

УДК 004.896 004.031

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.002

Обзор современного состояния понимания концепта «автономность технических средств»

Лукинова Ольга Васильевна

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, Москва, *lobars@mail.ru*

Аннотация. В статье представлен обзор современного состояния некоторых вопросов, связанных с такой предметной областью, как автономность технических средств. На сегодняшний день этот концепт не имеет четкого методологического или формализованного определения, что, в условиях перехода на цифровые технологии, представляется существенной проблемой при проектировании или внедрении средств с элементами искусственного интеллекта с заданной степенью автономности будущего изделия. Описаны разные подходы к пониманию термина «автономия», подчеркивается, что автономность следует рассматривать, как дальнейшее развитие свойств автоматизации технического средства, наряду с его автоматизмом и адаптивностью. Раскрываются используемые некоторыми зарубежными специалистами понятия «сильная автономность» и «слабая автономность», которые соотносятся со свойствами автоматизации технической системы. Дается подробный обзор методов и моделей оценки автоматизации для различных предметных областей. При этом, описанные методы применяются к задачам оценки технических систем как со слабой автономностью, т.е. к автоматизированным системам, так и с сильной. Представлены зарубежные и отечественные источники, содержащие различные критерии оценки уровня автономности. Показано, что оценочные показатели являются исключительно экспертными, носят неформальный характер и касаются не сущностного качества свойства автономии технического средства, а результата его функционирования. В связи с этим фактом при решении вопроса об оценке уровня автономности средства следует использовать алгоритмы принятия решений в неструктурированных областях, основанные на свертке векторного критерия, имеющего иерархический характер. Таким образом, цель и новизна данной работы заключается в том, чтобы, проанализировав многочисленные источники, показать ограниченность научно-методического аппарата оценивания такого сложного понятия, как автономность технических средств, которое, на сегодняшний день, основывается исключительно на субъективных оценках наблюдателя, а также необходимость перехода к формальным или, хотя бы, формализованным способам.

Ключевые слова: автоматизация, автономность, техническая система, оценка уровня автономности

Цитирование: Лукинова О.В. Обзор современного состояния понимания концепта «автономность технических средств» / О.В. Лукинова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 23-42 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.002.

Введение. Современный этап развития цифровой экономики характеризуется повсеместным внедрением во все сферы жизни общества различных автономных технических устройств. Несмотря на то, что концепция разработки и эксплуатации автономных роботизированных систем берет начало еще в 1980-х годах, понятие автономности таких систем на сегодняшний день не имеет четкого методологического определения и понимания, этим объясняется, на взгляд автора, актуальность исследований в данной области.

Существуют следующие подходы к определению и пониманию термина «автономность» технической системы (ТС):

1. Автономность ТС в смысле долговременного функционирования вдали от мест пополнения ресурсов, необходимых для осуществления функционирования ТС (например, автономное плавание подводной лодки). Данный подход нас не интересует, т.к. целью является исследование программной составляющей ТС.
2. Второй подход означает развитие свойств автоматизации до крайней точки, когда полностью автоматизированная система переходит в категорию автоматической (именно такие системы некоторые авторы называют автономными). При этом, алгоритмы, на

базе которых реализованы те или иные функции технического объекта, носят, согласно [1], строго детерминированный характер и имеют четкий, прозрачный алгоритм.

3. Третье направление связано непосредственно со смыслом термина «автономность». Наиболее полное толкование приведено в [2]: «Автономность – это характеристика высокоорганизованных (технических, биологических, социальных и других) систем, согласно которой функционирование и поведение таких систем определяется их внутренними основаниями и не зависит от воздействия внешней среды и других систем. Автономность систем подразумевает наличие у них имманентных собственных закономерностей существования и развития, их действие по внутренним основаниям и побуждениям, по законам функционирования своей внутренней организации, а также обусловленное этим состояние саморегулируемости». К автономным системам в указанном смысле, безусловно, относятся все живые организмы, включая человека. В будущем к такого рода системам, станут относиться те технические объекты, которые приобретут свойства субъектности за счет действительной и полной интеллектуализации программного обеспечения (ПО), встроенного в систему управления ТС. Безусловно, на сегодняшний день этот фактор является целевым в области развития автономности технических систем.
4. Еще одной тенденцией являются следующие рассуждения. Автономность ТС – это следующий (после автоматического) уровень развития автоматизации систем, т.е. автономные ТС являются не отдельной ветвью дихотомии «автоматизированные ТС (включая автоматические) – автономные ТС», а следствием развития в области автоматизации трех факторов:
 - с одной стороны – увеличением количества ручных функций, выполняемых человеком с помощью данного технического объекта за счет их автоматизации путем внедрения в объект ПО. Если автоматизированы все функции – такой объект приобретает свойства автоматического выполнения поставленной задачи и становится программным автоматом.
 - свойства адаптивности, когда автоматизированная система может реагировать на изменения внешней среды, однако эта реакция есть работа, по-прежнему, детерминированных алгоритмов на основе формализованных моделей.
 - с другой – развитием качества алгоритмов от полностью определенных к алгоритмам недетерминированным, не имеющим четкого, формального алгоритма решения задачи, т.е. обладающих чертами интеллекта [1].

Последний, четвертый, подход дает возможность подойти к пониманию автономности с точки зрения развития автоматизации от процессов механизации до когнитивных форм деятельности человека. Поэтому далее в работе аспекты автоматизации и автономности описаны в контексте последнего подхода.

Еще одной особенностью описываемой предметной области является тот факт, что не удалось найти опубликованных исследований, содержащих общие теоретические и методологические характеристики и представления об автономных ТС. Литературные источники отражают, в основном, понимание автономности в отдельных предметных областях: автономность в автомобильном транспорте, автономные морские суда, беспилотные летательные аппараты и т.д.

В статье описаны текущие представления специалистов о проблеме идентификации автономных ТС, понимания сути оценочных критериев степени автономности, а также выполнен обзор методов и моделей оценки уровня автономности роботизированных устройств из различных предметных областей. Цель данной работы заключается в том,

чтобы, проанализировав многочисленные источники, показать ограниченность научно-методического аппарата оценивания такого сложного понятия, как автономность ТС, которое, на сегодняшний день, основывается исключительно на субъективных оценках наблюдателя, а также необходимости перехода к формальным или, хотя бы, формализованным способам, что, безусловно, способствовало бы решению проблемы проектирования технических устройств с элементами искусственного интеллекта с заданной степенью автономности будущего изделия.

1. Способы функционирования автоматизированных систем. В соответствии с последним подходом, автоматизированные ТС прошли определенный путь развития от автоматизации механизированных функций до автономных (в той или иной мере) способов функционирования. Далее описана характеристика этапов развития таких ТС.

Автоматизацию можно считать высшей степенью механизации, то есть способностью системы выполнять процессы или выполнять действия без участия оператора. Однако, автоматизированная система (АС) не делает выбор сама, она только следует сценарию, который уже закодирован. Если возникает незапланированная ситуация, она может только ждать помощи человека [3].

Очевидно, что следующий этап развития АС был связан с увеличением количества автоматизируемых функций технического объекта. Чем большее количество функций системы управления (СУ) объекта выполняется за счет программного компонента, тем выше уровень автоматизации. Крайний случай, когда автоматизированы все функции, – это автоматическая СУ, что означает способность системы самостоятельно контролировать свои внутренние функции и операции, способность запускаться и работать без какого-либо ручного вмешательства или внешней помощи. Более прагматичное определение термина «автоматический» дано в ИЕС 60050-351 [4]: «относящийся к процессу, устройству или оборудованию, которые при определенных условиях могут функционировать без вмешательства человека». Однако, как подчеркивается в [5], действия такой системы предопределены с самого начала, и автомат не имеет возможности изменить их в будущем. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 [6] автоматический режим работы определяет, как «состояние системы управления, при котором система управления робота работает в соответствии с программой выполнения задания».

Развитие формальных методов теории чувствительности, инвариантности, робастности позволяют наделить автоматическую систему адаптационными механизмами, под которыми понимается, согласно [7], процесс изменения параметров, структуры систем или управляющих воздействий на основе информации, получаемой во время управления, с целью достижения определенного (оптимального) качества управления при начальной неопределенности и/или изменяющихся условиях работы. Адаптивная система имеет возможность изменять свою работу (т.е. конфигурацию, состояние или функции). Это позволяет системе при ее функционировании справляться с временными и пространственными изменениями, как в долгосрочной (настройка/оптимизация среды), так и в краткосрочной перспективе (исключительные условия, такие, как вредоносные атаки, сбои и т. д.). Таким образом, свойство адаптивности может быть запрограммировано в системе, например, статистическими методами или машинным обучением, что позволяет компьютерной программе давать ответы, которые кажутся проявлением интеллектуальных свойств алгоритма, но эти ответы все еще ограничены рамками программного алгоритма.

Следующим после автоматических и адаптивных свойств уровнем развития идеологии автоматизации является придание системам управления ТС свойств автономности в виде «осознанности», т.е. возможности отслеживать (воспринимать) свой рабочий контекст, внешнюю

среду, а также внутреннее состояние, чтобы иметь возможность оценить, соответствует ли её текущая работа поставленным целям. Осознанность будет управлять адаптацией её рабочего поведения в ответ на изменения контекста или состояния. Как подчеркивается в [8, 9], автономия подразумевает мотивацию, способность или характеристику функционирования системы в неопределенных заранее условиях и устранять сбои без внешнего вмешательства.

С точки зрения философии, автономия является основной характеристикой, которую люди воплощают в своей практической деятельности и которая находится под влиянием окружающей среды и ограничивается ими самими. Чтобы понять автономию с точки зрения технологии, сначала следует четко определить соотношение концепции автоматизации и интеллекта. Так, в [10] интеллект – это способность определять, какое поведение максимизирует вероятность достижения цели в динамичных и неопределенных условиях. По мнению Клафа [11], интеллект представляется возможностью открывать знания и использовать их для решения проблем. Тогда, авторами [12], автономность правомерно представляется способностью системы достигать самоуправления путем принятия решений, их исполнения и оценки; система автономии может сама справляться с непредвиденными ситуациями, что сведет к минимуму вмешательство человека.

На сегодняшний день нет формальных или формализованных критериев, позволяющих определить четкую границу между свойствами автоматизации и автономности программной системы. Поэтому в некоторых источниках вводятся «слабое» и «сильное» понятия автономности. С точки зрения автора речь идет об определении:

1. Автоматизированных систем, включая свойства автомата и адаптивности («слабая» автономность). Так, в [13] предлагается определение автономности в слабом варианте: автономность означает работу технического средства без вмешательства человека в течение всего указанного периода времени при выполнении некоторой цели, заданной человеком. В отечественном стандарте [14] вводится термин «автономный режим» как «режим работы, при котором мобильный робот получает задание от оператора или внешней системы управления, с которой взаимодействует, и выполняет его без дальнейшего взаимодействия с оператором или внешней системой», что также можно интерпретировать как слабую автономность.
2. Систем, обладающих тем или иным уровнем автономности за счет интеллектуализации своих алгоритмов («сильная» автономность). Так, в [15] искусственный интеллект (artificial intelligence) определяется как: «Комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Тогда понятие «сильной» автономности основывается на некоторой осознанности автономной системой своих действий: это «степень, в которой робот может воспринимать окружающую среду, планировать действия на ее основе и воздействовать на нее с намерением достичь определенной цели (заданной роботу или созданной им) без внешнего контроля» [16]

2. Оценочные характеристики уровня автономности ТС. Уровень автономности зависит от имеющихся у системы возможностей, которые могут находиться в широком диапазоне – от интегрированной системы автоматических сенсоров до управляемого компьютером процесса принятия решений, т.е. от возможностей слабой до сильной автономности.

В 2001 году в компании IBM в рамках проекта «Автономные компьютерные системы» были сформулированы восемь определяющих характеристик автономной вычислительной системы (АВС) [17], которые, безусловно, могут быть адаптированы и к системам управления ТС:

1. АВС должна обладать свойством самоидентификации, т.е. должна хранить детальную информацию о своих компонентах, их текущем статусе, предельной мощности, возможностях и всех связях с другими системами, влияющих на неё, чтобы управлять собой. Она должна вести учет собственным ресурсам, тем ресурсам, которые она может заимствовать или одолжить и тем, которые могут быть разделены или должны быть изолированы.
2. АВС должна конфигурироваться и перенастраиваться в изменяющихся (а в будущем даже непредсказуемых) условиях. Конфигурация системы или «настройка» должна происходить автоматически, а также должна выполняться динамическая корректировка этой конфигурации, чтобы наилучшим образом справляться с изменяющимися условиями.
3. АВС функционирует в режиме постоянной оптимизации внутренней структуры и процедур с точки зрения достижения заранее predeterminedных общих целей системы.
4. АВС должна обладать способностями к обнаружению сбоев обычной деятельности и нахождению альтернативного способа использования ресурсов для самостоятельного переконфигурирования.
5. АВС должна быть способна обнаружить, идентифицировать и защититься от различного рода негативных внешних воздействий для сохранения системной безопасности, целостности и стабильности системы.
6. АВС должна получать информацию о внешней среде, особенно в контексте её собственной деятельности и действовать соответственно, включая генерацию правил для наилучшего взаимодействия с соседними системами. Она должна будет использовать имеющиеся ресурсы, даже договариваться об использовании другими системами своих недоиспользуемых элементов, изменяя при этом как себя, так и окружающую среду – одним словом, что и означает быть адаптивной.
7. АВС не может существовать в герметичной среде. Будучи независимой в своей способности управлять собой, она должна функционировать в неоднородном мире и внедрять открытые стандарты – другими словами, автономная вычислительная система не может, по определению, быть проприетарным решением.
8. АВС должна предвидеть и осуществлять оптимизацию своих ресурсов, с целью реализации поставленных целей в динамике, не вовлекая пользователя в эту реализацию.

В отечественном ГОСТ Р 60.6.0.1-2021 [6] под уровнем автономности понимается условная категория, позволяющая ранжировать сервисные мобильные объекты по степени их способности функционировать без вмешательства человека. Здесь же приводится перечень характеристик, которые позволяют детализировать данное определение. Это такие характеристики, как: восприятие внешней среды, автономный режим работы, адаптация к внешним условиям, мобильность, наблюдение, отказоустойчивость, ощущение, планирование достижения цели, предотвращение опасностей, самовосстановление, самодиагностика, ситуационная осведомленность, тактическое поведение, телеприсутствие, цель (миссия) и др. Контекстная семантика приведенных характеристик описана в [6].

Рабочей группой по уровням автономности для беспилотных систем (ALFUS) Национального института стандартов и технологий (NIST) был предложен следующий перечень характеристик для оценки уровня автономности беспилотных морских средств

(БМС) [18]: собственная способность БМС ощущать, воспринимать, анализировать, общаться, планировать, принимать решения и действовать для достижения своих целей, поставленных ее человеком-оператором(-ами) посредством спроектированного взаимодействия человека и робота (HRI).

Описанные характеристики можно соотнести с такими интегральными факторами, как *сложность миссии, сложность окружающей среды и уровень HRI* для выполнения миссий. Еще один интегральный критерий отмечен в [19]: автономность беспилотной системы должна описываться *производительностью* беспилотной системы при выполнении ею определенной миссии с высоким качеством, высокой эффективностью и способностью производить собственные намерения на основе боевой цели, с минимальным или отсутствием руководства со стороны операторов. Авторы [20] считают, что автономия должна содержать четыре уровня интерпретации:

1. Способность к самовосприятию, независимому суждению, самостоятельному принятию решений и осуществлению поведения.
2. Способность к самоуправлению.
3. Когнитивные способности, которые отражают степень взаимодействия человека и компьютера.
4. Способность беспилотной системы справляться с различными задачами в сложных, динамичных и неопределенных условиях.

Следует заметить, что в указанных источниках приведены достаточно обширные списки характеристик, более того, в некоторых методах оценки уровня автономности (будут описаны ниже) дается их детализировка в виде критериального дерева. Однако они все носят экспертный, субъективный характер.

3. Методы и модели оценки уровня автономных ТС. Основываясь на приведенных выше характеристиках, в этом разделе описаны методы и модели, позволяющие оценивать уровни автономности технических систем. При этом одни модели позволяют делать оценки в аспекте слабого определения автономности, т.е. на самом деле, оценивают уровень автоматизации. Другие – ориентируются на сильную автономность, т.е. на присутствие интеллектуальных алгоритмов. При этом реальная ситуация такова, что ТС в большинстве являются полуавтоматическими и полуавтономными, т.к. обладают как одними, так и другими качествами.

Кроме того, анализ показал, что на сегодняшний день существуют два варианта методов: а) оценка уровня автоматизации (методы LOA (Levels of automation)) исключительно на качественных основах; б) методы, позволяющие осуществлять сравнительный анализ автономности ТС: двух- и трехосные методы, метод паутины, метод на основе нечеткой логики и т.п.

Однако, в основе даже сравнительных методов, тем не менее, лежат экспертные оценки, а любой уровневый метод на основе использования технологии принятия рациональных решений в неструктурированных областях можно свести к получению интегральной балльной оценки, как результат свертки векторного критерия, имеющего иерархическую структуру [21, 22].

В настоящее время наиболее популярными оценочными методами являются: метод оценки уровня автоматизации LOA (Levels of automation) Шеридана [23-25]; метод ACL (автономный уровень управления) от Министерства обороны США [26-28]; методы ALFUS (NIST) [29-31]; метод SAE (Общество инженеров-автомобилестроителей) [32]; уровни автономности, определенные Регистром Ллойда [33]; уровни автоматизации, предоставленные IEC [34]; нечеткий метод оценки [35- 37] и др.

При этом семантика критериев оценки, их количество выбираются авторами, исходя из специфики предметной области. Так, Шеридан [23] формулирует 10 критериев для оценки автоматизированных производственных устройств с точки зрения участия человека в управлении устройством, в Программе NASA Vehicle Systems Program Highaltitude Long-range Sector (HALE Sector) сформулирована упрощенная оценка автономности (пять уровней) для авиационных систем [38]. Бир и др. выдвинули десять уровней автономности взаимодействия человека и робота (HRI) [16], Сообщество автомобильных инженеров SAE считает, что шести уровней вполне достаточно для описания всех автоматизированных функций вождения на дороге [39].

Ниже приведен обзор наиболее значимых методов в различных предметных областях.

Метод LOA Шеридана и Вепланка (ШИВ). Идея метода оценки уровня была впервые выдвинута Шериданом, который использовался для оценки уровня автоматических устройств. В своей работе 1978 г. Т. Шеридан и В. Вепланк (Массачусетский технологический институт) [23] предложили ставшее классическим 10-уровневое шкалирование по уровню компьютеризации и оценивания степени автоматизации в зависимости от того, кто принимает решение, вида операции и того, кто ее выполняет – человек или техническая система/компьютер (табл. 1) [23, 40-42]. Систематизация ШИВ включает вопросы обратной связи, определение и выбор вариантов, связанных с распределением задач между человеком и технической системой, компьютером. Эта шкала также является одной из наиболее подробных классификаций, которые можно найти в литературе с точки зрения определения того, что оператор (человек) и техническая система (компьютер для информации и контроля) должны выполнять на разных уровнях LOA, и как они должны взаимодействовать [42].

Таблица 1. 10 уровней автоматизации (LOA) по Т. Шеридану и В. Вепланку [42]

LOA	Описание
10	Компьютер решает все и действует автономно, игнорируя человека
9	Компьютер выполняет операции автоматически и информирует человека, только если он (компьютер) решит
8	Компьютер выполняет операции автоматически и информирует человека, только если компьютер "спросит"
7	Компьютер выполняет операции автоматически, обязательно информируя человека
6	Компьютер предлагает одну альтернативу и выполняет это предложение, если человек в течение ограниченного времени не накладывает вето на автоматическое выполнение операции
5	Компьютер предлагает одну альтернативу и автоматически выполняет это предложение, если человек соглашается
4	Компьютер предлагает одну альтернативу
3	Компьютер предлагает полный набор решений/действий, альтернативы и сужает выбор до нескольких вариантов
2	Компьютер предлагает человеку полный набор решений /действий, альтернативы
1	Компьютер не предлагает помощь: человек должен принимать решения и выполнять все действия сам

Метод LOA Сообщества автомобильных инженеров. В 2018-21 годах специалисты Сообщества автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE) представили обновлённые версии стандарта SAE J3016 «Системы автоматизированного управления движением АТС. Классификация, термины и определения», который впервые был опубликован в 2014 году [32, 39]. Рассматриваемый стандарт является наиболее цитируемым справочником в области автоматизации транспортных средств. В этом документе представлены 6 уровней системы автоматизации вождения транспортных средств,

описывающие полный спектр автоматизированных функций, которые выполняют часть или всю задачу динамического вождения (DDT) на постоянной основе в контексте эксплуатации транспортных средств на дорогах: 0) нет автоматизации вождения; 1) система помощи водителю; 2) частичная автоматизация вождения; 3) условная автоматизация вождения; 4) высокая степень автоматизации вождения; 5) полная автоматизация вождения.

При этом, системы активной безопасности, такие, как электронный контроль устойчивости (ESC) и автоматическое экстренное торможение (АЕВ), система помощи при удержании в полосе движения (LKA), а также те системы, которые только информируют, предупреждают или предупреждают водителя об опасностях в условиях вождения, исключены из области предложенной таксономии автоматизации вождения. Объясняется это тем, что они не выполняют часть или весь DDT на постоянной основе, а скорее обеспечивают мгновенное вмешательство во время потенциально опасных ситуаций.

Для разъяснения и упрощения уровней автоматизации вождения по стандарту J3016 маркетинговая группа SAE совместно с Комитетом по техническим стандартам представили сводную таблицу (рис. 1).

	SAE УРОВЕНЬ 0	SAE УРОВЕНЬ 1	SAE УРОВЕНЬ 2	SAE УРОВЕНЬ 3	SAE УРОВЕНЬ 4	SAE УРОВЕНЬ 5
Что должен делать человек на месте водителя?	Вы <u>управляете</u> автомобилем, когда используются эти системы, даже если ваши ноги не находятся на педалях, а руки – на руле			Вы <u>не управляете</u> автомобилем, когда задействованы эти системы, даже если вы находитесь в «кресле водителя»		
	Вы должны постоянно контролировать эти системы: рулить, тормозить или ускоряться по мере необходимости для поддержания безопасности			По запросу системы вы должны взять управление на себя	Эти системы автоматизированного вождения не потребуют от вас управления	
	Системы помощи водителям			Системы автоматизированного вождения		
Что делают эти системы?	Эти системы могут предупреждать или предоставлять кратковременную помощь	Эти системы обеспечивают помощь в рулевом управлении ИЛИ торможении/ ускорении	Эти системы обеспечивают помощь в рулевом управлении ИЛИ торможении/ ускорении	Эти системы могут управлять автомобилем в ограниченных условиях и не будут работать, пока не будут выполнены все необходимые условия		Эти системы могут управлять автомобилем в любых условиях
Пример использования систем	<ul style="list-style-type: none"> автоматическое экстренное торможение предупреждение о слепых зонах предупреждение о выходе из полосы движения 	<ul style="list-style-type: none"> удержание в полосе движения ИЛИ ЖЕ адаптивный круиз-контроль 	<ul style="list-style-type: none"> удержание в полосе движения А ТАКЖЕ адаптивный круиз-контроль (одновременно) 	<ul style="list-style-type: none"> ассистент движения в пробках 	<ul style="list-style-type: none"> беспилотное местное такси педали и рулевое колесо могут отсутствовать 	<ul style="list-style-type: none"> то же, что на уровне 4, но система может использоваться в любых условиях

Рис. 1. Уровни автоматизации согласно SAE J3016-2021 [Источник: 32, 39, 43]

Методы двух и трех осей. Серьезные исследования понятия автономности были проведены военными США. Еще в начале 21 века в военных ведомствах началась разработка технологий, моделей и методов оценки уровня автономности боевых аппаратов, которые

используются и развиваются до последнего времени. Концепция оценки уровней автономии военных беспилотных аппаратов базируется на следующих факторах:

1. Человеческий интерфейс, т.е. уровень зависимости от человека, может быть оценен с помощью таких показателей, как время и частота взаимодействия, рабочая нагрузка оператора, уровни квалификации, инициирование робота и т.д.
2. Сложность миссии, измеряется с помощью таких показателей, как уровни выполнения подзадач, принятия решений и совместной работы, требования к знаниям и восприятию, эффективность планирования и исполнения и т.д.
3. Сложность окружающей среды, может быть измерена с помощью размера препятствий, плотности и движения, типов местности, характеристик городского движения, способности распознавать друзей / врагов / случайных прохожих и т.д.

Указанные факторы касаются беспилотных систем, как мобильных, так и стационарных. Включают следующие категории оцениваемых средств: беспилотные наземные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты, беспилотные подводные транспортные средства, беспилотные надводные транспортные средства, необслуживаемые боеприпасы и необслуживаемые наземные датчики.

Графическое представление этой концепции приведено на рис. 2.

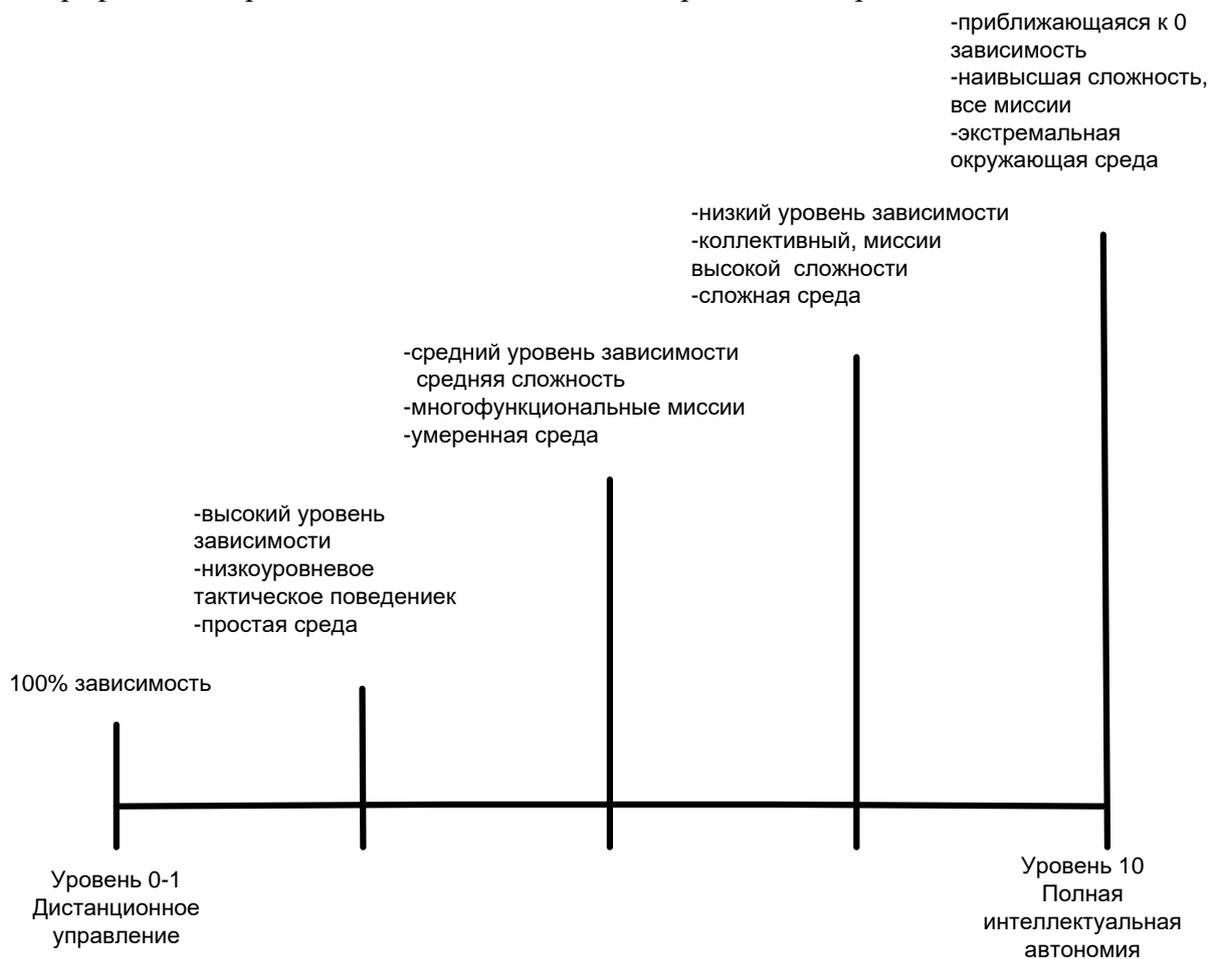


Рис. 2. Уровни автономности [Источник: 44]

Метод двух осей ALC. Шкала уровней автономного управления по двум параметрам ACL, опубликованный в технических отчетах Министерства обороны США по беспилотным летательным аппаратам 2001-2030 гг. [26-28], является наиболее репрезентативным методом, в котором горизонтальная ось – это время в период от 1955 по 2025 г.г. с шагом 10 лет, а ось ординат – уровень автономности беспилотной системы (10 уровней). Этот метод может

наглядно продемонстрировать цели, а также прогнозные варианты разработки беспилотных средств относительно эпохи развития соответствующего уровня автономии.

Метод трех осей ALFUS. В 2001-2004 годах Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST) был опубликован ряд фреймворков, в которых автономия также характеризуется указанными выше тремя факторами. На основе фреймворков разработан метод оценки уровня автономности беспилотной системы ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned Systems), предложенный в [29-31], который является типичной системой оценивания по трем переменным. Показатели автономности (наборы метрик), определяющие уровень автономности, как показано на рис. 3, сведены в «пространство» автономности».

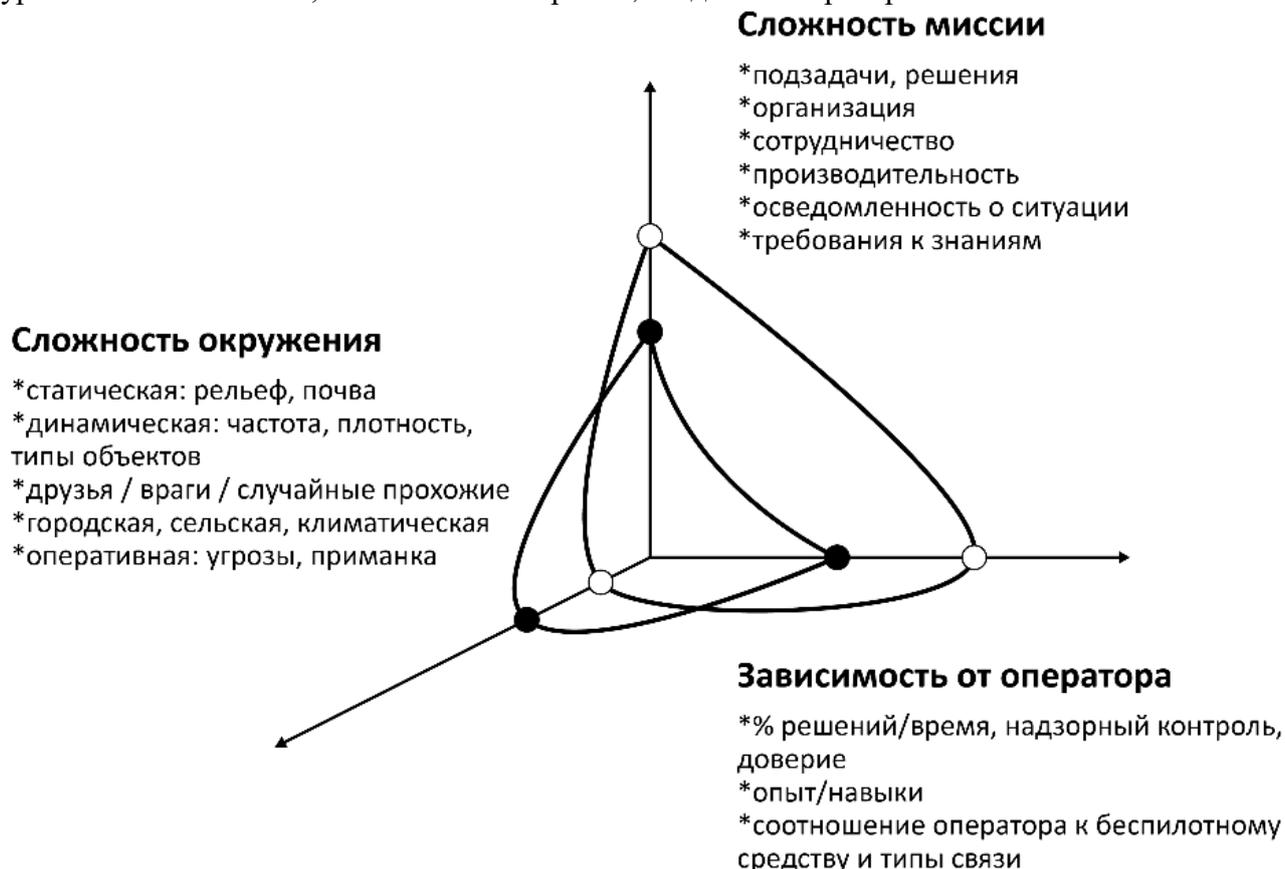


Рис. 3. Показатели для определения уровня автономности, предложенные группой ALFUS («пространство автономии») [Источник: 29-31, 44]

Изогнутые линии указывают на то, что пользователи для определения результирующих уровней автономности каждого из средств могут руководствоваться некоторыми сложными алгоритмами, в отличие от простых, средневзвешенных. Кривые линии также подразумевают, что они могут быть использованы для определения максимальных возможностей, т.е. беспилотное средство может работать при любой комбинации сложности / затрудненности/ независимости, которая лежит на поверхностях или под ними.

В работе [20] описан метод оценки уровня автономности для беспилотных морских судов, в котором три базовых фактора из фреймворка ALFUS достаточно подробно декомпозируются еще тремя уровням. На рис. 4 для примера показана онтология фактора «Сложность окружающей среды»; описание остальных факторов можно найти в указанном источнике.

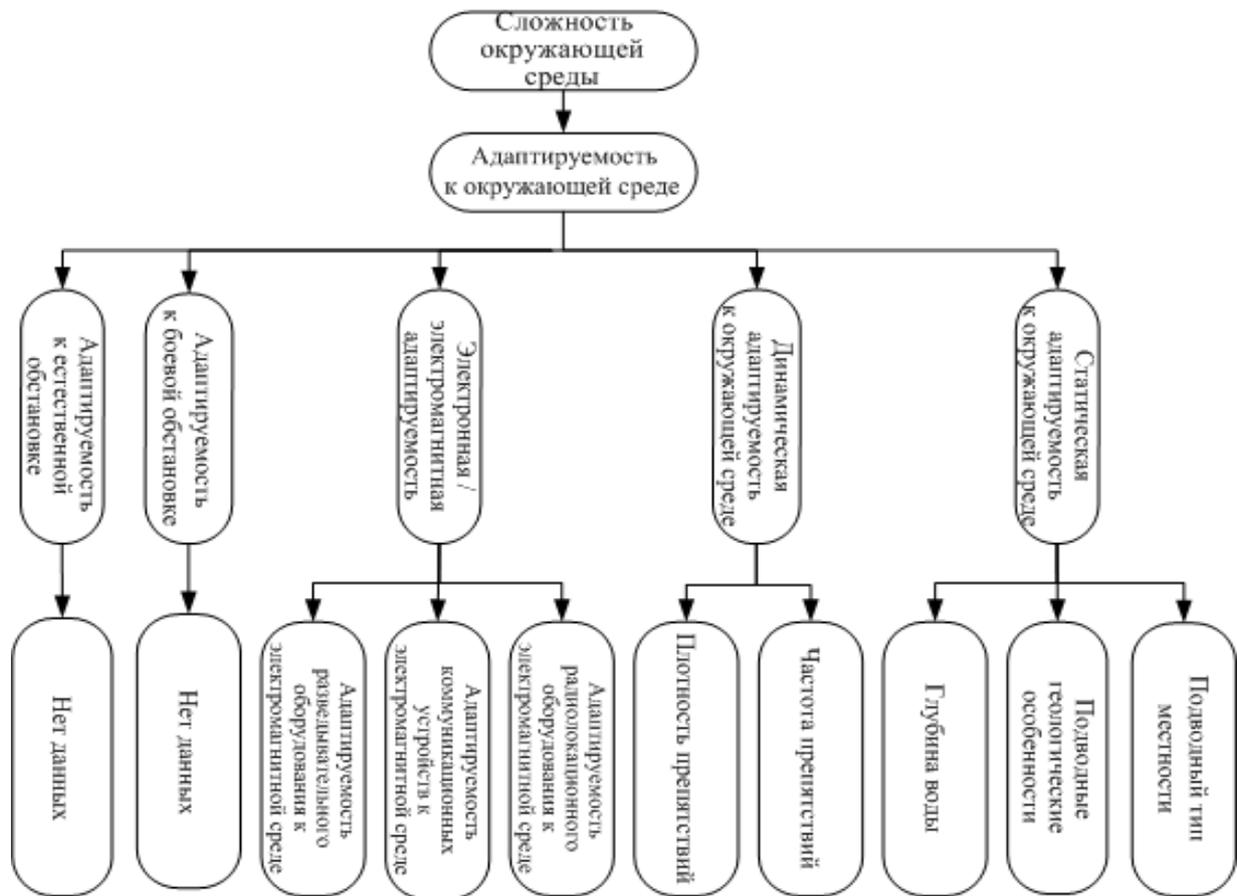


Рис. 4. Онтология фактора «Сложность окружающей среды» фреймворка ALFUS

Интегральный метод LOA для самоконфигурируемых роботов (ТАЕV).

Самореконфигурируемые (SR) роботы – это машины, которые могут изменять свою морфологию в соответствии с предписанными требованиями или адаптацией к окружающей среде в целях обеспечения их мультифункциональности, эволюционируемости и выживаемости [45].

Обычно самореконфигурируемые роботы являются модульными роботами (MSR), компоненты которых могут автономно организовываться в различные конфигурации. Модуль определяется, как фундаментальная единица модульного робота, где каждый модуль является независимым роботом, который может реагировать на команду. Конфигурация представляет собой связанный набор модулей, которые действуют, как единый тождественный или сформированный робот.

Самореконфигурируемые роботы основаны на реконфигурируемости механизма и уровне автономности для реконфигурации. При этом реконфигурируемость механизма роботов делится на два типа:

1. Интерреконфигурируемость (Inter-Reconfigurability) – конгрегация модульных роботов, способных формировать различные морфологии посредством непрерывного процесса сборки/разборки на уровне его модульных частей.
2. Внутрисистемная реконфигурируемость (Intra-Reconfigurability), т.е. изменение конфигурации робота за счет адаптивности морфологии, а не за счет сборки/разборки его роботизированных компонентов. Возможность реконфигурации обеспечивает мультимодальное перемещение, где каждая преобразованная конфигурация соответствует определенному режиму локомоции.

Реконфигурируемость самонастраивающихся роботов определяется не только реконфигурируемостью механизма, но и уровнем его *автономности*, под которой понимается степень, в которой самореконфигурируемый робот может *ощущать* окружающую среду, *планировать* свою конфигурацию на основе этой среды и *действовать*, чтобы трансформироваться в определенные конфигурации в этой среде с намерением достичь некоторой цели (заданной человеком или созданной самим роботом) [45].

На основе этого определения, а также с учетом введенной выше типологии MSR, в [45] предлагается метод оценки уровня автономности, названный фреймворком TAEV для самонастраивающихся роботов и основанный на распознавании типа механизма и уровня автономности в аспекте реконфигурируемости этих роботов (см. рис. 5). В основе метода лежит триадная система, в которой оси X и Y представляют собой интер- и внутривнутриреконфигурируемость соответственно, а ось Z представляет собой уровень способности к автономной реконфигурируемости, которая рассматривается с точки зрения трех связанных друг с другом характеристик: чувствование внешней среды, (sense environment), планирование действий (plan configuration), совершение реконфигурации (act reconfiguration); 10 уровней реконфигурируемости автономности варьируются от ручного телеуправления к полностью автономным системам.

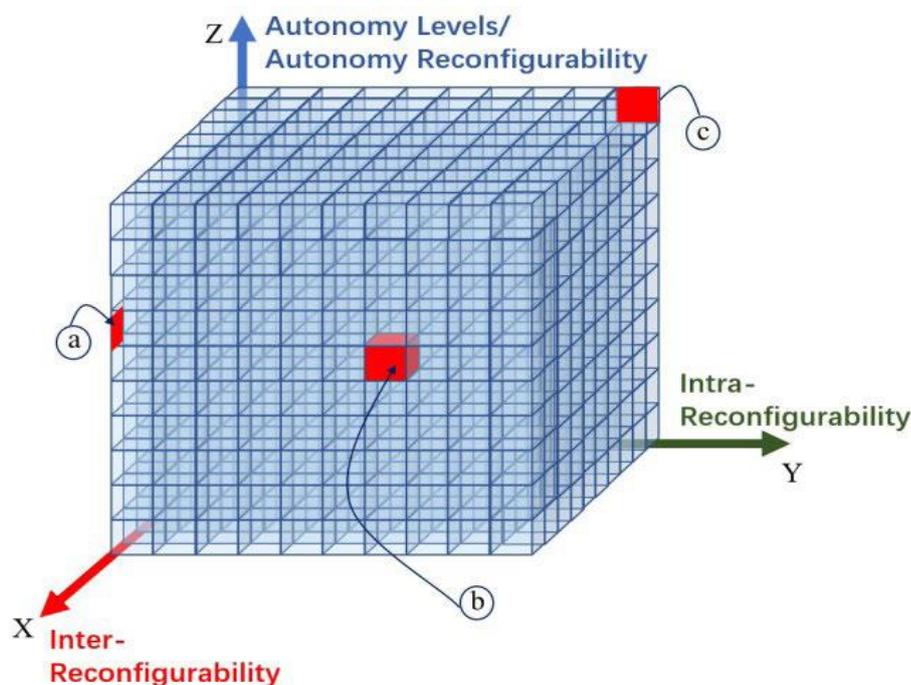


Рис. 5. Визуальное представление трех осей предлагаемой структуры TAEV, где вдоль каждой оси показано десять категорий, а каждый куб представляет категорию, к которой принадлежит самореконфигурируемый робот [Источник 45]

Шкала оценки уровня автономности к рис. 5 показана на рис. 6. Таким образом, изложенный фреймворк включает как уровневый подход LOA (оценка автономной реконфигурируемости), так и осевой метод.

Метод паутины. Метод демонстрируется на примере оценки автономности реконфигурируемости для самореконфигурируемых роботов (рис. 7) [45]. Очевидно, что выбор осей паутины осуществляется экспертным путем в зависимости от целей исследования и предметной области.

Autonomy Reconfigurability	Level	Functions			Description
		Sense	Plan	Act	
Manual teleoperated reconfiguration	0	M	M	M	The task including sensing the environment and monitoring the system, generating plans/options/goals, and implementation are performed manually.
Pre-defined reconfiguration pattern	1	M/R	M/R	M/R	The human is assisted by the robot to determine the reconfiguration options. However, human carries sensing and planning. The robot then implements the reconfiguration that the human chooses.
Teleoperation assisted by reconfiguration	2	M/R	M/R	M/R	Human intervention is there in selecting the reconfiguration option suggested by the robot during operating it remotely.
Task intervention by reconfiguration	3	M/R	M/R	R	The robot senses the surrounding and decides to involve in the task in the way of reconfigurations.
Reconfiguration decision Support	4	M/R	R	R	Both the robot and human sense the environment and plan for reconfiguration. Whereas, the task is selected manually and command to implement it is given to robot.
Shared control of reconfiguration with human initiative	5	M/R	R	R	The robot does all aspects of the task. Whereas, the human may intervene and influence the robot's progress in reconfiguration.
Shared control of reconfiguration with robot initiative	6	M/R	M/R	R	The robot performs all part of assignment. In case the robot encounters difficulties, the manual intervention prompts for setting new configurations.
Supervisory control of reconfiguration	7	M/R	R	M/R	The robot performs all parts of the assignment, but manual override option is available in setting new configurations.
Executive control of reconfiguration	8	R	M/R	R	The human may give a set goal. The robot sense, plan and implement reconfiguration autonomously.
Fully autonomous reconfigurability	9	R	R	R	All aspects of the task are performed by the robot without any human intervention.
Collaborative reconfigurability	10	R	R	R	The robot not only can perform tasks on its own but also can collaborate and help human using reconfiguration.

M: Manual or human R:Robot, Sense: Sense environemnt, Plan: plan configuration, Act: Act or execute reconfiguration

Рис. 6. Таблица уровней автономности реконфигурируемости для характеристик чувствования, планирования, действия по реконфигурируемости [Источник 45]

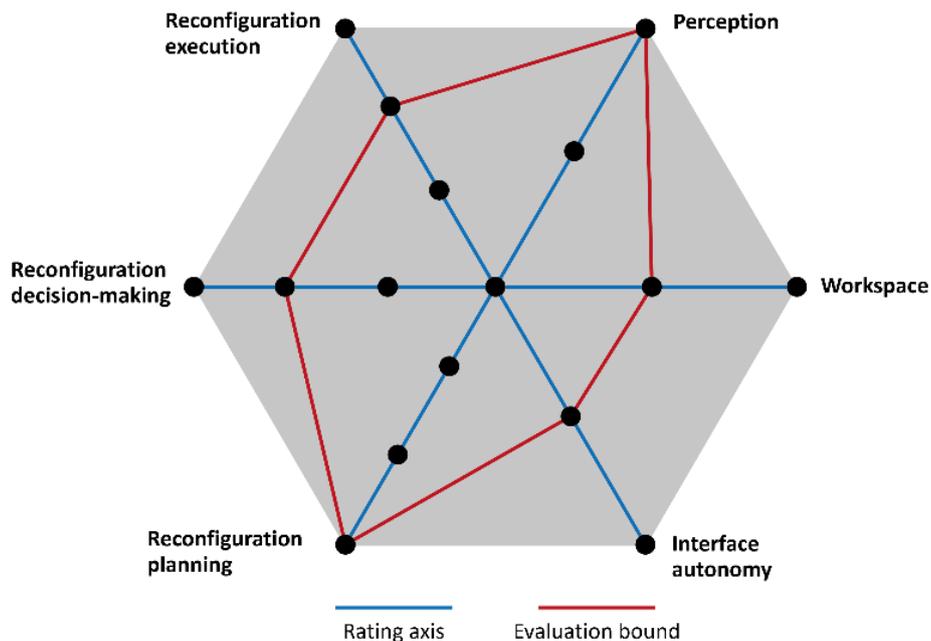


Рис. 7. Модель оценки «паутины» для оценки автономности реконфигурируемости самореконфигурируемых роботов [Источник 45]

Предлагаемая в [45] модель оценки паутины состоит из шести показателей производительности, которые представляют собой:

1. Восприятие, оценивает сенсорную способность самореконфигурируемого робота. Это не прямой фактор, связанный с реконфигурируемостью, но показывающий потенциал к автономной реконфигурации, в том смысле, что робот с большим уровнем восприятия сможет выполнить реконфигурацию автономно по сравнению с человеком с более слабой способностью к восприятию. Классифицируется по двум градациям (0 - 2), где 0 обозначает отсутствие датчиков; 1 – среднюю способность восприятия; 2 – полную способность восприятия.

2. Рабочее пространство, классифицируется по двум градациям (0 - 2), где 0 обозначает точку, 1 – реконфигурация может происходить только в 2D-плоскости.
3. Уровень автономности интерфейса представлен двумя градациями (0 - 2), где 0 – ручное присоединение или отсоединение; 1 – ручное присоединение и автономное отсоединение; 2 – автономное присоединение и отсоединение.
4. Планирование реконфигурации, обозначается тремя степенями (0 - 3). Этот показатель оценивает автономность в аспекте планирования реконфигурации. 0 – у робота нет возможности планирования; 1 – робот обеспечивает поддержку для планирования стратегии реконфигурации; 2 – робот руководит разработкой стратегии планирования, но человек контролирует процесс; 3 – робот разрабатывает стратегию планирования без какого-либо вмешательства человека.
5. Принятие решений о реконфигурации, обозначается тремя степенями (0 - 3), где 0 – решение принимается исключительно людьми; 1 – робот предоставляет консультативное решение; 2 – робот руководит принятием решений, но человек контролирует процесс; 3 – робот принимает решение без какого-либо вмешательства человека.
6. Выполнение реконфигурации, обозначается тремя степенями (0 - 3). 0 – выполнение выполняется исключительно людьми; 1 – робот обеспечивает вспомогательные действия для выполнения; 2 – робот руководит выполнением, но человек контролирует процесс; 3 – робот проводит выполнение без какого-либо вмешательства человека.

После определения значений индикаторов по всем осям, автономность реконфигурируемости I_{AUTO} может быть рассчитана по формуле

$$I_{AUTO} = \frac{A_{ocp}}{A_{total}} * 10,$$

где A_{ocp} – занимаемая площадь, полученная путем соединения значений оценок индикаторов для конкретного самореконфигурируемого робота, а именно площадь внутри красной границы оценки; A_{total} – общая площадь шестиугольника.

Модель оценки наземных транспортных средств на основе нечеткой логики.

Модель нечеткой комплексной оценки, разработанная китайскими исследователями [35-37], позволяет находить количественные оценки поведения при движении наземных транспортных средств в условиях нечетких и трудно поддающихся количественной оценке ситуациях. В основе модели лежит известный метод анализа иерархий Т.И. Саати. Предлагаемая в [37] система оценки больше связана с тем, насколько качественно автономные наземные транспортные средства выполняют поставленную задачу, а не с тем, выполнит ли транспортное средство поставленную задачу в отведенное время. С помощью метода нечеткой оценки авторы предлагают количественно оценить как общие, так и индивидуальные технические характеристики автономных наземных транспортных средств при автономном движении.

На рисунке 8 представлено критериальное дерево многоуровневой комплексной системы оценки в рамках модели, которое отображает:

1. Аспекты оценки с точки зрения: а) базового восприятия беспилотными наземными транспортными средствами сложности окружающей среды, б) интеллектуального поведенческого принятия решений при восприятии препятствий окружающей среды.
2. Элементы оценки: VCB – поведение транспортного средства при его самоуправлении; BDB – базовое поведение в процессе вождения; BTV – базовое поведение при дорожном движении; ADB – уровень интеллектуальности при принятии решений; НТВ – поведение в условиях интенсивного дорожного движения.

3. Факторы оценки: начало движения; парковка; удержание полосы движения; препятствие; разворот; остановочная линия; запрещение движения задним ходом; соблюдение дистанции; пересечение; динамическое планирование; GPS-навигация; распознавание дорожных знаков; распознавание сигналов; экстренное торможение.

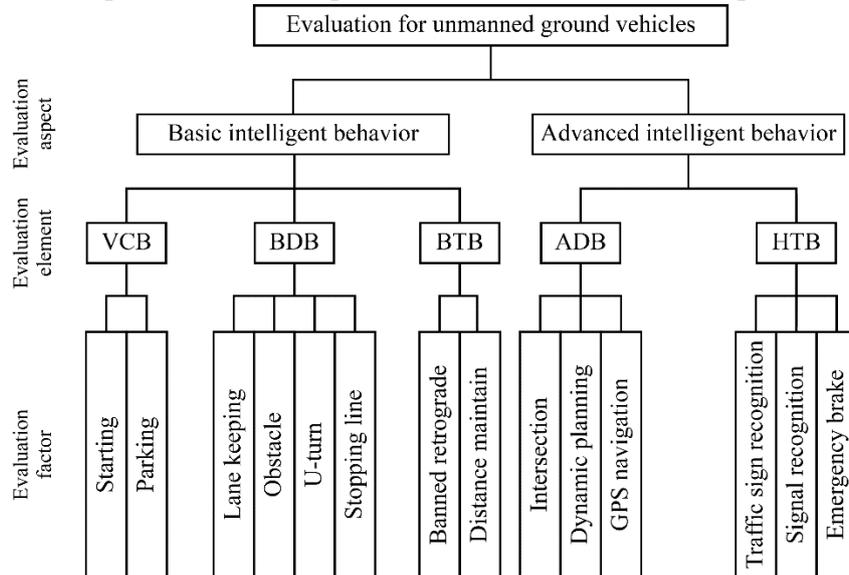


Рис. 8. Критериальная система модели нечеткой комплексной оценки [Источник 37]

На рисунке 9 представлена таблица результатов оценки движения автономных наземных транспортных средств, которые сделаны методом нечеткой оценки.

Evaluation aspect	Evaluation element	Evaluation factor	Evaluation grade V											
			v_1	v_2	v_3	v_4	v_5							
No i	u_i	a_i	No j	u_{ji}	a_{ji}	No k	u_{kij}	a_{kij}	Fuzzy matrix					
									Very good	Good	So-so	Bad	Very bad	
1	BIB	0.33	1	VCB	0.13	1	Starting	0.33	0.2	0.7	0.1	0	0	
						2	Parking	0.67	0.1	0.4	0.3	0.2	0	
	2	BDB	0.59	1	BDB	0.59	1	Lane Keeping	0.21	0	0.5	0.3	0.2	0
							2	Obstacle	0.11	1	0	0	0	0
							3	U-turn	0.57	0	0.4	0.6	0	0
							4	Stopping line	0.11	0	0	0	0.2	0.8
	3	BTB	0.28	1	BTB	0.28	1	Banned retrograde	0.7	0	0	0.2	0.3	0.5
							2	Distance maintain	0.25	0.3	0.7	0	0	0
	2	AIB	0.67	1	ADB	0.67	1	Intersection	0.31	0.2	0.6	0.2	0	0
							2	Dynamic planning	0.58	0.4	0.6	0	0	0
3							GPS navigation	0.11	0.3	0.7	0	0	0	
2		HTB	0.33	1	HTB	0.33	1	Traffic sign recognition	0.25	0	0	0	0	1
							2	Signal recognition	0.5	0	0	0	0	1
							3	Emergency brake	0.25	0.2	0.8	0	0	0

Рис. 9. Результаты оценки движения автономных наземных транспортных средств, полученных на основе модели нечеткой комплексной оценки [Источник 37]

Заключение. В работе рассмотрены различные подходы к пониманию термина «автономия», описаны понятия «сильная» и «слабая» автономность ТС. Показано, что автоматизированное ТС приобретает свойство автономности в том случае, когда ее программное обеспечение включает алгоритмы искусственного интеллекта. Дается подробный обзор методов и моделей оценки автоматизации для различных предметных областей. Представлены зарубежные и отечественные источники, содержащие различные

критерии оценки уровня автономности ТС. Однако все они основаны на экспертных субъективных оценках и достаточно сильно зависят от предметной области.

Таким образом, нужны более строгие методы оценок уровня автономности, как при проектировании автономных систем, так и при их внедрении. При этом, поскольку, с одной стороны, свойство «автономность» надо рассматривать, как результат развития процессов автоматизации когнитивных форм деятельности человека, а с другой – как свойство интеллектуальных систем, его содержание определяется как внутренним, так и внешним контентом. Поэтому, как сложное понятие, его можно характеризовать онтологической моделью, то есть структурой определяющих его параметров. Дальнейшие исследования и развитие результатов статьи предполагается направить на построение семантических структур с учетом таких свойств, как ментальные характеристики, мотивация, степень удовлетворенности выбора, цели, обязательства и т.п.

Следует также отметить, что, если «автономность» ТС выступает, как свойство искусственного разума за счет внедрения элементов искусственного интеллекта, то в идеальном случае необходимо разрабатывать методы, основанные на критериях оценивания степени интеллектуальности алгоритмов программного обеспечения таких систем. Формальных же методов, посвященных измерению уровней сильной автономности с точки зрения содержания в алгоритмах интеллектуальных качеств, имитирующих когнитивные способности человеческого мозга, как показал анализ источников, не существует. Исследования в этой области были бы крайне перспективны, т.к. позволили бы перейти от субъективизма в оценках к обоснованным суждениям.

Список источников

1. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях / Л.С. Болотова – ФГБОУ ВПО РГУИТП, ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информатика». – М.: Финансы и статистика. – 2012. – 664 с.
2. Сачков Ю.В. Автономность / Ю.В. Сачков, М.А. Можейко // Гуманитарный портал: концепты. – 2002-2025. – URL: <https://gtmarket.ru/concepts/7169> (дата обращения: 20.08.2025).
3. Parasuraman, R. and Riley, V., 1997. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, 39(2), pp.230-253.
4. IEC 60050-351:2013. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 351: Control Technology.
5. Rødseth Ø.J., Vagia M. A taxonomy for autonomy in industrial autonomous mobile robots including autonomous merchant ships. *IOP Conference series: materials science and engineering*, 2020, vol. 929, p. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/929/1/012003.
6. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – Москва, Стандартинформ, 2023.
7. Нестеров С.А. Адаптивные системы управления: Конспект лекций. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – 90 с.
8. Rødseth Ø.J. Defining ship autonomy by characteristic factors. *Proceedings of the 1st International conference on maritime autonomous surface ships*. SINTEF Academic Press, 2019.
9. Liu S., Ru Y., Wang K. The new progress in the evaluation method of Drone autonomy. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019, no. 2, pp. 43–49.
10. Gunderson J., Gunderson L. Intelligence ≠ Autonomy ≠ Capability. *The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, 2004.
11. Clough B. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway. *The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent System Workshop*, 2002.
12. Yan Y., Tang Z., Lu J. Research on autonomy evaluation of ground intelligent robot. *Journal of Huazhong University of science & technology*, 2011, vol. 39, Sup. II, pp. 68-71.
13. ISO. Input document to IMO Maritime Safety Committee, Session 102. Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), Proposed terminology for MASS. International Organization for Standardization, 2020.
14. ГОСТ Р 60.6.0.1-2021. Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2021.

15. ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – Москва: Стандартинформ, 2021.
16. Beer J.M., Fisk A.D., Rogers W.A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 74-99, DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer.
17. Autonomic Computing. Overview. The 8 Elements. 2001. Available at: <https://web.archive.org/web/20111231083818/http://www.research.ibm.com/autonomic/overview/elements.html> (accessed: 08.20.2025).
18. Huang H., Albus J., Messina E. et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. *Proceedings of the 2004 SPIE Defense and Security Symposium*, 2004, pp. 386–397, DOI:10.1117/12.552074.
19. Wang Y., Liu J., Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems. *Chinese Science Bulletin*, 2012, vol. 57(15), pp. 1290–1299, DOI: 10.1007/s11434-012-5183-2.
20. Lei S., Chen J., Hu J., et al. An Evaluation method of autonomy for marine unmanned vehicles. 2020 IEEE 9th Data driven control and learning systems conference, 2020, pp. 99-104, DOI: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275092.
21. Бойченко А.В. Методологические аспекты целеполагания при переходе к цифровой экономике / А.В. Бойченко, О.В. Лукинова // *Открытое образование*, 2018. – Т. 24. – № 4. – С. 74-83.
22. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий. – М.: СИНТЕГ, 2005. – 224 с.
23. Sheridan T.B., Verplank W.L. *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Systems Laboratory, 1978.
24. Sheridan T.B. *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. The MIT Press, 1992.
25. Sheridan T.B. Automation, authority and angst – revisited. *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting*, 1991, pp. 18–26.
26. Office of the Secretary of Defense, *Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000–2025*, Technical Report, 2001.
27. Office of the Secretary of Defense, *Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2002–2027*, Technical Report, 2002.
28. Office of the Secretary of Defense, *Unmanned Aircraft System Roadmap 2005–2030*, Technical Report, 2005.
29. Huang H., Albus J., Messinan E., et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. *The Proceedings of the 2004 SPIE Defense and security symposium conference*, 2004, pp. 386–397.
30. Huang H., Pavsek K., Novak B. et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS). *Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America Conference*, 2005, pp. 849–863.
31. Huang H. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) framework: Safety and application issues. *The Proceedings of the performance metrics for intelligent systems workshop*, 2007, pp. 48–53.
32. SAE International. *Surface Vehicle Recommended Practice J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2016, DOI: 10.4271/J3016_201609.
33. Lloyd's Register. *Cyber-enabled ships Ship Right procedure – autonomous ships*. First edition, July 2016.
34. IEC 62267:2009. *Automated urban guided transport – Safety requirements*. International Electrotechnical Commission, 2009.
35. Yang Z., Zhang R. Fuzzy evaluated method for the autonomy levels of unmanned system. *Journal of Chinese computer systems*, 2009, vol. 30, no. 10, pp. 2043–2047.
36. Li J., Tang Z., Tan Y., et al. Research on autonomous capability evaluation of unmanned ground vehicles. *Science discovery*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 12–20, DOI:10.11648/j.sd.20160401.13.
37. Sun Y., Tao G., Xiong G., et al. The Fuzzy-AHP Evaluation Method for Unmanned Ground Vehicles. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 653-658, DOI:10.12785/amis/070232.
38. Young L., Yetter J., Guynn M. System analysis applied to autonomy: Application to high-altitude long-endurance remotely operated aircraft. *Proceedings of Infotech@ Aerospace Conference*, 2005, p. 7103, DOI: 10.2514/6.2005-7103.
39. SAE J3016 (2018). Системы автоматизированного управления движением АТС. Классификация, термины и определения. – SAE, 2018. – 35 с. – DOI: 10.4271/J3016_201806.
40. Frohm J., Stahre J., Winroth M. Levels of Automation in Manufacturing. *International Journal of Ergonomics and Human Factors*, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 287-299.
41. Кораблев И.Г. Оценка уровня автоматизации бизнес-процессов предприятия / И.Г. Кораблев // *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2016. – № 1. – С. 17-24.
42. Кузьмин Ю.Б. Шкалирование уровня автоматизации на производстве / Ю.Б. Кузьмин // *Информационные технологии*, 2020. – Т. 26, № 2. – С. 116-127. – DOI: 10.17587/it.26.116-127.
43. Шадрин С.С. Аналитический обзор стандарта SAE J3016 «Классификация, термины и определения систем автоматизированного управления движением АТС» с учетом последних изменений / С.С. Шадрин, А.А.

- Иванова // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура, 2019. – № 3(21). – URL: https://www.adi-adi.ru/madi/article/download/811/pdf_478 (дата обращения: 13.07.2025).
44. Соколов С.М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов / С.М. Соколов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2023. – № 1. – С. 65-76. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76.
45. Tan N., Hayat A.A., Elara M.R., Wood K.L. A Framework for Taxonomy and Evaluation of Self-Reconfigurable Robotic Systems. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 13949-13964, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965327.

Лукинова Ольга Васильевна. Доцент, доктор технических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ведущий научный сотрудник, Российский технологический университет МИРЭА, профессор кафедры информационной безопасности. Направления исследований: программная и системная инженерия, принятие решений, искусственный интеллект, инженерия знаний, информационная безопасность. AuthorID 142037, SPIN 4361-0837, ORCID 0000-0002-5576-7749. lobars@mail.ru. ИПУ РАН, 117997, ГСП-7, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 45

UDC 004.896 004.031

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.002

Overview of the current state of understanding the concept of “autonomy of technical means”

Olga V. Lukinova

Institute of Control Sciences RAS,

Russia, Moscow, lobars@mail.ru

Abstract. The article provides an overview of some issues related to the technical devices' autonomy subject domain in its current state. Today, this concept does not have a clear methodological or formalized definition, which, in the context of the transition to digital technologies, seems to be a significant problem when designing devices with artificial intelligence elements and a given degree of autonomy. Various approaches to understanding the term "autonomy" are described, emphasizing that autonomy should be viewed as a further development of a technical device's automation properties, along with its automatism and adaptability. The concepts of "strong autonomy" and "weak autonomy," used by some foreign experts and related to the automation properties of a technical system, are discussed. Foreign and domestic sources containing various criteria for assessing the level of autonomy are presented. It is shown that the evaluation indicators are purely expert and informal in nature and do not relate to the essential quality of the autonomy of a technical device, but to the result of its functioning. Thus, when deciding on the assessment of the device autonomy level, decision-making algorithms in unstructured areas should be used, based on the convolution of a vector criterion, which is hierarchical in nature. Thus, the purpose of this work is to show, by analyzing numerous sources, the limitations of the scientific and methodological apparatus for assessing such a complex concept as device autonomy, which today is based solely on the subjective judgments of the observer, as well as the need to move to formal or at least formalized methods.

Keywords: automation, autonomy, technical system, assessment of autonomy level

References

1. Bolotova L.S. Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tekhnologii, osnovannye na znaniyakh [Artificial intelligence systems: models and technologies based on knowledge]. Moscow, Finansy i statistika [Finance and statistics] Publ., 2012, 664 p.
2. Sachkov Yu.V., Mozheiko M.A. Avtonomnost' [Autonomy]. Gumanitarnyy portal: kontsepty [Humanities Portal: Concepts], 2002-2025. Available at: <https://gtmarket.ru/concepts/7169> (accessed: 08/20/2025).
3. Parasuraman, R. and Riley, V., 1997. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. Human factors, 39(2), pp.230-253.
4. IEC 60050-351:2013. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 351: Control Technology.

5. Rødseth Ø.J., Vagia M. A taxonomy for autonomy in industrial autonomous mobile robots including autonomous merchant ships. IOP Conference series: materials science and engineering, 2020, vol. 929, p. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/929/1/012003.
6. GOST R 60.0.0.4-2019/ISO 8373:2012 Roboty i robototekhnicheskie ustrojstva. Terminy i opredeleniya [Robots and robotic devices. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2023.
7. Nesterov S.A. Adaptivnyye sistemy upravleniya: Konspekt lektsiy [Adaptive control systems: lecture notes]. Saint Petersburg, SPbGPU [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University] Publ., 2005, 90 p.
8. Rødseth Ø.J. Defining ship autonomy by characteristic factors. Proceedings of the 1st International conference on maritime autonomous surface ships. SINTEF Academic Press, 2019.
9. Liu S., Ru Y., Wang K. The new progress in the evaluation method of Drone autonomy. Aerodynamic Missile Journal, 2019, no. 2, pp. 43–49.
10. Gunderson J., Gunderson L. Intelligence ≠ Autonomy ≠ Capability. The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2004.
11. Clough B. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway. The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent System Workshop, 2002.
12. Yan Y., Tang Z., Lu J. Research on autonomy evaluation of ground intelligent robot. Journal of Huazhong University of science & technology, 2011, vol. 39, Sup. II, pp. 68-71.
13. ISO. Input document to IMO Maritime Safety Committee, Session 102. Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), Proposed terminology for MASS. International Organization for Standardization, 2020.
14. GOST R 60.6.0.1-2021 Roboty i robototekhnicheskie ustrojstva. Servisnye mobil'nye roboty. Urovni avtonomnosti. Terminy i opredeleniya [Robots and robotic devices. Service mobile robots. Levels of autonomy. Terms and definitions] Moscow, Standartinform Publ., 2021.
15. GOST R 59277—2020 Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikaciya sistem iskusstvennogo intellekta [Artificial Intelligence Systems. Classification of Artificial Intelligence Systems] Moscow, Standartinform Publ., 2021.
16. Beer J.M., Fisk A.D., Rogers W.A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. Journal of Human-Robot Interaction, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 74-99, DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer.
17. Autonomic Computing. Overview. The 8 Elements. 2001. Available at: <https://web.archive.org/web/20111231083818/http://www.research.ibm.com/autonomic/overview/elements.html> (accessed: 08.20.2025).
18. Huang H., Albus J., Messina E. et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. Proceedings of the 2004 SPIE Defense and Security Symposium, 2004, pp. 386–397, DOI:10.1117/12.552074.
19. Wang Y., Liu J., Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems. Chinese Science Bulletin, 2012, vol. 57(15), pp. 1290–1299, DOI: 10.1007/s11434-012-5183-2.
20. Lei S., Chen J., Hu J., et al. An Evaluation method of autonomy for marine unmanned vehicles. 2020 IEEE 9th Data driven control and learning systems conference, 2020, pp. 99-104, DOI: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275092.
21. Boychenko A.V., Lukinova O.V. Metodologicheskiye aspekty tselepolaganiya pri perekhode k tsifrovoy ekonomike [Methodological aspects of goal setting in the transition to a digital economy]. Otkrytoye obrazovaniye [Open education], 2018, vol. 24, no. 4, pp. 74-83.
22. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka formirovaniya tseley i strategiy [Computer Support for Forming Goals and Strategies]. Moscow, SINTEG Publ., 2005, 224 p.
23. Sheridan T.B., Verplank W.L. Human and computer control of undersea teleoperators. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Systems Laboratory, 1978.
24. Sheridan T.B. Telerobotics, automation, and human supervisory control. The MIT Press, 1992.
25. Sheridan T.B. Automation, authority and angst – revisited. Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting, 1991, pp. 18–26.
26. Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000–2025, Technical Report, 2001.
27. Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2002–2027, Technical Report, 2002.
28. Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aircraft System Roadmap 2005–2030, Technical Report, 2005.
29. Huang H., Albus J., Messinan E., et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. The Proceedings of the 2004 SPIE Defense and security symposium conference, 2004, pp. 386–397.
30. Huang H., Pavak K., Novak B. et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS). Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America Conference, 2005, pp. 849–863.
31. Huang H. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) framework: Safety and application issues. The Proceedings of the performance metrics for intelligent systems workshop, 2007, pp. 48–53.

32. SAE International. Surface Vehicle Recommended Practice J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. 2016, DOI: 10.4271/J3016_201609.
33. Lloyd's Register. Cyber-enabled ships Ship Right procedure – autonomous ships. First edition, July 2016.
34. IEC 62267:2009. Automated urban guided transport – Safety requirements. International Electrotechnical Commission, 2009.
35. Yang Z., Zhang R. Fuzzy evaluated method for the autonomy levels of unmanned system. Journal of Chinese computer systems, 2009, vol. 30, no. 10, pp. 2043–2047.
36. Li J., Tang Z., Tan Y., et al. Research on autonomous capability evaluation of unmanned ground vehicles. Science discovery, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 12–20, DOI:10.11648/j.sd.20160401.13.
37. Sun Y., Tao G., Xiong G., et al. The Fuzzy-AHP Evaluation Method for Unmanned Ground Vehicles. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 653-658, DOI:10.12785/amis/070232.
38. Young L., Yetter J., Guynn M. System analysis applied to autonomy: Application to high-altitude long-endurance remotely operated aircraft. Proceedings of Infotech@Aerospace Conference, 2005, p. 7103, DOI: 10.2514/6.2005-7103.
39. SAE J3016 (2018). Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem ATS. Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya [Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles]. SAE, 2018, 35 p., DOP: 10.4271/J3016_201806
40. Frohm J., Stahre J., Winroth M. Levels of Automation in Manufacturing. International Journal of Ergonomics and Human Factors, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 287-299.
41. Korablev I.G. Otsenka urovnya avtomatizatsii biznes-protsessov predpriyatiya [Assessment of the level of automation of enterprise business processes]. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Cherepovets state university], 2016, no. 1, pp. 17-24.
42. Kuzmin Yu.B. Shkalirovaniye urovnya avtomatizatsii na proizvodstve [Scaling the level of automation in production]. Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies], 2020, vol. 26, no. 2, pp. 116-127. DOI: 10.17587/it.26.116-127.
43. Shadrin S.S., Ivanova A.A. Analiticheskiy obzor standarta SAE J3016 «Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya sistem avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem ATS» s uchetom poslednikh izmeneniy [Analytical review of the SAE J3016 standard "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles" taking into account the latest changes]. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura [Car. Road. Infrastructure], 2019, no. 3(21). Available at: https://www.adi-adi.ru/madi/article/download/811/pdf_478 (accessed: 07/13/2025).
44. Sokolov S.M. Sravnitel'nyy analiz stepeni avtonomnosti robototekhnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of the degree of autonomy of robotic complexes]. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of the Southern Federal University. Technical Sciences], 2023, no. 1, pp. 65-76. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76.
45. Tan N., Hayat A.A., Elara M.R., Wood K.L. A Framework for Taxonomy and Evaluation of Self-Reconfigurable Robotic Systems. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 13949-13964, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965327.

Lukinova Olga Vasilyevna. Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Russian Technological University MIREA, Professor of the Department of Information Security. Research areas: software and systems engineering, decision making, artificial intelligence, knowledge engineering, information security. AuthorID 142037, SPIN 4361-0837, ORCID 0000-0002-5576-7749. lobars@mail.ru. IPU RAS, Russia, 117997, GSP-7, Moscow, Varshavskoye Highway, 45.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 20.12.2025; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 12/01/2025; approved after reviewing 12/20/2025; accepted for publication 02/10/2026.