

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПЛАТФОРМЫ ДВУНОГОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

И. А. БЖИХАТЛОВ, В. С. ГРОМОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bia@itmo.ru*

Представлен анализ существующих подходов к планированию траектории движения двуногого шагающего робота, разработана модель робота с платформой, повторяющая кинематическую структуру нижних конечностей человека с аналогичными массогабаритными характеристиками. Создана имитационная модель в программе MatLab, реализующая алгоритм устойчивого движения двуногого шагающего робота. В ходе исследования реализовано решение обратной задачи кинематики численным методом. С использованием алгоритма управления и имитационной модели исследованы колебания платформы шагающего робота по вертикальной оси как наиболее критичной в силу действия гравитации.

Ключевые слова: роботы, двуногие шагающие роботы, симуляционное моделирование, алгоритмы управления

Введение. На протяжении многих десятилетий учеными предпринимаются попытки создания механизмов, имитирующих походку человека. При этом явно прослеживаются два направления исследований. Первое связано с созданием двуногих шагающих роботов (ДШР), где упор делается на более сложную механику, простую систему управления и электронную схему, второе направление предполагает наличие более сложной системы управления и электроники.

Несмотря на большое количество трудов, можно отметить наиболее значимые результаты в создании ДШР. В 2003 г. был разработан регулятор для ДШР [1], использующий опережающее управление и точку нулевого момента (ТНМ). Принцип ТНМ, предложенный Вукабратовичем и его коллегами [2] еще в 1970 г., используется во многих ДШР благодаря своей простоте, однако данный принцип эффективен только при движении робота по ровной поверхности. В последующем японскими учеными был разработан критерий сохранения равновесия, который имеет преимущество перед принципом ТНМ и может использоваться при движении робота по неровной поверхности — этот принцип получил название „конус контактных моментов“ [3].

Были разработаны и другие более сложные и специфические методы обеспечения устойчивости ДШР, но они либо являются дополнением к ТНМ, либо их применение ограничивается высокими вычислительными затратами, что не позволяет рассчитывать траекторию движения в реальном времени. Следует отметить еще один способ расчета траекторий движения ДШР, при котором используются данные, полученные при захвате движения человека при ходьбе [4]. Однако алгоритмы на основе захвата движения человека эффективны только в случае концентрации основной массы робота в верхней части, что бывает крайне редко. Тем не менее путем параметризации данные захвата движения человека могут быть адаптированы для структуры робота.

Создание физических моделей для проверки методов обеспечения устойчивости, кроме всего прочего, требует больших финансовых затрат. А вследствие того что локомоционные роботы так и не нашли практического применения в промышленности, финансовые вложения в развитие ДШР существенно ограничены. Вышеуказанными фактами также объясняется то,

что в научной среде получило большое распространение использование имитационных моделей, точность которых позволяет проводить оценку различных алгоритмов управления.

Поскольку шагающий робот имеет несколько степеней свободы, таким роботом крайне сложно управлять, так как траекторий движения может быть огромное количество и потерять равновесие очень легко.

Постановка задачи. Цель настоящей статьи — исследование колебаний платформы ДШР, на которую может монтироваться дополнительное оборудование. Таким образом, плавность движения платформы является важной характеристикой для практического применения ДШР с установленным дополнительным оборудованием. Для достижения указанной цели поставлены задачи разработки модели ДШР с платформой и реализация алгоритма, обеспечивающего устойчивое движение ДШР. Кроме того, для определения экспериментальных траекторий движения ДШР необходимо разработать его имитационную модель и провести сравнительный анализ колебаний центра масс тела (ЦМТ), в частности таза, человека при ходьбе и колебаний платформы ДШР по вертикальной оси. Колебания по вертикальной оси представляют наибольший интерес из-за действия гравитации на динамику движения шагающего робота.

Кинематика двуногого шагающего робота. Для построения ДШР были использованы массогабаритные характеристики тела человека [5, 6], на основе которых разработана кинематическая модель, состоящая из 12 звеньев и имеющая 10 степеней свободы (рис. 1).

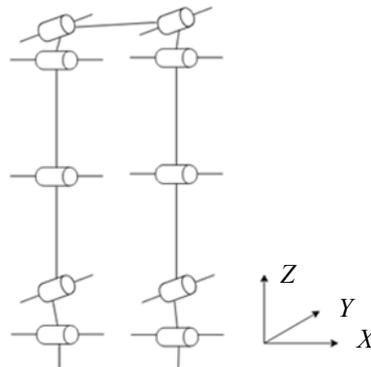


Рис. 1

В отличие от классического подхода к составлению модели ДШР [7], в данной модели полностью исключена верхняя часть, таким образом, распределение массы робота существенно отличается от распределения массы тела человека. Выбор такой кинематической структуры и массогабаритных параметров обусловлен тем, что для создания современных ДШР, как правило, используется большое количество электроприводов, имеющих существенные массогабаритные показатели. Наряду с этим, необходимо отметить крайне низкую энергоэффективность подобных ДШР по сравнению с пассивными динамически устойчивыми шагающими механизмами [8].

Для описания кинематики механизма ДШР применен математический аппарат линейной алгебры [9]. Был реализован алгоритм решения обратной задачи кинематики каждой ноги, так как устойчивость и способность движения ДШР зависят от расположения стоп и сил, приложенных к опорной поверхности. Таким образом, при выборе расположения стоп необходимо провести расчет углов поворота шарниров для достижения желаемого движения звеньев всего механизма, что соответствует обратной задаче кинематики.

Основной характеристикой движения ДШР является траектория центра масс (ЦМ). Задача управления формулируется следующим образом: для заданной траектории движения центра масс необходимо определить траекторию движения стоп и моменты для приводов на звеньях педипулятора, из чего следует, что требуется решить три основные подзадачи:

планирование траектории движения стопы, решение обратной задачи кинематики и определение необходимых моментов для обеспечения расчетных траекторий.

Планирование траектории движения стопы. Планирование траектории движения стоп позволит обеспечивать устойчивое движение ДШР. Для движения робота вперед достаточно выполнения нескольких простых операций: движение стоп вперед и назад с отставанием одной стопы на половину периода шага, при этом стопы попеременно должны отрываться от поверхности, по которой движется робот. Но чтобы движение робота оставалось устойчивым, необходимо обеспечить выполнение ряда условий:

- переносимая нога перпендикулярна земле во фронтальной плоскости;
- переносимая стопа параллельна поверхности, по которой движется ДШР;
- высота центра масс постоянна;
- траектория центра масс переносимой стопы в сагиттальной плоскости описывается формулами

$$x(t) = -S \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right); z(t) = \frac{h}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right],$$

где x, z — координаты центра переносимой стопы, T — период шага, S — длина шага, h — высота подъема переносимой стопы.

Для обеспечения устойчивого движения робота применяются различные методики, самыми распространенными являются проекция центра масс и точка нулевого момента.

Первый принцип заключается в том, чтобы обеспечивать такое движение робота, при котором проекция ЦМ лежит в площади опоры ступней робота [10]. Следует отметить, что этот метод накладывает ограничение на скорость ходьбы: при увеличении скорости устойчивость не обеспечивается.

Методы планирования движения на основе принципа ТНМ являются более универсальными и именно этот критерий наиболее часто используется.

В данном случае фигурируют два основных параметра — центр масс и точка нулевого момента. Управляя положением этих параметров, можно реализовать управление роботом таким образом, чтобы его движение было устойчивым. Первый параметр при этом является задаваемым и выражает желаемое направление движения робота, а второй следует рассчитывать.

Для расчета необходимой траектории движения используются различные модели. Наиболее широкое распространение получили простые модели, основанные, как правило, на принципе перевернутого маятника. Простые модели имеют крайне важное преимущество: благодаря вычислительной эффективности они могут использоваться для расчета траектории в режиме реального времени. Однако все упрощенные модели имеют один недостаток — погрешности в рассчитанных значениях координат точек нулевого момента, для уменьшения влияния этих погрешностей используются как математические методы [11], так и классический метод с управлением по обратной связи.

Самой широко применяемой является модель линейного перевернутого маятника с виртуальной высотой [9], позволяющая рассчитать такие траектории, при которых движение робота остается устойчивым.

В настоящей работе был использован метод построения траектории движения ДШР с помощью простой модели, не учитывающей его особенности, и с использованием модели, приведенной в [10].

На вход разрабатываемой модели подаются параметры робота и координаты положения ЦМ, а на выходе рассчитываются координаты p_x, p_y ТНМ, куда и необходимо переставить стопу робота во время следующего шага. Выражения, связывающие ускорение ЦМ робота и координаты ТНМ относительно центра масс, имеют следующий вид:

$$\ddot{x} = \frac{g}{h}(x - p_x), \quad \ddot{y} = \frac{g}{h}(y - p_y).$$

Данные формулы выражают еще более простую модель, чем приведенная в работе [9].

Следует также отметить, что в подобных простых моделях имеются и некоторые допущения: движение робота осуществляется с постоянной высотой ЦМ; угловой момент вокруг ЦМ принимается настолько малым, что им можно пренебречь; в результате получается, что центр масс и точка установки ноги образуют некий перевернутый маятник, модель которого показана на рис. 2.

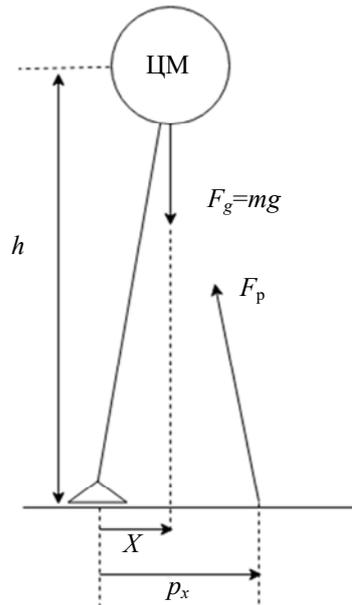


Рис. 2

Важная особенность использования данной модели — необходимость существования ТНМ, так как вследствие ограничений, накладываемых кинематикой робота, расчетная ТНМ может быть не достижима.

Структура системы управления. Для реализации управления ДШР необходимо разработать контроллер, который будет выполнять все функции системы управления (СУ). Обобщенная структурная схема СУ ДШР представлена на рис. 3.

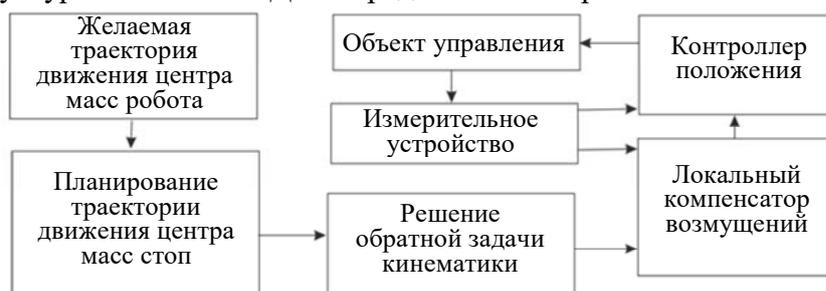


Рис. 3

Контроллер в данном случае состоит из следующих компонентов: планировщик шага, планировщик изменения углов поворота шарниров, контроллер устойчивости и контроллер положения шарниров.

Планировщик шага решает задачу определения желаемого положения стоп во время ходьбы при заданной длине шага и высоте центра масс.

Планировщик изменения углов поворота шарниров решает задачу расчета координат ТНМ и положения ЦМ, а также решает обратную задачу кинематики рассчитанных положений стоп.

Контроллер устойчивости решает задачу компенсации малых возмущений с использованием сигналов, поступающих с сенсоров.

Контроллер положения решает задачу удержания угла поворота шарниров для каждого момента времени.

На вход контроллера поступает информация о желаемой траектории движения ЦМ робота как линейной функции от времени. Для расчета траектории движения стоп используется упрощенная версия линейной модели перевернутого маятника (см. рис. 2), так как разрабатываемый контроллер отвечает за движение робота в одном направлении.

Поскольку реализуется движение робота по ровной поверхности, было принято решение отказаться от контроллера устойчивости.

Движение ног робота рассматривалось в трех плоскостях, что приводит к усложнению обратной задачи кинематики, которую необходимо решать для каждого момента времени. Во избежание множественности решения обратной задачи кинематики в работе использовался численный метод Ньютона — Рафсона [9].

Имитационная модель. Для разработки имитационной модели был выбран программный пакет MatLab. При создании модели ДШР моделирование контакта является одной из ключевых задач, для решения которой в программе MatLab имеется специальная библиотека Simscape Multibody Contact Forces Library [12]. В данной библиотеке для различных типов поверхностей доступны несколько режимов моделирования контакта: на основе импульса, действующих сил или ограничений на движение (без учета динамики); кроме того, моделирование контакта зависит также от типа поверхностей. В библиотеке доступны такие модели контакта, как „плоскость—поверхность“ и „сфера—плоскость“. Для контакта стопы с поверхностью выбрана модель контакта „сфера—плоскость“. Моделирование контакта выполнялось для 4 точек, расположенных на максимальном расстоянии друг от друга на контактной поверхности стопы.

Имитационная модель ДШР (рис. 4) является трехмерной и разработана с использованием элементов пакета „Simscape Multibody“ как несколько абсолютно жестких тел, связанных посредством шарниров, накладывающих кинематические ограничения на твердые тела.



Рис. 4

Анализ экспериментальных данных. С использованием разработанной модели была проведена серия экспериментов с имитацией движения ДШР по прямой линии; в результате получены траектории движения ЦМ, усредненное значение приведено на рис. 5, где по ординате отложена координата ЦМ по вертикальной оси.

Для сравнительного анализа полученных значений были использованы данные захвата движения человека [13], которые характеризуются двумя особенностями: 1) допускается движение человека в различных направлениях; 2) движение тела описывается в относительных

системах координат, связанных с движением одних частей тела относительно других [14]. В этой связи был разработан алгоритм пересчета данных захвата движения таким образом, чтобы для каждого момента времени направление движения человека совпадало с одной заданной осью, а начало координат совпадало с ЦМТ человека. Далее, с помощью алгоритма данные переводились в глобальную ортогональную систему координат, связанную с ЦМТ человека.

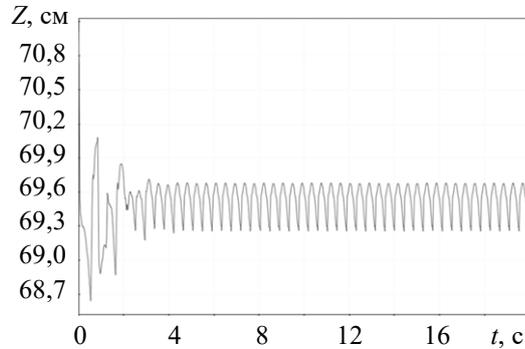


Рис. 5

Полученные значения относительного изменения координат ЦМТ человека при ходьбе приведены на рис. 6, где по оси ординат отложено количество захватов движения (N), по оси абсцисс — амплитуда колебаний ЦМТ (A).

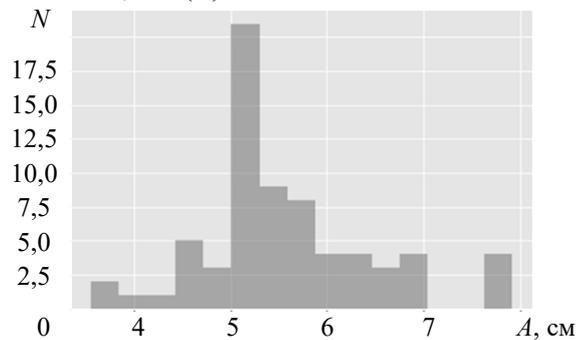


Рис. 6

Поскольку на изменение значений амплитуды A влияют такие параметры, как длина шага, период цикла ходьбы, длина ног и т.д., а результаты только одного эксперимента могут быть не репрезентивны, были выбраны 56 образцов захвата движения для 14 человек. График с распределением максимальной амплитуды колебаний для принятой выборки представлен на рис. 7, где n — номер кадра (в масштабе 120 кадров/с).

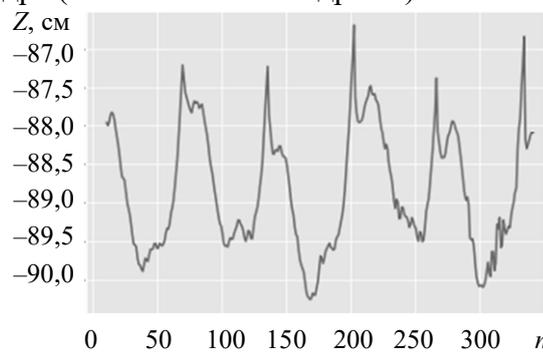


Рис. 7

Как видно из полученных экспериментальных данных, амплитуда колебания платформы ДШР в два раза ниже, чем ЦМТ человека.

Заключение. Разработана и математически описана кинематика двуногого шагающего робота. Реализован алгоритм планирования и расчета траектории движения ДШР, включая решение обратной задачи кинематики. Построена имитационная модель ДШР в математической

программе MatLab. С использованием разработанной модели проведена серия имитаций движения ДШР с геометрическими параметрами человека и произведен сравнительный анализ амплитуды колебания платформы ДШР и ЦМТ человека. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивости алгоритма управления и эффективности имитационной модели, что позволяет обеспечивать устойчивое движение ДШР с амплитудой колебания платформы, в 2 раза меньшей амплитуды колебания ЦМТ человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Plagenhoef S., Evans F. G., Abdelnour T.* Anatomical data for analyzing human motion // Research Quarterly for Exercise and Sport [Электронный ресурс]: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02701367.1983.10605290>>, 17.05.2019.
2. *Vukobratović M., Stepanenko J.* On the stability of anthropomorphic systems // Mathematical Biosciences. 1972. Vol. 15(1-2). P. 1—37.
3. *Hirukawa H., Hattori S., Harada K., Kajita S., Kaneko K., Kanehiro F., Fujiwara K., Morisawa M.* A universal stability criterion of the foot contact of legged robots — Adios ZMP // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Orlando, FL, USA; 15 May 2006.
4. *Anirvan D., Yoshihiko N.* Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. 1999. Vol. 2. P. 1044—1049.
5. Массогабаритные характеристики частей тела человека [Электронный ресурс]: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-orthosis-design-for-Spastic-Cerebral-Kuswanto-Ni'amah/c19f526aa14c658b64e10906ac704a42f6e3785a>>, 07.06.2019.
6. Массогабаритные характеристики частей тела человека, полученные с использованием оптических систем измерения [Электронный ресурс]: <<http://www.pupin.rs/RnDProfile/research-topic12.html>>, 12.06.2019.
7. *Kajita Sh., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H.* Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan; 14—16 Sept., 2003.
8. *McGeer T.* Passive dynamic walking // Intern. Journal of Robotics Research. 1990. Vol. 9, N 3. P. 62—82.
9. *Lynch K. M., Park F. C.* Modern Robotics — Mechanics, Planning, and Control. Cambridge Univ. Press, 2017.
10. *Taesin Ha, Chong-Ho Choi.* An effective trajectory generation method for bipedal walking // Robotics and Autonomous Systems. 2007. N 55. P. 795—810.
11. *Khusainov R., Klimchik A., Magid E.* Swing leg trajectory optimization for a humanoid robot locomotion // Proc. of the Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Lisbon, Portugal, 29—31 July, 2016.
12. Simscape Multibody Contact Forces Library [Электронный ресурс]: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/64001-matlab-and-simulink-robotics-arena-introduction-to-contact-modeling>>, 27.05.2019.
13. Carnegie Mellon University Motion Capture Database, [Электронный ресурс]: <<http://mocap.cs.cmu.edu>>, 25.07.2019.
14. Acclaim ASF/AMC [Электронный ресурс]: <<http://research.cs.wisc.edu/graphics/Courses/cs-838-1999/Jeff/ASF-AMC.html>>, 10.07.2019.

Сведения об авторах

- Ислам Асланович Бжихатлов** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: bia@itmo.ru
- Владислав Сергеевич Громов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: gromov@itmo.ru

Поступила в редакцию
31.01.2020 г.

Ссылка для цитирования: Бжихатлов И. А., Громов В. С. Исследование колебаний платформы двуногого шагающего робота // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 278—285.

RESEARCH OF BIPED ROBOT PLATFORM OSCILLATION

I. A. Bzhikhatlov, V. S. Gromov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: bia@itmo.ru

The existing approaches to planning of biped robot motion are analyzed, the advantages and disadvantages of various approaches are considered. A model of biped platform is developed. The model repeats the kinematic structure of the lower human limbs with similar mass-dimensional characteristics and the platform with which the pedipulators are connected via hinges. A simulation model is created in the MATLAB program, which implements the algorithm for the sustainable control of biped robot. During the work, the inverse kinematics problem was solved by the numerical method. Using a control algorithm and a simulation model, the vibrations of the DSHR platform along the vertical axis, as the most critical due to the action of gravity, are studied.

Keywords: robots, two-legged walking robots, simulation of biped robot, control algorithms

REFERENCES

1. Plagenhoef S., Evans F.G., Abdelnour T. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02701367.1983.10605290>.
2. Vukobratović M., Stepanenko J. *Mathematical Biosciences*, 1972, no. 15(1-2), pp. 1–37.
3. Hirukawa H., Hattori S., Harada K., Kajita S., Kaneko K., Kanehiro F., Fujiwara K., Morisawa M. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, FL, May 15, 2006.
4. Anirvan D., Yoshihiko N. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, vol. 2, May, pp. 1044–1049.
5. <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-orthosis-design-for-Spastic-Cerebral-Kuswanto-Ni'amah/c19f526aa14c658b64e10906ac704a42f6e3785a>.
6. <http://www.pupin.rs/RnDProfile/research-topic12.html>.
7. Kajita Sh., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, September 14–16, 2003.
8. McGeer T. *Int. J. Robot. Res.*, 1990, no. 3(9), pp. 62–82.
9. Lynch K.M., Park F.C. *Modern Robotics - Mechanics, Planning, and Control*, Cambridge University Press, May 2017, ISBN 9781107156302.
10. Taesin Ha, Chong-Ho Choi. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, no. 55, pp. 795–810.
11. Khusainov R., Klimchik A., Magid E. *Proc. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Lisbon, Portugal, 29–31 July, 2016*.
12. *Simscape Multibody Contact Forces Library*, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/64001-matlab-and-simulink-robotics-arena-introduction-to-contact-modeling>.
13. *Carnegie Mellon University Motion Capture Database*, <http://mocap.cs.cmu.edu>.
14. *Acclaim ASF/AMC*, <http://research.cs.wisc.edu/graphics/Courses/cs-838-1999/Jeff/ASF-AMC.html>.

Data on authors

Islam A. Bzhikhatlov

— ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: bia@itmo.ru

Vladislav S. Gromov

— PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: gromov@itmo.ru

For citation: Bzhikhatlov I. A., Gromov V. S. Research of biped robot platform oscillation. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 3. P. 278–285 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-278-285