

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕПОЛНОПРИВОДНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА С ГИБКИМИ СОЧЛЕНЕНИЯМИ

К. В. НАСОНОВ, И. И. БОРИСОВ*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*borisovii@itmo.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования по проектированию и изготовлению прототипа энергоэффективного прыгающего робота с гибкими сочленениями с использованием принципов морфологического расчета. Гибкие элементы позволяют роботам адаптивно подстраиваться к окружающей среде при контактном взаимодействии, перенаправляя энергию взаимодействия с пластической деформации твердых тел в упругую деформацию эластичных тел, что способствует рекуперации энергии в системе. В отличие от традиционных низших и высших кинематических пар, гибкие сочленения обеспечивают перемещения звеньев только в ограниченном диапазоне в пределах зоны упругой деформации. Решена задача проектирования эластичных полимерных перекрестных сочленений на примере плоского механизма ноги неполноприводного прыгающего робота замкнутой кинематики, приводимого в движение от единственного серводвигателя с присоединенными последовательно эластичными элементами. При синтезе такого робота необходимо оптимизировать не только кинематические параметры рычажного механизма, но и топологию и эластостатические параметры самих эластичных сочленений.

Ключевые слова: биомиметика, гибкие сочленения, податливые роботы, численная оптимизация, морфологический расчет

Ссылка для цитирования: Насонов К. В., Борисов И. И. Проектирование неполноприводного прыгающего робота с гибкими сочленениями // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 3. С. 174—184. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-174-184.

DESIGN OF AN UNDERACTUATED JUMPING ROBOT WITH FLEXIBLE JOINTS

К. В. Насонов, И. И. Борисов *

ITMO University, St. Petersburg, Russia
borisovii@itmo.ru

Abstract. Results of a study on the design and manufacture of a prototype of an energy-efficient jumping robot with flexible joints using the principles of morphological calculation are presented. Flexible elements allow robots adaptation to the environment during contact interaction, redirecting the interaction energy from the plastic deformation of solids to the elastic deformation of elastic bodies, which contributes to energy recovery in the system. Unlike traditional lower and higher kinematic pairs, flexible joints provide movement of links only in a limited range within the elastic deformation zone. The problem of designing elastic polymer cross joints is solved by the example of a flat leg mechanism of an incomplete jumping robot of closed kinematics, driven by a single servo motor with elastic elements connected in series. When synthesizing such a robot, it is necessary to optimize not only the kinematic parameters of the lever mechanism, but also the topology and elastic-static parameters of the elastic joints themselves.

Keywords: biomimetics, flexible joints, soft robots, numerical optimization, morphological computation

For citation: Nasonov K. V., Borisov I. I. Design of an underactuated jumping robot with flexible joints. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 3. P. 174—184 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-174-184.

Введение. Шагающие и галопирующие роботы сформировались и приобрели следующие характерные черты: двигатели с высокой плотностью момента [1], импедансные регуляторы [2] с планировщиками траекторий движения [3], топология конструкции в виде абсолютно жесткого тела и ног открытой кинематики для обеспечения динамической локомоции [4—7]. При

этом актуальным остается вопрос обеспечения энергоэффективности движения роботов, так как она напрямую влияет на запас хода и длительность работы [8]. Несмотря на универсальность и эффективность упомянутых роботов [4—7] они тратят большое количество энергии на движение. Помимо высоких требований к энергетическому запасу, для функционирования таких роботов необходимы высокоточные датчики, специально спроектированные электродвигатели с высокой плотностью момента, высокопроизводительные контроллеры.

Для повышения энергоэффективности применяются методы бионики, когда принципы движения живых систем переносятся в искусственные системы. В частности, такой вид движения, как энергоэффективный вращательный галоп, присущий псовым и кошачьим, является источником вдохновения для создания робототехнических систем [9]. Эластичность сухожилий и мышц животных позволяет поглощать удары от контакта с поверхностью и рекуперировать часть энергии при ходьбе, беге, прыжках и прочих циклических движениях [10, 11]. Использование приводов и механизмов переменной жесткости в конструкциях ног нашло отражение при проектировании роботов [12, 13].

Одним из параметров для оценки энергоэффективности является *стоимость перемещения* (Cost of Transport), которая рассчитывается одним из двух способов [10]:

$$COT = \frac{E}{mgd} = \frac{P}{mgv}, \quad (1)$$

где E — энергия, необходимая для перемещения груза массой m на расстояние d , g — ускорение свободного падения; P — мощность, необходимая для перемещения груза массой m со скоростью v ; стоимость перемещения является безразмерной величиной.

Механизмы с эластичными сочленениями используются, как правило, в целях повышения точности позиционирования в широком спектре областей: прецизионные датчики, микрорхирургия, аэрокосмические модули, развертываемые механизмы, оптическое прецизионное оборудование, потребительские товары. Прецизионность достигается за счет отсутствия люфта, низкого упругого гистерезиса, отсутствия механического износа, неподверженности влиянию засоренности. Однако аналогичный подход может быть использован и в целях повышения адаптивности, безопасности и энергоэффективности робототехнических устройств.

Настоящая статья посвящена проектированию прыгающего на месте робота с *гибкими сочленениями*, разработанного с использованием принципов морфологического проектирования.

Преодоленная дистанция и скорость перемещения при прыжке на месте равны нулю, поэтому стоимость перемещения (1) как метрика энергоэффективности неприменима. Проектирование осуществлялось в предположении, что минимизация количества приводов, управляющего момента, массы робота и трения способствует снижению энергопотребления. В качестве численного показателя энергопотребления использован числитель выражения (1), т. е. мощность P и энергия E . В результате был спроектирован, изготовлен и протестирован прототип с гибкими полимерными сочленениями, который динамически взаимодействует с твердой поверхностью.

Эта работа является частью проекта по разработке галопирующего робота с гибкой спиной, в котором динамика и особенности механической конструкции используются для максимизации метрик производительности, таких как энергоэффективность, генерируемый момент, податливость, соотношение грузоподъемности к собственному весу и пр., при этом максимально бережно расходуются бортовые запасы энергии. Например, в предыдущей работе авторов [8] были решены задачи по распределению массы между передней и задней частями тела галопирующего робота и по оптимизации параметров модели пространственной пассивной пружины гибкой спины робота для повторения, в частности, характера динамики геппарда, использующего мышцы и сухожилия спины при вращательном галопе.

Синтез и оптимизация рычажного механизма ноги робота. Для создания и анализа шагающих, прыгающих и галопирующих роботов используется модель перевернутого маятника

(Spring Loaded Inverted Pendulum — SLIP), согласно которой основная часть массы должна быть сосредоточена в теле робота, а инерция ноги должна быть минимальна [15]. В ходе исследований был апробирован метод синтеза конструкции, в которой все вращательные кинематические пары заменены на гибкие сочленения, что позволило существенно снизить массу ноги и „поднять“ центр масс робота к корпусу. Цель синтеза — определение структуры и геометрических параметров рычажного механизма совместно с топологией и эластостатическими параметрами сочленений.

Для прыжка робота на месте точка его контакта F с землей, расположенная строго над центром масс робота, должна перемещаться вдоль вертикальной прямой. Данную траекторию можно обеспечить рычажными механизмами разной структуры, например открытой кинематической цепью, однако в этом случае необходимо использовать столько приводов, сколько степеней свободы имеет механизм. Увеличение числа двигателей приводит к увеличению массы конструкции, усложнению системы управления и повышению энергопотребления. Поэтому была решена задача синтеза рычажного механизма замкнутой кинематики с одной степенью свободы, который следует требуемой траектории.

На рис. 1 представлены основные этапы синтеза рычажного механизма замкнутой кинематики ноги прыгающего робота. На первом этапе был задан двухзвеный механизм открытой кинематики с контуром ABF , который может совершать требуемое движение вдоль вертикальной прямой (рис. 1, а). Для приведения в движение механизма открытой кинематики с двумя звеньями необходимы два двигателя, расположенные в сочленениях A и B . Для обеспечения такого простого движения, как прыжок на месте, использование двух двигателей не рационально. Необходимо редуцировать количество двигателей до одного. Для получения механизма только с одним приводом была проведена оптимизация структуры в соответствии с методом, описанным в [16].

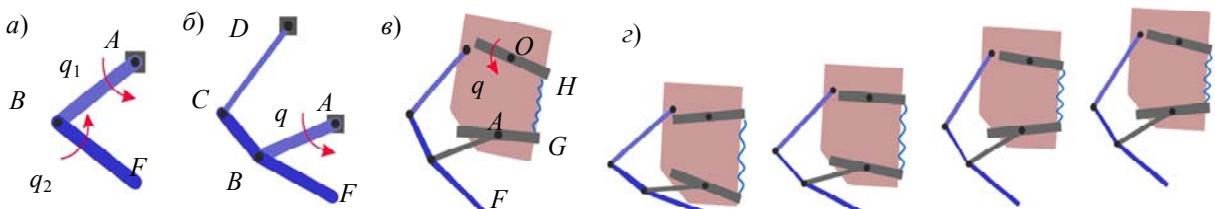


Рис. 1

Суть метода основана на наблюдении, что если расстояние между двумя компонентами кинематической цепи не меняется в течение всего цикла движения, то эти компоненты могут быть соединены через новое абсолютно твердое звено. Введение звена накладывает дополнительные голономные связи и редуцирует степень свободы механизма. Изложенный принцип обобщается в следующее правило: поддержание движения по заданной траектории при удалении актуаторов достигается путем присоединения звеньев.

Кинематическая цепь механизма представляет собой набор звеньев l_i , взаимосвязанных голономными связями. При плоском движении каждое звено l_i обладает тремя степенями свободы. Координаты $p_i^w \in \mathbb{R}^2$ физической точки p_i , принадлежащей звену l_i , в мировой системе координат Ψ_w определяются согласно следующему выражению:

$$p_i^w = R_l^w p_i^l + o_l^w,$$

где $R_l^w \in \text{SO}(2)$ — матрица ориентации системы координат Ψ_l относительно Ψ_w ; $p_i^l \in \mathbb{R}^2$ — координаты физической точки p_i в системе координат Ψ_l ; $o_l^w \in \mathbb{R}^2$ — точка на многообразии \mathcal{M} , описывающая положение системы координат Ψ_l относительно Ψ_w .

В общем случае наложение ограничения в виде фиксации относительного расстояния между точками p_i и p_j , принадлежащими звеньям l_i и l_j , приводит к отклонению движения от изначальной траектории механизма. В рассматриваемом случае целью оптимизации является поиск точек крепления присоединяемого звена l_{CD} к точке p_C звена l_{CBF} и точке p_D звена l_D (рис. 1, δ), при которых наложение ограничения приводит к минимальному изменению изначальной траектории механизма на всем цикле движения, в частности, к минимальному изменению расстояния между точками $|p_C^w(t_i) - p_D^w(t_i)|$, выраженному в мировой системе координат Ψ_w . Среднеквадратическое изменение квадрата расстояния d_{CD}^2 между точками p_C и p_D вдоль всей траектории определяется в соответствии с выражением

$$d_{CD}^2 = \frac{1}{n_s} \sum_i^{n_s} (p_C^w(t_i) - p_D^w(t_i))^2,$$

где n_s — количество элементов в массиве данных, описывающих движение.

Соответственно, оптимизация направлена на минимизацию дисперсии квадрата расстояния между точками p_C и p_D :

$$f = \frac{1}{n_s} \sum_i^{n_s} \left[(p_C^w(t_i) - p_D^w(t_i))^2 - d_{CD}^2 \right]^2.$$

Оптимизация была проведена в программной среде MatLab численным методом Хука — Дживса (patternsearch), который входит в состав пакета Global Optimization Toolbox. Были введены ограничения на значения координат точек, обусловленные желаемыми габаритными размерами робота. В процессе оптимизации вычисляются значения координат точек p_C и p_D , при которых целевая функция принимает минимальное значение, а замкнутая кинематическая цепь с контуром $ABCD$ способна обеспечивать движение точки F вдоль требуемой траектории. Результат выполнения оптимизации — механизм, приведенный на рис. 1, δ .

Приведение в движение. Одним из способов передачи движения от двигателя к исполнительному звену является использование редукторов с большим передаточным отношением. Такой способ позволяет значительно увеличить приводной момент, однако накладывает также ряд ограничений, связанных с наличием трения и люфтов между зубчатыми колесами. Например, передаточное отношение N редуктора означает возрастание инерции в N^2 раз, что обуславливает более высокие ударные нагрузки, передающиеся на зубья шестерен [17]. Кроме того, у приводов с высоким передаточным числом редуктора, как правило, отсутствует обратный ход (non-back drivability). Это может привести, например, к поломке редуктора при внезапном воздействии внешней нагрузки на выходное звено.

Другое решение — использование привода с последовательной эластичностью (Series Elastic Actuation — SEA). Отличительной особенностью данного типа актуатора, принцип работы которого подробно описан в [17], является наличие пружин между приводным валом и звеном, приводимым в движение. Упрощенное представление интеграции SEA в модель робота изображено на рис. 1, ε . Пружина устанавливается между точками H и G . Помимо обеспечения возможности обратного хода (back drivability), основными преимуществами привода SEA являются устойчивость к ударам, более точное регулирование приводного момента, а также снижение пикового усилия, передающегося обратно на вал сервопривода.

В пакете MatLab Simscape было проведено имитационное моделирование синтезированной конструкции. Визуализация фазы полета робота при прыжке представлена на рис. 1, ε . При построении модели были учтены масса конструкции, жесткость пружин привода и поверхности, с которой контактирует робот. Модель контактного взаимодействия описывается

уравнениями силы реакции вдоль вертикальной \hat{y} и горизонтальной \hat{x} осей. Вертикальная составляющая соответствует вязкоупругой модели Кельвина — Войта [18]:

$$F_{\hat{y}} = K\delta + b\dot{\delta},$$

где δ — глубина проникновения контактной поверхности ноги в поверхность земли, м; K — коэффициент жесткости контактного взаимодействия, Н/м; b — коэффициент демпфирования контактного взаимодействия, Н·с/м.

Для горизонтальной составляющей используется модель кулоновского трения с учетом проскальзывания [19]:

$$F_{\hat{x}} = -\mu F_y \operatorname{sgn} v_x,$$

где μ — коэффициент статического трения; v_x — горизонтальная составляющая скорости, м/с.

Моделирование позволило оценить высоту (h) прыжка (рис. 2, *a*), диапазоны углов вращения сочленений механизма и действующие в них нагрузки. Эти данные необходимы для синтеза гибких сочленений. На рис. 2, *б* представлен график изменения моментов, генерируемых в сочленениях робота (M_A, M_B, M_C, M_D), в процессе его работы на протяжении 5 с из состояния покоя: зеленая зона соответствует этапу нагрузки пружин, т. е. накопления энергии; розовая зона — этапу разгрузки пружин, т. е. высвобождения энергии; белая зона — этапу свободного полета робота. На графике отчетливо видны всплески значений моментов, возникающие при переходе между этапами. Амплитуды всплесков зависят напрямую от коэффициентов жесткости K и демпфирования b модели контактного взаимодействия и являются исключительно индикаторами катастрофических событий — приземления робота и смены характера работы пружин (рис. 2, *б*). На увеличенном графике (рис. 2, *в*) видны изменения моментов между катастрофическими событиями. Во время полета на сочленения не действуют нагружающие моменты. По полученным значениям моментов с учетом коэффициента запаса были синтезированы гибкие сочленения.

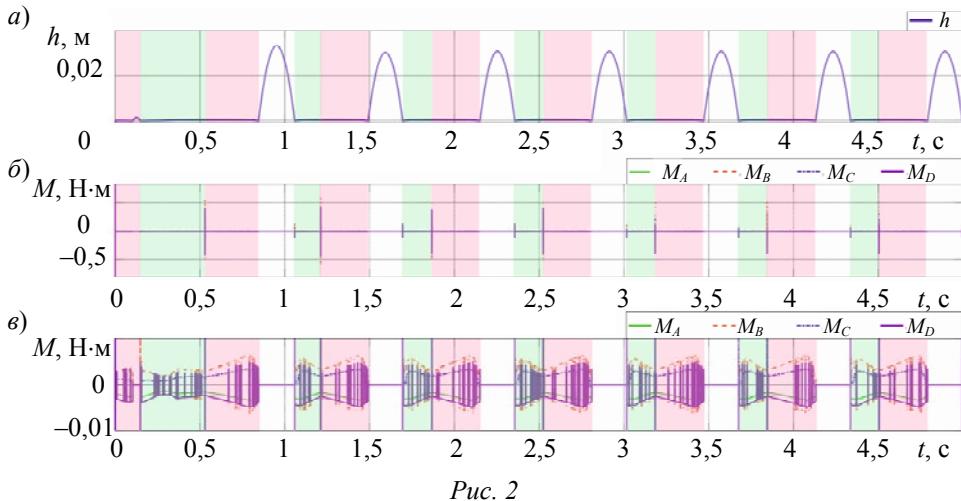


Рис. 2

На рис. 3 представлены графики для оценки энергопотребления прыгающего робота: момент серводвигателя M , угловая скорость ω , мощность P и итоговая потребленная энергия E (данные получены с использованием имитационной модели). Для управления роботом использован реактивный регулятор, принцип работы которого, описанный в [20], состоит во „впрыскивании“ энергии в систему в определенные моменты движения: когда сочленения начинают нагружаться, двигатель вращается, чтобы помочь ноге робота максимально сжаться; во время разгибания ноги двигатель вращается в обратную сторону для создания дополнительного усилия при отталкивании.

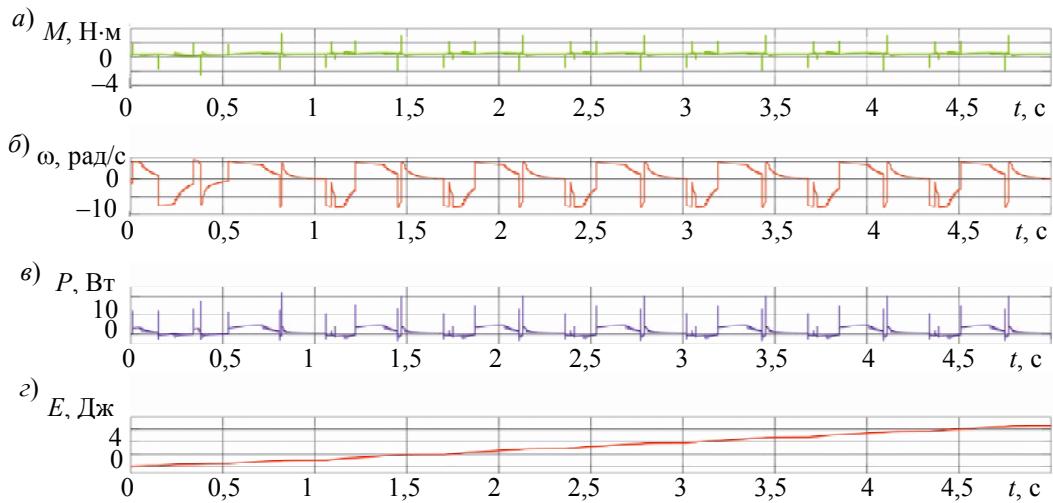


Рис. 3

Синтез гибких сочленений. Гибкие сочленения — разновидность податливых механизмов и зачастую используются в качестве замены классическим вращательным шарнирам [21]. Важными преимуществами гибких сочленений являются отсутствие люфтов, низкий эластичный гистерезис, а также более низкий вес и меньшие габариты по сравнению с традиционной компоновкой „подшипник-ось“. Гибкие сочленения характеризуется малой площадью в центре петли эластичного гистерезиса, что обуславливает малое количество энергии, рассеиваемой из-за внутреннего трения материала [22].

Существует множество топологий гибких сочленений и методов их проектирования. Например, в работах [23, 24] приведены структуры сочленений с одной вращательной степенью свободы; их существенные недостатки — малый диапазон углов вращения (до 10°) и низкая податливость в направлении вращения. Другим решением является метод проектирования гибких сочленений из листовых пружин [25, 26]. Протез пальца с двумя гибкими сочленениями, которые обеспечивают соответствующие степени свободы, представлен в работе [27]: синтезированный протез способен обеспечивать 20 Н контактного усилия в диапазоне движения 80°.

Оптимизированная структура, позволяющая роботу совершать прыжок на месте, содержит четыре сочленения. Для апробации рассматриваемого метода проектирования все вращательные шарниры предложено заменить на гибкие сочленения. Для прыгающего робота была выбрана описанная в [25] топология сочленения, обладающая рядом преимуществ: большой диапазон углов вращения (до 90°), сохранение податливости по оси вращения на всем интервале движения, возможность анализа жесткости в направлениях, перпендикулярных оси вращения.

Для синтеза гибких сочленений использовался инструмент SPACAR Toolbox [28], который позволяет оптимизировать топологию сочленения в зависимости от действующих нагрузок и желаемых углов вращения. Оптимизация направлена на увеличение значения первой паразитной собственной частоты сочленения f , что способствует увеличению точности воспроизводимого движения в ограниченном диапазоне [29]. Целевая функция определяется как

$$F(x) = \min f(x, \theta)^{-1}, \quad (2)$$

где x — вектор параметров сочленения, θ — угол отклонения.

Вектор параметров выбранного сочленения для прыгающего робота имеет вид $x = [L, W, H, T]^T$, где L , W , H — длина, ширина и глубина сочленения соответственно; T — толщина листовых пружин.

Для того чтобы предотвратить неограниченный рост параметров во время оптимизации и гарантировать, что алгоритм выполнит построение геометрии сочленения, применяется

функция ограничений. Ограничения на максимальный момент $M(x, \theta) < M_{\max}$, при котором достигается максимальный угол θ_{\max} , и на максимальное возникающее напряжение $\sigma(x, \theta) < \sigma_{\max}$ определяют нелинейную функцию ограничения:

$$C(x) = \max \left\{ \begin{array}{l} \max \sigma(x, \theta) - \sigma_{\max} \\ M(x, \theta) - M_{\max} \end{array} \right\} \forall \theta,$$

где допустимый вектор параметров должен удовлетворять $C(x) < 0$.

Помимо наложенных ограничений, при оптимизации учитываются основные свойства материала (модуль Юнга E , плотность ρ , модуль сдвига G), из которого планируется изготавливать сочленение.

Результатом оптимизации гибкого сочленения является трехмерная модель, изображенная на рис. 4, *a*.

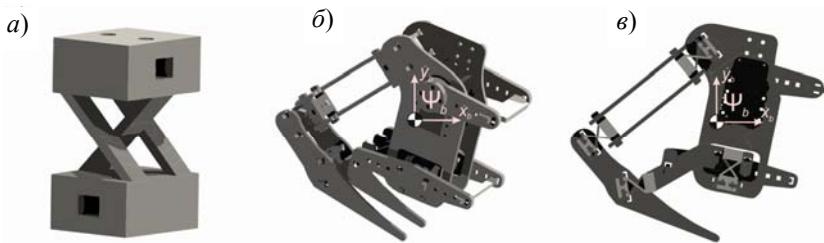


Рис. 4

Изготовление прототипа. В соответствии с полученными результатами в САПР SolidWorks была построена твердотельная модель разрабатываемого робота. На рис. 4, *б* представлена визуализация модели вместе с отображением центра масс, который находится над точкой контакта в области корпуса робота, согласно аналитической модели перевернутого маятника.

Робот был спроектирован таким образом, что каждое гибкое сочленение может быть заменено в случае необходимости. Основные корпусные детали нарезаны на лазерном гравере из материала поликарбонат. Гибкие сочленения изготовлены посредством трехмерной печати. В качестве материала использовался полиуретан марки BF FLEX. Для крепления деталей между собой не использовались метизы — детали крепятся посредством соединения типа „шип — паз“, что способствует уменьшению общей массы конструкции. В качестве приводного двигателя выбран маломощный сервомотор Dynamixel AX-12A [30].

На рис. 5 представлен прототип, корпус которого присоединен к направляющей алюминиевой трубке, обеспечивающей перемещения вдоль вертикальной прямой \hat{y} .

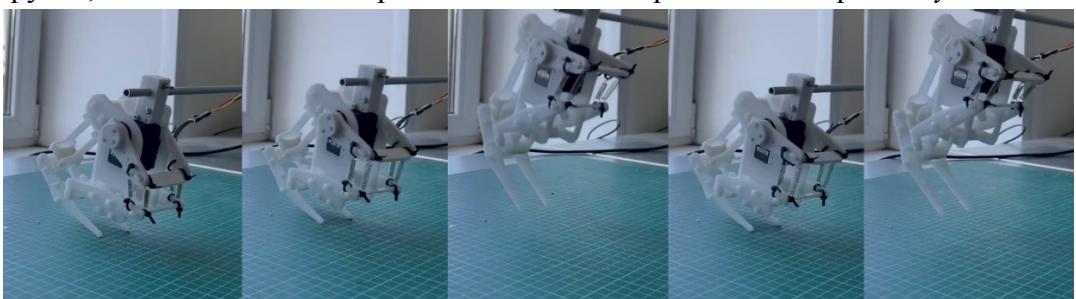


Рис. 5

Получение данных, регистрируемых роботом, осуществляется с помощью тензорезистивных датчиков. Принцип их действия заключается в изменении значения сопротивления в зависимости от степени деформации. Это обусловлено свойствами металлической резистивной фольги, из которой датчики изготавливаются [31]. Так как гибкие сочленения эластично деформируются в процессе движения, тензорезисторы прикрепляются к гибким элементам сочленения с обеих сторон. В результате образуется электрическая цепь, позволяющая выяв-

лять мельчайшие изменения сопротивления — мост Уитстона. Такое решение позволяет преобразовать электрический сигнал, соответствующий деформации, в угол поворота.

На рис. 6 представлены графики, отражающие показания тензорезистора на одном из сочленений: q_{ref} отображает сигнал, полученный с энкодера серводвигателя AX12-A, соответствующий синусоиде с частотой 3 Гц и амплитудой 20° ; q_h — сигнал, полученный с тензорезистора. Представленные данные получены в ходе эксперимента, для которого была собрана стендовая установка для тестирования прототипа (рис. 7). Двигатель воспроизводит движение, аналогичное нагружению сочленения робота при прыжке.

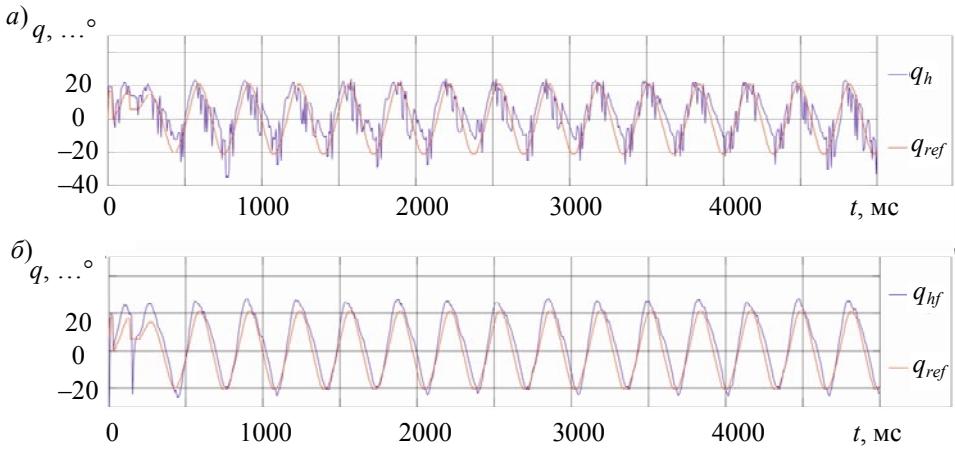


Рис. 6

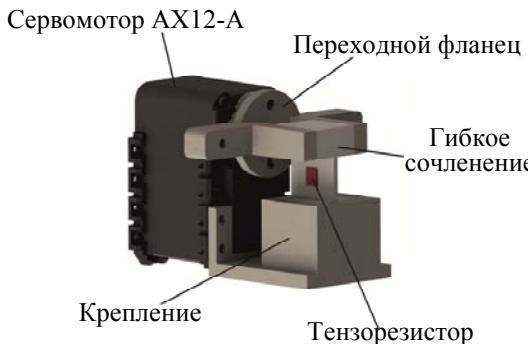


Рис. 7

На рис. 6, *а* отчетливо видны шумы и выбросы, которые необходимо фильтровать для корректной обработки сигнала. Для данной системы был выбран фильтр бегущего среднего, который задается следующим выражением:

$$\zeta = \zeta + (\eta - \zeta)k,$$

где ζ — фильтрованное значение; η — значение, которое требуется фильтровать; k — коэффициент фильтрации, значение которого настраивается в пределах от 0,0 до 1,0 — чем меньше значение, тем плавнее фильтрация.

Данный алгоритм был выбран вследствие его простой реализации и быстроты вычислений.

На рис. 6, *б* приведен график после фильтрации: q_{hf} соответствует значению угла поворота после обработки фильтра. Среднеквадратическое отклонение за период работы составляет $5,58^\circ$, максимальное отклонение от желаемого значения составляет $11,23^\circ$. Сигнал тензорезистора совпадает по форме и частоте с референсным сигналом, полученным с энкодера серводвигателя. Это говорит о том, что гибкое сочленение, параметры которого определены в процессе оптимизации, способно точно воспроизводить желаемую траекторию.

Заключение. Представлены результаты исследования по проектированию и изготовлению прототипа энергоэффективного прыгающего робота с гибкими сочленениями с использованием принципов морфологического расчета. Синтезирована и оптимизирована кинематическая схема робота, позволяющая совершать прыжок на месте. Она представляет собой замкнутую, четырехзвенную структуру с одной степенью свободы. Параметрическая оптимизация звеньев позволила обеспечить следование точки контакта вдоль желаемой траектории. В качестве актуатора был выбран привод с последовательной эластичностью, что позволило уменьшить требуемую мощность электродвигателя.

На основе данных, полученных с использованием имитационной модели, синтезированы гибкие сочленения, заменяющие кинематические пары. Данное решение принято для уменьшения массы. Из-за свойств материала для сочленений условно принято, что вся накопленная энергия рассеивается вследствие высокого демпфирования. Поэтому гибкие сочленения не рассматриваются как элементы рекуперации энергии.

Интеграция гибких сочленений для уменьшения массы конструкции и избавления от трений в узлах, а также использование маломощного двигателя являются приемами по увеличению энергоэффективности прототипа.

В САПР SolidWorks спроектирована твердотельная модель робота. Посредством трехмерной печати и резки на лазерном гравере были изготовлены основные детали. Результатом выполнения работы стал прототип прыгающего робота с гибкими сочленениями, который демонстрирует работоспособность предложенного способа проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seok S. et al. Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012. P. 1970—1975.
2. Hauser S., Dujany M., Arreguit J., Ijspeert A., Iida F. Coupling-dependent convergence behavior of phase oscillators with tegotae-control // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021.
3. Ye K., Karydis K. Modeling and Trajectory Optimization for Standing Long Jumping of a Quadruped With a Preloaded Elastic Prismatic Spine // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021.
4. Fankhauser P., Hutter M. ANYmal: a unique quadruped robot conquering harsh environments // Research Features. 2018. N 126. P. 54—57.
5. Bledt G. et al. MIT Cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018. P. 2245—2252.
6. Park H. W., Wensing P. M., Kim S. High-speed bounding with the MIT Cheetah 2: Control design and experiments // Intern. Journal of Robotics Research. 2017. Vol. 36, N 2. P. 167—192.
7. Zhong Y. et al. Analysis and research of quadruped robot's legs: a comprehensive review // Intern. Journal of Advanced Robotic Systems. 2019. Vol. 16. N 3. P. 1729881419844148.
8. Borisova O., Borisov I., Kolyubin S., Stramigioli S. Design of Galloping Robots with Elastic Spine: Tracking Relations between Dynamic Model Parameters Based on Motion Analysis of a Real Cheetah // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021.
9. Folkertsma G. A. Energy-Based and Biomimetic Robotics. Enschede: Univ. of Twente, 2017.
10. Seok S. et al. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot // IEEE/ASME Trans. on Mechatronics. 2014. Vol. 20, N 3. P. 1117—1129.
11. Folkertsma G. A., Kim S., Stramigioli S. Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012. P. 2210—2215.
12. Hurst J. W., Chestnutt J. E., Rizzi A. A. An actuator with physically variable stiffness for highly dynamic legged locomotion // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'04. IEEE, 2004. Vol. 5. P. 4662—4667.

13. *Vu H. Q.* et al. A variable stiffness mechanism for improving energy efficiency of a planar single-legged hopping robot // Proc. of the 16th Intern. Conf. on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, 2013. P. 1—7.
14. *Radhakrishnan V.* Locomotion: dealing with friction // Proc. of the National Academy of Sciences. 1998. Vol. 95, N 10. P. 5448—5455.
15. *Haberland M.* et al. The effect of swing leg retraction on running energy efficiency // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2011. P. 3957—3962.
16. *Thomaszewski B.* et al. Computational design of linkage-based characters // ACM Trans. on Graphics (TOG). 2014. Vol. 33, N 4. P. 1—9.
17. *Pratt G. A., Williamson M. M.* Series elastic actuators // Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. IEEE, 1995. Vol. 1. P. 399—406.
18. *Pappalardo A.* et al. Hunt–crossley model based force control for minimally invasive robotic surgery // Biomedical Signal Processing and Control. 2016. Vol. 29. P. 31—43.
19. *Townsend W., Salisbury J.* The effect of coulomb friction and stiction on force control // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. IEEE, 1987. Vol. 4. P. 883—889.
20. *Lakatos D., Albu-Schäffer A.* Switching based limit cycle control for compliantly actuated second-order systems // IFAC Proc. Volumes. 2014. Vol. 47, N 3. P. 6392—6399.
21. *Howell L. L.* Compliant mechanisms // 21st Century Kinematics; Ed. *I. M. McCarthy*. Springer, 2013. P. 189—216.
22. *Ashby M. F., Jones D. R. H.* Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design. Elsevier, 2012. Vol. 1.
23. *Chen G. M., Jia J. Y., Li Z. W.* Right-circular corner-fillet flexure hinges // IEEE Intern. Conf. on Automation Science and Engineering. IEEE, 2005. P. 249—253.
24. *Lobontiu N.* Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges. CRC Press, 2002.
25. *Naves M.* et al. Flexure-based 60 degrees stroke actuator suspension for a high torque iron core motor // Precision Engineering. 2020. Vol. 63. P. 105—114.
26. *Naves M., Aarts R., Brouwer D. M.* Large-stroke flexure hinges: Building-block-based spatial topology synthesis method for maximising flexure performance over their entire range of motion // Mikroniek. 2017. Vol. 57, N 3. P. 5—9.
27. *Boers A. S. B.* et al. Inverted curved flexure hinge with torsional reinforcements in a printed prosthetic finger // 33rd ASPE Annual Meeting. 2018.
28. SPACAR Wiki. 2021 [Электронный ресурс]: <<http://www.spacar.nl/wiki/doku.php?id=start>>, 10.04.2021.
29. *Fix M. E., Brouwer D. M., Aarts R. G. K. M.* Building Block Based Topology Synthesis Algorithm to Optimize the Natural Frequency in Large Stroke Flexure Mechanisms // Intern. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 83914. P. V002T02A007.
30. ROBOTIS e-Manual AX-12A [Электронный ресурс]: <<https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>>, 25.06.2021.
31. Тензорезисторы KYOWA. 2018 [Электронный ресурс]: <<http://kyowa.ru/produktsiya/tenzorezistori.html>>, 20.06.2021.

Сведения об авторах

Кирилл Вячеславович Насонов

- магистрант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер; E-mail: kvnasonov@itmo.ru
- канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; научный сотрудник; E-mail: borisovii@itmo.ru

Иван Игоревич Борисов

Поступила в редакцию 28.12.21; одобрена после рецензирования 11.01.22; принята к публикации 18.01.22.

REFERENCES

1. Seok S. et al. 2012 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 1970–1975.
2. Hauser S., Dujany M., Arreguit J., Ijspeert A., & Iida F. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IROS 2021, 2021.
3. Ye K. and Karydis K. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IROS 2021, 2021.
4. Fankhauser P., Hutter M. *Research Features*, 2018, no. 126, pp. 54–57.
5. Bledt G. et al. 2018 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2018, pp. 2245–2252.
6. Park H.W., Wensing P.M., Kim S. *International Journal of Robotics Research*, 2017, no. 2(36), pp. 167–192.
7. Zhong Y. et al. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, no. 3(16), pp. 1729881419844148.
8. Borisova O., Borisov I., Kolyubin S., Stramigioli S. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IROS 2021, 2021.
9. Folkertsma G.A. *Energy-based and biomimetic robotics*, 2017.
10. Seok S. et al. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2014, no. 3(20), pp. 1117–1129.
11. Folkertsma G.A., Kim S., Stramigioli S. 2012 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2012, pp. 2210–2215.
12. Hurst J.W., Chestnutt J.E., Rizzi A.A. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Proceedings. ICRA'04, 2004, vol. 5, pp. 4662–4667.
13. Vu H.Q. et al. 2013 16th *International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, IEEE, 2013, pp. 1–7.
14. Radhakrishnan V. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1998, no. 10(95), pp. 5448–5455.
15. Haberland M. et al. 2011 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2011, pp. 3957–3962.
16. Thomaszewski B. et al. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, no. 4(33), pp. 1–9.
17. Pratt G.A., Williamson M.M. *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Human Robot Interaction and Cooperative Robots, IEEE, 1995, vol. 1, pp. 399–406.
18. Pappalardo A. et al. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2016, vol. 29, pp. 31–43.
19. Townsend W., Salisbury J. *Proceedings 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1987, vol. 4, pp. 883–889.
20. Lakatos D., Albu-Schäffer A. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, no. 3(47), pp. 6392–6399.
21. Howell L.L. *21st century kinematics*, Springer, London, 2013, pp. 189–216.
22. Ashby M.F., Jones D.R.H. *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*, Elsevier, 2012, vol. 1.
23. Chen G.M., Jia J.Y., Li Z.W. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2005, pp. 249–253.
24. Lobontiu N. *Compliant mechanisms: design of flexure hinges*, CRC press, 2002.
25. Naves M. et al. *Precision engineering*, 2020, vol. 63, pp. 105–114.
26. Naves M., Aarts R., Brouwer D.M. *Mikroniek*, 2017, no. 3(57), pp. 5–9.
27. Boers A.S.B. et al. *33rd ASPE Annual Meeting 2018*, 2018.
28. SPACAR Wiki, 2021, <http://www.spacar.nl/wiki/doku.php?id=start>.
29. Fix M.E., Brouwer D.M., Aarts R.G.K.M. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2020, vol. 83914, pp. V002T02A007.
30. ROBOTIS e-Manual AX-12A, <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>.
31. <http://kyowa.ru/produktsiya/tenzorezistori.html>.

Data on authors

- Kirill V. Nasonov** — Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Engineer; E-mail: kvnasonov@itmo.ru
- Ivan I. Borisov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Researcher; E-mail: borisovii@itmo.ru

Received 28.12.21; approved after reviewing 11.01.22; accepted for publication 18.01.22.