

УДК 621.865.8

Исследование динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей с учётом реакций опорной поверхности

Верейкин А. А.^{1,*}, Ковальчук А. К.¹,
Каргинов Л. А.¹

[*aautres@gmail.com](mailto:aautres@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлены результаты исследования динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей. Уравнения динамики получены с использованием принципа Д'Аламбера. Для описания кинематической структуры исполнительного механизма применялись системы координат Денавита-Хартенберга и элементы теории графов. На базе разработанной в программном комплексе SolidWorks 3-D модели исполнительного механизма экзоскелета найдены массо-инерционные параметры его звеньев. Определены законы изменения обобщённых координат в сочленениях экзоскелета от времени, соответствующие наиболее нагруженным случаям типовых движений человека. Получены значения моментов и мощностей в степенях подвижности исполнительного механизма как без учёта, так и с учётом реакций опорной поверхности шагания.

Ключевые слова: робототехника, древовидная кинематическая структура, расчёт привода, экзоскелет, человек-машина, уравнение динамики робота, динамический анализ, математическое моделирование

Введение

Робототехника на сегодняшний день является одной из самых динамично развивающихся отраслей научного знания, что находит своё объяснение в широте и разнообразии областей её возможного применения. При этом значительная часть исследований, имеющих отношение к робототехнике, посвящена шагающим роботам (ШР), среди несомненных преимуществ которых стоит упомянуть более высокие в сравнении с колёсными или гусеничными машинами проходимость и энергоэффективность в условиях передвижения по пересечённой местности. Ещё одним достоинством ШР является возможность частичного или полного замещения человеческого труда роботами в условиях, изначально созданных для человека (здания, кабины различной техники и т.п.).

Одним из наиболее перспективных видов шагающих роботов в плане частичной замены человеческого труда являются роботизированные экзоскелеты [1–5], разгружающие человека-оператора и повторяющие его биомеханику. Широкое распространение получили экзоскелеты, оснащённые электрогидравлическими приводами в силу высокой энергоёмкости и приемлемых динамических свойств последних. Однако практическое применение экзоскелетов ограничено в силу отсутствия на данный момент подходящего бортового источника энергии, способного поддерживать их автономность на приемлемом уровне. Исследования [6-10] посвящены вопросам создания силовых установок мобильных роботов.

Ещё одной трудностью в процессе разработки экзоскелетов является проблема управления ими человеком-оператором в силу того, что человеческий организм представляет собой сложную нелинейную систему с распределёнными параметрами. Данный вопрос рассматривается в работах [11-13].

По результатам обзора, приведённого в [14], можно сделать вывод, что в РФ наблюдается значительное отставание в этой области техники. Актуальной ведущейся разработкой, насколько можно судить по [15], является проект Eхоatlet НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Таким образом, разработка исполнительного механизма (ИМ) экзоскелета и исследование его параметров и характеристик представляют собой актуальные задачи. В настоящем исследовании используется метод построения математических моделей ИМ, прошедший апробацию при расчёте параметров шагающих роботов как с древовидной [16-20], так и с линейной [21] кинематическими структурами. В качестве приводов выбраны электрогидравлические следящие приводы (ЭГСП) в силу указанных выше причин.

В работах [22–24] представлены результаты синтеза кинематической схемы экзоскелета нижних конечностей, проведённого по методике, изложенной в [25], определены диапазоны изменения обобщённых координат сочленений экзоскелета, оснащённых ЭГСП, назначены системы координат (СК) для которых определены параметры Денавита-Хартенберга [26], получены граф и матрица достижимости.

В первом разделе записано уравнение динамики ИМ экзоскелета, на базе которого проводится математическое моделирование. Во втором разделе приведены исходные данные, необходимые для проведения моделирования: параметры Денавита-Хартенберга основных и вспомогательных СК ИМ экзоскелета, массо-инерционные параметры его звень-

ев, точки приложения сил реакции опоры, законы изменения обобщённых координат в степенях подвижности ИМ экзоскелета, оснащённых приводами. В третьем разделе представлены результаты моделирования уравнения динамики ИМ экзоскелета, включающие в себя значения моментов и мощностей в его сочленениях как без учёта, так и с учётом реакций опорной поверхности.

1. Уравнение динамики исполнительного механизма экзоскелета

Уравнение динамики ИМ экзоскелета с учётом воздействия внешних сил и моментов, а также внешних наложенных связей запишем в следующем виде [27, 28]:

$$\begin{pmatrix} A(\mathbf{q}) & -J_{VR}^T(\mathbf{q}) \\ J_t(\mathbf{q}) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ {}^0\mathbf{R}_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{P}(\mathbf{q}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L(\mathbf{q}) \cdot {}^0\mathbf{F}_e \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где \mathbf{q} – вектор обобщённых координат ИМ;

$A(\mathbf{q})$, $B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – матричные коэффициенты;

$J_t(\mathbf{q})$ – Якобиева матрица, определяющая кинематические ограничения, накладываемые на ИМ связями;

$J_{VR}^T(\mathbf{q})$ – транспонированная Якобиева матрица, определяющая кинематические ограничения, накладываемые кинематикой ИМ;

${}^0\mathbf{R}_f$ – блочная матрица сил и моментов реакций связи;

$\mathbf{P}(\mathbf{q})$ – вектор-столбец, определяемый из кинематических выражений;

$L(\mathbf{q})$ – Якобиева матрица размерностью $N \times (2 \cdot N)$, объединяющая матричные коэффициенты внешних сил и внешних моментов, наложенных на ИМ;

${}^0\mathbf{F}_e$ – блочный вектор внешних сил и моментов, приложенных к звеньям ИМ;

$\boldsymbol{\tau}$ – матрица моментов, развиваемых приводами ИМ.

Значения компонентов уравнения (1) определяются в соответствии с [29, 30].

2. Исходные данные для расчёта динамики ИМ экзоскелета

Исходными данными для расчета компонентов уравнения (1) являются:

- d_i [м], a_i [м], α_i [рад] – параметры Денавита-Хартенберга основных и вспомогательных СК экзоскелета, параметры $f(i)$ и $ns(i)$ основных систем координат, где $f(i)$ – номер звена-отца [31] звена i и $ns(i)$ – параметр, показывающий, каким по счёту сыном [31] явля-

ется звено i для звена $f(i)$, а также параметры N_i и N_k вспомогательных систем координат, где N_i – номер основной СК звена, N_k – номер вспомогательной СК;

- диапазоны изменения обобщённых координат сочленений ИМ;
- параметры звеньев ИМ: масса, тензоры инерции, координаты центров масс звеньев, получаемые по результатам 3D-моделирования конструкции;
- координаты точек приложения внешних сил;
- координаты точек приложения внешних связей.

2.1 Параметры Денавита-Хартенберга

Синтезированная в [22, 23] кинематическая схема и соответствующая ей 3-D модель ИМ экзоскелета представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Значения параметров Денавита-Хартенберга для основных и вспомогательных СК ИМ экзоскелета указаны в таблицах 1 и 2.

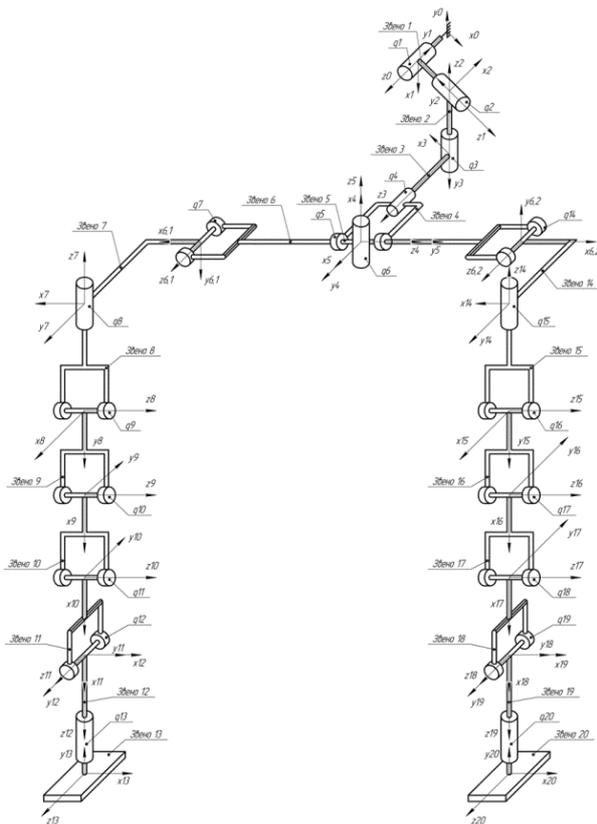


Рис. 1. Кинематическая схема ИМ экзоскелета

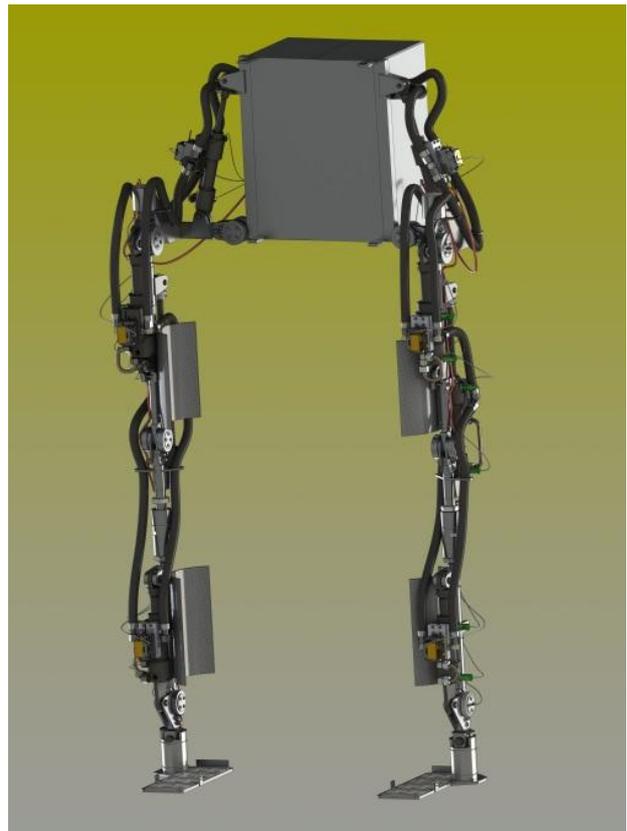


Рис. 2. 3-D модель ИМ экзоскелета

Таблица 1. Значения параметров Денавита-Хартенберга основных СК ИМ экзоскелета

№ СК	θ , [рад]	d , [м]	a , [м]	α , [рад]	$f(i)$	$ns(i)$
1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	2	1
4	0	0	0	0	3	1
5	0	0	0	0	4	1
6	$-\pi/2$	0	0,238	$-\pi/2$	5	1
7	0	0,198	0,167	$\pi/2$	6	1
8	$\pi/2$	- 0,107	0	$-\pi/2$	7	1
9	$\pi/2$	0	0,526	0	8	1
10	0	0	0,674	0	9	1
11	0	0	0,094	$\pi/2$	10	1
12	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	11	1
13	0	0,101	0	$-\pi/2$	12	1
14	π	0,198	- 0,167	$\pi/2$	6	2
15	$\pi/2$	- 0,107	0	$-\pi/2$	13	1
16	$\pi/2$	0	0,526	0	14	1
17	0	0	0,674	0	15	1
18	0	0	0,094	$\pi/2$	16	1
19	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	17	1
20	0	0,101	0	$-\pi/2$	18	1

Таблица 2. Значения параметров Денавита-Хартенберга вспомогательных СК ИМ экзоскелета

№ СК	θ , [рад]	d , [м]	a , [м]	α , [рад]	N_i	N_k
6,2	π	0	0,476	0	6	2

2.2 Массо-инерционные параметры звеньев ИМ

Массо-инерционные параметры звеньев ИМ экзоскелета были получены по результатам 3-D моделирования в программном комплексе SolidWorks. На рис. 3-10 показаны модели звеньев ИМ и в таблицах 3-9 приведены соответствующие им массо-инерционные параметры. Отметим, что грузоподъёмность разрабатываемого ИМ экзоскелета составляет 50 кг в предположении, что груз располагается в геометрическом центре звена 6. Масса силовой установки составляет 15 кг.

Таблица 3. Массо-инерционные параметры звеньев 6, 7 и 14

	Звено 6	Звено 7	Звено 14
Масса, [кг]	$M = 50$	$M = 2.40525758$	$M = 2.40525758$
Координаты центра масс, [м]	$X = -0.23510159$	$X = -0.04822968$	$X = 0.04822968$
	$Y = -0.22231140$	$Y = -0.10362463$	$Y = -0.10362463$
	$Z = -0.12147542$	$Z = -0.06311183$	$Z = -0.06311183$
Тензоры инерции, [кг · м²]	$I_x = 7.12970399$	$I_x = 0.02850829$	$I_x = 0.02850829$
	$I_y = 5.96302003$	$I_y = 0.01966455$	$I_y = 0.01966455$
	$I_z = 9.36554832$	$I_z = 0.03135668$	$I_z = 0.03135668$
	$I_{xy} = -0.01278172$	$I_{xy} = 0.01087169$	$I_{xy} = -0.01087169$
	$I_{xz} = -0.01018372$	$I_{xz} = 0.00622898$	$I_{xz} = -0.00622898$
	$I_{yz} = 0.02476764$	$I_{yz} = 0.01208787$	$I_{yz} = 0.01208787$

Таблица 4. Массо-инерционные параметры звеньев 8 и 15

	Звено 8	Звено 15
Масса, [кг]	$M = 0.83994875$	$M = 0.83994875$
Координаты центра масс, [м]	$X = 0.00473085$	$X = 0.00473085$
	$Y = -0.06957595$	$Y = -0.06957595$
	$Z = 0.00016564$	$Z = -0.00016564$
Тензоры инерции, [кг · м²]	$I_x = 0.00213518$	$I_x = 0.00213518$
	$I_y = 0.00052669$	$I_y = 0.00052669$
	$I_z = 0.00240389$	$I_z = 0.00240389$
	$I_{xy} = 0.00024127$	$I_{xy} = 0.00024127$
	$I_{xz} = 0.00000187$	$I_{xz} = -0.00000187$
	$I_{yz} = 0.00000240$	$I_{yz} = -0.00000240$



Рис. 3. 3-D модель звена 6

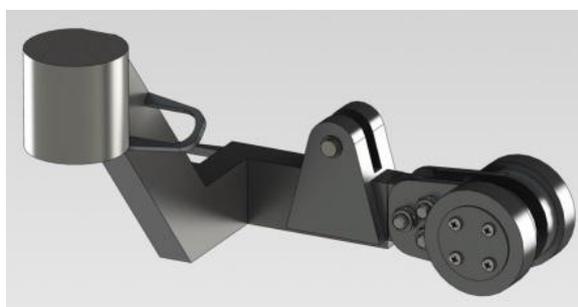


Рис. 4. 3-D модель звена 7



Рис. 5. 3-D модель звена 8

Таблица 5. Массо-инерционные параметры звеньев 9 и 16

	Звено 9	Звено 16
Масса, [кг]	$M = 8.91380755$	$M = 8.91380755$
Координаты центра масс, [м]	$X = -0.31796049$	$X = -0.31796049$
	$Y = -0.05298032$	$Y = -0.05298032$
	$Z = 0.00285154$	$Z = -0.00285154$
Тензоры инерции, [кг · м ²]	$I_x = 0.02483047$	$I_x = 0.02483047$
	$I_y = 0.14443780$	$I_y = 0.14443780$
	$I_z = 0.16161733$	$I_z = 0.16161733$
	$I_{xy} = 0.00257638$	$I_{xy} = 0.00257638$
	$I_{xz} = 0.00322018$	$I_{xz} = -0.00322018$
	$I_{yz} = 0.00114324$	$I_{yz} = -0.00114324$



Рис. 6. 3-D модель звена 16



Рис. 7. 3-D модель звена 17



Рис. 8. 3-D модель звена 11

Таблица 6. Массо-инерционные параметры звеньев 10 и 17

	Звено 10	Звено 17
Масса, [кг]	$M = 12.78978439$	$M = 12.78978439$
Координаты центра масс, [м]	$X = -0.43625373$	$X = -0.43625373$
	$Y = -0.00415647$	$Y = -0.00415647$
	$Z = 0.00161494$	$Z = -0.00161494$
Тензоры инерции, [кг · м ²]	$I_x = 0.07880506$	$I_x = 0.07880506$
	$I_y = 1.06478425$	$I_y = 1.06478425$
	$I_z = 1.13450491$	$I_z = 1.13450491$
	$I_{xy} = -0.23544191$	$I_{xy} = -0.23544191$
	$I_{xz} = 0.00595373$	$I_{xz} = -0.00595373$
	$I_{yz} = 0.00114324$	$I_{yz} = -0.00114324$

Таблица 7. Массо-инерционные параметры звеньев 11 и 18

	Звено 11	Звено 18
Масса, [кг]	$M = 0.75006227$	$M = 0.75006227$
Координаты центра масс, [м]	$X = -0.07648757$	$X = -0.07648757$
	$Y = 0.00013199$	$Y = -0.00013199$
	$Z = 0.00929483$	$Z = 0.00929483$
Тензоры инерции, [кг · м ²]	$I_x = 0.00062512$	$I_x = 0.00062512$
	$I_y = 0.00134389$	$I_y = 0.00134389$
	$I_z = 0.00105048$	$I_z = 0.00105048$
	$I_{xy} = 0.00000008$	$I_{xy} = -0.00000008$
	$I_{xz} = -0.00014631$	$I_{xz} = -0.00014631$
	$I_{yz} = -0.00000086$	$I_{yz} = 0.00000086$



Рис. 9. 3-D модель звена 12

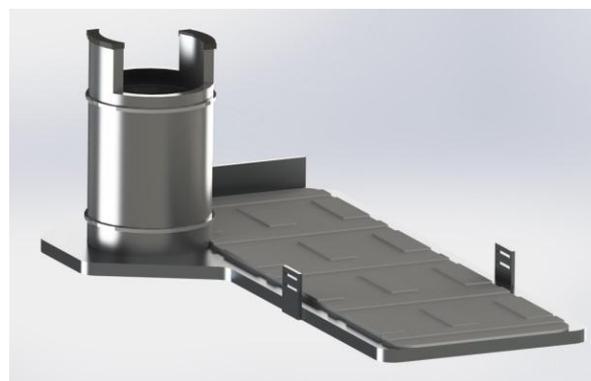


Рис. 10. 3-D модель звена 13

Таблица 8. Массо-инерционные параметры звеньев 12 и 19

	Звено 12	Звено 19
Масса, [кг]	$M = 0.84265474$	$M = 0.84265474$
Координаты центра масс, [м]	$X = 0.00000000$	$X = 0.00000000$
	$Y = -0.00005627$	$Y = -0.00005627$
	$Z = 0.04704563$	$Z = 0.04704563$
Тензоры инерции, [кг · м ²]	$I_x = 0.00108224$	$I_x = 0.00108224$
	$I_y = 0.00102586$	$I_y = 0.00102586$
	$I_z = 0.00038008$	$I_z = 0.00038008$
	$I_{xy} = -0.00000001$	$I_{xy} = -0.00000001$
	$I_{xz} = 0.00000013$	$I_{xz} = 0.00000013$
	$I_{yz} = -0.00000006$	$I_{yz} = -0.00000006$

Таблица 9. Массо-инерционные параметры звеньев 13 и 20

	Звено 13	Звено 20
Масса, [кг]	$M = 2.40532807$	$M = 2.40532807$
Координаты центра масс, [м]	$X = 0.02536075$	$X = -0.02536075$
	$Y = 0.02160510$	$Y = 0.02160510$
	$Z = 0.03175562$	$Z = 0.03175562$
Тензоры инерции, [кг · м ²]	$I_x = 0.01470942$	$I_x = 0.01470942$
	$I_y = 0.01737613$	$I_y = 0.01737613$
	$I_z = 0.00680497$	$I_z = 0.00680497$
	$I_{xy} = -0.00151431$	$I_{xy} = 0.00151431$
	$I_{xz} = 0.00383638$	$I_{xz} = -0.00383638$
	$I_{yz} = -0.00189032$	$I_{yz} = -0.00189032$

Необходимо заметить, что силы реакции опоры приложены в двух точках на левой и правой стопах, которые находятся на осевой линии стопы на мысках, что соответствует наименее благоприятному случаю нагружения.

2.3 Законы изменения обобщённых координат в степенях подвижности ИМ экзоскелета, оснащённых приводами

С целью определения законов изменения обобщённых координат в степенях подвижности ИМ экзоскелета, оснащённых приводами, были рассмотрены характерные типовые движения человека-оператора, совершаемые за счёт изменения обобщённой координаты (угла $\varphi_{\text{нагр}}(t)$) во времени в соответствующем сочленении в определённом ранее диапазоне (таблица 10) согласно гармоническому закону вида:

$$\varphi_{\text{нагр}}(t) = \varphi_{\text{А нагр}} \cdot \sin(\omega t) + \varphi_{\text{Н нагр}}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{А нагр}}$ – амплитуда изменения угла в сочленении, [град];

$\varphi_{\text{Н нагр}}$ – начальное значение угла в сочленении [град];

ω – скорость изменения угла в сочленении [град/с].

Таблица 10. Диапазоны изменения обобщённых координат в сочленениях экзоскелета, оснащённых приводами

Сочленения	Значение диапазона
q_7, q_{14}	[135°; 210°]
q_9, q_{16}	[120°; 184°]
q_{10}, q_{17}	[90°; 180°]
q_{11}, q_{18}	[140°; 230°]

Чтобы определить закон изменения обобщённой координаты для спинного сочленения ИМ, соответствующий наиболее нагруженному случаю, были рассмотрены следующие типовые движения:

- изменение угла крена корпуса, при котором человек-оператор остаётся на месте;
- поочерёдные движения ногами, при которых человек-оператор остаётся на месте и положение корпуса с течением времени не изменяется. В этом случае, во-первых, несущественна инерционная составляющая нагрузки, а во-вторых, масса ноги исполнительного механизма мала в сравнении с суммарной массой корпуса и груза, что делает исследование данного типа движения необязательным;
- поочерёдные движения ногами, совершаемые в процессе бокового перемещения, при этом вертикальная координата корпуса меняется во времени.

Результаты расчёта показали, что наиболее тяжёлому случаю нагружения соответствует изменение крена корпуса ИМ, описываемое следующим законом изменения угла в спинном сочленении:

$$q_7(t) = q_{14}(t) = 37.5^\circ \cdot \sin(128.572 \cdot t) + 172.5^\circ, \\ 135^\circ \leq q_7(t) = q_{14}(t) \leq 210^\circ .$$

С целью определения закона изменения обобщённой координаты в бедренном сочленении ИМ, соответствующего наихудшему случаю нагружения, были рассмотрены следующие типовые движения:

- одновременное изменение угла для двух ног, при котором человек-оператор остаётся на месте, сопровождаемое изменением тангажа корпуса ИМ, т.е. наклоны корпуса вперёд-назад;
- поочерёдные махи ногами, при которых человек-оператор остаётся на месте и положение корпуса с течением времени не изменяется. В этом случае, во-первых, мала инерционная составляющая нагрузки, а во-вторых, масса ноги исполнительного механизма мала в сравнении с суммарной массой корпуса и груза, что делает исследование данного типа движения необязательным;
- поочерёдные махи ногами, совершаемые в процессе ходьбы, при этом вертикальная координата корпуса ИМ меняется во времени.

Результаты расчёта показали, что наименее благоприятному случаю нагружения соответствуют поочерёдные махи ногами, совершаемые в процессе ходьбы, при которых закон изменения угла в бедренном сочленении ИМ задаётся соотношением:

$$q_9(t) = q_{16}(t) = 32^\circ \cdot \sin(156.532 \cdot t) + 152^\circ,$$

$$120^\circ \leq q_9(t) = q_{16}(t) \leq 184^\circ .$$

Для коленного сочленения в качестве типового движения рассматривалось приседание на одной ноге с полным контактом поверхности стопы ИМ и опорной поверхности. Закон изменения угла для коленного сочленения примет вид:

$$q_{10}(t) = q_{17}(t) = 45^\circ \cdot \sin(143.984 \cdot t) + 135^\circ ,$$

$$90^\circ \leq q_{10}(t) = q_{17}(t) \leq 180^\circ .$$

Для щиколоточного сочленения рассматривались движения типа поднятие – опускание человека на мысках. Итак, закон изменения угла для щиколоточного сочленения ИМ запишется следующим образом:

$$q_{11}(t) = q_{18}(t) = 45^\circ \cdot \sin(133.327 \cdot t) + 95^\circ ;$$

$$140^\circ \leq q_{11}(t) = q_{18}(t) \leq 230^\circ .$$

3. Результаты

В результате моделирования уравнения динамики (1) в программе моделирования дрововидных ИМ ШР с учётом внешних наложенных связей [29] были получены численные значения его элементов. Моменты и мощности в сочленениях, оснащённых ЭГСП, представлены на рис. 11-18. При этом моменты и мощности, рассчитанные без учёта реакции опоры обозначены как M_i и N_i , а моменты и мощности, рассчитанные с учётом реакции опоры, – M_{iR} и N_{iR} соответственно, где i – номер сочленения.

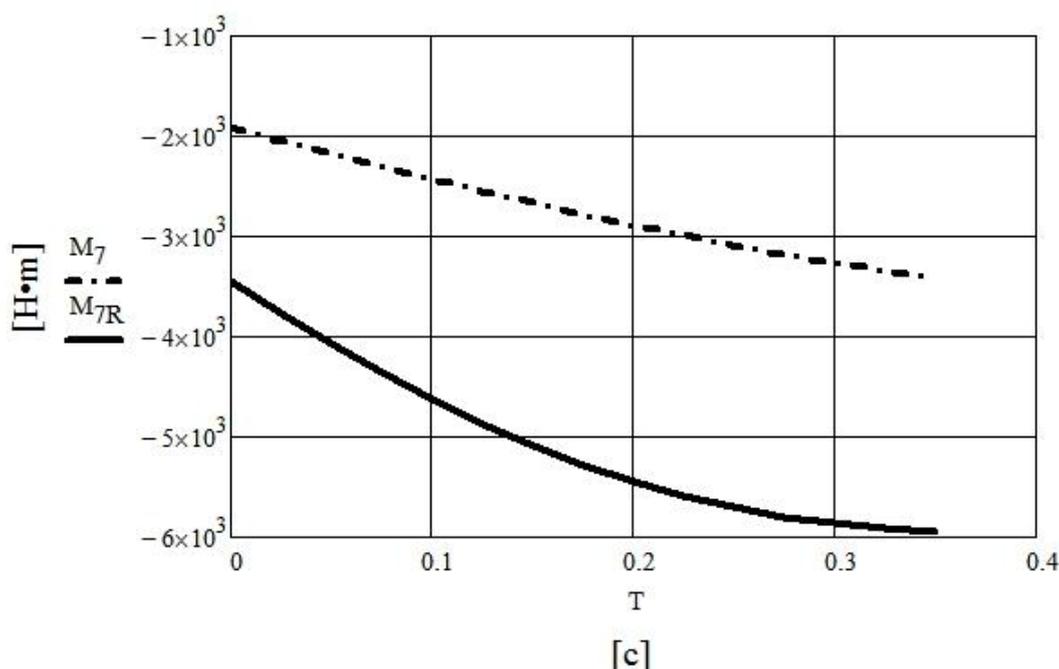


Рис. 11. Зависимость момента в сочленении 7 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

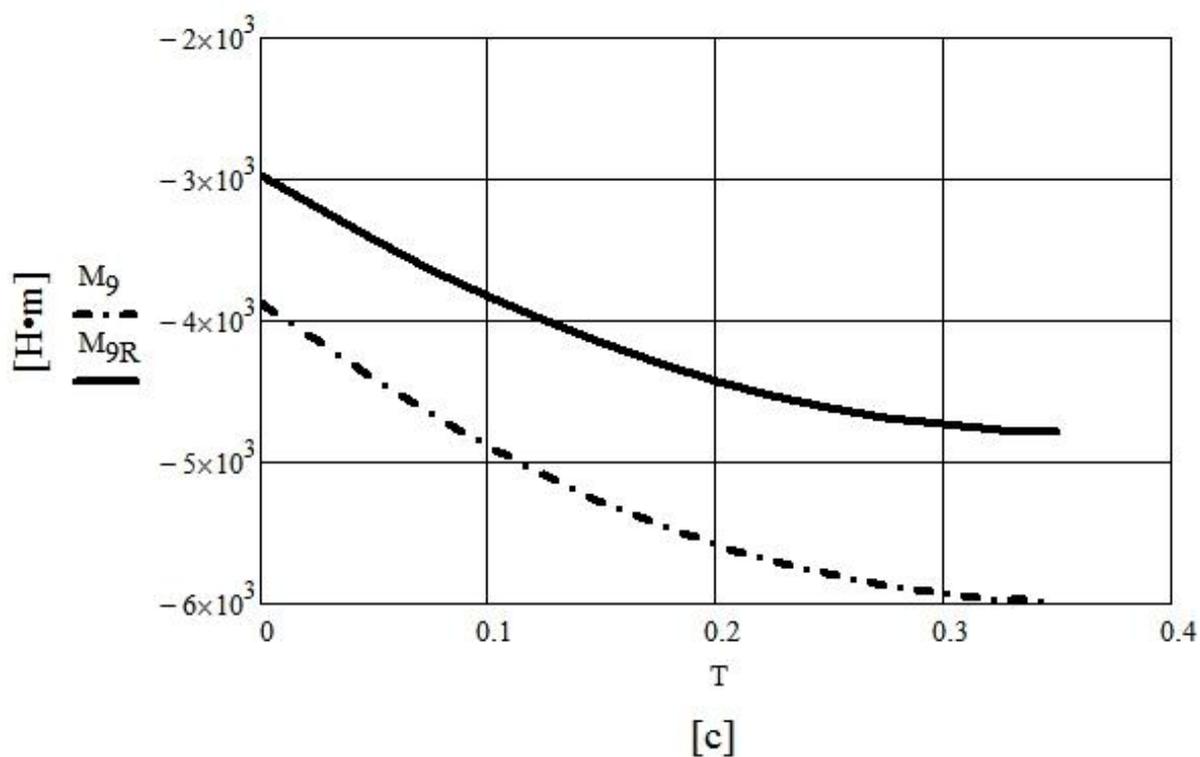


Рис. 12. Зависимость момента в сочленении 9 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

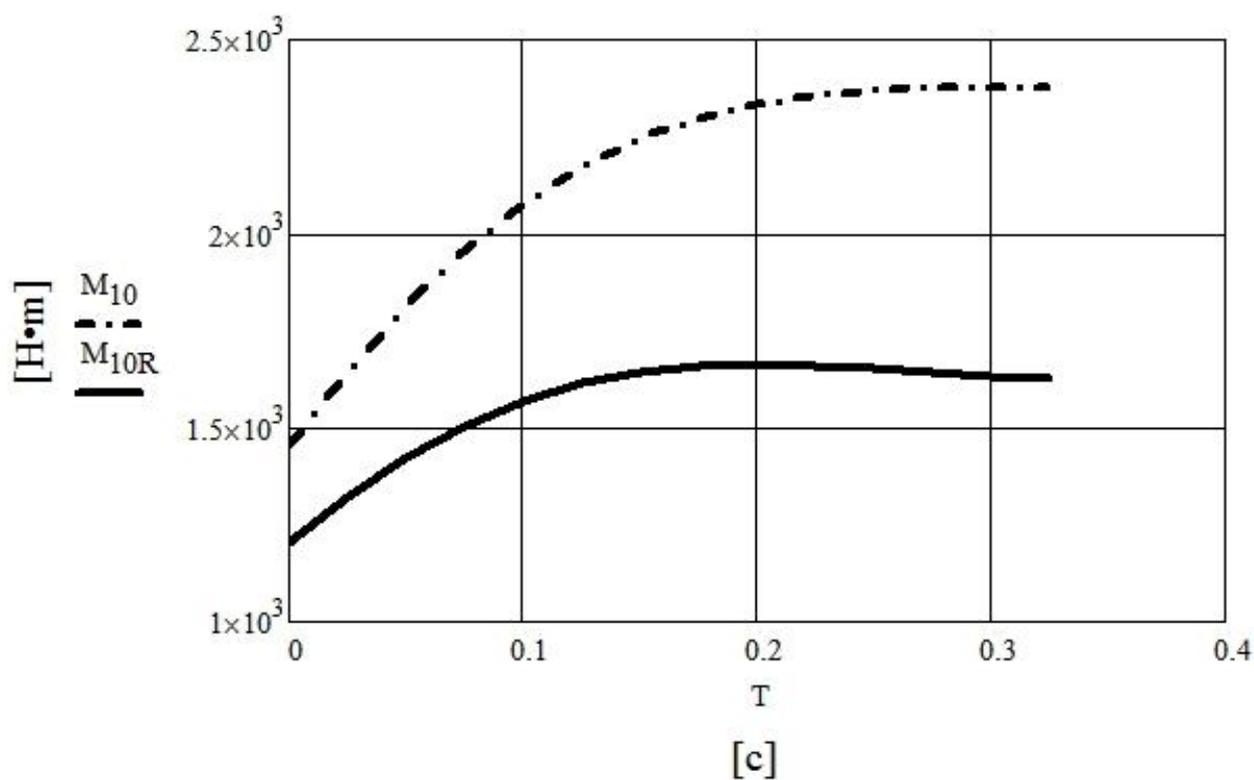


Рис. 13. Зависимость момента в сочленении 10 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

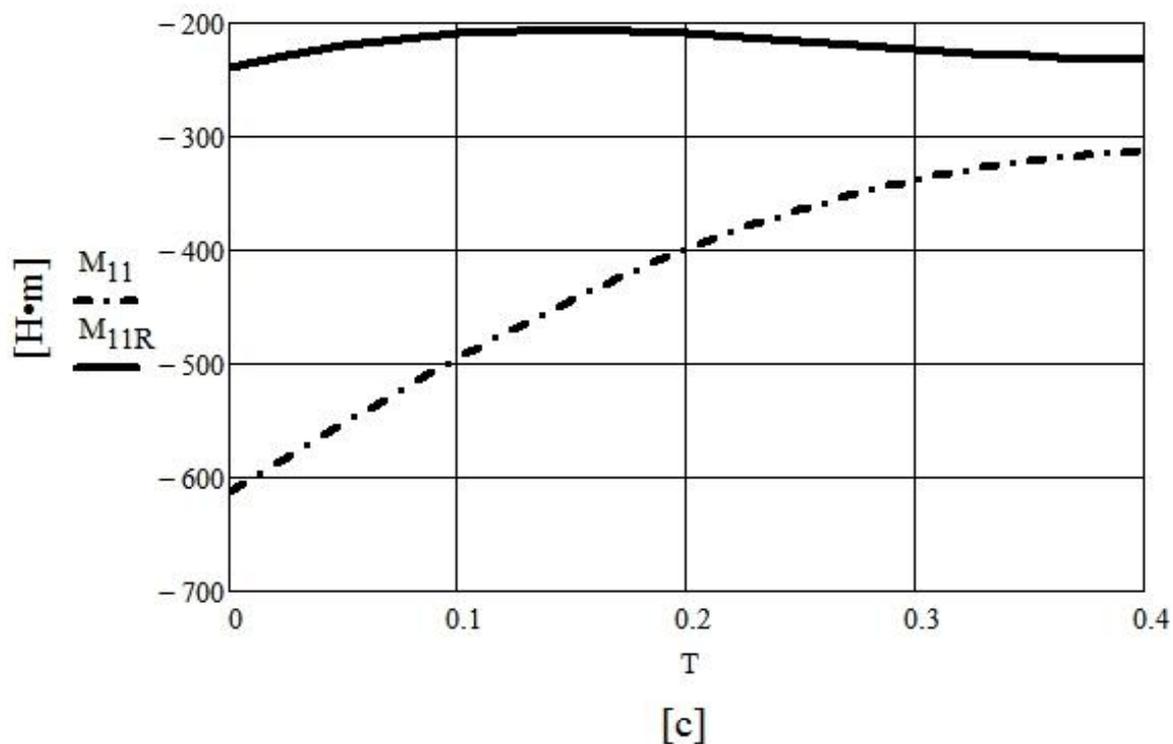


Рис. 14. Зависимость момента в сочленении 11 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

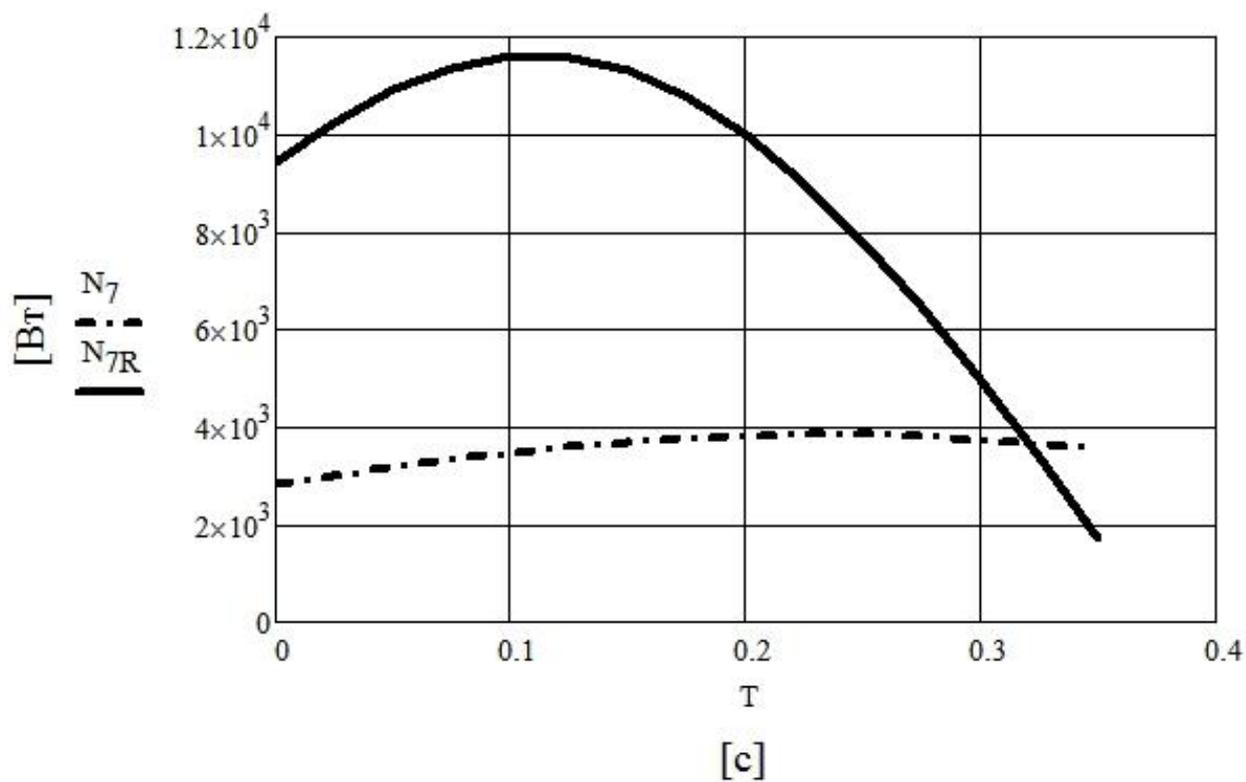


Рис. 15. Зависимость мощности в сочленении 7 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

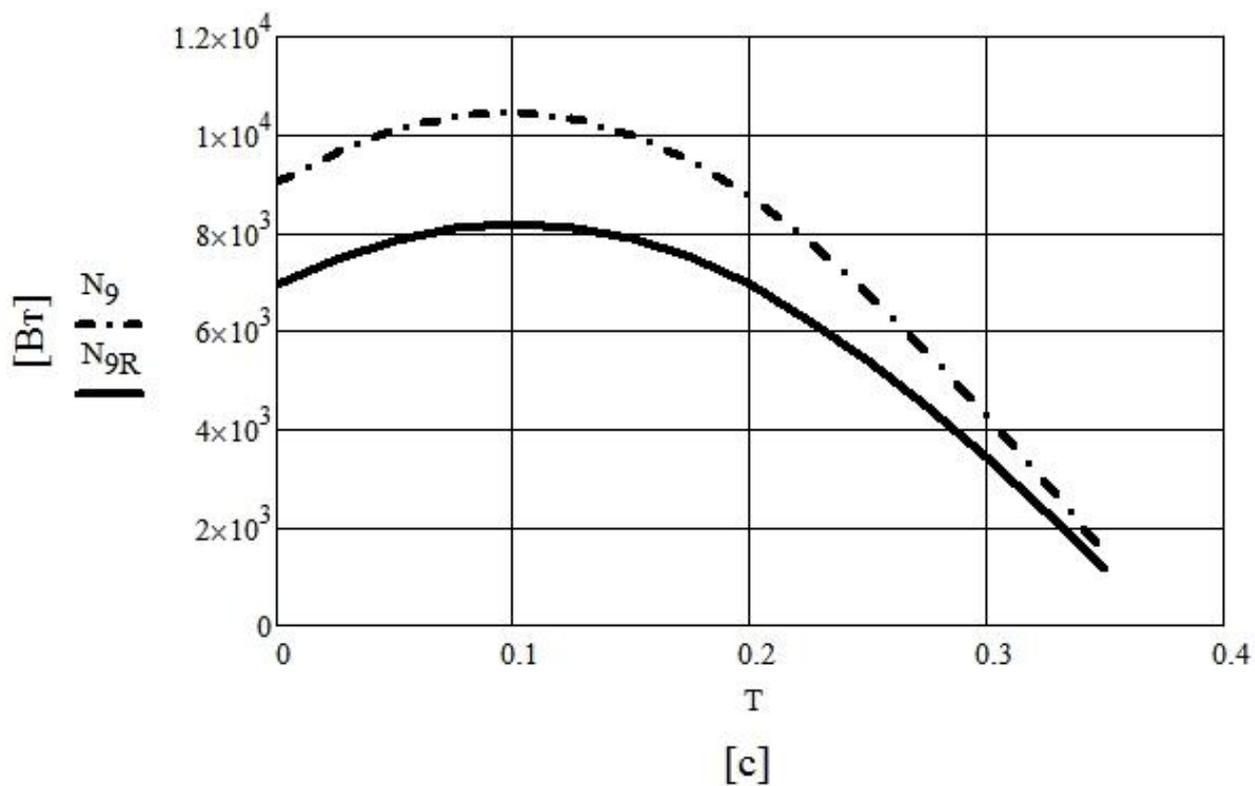


Рис. 16. Зависимость мощности в сочленении 9 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

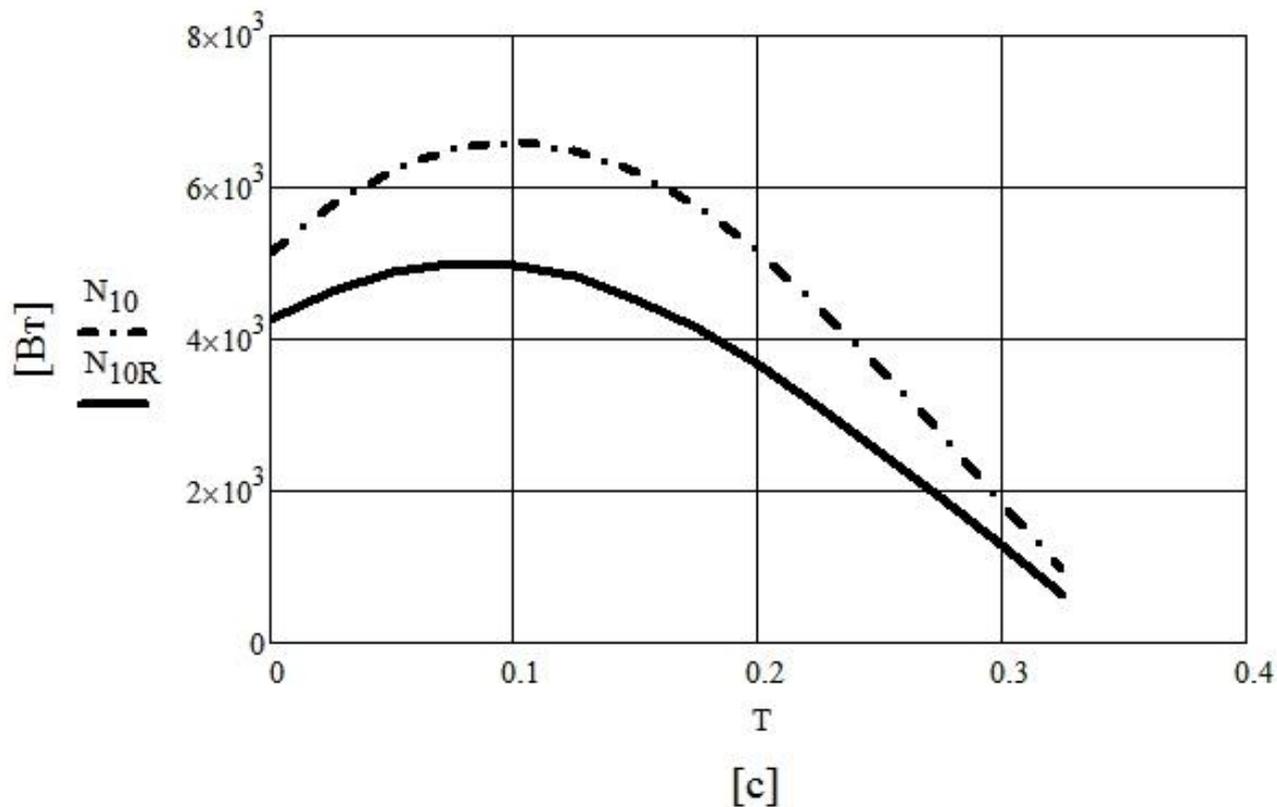


Рис. 17. Зависимость мощности в сочленении 10 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

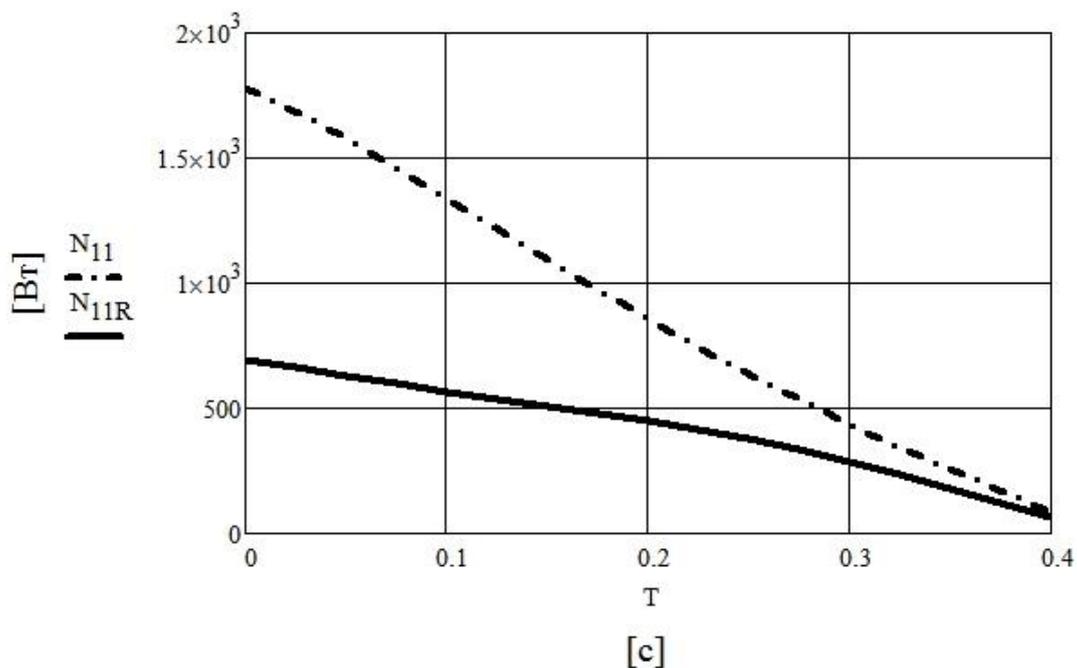


Рис. 18. Зависимость мощности в сочленении 11 от времени без учёта и с учётом реакции опоры

На рис. 19 приведён график суммарной мощности, развиваемой в сочленениях ИМ экзоскелета как без учёта, так и с учётом реакции опоры. Критерий минимальной суммарной (затрачиваемой) мощности может служить одним из базовых критериев при оценке конструкции.

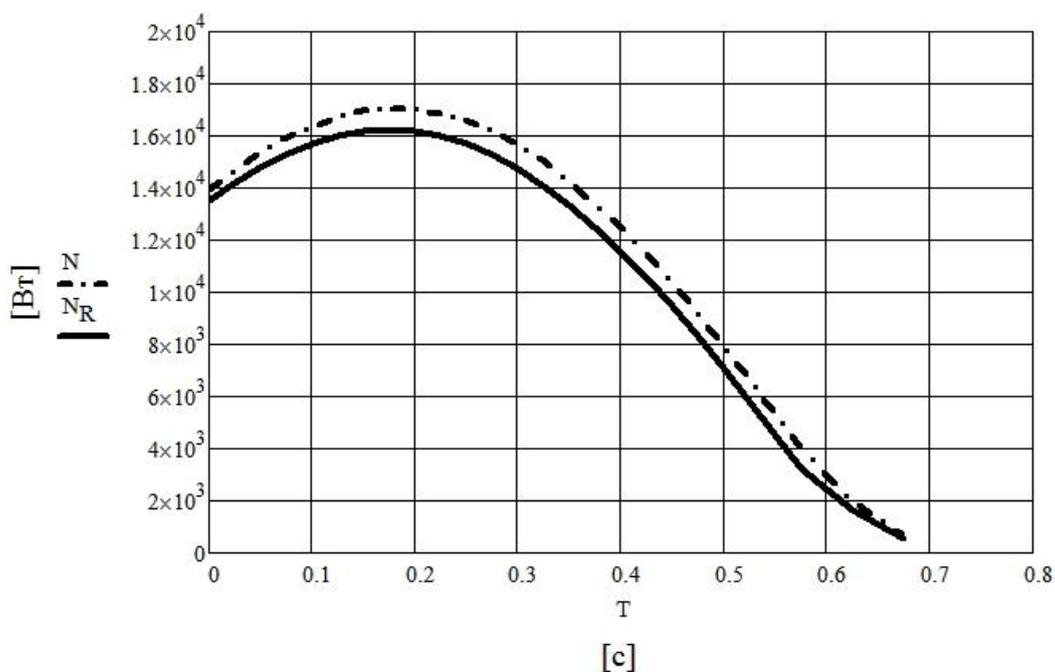


Рис. 19. Зависимость суммарной мощности в сочленении ИМ экзоскелета без учёта и с учётом реакции опоры

Как видно из приведённых рисунков, часто учёт реакций опоры приводит к уменьшению значений моментов и мощностей в сочленениях, что может быть объяснено разнонаправленностью сил тяжести и реакции опоры.

Заключение

Одним из критических параметров экзоскелета является потребляемая мощность, которая, в свою очередь, определяет степень его автономности. Стремление к уменьшению потребляемой мощности заставляет разработчиков проектировать компактные силовые установки, исследовать различные виды приводов и способы энергоэффективного управления ими. Очевидна необходимость применения методов, позволяющих оперативно определять энергетические параметры ИМ как функцию от множества факторов (кинематической схемы, конструкции, грузоподъёмности, законов управления и т.д.).

Предложенный метод расчёта энергетических параметров экзоскелета, используемый совместно с описанным в работах [22, 23] методом синтеза кинематической схемы ИМ экзоскелета, позволяет на протяжении всего процесса разработки изделия, начиная с этапа эскизного проектирования, когда возможно оперативное изменение принятых решений, с минимальными трудозатратами прогнозировать энергетические характеристики приводов, отслеживать влияние изменений, вносимых в ИМ, и оценивать различные варианты конструкции.

Представленные в настоящей статье результаты являются основой дальнейших исследований, направленных на создание экзоскелета.

Список литературы

1. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics // In: Monograph of ANS: Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications. Vol. 2. Belgrade, 2008. P. 329-348.
2. Hanlon M. Raytheon XOS 2: second generation exoskeleton. Second-Generation Robotics Suit, United States of America // Gizmag: website. Режим доступа: www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479 (дата обращения 20.10.2014).
3. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton // ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control. 2005. Vol. 128, is. 1. P. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)

4. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) // The International Journal of Robotics Research. 2006. Vol. 25, no. 5-6. P. 561-573. DOI: [10.1177/0278364906065505](https://doi.org/10.1177/0278364906065505)
5. Sankai Y. HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernetics // Sankai Laboratory. Cybernetics Group : website. Режим доступа: http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf (дата обращения 20.10.14).
6. Raade J.M., Amundson K.R., Kazerooni H. Development of Hydraulic-Electric Power Units for Mobile Robots // Proceedings of IMECE 2005. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (5-11 November, 2005, Orlando, Florida USA). ASME, 2005. Paper no. IMECE2005-80138. P. 27-34. DOI: [10.1115/IMECE2005-80138](https://doi.org/10.1115/IMECE2005-80138)
7. Raade J.M., Kazerooni H., McGee T.G. Analysis and Design of a Novel Power Supply for Mobile Robots // Proceedings of IEEE 2004. International Conference on Robotics & Automation (April, 2005, New Orleans, LA USA). Vol. 5. IEEE Publ., 2004. P. 4911-4917. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1302496](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302496)
8. Barth E.J, Riofrio J.A. Design of a Free Piston Pneumatic Compressor as a Mobile Robot Power Supply // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (18-22 April, 2005, Barcelona, Spain). IEEE Publ., 2005. P. 235-240. DOI: [10.1109/ROBOT.2005.1570125](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570125)
9. Riofrio J.A., Barth E.J. A Free Piston Compressor as a Pneumatic Mobile Robot Power Supply: Design, Characterization and Experimental Operation // International Journal of Fluid Power. 2007. Vol. 8, no. 1. P. 17-28.
10. Amundson K.R., Raade J.M., Harding N., Kazerooni H. Hybrid Hydraulic-Electric Power Unit for Field and Service Robots // 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2-6 August, 2005, Shaw Convention Center, Edmonton, AB, Canada). IEEE Publ., 2005. P. 3453-3458. DOI: [10.1109/IROS.2005.1545452](https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545452)
11. Воробьев Е.И., Скворчевский А.К., Сергеев А.М. Проблемы создания алгоритмов управления антропоморфными биопротезами рук и ног // Медицина и высокие технологии. 2012. № 1. С. 7-12.
12. Скворчевский А.К., Воробьев Е.И., Скворчевский К.А. Концепция развития технических средств реабилитации (ТСР) людей с ограниченными физическими возможностями на основе антропоморфных биопротезов рук // Медицина и высокие технологии. 2012. № 2. С. 7-22.
13. Скворчевский А.К., Воробьев Е.И., Скворчевский К.А., Сергеев А.М., Акентьев А.А., Ковалев Н.С. Технические средства реабилитации (ТСР) на основе антропоморфных биопротезов рук и ног // Информатизация и связь. 2013. № 4. С. 43-58.
14. Верейкин А.А. Расчёт исполнительных гидроцилиндров экзоскелета // Молодёжный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2013. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> (дата обращения 20.10.2014).

15. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18, № 2. С. 208-225.
16. Ковальчук А.К., Семенов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Д.Б., Верейкин А.А., Яроц В.В. Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-треножника // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 10. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/654481.html> (дата обращения (20.10.2014)).
17. Ковальчук А.К., Верейкин А.А., Каргинов Л.А., Цепкова А.А. Проектирование и расчёт мощности приводов медицинского робота с учётом динамики его исполнительного механизма // XII Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективы развития» (25.02.2014): матер. М.: "Спутник +", 2014. С. 28-41.
18. Ковальчук А.К., Ромашко А.М., Верейкин А.А., Каргинов Л.А., Малякина Е.А., Стаitiva В.А. Кинематический и динамический анализ исполнительного механизма шестиногого шагающего робота // XIV Международная научно-практическая конференция «Современное состояние естественных и технических наук» (14.03.2014): матер. М.: "Спутник +", 2014. С. 60-79.
19. Ковальчук А.К. Выбор кинематической структуры и исследование древовидного исполнительного механизма робота-собаки // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 8. С. 65-73.
20. Ковальчук А.К. Проектирование и исследование динамики древовидного исполнительного механизма шестиногого шагающего робота // Естественные и технические науки. 2014. № 4 (72). С. 104-110.
21. Kovalchuk A.K. Designing drives of a medical robot actuator // Life Science Journal. 2014. № 11 (11s). P. 337-340.
22. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Синтез кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета // XIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки» (25.04.2014): матер. М.: «Спутник +», 2014. С. 68-76.
23. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2014. № 7. С. 72-93. DOI: [10.7463/0714.0717676](https://doi.org/10.7463/0714.0717676)
24. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Динамика исполнительного механизма экзоскелета // XIII Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективы развития» (26.05.2014): матер. М.: «Спутник +», 2014. С. 5-16.

25. Ковальчук А.К. Метод синтеза древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов // Естественные и технические науки. 2014. № 3 (71). С. 127-130.
26. Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices // J. Appl. Mech. 1955. Vol. 77. P. 215-221.
27. Ковальчук А.К., Кулаков Б.Б., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В. Основы теории исполнительных механизмов шагающих роботов. М.: Изд-во Рудомино, 2010. 170 с.
28. Ковальчук А.К. Метод математического описания кинематики и динамики древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов // Естественные и технические науки. 2014. № 5 (73). С. 87-90.
29. Ковальчук А.К., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В., Верейкин А.А. Моделирование древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов с учётом внешних наложенных связей: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2014612547 от 28.02.2014.
30. Ковальчук А.К., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В. Программа моделирования древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012610398. 10.01.2012.
31. Алексеев В.Е., Таланов В.А. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. М.: Изд-во Бином, 2006. 319 с.

The Lower Extremities Exoskeleton Actuator Dynamics Research Taking into Account Support Reaction

A. A. Vereikin^{1,*}, A.K. Kovalchuk¹,
L.A. Karginov¹

[*aautres@gmail.com](mailto:aautres@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: robotics, tree-like kinematic structure, drive design, exoskeleton, human-machine, dynamic equation of robot, dynamics analysis, mathematical simulation

The article shows high relevance of research, aimed at the robotic exoskeleton creation. It defines some problems related to the process of their designing; including a lack of power supply to provide enough autonomy, and difficulties of man-machine complex control. There is a review of literature on the walking robots with tree-like kinematic structure development. This work reflects the continuing investigations, currently conducted by the authors, and relies heavily on the results of previous works, devoted to this subject.

The article presents the exoskeleton dynamics equation, taking into account the impact of external forces and torques, as well as external relations imposed. Using a model of lower extremities exoskeleton developed in SolidWorks software complex, baricentric parameters of the actuator links were found. The different types of movements, committed due to harmonic changes of generalized coordinates in exoskeleton degrees of mobility, equipped with electrohydraulic actuators, were analyzed. The laws of generalized coordinate changes in time, corresponding to the worst case loading, were found. All the necessary input data for the exoskeleton dynamics equation solution were determined.

The numerical values of all components of the dynamics equation were obtained as result of the dynamics equation simulation. In this case, the exoskeleton actuator load capacity was assumed to be 50 kg. The article shows dependences of torque and power in the actuator degrees of mobility on the time, as well as a curve of total capacity of all drives both, ignoring and taking into consideration the support surface reactions. Obtained dependences are the initial data for the calculation of the drive system.

The proposed method for determination of exoskeleton energy parameters allows developer to perform a prompt evaluation of various options for the actuator design in accordance with the selected criteria. As a main evaluation criterion, a minimum consumed power is offered to choose. This, under otherwise equal conditions, provides a maximum autonomy for the projectable exoskeleton.

References

1. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotic. In: *Monograph of ANS: Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications. Vol. 2.* Belgrade, 2008, pp. 329-348.
2. Hanlon M. *Raytheon XOS 2: second generation exoskeleton.* Second-Generation Robotics Suit, United States of America. Gizmag: website. Available at: www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479 , accessed 20.10.2014.
3. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton. *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control*, 2005, vol. 128, is. 1, pp. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)
4. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*, 2006, vol. 25, no. 5-6, pp. 561-573. DOI: [10.1177/0278364906065505](https://doi.org/10.1177/0278364906065505)
5. Sankai Y. *HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics.* Sankai Laboratory. Cybernics Group : website. Available at: http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf , accessed 20.10.14.
6. Raade J.M., Amundson K.R., Kazerooni H. Development of Hydraulic-Electric Power Units for Mobile Robots. *Proceedings of IMECE 2005. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 5-11 November, 2005, Orlando, Florida USA). ASME, 2005, paper no. IMECE2005-80138, pp. 27-34. DOI: [10.1115/IMECE2005-80138](https://doi.org/10.1115/IMECE2005-80138)
7. Raade J.M., Kazerooni H., McGee T.G. Analysis and Design of a Novel Power Supply for Mobile Robots. *Proceedings of IEEE 2004 International Conference on Robotics and Automation*, April, 2005, New Orleans, LA USA. Vol. 5. IEEE Publ., 2004, pp. 4911-4917. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1302496](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302496)
8. Barth E.J, Riofrio J.A. Design of a Free Piston Pneumatic Compressor as a Mobile Robot Power Supply. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 18-22 April, 2005, Barcelona, Spain. IEEE Publ., 2005, pp. 235-240. DOI: [10.1109/ROBOT.2005.1570125](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570125)
9. Riofrio J.A., Barth E.J. A Free Piston Compressor as a Pneumatic Mobile Robot Power Supply: Design, Characterization and Experimental Operation. *International Journal of Fluid Power*, 2007, vol. 8, no. 1, pp. 17-28.
10. Amundson K.R., Raade J.M., Harding N., Kazerooni H. Hybrid Hydraulic-Electric Power Unit for Field and Service Robots. *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2-6 August, 2005, Shaw Convention Center, Edmonton, AB, Canada. IEEE Publ., 2005, pp. 3453-3458. DOI: [10.1109/IROS.2005.1545452](https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545452)
11. Vorob'ev E.I., Skvorchevskiy A.K., Sergeev A.M. The development of dynamic models and control algorithms bioprostheses anthropomorphic hands and legs. *Meditcina i vysokie tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 7-12. (in Russian).

12. Skvorchevskiy A.K., Vorob'ev E.I., Skvorchevskiy K.A. The concept of the development of technical means of rehabilitation people with disabilities on the basis of anthropomorphic hands bioprotheses. *Meditcina i vysokie tekhnologii*, 2012, no. 2, pp. 7-22. (in Russian).
13. Skvorchevskiy A.K., Vorob'ev E.I., Skvorchevskiy K.A., Sergeev A.M., Akent'ev A.A., Kovalev N.S. Technical devices of rehabilitation (TDR) on the basis of anthropomorphic prosthetic hands and feet. *Informatizatsiya i svyaz'*, 2013, no. 4, pp. 43-58. (in Russian).
14. Vereikin A.A. Calculation of actuating hydraulic cylinders of exoskeleton. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> , accessed 20.10.2014. (in Russian).
15. Lavrovskiy E.K., Pis'mennaya E.V. On the lower limb exoskeleton regular locomotion under input control deficit. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 208-225. (in Russian).
16. Koval'chuk A.K., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov D.B., Vereikin A.A., Yarots V.V. Choice of kinematic structure and study of dynamics of tree-like actuator of robot-tripod. *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/654481.html> , accessed 20.10.2014. (in Russian).
17. Koval'chuk A.K., Vereykin A.A., Karginov L.A., Tsepkova A.A. Design and calculation of power of drives of medical robot taking into account the dynamics of its actuator. *12 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Tekhnika i tekhnologiya: novye perspektivy razvitiya" (25.02.2014): mater.* [Proc. of the 12 International Scientific-Practical Conference "Engineering and technology: new prospects of development" (25.02.2014)]. Moscow, "Sputnik+" Publ., 2014, pp. 28-41. (in Russian).
18. Koval'chuk A.K., Romashko A.M., Vereykin A.A., Karginov L.A., Malyakina E.A., Stativa V.A. Kinematic and dynamic analysis of actuator of six-legged walking robot. *14 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk" (14.03.2014): mater.* [Proc. of the 14 International Scientific-Practical Conference "The current state of natural sciences and engineering" (14.03.2014)]. Moscow, "Sputnik+" Publ., 2014, pp. 60-79. (in Russian).
19. Koval'chuk A.K. Choice of a kinematic structure and reseach of a "Robot-dog" tree-like actuator. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 8, pp. 65-73. (in Russian).
20. Koval'chuk A.K. Design and investigation of the dynamics of tree-like actuator of six-legged walking robot. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 4 (72), pp. 104-110. (in Russian).
21. Kovalchuk A.K. Designing drives of a medical robot actuator. *Life Science Journal*, 2014, no. 11 (11s), pp. 337-340.
22. Vereikin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov B.B., Yarots V.V. Synthesis kinematic scheme of the actuating mechanism of the exoskeleton. *13*

- Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Aktual'nye voprosy nauki" (25.04.2014): materialy* [Proc. of the 13 International Scientific-Practical Conference "Actual Problems of Science" (25.04.2014)]. Moscow, "Sputnik+" Publ., 2014, pp. 68-76. (in Russian).
23. Vereikin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Analysis and Choice of the Exoskeleton's Actuator Kinematic Structure. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 7, pp. 72-93. DOI: [10.7463/0714.0717676](https://doi.org/10.7463/0714.0717676) (in Russian).
 24. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov B.B., Yarots V.V. Dynamics of actuator of exoskeleton. *13 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Tekhnika i tekhnologiya: novye perspektivy razvitiya" (26.05.2014): mater.* [Proc. of the 13 International Scientific-Practical Conference "Engineering and technology: new prospects of development" (26.05.2014)]. Moscow, "Sputnik+" Publ., 2014, pp. 5-16. (in Russian).
 25. Koval'chuk A.K. Method for the synthesis of tree-like actuators of walking robots. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 3 (71), pp. 127-130. (in Russian).
 26. Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *J. Appl. Mech.*, 1955, vol. 77, pp. 215-221.
 27. Koval'chuk A.K., Kulakov B.B., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V. *Osnovy teorii ispolnitel'nykh mekhanizmov shagayushchikh robotov* [Fundamentals of the theory of actuators of walking robots]. Moscow, Rudomino Publ., 2010. 170 p. (in Russian).
 28. Koval'chuk A.K. Method of mathematical description of the kinematics and dynamics of tree-like actuators of walking robots. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 5 (73), pp. 87-90. (in Russian).
 29. Koval'chuk A.K., Karginov L.A., Kulakov B.B., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V., Vereykin A.A. *Modelirovanie drevovidnykh ispolnitel'nykh mekhanizmov shagayushchikh robotov s uchetom vneshnikh nalozhennykh svyazey* [Simulation of treelike actuators of walking robots, taking into account external imposed external relations]. Certificate of state registration of computer program, no. 2014612547 RF, 2014. (in Russian).
 30. Koval'chuk A.K., Karginov L.A., Kulakov B.B., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V. *Programma modelirovaniya drevovidnykh ispolnitel'nykh mekhanizmov shagayushchikh robotov* [Simulation program of tree-like actuators of walking robots]. Certificate of state registration of computer program, no. 2012610398 RF, 2012. (in Russian).
 31. Alekseev V.E., Talanov V.A. *Grafy i algoritmy. Struktury dannykh. Modeli vychisleniy* [Graphs and algorithms. Data structures. Models of computation]. Moscow, Binom Publ., 2006. 319 p. (in Russian).