

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРУ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

© 2021 Е. О. Черских✉, А. А. Ерашов, А. Н. Быков

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,
Лаборатория автономных робототехнических систем
14 линия, 39, 199178 Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. В работе проведен анализ автономных робототехнических систем и разработана классификация, в которой установлены взаимосвязи между массогабаритными характеристиками, энергопотреблением и энергоемкостью источника питания рассмотренных систем. Рассмотрены существующие классификации робототехнических систем и выявлено, что большинство работ посвящены классификациям форм, свойствам и назначению роботов, а также факторам, влияющим на потребление энергии. Анализ и классификация автономных робототехнических средств по уровню потребления энергии позволит осуществлять обоснованный подбор наиболее эффективного класса и уровня мощности беспроводной системы передачи энергии для конкретного робота на этапе проектирования в зависимости от массогабаритных характеристик. Задача является особенно актуальной для активно развивающегося в настоящее время направления беспроводных систем передачи энергии мобильным роботам. В настоящем анализе основное внимание уделяется рассмотрению автономных мобильных наземных роботов, предназначенных для работы в помещениях. Рассмотрены роботы следующих типов: колесные, шагающие, антропоморфные и гибридные, включающие в себя несколько типов конструкций. Анализируемыми параметрами являются: потребляемая мощность, массогабаритные характеристики робота, используемый источник питания и его энергетические характеристики. Выделены четыре группы робототехнических систем по потребляемой мощности: потребители малой мощности (до 10 Вт), средней (от 10 до 250 Вт), высокой (от 250 до 1000 Вт) и сверхвысокой мощности (более 1000 Вт). Определены диапазоны потребляемых мощностей, линейных размеров, массы и энергоемкостей аккумуляторных батарей робототехнических средств для каждой из перечисленных групп. Построены графики зависимости потребляемой мощности от массогабаритных показателей рассмотренных роботов.

Ключевые слова: энергопотребление, энергоемкость аккумуляторов робота, питание автономных робототехнических систем, потребляемая мощность.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие мобильные робототехнические системы подразделяются на наземные, воздушные, надводные и подводные [1]. Ис-

ходя из назначения, наземные системы имеют различные типы механической конструкции [2]: колесные, гусеничные, шагающие, антропоморфные. В зависимости от количества программируемых степеней подвижности (стационарные или подвижные) и степени автономности в документе [1] выделены две категории: роботы и робототехнические

✉ Черских Екатерина Олеговна
e-mail: cherskikh.e@iias.spb.su



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

устройства. Источником питания автономных роботов в основном являются аккумуляторные батареи (АКБ), следовательно, роботам необходимо периодически осуществлять процесс пополнения запаса энергии. Как правило, в автономных робототехнических системах (АРС) [3–5], обладающих определенной степенью мобильности, энергоемкость источника питания связана с размерами и массой робота. Установка взаимосвязи между массогабаритными характеристиками АРС и требуемой энергоемкостью источника питания позволит дать объективную оценку необходимой мощности зарядного устройства на этапе проектирования АРС и является целью данного исследования. Задача особенно актуальна для развивающегося в настоящее время направления разработки беспроводных систем передачи энергии (БСПЭ) [6].

В настоящем анализе рассматриваются автономные мобильные наземные роботы следующих типов: колесные, шагающие, антропоморфные и гибридные, включающие несколько типов конструкций. Данные об энергопотреблении и типе используемых источников питания роботов позволят выбрать требуемый тип БСПЭ для заряда АКБ роботов, классификация которых по величине передаваемой мощности и существующим способами передачи энергии проведена в [7–9]. Авторами выделены следующие способы передачи энергии: магнитно-резонансная и ёмкостная связь, электромагнитная связь и ультразвуковой метод. Уровни и диапазоны передаваемой мощности и эффективности работы БСПЭ определены как низкие, средние и высокие. Численные диапазоны авторами не приводятся. Каждая группа, в зависимости от передаваемой мощности, имеет собственные схемотехнические и конструктивные особенности, а также эксплуатационные ограничения. Классификация АРС по энергопотреблению и массогабаритным характеристикам позволит по передаваемой мощности однозначно определять класс БСПЭ, который может применяться для заряда АКБ и питания иных потребителей энергии робототехнического комплекса.

1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ КЛАССИФИКАЦИИ АРС

Документ [1] содержит несколько классификаций роботов и робототехнических устройств, предназначенных для использования в помещениях и на открытом воздухе в наземных условиях. В первую очередь, роботы разделены на две категории: промышленные и сервисные. Среди данных категорий выделены: область применения, грузоподъемность, способ управления и другие.

На данный момент существует достаточное количество исследовательских работ, в которых авторы проводят классификацию АРС по различным признакам: области применения [10], назначению [11], форме [12, 13]. Авторы общей классификации роботов [10] рассматривают несколько категорий роботов и выделяют следующие критерии: стационарность или подвижность, автономность, области применения, способы перемещения, архитектура, размер, тип используемого контроллера, типы датчиков, конструкция роботов [14].

Классификация по виду и форме коллаборативных роботов, а также областям исследования проводится авторами [12] и [13] соответственно. Выявлено, что для наилучшего взаимодействия с человеком подходят АРС с приятным внешним видом. На основании полученной классификации была проведена оценка [15] внешнего вида роботов для взаимодействия с человеком. Данное исследование показало, что успешность взаимодействия человека с роботом увеличивается при более благоприятном виде робота.

Авторы [11] и [16] рассматривают роботов, предназначенных для работы в помещениях, и проводят классификацию роботов по типу выполняемой работы: для безопасности, образования, личного использования, реабилитации.

В основном в рассмотренных работах уделяется внимание классификации типов и форм роботов, их свойств и назначения. Рассмотренные роботы питаются от сети или от аккумуляторных батарей. Питание

от сети ограничивает мобильность роботов, но позволяет отказаться от необходимости минимизации потребления энергии. При использовании АКБ количество энергии и время автономного функционирования робота ограничено. Для обеспечения бесперебойной работы АРС требуется осуществлять периодическое восполнение заряда ее АКБ, поэтому необходимо учитывать уровень потребления энергии АРС в различных режимах и условиях работы. Классификация АРС по уровню потребления энергии позволит при проектировании подобных систем подобрать для них наиболее эффективный класс БСПЭ в зависимости от массогабаритных характеристик. Далее будут рассмотрены и классифицированы наземные роботы с точки зрения потребляемой ими мощности.

2. АНАЛИЗ ГАБАРИТОВ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

При проведении анализа основное внимание уделено рассмотрению АРС, предназначенных для работы в помещениях, поскольку это наиболее распространенный тип промышленных и сервисных роботов. Рассмотренные решения разделены на несколько категорий по типу механической конструкции: колесные, шагающие, антропоморфные и гибридные. Целевыми анализируемыми параметрами, сведенными в табл. 1–4, являются: массогабаритные характеристики, используемый источник питания и потребляемая мощность робота. Наличие в таблицах пустых ячеек объясняется отсутствием в предоставленной авторами информации об определенных параметрах роботов. Также внимание уделено назначению рассматриваемых роботов, особенностям типа конструкции и рабочим характеристикам в определенных условиях эксплуатации робота.

2.1. Колесные роботы

Роботы колесного типа в основном представляют собой платформы, выполняющие

задачи перевозки грузов [17], наблюдения за окружающей средой, взаимодействия с человеком в качестве роботов-промоутеров [18, 19], проведения различных исследований. На них также могут быть установлены манипуляторы или комплекс устройств слежения за окружающей средой. Потребляемая мощность мобильных роботов Kherera III [20] и Alice [21] колеблется в небольшом диапазоне и зависит от того, имеет ли робот полезную нагрузку и двигается ли робот по прямой или осуществляет поворот. Робот приводится в движение двумя сервоприводами, источником питания которых является АКБ емкостью 1400 мА·ч. Такой же небольшой потребляемой мощностью как Kherera III и Alice обладают роботы, представленные в работах [22–24], созданные для отработки передвижения и наблюдения.

Энергопотребление роботов может зависеть от типа поверхности, по которой передвигается робот [25], от режимов работы [26], используемого способа передвижения [27, 28] и от энергопотребления используемого оборудования [29]. Так робот [26], разработанный для проверки внутренней поверхности трубопровода, имеет два режима работы с разным энергопотреблением: режим передвижения по трубопроводу и режим проверки поверхности трубопровода. Питание осуществляется от двух АКБ, соединенных последовательно для получения выходного напряжения 48 В и 24 В. Движение обеспечивается шестью серводвигателями постоянного тока, установленных по одному на каждую пару колес.

В отличие от робота [27], упомянутого ранее, энергопотребление колесно-гусеничного мобильного робота [28] изменяется не только при смене способа передвижения, но и при удалении или добавлении дополнительных пар колес. Робот создан для отработки универсальной модели управления и оснащен двумя двигателями Maxon EC-45 для отдельного управления левой и правой гусеницей или рядом колес, если гусеницы сняты. Емкость используемой АКБ авторами не указана.

На энергопотребление роботов также могут влиять применяемые стратегии снижения

Таблица 1. Параметры колесных роботов
 [Table 1. Parameters of wheeled robots]

	Линейные размеры, мм				Потреб. мощность, Вт	Масса, кг	Энергоем. АКБ, Вт·ч
	Длина	Ширина	Высота	Диаметр			
[17]	890	1200	390		72	94	
[19]	1100	660	1600		200	80	
[20]	127	123	70		0,6–0,8	0,69	5
[21]	20	20	20		0,004–0,007		
[22]	90	140			0,28–0,506	0,25	
[23]	45			45		0,01	0,407
[24]			120		0,35	0,098	10
[25]	820	640	470		125–173	83,1	
[26]					480	62	976
[27]	300	500	80		60		
[28]	650	500			600	28,8	
[29]	420	420	220		45	2,5	24,46
[30]		350	500		16,78–23,73		86,4
[32]				900	17	2,8	32,56
[33]			470	300		25	99,9
[34] [35]	1900	1900	1900		410	190	
[36]				370	17,8	9	
[37]	600	500			20	4	
[38]		540			200–300	90	
[39]	800	140	1000		2600		

уровня энергопотребления. Авторами [30] проводится симуляция двух стратегий управления двухколесной платформой: базисной (потребляемая мощность при использовании которой минимальна) и гибридной. Система приводится в движение четырьмя бесколлекторными электродвигателями [31]. Питание платформы осуществляется от 4 аккумуляторных блоков номинальным напряжением 28,8 В, емкостью 3000 мА·ч.

Сферический робот ISR [32] и моноколесная платформа [33] разработаны для проведения исследования по уменьшению энергопотребления. Источником питания ISR служит АКБ напряжением 14,8 В, емкостью 2200 мА·ч. Для продольных движений используется редукторный двигатель 12 В, а для боковых — серводвигатель MG995. В качестве колеса платформы [33] используется шар для боулинга, приводимый в движение четырьмя

двигателями. Робот имеет одну батарею, напряжение которой 22,2 В, емкость 4500 мА·ч.

Мобильные роботы MogoLIPi [34, 35] и Pioneer 3DX [36] могут осуществлять наблюдение за окружающей средой, разведку, логистику и перемещение грузов. Передвижение MogoLIPi осуществляется посредством четырехколесной системы, двухгусеничной системы и четырех подвижных гусеничных удлинителей. Pioneer3DX представляет собой двухколесную платформу, снижение потребления энергии которой осуществляется посредством генерации плавного пути с минимальным количеством поворотов и контролем скорости движения робота. Для уменьшения количества потребляемой энергии при планировании движения учитывается длина пути, углы поворотов, длина наклонного пути и количество препятствий. Источником питания обеих роботов являются АКБ.

Для отслеживания энергопотребления АРС может иметь собственную систему измерения уровня энергопотребления. В качестве примера подобных роботов могут быть рассмотрены четырехколесная мобильная платформа [37] и робот Clearpath Husky A200 [38]. Энергопотребление платформы [37] рассчитывается на основе данных нейронной сети. Питание осуществляется от установленной на борту робота АКБ. Использование таких систем позволяет выявить потери мощности, связанные с динамическим трением колес робота.

Использование альтернативных источников питания робототехнических комплексов позволяет увеличить время автономной работы и уменьшить время заряда батарей. Так, мобильная платформа [39] питается от встроенного генератора переменного тока, топливом для которого служит бензин. Робот используется для сельскохозяйственных работ в теплицах. Также робот может использовать источник питания переменного тока, есть возможность проводного подключения к источнику питания.

На увеличение потребляемой мощности рассмотренных роботов влияет наличие препятствий на пути робота, ускорение движения и осуществление поворотов. Потребление также зависит от типа поверхности, по которой движется робот. В целях снижения энергопотребления некоторые из рассмотренных прототипов применяют стратегии снижения потребляемой мощности. При использовании таких стратегий робот не использует свои функциональные возможности полностью и, если такая стратегия применяется, нами здесь и далее учитывается суммарная номинальная потребляемая мощность установленных на работах двигателей. В табл. 1 представлены анализируемые параметры рассмотренных решений.

2.2. Шагающие роботы

Шагающие роботы имеют один или несколько педипуляторов, позволяющих передвигаться по сложному типу местности и преодолевать препятствия. В категорию шагающих роботов вошли гексаподы, моноподы,

зооморфные и двуногие роботы различного назначения. Значительное влияние на потребляемую мощность шагающих роботов оказывает способ передвижения и двигательная активность педипуляторов. Так, например, энергопотребление шагающего гексапода [40] зависит от параметров шага и походки. Робот имеет шесть педипуляторов, управляемых сервоприводами. Гексапод не имеет АКБ, питание осуществляется от внешнего источника.

Для многих шагающих роботов также характерно наличие собственной системы измерения уровня энергопотребления. Самоанализ энергопотребления проводят роботы PhantomX [41] и, передвигающийся посредством прыжков, монопод ARL [42]. PhantomX выполняет переключение между видами походки для минимизации энергопотребления и питается от АКБ с характеристиками: 11,1 В, 5800 мА·ч. Педипуляторы робота приводятся в движение 12 серводвигателями AX-18A.

Для решения задачи минимизации энергопотребления шагающих роботов [43, 44] вводится ограничение двигательной активности. В качестве движителей [43] применяются сервоприводы AX-12, питание которых осуществляется от АКБ. Для движения педипуляторов робота, представленного в [44], используются 12 сервоприводов MX-28 [45] и 6 MX-64 [46]. Питание робота осуществляется от внешнего источника.

В исследованиях [47–50] уровень потребления энергии роботов в процессе работы не изменяется, но предлагается использование дополнительных источников питания таких как внешний источник постоянного тока или дополнительные АКБ для увеличения времени автономной работы. Робот SPOT [51], имеет литий-ионную АКБ с максимальным напряжением 58,8 В. Робот имеет 12 степеней свободы и разрабатывался с целью выполнения широкого круга задач, что обеспечивается возможностью обработки данных с устанавливаемых датчиков, программирования, а также установки различного дополнительного оборудования.

В табл. 2 перечислены параметры рассмотренных роботов. В качестве источника

Таблица 2. Параметры шагающих роботов
 [Table 2. Parameters of walking robots]

	Линейные размеры, мм			Потреб. мощность, Вт	Масса, кг	Энергоем. АКБ, Вт·ч
	Длина	Ширина	Высота			
[40]	400	380	220	17	2	
[41]	120	240		130	18	64,38
[42]				125	5	
[43]		193	83	17,6–18,1	1,5	
[44]				138,96	4,7	
[47]	880	450	260	350	57,34	
[48]		482	1100	22–200	12,3	200
[49]	250	230	130	7,5	0,615	
[50]	1200	500	1000	10000	130	
[51]	1100		840	400	32,5	605

питания рассмотренных шагающих роботов используются аккумуляторные батареи, сеть, солнечные панели. В целях уменьшения потребления энергии в некоторых прототипах применяется ограничение активности педипуляторов и переключение между режимами походки исходя из оцененного самим роботом уровня энергопотребления.

2.3. Антропоморфные роботы

Антропоморфные роботы имеют различные области применения: развлекательные и научные цели [52], выполнение работы в опасных для человека средах [53] и совместная работа с человеком [54–56]. Далее будут рассмотрены антропоморфные роботы и платформы, созданные для игры в футбол, поскольку это одна из наиболее популярных областей применения АРС подобного типа. Движение робота NimRo-OP [57] обеспечивается посредством сервоприводов MX-106 (12 штук) [58] и MX-64 (8 штук). Питание [55] осуществляется от АКБ с номинальным напряжением 14,8 В и емкостью 3600 мА·ч. Питание более позднего прототипа [55], представленного в работе [59], осуществляется от АКБ 14,8 В, емкость 6600 мА·ч.

Источником питания антропоморфной платформы Artin [60] являются две АКБ 11,1 В, 8000 мА и 14,7 В, 2200 мА. Управление конечностями осуществляется двадцатью сер-

воприводами MX-106. Аналогичные сервоприводы (12 штук) применяются и в роботе Ichiro [61], кроме того, в манипуляторах робота установлены шесть MX-64, в голове — два MX-28. Источником питания является АКБ емкостью 3300 мА·ч.

Роботы Nao [62], Igus [63], ROBOTIS-MINI [64] и PRH [67] представляют собой модульные платформы. Батарея Igus обеспечивает автономную работу в течение 15–30 минут, с напряжением 14,8 В, емкостью 3,8 А·ч. ROBOTIS-MINI приводится в движение шестнадцатью сервоприводами XL-320 с номинальным напряжением 7,4 В [65, 66].

При создании роботов для научных целей исследователями ставятся такие задачи как улучшение энергоэффективности путем изменения типа походки [52], отработка алгоритмов ходьбы [54] и движения [68] и др. Антропоморфные роботы Bioloid [69] и KUBO [70] созданы для проведения исследований динамики ходьбы. Робот Bioloid имеет 18 степеней свободы, которые обеспечиваются посредством серводвигателей AX-12A. Емкость батареи составляет 1000 мА·ч, напряжение 11,1 В. Емкость батареи робота KUBO больше и составляет 13,88 Вт·ч, при напряжении 18,5 В, емкости 750 мА·ч. Движения осуществляются при помощи 12 серводвигателей RX-64 [71] и 8 серводвигателей RX-28 [72].

Обеспечение энергоэффективного движения является одной из задач, которую ставят

перед собой авторы [53, 68, 73], но предлагаемые стратегии накладывают ограничение на движения роботов, и, следовательно, снижают энергопотребление. Представленный в работе [68] антропоморфный робот WANDERER имеет 29 степеней свободы. Источниками питания робота являются две литий-ионных батареи AllCell HE4820. Питание роботов [53, 73], осуществляется от АКБ. При классификации учтен пик потребляемой мощности при задействовании всех приводов робота SAFFiR.

Сервисный робот Togo [54] и антропоморфный робот LARMbot [75–78], предназначены для работы в помещении совместно с человеком. Togo может преодолевать небольшие препятствия и подниматься по лестницам. Источником питания Togo являются АКБ номинальным напряжением 48 В и емкостью 6,6 А·ч. При классификации учитывается суммарная номинальная мощность перечисленных установленных на роботе двигателей ILM, согласно документации [74]. Питание LARMbot осуществляется с помощью АКБ со следующими характеристиками: напряжение 11,1 В, емкость 2,2 А·ч.

Рассмотрим далее некоторые коллаборативные АРС, а также АРС, предназначенные для работы в экстремальных условиях. Робот Atlas [79] имеет 28 степеней свободы, движение робота осуществляется при помощи гидравлических приводов. Питание, охлаждение и связь робота Atlas с компьютером осуществлялось через подведенный к роботу кабель, но на настоящий момент робот полностью автономен [80], питание осуществляется АКБ.

Робот WALK-MAN [81, 82] предназначен для работы в опасной для человека среде. Робот имеет 29 степеней свободы. Питание робота осуществляется при помощи литий-ионной батареи 29 В, 63 А·ч.

В табл. 3 даны параметры роботов, рассмотренных в этом разделе. Питание всех рассмотренных выше роботов осуществляется от АКБ. Только один прототип в его более ранней версии получал питание проводным способом. Роботы, созданные для развлекательных целей, а именно для игры в робофут-

бол, меньше по весу и размеру, чем роботы, созданные для научных целей и для работы с человеком. Основными целями работ являются усовершенствование походки роботов, только авторами [78] ставилась цель снижения энергопотребления робота.

2.4. Гибридные роботы

В гибридных роботах используются колеса, которые при необходимости, могут трансформироваться в педипуляторы для осуществления движения по сложному ландшафту. Также роботы такого типа могут использовать колеса или педипуляторы в зависимости от типа местности, по которой в данный момент передвигается робот, или же и колеса и педипуляторы одновременно. На энергопотребление робота DRC-HUBO+ [83], имеющего два педипулятора с установленными у коленных суставов колесами, существенное влияние оказывает тип передвижения. Робот способен переходить от прямоходящего положения в положение движения на колесах. Питание осуществляется при помощи двух АКБ.

Гибридные роботы PAW [84] и MSRox [85] имеют похожую конструкцию педипуляторов, на концах которых располагаются колеса. На роботе PAW установлено две АКБ различной емкости: HR-D емкостью 7,5 А·ч и VH-D емкостью 9,5 А·ч. MSRox имеет гибридный механизм Star-Wheel [86] представляющий собой звездообразную структуру из трех колес. MSRox не имеет собственного источника энергии и питается от сети.

Трансформация колес в педипуляторы также применяется при изменении типа поверхности, по которой движется АРС. Передвижение робота Quattroped [87], источником питания которого является АКБ, с помощью педипуляторов требует больше энергии, чем передвижение с помощью колес. Также и потребляемая мощность робота ASGUARD [88, 89] возрастает до пиковых значений при передвижении по неровной поверхности или при преодолении препятствий. ASGUARD использует двадцать педипуляторов, установленных на концах четырех звездообразных колес.

Таблица 3. Параметры антропоморфных роботов
 [Table 3. Parameters of anthropomorphic robots]

	Линейные размеры, мм			Потреб. мощность, Вт	Масса, кг	Энергоем. АКБ, Вт·ч
	Длина	Ширина	Высота			
[52]			1500	134		2000
[53]			1600	1500		
[54]			1740	400	76	316,8
[55]		620	1680		85	1000
[56]			1300	618	70	555
[57]			950	376	6,6	53,28
[59]			1345	300	17,5	97,68
[60]			1330	264	25	120
[61]			850	184,4	7,2	
[62]			570		4,5	55
[63]			90	111,6	6,6	56,24
[64]	90	203	280	130,24	2,3	
[67]			908	25	4,7	48,84
[68]			2000	394–478	91	2462
[69]			397	18–324	1,7	11,1
[70]			580	230		13,87
[73]			1800		79,5	1100
[75–78]	294,6	414,6	972,19	72	2,8	24,42
[79] [80]			1880	>1000	155	3700
[81] [82]	600	815	1915	>1000	132	1856

В некоторых роботах [90, 91] используется пассивное преобразование колес в педипуляторы. При этом уровень потребляемой мощности не изменяется или изменяется незначительно. При разработке роботов TriBot [92] и Mini-Whegs [93] была использована конструкция колес, подобная решению, предложенному в [90]. Колеса TriBot могут использоваться как педипуляторы для преодоления небольших препятствий и управляются пятью двигателями Hitec HS-985MG с напряжением питания 6 В. В отличие от рассмотренных выше прототипов гибридных роботов и Mini-Whegs, колеса TriBot не имеют возможности преобразования. TriBot имеет манипулятор, управляемый шестью двигателями Hitec HS-82MG. Питание двигателей осуществляется от 10 АКБ напряжением 1,2 В, емкостью 3000 мА·ч. Для питания управляющей платы используется АКБ напряжением 11,1 В, емкостью 1600 мА·ч.

В гибридных робототехнических средствах могут использоваться исполнительные механизмы на основе гидро- и пневмоприводов для осуществления наиболее плавного передвижения по сложному ландшафту [94, 95]. В целях сохранения возможности передвижения робота по сложному ландшафту без значительных энергозатрат также вводится ограничение двигательной активности педипуляторов. Гибридные роботы, использующие переключение между колесами и педипуляторами в зависимости от ландшафта, по которому они перемещаются, при передвижении с помощью педипуляторов потребляют больше энергии. При сравнительном анализе характеристик рассмотренных роботов, в случае применения стратегий уменьшения потребления энергии роботами, в качестве значения потребляемой мощности АРС будут приняты номинальные значения установлен-

Таблица 4. Параметры гибридных роботов
[Table 4. Parameters of hybrid robots]

	Линейные размеры, мм			Потреб. мощность, Вт	Масса, кг	Энергоем. АКБ, Вт·ч
	Длина	Ширина	Высота			
[83]	1700	587	345	400	80	91,2
[84]	494	366		22–58	15,7	
[85] [86]	820	540	290	34	11,5	
[87]	600	190	140	44–160	12,2	
[88] [89]	440	950	500	83	9,5	300
[90]	190	210	70		0,350	2,88
[91]	210	340	80	9–10		20,72
[92]	360	230	130	96	1,95	53,76
[93]	90	20	20	1,2	0,146	
[94]			1981		150	
[95]			84	30	1,1	
[95]			140	60–345	1,12	

ных приводов. Параметры рассмотренных роботов приведены в табл. 4.

Среди рассмотренных АРС есть прототипы с собственной системой отслеживания уровня потребления энергии. При отсутствии такой системы энергопотребление АРС отслеживалось авторами с помощью сторонних средств при проведении экспериментов. В некоторых исследованиях для уменьшения потребляемой энергии используются методы планирования пути и методы увеличения гладкости траектории движения путем снижения количества возможных поворотов, обхода препятствий, использования наиболее энергетически эффективного типа походки для определенного типа поверхности, по которой движется робот и контроля скорости движения [96].

3. КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО ГАБАРИТАМ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ

В рамках рассмотренных типов роботов (антропоморфные, шагающие, колесные и гибридные) можно выделить диапазоны потребляемой мощности и масс для каждого из них. Полученные значения приведены в

табл. 5. Как видно из представленных данных, наиболее широким диапазоном мощности обладают шагающие роботы, гибридные — наименьшим; наибольший диапазон масс соответствует антропоморфному типу роботов, а наименьший — гибридным роботам.

Анализ представленных в настоящей работе АРС показал, что можно выделить четыре группы по уровню энергопотребления: малая (менее 10 Вт), средняя (10–250 Вт), высокая (250–1000 Вт), сверхвысокая (более 1000 Вт), численные характеристики которых также приведены в табл. 6. В представленной таблице значения были округлены к ближайшему целому. Для каждой из перечисленных групп определены соответствующие линейные размеры: менее 250 мм для малой, 100–1100 мм для средней, 300–1700 мм для высокой и для сверхвысокой 500–2000 мм. Масса входящих в группы АРС: менее одного кг — малая группа, 1–20 кг — средняя, 20–100 кг — высокая и более 100 кг — сверхвысокая. Энергоемкость источников питания АРС, входящих в группу потребителей малой мощности — менее 5 Вт·ч, средней — менее 300 Вт·ч, высокой менее 1000 Вт·ч и сверхвысокой — более 1000.

Всего рассмотрено 70 работ по 62 роботам, из которых 21 колесных, 10 шагающих,

Таблица 5. Диапазоны потребляемой мощности и массы различных типов роботов
 [Table 5. Ranges of power consumption and weight of various types of robots]

Тип робота	Антропоморфный	Шагающий	Колесный	Гибридный
Потреб. мощн., Вт	18–1500	0,35–10000	0,004–2600	1,2–400
Диапазон масс, кг	1,7–155	0,098–130	0,01–100	0,146–150

Таблица 6. Группы APC по уровню энергопотребления
 [Table 6. Energy Consumption Groups of Autonomous Robots]

Группы энергопотребления APC	Малая	Средняя	Высокая	Сверхвысокая
Потребл. мощн., Вт	<10	10–250	250–1000	> 1000
Линейные размеры, мм	< 250	100–1100	300–1700	500–2000
Масса, кг	< 1	1–20	20–100	> 100
Энергоем. АКБ, Вт·ч	< 5	< 300	< 1000	> 1000

20 антропоморфных, 11 гибридных. В классификацию и, соответственно, в группы, перечисленные в табл. 5 и 6 не вошли 4 колесных робота, 4 антропоморфных и 1 гибридный. WANDERER [68] исключен из классификации из-за выходящих за пределы установленных диапазонов высоты и массы, а также неполных данных об энергопотреблении в источнике.

Робот DURUS [73] заявлен авторами как гуманоидный робот, он представляет собой платформу без головы и рук, энергопотребление которой учитывается только при ходьбе без каких-либо действий. Также из классификации исключен антропоморфный робот E2-DR [55], который по габаритным характеристикам может быть отнесен к потребителям сверхвысокой мощности, но его масса сравнительно небольшая для этой категории. Авторами не указана потребляемая мощность, в связи с чем робот не может быть классифицирован.

Робот [19] исключен из классификации, так как авторами не указана потребляемая мощность демонстрационного экрана и системы управления.

Мощность робота [57] не указана авторами и рассчитана, исходя из информации о мощности установленных серводвигателей. Робота можно отнести к группе потребителей высокой мощности, но его масса позволяет определить его в группу потребителей средней мощности. По причине недостатка информации робот исключен из классификации.

Указанная авторами [34, 35] потребляемая мощность при передвижении робота и потребляемая мощность контроллера позиционирования манипулятора робота суммарно составляет 778 Вт. Однако не указаны модели используемых в манипуляторе робота шести сервоприводов, применяется сценарий снижения энергопотребления. Исходя из указанного веса робота (190 кг) и предположительной потребляемой сервоприводами манипулятора мощности, его можно отнести к группе потребителей сверхвысокой мощности, однако вследствие недостатка данных робот исключен из классификации.

Энергопотребление платформы [37] измерено авторами при применении ограничения скорости передвижения. Исходя из указанной массы, потребление платформы, вероятно, будет значительно выше.

Включение в классификацию платформы [33] также невозможно, поскольку в данной работе не указана модель используемых двигателей. Исходя из приведенного значения массы, платформа могла бы быть отнесена к группе потребителей высокой мощности, но по причине отсутствия требуемой информации невозможно определить робота в какую-либо из представленных групп.

Робот [91] имеет два двигателя суммарной мощностью 9 Вт. Робот отнесен нами к группе потребителей средней мощности, так как при учете мощности, потребляемой системой управления, общая потребляемая мощность, вероятно, превысит 10 Вт.

Значения диапазонов размеров роботов взяты как минимальное и максимальное значения длины, ширины, высоты и диаметра тел роботов. Пересечение диапазонов категорий среди разных групп обусловлено конструктивными особенностями АРС и возрастанием потребления энергии при выполнении роботом какой-либо задачи. Авторы некоторых прототипов предоставляют возможность замены установленных АКБ на батареи с большей энергоемкостью. При этом общая масса робота будет увеличена, так как батареи с большей энергоемкостью имеют больший вес. Исходя из указанных авторами масс АКБ прототипов, было рассчитано, что масса аккумуляторной батареи составляет от 6 до 17 % от полной массы робота.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости потребляемой мощности от массогабаритных показателей каждого их рассмотренных типов роботов. На рис. 1 приведено распределение антропоморфных и шагающих роботов по категориям потребляемой мощности. Антропоморфные, исходя из конструктивных особенностей, разделены на три категории, имеющие соответствующие каждой из них массу и размер. Шагающие, колесные и гибридные роботы разделены на четыре категории, каждой из которых также соответствуют диапазоны массы и размеров. Приведенные на рис. 1(а) размеры антропоморфных роботов соответствуют их высоте. Размеры шагающих роботов, рис. 1(б), взяты как минимальное и максимальное значения линейных размеров.

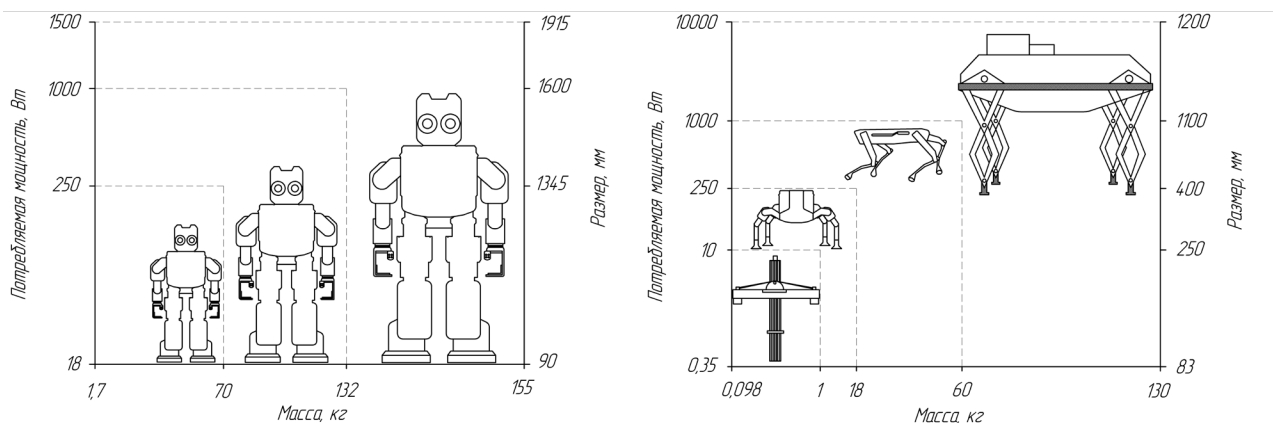


Рис. 1. Зависимость потребляемой мощности от массогабаритных показателей антропоморфных (а) и шагающих роботов (б)

[Fig. 1 Dependence of power consumption on the weight and size indicators of anthropomorphic (a) and walking robots (b)]

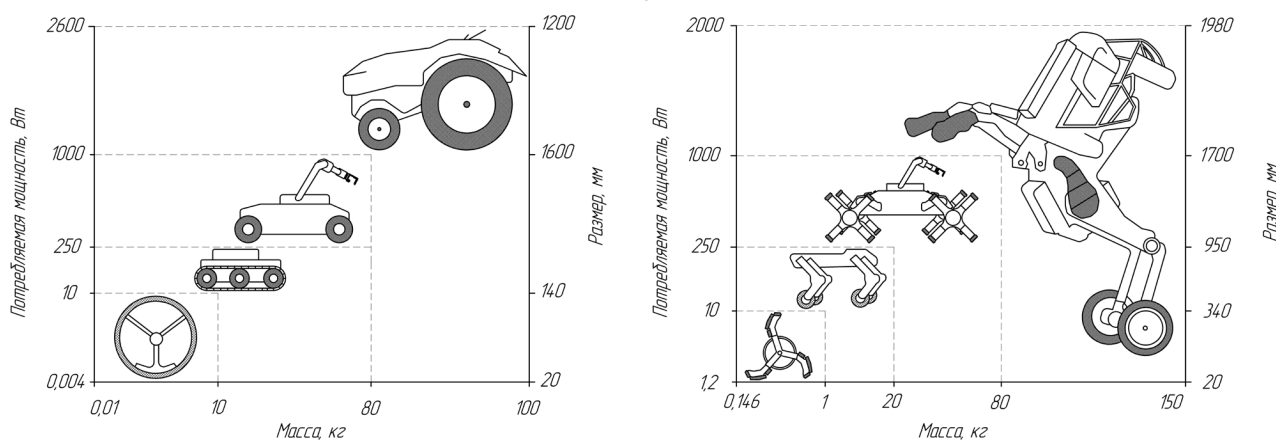


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности от массогабаритных показателей колесных (а) и гибридных роботов (б)

[Fig. 2 Dependence of power consumption on the weight and dimensions of wheeled (a) and hybrid robots (b)]

Большинство из рассмотренных АРС являются мобильными и работают от аккумулятора. Кроме передвижения по ландшафту различной сложности, некоторые из рассматриваемых роботов могут выполнять задачи переноса грузов. В таких случаях средняя потребляемая мощность значительно возрастает.

На рис. 2 представлены распределенные по категориям колесные и гибридные роботы. Гибридные роботы имеют несколько режимов работы в зависимости от типа походки и использования педипуляторов или колес. Энергопотребление роботов-гибридов также зависит от скорости передвижения, параметров шага, походки, а также сложности ландшафта. При этом применение педипуляторов является менее энергоэффективным, чем колесный способ передвижения.

При известных массогабаритных характеристиках робота, используя представленную в работе классификацию, возможен подбор БСПЭ определенного класса и мощности на этапе проектирования АРС. Например, для антропоморфного робота высотой 600 мм и массой 5 кг, предположительная потребляемая мощность которого 120, подойдет БСПЭ средней мощности. Цель наших будущих исследований — разработка собственной БСПЭ применения в мобильной робототехнике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ наземных АРС с указанием параметров, требуемых для проведения классификации рассмотренных роботов: массогабаритные характеристики робота, используемый источник питания и потребляемая мощность. Для проведения классификации были рассмотрены работающие в помещении наземные роботы четырех типов механической конструкции: колесные, шагающие, гибридные и антропоморфные. Анализ позволил разделить рассмотренных роботов на следующие категории: потребители малой мощности (до 10 Вт, 250 мм и 1 кг), средней (от 10 до 250 Вт, 100–1100 мм, от 1 до 20 кг), высокой (от 250 до 1000 Вт, 300–1700 мм, от 20 до 100 кг) и сверхвысокой мощно-

сти (более 1000 Вт, 500–2000 мм, массой более 100 кг). Показано, что шагающие роботы обладают наиболее широким диапазоном потребляемой мощности, а наиболее узким — гибридные. Диапазон масс антропоморфных роботов преобладает над диапазонами масс колесных, шагающих и гибридных роботов.

Отношение энергоемкости аккумулятора к потребляемой мощности рассмотренных роботов колесного типа выше, чем у антропоморфных, шагающих и гибридных роботов, что обусловлено функциональными особенностями и планируемым временем автономной работы. Зачастую, для увеличения времени автономной работы АРС используются несколько аккумуляторных батарей или альтернативные источники питания: генераторы на основе двигателей внутреннего сгорания, солнечные батареи. Такие решения позволяют исключить из процесса работы АРС время, затрачиваемое на заряд аккумуляторных батарей и связанные с ним ограничения мобильности робота, но увеличивают общую массу робота. Этого можно избежать путем использования БСПЭ, позволяющей выполнять заряд батарей АРС, не прерывая их работу. Полученные данные о взаимосвязи массогабаритных характеристик АРС и энергоемкостью АКБ, могут быть применимы при выборе схмотехнических решений и необходимой мощности БСПЭ для питания потребителей энергии робототехнического комплекса [96] и заряда аккумуляторных батарей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р. 60.0. 0.2–2016 Роботы и робототехнические устройства. Классификация. Стандартинформ, 2018. – 15 с.
2. ГОСТ Р 60.0.0.4–2019/ISO 8373:2012 Роботы и робототехнические устройства.

Термины и определения. Стандартиформ, 2019. – 31 с.

3. Роботы, автономные робототехнические системы, искусственный интеллект и вопросы трансформации рынка транспортно-логистических услуг в условиях цифровизации экономики / И. А. Соколов [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2018, – Т. 6, № 4. С. 92–108.

4. Бычков, И. В. Двухуровневый эволюционный подход к маршрутизации группы подводных роботов в условиях периодической ротации состава / И. В. Бычков, М. Ю. Кензин, Н. Н. Максимкин // Труды СПИИРАН – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 267–301. DOI: 10.15622/sp.18.2.267-301

5. IEEE Std 1872-2015. IEEE Standard Ontologies for Robotics and Automation, 2015, DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7084073

6. Krestovnikov, K. Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, P. Smirnov // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – 2019. – P. 193–203. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_19

7. Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging / C. Qiu, [et al.] // 2013 world electric vehicle symposium and exhibition (EVS27), – P. 1–9. DOI: 10.1109/EVS.2013.6914731

8. A view of research on wireless power transmission / Y. Wang, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1074, № 1. DOI:10.1088/1742-6596/1074/1/012140

9. Pellitteri, F. Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries: PhD Thesis. – Palermo, 2016. – P. 94.

10. Dobra, A. General classification of robots. Size criteria. 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD). – 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/RAAD.2014.7002249

11. Spyridon, M. G. Classification of domestic robots / M. G. Spyridon, M. Eleftheria // Proceedings in ARSA-Advanced Research in Scientific Areas. – 2012. – Vol. 1, No 7. – P. 1693.

12. Classification of robot form: Factors predicting perceived trustworthiness / K. E. Schaefer

[et al.] // Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. – 2012. – Vol. 56, No 1. – P. 1548–1552. DOI: 10.1177/1071181312561308

13. Fong, T. A survey of socially interactive robots / T. Fong, I. Nourbakhsh, K. Dautenhahn // Robotics and autonomous systems. – 2003. – Vol. 42, No 3–4. – P. 143–166. DOI: 10.1016/S0921-8890(02)00372-X

14. Campion, G. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots / G. Campion, G. Bastin, B. Dandrea-Novel // IEEE transactions on robotics and automation. – 1996. Vol. 12, No 1. – P. 47–62. DOI: 10.1109/70.481750

15. Shin, E. A study on the elements of body feature based on the classification of social robots / E. Shin, S.S. Kwak, M.S. Kim // RO-MAN 2008-The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. – 2008. – P. 514–519. DOI: 10.1109/RO-MAN.2008.4600718

16. Kraevsky, S. V. Medical robotics: the first steps of medical robots / S.V. Kraevsky D. A. Rogatkin // Russian Journal: Technologies of live systems. – 2010. – Vol. 7, No 4, – P. 3–14.

17. Xie, L. Experimental validation of energy consumption model for the four-wheeled omnidirectional Mecanum robots for energy-optimal motion control / L. Xie [et al.] // In 2016 IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). – 2016. – P. 565–572. DOI: 10.1109/AMC.2016.7496410

18. Development of Multipurpose Mobile Platform with a Modular Structure / N. Pavliuk [et al.] // In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. – 2020. – P. 137–147. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_12.

19. Ripel, T. Design of the Frame for Autonomous Mobile Robot with Ackerman Platform / T. Ripel, J. Hrbáček, J. Krejsa // Proceedings Engineering Mechanics. – 2011. – P. 515–518.

20. Model based on-line energy prediction system for semi-autonomous mobile robots / R. Parasuraman [et al.] // In 2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. – 2014. – P. 411–416. DOI: 10.1109/ISMS.2014.76

21. The Autonomous Micro Robot «Alice»: a platform for scientific and commercial applications / G. Caprari [et al.] // In MHA'98. Proceedings of the 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science.-Creation of New Industry. – 1998. – P. 231–235. DOI: 10.1109/MHS.1998.745787
22. A surveillance robot with hopping capabilities for home security / G. Song [et al.] / IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2009. – Vol. 55, No 4. – P. 2034–2039. DOI: 10.1109/TCE.2009.5373766
23. A Wheeled Robot Driven by a Liquid-Metal Droplet / J. Wu [et al.] // Advanced materials. – 2018. – Vol. 30, No 51. DOI: 10.1002/adma.201805039
24. A miniature jumping robot with self-recovery capabilities / M. Kovač [et al.] // In 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2009. – P. 583–588. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354005
25. Simplified power consumption modeling and identification for wheeled skid-steer robotic vehicles on hard horizontal ground / J. Morales [et al.] // In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2010. – P. 4769–4774. DOI: 10.1109/IROS.2010.5649292
26. Jun, C. Study of locomotion control characteristics for six wheels driven in-pipe robot / C. Jun, Z. Deng, S. Jiang // In 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. – 2004. – P. 119–124. DOI: 10.1109/ROBIO.2004.1521762
27. Bayar, G. Design of a configurable all terrain mobile robot platform / G. Bayar, A. B. Koku, E. ilhan Konukseven // International journal of mathematical models and methods in applied sciences. – 2009. – Vol. 3, No 4. – P. 366–373.
28. Power consumption of tracked and wheeled small mobile robots on deformable terrains—model and experimental validation / T. Guo, J. Guo, B. Huang, H. Peng // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – Vol. 133. – P. 347–364. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.001
29. Ayob, M. A. B. 3WD omni-wheeled mobile robot using ARM processor for line following application / M. A. B. Ayob, M. F. Zakaria // In 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications. – 2011. – P. 410–414. DOI: 10.1109/ISIEA.2011.6108741
30. Kalra, S. Design and hybrid control of a two wheeled robotic platform / S. Kalra, D. Patel, K. Stol // In Proceedings 2007 Australasian Conference on Robotics and Automation. – 2007. – Article ID: 8721107.
31. Documentation Synchronous Servomotor AM3100. – Режим доступа: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/am3100_ba_en.pdf (дата обращения 05.09.2020).
32. The Design and Development of a Dynamic Model of a Low-Power Consumption / S. Asiri, [et al.] // Two-Pendulum Spherical Robot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2019. – Vol. 24, No 5. – P. 2406–2415. DOI: 10.1109/TMECH.2019.2934180
33. Jeong, K. W. Energy-saving trajectory planning for an inverse ball drive robot with Mecanum wheels / Jeong K. W., J. Lee, M. C. Lee // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2017. – Vol. 15, № 2. – P. 752–762. DOI: 10.1007/s12555-015-0259-9
34. Saputra, R. P. Trajectory scenario control for the remotely operated mobile robot LIPI platform based on energy consumption analysis / R. P. Saputra, E. Rijanto, H. M. Saputra // International Journal of Applied Engineering Research. – 2012. – Vol. 7, № 8. – P. 851–866.
35. Rijanto, E. Positioning control for the mobile robot LIPI articulated robot arm based on PD control approach / E. Rijanto, R. P. Saputra, H. M. Saputra // International Journal of Applied Engineering Research. – 2013. – Vol. 8, No 4. – P. 423–433.
36. Liu, S. Minimizing Energy Consumption of Wheeled Mobile Robots via Optimal Motion Planning / S. Liu, D. Sun // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, – 2014. – Vol. 19, No 2. – P. 401–411. DOI:10.1109/tmech.2013.2241777
37. Sakayori, G. Energy efficient slope traversability planning for mobile robot in loose soil / G. Sakayori, G. Ishigami // International Conference on Mechatronics (ICM). – 2017. – P. 99–104. DOI: 10.1109/ICMECH.2017.7921087
38. Dogru, S. Physics-Based Power Model for Skid-Steered Wheeled Mobile Robots / S. Dogru, L. A. Marques // IEEE Transactions on Ro-

- botics. – 2018. – Vol. 34, No 2. – P. 421–433. DOI:10.1109/tro.2017.2778278
39. The autonomous mobile robot AUORA for greenhouse operation / A. Mandow [et al.] // IEEE Robotics and Automation Magazine. – 1996. – Vol. 3, No 4. – P. 18–28. DOI: 10.1109/100.556479
40. Grzelczyk, D. Kinematics, dynamics and power consumption analysis of the hexapod robot during walking with tripod gait / D. Grzelczyk, B. Stanczyk, J. Awrejcewicz // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2017. – Vol. 17, No 5. DOI: 10.1142/S0219455417400107
41. Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains / N. Kottege [et al.] // International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015. – P. 5140–5147. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139915
42. Gregorio, P. Design, control, and energetics of an electrically actuated legged robot / P. Gregorio, M. Ahmadi, M. Buehler // Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 1997. – Vol. 27, No 4. P. 626–634. DOI: 10.1109/3477.604106
43. Luneckas, M. Hexapod robot energy consumption dependence on body elevation and step height / M. Luneckas [et al.] // Elektronika ir Elektrotechnika – 2014. – Vol. 20, No 7. – P. 7–10. DOI: 10.5755/j01.eee.20.7.8017
44. Joint space reference trajectory to reduce the energy consumption of a six-legged mobile robot / A. Bodrov [et al.] // 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). – 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2018.8321378
45. Documentation Dynamixel MX-28, v1.31.30. – Режим доступа: [http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-28\(2.0\).htm](http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-28(2.0).htm) (дата обращения 05.09.2020).
46. Documentation Dynamixel MX-64, v1.31.30. – Режим доступа: [http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-64\(2.0\).htm](http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-64(2.0).htm) (дата обращения 05.09.2020).
47. Sanz-Merodio, D. Analyzing energy-efficient configurations in hexapod robots for demining applications / D. Sanz-Merodio, E. Garcia, P. Gonzalez-de-Santos, // Industrial Robot. – 2012. – Vol. 39, No 4. – P. 357–364. DOI: 10.1108/01439911211227926
48. Folgheraiter, M. Design and modeling of a lightweight and low power consumption full-scale biped robot / M. Folgheraiter, B. Aubakir // International Journal of Humanoid Robotics. – 2018. – Vol. 15, No 5. DOI: 10.1142/S0219843618500226
49. Li, Y. FPGA-based Hexapod Robot Spider. In Proceedings of the International Conference on Computer Design (CDES) / Y. Li, H. Ma // The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2013.
50. Tian, X. Reaction forces identification of a quadruped robot with parallel-serial leg structure / X. Tian [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2014. – Vol. 229, No 15. – P. 2774–2787. DOI:10.1177/0954406214563110
51. SPOT user guide, release 2.0.1. – Режим доступа: <https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/inline-files/spot-user-guide.pdf>, <https://www.bostondynamics.com/spot> (дата обращения 05.09.2020).
52. Team RoboSimian: semi-autonomous mobile manipulation at the 2015 DARPA robotics challenge finals / S. Karumanchi [et al.] // Journal of Field Robotics. – 2017. – Vol. 34, No 2. – P. 305–332. DOI: 10.1002/rob.21676
53. Lahr, D. F. Biologically inspired design of a parallel actuated humanoid robot / D. F. Lahr, H. Yi, D. W. Hong // Advanced Robotics. – 2016. – Vol. 30, No 2. – P. 109–118. DOI: 10.1080/01691864.2015.1094408
54. Mechanisms and design of DLR humanoid robots / C. Ott [et al.] // Humanoid Robotics: A Reference. – 2016. – P. 1–26. DOI: 10.1007/978-94-007-7194-9_132-1
55. The Experimental Humanoid Robot E2-DR: A Design for Inspection and Disaster Response in Industrial Environments / T. Yoshiike, M. Kuroda, R. Ujino // Robotics and Automation Magazine. – 2019. – Vol. 26, No 4. – P. 46–58. DOI: 10.1109/MRA.2019.2941241
56. Basic design of human-symbiotic robot EMIEW / Y. Hosoda [et al.] // International Confer-

- ence on Intelligent Robots and Systems. – 2006. – P. 5079–5084. DOI: 10.1109/IROS.2006.282596
57. NimbRo-OP humanoid teensize open platform / M. Schwarz [et al.] // Proceedings of 7th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. – 2012.
58. Documentation Synchronous Servomotor MX-106, v1.31.30, Режим доступа: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106/> (дата обращения 05.09.2020).
59. NimbRo-OP2: Grown-up 3D printed open humanoid platform for research / G. Ficht [et al.] // IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics. – 2017. – P. 669–675. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246944
60. IRC adult size humanoid robot soccer team description paper 2017 / S. Saeevand, M. Jafari, V. Alizadeh // RoboCup humanoid robot league. – 2017.
61. Attamimi, M. Implementation of Ichi-ro Teen-Size Humanoid Robots For Supporting Autism Therapy / M. Attamimi // Journal on Advanced Research in Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 3, No 1.
62. Mechatronic design of NAO humanoid / D. Gouaillier [et al.] // In 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2009. – P. 769–774. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152516
63. Child-sized 3D printed Igus humanoid open platform / P. Allgeuer [et al.] // IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). – 2015. – P. 33–40. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363519
64. Dang, L. Design of a new cost-effective head for a low-cost humanoid robot / L. Dang, J. Kwon // IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON). – 2016. – P. 1–7. DOI: 10.1109/UEMCON.2016.7777923
65. Documentation Servomotor XL320. – Режим доступа: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl320/> (дата обращения 05.09.2020).
66. ROBOTIS MINI user guide. ежим доступа: <http://www.robotis.us/robotis-mini-intl/> (дата обращения 05.09.2020).
67. Zapata, S. Mechatronic design of PRH: A NEW 3D printed and anthropometric humanoid robotic platform / S. Zapata, I. D. Mora, G. Suarez // IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). – 2017. – P. 1–6.
68. Achieving Versatile Energy Efficiency With the WANDERER Biped Robot / C. G. Hobart, A. Mazumdar, S. J. Spencer // Transactions on Robotics. – 2020. – P. 959–966. DOI: 10.1109/TRO.2020.2969017
69. Dincer, F. Communication of Cost Oriented Humanoid Robots / F. Dincer, A. Byagowi, P. Kopacek // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52, No 25. – P. 100–103. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.454
70. Kinematic analysis and workspace simulation of humanoid robot KUBO / E. Hernandez [et al.] // IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII). – 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/CONCAPAN.2017.8278461
71. Documentation Servomotor RX64. – Режим доступа: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/rx/rx-64/> (дата обращения 05.09.2020).
72. Documentation Servomotor RX28. – Режим доступа: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/rx/rx-28/> (дата обращения 05.09.2020).
73. Realizing dynamic and efficient bipedal locomotion on the humanoid robot DURUS / J. Reher [et al.] // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2016. – P. 1794–1801. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487325
74. Documentation Frameless Servomotor ILM. – Режим доступа: https://www.tq-group.com/filedownloads/files/products/robo-drive/data-sheets/en/DRVA_DB_Servo-Kits_ILM_EN_Rev407_Web.pdf (дата обращения 05.09.2020).
75. Cafolla, D. LARMbot: a new humanoid robot with parallel mechanisms / D. Cafolla [et al.] // Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. – 2016. – P. 275–283. DOI: 10.1007/978-3-319-33714-2_31
76. Wang, M. Design and Development of the Cassino Biped Locomotor / M. Wang, M. Seccarelli, G. Carbone // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2020. – Vol. 12, No 3. DOI: 10.1115/1.4045181

77. Documentation Miniature Linear Motion Series L16. – Режим доступа: <https://docs.rs-online.com/cd2d/0900766b814ad9df.pdf> (дата обращения 05.09.2020).
78. Russo, M. Design and experiments of a novel humanoid robot with parallel architectures / M. Russo, D. Cafolla, M. Ceccarelli // *Robotics*. – 2018. – Vol. 7, No 4. – P. 79. DOI: 10.3390/robotics7040079
79. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot / S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon // *Autonomous Robots*. – 2015. – Vol. 40, No 3. – P. 429–455. DOI:10.1007/s10514-015-9479-3
80. User guide ATLAS DRC Robot. – Режим доступа: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/atlas-drc-robot-is-75-percent-new-completely-unplugged> (дата обращения 05.09.2020).
81. Walk-man: A high-performance humanoid platform for realistic environments / N. G. Tsagarakis [et al.] // *Journal of Field Robotics*, 2017. – Vol. 34, № 7. – P. 1225–1259. DOI: 10.1002/rob.21702.
82. Walk-man humanoid robot: Field experiments in a post-earthquake scenario / F. Negrello [et al.] // *Robotics and Automation Magazine*. – 2018. – Vol. 99.
83. Development of the humanoid disaster response platform DRC-HUBO+ / T. Jung [et al.] // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2018. – Vol. 34, No 1. – P. 1–17. DOI: 10.1109/TRO.2017.2776287
84. Smith, J. A. PAW: a hybrid wheeled-leg robot / J.A. Smith, I. Sharf, M. Trentini // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2006. – P. 4043–4048. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642323
85. Dalvand, M. M. Stair climber smart mobile robot (MSRox) / M. M. Dalvand, M. M. Moghadam // *Autonomous robots*. – 2006. – Vol. 20, No 1. – P. 3–14. DOI: 10.1007/s10514-006-5364-4
86. Dalvand, M. M. Design and modeling of a stair climber smart mobile robot (MSRox) / M. M. Dalvand, M. Moghadam // *In ICAR 2003: Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics*. – 2003. – P. 1062–1067. DOI: 10.1007/s10514-006-5364-4
87. Quattroped: a leg-wheel transformable robot / S. C. Chen, K. J. Huang, W.H. Chen // *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*. – 2013. – Vol. 19, No 2. – P. 730–742. DOI: 10.1109/TMECH.2013.2253615
88. Eich, M. A versatile stair-climbing robot for search and rescue applications / M. Eich, F. Grimminger, F. Kirchner // *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. – 2008. – P. 35–40. DOI: 10.1109/SSRR.2008.4745874
89. Eich, M. Adaptive stair-climbing behaviour with a hybrid legged-wheeled robot / M. Eich, F. Grimminger, F. Kirchner // *Advances in Mobile Robotics*. – 2008. – P. 768–775. DOI: 10.1142/9789812835772_0093
90. Wheel transformer: A miniaturized terrain adaptive robot with passively transformed wheels / Y. S. Kim, G.P. Jung, H. Kim // *International Conference on Robotics and Automation*. – 2013. – P. 5625–5630. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631385
91. Wheel transformer: A wheel-leg hybrid robot with passive transformable wheels / Y. S. Kim, G. P. Jung, H. Kim // *Transactions on Robotics*. – 2014. – Vol. 30, №6. – P. 1487–1498. DOI: 10.1109/TRO.2014.2365651
92. Insect inspired unsupervised learning for tactic and phobic behavior enhancement in a hybrid robot / P. Arena [et al.] // *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. – 2010. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN.2010.5596542
93. Highly mobile and robust small quadruped robots / J. M. Morrey, B. Lambrecht, A.D. Horchler [et al.] // *In Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453)*. – 2003. – Vol. 1. – P. 82–87. DOI: 10.1109/IROS.2003.1250609
94. Boston Dynamics wheeled robot «Handle». – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=-7xvqQeoA8c>, Published on 27th February 2017 and <https://www.bostondynamics.com/handle>, <https://robots.ieee.org/robots/handle> (дата обращения 10.09.2020).
95. The hybrid OmniClimber robot: wheel based climbing, arm based plane transition, and switchable magnet adhesion / M. Tavakoli,

J. Lourenco, C. Viegas [et al.] // *Mechatronics*. – 2016. – Vol. 36. – P. 136–146. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2016.03.007

96. *Zakharov, K.* Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots / K. Zakharov, A. Saveliev, O. Sivchenko // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. – 2020. – P. 319–330. DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_31

97. *Ryumin, D.* Multimodal User Interface for an Assistive Robotic Shopping Cart / Ryumin D., Kagirow I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, No 12. – P. 2093.

Черских Екатерина Олеговна — младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

E-mail: cherskikh.e@iias.spb.su

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4443-2281>

Ерашов Алексей Алексеевич — младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

E-mail: erashov.a@iias.spb.su

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8003-3643>

Быков Александр Норайрович — младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

E-mail: bykov.a@iias.spb.su

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8025-7209>

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF AUTONOMOUS ROBOTIC SYSTEMS BY THEIR ENERGY CONSUMPTION

© 2021 E. O. Cherskikh✉, A. A. Erashov, A. N. Bykov

*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory of Autonomous Robotic Systems
39, 14th Line, 199178 St. Petersburg, Russian Federation*

Annotation. The paper presents an analysis of autonomous robotic systems and develops a classification which establishes the dependency between the overall dimensions, weight, energy consumption, and energy intensity of the power source of the said systems. The analysis of the existing classifications of robotic systems demonstrated that most papers focus on the classifications of forms, properties, and purposes of robots, as well as factors affecting energy consumption. Analysis and classification of autonomous robotics according to the level of energy consumption will help to determine the most efficient class and power level of the wireless power transmission system for a particular robot at the design stage, depending on the weight and dimensions of the robot. The task is especially relevant for the actively developing sphere of wireless systems for transmitting energy to mobile robots. This article focuses on autonomous mobile ground robots designed for indoor use. We considered the following types of robots: wheeled, walking, humanoid, and hybrid robots that combine several types of structures. The studied parameters were: power consumption, weight and dimensions of the robot, the power source, and its output performance. As a result, we identified four groups of robotic systems in terms of energy consumption: low energy consumers (up to 10 W), medium energy consumers (from 10 to 250 W), high energy consumers (from 250 to 1000 W), and ultra-high energy consumers (over 1000 W). We also determined the ranges of energy consumption, linear dimensions, mass, and capacity of accumulators of robotic devices in each group. The article presents the dependency curves of the consumed energy on the weight and dimensions of the considered robots.

Keywords: energy consumption of the robot, energy storage capacity, power supply of autonomous robotic systems, power consumption.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. GOST (2016) P. 60.0. 0.2–2016 Robots and robotic devices. Classification. Standardinform.
2. GOST (2019) P 60.0.0.4-2019/ISO 8373:2012 [Robots and robotic devices. Terms and definitions. Standardinform.
3. Sokolov I. A., Misharin A. S., Kupriyanovsky V. P., Pokusaev O. H., Kupriyanovsky Y. V. (2018) Robots, Autonomous Robotic Systems, Artificial Intelligence and the Transformation of The Market of Transport and Logistics Services in the Digitalization of The Economy. *International Journal of Open Information Technologies*. 6(4). P. 92–108 (in Russian).
4. Bychkov I. V., Kenzin M. Yu., Maksimkin N. N. (2019) A two-level evolutionary approach to the routing of a group of underwater robots under conditions of periodic rotation of the composition. *Proceedings of SPIIRAS*. 18(2). P. 267–301 (in Russian).
5. IEEE Std 1872-2015, IEEE Standard Ontologies for Robotics and Automation, 2015. Available from: doi:10.1109/IEEESTD.2015.7084073.

✉ Cherskikh Ekaterina O.
e-mail: cherskikh.e@iias.spb.su

6. *Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P.* (2019) Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. International Conference on Interactive Collaborative Robotics. P. 193–203. Available from: doi:10.1007/978-3-030-26118-4_19.
7. *Qiu C., Chau K. T., Liu C., Chan C. C.* (2013) Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging. World electric vehicle symposium and exhibition (EVS27). P. 1–9. Available from: doi: 10.1109/EVS.2013.6914731.
8. *Wang Y., Qiao J., Du J., Wang F., Zhang W.* (2018) A view of research on wireless power transmission Journal of Physics: Conference Series. 1074(1). Available from: doi:10.1088/1742-6596/1074/1/012140.
9. *Pellitteri F.* (2016) Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries: PhD Thesis. Palermo.
10. *Dobra A.* (2014) General classification of robots. Size criteria. 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD). 1–6. Available from: doi:10.1109/RAAD.2014.7002249.
11. *Spyridon M. G., Eleftheria M.* (2012) Classification of domestic robots. Proceedings in ARSA-Advanced Research in Scientific Areas. 1(7). P. 1693.
12. *Schaefer K. E., Sanders T. L., Yordon R. E., Billings D. R., Hancock P. A.* (2012) Classification of robot form: Factors predicting perceived trustworthiness. Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. 56(1). P. 1548–1552. Available from: doi:10.1177/1071181312561308.
13. *Fong T., Nourbakhsh I., Dautenhahn K.* (2003) A survey of socially interactive robots. Robotics and autonomous systems. 42(3–4). P. 143–166. Available from: doi:10.1016/S0921-8890(02)00372-X.
14. *Campion G., Bastin G., Dandrea-Novel B.* (1996) Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. IEEE transactions on robotics and automation. 12(1). P. 47–62. Available from: doi:10.1109/70.481750.
15. *Shin E., Kwak S. S., Kim M. S.* (2008) A study on the elements of body feature based on the classification of social robots. RO-MAN 2008-The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. P. 514–519. Available from: doi:10.1109/ROMAN.2008.4600718.
16. *Kraevsky S. V., Rogatkin D. A.* (2010) Medical robotics: the first steps of medical robots. Russian Journal: Technologies of live systems. 7(4). P. 3–14.
17. *Xie L., Herberger W., Xu W., Stol K. A.* (2016) Experimental validation of energy consumption model for the four-wheeled omnidirectional Mecanum robots for energy-optimal motion control. In 2016 IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). P. 565–572. Available from: doi:10.1109/AMC.2016.7496410.
18. *Pavliuk N., Kharkov I., Zimuldinov E., Saprychev V.* (2020) Development of Multipurpose Mobile Platform with a Modular Structure. In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. P. 137–147. Available from: doi:10.1007/978-981-13-9267-2_12.
19. *Ripel T., Hrbáček J., Krejsa J.* (2011) Design of the Frame for Autonomous Mobile Robot with Ackerman Platform. Proceedings Engineering Mechanics. P. 515–518.
20. *Parasuraman R., Kershaw K., Pagala P., Ferre M.* (2014) Model based on-line energy prediction system for semi-autonomous mobile robots. 2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. P. 411–416. Available from: doi:10.1109/ISMS.2014.76.
21. *Caprari G., Balmer P., Piguet R., Siegwart R.* (1998) The Autonomous Micro Robot “Alice”: a platform for scientific and commercial applications. MHA’98. Proceedings of the 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science. Creation of New Industry. P. 231–235. Available from: doi:10.1109/MHS.1998.745787.
22. *Song G., Yin K., Zhou Y., Cheng X.* (2009) A surveillance robot with hopping capabilities for home security. IEEE Transactions on Consumer Electronics. 55(4). P. 2034–2039. Available from: doi: 10.1109/TCE.2009.5373766.
23. *Wu J., Tang S. Y., Fang T., Li W., Li X., Zhang S.* (2018) A Wheeled Robot Driven by a Liq-

uid-Metal Droplet. *Advanced materials*. 30(51). Available from: doi: 10.1002/adma.201805039.

24. Kovač M., Schlegel M., Zufferey J. C., Floreano D. (2009) A miniature jumping robot with self-recovery capabilities. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. P. 583–588. Available from: doi: 10.1109/IROS.2009.5354005.

25. Morales J., Martínez J. L., Mandow A., Pequeño-Boyer A., García-Cerezo A. (2010) Simplified power consumption modeling and identification for wheeled skid-steer robotic vehicles on hard horizontal ground. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2010. – P. 4769–4774. Available from: doi: 10.1109/IROS.2010.5649292.

26. Jun C., Deng Z., Jiang S. (2004) Study of locomotion control characteristics for six wheels driven in-pipe robot. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. P. 119–124. Available from: doi: 10.1109/ROBIO.2004.1521762.

27. Bayar G., Koku A. B., İlhan Konukseven E. (2009) Design of a configurable all terrain mobile robot platform. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*. 3(4). P. 366–373.

28. Guo T., Guo J., Huang B., Peng H. (2019) Power consumption of tracked and wheeled small mobile robots on deformable terrains-model and experimental validation. *Mechanism and Machine Theory*. 133. P. 347–364. Available from: doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.001.

29. Ayob M. A. B., Zakaria M. F. (2011) 3WD omni-wheeled mobile robot using ARM processor for line following application. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*. P. 410–414. Available from: doi: 10.1109/ISIEA.2011.6108741.

30. Kalra S., Patel D., Stol K. Design and hybrid control of a two wheeled robotic platform. *Australasian Conference on Robotics and Automation*. Article ID: 8721107.

31. Documentation Synchronous Servomotor AM3100. (2012) Available from: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/am3100_ba_en.pdf (accessed 5th September 2020).

32. Asiri S., Khademianzadeh F., Monadjemi A., Moallem P. (2019) The Design and Development of a Dynamic Model of a Low-Power Consumption. Two-Pendulum Spherical Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 24(5). P. 2406–2415. Available from: doi: 10.1109/TMECH.2019.2934180.

33. Jeong K. W., Lee J., Lee M. C. (2017) Energy-saving trajectory planning for an inverse ball drive robot with Mecanum wheels. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 15(2). P. 752–762. Available from: doi: 10.1007/s12555-015-0259-9.

34. Saputra R. P., Rijanto E., Saputra H. M. (2012) Trajectory scenario control for the remotely operated mobile robot LIPI platform based on energy consumption analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*. 7(8). P. 851–866.

35. Rijanto E., Saputra R. P., Saputra H. M. (2013) Positioning control for the mobile robot LIPI articulated robot arm based on PD control approach. *International Journal of Applied Engineering Research*. 8(4). P. 423–433.

36. Liu S., Sun D. (2014) Minimizing Energy Consumption of Wheeled Mobile Robots via Optimal Motion Planning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 19(2). P. 401–411. Available from: doi:10.1109/tmech.2013.2241777.

37. Sakayori G., Ishigami G. (2017) Energy efficient slope traversability planning for mobile robot in loose soil / G. Sakayori, G. Ishigami // *International Conference on Mechatronics (ICM)*. P. 99–104. Available from: doi: 10.1109/ICMECH.2017.7921087.

38. Dogru S., Marques L. (2018) Physics-Based Power Model for Skid-Steered Wheeled Mobile Robots. 34(2). P. 421–433. Available from: doi:10.1109/tro.2017.2778278.

39. Mandow A., Gomez-de-Gabriel J. M., Martinez J. L., Munoz V. F., Ollero A., Garcia-Cerezo A. (1996) The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 3(4). P. 18–28. Available from: doi: 10.1109/100.556479.

40. Grzelczyk D., Stanczyk B., Awrejcewicz J. (2017) Kinematics, dynamics and power consumption analysis of the hexapod robot during walking with tripod gait. *International Journal of*

Structural Stability and Dynamics. 17(5). Available from: doi: 10.1142/S0219455417400107.

41. *Kottege N., Parkinson C., Moghadam P., Elfes A., Singh S. P.* (2015) Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains. International Conference on Robotics and Automation (ICRA). P. 5140–5147. Available from: doi: 10.1109/ICRA.2015.7139915.

42. *Gregorio P., Ahmadi M., Buehler M.* (1997) Design, control, and energetics of an electrically actuated legged robot. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). 27(4). P. 626–634. Available from: doi: 10.1109/3477.604106.

43. *Luneckas M., Luneckas T., Udris D., Ferreira N. M. F.* (2014) Hexapod robot energy consumption dependence on body elevation and step height. Elektronika ir Elektrotechnika 20(7). P. 7–10. Available from: doi: 10.5755/j01.eee.20.7.8017.

44. *Bodrov A., Cheah W., Green P. N., Watson S., Apsley J.* (2018) Joint space reference trajectory to reduce the energy consumption of a six-legged mobile robot. 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). P. 1–6. Available from: doi: 10.1109/IWED.2018.8321378.

45. Documentation Dynamixel MX-28, v1.31.30. (2018) Available at: [http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-28\(2.0\).htm](http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-28(2.0).htm) (accessed 5th September 2020).

46. Documentation Dynamixel MX-64, v1.31.30. (2018) Available at: [http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-64\(2.0\).htm](http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-64(2.0).htm) (accessed 5th September 2020).

47. *Sanz-Merodio D., Garcia E., Gonzalez-de-Santos P.* (2012) Analyzing energy-efficient configurations in hexapod robots for demining applications. Industrial Robot. 39(4). P. 357–364. Available from: doi: 10.1108/01439911211227926.

48. *Folgheraiter M., Aubakir B.* (2018) Design and modeling of a lightweight and low power consumption full-scale biped robot. International Journal of Humanoid Robotics. 15(5). Available from: doi: 10.1142/S0219843618500226.

49. *Li Y., Ma H.* (2013) FPGA-based Hexapod Robot Spider. In Proceedings of the International

Conference on Computer Design (CDES). The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2013.

50. *Tian X., Gao F., Qi C., Chen X.* (2014) Reaction forces identification of a quadruped robot with parallel-serial leg structure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 229(15). P. 2774–2787. Available from: doi:10.1177/0954406214563110.

51. SPOT user guide, release 2.0.1. (2020) Available from: <https://www.bostondynamics.com/sites/default/files/inline-files/spot-user-guide.pdf>, <https://www.bostondynamics.com/spot> (accessed 5th September 2020).

52. *Karumanchi S., Edelberg K., Baldwin I., Nash J., Reid J., Bergh C., Leichty J., Carpenter K., Shekels M., Gildner M., Newill-Smith D., Carlton J., Koehler J., Dobreva T., Frost M., Hebert P., Borders J., Ma J., Douillard B., Backes P., Kennedy B., Satzinger B., Lau C., Byl K., Shankar K., Burdick J.* (2017) Team RoboSimian: semi-autonomous mobile manipulation at the 2015 DARPA robotics challenge finals/ Journal of Field Robotics. 34(2). P. 305–332. Available from: doi: 10.1002/rob.21676.

53. *Lahr D. F., Yi H., Hong D. W.* (2016) Biologically inspired design of a parallel actuated humanoid robot. Advanced Robotics. 30(2). P. 109–118. Available from: doi: 10.1080/01691864.2015.1094408.

54. *Ott C., Roa M., Schmidt F., Friedl M., Engelsberger J., Burger R., Werner A., Dietrich A., Leidner D., Henze B., Eiberger O., Beyer A., Bäuml B., Borst C., Albu-Schäffer A.* (2016) Mechanisms and design of DLR humanoid robots. Humanoid Robotics: A Reference. P. 1–26. Available from: doi: 10.1007/978-94-007-7194-9_132-1.

55. *Yoshiike T., Kuroda M., Ujino R., Kanemoto Y., Kaneko H., Higuchi, Komura S., Iwasaki S., Asatani M., Koshiishi T.* (2019) The Experimental Humanoid Robot E2-DR: A Design for Inspection and Disaster Response in Industrial Environments. Robotics and Automation Magazine. 26(4). P. 46–58. Available from: doi: 10.1109/MRA.2019.2941241.

56. *Hosoda Y., Egawa S., Tamamoto J., Yamamoto K., Nakamura R., Togami M.* (2006)

Basic design of human-symbiotic robot EMIEW. International Conference on Intelligent Robots and Systems. 5079–5084. Available from: doi: 10.1109/IROS.2006.282596.

57. Schwarz M., Schreiber M., Schueller S., Missura M., Behnke S. (2012) NimbRo-OP humanoid teensize open platform. Proceedings of 7th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots.

58. Documentation Synchronous Servomotor MX-106, v1.31.30. Available at: <https://manual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106/> (accessed 5th September 2020).

59. Ficht G., Allgeuer P., Farazi H., Behnke S. (2017) NimbRo-OP2: Grown-up 3D printed open humanoid platform for research. IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics. P. 669–675. Available from: doi: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246944.

60. Saeedvand S., Jafari M., Alizadeh V., Ranjbaran A., Abbaszadeh M. (2017) IRC adult size humanoid robot soccer team description paper. RoboCup humanoid robot league.

61. Attamimi M. (2019) Implementation of Ichiro Teen-Size Humanoid Robots For Supporting Autism Therapy. Journal on Advanced Research in Electrical Engineering. 3(1).

62. Dang L., Kwon J. (2009) Mechatronic design of NAO humanoid. IEEE International Conference on Robotics and Automation. P. 769–774. Available from: doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152516

63. Allgeuer P., Farazi H., Schreiber M., Behnke S. (2015) Child-sized 3D printed Igus humanoid open platform. IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). P. 33–40. Available from: doi: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363519.

64. Dang L., Kwon J. (2016) Design of a new cost-effective head for a low-cost humanoid robot. IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON). 1–7. Available from: doi:10.1109/UEMCON.2016.7777923.

65. Documentation Servomotor XL320. Available from: <https://manual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl320/> [accessed 5th September 2020].

66. ROBOTIS MINI user guide. – Available from: <http://www.robotis.us/robotis-mini-intl/> (accessed 5th September 2020).

67. Zapata S., Mora I. D., Suarez G. (2017) Mechatronic design of PRH: A NEW 3D printed and anthropometric humanoid robotic platform. IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). P. 1–6.

68. Hobart C. G., Mazumdar A., Spencer S. J., Quigley M., Smith J. P., Bertrand S., Pratt J., Kuehl M., Buerger S. P. (2020) Achieving Versatile Energy Efficiency With the WANDERER Biped Robot. Transactions on Robotics. P. 959–966. Available from: doi: 10.1109/TRO.2020.2969017.

69. Dincer F., Byagowi A., Kopacek P. (2019) Communication of Cost Oriented Humanoid Robots. IFAC-PapersOnLine. 52(25). P. 100–103. Available from: doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.454.

70. Hernandez E., Velázquez R., Giannoccaro N. I., Gutierrez C. A. (2017) Kinematic analysis and workspace simulation of humanoid robot KUBO. IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII). P. 1–6. Available from: doi:10.1109/CONCAPAN.2017.8278461.

71. Documentation Servomotor RX64. – Available from: <https://manual.robotis.com/docs/en/dxl/rx/rx-64/> [accessed 5th September 2020].

72. Documentation Servomotor RX28. – Available from: <https://manual.robotis.com/docs/en/dxl/rx/rx-28/> [accessed 5th September 2020].

73. Reher J., Cousineau E. A., Hereid A., Hubicki C. M., Ames A. D. (2016) Realizing dynamic and efficient bipedal locomotion on the humanoid robot DURUS. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). P. 1794–1801. Available from: doi: 10.1109/ICRA.2016.7487325.

74. Documentation Frameless Servomotor ILM. Available from: https://www.tq-group.com/filedownloads/files/products/robodrive/data-sheets/en/DRVA_DB_Servo-Kits_ILM_EN_Rev407_Web.pdf [accessed 5th September 2020].

75. Cafolla D., Wang M., Carbone G., Ceccarelli M. (2016) LARMbot: a new humanoid robot with parallel mechanisms. Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. P. 275–283.

Available from: doi: 10.1007/978-3-319-33714-2_31.

76. Wang M., Ceccarelli M., Carbone G. (2020) Design and Development of the Cassino Biped Locomotor. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 12(3). Available from: doi: 10.1115/1.4045181.

77. Documentation Miniature Linear Motion Series L16. Available from: <https://docs.rs-online.com/cd2d/0900766b814ad9df.pdf> [accessed 5th September 2020].

78. Russo M., Cafolla D., Ceccarelli M. (2018) Design and experiments of a novel humanoid robot with parallel architectures. *Robotics*. 7(4). P. 79. Available from: doi: 10.3390/robotics7040079.

79. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Koolen T., Marion P., Tedrake R. (2015) Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*. 40(3). P. 429–455. Available from: doi:10.1007/s10514-015-9479-3.

80. User guide ATLAS DRC Robot. – Available from: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/atlas-drc-robot-is-75-percent-new-completely-unplugged> [accessed 5th September 2020].

81. Tsagarakis N. G., Caldwell D. G., Negrello F., Choi W., Baccelliere L., Loc V. G., Noorden J., Muratore L., Margan A., Cardellino A., Natale L., Mingo Hoffman E., Dallali H., Kashiri N., Malzahn J., Lee J., Kryczka P., Kanoulas D. (2017) Walk-man: A high-performance humanoid platform for realistic environments. *Journal of Field Robotics*, 2017. 34(7). P. 1225–1259. Available from: doi: 10.1002/rob.21702.

82. Negrello F., Settini A., Caporale D., Lentini G., Poggiani M., Kanoulas D. Muratore L., Luberto E., Santaera G., Ciarleglio L., Ermini L., Pallottino L., Caldwell D., Tsagarakis N. G., Bichi A., Garabin M., Catalano M. G. (2018) Walk-man humanoid robot: Field experiments in a post-earthquake scenario. *Robotics and Automation Magazine*. 99.

83. Jung T., Lim J., Bae H., Lee K. K., Joe H. M., Oh J. H. (2018) Development of the humanoid disaster response platform DRC-HUBO+. *IEEE Transactions on Robotics*. 34(1). P. 1–17. Available from: doi: 10.1109/TRO.2017.2776287.

84. Smith J. A., Sharf I., Trentini M. (2006) PAW: a hybrid wheeled-leg robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. P. 4043–4048. Available from: doi: 10.1109/ROBOT.2006.1642323.

85. Dalvand M. M., Moghadam M. M. (2006) Stair climber smart mobile robot (MSRox). *Autonomous robots*. 20(1). P. 3–14. Available from: doi: 10.1007/s10514-006-5364-4.

86. Dalvand M. M., Moghadam M. (2003) Design and modeling of a stair climber smart mobile robot (MSRox). *ICAR 2003: Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics*. P. 1062–1067. Available from: doi: 10.1007/s10514-006-5364-4.

87. Chen S. C., Huang K. J., Chen W. H., Shen S. Y., Li C. H., Lin P. C. (2013) Quattroped: a leg-wheel transformable robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 19(2). P. 730–742. Available from: doi: 10.1109/TMECH.2013.2253615.

88. Eich M., Grimminger F., Kirchner F. (2008) A versatile stair-climbing robot for search and rescue applications. *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. P. 35–40. Available from: doi: 10.1109/SSRR.2008.4745874.

89. Eich M., Grimminger F., Kirchner F. (2008) Adaptive stair-climbing behaviour with a hybrid legged-wheeled robot. *Advances in Mobile Robotics*. P. 768–775. Available from: doi: 10.1142/9789812835772_0093.

90. Kim Y. S., Jung G. P., Kim H., Cho K. J., Chu C. N. (2013) Wheel transformer: A miniaturized terrain adaptive robot with passively transformed wheels. *International Conference on Robotics and Automation*. P. 5625–5630. Available from: doi: 10.1109/ICRA.2013.6631385.

91. Kim Y. S., Jung G. P., Kim H., Cho K. J., Chu C. N. (2014) Wheel transformer: A wheel-leg hybrid robot with passive transformable wheels. *Transactions on Robotics*. 30(6). P. 1487–1498. Available from: doi: 10.1109/TRO.2014.2365651.

92. Arena P., De Fiore S., Patané L., Pollino M., Ventura C. (2010) Insect inspired unsupervised learning for tactic and phobic behavior enhancement in a hybrid robot. *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. P. 1–8. Available from: doi: 10.1109/IJCNN.2010.5596542.

93. *Morrey J. M., Lambrecht B., Horchler A. D., Ritzmann R. E., Quinn R. D.* (2003) Highly mobile and robust small quadruped robots. In *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)* (Cat. No. 03CH37453). 1. P. 82–87. Available from: doi: 10.1109/IROS.2003.1250609.
94. Boston Dynamics. (2017) Wheeled robot “Handle”. [Video] Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=-7xvqQeoA8c>, <https://www.bostondynamics.com/handle>, <https://robots.ieee.org/robots/handle> (accessed 10th September 2020).
95. *Tavakoli M., Lourenco J., Viegas C., Neto P., de Almeida A. T.* (2016) The hybrid OmniClimber robot: wheel based climbing, arm based plane transition, and switchable magnet adhesion. *Mechatronics*. 36. P. 136–146. Available from: doi: 10.1016/j.mechatronics.2016.03.007.
96. *Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O.* (2020) Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. P. 319–330. Available from: doi: 10.1007/978-3-030-60337-3_31.
97. *Ryumin D., Kagirov I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A.* (2020) Multimodal User Interface for an Assistive Robotic Shopping Cart. *Electronics*. 9(12), 2093. doi: 10.3390/electronics9122093.

Cherskikh Ekaterina O. — research assistant, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg.
E-mail: cherskikh.e@iias.spb.su
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4443-2281>

Erashov Aleksei A. — research assistant, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg.
E-mail: erashov.a@iias.spb.su
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8003-3643>

Bykov Aleksandr N. — research assistant, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg.
E-mail: bykov.a@iias.spb.su
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8025-7209>