

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ОПОР ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ****Ю.Г. Алейников**

**Реферат.** Перемещение машины с шагающим движителем сопровождается динамическими колебаниями ее корпуса и большим расходом энергии на возвратно-поступательные движения опор. Наибольшее влияние на плавность хода оказывают знакопеременные ускорения подвижных масс и жесткий контакт опоры с поверхностью земли. Для снижения негативных факторов, влияющих на плавность движения и расход энергии, предлагается оптимизировать траекторию движения опор. Оптимизированная траектория движения опоры позволила снизить расход электроэнергии за один цикл движения, по сравнению с траекторией, лежащей в одной плоскости, на 12...18 %. С целью уменьшения ударных нагрузок экспериментальным путем определен временной интервал между срабатыванием датчика удара и датчика нагружения при опускании опоры на поверхность, который составил около 100 мс при скорости опускания 20 мм/сек. Снижение скорости движения опоры в момент срабатывания датчика удара после соприкосновения с поверхностью и ее последующее плавное нагружение позволило уменьшить ударные нагрузки и колебания корпуса, вызванные резкими ударами стоп о поверхность. Ускорение опоры при ударе снизилось с 6g до 1,5g. Срабатывание датчика удара, расположенного на стопе опоры, при касании с твердыми и мягкими поверхностями требует подстройки его чувствительности во время движения машины. Оптимизация алгоритма фильтрации ложных срабатываний и динамическое изменение чувствительности не дало удовлетворительного результата, поэтому конструкцию необходимо дополнить дополнительными датчиками нагружения реагирующими на контакт с поверхностью при опускании опоры.

**Ключевые слова:** шагающая машина, датчики, роботы, алгоритмы движения шагающей машины, электроника, микроконтроллеры.

**Введение.** Робототехника – одно из перспективных быстроразвивающихся направлений в современном сельском хозяйстве. Автоматические машины способны выполнять многие виды работ быстрее и качественнее, чем человек. Вместе с развитием механических платформ изменяется и программное обеспечение. Сегодня существуют технологии и методологии разработки программного обеспечения, позволяющие организовать работу с данными, наладить сбор информации с множества датчиков, реализовать обход препятствий и поиск кратчайшего пути.

Шагающая машина – это платформа, использующая для передвижения шесть ног. При перемещении по не ровной поверхности в сложных условиях шагающие машины могут быть более эффективными, чем колесные и гусеничные транспортные средства [1]. Кроме того, благодаря маневренности опор шагающие машины способны передвигаться по крутым склонам, преодолевать препятствия с резким перепадом высот, разворачивать корпус на месте и двигаться в любом направлении [2, 3]. Они применимы в условиях открытого и закрытого грунта для точного мониторинга состояния выращиваемой культуры и факторов, негативно влияющих на рост и развитие растений. В этой сфере шагающие машины имеют преимущество перед колесными и гусеничными роботами, поскольку контактируют с поверхностью в отдельных точках и не наносят вред сельскохозяйственным растениям [4]. К числу основных недостатков шагающих машин можно отнести невысокие скорости передвижения, динамические колебания корпуса во время перемещения и сложность алгоритмов управления [5, 6, 7].

Цель исследования – снижение энергозатрат путем оптимизации траектории движения опор шагающей машины с динамической устойчивостью.

**Условия, материалы и методы.** Для моделирования движения шагающей машины и экспериментальных исследований был изготовлен стенд, повторяющий все электронные системы машины с одной опорой. Стенд позволяет проводить моделирование движения, проверять конструкторские решения и отлаживать программное обеспечение (рис. 1).

На стенде были опробованы несколько конструкций датчиков и разные типы поверхностей: твердые – бетон, асфальт, керамическая плитка, сухая земля; мягкие – торф, трава, рыхлая почва. Разработаны алгоритмы сбора данных с сенсоров и их многопоточная обработка с выдачей команд на исполнительные механизмы.

На стенде установлен мини компьютер Raspberry Pi, импульсный источник питания, преобразователи напряжения, цепи силовой защиты, USB-HUB для подключения микроконтроллеров, отвечающих за первичную обработку данных с датчиков и последующую их передачу в цифровом виде на бортовой компьютер. Одной из важных составляющих стенда – контроллер сервомеханизмов, который включает в себя датчики тока и аналоговые датчики положения выходного вала привода. На плате установлены переключатели для преобразования входных аналоговых сигналов, что дает возможность применять широкий спектр моделей сервомеханизмов с различными значениями сигналов обратной связи по напряжению для углового положения выходного вала редуктора (рис. 2). При помощи

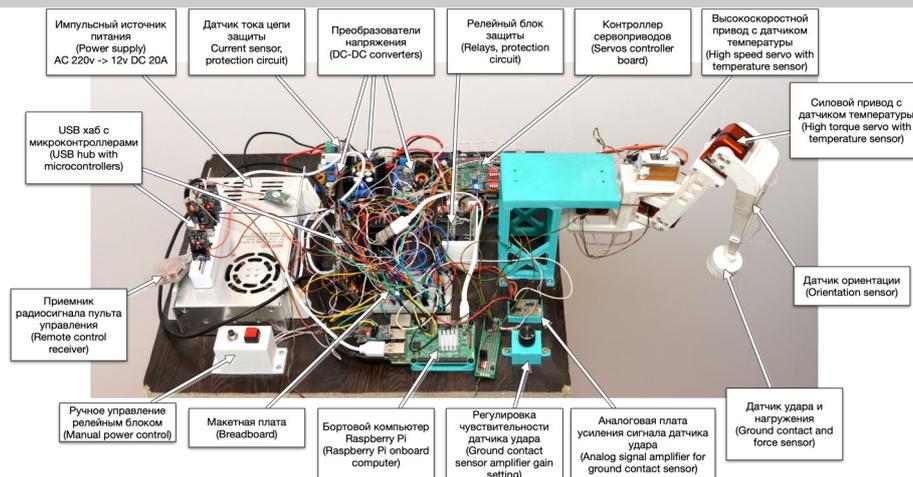


Рис. 1 – Лабораторный стенд шагающей машины

аналогового сигнала с датчика положения выходного вала привода осуществляется обратная связь для подтверждения перемещения рычагов опоры. Датчики тока измеряют количественный расход энергии каждого привода. Две группы выходов сервоприводов позволяют использовать сервоприводы с двумя различающимися напряжениями питания электромоторов. Через порт ввода-вывода осуществляется обмен командами и данными обратной связи с бортовым компьютером.

Выбор бортового компьютера (Raspberry Pi) был обусловлен стоимостью, возможностью масштабирования и набором доступных технологий разработки. Программирование осуществляли с использованием кроссплатформенный язык программирования Swift компании Apple. В качестве библиотеки для многопоточной обработки данных использовали Grand Central Dispatch (GCD) – технологию

Apple, предназначенную для создания приложений, использующих преимущества многоядерных процессоров. Она использует потоки на низком уровне, позволяя разработчику сконцентрироваться на высокоуровневых задачах. Задачи GCD легковесны, мало ресурсоемки в создании и переключении [8, 9]. Такие компьютерные технологии хорошо подходят для моделирования движений опорными и сбора данных с датчиков во время перемещения. Новизна исследования заключается в том, что написанный программный код можно встроить в качестве модуля в ROS и использовать разработанную электронику в промышленной роботостроении, а также внедрять в бортовой компьютер библиотеки, алгоритмы и электронные устройства, созданные другими разработчиками. ROS (Robot Operating System – операционная система для роботов) – это фреймворк для программирования роботов,

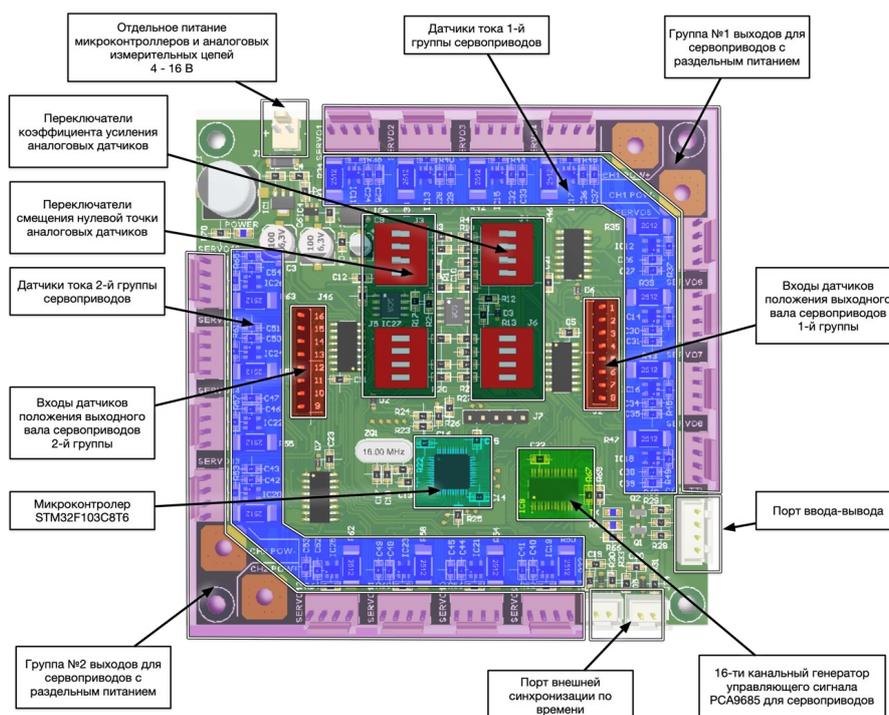


Рис. 2 – Контроллер сервоприводов

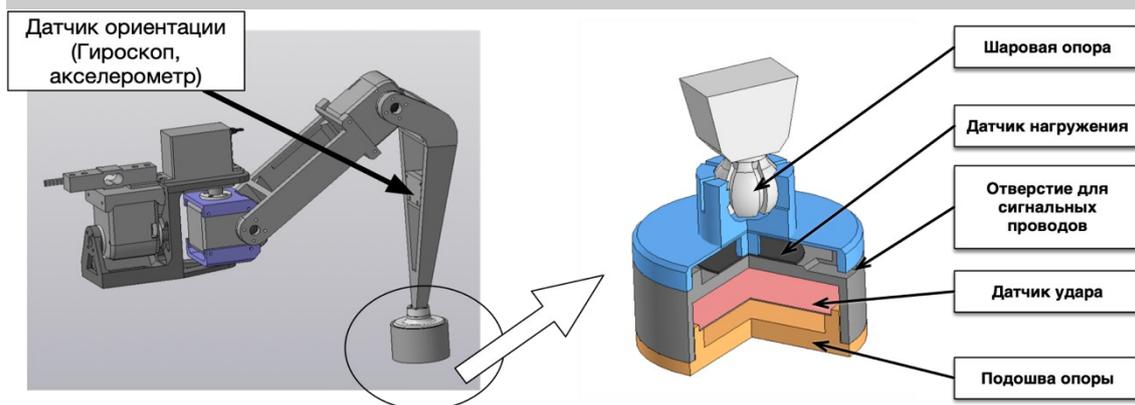


Рис. 3 – Расположение датчиков на подвижном рычаге

предоставляющий функциональность для распределённой работы, основанной на архитектуре графов, когда обработка данных происходит в узлах, которые могут получать и передавать сообщения между собой.

На подвижной опоре смонтировано несколько датчиков: ускорения и ориентации, размещенный на подвижном рычаге, удара и нагружения – в стопе (рис. 3). Датчик нагружения представляет собой полимер изменяющий сопротивление под воздействием механической нагрузки [10, 11].

Движение шагающей машины по сложной неровной поверхности – комплексная задача для бортовой вычислительной системы. Во время ее перемещения из-за возвратно-поступательных движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях возникают колебания корпуса [12]. Для снижения энергозатрат и колебаний корпуса машины были предложены две траектории перемещения опоры [13]. При помощи стенда был смоделирован процесс движения машины с быстрым возвратно-поступательным перемещением стопы: по траектории ВСЕ с опусканием опоры на поверхность со срабатыванием датчиков удара и нагружения на участке ДЕ и созданием тягового усилия на траектории ЕА (рис. 4).

**Анализ и обсуждение результатов.** Движение опоры по плоской траектории (см. рис. 4 а) требует большего количества энергии, по сравнению с искривленной (см. рис. 4 б). Оптимизированная траектории перемещения опоры позволяет снизить расход электрической энергии за один цикл, по сравнению с

траекторией, лежащей в одной плоскости, на 12...18 %.

Для снижения ударных нагрузок и колебаний корпуса важно плавное опускание опоры и мягкий контакт с поверхностью. При движении по траектории ДЕ была снята осциллограмма с датчика удара и датчика нагружения опоры (рис. 5), которая показывает временную задержку между срабатыванием двух датчиков. Интервал времени между срабатыванием датчика удара и началом нарастания сигнала датчика нагружения необходим для своевременной реакции системы управления и реакции приводов. Если он будет слишком маленьким система не сможет вовремя снизить скорость опускания опоры на участке ДЕ, что приведет к резкому нагружению опоры весом машины, а инертность привода, в свою очередь, усилит колебания ее корпуса. Слишком большим интервал времени отразится на скоростных возможностях машины. Она будет двигаться плавно, но медленно. Поэтому необходимо найти баланс между скоростью опускания стопы и величиной колебания корпуса опытным путем ориентируюсь на интервал времени между срабатыванием датчика удара и нагружения.

Для решения этой задачи был смоделирован процесс контакта опоры с поверхностью и создан алгоритм контроля движения. Опускание опоры осуществляли со скоростью 20 мм/сек. В момент срабатывания датчика удара (короткий импульс вверх) она снижалась до 5 мм/сек. При возрастании напряжения на датчике нагружения до 3-х вольт опускание опоры прекращалось. После задержки в 400 мс опора поднималась для выполнения следую-

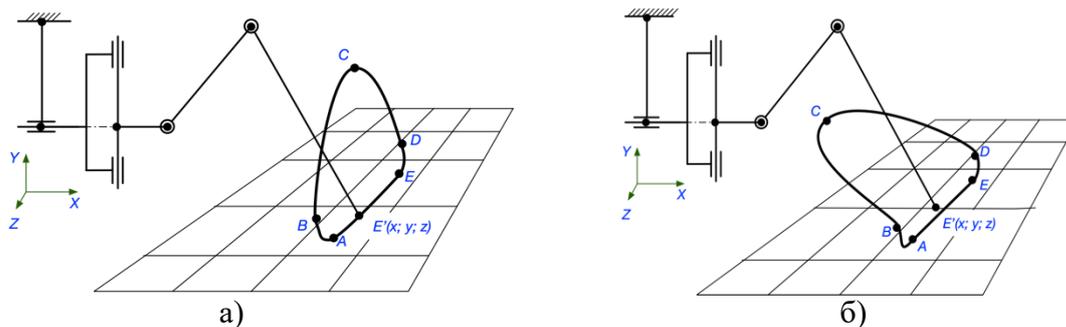


Рис. 4 – Траектория движения стопы опоры: а – плоская; б – искривленная

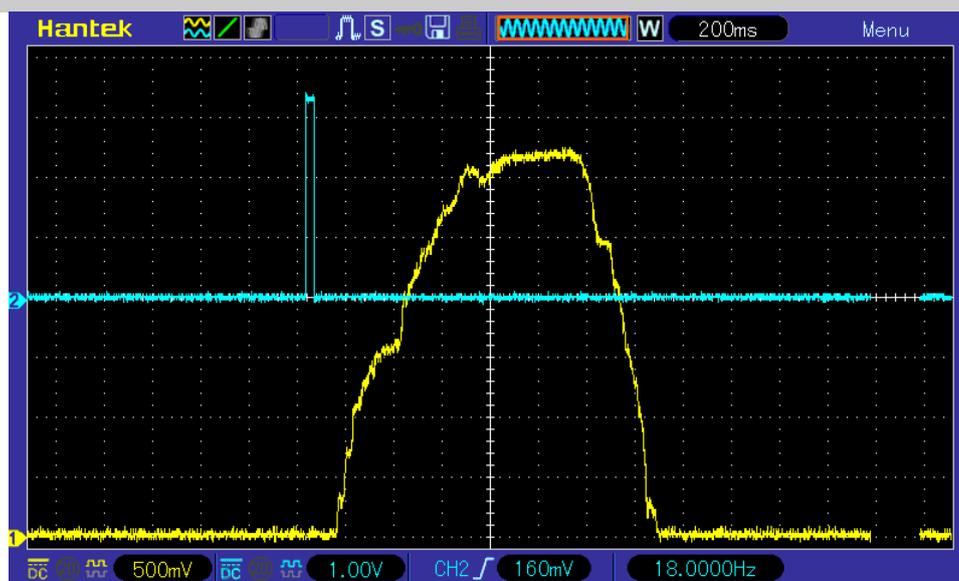


Рис. 5 – Осциллограмма сигналов с датчика удара и датчика нагружения опоры: кривая 1 – датчик нагружения, кривая 2 – датчик удара (короткий импульс)

шего шага со скоростью 5 мм/сек. По спаду значения показания датчика нагружения скорость подъема опоры на траектории АВ увеличивалась до 20 мм/сек на участке кривой ВС.

Применение датчика удара оказалось малоэффективным. На твердых поверхностях (сухой грунт, бетон, асфальт) он срабатывал, а на мягких необходимо было увеличение чувствительности, что приводило к ложным срабатываниям. В процессе движения опоры так же проводились измерения датчиком ускорения. При срабатывании датчика удара и плавном опускании опоры перегрузка, зафиксированная датчиком, составила 1,5 g. При сильном ударе, в случае, когда датчик не срабатывал, она достигала 6 g. Оптимизация алгорит-

ма фильтрации ложных срабатываний и динамическое изменение чувствительности не дало удовлетворительного результата в снижении ударных нагрузок, поэтому в конструкцию необходимо дооснастить дополнительными датчиками нагружения реагирующим на контакт с поверхностью при опускании опоры.

**Выводы.** Оптимизация траектории движения опоры снижает расход энергии и колебания корпуса машины. Перемещение опоры по оптимизированной искривленной траектории требует на 12...18 % меньше энергии за один цикл движения, чем при плоской траектории. Срабатывание датчика удара снижает ударные перегрузки с 6 g до 1,5 g.

#### Литература

1. Foothold Planning and Gait Generation for a Hexapod Robot Traversing Terrains with Forbidden Zones / M. Rojas, N. Certad, J. Cappelletto, et al. // 12th Latin American Robotics Symposium and 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR), 2015. P. 49–54. doi: 10.1109/LARS-SBR.2015.70.
2. Петров Н. В. Разработка учебного шагающего мобильного робота // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 9 (38). С. 7. URL: <http://ptsj.ru/articles/520/520.pdf> (дата обращения: 18 июня 2020) doi: 10.18698/2541-8009-2019-09-520
3. Чернышев В. В., Вершинина И. П., Арыканцев В. В. Динамическая устойчивость шагающих платформ, передвигающихся по дну // Робототехника и искусственный интеллект: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. М.: Литера-Принт, 2019. С. 108–113.
4. Дидманидзе О. Н., Митягина Я. Г., Алейников Ю. Г. Принцип перемещения опор шагающих машин во время движения // Плоды и овощи – основа структуры здорового питания человека. Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2012. С. 381-384.
5. Чернышев В. В. Полевые исследования шагающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. №4. С. 20–22.
6. Grzelczyk D., Szymanowska O., Awrejcewicz J. Kinematic and dynamic simulation of an octopod robot controlled by different central pattern generators // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019. Vol. 233. No. 4. P. 400–417. doi: 10.1177/0959651818800187
7. Control strategy of stable walking for a hexapod wheel-legged robot / C. Zhihua, W. Shoukun, W. Junzheng, X. Kang et al., // ISA Transactions. 2020. Vol. 108. P.367–380. doi: 10.1016/j.isatra.2020.08.033.
8. Документация разработчика технологии GCD (Grand Central Dispatch) от Apple. URL: <https://apple.github.io/swift-corelibs-libdispatch/tutorial/> (Дата обращения: 05.10.2020).
9. Краткое описание технологии GCD (Grand Central Dispatch) от Apple. URL: [https://web.archive.org/web/20090920043909/http://images.apple.com/macosx/technology/docs/GrandCentral\\_TB\\_brief\\_20090903.pdf](https://web.archive.org/web/20090920043909/http://images.apple.com/macosx/technology/docs/GrandCentral_TB_brief_20090903.pdf) (Дата обращения: 05.10.2020).
10. Fielding M., Dunlop R., Damaren C. Hamlet: Force/position controlled hexapod walker - Design and systems // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01) (Cat. No.01CH37204). 2001. P. 984–989. doi: 10.1109/CCA.2001.973998.

11. Shaikh M., Salcić Z., Wang K. Analysis and selection of the Force Sensitive Resistors for gait characterisation // 6-th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7081176> (дата обращения: 17.10.2020) doi: 10.1109/icara.2015.7081176
12. Алейников Ю. Г., Митягина Я. Г. Моделирование параметров технологической роботизированной машины. М.: ООО «УМЦ «Триада», 2016. 120 с.
13. Алейников Ю. Г. Методика расчета приводов для многоногих шагающих машин на примере шестиногой шагающей машины // Международный технико-экономический журнал. 2013. № 1. С. 100–101.

**Сведения об авторе:**

Алейников Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, соискатель, e-mail: [Yuri@AleyRobotics.com](mailto:Yuri@AleyRobotics.com)  
 Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия

**WALKING MOTION OPTIMIZATION OF THE WALKING MACHINE WITH DYNAMIC STABILITY**  
**Y.G. Aleynikov**

**Abstract.** The movement of machines with a walking legs is accompanied by dynamic vibrations of its body and a large energy consumption for the reciprocating movements of the legs. The greatest influence on the smoothness of the course is exerted by the alternating accelerations of the moving masses and the rigid contact of the leg with the ground surface. To reduce the negative factors affecting the smoothness of movement and energy consumption, are proposed to optimize the trajectory of movement of the legs. The optimized trajectory of the legs movement made it possible to reduce the consumption of electrical energy by 12 ... 18% per cycle of movement compared to the trajectory lying in the same geometric plane. In order to reduce shock loads, the time interval between the triggering of the shock sensor and the shock sensor when lowering the support to the surface was experimentally determined, which was about 100 ms at a lowering speed of 20 mm/s. Reducing the speed of the leg at the moment of triggering the shock sensor after contact with the surface and its subsequent smooth loading made it possible to reduce shock loads and reduce body vibrations caused by sharp impacts of the feet on the surface. Support acceleration on impact decreased from 6g to 1.5g. The triggering of the shock sensor located on the support foot when it touches hard and soft surfaces requires adjusting the sensor's sensitivity while the machine is moving. Optimization of the algorithm for filtering false alarms and dynamic change in sensitivity did not give a satisfactory result, therefore, it is necessary to equip the design with additional load sensors that react to contact with the surface when lowering the support.

**Keywords:** walking machine, sensor, robotics, walking algorithm, electronics, microcontrollers.

**References.**

1. Rojas M, Certad N, Cappelletto J. Foothold planning and gait generation for a hexapod robot traversing terrains with forbidden zones. 12<sup>th</sup> Latin American Robotics Symposium and 3<sup>rd</sup> Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR). 2015; 49-54 p. doi: 10.1109/LARS-SBR.2015.70.
2. Petrov NV. Development of an educational walking mobile robot. [Internet]. Politekhnikeskii molodezhnyi zhurnal. 2019; 9 (38): 7 p. [cited 2020 June 18]. Available from: <http://ptsj.ru/articles/520/520.pdf> doi: 10.18698/2541-8009-2019-09-520.
3. Chernyshev VV, Vershinina IP, Arykantsev VV. Dinamicheskaya ustoichivost' shagayushchikh platform, peredvigayushchikhsya po dnu. Robototekhnika i iskusstvennyi intellekt: materialy XI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. [Dynamic stability of walking platforms moving along the bottom. Robotics and artificial intelligence: proceedings of XI All-Russian scientific and technical conference with international participation]. Moscow: Litera-Print. 2019; 108-113 p.
4. Didmanidze ON, Mityagina YaG, Aleinikov YuG. Printsip peremeshcheniya opor shagayushchikh mashin vo vremya dvizheniya. Plody i ovoshchi – osnova struktury zdorovogo pitaniya cheloveka. [The principle of moving the supports of walking machines during movement. Fruits and vegetables - the basis of the structure of healthy human nutrition]. Michurinsk: Michurinskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2012; 381-384 p.
5. Chernyshev VV. [Field research of walking machines]. Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny. 2004; (4): 20-22 p.
6. Grzelczyk D, Szymanowska O, Awrejcewicz J. Kinematic and dynamic simulation of an octopod robot controlled by different central pattern generators. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019; 233 (4): 400-417 p. doi: 10.1177/0959651818800187.
7. Zhihua C, Shoukun W, Junzheng W, Kang X. [Control strategy of stable walking for a hexapod wheel-legged robot]. ISA Transactions. 2020; (108): 367-380 p. doi: 10.1016/j.isatra.2020.08.033.
8. Documentation of the developer of technology GCD (Grand Central Dispatch) from Apple. [cited 2020 Oct. 05]. Available from: <https://apple.github.io/swift-corelibs-libdispatch/tutorial>.
9. Brief description of technology GCD (Grand Central Dispatch) from Apple. [cited 2020 Oct. 05]. Available from: [https://web.archive.org/web/20090920043909/http://images.apple.com/macosx/technology/docs/GrandCentral\\_TB\\_brief\\_20090903.pdf](https://web.archive.org/web/20090920043909/http://images.apple.com/macosx/technology/docs/GrandCentral_TB_brief_20090903.pdf).
10. Fielding M, Dunlop R, Damaren C. Hamlet: Force/position controlled hexapod walker - Design and systems. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01) (Cat. No.01Ch37204). 2001; 984-989 p. doi: 10.1109/CCA.2001.973998.
11. Shaikh M, Salcić Z, Wang K. Analysis and selection of the force sensitive resistors for gait characterization. [Internet]. 6<sup>th</sup> International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). 2015; / [cited 2020 Oct. 17]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7081176>.
12. Aleinikov YuG, Mityagina YaG. Modelirovanie parametrov tekhnologicheskoi robotizirovannoi mashiny. [Modeling of parameters of a technological robotic machine]. Moscow: ООО «УМЦ «Триада». 2016; 120 p.
13. Aleinikov YuG. [Methodology for calculating drives for multi-legged walking machines on the example of a six-legged walking machine]. Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal. 2013; (1): 100-101 p.

**Authors:**

Aleynikov Yuri Georgievich – Ph.D. of Technical sciences, researcher of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU – MTAА or RSAU – MAA named after K.A. Timiryazev), ResearcherID: AAS-2070-2020 ORCID: 0000-0001-6586-9741, e-mail: [Yuri@AleyRobotics.com](mailto:Yuri@AleyRobotics.com)  
 Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia