

УДК 004.89:004.75:656.021.8

КЛАССИФИКАЦИЯ УРОВНЕЙ ПОДКЛЮЧЕННОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ И КОММУНИКАЦИОННЫХ ПАТТЕРНОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

А. В. Белов

ГУП «Московский метрополитен»

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Аннотация. В статье предлагается классификация уровней подключенности транспортных средств, ориентированная на задачи управления дорожным движением. Классификация включает 6 уровней (0–5) с подуровнями (а и б) и основана на комбинации двух ключевых измерений: адресности и режима участия в управлении. Предложенная градация уровней подключенности эквивалентна этапам эволюции коммуникационных архитектур распределенных вычислительных систем — от широковещания к полной оркестрации агентов. Такое соответствие позволяет переносить результаты из области распределенных систем (масштабируемость, отказоустойчивость, согласованность) на задачи проектирования архитектур систем управления транспортными потоками. Методологический выбор линейного подхода с фасетным подкреплением обоснован через систематическое сравнение четырех подходов к классификации по пяти критериям качества.

Ключевые слова: подключенные транспортные средства, классификация, мультиагентные системы, распределенные системы, коммуникационные паттерны, управление дорожным движением, V2X.

UDC 004.89:004.75:656.021.8

CLASSIFICATION OF VEHICLE CONNECTIVITY LEVELS BASED ON AGENT INTERACTION MODELS AND COMMUNICATION PATTERNS OF DISTRIBUTED SYSTEMS

A. V. Belov

SUE Moscow Metro

HSE University MIEM

Abstract. This article proposes a classification of vehicle connectivity levels oriented towards traffic management tasks. The classification comprises 6 levels (0–5) with sub-levels (a and b) and is based on a combination of two key dimensions: addressability and mode of participation in management. The proposed connectivity level gradation is equivalent to the stages of evolution of communication architectures in distributed computing systems — from broadcasting to full agent orchestration. This correspondence enables the transfer of results from the field of distributed systems (scalability, fault tolerance, consistency) to the design of traffic flow management system architectures. The methodological choice of a linear approach with faceted reinforcement is justified through a systematic comparison of four classification approaches across five quality criteria.

Keywords: connected vehicles, classification, multi-agent systems, distributed systems, communication patterns, traffic management, V2X.

Введение

Стандарт SAE J3016 [1] предоставил транспортной отрасли общепринятую классификацию уровней автоматизации вождения, которая стала универсальным языком для индустрии, регуляторов и исследователей. Однако аналогичной общепринятой классификации для подключенности транспортных средств (ТС) не существует, несмотря на то что именно подключенность определяет возможности координации транспортного потока и, как следствие, системную эффективность функционирования улично-дорожной сети (УДС).

Имеющиеся классификации рассматривают подключенность, как правило, через призмы, лишь косвенно затрагивающие задачи управления движением: Privacy4Cars [2] — с позиций типов передаваемой информации и защиты персональных данных, McKinsey C3X [3] — с позиции пользовательского опыта. Обзоры стандартов V2X-коммуникаций [4] типизируют каналы связи (V2V, V2I, V2N и пр.), но не функциональные возможности участия ТС в координированном управлении. Попытка построить единую онтологию подключенного автомобиля [5] также не привела к созданию классификации, ориентированной на управление потоками.

Вместе с тем, если рассматривать ТС как автономного агента в распределенной системе

управления дорожным движением, то задача классификации уровней подключенности естественно ложится в область информатики: она сводится к определению моделей взаимодействия агента с управляющей системой и другими агентами. Взгляд с этой точки зрения позволяет опереться на обширный корпус знаний о коммуникационных паттернах распределенных систем [6], архитектурах мультиагентных систем [7, 8] и формальных моделях координации [9].

Ранее автором был предложен подход «управления формированием транспортных потоков» (УФТП) [10, 11] как совокупность управляющих воздействий на отдельные ТС с целью минимизации издержек конкурентного использования дорожной сети. Данный подход предполагает градацию от простого информирования водителей к оркестрации траекторий движения, что непосредственно связано с уровнем подключенности.

Целью настоящей работы является разработка формально обоснованной классификации уровней транспортной подключенности, основанной на моделях взаимодействия агентов, и демонстрация ее изоморфизма (структурного сходства) с эволюцией коммуникационных паттернов распределенных вычислительных систем.

Обзор литературы

Классификации подключенности транспортных средств

Систематический анализ литературы выявил несколько подходов к классификации подключенности ТС. Первый подход, ориентированный на данные, представлен классификацией Privacy4Cars [2], которая определяет пять уровней в зависимости от объема собираемых и передаваемых персональных данных. Второй, ориентированный на пользователя, реализован в модели McKinsey C3X [3], описывающей четыре уровня качества цифрового опыта водителя. Третий ориентирован на каналы связи и представлен в обзорах стандартов V2X [4], типизирующих физические каналы (V2V, V2I, V2N, V2C и др.). В европейских странах получил развитие подход, при котором уровни присваиваются не автомобилю, а участкам дорожной сети — шкала ISAD (Infrastructure Support levels for Automated Driving). Уровни ISAD описывают, какую инфраструктурную поддержку может ожидать автоматизированное транспортное средство на данном участке, и в перспективе могут быть расширены

для охвата функций управления трафиком и кооперативных маневров. Таким образом, ни один из этих подходов не отвечает на вопрос: какие управляющие воздействия возможны при данном уровне подключенности, какой уровень координации между ТС и системой управления достигим.

Коммуникационные паттерны распределенных систем

В теории распределенных вычислительных систем сложилась устоявшаяся типология коммуникационных паттернов [6]. Широковещание («broadcast») обеспечивает однонаправленную доставку сообщений неопределенному кругу получателей. Архитектура «клиент–сервер» реализует запрос-ответное взаимодействие с идентификацией клиента. Паттерн «издатель–подписчик» («publish-subscribe») [12] обеспечивает асинхронную доставку сообщений без прямой связи между источником и потребителем. Одноранговые сети (P2P) с координатором сочетают прямое взаимодействие между узлами с централизованной функцией согласования. Наконец, паттерн оркестрации

предполагает централизованное управление поведением узлов, где координатор назначает задачи и контролирует исполнение, подобно тому, как системы оркестрации контейнеров управляют жизненным циклом вычислительных единиц [6].

Такая градация от ширококовечания к оркестрации отражает нарастание степени координации, требований к идентификации узлов и гарантий доставки. Как будет показано далее, аналогичную градацию можно выстроить в отношении подключенности ТС.

Мультиагентные системы и координация

Мультиагентная система (МАС)— это распределенная вычислительная система, состоящая из автономных агентов, взаимодействующих для достижения индивидуальных или общих целей [7]. В контексте управления дорожным движением каждое ТС может рассматриваться как агент, а система управления — как координатор или оркестратор. Как отмечается в [8], ключевым свойством МАС является модель координации: от полностью децентрализованной (каждый агент действует автономно) до централизованно управляемой (координатор определяет действия каждого агента). В [9] выделяется спектр форм координации — от информационной (обмен данными) через консультативную (рекомендации)

к директивной (управляющие команды). Именно такую градацию форм координации между агентом (ТС) и координатором (системой управления) представляется целесообразным положить в основу предлагаемой классификации.

Подключенность и эффективность управления движением

Исследования последних лет убедительно подтверждают значимость даже минимальной подключенности. В работе [13] показано, что GPS-данные от 6–10% автомобилей позволяют оптимизировать светофорные циклы и снизить число остановок на 20–30%. В [14] значительные улучшения наблюдались при 5–10% проникновении подключенных ТС на магистралях. Теоретический анализ [15, 16] показывает, что полная координация (системно-оптимальное распределение по Уордропу [17]) может снизить суммарные задержки в 2–3 раза по сравнению с «эгоистическим» распределением. При этом технологии полного V2X (DSRC, C–V2X) требуют значительных инвестиций в дорожную инфраструктуру [19, 20]. Значительность эффекта от минимальной подключенности и сложность повсеместного внедрения V2X повышают актуальность задачи классификации уровней подключенности как инструмента оценки и обоснования мероприятий по повышению уровня координации.

Методология построения классификации

Анализ подходов к классификации

При разработке классификации необходимо выбрать подход, обеспечивающий достаточную научную строгость и высокую практическую

применимость. Следуя методологии построения таксономий (иерархических классификаций) в программной инженерии [18], рассматриваются четыре подхода (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение подходов к классификации

№ п/п	Подход	Принцип	Достоинства	Ограничения
1	2	3	4	5
1	Иерархический	Вложенные категории по общим существенным признакам	Четкая структура; наследование свойств	Ригидность; единственная иерархия
2	Фасетный	Независимые измерения; объект классифицируется по каждому	Гибкость; многомерность	Отсутствие естественного упорядочения
3	Ординальный (порядковый)	Линейная прогрессия уровней возрастающей сложности	Интуитивность; пороговые требования	Риск упрощения многомерных объектов
4	Кластерный	Группировка по сходству статистическими методами	Объективность; основан на данных	Требует количественных данных; произвольность границ

Источник: автор исследования

Обоснование выбора подхода классификации

В качестве основного подхода выбрана порядковая линейная классификация с фасетным подкреплением. Обоснование включает следующие аргументы. Во-первых, аналогия с SAE J3016 [1] обеспечивает концептуальную когерентность и возможность перекрестного сопоставления двух независимых измерений — автоматизации и подключенности. Во-вторых, подключенность для задач управления движением демонстрирует естественную градацию — от отсутствия обмена данными до полной оркестрации траекторий, где каждый уровень расширяет возможности предыдущего. В-третьих, инженеры и регуляторы знакомы с линейными системами (SAE, CMMI, NIST). В-четвертых, такая шкала обеспечивает возможность бенчмаркинга городов и транспортных коридоров.

Для преодоления ключевого ограничения

линейного подхода, а именно риска чрезмерного упрощения, каждый уровень формально характеризуется по 8 независимым измерениям (фасетам), что обеспечивает строгость и воспроизводимость.

Классификационные измерения

В качестве фасетов для классификации определены 8 измерений (табл. 2). Измерения И5 (Адресность) и И6 (Режим участия в управлении) являются первичными дескрипторами: именно их комбинация однозначно определяет уровень. Измерение И7 (коммуникационная модель) устанавливает связь с паттернами распределенных систем. Остальные измерения выполняют описательную и верификационную функции.

Таблица 2

Классификационные измерения

№ п/п	#	Измерение	Описание	Шкала
1	2	3	4	5
1	И1	Направленность	от ТС, к ТС или двусторонний обмен	исходящий → входящий → двусторонний
2	И2	Непрерывность	характер связи во времени	дискретная → периодическая → непрерывная
3	И3	Задержка	максимально допустимая латентность	минуты → секунды → миллисекунды
4	И4	Идентификация	различимость отдельных ТС	нет → агрегат → анонимный ID → постоянный ID
5	И5*	Адресность	возможность адресного обращения к ТС	нет → широковещание → групповая → индивидуальная → персональная
6	И6*	Режим участия в управлении	какую роль играет ТС в процессе управления	пассивное получение → передача данных → получение рекомендаций (+ верификация) → исполнение предписаний → полное подчинение
7	И7	Коммуникационная модель	соответствующий паттерн распределенной системы	Broadcast → Pub/Sub → Client-Server → RPC → Edge → P2P + координатор → Оркестрация
8	И8	Полнота данных	объем обмениваемых данных	позиция → телематика → сенсорные данные

Источник: автор исследования

* Примечание: И5 и И6 — первичные дескрипторы уровней.

Под индивидуальной адресностью понимается возможность обращения к конкретному устройству (смартфон, бортовое устройство) без постоянной привязки к транспортному средству: система адресует аккаунт пользователя или сессию, но не идентифицирует ТС. Под персо-

нальной адресностью понимается обращение к конкретному идентифицированному ТС с постоянным идентификатором (VIN, телематический профиль), позволяющим системе вести историю взаимодействия и учитывать параметры конкретного ТС.

Критерии качества

Классификация оценивается по пяти критериям качества таксономий в программной инженерии [18]:

1. ортогональность — взаимная исключительность уровней;
2. полнота — покрытие всего спектра существующих и перспективных систем;
3. монотонность — строгое возрастание функций

4. прагматическая полезность — применимость для проектных и инвестиционных решений;
5. воспроизводимость — однозначность отнесения реальной системы к уровню независимыми экспертами.

Верификация этих критериев представлена в разделе «Результаты».

Результаты

Определение уровней

Классификация определяет 6 основных уровней (Ур.0–Ур.5) с подуровнями (а/б) для функциональных вариантов внутри одного яруса.

Каждый уровень характеризуется уникальной комбинацией значений И5 (Адресность) и И6 (Режим участия в управлении), что гарантирует ортогональность классификации (табл. 3).

Таблица 3

Уровни подключенности транспортных средств

№ п/п	Ур.	Название	Описание	И5	И6
1	2	3	4	5	6
2	0a	Информированный по радио	водитель получает общую информацию из центра управления по радио	широковещательный	пассивное получение информации
3	0б	Информированный знаками	водитель получает общую информацию со знаков переменной информации	групповой	пассивное получение информации
4	1a	Телематически наблюдаемый (событийно)	система связи односторонне и событийно передает информацию (бортовая телематика производителей, ЭРА-ГЛОНАСС)	индивидуальный	передача данных
5	1б	Телематически наблюдаемый (непрерывно)	автомобиль передает телематические данные (позиция, скорость) с бортового устройства	индивидуальный	передача данных
6	2a	Опосредованный смартфоном	детализированная информация через смартфон (навигация, маршруты), система не знает, выполнена ли рекомендация	индивидуальный	получение рекомендаций
7	2б	Телематически подключенный	адресные рекомендации по скорости, маршруту, времени на идентифицированное устройство	персональный	получение и верификация рекомендаций
8	3a	Связанный с инфраструктурой (облачный)	Ур.2 + прием данных от облачной инфраструктуры (фазы светофора, метеоусловия и др.)	персональный	получение и верификация рекомендаций
9	3б	Связанный с инфраструктурой (периферийный)	Ур.3a + придорожный узел RSU/МЕС вычисляет команду локально и передает ее ТС с минимальной задержкой; открывает класс задач управления в реальном времени (скоростной коридор, проезд на зеленый)	персональный	исполнение предписаний

№ п/п	Ур.	Название	Описание	И5	И6
1	2	3	4	5	6
10	4а	Сетевой кооперативный	обмен с центром управления, инфраструктурой и другими ТС без жестких требований к задержке, тактическое согласование происходит P2P между ТС в реальном времени	персональный	исполнение предписаний
11	4б	Сетевой коллективный	Ур.4а + передача данных бортовых сенсоров (камера, лидар)	персональный	исполнение предписаний
12	5а	Оркестрированный кооперативный	ТС включается в динамическую модель движения; траектория назначается системой с регламентированной задержкой; ТС не принимает самостоятельных решений о тактических параметрах движения	персональный	полное подчинение
13	5б	Оркестрированный коллективный	Ур.5а + сенсорные данные всех ТС формируют единую модель мира для оркестратора; коллективное восприятие окружения обеспечивает назначение траекторий с учетом полной картины среды	персональный	полное подчинение

Источник: автор исследования

Изоморфизм с коммуникационными паттернами распределенных систем

Важным свойством предлагаемой классификации является то, что градация уровней подключенности ТС структурно соответствует эволюции коммуникационных моделей в распределенных вычислительных системах (табл. 4). В обоих

случаях градация определяется нарастанием требований к точности идентификации узлов, адресности сообщений, гарантиям доставки и степени централизации управления.

Таблица 4

Соответствие уровней подключенности коммуникационным моделям

№ п/п	Ур.	Коммуникационная модель	Транспортная аналогия	Топология	Ключевые свойства
1	2	3	4	5	6
2	0	широковещание (broadcast)	радио, ЗПИ	один-ко-многим, без обратной связи	без идентификации получателей; минимальная латентность не требуется
3	1	издатель–подписчик (pub/sub)	ТС → платформа данных	многие-к-одному через брокера	асинхронная доставка; слабая связанность; масштабируемость публикации
4	2	клиент–сервер + RPC с идентификацией	смартфон или бортовое устройство — сервер навигации	звезда (клиент — сервер)	идентификация клиента; запрос-ответ; на Ур.2б — двусторонний адресный обмен с верификацией исполнения; масштабируемость через реплицирование сервера
5	3	двусторонний RPC с идентификацией + периферийные вычисления (Edge)	ТС ↔ центр управления + RSU как периферийный узел	звезда с адресацией	персонализация; гарантия доставки; идемпотентность операций (повторное выполнение без изменения результата). На Ур.3а: вычисление в облаке; на Ур.3б: RSU вычисляет локально

№ п/п	Ур.	Коммуникационная модель	Транспортная аналогия	Топология	Ключевые свойства
1	2	3	4	5	6
6	4	P2P с координатором	V2V между ТС + координатор (ЦУ)	смешанная: P2P + координатор	координатор задает параметры, тактическое согласование — P2P; устойчивость к отказам узлов; на Ур.4б добавляется коллективное восприятие (сенсорные данные)
7	5	централизованная оркестрация (Kubernetes для контейнеров)	коллективное восприятие и динамическое управление траекториями	полная звезда с управлением	назначение задач; контроль полного цикла поездки; гарантированная задержка

Источник: автор исследования

Изоморфизм проявляется не только в топологии, но и в ключевых свойствах каждого уровня. На Ур.0 система не различает отдельных получателей — аналогично широковещательной передаче, где сообщение адресовано всем без идентификации. На Ур.1 ТС выступает в роли издателя телематических данных, а система управления — в роли подписчика, что в точности соответствует паттерну «издатель–подписчик» [12]: масштабируемость определяется пропускной способностью брокера, а не числом издателей. На Ур.2 появляется идентификация конкретного «клиента» (смартфона на Ур.2а, бортового устройства ТС на Ур.2б) и возможность адресного ответа — классический паттерн «клиент–сервер»; на Ур.2б взаимодействие приобретает характер двустороннего адресного обмена с верификацией исполнения, что соответствует механизму удаленного вызова процедур (RPC) с подтверждением. На Ур.3 в цепочку обмена включается инфраструктурный объект как источник данных реального времени: на Ур.3а вычисление выполняется в облаке (задержка порядка нескольких секунд), на Ур.3б придорожный узел RSU/MEC обрабатывает данные локально с задержкой в доли секунды, открывая класс задач управления в реальном времени, — этот подход соответствует архитектуре периферийных вычислений («Multi-access Edge Computing», MEC). На Ур.4 ТС обмениваются данными не только с центральной системой, но и напрямую друг с другом (V2V), что формирует одноранговую сеть с координатором, подобную распределенным системам согласования. На Ур.5 система полностью определяет траекторию каждого ТС — это паттерн централизованной оркестрации, где каждый агент подчинен координирующей инстанции.

Установленное соответствие позволяет сформулировать ряд теоретических следствий. Во-первых, к каждому уровню подключенности применимы результаты анализа соответствующего коммуникационного паттерна. Так, для Ур.1 (издатель–подписчик) масштабируемость определяется пропускной способностью брокера, а не числом издателей — это объясняет, почему даже 6–10% подключенных ТС дают значительный эффект [13].

Во-вторых, переход к Ур.4–Ур.5 порождает проблемы, хорошо изученные в теории распределенных систем. Теорема CAP, или теорема Брюера (согласованность–доступность–устойчивость к разделению) [6], утверждает, что распределенная система не может одновременно обеспечить все три свойства. Применительно к Ур.5 это означает, что при разрыве связи (устойчивость к разделению) система должна выбирать между точным выполнением назначенных траекторий (согласованность) и продолжением движения по автономному решению ТС (доступность). Данный компромисс формализует известную практическую проблему выбора вариантов поведения автоматизированных ТС при потере связи с системой управления.

В-третьих, градация моделей координации от информационной к директивной (по [9]) точно соответствует шкале Иб: пассивное получение информации (Ур.0) → передача данных (Ур.1) → получение рекомендаций (Ур.2а) → верифицируемые рекомендации (Ур.2б–3а) → исполнение предписаний (Ур.3б, кооперативные предписания на Ур.4) → полное подчинение (Ур.5). Это подтверждает, что предложенная классификация не является произвольной, а отражает фундаментальные принципы и формы координации в мультиагентных системах.

Обсуждение

Верификация критериев качества

Ортогональность обеспечивается тем, что каждый уровень определяется уникальной комбинацией И5 × И6: ни один реальный сценарий не может быть отнесен к двум уровням одновременно. Полнота подтверждается покрытием всего спектра — от отсутствия подключения до полной оркестрации с коллективным восприятием; промежуточных состояний, не покрываемых классификацией, при анализе существующих и перспективных систем выявлено не было (табл. 5). Монотонность вытекает из строгого возрастания значений обоих первич-

ных измерений (И5 и И6) от уровня к уровню. Практическая полезность обоснована соотношением уровней с конкретными стратегиями управления и известными коммуникационными паттернами. Воспроизводимость обеспечивается формальным характером классификационных измерений, отнесение системы к уровню определяется объективно проверяемыми свойствами (наличие или отсутствие адресации, тип управляющего воздействия), а не экспертной оценкой.

Таблица 5

Примеры разделения существующих систем по уровням подключенности

№ п/п	Ур.	Примеры реальных систем	Масштаб внедрения
1	2	3	4
1	0a	TMC/RDS (Traffic Message Channel через FM-радио), Highway Advisory Radio (HAR, США), радиопроинформирование от центров управления движением	повсеместно
2	0б	знаки переменной информации (ЗПИ / VMS / DMS), управляемые дорожные знаки (переменное ограничение скорости на магистралях)	широко: магистрали, крупные города
3	1a	eCall (ЕС, обязателен с 2018), ЭРА-ГЛОНАСС (ЕАЭС, обязателен с 2017 для новых ТС), GM OnStar (базовый — оповещение об аварии), OBD-II aftermarket трекеры в событийном режиме	13+ млн ТС в РФ; обязательно для всех новых ТС ЕС/ЕАЭС
4	1б	BMW ConnectedDrive / CarData, Mercedes me connect, Toyota Connected Services, GM OnStar (расширенный), fleet-трекеры (Wialon, Omnicomm), FCD от смартфонов через Waze / Google Maps / Яндекс	десятки млн (OEM); 140+ млн (Waze); сотни млн (Google Maps)
5	2a	Яндекс.Навигатор, Google Maps, Waze, 2ГИС, Apple Maps — навигация с учетом трафика через смартфон водителя	сотни миллионов пользователей
6	2б	Audi Traffic Light Information (ATLI) через LTE/облако; DENSO MobiQ; fleet-системы с адресными рекомендациями водителям (Samsara, Geotab); Яндекс.Авто с интегрированной навигацией на бортовом экране	пилотные проекты; единицы тысяч ТС
7	3a	Audi ATLI через облако (V2N): фазы светофора доставляются на бортовой дисплей через сотовую сеть; Verizon Edge Transportation Exchange (через 5G/LTE); облачные платформы передачи SPaT без RSU	пилотные проекты в США и Европе
8	3б	GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory) через RSU/DSRC: пилоты в Бирмингеме (UK, A45), Тренто (Италия); SPaT через DSRC/C-V2X; Fulton County, GA: школьные автобусы с C-V2X, приоритет на 62 светофорах — снижение числа остановок на 40%, времени в пути на 13%	десятки пилотов; тысячи ТС
9	4a	V2V через DSRC: пилоты THEA (Тампа, FL), Indiana DOT (оснащенные грузовики), Wyoming DOT (снегоуборщики); C-V2X Sidelink (PC5) в Китае (интеграция в новые ТС); Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC); грузовой платунинг (Peloton Technology, DAF/MAN/Volvo, Европа)	единичные пилоты; сотни-тысячи ТС
10	4б	Cooperative Perception: стандарт ETSI TS103 324 (2023), Collective Perception Messages (CPM); агрегация данных лидаров и камер через MEC-серверы	лабораторные прототипы; стандарт принят

№ п/п	Ур.	Примеры реальных систем	Масштаб внедрения
1	2	3	4
11	5a	концепции: Waymo + городская инфраструктура (координация маршрутов через облако); проекты «умных дорог» в Китае (Xiong'an, Changsha) с интеграцией ТС в динамическую модель; Mobility-as-a-Service с назначением маршрутов	прототипы; ограниченные пилоты
12	5б	полное коллективное восприятие + централизованная оркестрация траекторий на основе единой модели мира: теоретическая целевая архитектура	не реализовано; целевой горизонт

Источник: автор исследования

Классификация уровней подключенности ТС в контексте SAE J3016

Уровни автоматизации (SAE0–5) и уровни подключенности (Ур.0–Ур.5) представляют собой два ортогональных измерения. В терминах мультиагентных систем [7], автоматизация — это свойство исполнительного механизма агента, подключенность — свойство его коммуникационного интерфейса. Автомобиль с высокой автоматизацией (SAE4,5) может иметь минимальную подключенность, и наоборот, управляемое человеком ТС может иметь 5-й уровень подключенности. Таким образом, автоматизация определяет способность ТС исполнять управляющие команды, тогда как подключенность определяет возможность получать эти команды и участвовать в координации. Без подключенности автоматизированное ТС остается изолированным агентом, действующим в собственных интересах — «эгоистическим» в терминологии теории игр [10].

Заключение

Предложенная классификация уровней транспортной подключенности обосновывает перенос архитектурных решений, паттернов отказоустойчивости и моделей масштабирования из области распределенных систем [6, 21] на задачи проектирования транспортных коммуникационных платформ.

Классификация удовлетворяет пяти критериям качества (ортогональность, полнота, монотонность, прагматическая полезность, воспроизводимость) и может служить основой для разработки дорожной карты цифровой трансформации управления дорожным движением, а также для проектирования коммуникационных

Практическое значение для проектирования систем управления движением

Установленный изоморфизм имеет прямое инженерно-практическое значение для проектирования коммуникационной архитектуры транспортной системы. Для каждого целевого уровня подключенности разработчик может обратиться к обширному корпусу решений для соответствующего паттерна распределенной системы: брокеры сообщений и протоколы MQTT для Ур.2, архитектуры МЕС для Ур.3, протоколы согласования для Ур.4, системы оркестрации для Ур.5. Это существенно снижает риски проектирования и позволяет повторно использовать проверенные архитектурные решения.

Кроме того, классификация позволяет упорядочить шаги цифровой трансформации в области организации и управления дорожным движением. Города могут начинать с Ур.1–Ур.2, используя существующую сотовую инфраструктуру и навигационные приложения, проектируя при этом архитектуру под целевой Ур.5 с поэтапным наращиванием функций управления.

архитектур транспортных систем.

Направления дальнейших исследований включают:

- количественное моделирование зависимости эффективности от уровня подключенности;
- исследование влияния смешанных потоков (с различными уровнями подключенности) на пропускную способность;
- разработку архитектуры системы управления дорожным движением для поэтапного перехода от Ур.1 к Ур.5;
- разработку комплексной методологии внедрения высокоавтоматизированного и подключенного транспорта в городах.

Список литературы

1. SAE J3016_202104. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. — SAE International, 2021.
2. P4C's Five Levels of Vehicle Connectivity [Электронный ресурс] // Privacy4Cars. — 2022. — URL: <https://privacy4cars.com/data-in-cars/p4cs-five-levels-of-vehicle-connectivity/> (дата обращения: 27.01.2026).
3. Setting the framework for car connectivity and user experience: the C3X framework [Электронный ресурс] // McKinsey & Company. — 2018. — URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/setting-the-framework-for-car-connectivity-and-user-experience> (дата обращения: 27.01.2026).
4. Zhang X. et al. Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy // *Automotive Innovation*. — 2025. — Vol. 8. — Art. 3. — DOI: 10.1007/s42154-024-00310-2.
5. Baumann D., Sommer M., Dettinger F., Rösch T., Weyrich M., Sax E. Connected Vehicle: Ontology, Taxonomy and Use Cases // *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. — Montreal, 2024. — P. 1–6. — DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553586.
6. Van Steen M., Tanenbaum A. S. *Distributed Systems*. — 4th ed. — distributed-systems.net, 2023.
7. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. — 2nd ed. — Chichester: John Wiley & Sons, 2009. — 484 p.
8. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы: обзор // *Новости искусственного интеллекта*. — 1998. — № 2. — С. 64–96.
9. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. — 352 с.
10. Белов А. В. Повышение эффективности использования улично-дорожных сетей на основе управления формированием транспортных потоков: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. — Москва, 2014. — 134 с.
11. Белов А. В., Бутенко Ю. В. Анализ возможности и перспектив достижения системно-оптимального распределения транспортных потоков с появлением подключенных и высокоавтоматизированных транспортных средств // *Мир транспорта и технологических машин*. — 2025. — № 1–3(88). — С. 120–129. — DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-120-129.
12. Eugster P. Th., Felber P. A., Guerraoui R., Kermarrec A. — M. The many faces of publish/subscribe // *ACM Computing Surveys*. — 2003. — Vol. 35. — No. 2. — P. 114–131.
13. Jerome Z., Ren Y., Liu H. et al. Traffic light optimization with low penetration rate vehicle trajectory data // *Nature Communications*. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1306.
14. Cetin M. et al. Active bottleneck management on freeways through connected vehicle technology. — NTC, University of Maryland, 2018.
15. Roughgarden T., Tardos E. How bad is selfish routing? // *Journal of the ACM*. — 2002. — Vol. 49. — No. 2. — P. 236–259.
16. Small K. The Bottleneck Model: An Assessment and Interpretation // *Economics of Transportation*. — 2015. — Vol. 4. — No. 1–2. — P. 110–117.
17. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. — 1952. — Vol. 1. — P. 325–378.
18. Usman M. et al. Taxonomies in software engineering: A systematic mapping study and a revised taxonomy development method // *Information and Software Technology*. — 2017. — Vol. 85. — P. 43–59.
19. Gomez A. E. et al. Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies // *Electronics*. — 2025. — Vol. 14. — No. 7. — Art. 1279.
20. ПНСТ 633–2022. Интеллектуальные транспортные системы. Кооперативные адаптивные системы круиз-контроля. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания. — М.: Стандартинформ, 2022.
21. Швецов А. Н. Распределенные интеллектуальные информационные системы. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. — 180 с.

References

1. SAE J3016_202104. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. — SAE International, 2021.
2. P4C's Five Levels of Vehicle Connectivity. — Privacy4Cars, 2022. — Available at: <https://privacy4cars.com/data-in-cars/p4cs-five-levels-of-vehicle-connectivity/> (accessed: 27.01.2026).

3. Setting the framework for car connectivity and user experience: the C3X framework.—McKinsey & Company, 2018.—Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/setting-the-framework-for-car-connectivity-and-user-experience> (accessed: 27.01.2026).
4. Zhang X. et al. Vehicle-to-Everything Communication in Intelligent Connected Vehicles: A Survey and Taxonomy // *Automotive Innovation*.— 2025.— Vol. 8.— Art. 3.— DOI: 10.1007/s42154-024-00310-2.
5. Baumann D., Sommer M., Dettinger F., Rösch T., Weyrich M., Sax E. Connected Vehicle: Ontology, Taxonomy and Use Cases // *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*.— Montreal, 2024.— P. 1–6.— DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553586.
6. Van Steen M., Tanenbaum A. S. *Distributed Systems*.— 4th ed.— distributed-systems.net, 2023.
7. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*.— 2nd ed.— Chichester: John Wiley & Sons, 2009.— 484 p.
8. Gorodetskij V. I., Grushinskij M. S., Khabalov A. V. Mnogoagentnye sistemy: obzor [Multi-agent systems: a review] // *Novosti iskusstvennogo intellekta [Artificial Intelligence News]*.— 1998.— No. 2.— P. 64–96. (In Russ.)
9. Tarasov V. B. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektualnym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intelligent organisations: philosophy, psychology, computer science].— Moscow: Editorial URSS Publ., 2002.— 352 p. (In Russ.)
10. Belov A. V. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya ulichno-dorozhnykh setej na osnove upravleniya formirovaniem transportnykh potokov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.01 [Improving the efficiency of road network utilisation based on traffic flow formation management: Candidate of Technical Sciences dissertation].— Moscow, 2014.— 134 p. (In Russ.)
11. Belov A. V., Butenko Yu. V. Analiz vozmozhnosti i perspektiv dostizheniya sistemno-optimalnogo raspredeleniya transportnykh potokov s poyavleniem podklyuchennykh i vysokoavtomatizirovannykh transportnykh sredstv [Analysis of the feasibility and prospects of achieving system-optimal traffic distribution with the advent of connected and highly automated vehicles] // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of Transport and Technological Machines]*.— 2025.— No. 1–3 (88).— P. 120–129.— DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-120-129. (In Russ.)
12. Eugster P. Th., Felber P. A., Guerraoui R., Kermarrec A.—M. The many faces of publish/subscribe // *ACM Computing Surveys*.— 2003.— Vol. 35.— No. 2.— P. 114–131.
13. Jerome Z., Ren Y., Liu H. et al. Traffic light optimization with low penetration rate vehicle trajectory data // *Nature Communications*.— 2024.— Vol. 15.— Art. 1306.
14. Cetin M. et al. Active bottleneck management on freeways through connected vehicle technology.— NTC, University of Maryland, 2018.
15. Roughgarden T., Tardos E. How bad is selfish routing? // *Journal of the ACM*.— 2002.— Vol. 49.— No. 2.— P. 236–259.
16. Small K. The Bottleneck Model: An Assessment and Interpretation // *Economics of Transportation*.— 2015.— Vol. 4.— No. 1–2.— P. 110–117.
17. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*.— 1952.— Vol. 1.— P. 325–378.
18. Usman M. et al. Taxonomies in software engineering: A systematic mapping study and a revised taxonomy development method // *Information and Software Technology*.— 2017.— Vol. 85.— P. 43–59.
19. Gomez A. E. et al. Cooperative Intelligent Transport Systems: The Impact of C-V2X Communication Technologies // *Electronics*.— 2025.— Vol. 14.— No. 7.— Art. 1279.
20. PNST 633–2022. Intellektualnye transportnye sistemy. Kooperativnye adaptivnye sistemy krujz-kontrolya. Trebovaniya k ekspluatatsionnym kharakteristikam i metody ispytaniya [Intelligent transport systems. Cooperative adaptive cruise control systems. Performance requirements and test methods].— Moscow: Standartinform Publ., 2022. (In Russ.)
21. Shvetsov A. N. Raspredelennye intellektualnye informatsionnye sistemy [Distributed intelligent information systems].— Saint Petersburg: SPbGETU LETI Publ., 2017.— 180 p. (In Russ.)

Сведения об авторе	Information about the author
Белов Александр Владимирович кандидат технических наук, руководитель проектов Инновационного центра «Безопасный транспорт» ГУП «Московский метрополитен», приглашенный преподаватель ФГАОУ ВО Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» SPIN-код: 1704–1913 ORCID: 0000–0002–6132–4987 Адрес: ГУП «Московский метрополитен» 129110, г. Москва, пр. Мира, д. 41 стр. 2 E-mail: belov_trans@mail.ru	Belov Alexander Vladimirovich Candidate of Technical Sciences, Project Manager at the Innovation Center “Safe Transport”, SUE Moscow Metro; Visiting Lecturer at HSE University (MIEM) SUE Moscow Metro SPIN code: 1704–1913 ORCID: 0000–0002–6132–4987 Address: SUE “Moscow Metro”, 41/2 Mira Avenue, Moscow, 129110, Russia E-mail: belov_trans@mail.ru

Статья получена 25.02.2026 | статья опубликована 25.03.2026

Article received 25.02.2026 | Article published 25.03.2026