

**СОДИЗАЙН НЕПОЛНОПРИВОДНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА:  
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИРТУАЛЬНОГО И НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Д. В. ИВОЛГА\*, К. В. НАСОНОВ, И. И. БОРИСОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,*  
*\*ivolga.dv@itmo.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены прямая и обратная задачи проектирования неполноприводного прыгающего робота, способного осуществлять энергоэффективную динамическую локомоцию. Представлено решение прямой задачи проектирования: имитационное моделирование робота в виртуальной среде в целях изучения его поведения и производительности. Приведено решение обратной задачи проектирования: формирование требований и поиск параметров робота, обеспечивающих его наилучшую производительность. Содизайн заключается в одновременном поиске механической конструкции и траекторий движения робота; оценка поведения и производительности рассматриваемой системы осуществляется в виртуальной имитационной среде. Так как имитационное моделирование не в полной мере отражает протекающие в реальной жизни процессы, апробированные исключительно в виртуальной среде результаты проектирования не могут в полной мере описывать результаты реального эксперимента и заменять их. Сравниваются результаты виртуального и натурального экспериментов макета неполноприводного прыгающего робота, приведено обоснование расхождений полученных данных.

**Ключевые слова:** *прямая задача проектирования, обратная задача проектирования, неполноприводный робот, морфологический расчет, содизайн*

**Благодарности:** работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (№ МК-2081.2022.4).

**Ссылка для цитирования:** *Иволга Д. В., Насонов К. В., Борисов И. И.* Содизайн неполноприводного прыгающего робота: сравнительный анализ виртуального и натурального экспериментов // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2022. Т. 65, № 12. С. 863—873. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-863-873.

**CO-DESIGN OF AN INCOMPLETE-DRIVE HOPPING ROBOT:  
COMPARATIVE ANALYSIS OF VIRTUAL AND FULL-SCALE EXPERIMENTS**

D. V. Ivolga\*, K. V. Nasonov, I. I. Borisov

*ITMO University, St. Petersburg, Russia*  
*\*ivolga.dv@itmo.ru*

**Abstract.** The forward and inverse design tasks of an incomplete-drive hopping robot capable of energy-efficient dynamic locomotion are considered. A solution to the direct design problem of simulating a robot in a virtual environment in order to study its behavior and performance is presented. A solution of the inverse design problem is obtained, which consists in the formation of requirements and the search for robot parameters that ensure its best performance. Since simulation modeling does not fully reflect the processes occurring in real life, the design results tested exclusively in a virtual environment cannot fully describe the results of a real experiment and replace them. The results of virtual and full-scale experiments of a prototype of a non-wheel drive jumping robot are compared, and the rationale for the discrepancies in the data obtained is given.

**Keywords:** forward design task, inverse design task, incomplete-drive robot, morphological computation, co-design

**Acknowledgment:** the work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (No. МК-2081.2022.4).

**For citation:** Ivolga D. V., Nasonov K. V., Borisov I. I. Co-design of an incomplete-drive hopping robot: comparative analysis of virtual and full-scale experiments. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 863—873 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-863-873.

**Введение.** Среди всех возможных структур роботов наиболее широко используется полноприводная открытая кинематика: артикулированные роботы-манипуляторы [1], пальцы антропоморфных захватных устройств [2], механизмы ног шагающих роботов [3] и др. Полноприводная кинематика является универсальным средством для выполнения разнообразных движений, поскольку способна двигаться в произвольном направлении, точно следовать требуемым траекториям, физически взаимодействовать с окружающей средой.

С момента появления промышленных роботов к ним предъявлялись требования по высокой точности позиционирования, скорости перемещения, повторяемости и грузоподъемности. В условиях структурированной среды производственных цехов и отсутствия жестких требований по энергоэффективности требуемые характеристики обеспечиваются механизмами открытой и параллельной кинематики, состоящими из жестких, соединенных дискретными сочленениями, звеньев. Жесткие звенья способны выдерживать больше нагрузки, дискретные сочленения позволяют точно управлять движением. Задачи проектирования подобных конструкций и синтеза алгоритмов управления ими хорошо изучены и, в том числе, обеспечены аналитическими методами.

Несмотря на очевидные преимущества, необходимость большого количества актуаторов для управления такого рода конструкциями влечет за собой повышение требований к производительности приводов и точности датчиков, а также возрастание сложности управления, энергопотребления, веса и габаритов, общей стоимости робота [4].

**Морфологический расчет законов управления.** Новое поколение роботов необходимо для обеспечения *сервиса, логистики, инспекции, обработки и сборки* — решать эти задачи невозможно, если роботы не способны *адаптивно и безопасно* взаимодействовать с неструктурированным окружением в условиях ограниченных *энергетических* запасов. Сформировавшихся и ставших традиционными принципов анализа, конструирования и управления недостаточно, когда перед проектировщиком стоят жесткие ограничения по производительности и запасу набортовой энергии [5]. Параметр „энергоэффективность“, прежде всего, означает бережный расход энергии без ограничения производительности робота. Естественная динамика механической системы не должна отменяться системой управления, ее следует учитывать при проектировании робота. Согласно принципам морфологического расчета законов управления (*morphological computation*) [6, 7] и физического воплощения интеллекта (*physical intellect embodiment*) [8], основная часть желаемого поведения и динамики может быть заложена на механическом уровне робота, а задача алгоритмического управления сведена к дополнению и стабилизации движения, обусловленного особенностями механического строения и естественной динамики робота. Минимизация управляющего воздействия требует меньшего „участия“ двигателей, что приводит к меньшему энергопотреблению.

**Проектирование как задача оптимизации.** Запрограммировать робота на выполнение поставленной задачи на механическом уровне можно за счет синтеза механизмов замкнутой кинематики с оптимизацией структуры и геометрических параметров, оптимизации распределения массы между звеньями и оптимизации распределения эластичности. Процесс проектирования подобных конструкций зачастую носит неформализованный характер в силу сочетания в робототехнической системе компонентов разной физической природы, стремящегося к бесконечности количества топологий и параметров, разнородных критериев оптимальности

решений, нелинейных целевых функций, несовершенства аналитического аппарата и средств имитационного моделирования и пр. [9].

Для содизайна неполноприводного прыгающего робота был использован нисходящий метод *адаптивной оптимизации* (рис. 1). При проектировании сверху вниз сначала грубо оптимизируется высокоуровневое поведение для конструкции низкой детализации, а затем с каждым этапом постепенно добавляются детали [10].

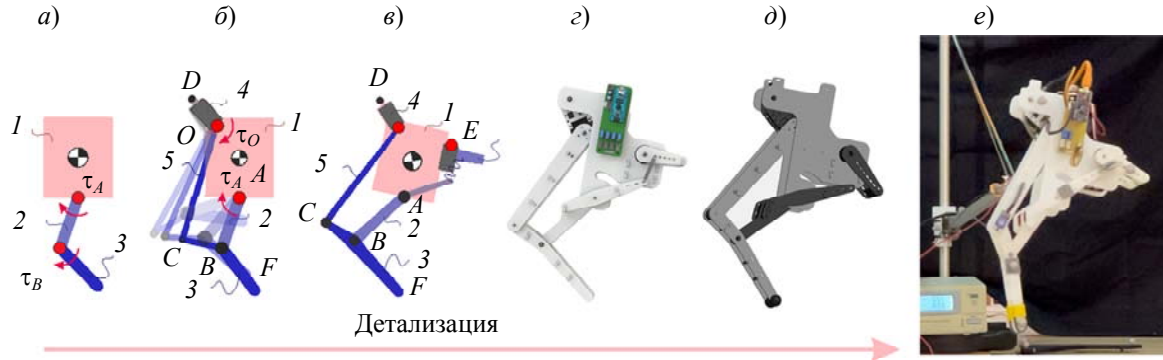


Рис. 1

На первом этапе адаптивной оптимизации прыгающего робота (рис. 1, а—в) решалась задача содизайна для модели, состоящей из звеньев примитивных форм. Для структурно-параметрического синтеза был использован метод, представленный в работах [11, 12], заключающийся в содизайне механизма открытой кинематики (рис. 1, а), последующем замыкании кинематики механизма (рис. 1, б) и интеграции пассивных элементов для адаптивности при контактном взаимодействии и рекуперации энергии (рис. 1, в).

Конструкция в САПР (рис. 1, з) спроектирована по найденным в результате содизайна структуры: длине звеньев и положению сочленений, массе звеньев, параметрам пружины. Детализированная конструкция верифицирована в имитационной среде согласно прямой задаче проектирования (рис. 1, д).

Прямая и обратная задачи применяются для повышения степени автоматизации проектирования (рис. 2) [13]. Прямая задача заключается в имитационном моделировании объекта проектирования в виртуальной среде в целях изучения его поведения и производительности. Изменение параметров исследуемой системы  $x_0$  ведет к изменению поведения и производительности исследуемой системы, оцениваемой эвристической целевой функцией  $f(x_0)$ .



Рис. 2

В случае обратной задачи проектирования производительность системы определяется путем направленного поиска, обеспечивающего минимизацию (или максимизацию) значения целевой функции. При обратной задаче проектирования поиск решения выполняется автоматизированным способом до тех пор, пока решение не удовлетворяет требуемому значению. Такой подход позволяет эффективно изучить пространство проектирования и найти оптимальное или субоптимальное решение.

Под содизайном робототехнической системы понимается оптимизация механической конструкции совместно с генерацией оптимальных траекторий движения [14—17]. Генерация конструкций роботов, генерация управляющих воздействий и их верификация выполняются

в имитационной среде моделирования с использованием эвристических алгоритмов для эффективного исследования пространства кандидатов и поиска среди них высокопроизводительных решений.

Производительность сгенерированных решений оценивается в среде имитационного моделирования, что неминуемо ведет к расхождению при сравнении результатов моделирования и натурального тестирования физических образцов роботов. Минимизировать разрыв между имитационным моделированием и реальностью возможно, но чем выше точность моделирования, тем больше усилий приходится затрачивать на создание, верификацию и валидацию модели [9, 10].

**Прямая задача проектирования прыгающего робота.** Имитационное моделирование спроектированного неполноприводного прыгающего робота было проведено в среде MatLab с использованием пакетов Simscape Multibody, Driveline и Electrical.

1) *Моделирование движения тел.* Все звенья робота, подстилающая поверхность и объекты окружения промоделированы как абсолютно твердые однородные тела. Учтены масса, инерция тел, голономные ограничения, выполнена визуализация моделируемой сцены в трехмерном пространстве. Так как моделирование включено в контур оптимизации, требуется обеспечение высокой скорости моделирования за шаг оптимизации, поэтому не учитываются эластичная и пластичная деформации, ползучесть, износ пластиковых деталей, люфт в сочленениях.

2) *Моделирование контактного взаимодействия* заключается в расчете силы по нормали к контактной поверхности  $f_n$  и силы трения  $f_f$ , действующей в плоскости контакта. Для расчета  $f_n$  был использован метод штрафов [18, 19], при котором геометрия контактируемых объектов пересекается в момент соударения, а сила рассчитывается по линейно-вязкой модели:

$$f_n = k_c x + b_c \dot{x},$$

где  $k_c$  и  $b_c$  — коэффициенты жесткости (Н/м) и демпфирования контактного взаимодействия (Нс/м) соответственно;  $x$  — глубина проникновения контактных поверхностей друг в друга (м). Горизонтальная составляющая контактной силы — сила трения  $f_f$  — рассчитывается как функция, которая зависит от компонентов трения Штрибека  $F_s$ , трения Кулона  $F_c$  и трения вязкости  $F_v$ :

$$f_f = \sqrt{2e} \cdot (F_b - F_c) \exp\left(-\left(\frac{v}{v_s}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{v}{v_s}\right) + F_c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{v}{v_c}\right) + \mu v,$$

где  $F_b = F_s + F_c + F_v$  — сила трения отрыва (Н);  $v_s = v_b \sqrt{2}$  и  $v_c = v_b / 10$  — пороги скорости Штрибека и скорости Кулона соответственно (м/с);  $v_b$  — скорость трения отрыва (м/с);  $v$  — скорость контактирующих тел относительно друг друга (м/с);  $\mu$  — коэффициент трения.

3) *Моделирование эластичных элементов* осуществлялось по линейно-вязкой модели вида „пружина—демпфер“:

$$F_e = k\Delta p + b\Delta \dot{p},$$

где  $F_e$  — генерируемая сила;  $k$ ,  $b$  — скалярные коэффициенты жесткости (Н/м) и демпфирования (Нс/м) соответственно;  $\Delta p$  — деформация пружины (м).

4) *Модель главного и вспомогательного сервомотора* состоит из моделей двигателей постоянного тока, редуктора и контура системы управления. Модель позволяет учесть электромеханическую составляющую сервомоторов при апробации прыгающего робота, тем самым определив параметры реальных приводов для физического прототипа.

Генерируемый мотором постоянного тока крутящий момент  $T$  описывается упрощенной моделью с учетом электромеханических характеристик:

$$T = \frac{k_t}{R}(V - k_v\omega) - J\dot{\omega} - \frac{k_t i_{xx}}{\omega_{xx}}\ddot{\omega},$$

где  $R$  — сопротивление обмоток ротора,  $k_t$  — постоянный коэффициент крутящего момента,  $k_v$  — константа противо-ЭДС,  $\omega$  — угловая скорость ротора, где  $i_{xx}$  — ток холостого хода,  $\omega_{xx}$  — угловая скорость вращения ротора на холостом ходу. Модель отражает основные динамические характеристики мотора, в то же время используемые величины на практике указываются в спецификации к моторам или определяются экспериментально [20].

Модель редуктора описывает зависимость между входным движением вала двигателя постоянного тока и выходом редуктора, с учетом КПД редуктора  $\eta$ :

$$\begin{cases} T_s = i_{gb}T - T(1 - \eta), \\ \omega_s = \frac{\omega}{i_{gb}}, \end{cases}$$

где  $T_s$  и  $\omega_s$  — крутящий момент и угловая скорость на выходе сервомотора.

Управление по положению сервомотором осуществляется с помощью ПД-регулятора:

$$V = eK_p + \dot{e}K_d,$$

где  $V$  — подаваемое на мотор постоянного тока напряжение,  $e = q_c - q_d$  — ошибка по положению ( $q_c$  и  $q_d$  — текущий и требуемый углы поворота),  $K_p$  и  $K_d$  — пропорциональный и дифференцирующий коэффициенты регулирования.

Модель сервомотора является идеализированной, чтобы упростить процедуру расчета и уменьшить время моделирования. В ней не учитываются электромагнитные потери, термодинамические процессы, связанные с рассеиваемой энергией, трение, люфт, помехи и задержки в контуре управления. Данные параметры в большей степени необходимы для количественной оценки надежности работы привода при постоянной нагрузке.

**Обратная задача проектирования прыгающего робота.** Целью решения обратной задачи проектирования является нахождение морфологии робота и траекторий сочленений, которые обеспечивают требуемую производительность и поведение.

1) *Цель содизайна.* Численная оценка поведения и производительности робота при рассматриваемых значениях переменных осуществляется с помощью эвристической целевой функции вознаграждения по итогам тестирования робота в имитационной среде. Для поведения, соответствующего прыжку на месте, функция вознаграждения имеет следующий вид:

$$f_J = \frac{\tilde{h}_F^2 t^2}{1 + |\tilde{x}_B|},$$

для поведения, соответствующего бегу,

$$f_R = \text{sgn}(x_B) x_B^2 \tilde{h}_F^2 t^2,$$

где  $\tilde{h}_F$  — средняя высота прыжка для точки контакта робота с полом,  $t$  — время процесса моделирования,  $x_B$  и  $\tilde{x}_B$  — абсолютное и среднее значение пройденного расстояния вдоль оси  $\hat{x}$  для тела соответственно.

2) *Входные и выходные данные.* В общем виде на вход подается структура вида

$$\mathcal{G}_{in}^l = (\mathcal{N}, \mathcal{T}, \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{S}),$$

где множества  $\mathcal{N}$  и  $\mathcal{T}$  несут информацию о структуре механизма,  $\mathcal{N}$  содержит нетерминальные символы,  $\mathcal{T}$  — терминальные символы графа; множество  $\mathcal{A}$  — характеристики символов, которые несут информацию о непрерывных переменных:

$$\mathcal{A} = (\mathbf{l}, \mathbf{p}, \mathbf{i}, \boldsymbol{\beta}),$$

где  $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^u$  — вектор длин звеньев,  $u \in \mathbb{N}$  — число звеньев,  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{c \times 2}$  — вектор систем координат точек присоединения звеньев,  $c \in \mathbb{N}$  — число поводков,  $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^l$  — вектор масс звеньев,  $\boldsymbol{\beta} \in \mathbb{R}^{o \times 4}$  — вектор параметров пружин,  $o \in \mathbb{N}$  — число пружин,  $\mathcal{R}$  — грамматические правила сборки терминальных и нетерминальных символов,  $\mathcal{S}$  — начальные элементы графа. Грамматические правила  $\mathcal{R}$  описывают способы образования структуры механизма.

На выходе формируется структура  $\mathcal{G}_{\text{out}}^l$ , которая несет всю информацию о структуре, геометрических параметрах и траекториях движения сочленений механизмов пальцев открытой кинематики для захватного устройства или роботизированной кисти

$$\mathcal{G}_{\text{out}}^l = (\mathcal{T}, \mathcal{A}, \mathcal{E}, \mathcal{J}),$$

где  $\mathcal{E} \in \mathbb{N}^{g \times g}$  — матрица связности терминальных элементов механизма  $\mathcal{T}$ ,  $g \in \mathbb{N}$  — число элементов механизма,  $\mathcal{J}(t) \in \mathbb{R}^l$  — матрица с траекториями всех приводных сочленений,  $l \in \mathbb{N}$  — число звеньев.

3) *Ограничения.* Поскольку оптимизация основана на имитационном моделировании, всех нежелательных сценариев можно избежать, установив условия для прерывания моделирования. Например, задать граничные условия для положения тела робота вдоль вертикальной оси  $z_B \in [z_{B\min}; z_{B\max})$  и для средней высоты прыжка  $\tilde{h}_F \in [\tilde{h}_{F\min}; \infty)$ .

4) *Оптимизация.* Целью содизайна прыгающего робота является поиск переменных для  $\mathcal{G}_{\text{out}}^l$ , т.е. структуры, длин звеньев и положений сочленений, масс звеньев, параметров пружин, а также траекторий активных сочленений, при которых достигается максимум функции вознаграждения:

$$f(\mathcal{G}_{\text{out}}^l) = \max \{k_j f_J + k_r f_R\},$$

где  $k_j$  и  $k_r$  — весовые коэффициенты.

Задача содизайна решена с помощью MatLab Global Optimization Toolbox. Для решения задачи оптимизации использованы генетические алгоритмы глобальной оптимизации.

**Конструкция прыгающего робота.** Для верификации результатов моделирования создан физический прототип прыгающего робота (см. рис. 1, е). Конструкция робота (рис. 1, з) создана на основе топологии, полученной в результате оптимизации (рис. 1, а—в). Большинство деталей прототипа адаптированы для изготовления методом лазерной резки, что значительно увеличивает скорость прототипирования. Основным конструкционным материалом является полиоксиметилен, обладающий низким коэффициентом трения, высокими ударопрочностью и износостойкостью. Для сопряжения деталей вместо крепежа используется клипсовое соединение, что снижает общий вес и увеличивает скорость сборки. Оси изготовлены на токарном станке из стали 45. Благодаря симметричной конструкции возможно подключение пружин с обеих сторон. Это решение позволяет гибко регулировать коэффициент жесткости за счет параллельности пружин. Для прототипа пружины выбраны в соответствии с данными, полученными в результате оптимизации. Изготовленный прототип весит 430 г.

Структура аппаратной части системы управления приведена на рис. 3. В качестве основного и вспомогательного двигателя выбран сервопривод Dynamixel AX-18A, обеспечивающий необходимый крутящий момент и скорость, а также позволяющий определять широ-

кий спектр данных обратной связи. Измерение угла колена осуществляется с помощью потенциометра CJMCU-103. Для управления сервоприводами и считывания сигнала с датчика разработана плата расширения на основе Arduino Nano Every. Согласование интерфейса между сервомоторами и Arduino осуществлялось с помощью микросхемы 74LVC2G241. Усиление и фильтрация сигнала с датчика углового положения колена производились посредством инструментального усилителя AD623.

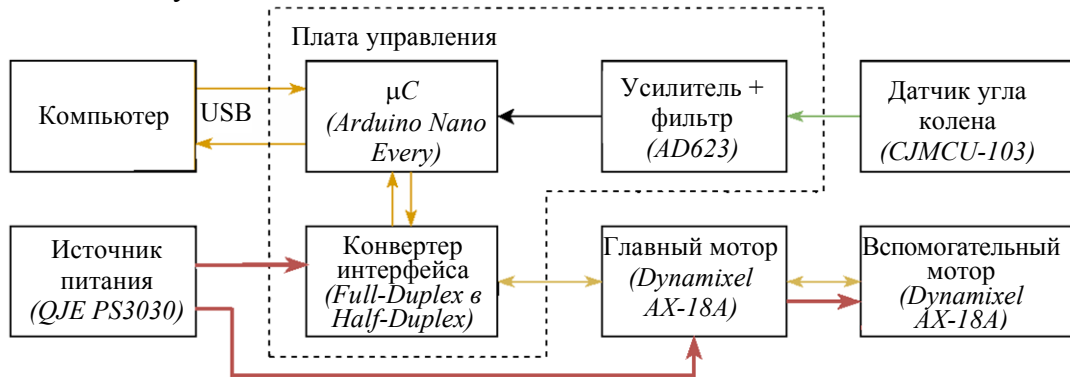


Рис. 3

**Сравнительный анализ виртуального и натурального экспериментов.** Для сравнительного анализа результатов моделирования и реального поведения прыгающего робота протестирован разработанный прототип. На рис. 4 приведена последовательность изображений для бега. Прыгающий робот имеет две степени свободы: вдоль вертикальной  $\hat{z}$  и горизонтальной оси  $\hat{x}$ . Чтобы ограничить все остальные степени свободы, к корпусу робота жестко прикреплен соединительный стержень длиной 1,15 м. Другой конец стержня соединен со стойкой с помощью двух вращательных сочленений, которые обеспечивают рыскание и вращение по крену вокруг неподвижного основания. Для компенсации веса стержня использован эластичный трос, натянутый между основанием и стержнем.



Рис. 4

Движение робота было захвачено с помощью систем отслеживания в реальном времени *OptiTrack* [21]. Система захвата движения состоит из восьми камер, установленных на одинаковой высоте вокруг испытательного стенда, чтобы охватить всю область действия робота. На роботе установлены отражающие сферы для определения положения и ориентации в пространстве: туловища, стопы и выходного звена робота. Точки крепления сфер идентичны расположению маркеров в имитационной модели. Система откалибрована со средней погрешностью 0,9 мм при длине луча 5,9 м.

Испытания проведены для различных углов настройки двигателя, который задает скорость движения робота. Dynamixel AX-18A предоставляет широкий спектр данных обратной связи, таких как угловое положение, угловая скорость и моменты нагрузки.



На рис. 5 представлены графики виртуального и натурального экспериментов для быстрого (рис. 5, а) и медленного (рис. 5, б) бега:  $p_b^w$  и  $p_b^f$  — перемещения системы координат робота  $\Psi_B$  и точки контакта  $\Psi_F$  соответственно, выраженные в мировой системе координат  $\Psi_W$ , моменты  $\tau$  и угловое положение  $\alpha$  для обоих двигателей, а также общее энергопотребление  $P$

$$\bar{P} = \bar{\tau}_m \cdot \dot{\bar{\alpha}}_m + \bar{\tau}_c \cdot \dot{\bar{\alpha}}_c,$$

где штрих указывает на экспериментальные данные, индексы  $m$  и  $c$  указывают на основной и конфигурационный двигатели соответственно. При анализе графиков видно, что в самом быстром режиме для прохождения дистанции требуется меньше времени.

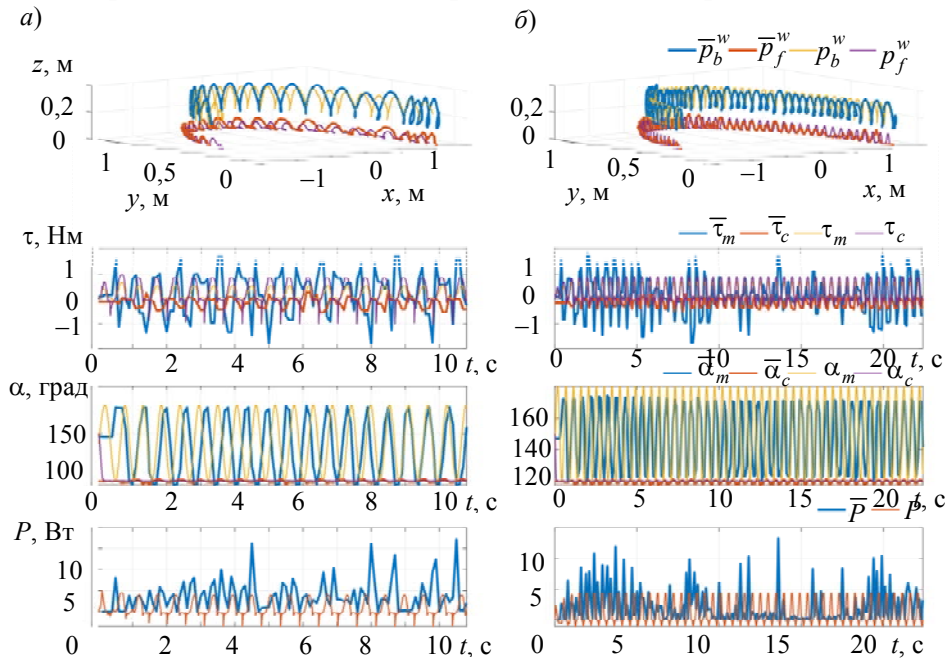


Рис. 5

Рис. 6 демонстрирует стоимость перемещения для быстрого СП<sub>а</sub> и медленного СП<sub>б</sub> перемещения

$$СП = \frac{E}{m_p d},$$

где  $E$  — значение энергии, затраченной на перемещение,  $m_p$  — масса робота, а  $d$  — пройденное расстояние.

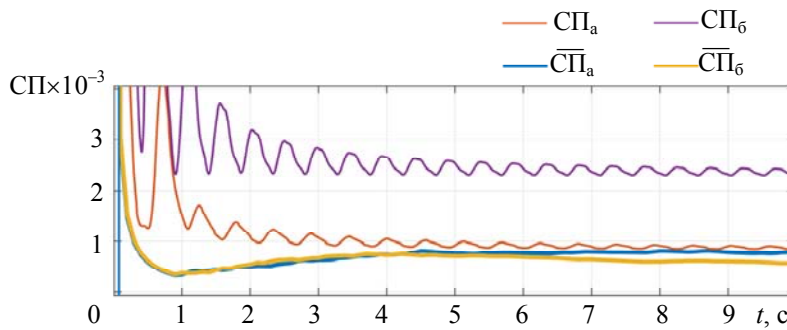


Рис. 6

Порядок данных виртуального и натурального экспериментов одинаков: в частности, амплитуды перемещения по вертикали для корпуса и ступни, порядок моментов на двигателях, амплитуда и частота движения входных звеньев как при быстром там и при медленном беге. Отсутствие части данных в паспорте (параметры индуктивности и сопротивления обмоток, момент инерции ротора и электромеханической составляющей, КПД) серводвигателя, эмпи-



рически подобранные коэффициенты контактного взаимодействия, отсутствие люфтов и деформаций пластиковых деталей, линейные модели для пружин растяжения и трения в сочленениях, неучтенные неровности пола и потери на сопротивление со средой приводят к неминуемым несоответствиям между имитационной и реальной средой с точки зрения как визуальных, так и физических свойств.

Полосы пропускания Dynamixel AX-18A недостаточно для снятия данных с высокой частотой, поэтому виртуальный и натуральный эксперименты имеют разное время дискретизации. Например, из рис. 5 видно, что значения  $C_p$  при моделировании с меньшим шагом имеют затухающие колебания, но в реальных экспериментах с большим шагом графики  $C_p$  являются гладкими.

**Заключение.** В случае слабоформализованных задач проектирования поиск решения в большинстве случаев до сих пор производится „ручными“ аналитическими методами; при этом результат сильно зависит от опыта и инженерной интуиции специалиста-проектировщика. Творческих способностей человека зачастую недостаточно для проектирования энергоэффективных и адаптивных робототехнических систем с морфологическим расчетом законов управления и физического воплощенного искусственного интеллекта, что связано с неограниченностью пространства решений, непрерывным характером работы деформируемых тел, несовершенством аналитического аппарата и средств имитационного моделирования.

Процесс проектирования путем решения обратной задачи автоматизируется благодаря средствам имитационного моделирования. Однако проблема имитационного моделирования заключается в том, что даже лучшие из доступных симуляторов не в полной мере отражают процессы, протекающие в реальности. При создании имитационных моделей необходимо аргументированно балансировать между степенью детализации модели и быстротой ее расчета.

В настоящей работе решена обратная задача проектирования неполноприводного робота со сложной механической конструкцией как оптимизационная задача с расчетом целевой функции по результатам тестирования решения в имитационной среде. Однако модели роботов, апробированные исключительно в искусственных условиях, не могут в полной мере описывать результаты реального эксперимента и заменять их. Для верификации решения был изготовлен физический прототип и проведено сравнение детализированной имитационной модели и физического макета робота.

Исследование проведено в рамках разработки методов, алгоритмов, а также программных продуктов, предназначенных для оптимизации структуры механизмов исполнительных элементов, геометрических параметров с целью обеспечения требуемой кинематики движения, параметров эластостатики и распределения массы для обеспечения требуемой естественной динамики и синтеза алгоритмов управления с целью достижения требуемого поведения неполноприводных роботов, которые должны решать задачи контактного взаимодействия с заранее неизвестным окружением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raiola G. et al. Development of a safety-and energy-aware impedance controller for collaborative robots // IEEE Robotics and automation letters. 2018. Vol. 3, N 2. P. 1237—1244.
2. Rothling F. et al. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-DOF shadow and 9-DOF TUM hand // 2007 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2007. P. 2951—2956.
3. Lee J. et al. Learning quadrupedal locomotion over challenging terrain // Science robotics. 2020. Vol. 5, N 47. P. eabc5986.
4. Thomaszewski B. et al. Computational design of linkage-based characters // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2014. Vol. 33, N 4. P. 1—9.

5. Roy N. et al. From Machine Learning to Robotics: Challenges and Opportunities for Embodied Intelligence // arXiv preprint arXiv:2110.15245. 2021.
6. Müller V. C., Hoffmann M. What is morphological computation? On how the body contributes to cognition and control // *Artificial life*. 2017. Vol. 23, N 1. P. 1—24.
7. Folkertsma G. A., van der Schaft A. J., Stramigioli S. Morphological computation in a fast-running quadruped with elastic spine // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, N 13. P. 170—175.
8. Howard D. et al. Evolving embodied intelligence from materials to machines // *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1, N 1. P. 12—19.
9. Chen F., Wang M. Y. Design optimization of soft robots: A review of the state of the art // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2020. Vol. 27, N 4. P. 27—43.
10. Pinski J., Howard D. From bioinspiration to computer generation: Developments in autonomous soft robot design // *Advanced Intelligent Systems*. 2022. Vol. 4, N 1. P. 2100086.
11. Borisov I. I. et al. Computational design of reconfigurable underactuated linkages for adaptive grippers // 2021 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021. P. 6117—6123.
12. Borisov I. I. et al. Reconfigurable Underactuated Adaptive Gripper Designed by Morphological Computation // 2022 Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2022. P. 1130—1136.
13. Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories / Ed. by E. Gasparri et al. Woodhead Publishing, 2021.
14. Sims K. Evolving virtual creatures // *Proc. of the 21st Ann. Conf. on Computer graphics and interactive techniques*. 1994. P. 15—22.
15. Geijtenbeek T., Van De Panne M., Van Der Stappen A. F. Flexible muscle-based locomotion for bipedal creatures // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2013. Vol. 32, N 6. P. 1—11.
16. Wang T. et al. Neural graph evolution: Towards efficient automatic robot design // arXiv preprint arXiv:1906.05370. 2019.
17. Zhao A. et al. Robogrammar: graph grammar for terrain-optimized robot design // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2020. Vol. 39, N 6. P. 1—16.
18. Marhefka D. W., Orin D. E. Simulation of contact using a nonlinear damping model // *Proc. of IEEE Intern. Conf. on robotics and automation*. IEEE, 1996. Vol. 2. P. 1662—1668.
19. Hwang Y. et al. An order n dynamic simulator for a humanoid robot with a virtual spring-damper contact model // 2003 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422). IEEE, 2003. Vol. 1. P. 31—36.
20. Horowitz P., Hill W., Robinson I. *The art of electronics*. Cambridge: Cambridge university press, 1989. Vol. 2. P. 658.
21. Nagymáté G., Kiss R. M. Application of OptiTrack motion capture systems in human movement analysis: A systematic literature review // *Recent Innovations in Mechatronics*. 2018. Vol. 5, N 1. P. 1—9.

#### Сведения об авторах

- Дмитрий Викторович Иволга** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер; E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Кирилл Вячеславович Насонов** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер; E-mail: kvnasonov@itmo.ru
- Иван Игоревич Борисов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; научный сотрудник; E-mail: borisovii@itmo.ru

Поступила в редакцию 31.08.22; одобрена после рецензирования 09.09.22; принята к публикации 31.10.22.

#### REFERENCES

1. Raiola G. et al. *IEEE Robotics and automation letters*, 2018, no. 2(3), pp. 1237–1244.
2. Rothling F. et al. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007, pp. 2951–2956.

3. Lee J. et al. *Science robotics*, 2020, no. 47(5), pp. eabc5986.
4. Thomaszewski B. et al. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, no. 4(33), pp. 1–9.
5. Roy N. et al. *arXiv preprint arXiv:2110.15245*, 2021.
6. Müller V.C., Hoffmann M. *Artificial life*, 2017, no. 1(23), pp. 1–24.
7. Folkertsma G.A., van der Schaft A.J., Stramigioli S. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, no. 13(48), pp. 170–175.
8. Howard D. et al. *Nature Machine Intelligence*, 2019, no. 1(1), pp. 12–19.
9. Chen F., Wang M.Y. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2020, no. 4(27), pp. 27–43.
10. Pinskiel J., Howard D. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, no. 1(4), pp. 2100086.
11. Borisov I.I. et al. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2021, pp. 6117–6123.
12. Borisov I.I. et al. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2022, pp. 1130–1136.
13. Gasparri E. et al., ed., *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*, Woodhead Publishing, 2021.
14. Sims K. *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1994, pp. 15–22.
15. Geijtenbeek T., Van De Panne M., Van Der Stappen A.F. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, no. 6(32), pp. 1–11.
16. Wang T. et al. *arXiv preprint arXiv:1906.05370*, 2019.
17. Zhao A. et al. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2020, no. 6(39), pp. 1–16.
18. Marhefka D.W., Orin D.E. *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*, IEEE, 1996, vol. 2, pp. 1662–1668.
19. Hwang Y. et al. *IEEE International*, 2003, vol. 1, pp. 31–36.
20. Horowitz P., Hill W., Robinson I. *The art of electronics*, Cambridge, Cambridge university press, 1989, vol. 2, pp. 658.
21. Nagymáté G., Kiss R. M. *Recent Innovations in Mechatronics*, 2018, no. 1(5), pp. 1–9.

**Data on authors**

- Dmitry V. Ivolga** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Engineer;  
E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Kirill V. Nasonov** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, 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, Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Researcher;  
E-mail: borisovii@itmo.ru

Received 31.08.22; approved after reviewing 09.09.22; accepted for publication 31.10.22.