализованных к гибридным и сотовым архитектурам наблюдается последовательный рост масштабируемости и устойчивости передачи, однако проблема перегрузки канала и корректной оценки занятости спектра сохраняет актуальность для всех рассматриваемых технологий.

Перегрузка канала в VANET представляет собой нелинейное явление, напрямую связанное с ростом плотности транспортного потока. Анализ существующих подходов показывает, что эффективность управления перегрузкой зависит от выбранной архитектуры (децентрализованной или сотовой) и механизма адаптации параметров передачи. Наиболее перспективными являются комбинированные и интеллектуальные методы, способные учитывать динамику трафика и обеспечивать баланс между надёжностью, задержкой и пропускной способностью.

Выявленные исследовательские пробелы

Проведённый анализ архитектурных решений, моделей функционирования и механизмов управления перегрузкой в VANET позволяет констатировать значительный прогресс в области V2X-коммуникаций. Вместе с тем, несмотря на развитие стандартов IEEE 802.11bd, LTE-V2X и NR-V2X, остаётся ряд нерешённых научных и прикладных проблем, требующих дальнейших исследований.

Большинство современных работ оценивают производительность VANET по отдельным параметрам PDR, PRR, задержке, CBR или вероятности коллизий. Однако

комплексная оценка устойчивости сети как интегральной характеристики, учитывающей одновременно надёжность, латентность и загрузку канала, представлена фрагментарно. Отсутствие унифицированной метрики затрудняет корректное сравнение различных технологий и алгоритмов управления перегрузкой, а также не позволяет формализовать критическую плотность транспорта, при которой система переходит в режим квазинасыщения.

Существующие стохастические модели функционирования VANET зачастую базируются на допущении насыщенного режима либо используют упрощённые вероятностные представления механизма CSMA/CA. Такие подходы не полностью отражают реальный характер периодической генерации сообщений безопасности и динамику транспортного потока. Кроме того, многие модели не учитывают пространственную корреляцию узлов, влияние скрытых терминалов и нелинейные эффекты заморозки процедуры ожидания. Это ограничивает применимость аналитических результатов в практических сценариях.

Несмотря на многочисленные эмпирические исследования деградации PDR при увеличении числа узлов, в литературе отсутствует строгая математическая формализация пороговой плотности, при которой сеть теряет устойчивость. Определение такого порога является важной задачей для проектирования транспортной инфраструктуры и выбора технологии V2X в зависимости от сценария движения (город, автомагистраль, перекрёсток).

Децентрализованные механизмы управления перегрузкой (DCC) в IEEE 802.11p в основном основаны на локальной оценке CBR и статических пороговых значениях. При резких изменениях плотности транспорта или внезапных событиях (авария, образование затора) такие алгоритмы могут реагировать с запаздыванием. Кроме того, комбинированное влияние адаптации частоты, мощности и CW-параметров остаётся недостаточно исследованным в рамках единой системной модели.

Совместная работа IEEE 802.11p, LTE-V2X и NR-V2X в одном частотном диапазоне 5,9 ГГц остаётся открытой проблемой. Вопросы взаимной интерференции, справедливого распределения ресурсов и обеспечения совместимости протоколов требуют дальнейшего теоретического и экспериментального анализа. Отсутствие единых механизмов координации может приводить к дополнительной деградации надёжности передачи.

Многие аналитические работы рассматривают упрощённые модели радиораспространения, игнорируя влияние NLOS-сценариев, затенения зданиями и сложной городской морфологии. Между тем эмпирические данные показывают существенное снижение PRR в условиях плотной застройки. Интеграция реалистичных моделей канала в стохастические и системные исследования остаётся актуальной задачей.

Хотя NR-V2X обеспечивает поддержку URLLC и edge-инфраструктуры, остаются нерешёнными вопросы распределения вычислительной нагрузки между транспортными средствами и граничными узлами, а также оптимизации маршрутизации данных в гибридных архитектурах. Взаимосвязь между устойчивостью радиодоступа и вычислительной задержкой на edge-узлах требует комплексного анализа.

Методы машинного обучения и reinforcement learning демонстрируют потенциал в задачах адаптивного управления ресурсами, однако их практическое внедрение осложняется вычислительными ограничениями бортовых устройств и необходимостью сбора достоверных обучающих данных. Кроме того, отсутствуют стандартизированные методики оценки эффективности таких алгоритмов в реальных транспортных сценариях.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в развитии стандартов V2X и механизмов управления перегрузкой, остаётся ряд фундаментальных проблем, связанных с формализацией устойчивости, масштабируемостью при высокой плотности транспорта, коэкзистенцией технологий и интеграцией с сетями нового поколения. Выявленные исследовательские пробелы формируют актуальную повестку дальнейших научных исследований и определяют направления совершенствования архитектур VANET в условиях растущих требований к надёжности и задержке передачи сообщений безопасности.

Направления дальнейших исследований

На основе проведённого анализа можно выделить следующие приоритетные направления дальнейших исследований:

- разработка унифицированной метрики устойчивости, объединяющей показатели PRR/PDR, задержки, вероятности коллизий и CBR в рамках единой интегральной модели;
- формализация критической плотности транспорта, при которой сеть переходит в режим квазинасыщения и наблюдается резкая деградация надёжности передачи;
- создание гибридных механизмов управления перегрузкой, сочетающих адаптацию частоты передачи, мощности сигнала и параметров MAC-уровня;
- интеграция стохастических моделей с реалистичными моделями радиораспространения, включая учёт NLOS-сценариев и городской морфологии;
- исследование коэкзистенции технологий V2X (802.11p/802.11bd/LTE-V2X/NR-V2X) в общем частотном диапазоне;
- интеграция VANET с edge- и 6G-инфраструктурой, включая оптимизацию распределения вычислительных ресурсов;
- применение методов искусственного интеллекта для прогнозирования перегрузки и динамической адаптации параметров доступа к среде;
- комплексная валидация аналитических моделей посредством имитационного и экспериментального тестирования.

Перспективы развития VANET связаны с переходом от изолированного анализа отдельных параметров к комплексному системному подходу, учитывающему взаимодействие MAC-, РНУ- и сетевых уровней, динамику транспортного потока и возможности сетей нового поколения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку унифицированных моделей устойчивости, гибридных механизмов управления перегрузкой и интеграцию V2X-коммуникаций с интеллектуальной вычислительной инфраструктурой, что позволит обеспечить надёжную передачу сообщений безопасности в условиях высокой плотности транспорта и растущих требований к задержке.

Заключение

В настоящей работе выполнен систематизированный анализ архитектурных решений, коммуникационных стандартов и механизмов обеспечения надёжности передачи сообщений безопасности в сетях VANET. Рассмотрена эволюция технологий V2X от децентрализованной архитектуры IEEE 802.11p к гибридным и сотовым решениям LTE-V2X и NR-V2X, что позволило выявить закономерности повышения масштабируемости и устойчивости при переходе к более интегрированным системам радиодоступа.

Проведённый обзор показал, что ключевым фактором деградации производительности в условиях высокой плотности транспортного потока является перегрузка канала, проявляющаяся через рост вероятности коллизий, увеличение коэффициента занятости канала и нелинейное снижение коэффициента доставки пакетов. Аналитическое рассмотрение зависимости устойчивости сети от плотности автотранспорта подтвердило существование переходного режима, в котором система приближается к состоянию квазинасыщения. Полученные результаты демонстрируют, что фиксированные параметры доступа к среде в IEEE 802.11p не обеспечивают устойчивую работу при высоких нагрузках без применения адаптивных механизмов управления.

Сравнительный анализ технологий показал, что IEEE 802.11bd частично компенсирует ограничения предшествующей версии за счёт улучшений на физическом уровне, тогда как LTE-V2X и NR-V2X обеспечивают более высокую предсказуемость распределения ресурсов и повышенную устойчивость в условиях плотного трафика. Вместе с тем ни одна из существующих технологий не устраняет полностью проблему перегрузки, особенно в сценариях экстремальной плотности и сложной радиосреды.

Выявленные исследовательские пробелы указывают на необходимость разработки унифицированной интегральной метрики устойчивости, формализации критической плотности транспортного потока и создания гибридных адаптивных механизмов управления перегрузкой. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией стохастических моделей, реалистичных моделей радиораспространения и интеллектуальных алгоритмов прогнозирования нагрузки, а также с комплексной валидацией аналитических результатов в имитационных и экспериментальных сценариях.

Устойчивость VANET является многопараметрической характеристикой, определяемой взаимодействием MAC- и PHY-механизмов, динамики транспортного потока и архитектурных особенностей выбранной технологии V2X. Комплексный системный подход к анализу и управлению перегрузкой является необходимым условием обеспечения надёжной передачи сообщений безопасности в условиях цифровизации транспортной инфраструктуры и перехода к сетям нового поколения.

Adabiyotlar/Literatura/References:

1. World Health Organization, Global status report on road safety 2023 (2023).
2. H. Hartenstein and K. P. Laberteaux, IEEE Communications Magazine 46, 164 (2008).
3. K. Abboud, H. A. Omar, and W. Zhuang, IEEE Transactions on Vehicular Technology 65, 9457 (2016).
4. J. V. Kenney, Proceedings of the IEEE 99, 1162 (2011).

5. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Study on LTE-based V2X Services, Tech. Rep. TR 36.885 (3GPP, 2016).
6. 3GPP, Study on NR Vehicle-to-Everything (V2X), Tech. Rep. TR 38.885 (3rd Generation Partnership Project, 2020).
7. A. Triwinarko, I. Dayoub, and S. Cherkaoui, *Vehicular Communications* 32, 100385 (2021).
8. S. Xue, S. Gong, and X. Li, *Applied Sciences* 14 (2024).
9. Z. Ali, S. Lag'en, L. Giupponi, and R. Rouil, *Sensors* 21 (2021).
10. A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella, and I. Thibault, *Vehicular Communications* 38 (2023).
11. T. Chatterjee, R. Karmakar, G. Kaddoum, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, *IEEE Access* 10 (2022).
12. A. Nair and S. Tanwar, *ICT Express* 10 (2024).
13. A. Balador, E. Cinque, M. Pratesi, F. Valentini, C. Bai, A. A. G'omez, and M. Mohammadi, *Vehicular Communications* 33, 100394 (2022).
14. L. K. Ouladdjedid, C. T. Calafate, C. A. Kerrache, and Y. Guellouma, *Electronics* 12 (2023).
15. B. McCarthy and A. O'Driscoll, in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)* (2021).
16. L. A. Pishembayevich and A. N. Murodovich, "AMHRAVS: Advanced Multi-Hop Retransmission Algorithm for Vehicle Safety in Intelligent Transport System," 2025 Optical Communication, Photonics, Telecommunications, and Intelligent Machine Applications (OPTIMA), Tashkent, Uzbekistan, 2025, pp. 213-222, doi: 10.1109/OPTIMA67660.2025.11380332.
17. A. N. Murodovich, L. A. Pishembayevich, U. A. A. Uli', B. U. Baxshulloyevich and Z. B. B. O'g'Li, "Throughput Analysis of Wireless Networks in High Sensor Density Environments," 2025 Optical Communication, Photonics, Telecommunications, and Intelligent Machine Applications (OPTIMA), Tashkent, Uzbekistan, 2025, pp. 278-284, doi: 10.1109/OPTIMA67660.2025.11380342.
18. Ernazar N Reypnazarov, Amir P Lazarev, Abduvali M Khidirov, Gozzal B Eshniyazova, Blockchain-enabled framework for secure and transparent allocation of network resources. *Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025)*. SPIE, 2025, Bukhara, Uzbekistan. 13803. 258-266 p. <https://doi.org/10.1117/12.3077875>
19. R. Djurayev, S. Djabbarov, D. Matkurbonov, A. Lazarev and O. Khasanov, "Increasing the efficiency of network resources in ip networks based on fuzzy sets," 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICISCT52966.2021.9670099.

TECHSCIENCE.UZ

TEXNIKA FANLARINING DOLZARB MASALALARI

№ 4 (4)-2026

TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda 130346-
sonli guvohnoma bilan davlat ro'yxatidan
o'tkazilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM"
mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.

Elektron manzil:

scienceproblems.uz@gmail.com