

Л.Ю. ВОРОЧАЕВА, А.С. ЯЦУН, С.Ф. ЯЦУН
**УПРАВЛЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ХОДЬБОЙ
ЭКЗОСКЕЛЕТА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Управление квазистатической ходьбой экзоскелета на основе экспертной системы.

Аннотация. В статье рассматриваются экспертная система и алгоритм управления квазистатической ходьбой экзоскелета, гарантирующие устойчивость устройства в вертикальном положении; на их основе проводится математическое моделирование движения объекта. В работе предложена расчетная схема устройства в виде одиннадцатизвенного механизма, звенья которого соединены между собой однокоординатными цилиндрическими шарнирами, описано движение экзоскелета в сагитальной и фронтальной плоскостях, определено положение центра масс, координаты которого изменяются в зависимости от положения ног и корпуса. Разработаны логические правила, образующие экспертную систему и обеспечивающие устойчивую походку экзоскелета за счет расположения его центра масс внутри опорной площадки. Получены результаты численного моделирования шага системы на специально разработанном виртуальном симуляторе.

Ключевые слова: экзоскелет нижних конечностей, экспертная система, пространственный многозвенный механизм, центр масс, система управления, устойчивость, опорная площадка, область вертикального равновесия.

1. Введение. Общие вопросы моделирования походки антропоморфных шагающих роботов и управления движением их звеньев рассматривались во многих работах [1-6]. В последние годы интерес к этой теме возрос в связи с созданием целого ряда экзоскелетов, позволяющих человеку передвигаться в пространстве. Так в [7] описывается одноопорная и двухопорная ходьба человека в экзоскелете нижних конечностей, получены зависимости угла наклона корпуса, обеспечивающие желаемое качество движения, выработаны аналитические законы управления устройством. В [8] рассматривается нейросетевое управление пространственным движением двуногого робота, состоящего из пяти звеньев (двух ног, рук и корпуса). Методика формирования траектории движения двуногого шагающего робота в режиме динамической ходьбы, при которой траектория описывается кусочными функциями, представлена в [9]. Другой способ управления антропоморфным роботом предложен в [10], где описывается разработка алгоритмов и последующее моделирование ходьбы двуногого робота с использованием методов траекторного планирования и согласованного управления. Работы [11-15] посвящены вопросам управления шагающими системами во время реализации разных походок. В статьях [16-19] для экзоскелета нижних конечностей, исследование которого проводится в данной работе, рассмотрены режимы вставания и посадки

на стул, приведены особенности управления движением устройства во время реализации походки.

В данной статье рассматривается пространственное движение экзоскелета нижних конечностей, который представлен в виде одиннадцатизвенного механизма, чьи звенья соединены между собой цилиндрическими шарнирами, оси которых направлены вдоль двух взаимно перпендикулярных осей. Целью данной работы является разработка логических и геометрических условий, образующих экспертную систему управления квазистатической походкой экзоскелета, которая обеспечивает реализацию шага в области вертикального равновесия за счет расположения центра масс объекта в пределах опорной площадки [19, 20].

2. Математическая модель шага экзоскелета. В работе рассматривается экзоскелет нижних конечностей во время реализации квазистатической походки. Движение происходит по шероховатой поверхности. Условием правильной реализации шага является расположение центра масс устройства в пределах опорной площадки [19, 20]. Для однозначности результатов исследования введем абсолютную систему координат $Oxyz$. В соответствии с расчетной схемой рисунка 1 будем считать, что все звенья являются стержнями, причем стопа, корпус и бедро моделируются несколькими взаимно перпендикулярными стержнями, что более наглядно показано на рисунке 2. Положим, что массами m_i обладают только основные звенья $i=1-7$, масса остальных звеньев мала по сравнению с указанными, поэтому ею пренебрегается, причем центры масс звеньев 1-7 совпадают с центрами симметрии стержней l_1-l_7 . Для удобства исследования будем считать, что движение системы происходит вдоль оси Ox , и рассмотрим шаг объекта в сагитальной и фронтальной плоскостях [20]. Это позволит оценивать ориентацию экзоскелета в пространстве относительно оси движения, в частном случае совпадающей с осью неподвижной системы координат.

При этом примем допущения, что при рассмотрении устройства в сагитальной плоскости дополнительные звенья 9 и 10 будут относиться к звену 4 (корпус), звено 8 к звену 1 (правая стопа), а звено 11 к звену 7 (левая стопа), а во фронтальной звено 9 будет считаться принадлежащим звену 3 (бедро правой ноги), звено 10 — звену 5 (бедро левой ноги), звено 11 — звену 6 (голень левой ноги), а звено 8 — звену 2 (голень правой ноги). Таким образом, в каждой из двух плоскостей будем иметь семизвенный механизм с образующими цепочку при помощи цилиндрических шарниров звеньями, оси которых перпендикулярны рассматриваемым плоскостям l .

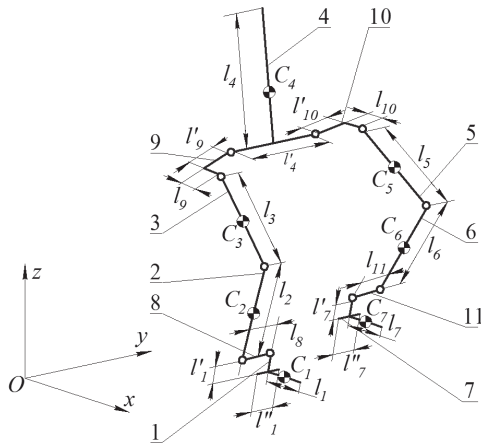


Рис.1. Расчетная схема экзоскелета нижних конечностей

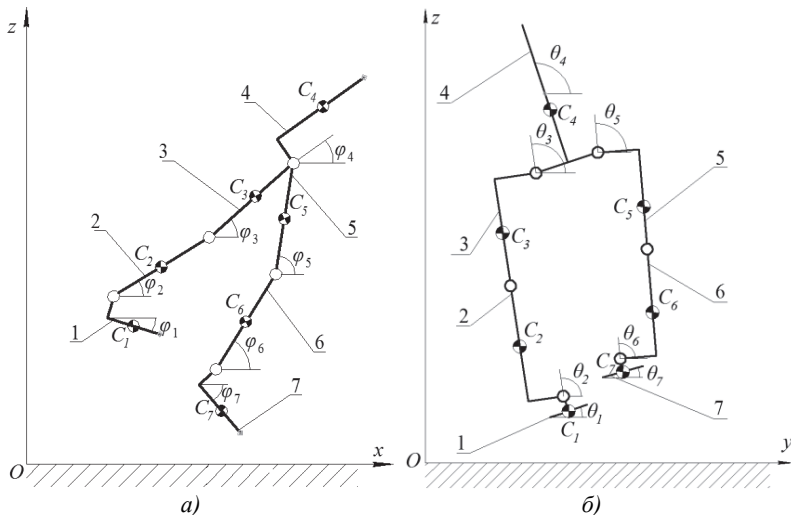


Рис. 2. Проекция устройства: а — в сагиттальной плоскости, б — во фронтальной плоскости

Положение механизма в неподвижной системе координат однозначно определяется проекциями положения центра масс устройства x_C , y_C , z_C и углами φ_i наклона звеньев $i=1-7$ к оси Ox , а также углами θ_i к оси Oy . Углы отсчитываются против часовой стрелки от положительного направления оси Ox и Oy соответственно. В связи с тем, что во фронтальной плоскости звенья 2 и 3 правой и звенья 5 и 6 левой ноги располагаются под одними и теми же углами $\theta_2=\theta_3$, $\theta_5=\theta_6$, то

в качестве обобщенных координат будем рассматривать два из перечисленных углов: θ_2 и θ_6 . Тогда вектор обобщенных координат будет иметь вид:

$$\vec{q} = (x_C \ y_C \ z_C \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4 \ \varphi_5 \ \varphi_6 \ \varphi_7 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_4 \ \theta_6 \ \theta_7)^T. \quad (1)$$

Для определения координат центра масс устройства будем рассматривать его проекции в сагитальной и фронтальной плоскостях при условии, что на положение звеньев в одной из рассматриваемых плоскостей не оказывает влияние их положение во второй, то есть углы φ_i и θ_i независимы друг от друга однозначно определяют координаты точки C в сагитальной (x_C, z_C) и фронтальной (y_C) плоскостях. Это допустимо только в том случае, когда углы φ_1, φ_7 малы, то есть во время шага стопы можно считать расположенными параллельно поверхности, а углы θ_2, θ_6 близки к 90° , то есть левая и правая ноги почти не отклоняются от вертикали во фронтальной плоскости.

Тогда вектор обобщенных координат в каждой из плоскостей будет иметь следующий вид.

В сагитальной плоскости:

$$\vec{q}_{Oxz} = (x_C \ z_C \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4 \ \phi_5 \ \phi_6 \ \phi_7)^T. \quad (2)$$

Во фронтальной плоскости:

$$\vec{q}_{Oyz} = (y_C \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_4 \ \theta_6 \ \theta_7)^T. \quad (3)$$

Положение центра масс экзоскелета в каждой из рассматриваемых плоскостей определим по формуле

$$\vec{r}_C = \sum_{i=1-7} m_i \vec{r}_i / \sum_{i=1-7} m_i, \quad (4)$$

где \vec{r}_C — радиус-вектор центра масс системы, \vec{r}_i — радиус-векторы центров масс звеньев $i=1-7$.

Формулы для определения координат центра масс зависят от того, какой ногой осуществляется шаг.

$$x_C, y_C, z_C = \begin{cases} x_{CR}, y_{CR}, z_{CR}, & (z_{C1} \neq 0) \wedge (z_{C7} = 0) \\ x_{CL}, y_{CL}, z_{CL}, & (z_{C1} = 0) \wedge (z_{C7} \neq 0) \end{cases}, \quad (5)$$

где x_{CR}, y_{CR}, z_{CR} — координаты точки C при шаге правой ногой, x_{CL}, y_{CL}, z_{CL} — координаты точки C при шаге левой ногой, z_{C1}, z_{C7} — аппликаты центров масс стоп (точек C_1 и C_7).

При шаге левой ногой координаты центров масс всех звеньев и центра масс объекта определяются исходя из радиус-вектора центра масс звена 1 (стопы правой ноги), а при шаге правой ногой в формулах проекций всех центров масс используются координаты центра масс звена 7 (стопы левой ноги), то есть расчеты проводятся от звена, взаимодействующего во время шага с поверхностью. Проекция центра масс на оси абсолютной системы координат имеют следующий вид:

$$x_{CL(R)} = [a_x + a_{x\varphi 2(6)} \cos \varphi_{2(6)} + a_{x\varphi 3(5)} \cos \varphi_{3(5)} + a_{x\varphi 4} \cos \varphi_4 + a_{x\varphi 5(3)} \cos \varphi_{5(3)} + a_{x\varphi 6(2)} \cos \varphi_{6(2)} + a_{x\varphi 7(1)} \cos \varphi_{7(1)} + b_{x\varphi 4} \sin \phi_4 + b_{x\varphi 7(1)} \sin \varphi_{7(1)}] / \sum_{i=1-7} m_i; \quad (6)$$

$$y_{CL(R)} = [a_y + a_{\theta 2(6)} \cos \theta_{2(6)} + a_{\theta 4} \cos \theta_4 + a_{\theta 6(2)} \cos \theta_{6(2)} + b_{\theta 2(6)} \sin \theta_{2(6)} + b_{\theta 4} \sin \theta_4 + b_{\theta 6(2)} \sin \theta_{6(2)} + b_{\theta 7(1)} \sin \theta_{7(1)}] / \sum_{i=1-7} m_i; \quad (7)$$

$$z_{CL(R)} = [a_z + a_{z\varphi 4} \cos \varphi_4 + a_{z\varphi 7(1)} \cos \varphi_{7(1)} + b_{z\varphi 2(6)} \sin \varphi_{2(6)} + b_{z\varphi 3(5)} \sin \varphi_{3(5)} + b_{z\varphi 4} \sin \varphi_4 + b_{z\varphi 5(3)} \sin \varphi_{5(3)} + b_{z\varphi 6(2)} \sin \varphi_{6(2)} + b_{z\varphi 7(1)} \sin \varphi_{7(1)}] / \sum_{i=1-7} m_i, \quad (8)$$

где a_x , a_y , a_z — коэффициенты при свободных членах, $a_{x\varphi i}$, $a_{\theta i}$, $a_{z\varphi i}$ — коэффициенты при косинусах углов, $b_{x\varphi i}$, $b_{\theta i}$, $b_{z\varphi i}$ — коэффициенты при синусах углов. В приведенных формулах в скобках указаны индексы углов, используемые при шаге правой ногой.

3. Описание походки экзоскелета. Рассмотрим пример реализации экзоскелетом последовательности четырех шагов, представленных на рисунках 3 и 4.

Согласно рисунку 3, движение начинается из положения, когда ноги соединены вместе, голени и бедра расположены перпендикулярно поверхности, корпус расположен под углом, обеспечивающим устойчивое положение системы, x_0 — расстояние от начала координат до пятки опорной стопы (рисунок 3а). Первый шаг осуществляется правой ногой, длина шага равна $L=L_0/2$, где L_0 — длина двойного шага, в конечном положении левая и правая ноги образуют равнобедренный треугольник, корпус устройства перпендикулярен поверхности (рисунок 3б). Для реализации второго шага правая нога становится опорной, левая переносится вперед на расстояние $L=L_0$, конечное положение этого шага аналогично рассмотренному ранее (рисунок 3в).

Третий шаг полностью повторяет второй с той лишь разницей, что он осуществляется правой, а не левой ногой (рисунок 3г). Во время четвертого шага левая нога переносится вперед на расстояние $L=L_0/2$, объект занимает положение, аналогичное начальному (рисунок 3д). Таким образом, устройство совершает шаг длиной L , высота шага при этом равна H . Под L понимается расстояние, пройденное за один шаг «пяткой» стопы, а H представляет собой наибольшее расстояние, на которое поднимается стопа.

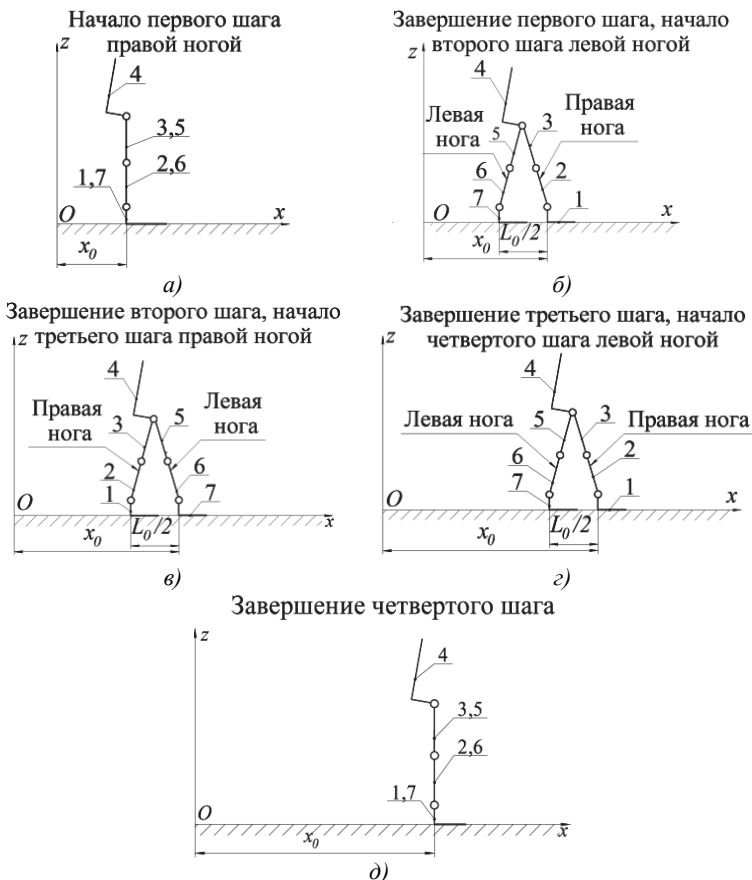


Рис. 3. Последовательность шагов экзоскелета в сагиттальной плоскости: а — начало первого шага правой ногой; б — завершение первого шага, начало второго шага левой ногой; в — завершение второго шага, начало третьего шага правой ногой; г — завершение третьего шага, начало четвертого шага левой ногой; д — завершение четвертого шага

Во время каждого шага при рассмотрении экзоскелета в сагиттальной плоскости устройство занимает несколько характерных положений, в которых значения высоты и длины шага определены однозначно (таблица 1), помимо этого на звенья системы наложены ограничения: $\varphi_1 = \varphi_7 = 0$; $\varphi_3 - \varphi_2 \geq 0$; $\varphi_5 - \varphi_6 \geq 0$; $70^\circ \leq \varphi_4 \leq 90^\circ$. Также в характерных положениях какое-либо из звеньев 2, 3, 5 или 6 может располагаться перпендикулярно поверхности, а два звена другой ноги могут иметь один и тот же угол к оси Ox , либо звенья 2 и 3, 5 и 6 попарно находятся под одинаковыми углами.

Таблица 1. Характерные положения экзоскелета в сагиттальной плоскости во время каждого шага

№ шага	Параметр шага	Положение				
		1	2	3	4	5
1-ый	Высота	0	H	$H/2$	0	-
	Длина	0	0	$L/2$	L	-
2-ой, 3-ий	Высота	0	$H/2$	H	$H/2$	0
	Длина	0	$L/4$	$L/2$	$3L/4$	L
4-ый	Высота	0	$H/2$	H	0	-
	Длина	0	$L/2$	L	L	-

Таким образом, звенья 2, 3, 5 и 6 правой и левой ног в каждом характерном положении образуют четырехзвеновик, в котором углы их наклона к оси Ox определяются однозначно. Звено 4 (корпус) при этом образует такой угол с осью Ox , чтобы абсцисса его центра масс совпадала с центром симметрии опорной площадки.

При рассмотрении системы во фронтальной плоскости механизм может принимать пять характерных положений также с учетом ограничений: $\theta_1 = \theta_7 = 0$; $\theta_2 = \theta_6$; $\theta_4 = f(\theta_2)$ (рисунок 4). Первое из них соответствует случаю симметричного расположения центра масс системы между двумя стопами при двухопорной фазе шага (рисунок 4а). Обе стопы контактируют с поверхностью, голени и бедра ног, а также корпус системы перпендикулярны поверхности. Для переноса центра масс устройства на одну из стоп система занимает одно из положений, показанных на рисунке 4б (шаг правой ногой) и рисунке 4в (шаг левой ногой). Обе стопы при этом находятся на поверхности, ноги наклоняются влево или вправо на одинаковые углы, угол наклона корпуса определяется конструкцией экзоскелета и принимает такое значение, чтобы ординаты его центра масс и центра масс стопы, на которую переносится центр масс экзоскелета, были равны между собой. Оставшиеся два положения наблюдаются при одноопорной фазе шага правой и левой ногой. Во время шага правой

ногой обе ноги наклоняются на один и тот же угол так, чтобы обеспечить устойчивое положение устройства, угол наклона корпуса определяется геометрическими размерами, конструктивом системы и обеспечивает расположение проекции его центра масс на горизонтальную плоскость на оси симметрии опорной стопы, проходящей вдоль направления движения (рисунок 4г). При шаге левой ногой экзоскелет наклоняется в другую сторону относительно вертикальной оси на тот же самый угол (рисунок 4д).

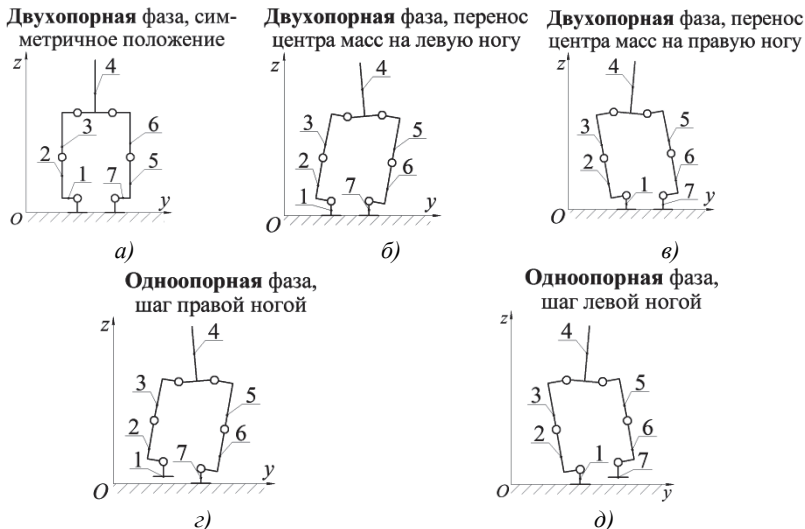


Рис. 4. Положения устройства во фронтальной плоскости: а — двухопорная фаза, симметричное положение (положение 1); б — двухопорная фаза, перенос центра масс на левую ногу (положение 2); в — двухопорная фаза, перенос центра масс на правую ногу (положение 3); г — одноопорная фаза шага правой ногой (положение 4); д — одноопорная фаза шага левой ногой (положение 5)

Каждый шаг устройства реализуется при его последовательном движении в одной из плоскостей: сагитальной или фронтальной. В начальный момент шага в обеих плоскостях система занимает положение 1. Затем при положении 1 в сагитальной плоскости происходит перенос центра масс во фронтальной плоскости на одну из стоп при расположении обеих стоп на поверхности (положения 2 или 3). После этого происходит отрыв стопы от поверхности, то есть реализация непосредственно шага, в сагитальной плоскости система проходит характерные положения 2, 3 и при наличии 4, а во фронтальной находится в положениях 4 или 5 (углы наклона звеньев устройства вбок при этом остаются неизменными). После этого шаг

завершается, вторая стопа опускается на поверхность: положение 4 или 5 в сагиттальной плоскости, положение 2 или 3 во фронтальной. И только затем происходит переход в положение 1 во фронтальной плоскости, положение в сагиттальной плоскости остается неизменным (4 или 5). Сочетание характерных положений системы в двух плоскостях приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сочетания характерных положений экзоскелета в сагиттальной и фронтальной плоскостях

Плоскость	Характерное положение для 1-ого и 4-ого шагов						
	Сагиттальная	1	1	2	3	4	4
Фронтальная	1	2 (3)	4, (5)	4, (5)	2 (3)	1	
Плоскость	Характерное положение для 2-ого и 3-его шагов						
	Сагиттальная	1	1	2	3	4	5
Фронтальная	1	2 (3)	4, (5)	4, (5)	4, (5)	2 (3)	1

Для каждого сочетания характерных положений экзоскелета (для первого и последнего шагов их число равно 6, для всех остальных — 7) определяются углы φ_i , θ_i наклона звеньев в двух плоскостях, а для перехода от одного значения угла в другое эти значения соединяются между собой наклонными прямыми. Тогда законы изменения абсолютных углов наклона звеньев можно записать следующим образом:

$$\varphi_i(\theta_i) = \begin{cases} \left[\left[\varphi_{12}(\theta_{12}) - \varphi_{11}(\theta_{11}) \right] t + \varphi_{11}(\theta_{11}) t_2 - \varphi_{12}(\theta_{12}) t_1 \right] / [t_2 - t_1], & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \left[\left[\varphi_{13}(\theta_{13}) - \varphi_{12}(\theta_{12}) \right] t + \varphi_{12}(\theta_{12}) t_3 - \varphi_{13}(\theta_{13}) t_2 \right] / [t_3 - t_2], & t_2 < t \leq t_3 \\ \left[\left[\varphi_{14}(\theta_{14}) - \varphi_{13}(\theta_{13}) \right] t + \varphi_{13}(\theta_{13}) t_4 - \varphi_{14}(\theta_{14}) t_3 \right] / [t_4 - t_3], & t_3 < t \leq t_4 \\ \left[\left[\varphi_{15}(\theta_{15}) - \varphi_{14}(\theta_{14}) \right] t + \varphi_{14}(\theta_{14}) t_5 - \varphi_{15}(\theta_{15}) t_4 \right] / [t_5 - t_4], & t_4 < t \leq t_5 \\ \left[\left[\varphi_{16}(\theta_{16}) - \varphi_{15}(\theta_{15}) \right] t + \varphi_{15}(\theta_{15}) t_6 - \varphi_{16}(\theta_{16}) t_5 \right] / [t_6 - t_5], & t_5 < t \leq t_6 \\ \left[\left[\varphi_{17}(\theta_{17}) - \varphi_{16}(\theta_{16}) \right] t + \varphi_{16}(\theta_{16}) t_7 - \varphi_{17}(\theta_{17}) t_6 \right] / [t_7 - t_6], & t_6 < t \leq t_7 \end{cases}, \quad (9)$$

где $\varphi_{11} - \varphi_{17}$, $\theta_{11} - \theta_{17}$ — значения углов наклона звеньев в двух плоскостях в характерных положениях, $t_1 - t_7$ — соответствующие этим положениям моменты времени.

4. Определение устойчивости квазистатической походки.

Квазистатическая походка экзоскелета будет устойчивой в случае, если центр масс системы будет все время находиться в пределах опорной площадки как во время опоры на две стопы, так и во время отрыва одной из них от поверхности [21].

Для удобства определения условий, характеризующих устойчивость ходьбы, каждый шаг устройства условно будем представлять следующим образом:

— этап 1 — начальное положение, при котором обе стопы находятся на поверхности, все звенья неподвижны, $(z_{C1}^{(1)} = 0) \wedge (z_{C7}^{(1)} = 0)$, двухопорная фаза;

— этап 2 — непосредственно шаг, при котором одна из стоп на поверхности, а вторая отрывается от поверхности и переносится вперед, после чего начинает опускаться на поверхность, одноопорная фаза, $(z_{C1}^{(2)} = 0) \wedge (z_{C7}^{(2)} \neq 0)$ при шаге левой ногой, $(z_{C1}^{(2)} \neq 0) \wedge (z_{C7}^{(2)} = 0)$ при шаге правой ногой;

— этап 3 — конечное положение, в котором две стопы взаимодействуют с поверхностью, $(z_{C1}^{(3)} = 0) \wedge (z_{C7}^{(3)} = 0)$, двухопорная фаза.

Запишем следующие выражения, формирующие условия устойчивой ходьбы. Для определения положения опорной площадки вычисляются координаты центров масс левой и правой стоп $\bar{r}_{C1}, \bar{r}_{C7}$:

$$\bar{r}_{C1} = (x_{C1} \quad y_{C1} \quad z_{C1})^T, \quad \bar{r}_{C7} = (x_{C7} \quad y_{C7} \quad z_{C7})^T. \quad (10)$$

Исходя из координат центра масс системы на каждом из этапов шага вычисляются минимальное $\bar{r}_{C\min}$ и максимальное $\bar{r}_{C\max}$ значения его координат в проекции на горизонтальную плоскость Oxy :

$$\bar{r}_{C\min} = (x_{C\min} \quad y_{C\min})^T, \quad \bar{r}_{C\max} = (x_{C\max} \quad y_{C\max})^T, \quad (11)$$

$$x_{C\min, C\max} = \begin{pmatrix} x_{C\min 1, C\max 1} & x_{C\min 2, C\max 2} & x_{C\min 3, C\max 3} \end{pmatrix}^T, \quad (12)$$

$$y_{C\min, C\max} = \begin{pmatrix} y_{C\min 1, C\max 1} & y_{C\min 2, C\max 2} & y_{C\min 3, C\max 3} \end{pmatrix}^T.$$

А координаты центров масс стоп используются для вычисления предельных значений $\bar{r}_{C\min}^*, \bar{r}_{C\max}^*$ координат центра масс системы:

$$\bar{r}_{C\min}^* = (x_{C\min}^* \quad y_{C\min}^*)^T, \quad \bar{r}_{C\max}^* = (x_{C\max}^* \quad y_{C\max}^*)^T, \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 x_{C \min, C \max}^* &= \begin{pmatrix} x_{C \min 1, C \max 1}^* & x_{C \min 2, C \max 2}^* & x_{C \min 3, C \max 3}^* \end{pmatrix}^T \\
 y_{C \min, C \max}^* &= \begin{pmatrix} y_{C \min 1, C \max 1}^* & y_{C \min 2, C \max 2}^* & y_{C \min 3, C \max 3}^* \end{pmatrix}^T,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

в диапазоне которых должны находиться его ранее определенные минимальные и максимальные координаты:

$$x_{C \min} > x_{C \min}^*, \quad x_{C \max} < x_{C \max}^*, \quad y_{C \min} > y_{C \min}^*, \quad y_{C \max} < y_{C \max}^*. \tag{15}$$

Предельные значения представляют собой проекции координат крайних точек опорной стопы на оси Ox и Oy на этапе 2 шага, а на этапах 1 и 3 эти значения вычисляются по одной из трех приведенных ниже формул. Если центр масс устройства лежит в пределах одной из стоп, то предельными значениями являются проекции координат ее крайних точек на оси Ox и Oy , а если в пространстве между двумя стопами, то предельные значения лежат на прямых, соединяющих между собой точки B_1 и A_7 , D_1 и E_7 правой и левой стоп (рисунок 5).

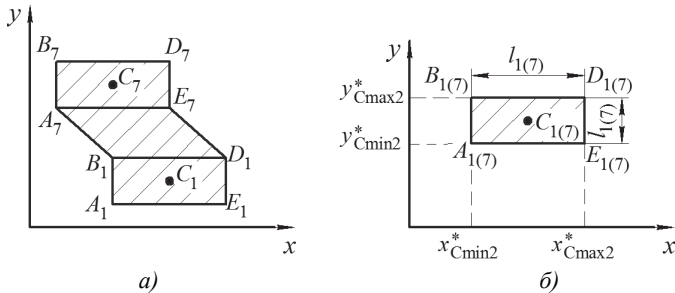


Рис. 5. Определение предельных значений положения центра масс системы на плоскости Oxy : а — этапы 1 и 3 шага (двухопорная фаза); б — этап 2 шага (одноопорная фаза)

Координаты крайних точек стоп вычисляются по формулам, приведенным ниже, причем точки $A_{1(7)}, B_{1(7)}$ принадлежат пятке, а точки $D_{1(7)}, E_{1(7)}$ — носку стопы:

$$x_{\substack{A_{1(A7)} \\ B_{1(B7)}}} = x_{C_1(C7)} - l_{1(7)} / 2, \quad x_{\substack{D_{1(D7)} \\ E_{1(E7)}}} = x_{C_1(C7)} + l_{1(7)} / 2, \tag{16}$$

$$y_{\substack{A_{1(A7)} \\ E_{1(E7)}}} = y_{C_1(C7)} - l'_{1(7)} / 2, \quad y_{\substack{B_{1(B7)} \\ D_{1(D7)}}} = y_{C_1(C7)} + l'_{1(7)} / 2. \tag{17}$$

На этапах 1 и 3 предельные значения равны:

$$x_{C\min 1,3}^* = \begin{cases} x_{A1}, y_{A1} \leq y_C \leq y_{B1} \\ [(x_{A7} - x_{B1})y_C + y_{A7}x_{B1} - x_{A7}y_{B1}] / [y_{A7} - y_{B1}], y_{B1} < y_C < y_{A7}; \\ x_{A7}, y_{A7} \leq y_C \leq y_{B7} \end{cases} \quad (18)$$

$$x_{C\max 1,3}^* = \begin{cases} x_{E1}, y_{A1} \leq y_C \leq y_{B1} \\ [(x_{E7} - x_{D1})y_C + y_{E7}x_{D1} - x_{E7}y_{D1}] / [y_{E7} - y_{D1}], y_{B1} < y_C < y_{A7}; \\ x_{E7}, y_{A7} \leq y_C \leq y_{B7} \end{cases} \quad (19)$$

$$y_{C\min 1,3}^* = \begin{cases} y_{A1}, y_{A1} \leq y_C \leq y_{B1} \\ [(y_{A7} - y_{B1})x_C + x_{A7}y_{B1} - y_{A7}x_{B1}] / [x_{A7} - x_{B1}], y_{B1} < y_C < y_{A7}; \\ y_{A7}, y_{A7} \leq y_C \leq y_{B7} \end{cases} \quad (20)$$

$$y_{C\max 1,3}^* = \begin{cases} y_{B1}, y_{A1} \leq y_C \leq y_{B1} \\ [(y_{E7} - y_{D1})x_C + x_{E7}y_{D1} - y_{E7}x_{D1}] / [x_{E7} - x_{D1}], y_{B1} < y_C < y_{A7}; \\ y_{B7}, y_{A7} \leq y_C \leq y_{B7} \end{cases} \quad (21)$$

На этапе 2 предельные значения определяются по формулам:

$$x_{C\min 2(C\max 2)}^* = \begin{cases} x_{A1}(x_{D1}), (z_{C1} = 0) \wedge (z_{C7} \neq 0) \\ x_{A7}(x_{D7}), (z_{C7} = 0) \wedge (z_{C1} \neq 0) \end{cases}, \quad (22)$$

$$y_{C\min 2(C\max 2)}^* = \begin{cases} y_{A1}(y_{D1}), (z_{C1} = 0) \wedge (z_{C7} \neq 0) \\ y_{A7}(y_{D7}), (z_{C7} = 0) \wedge (z_{C1} \neq 0) \end{cases}, \quad (23)$$

Таким образом, условием устойчивой походки является:

$$\begin{aligned} & (x_{C\min 1-3} > x_{C\min 1-3}^*) \wedge (x_{C\max 1-3} < x_{C\max 1-3}^*) \wedge \\ & \wedge (y_{C\min 1-3} > y_{C\min 1-3}^*) \wedge (y_{C\max 1-3} < y_{C\max 1-3}^*) \end{aligned} \quad (24)$$

Для рассматриваемой в работе походки расположение центра масс системы внутри опорной площадки достигается за счет совпадения проекции центра масс корпуса на плоскость Oxy с центром масс опорной стопы при одноопорной фазе шага (этап 2) и расположением этой же проекции на оси движения устройства в центре опорной площадки при двухопорной фазе шага (этапы 1 и 3). В сагиттальной плоскости это реализуется путем варьирования угла наклона корпуса к оси Ox , а во фронтальной за счет обеспечения наклона всей системы вбок.

5. Система управления экзоскелетом. Система управления ходьбой экзоскелета, структурная схема которой приведена на рисунке 6, реализована на экспертной системе, состоящей из следующих разделов:

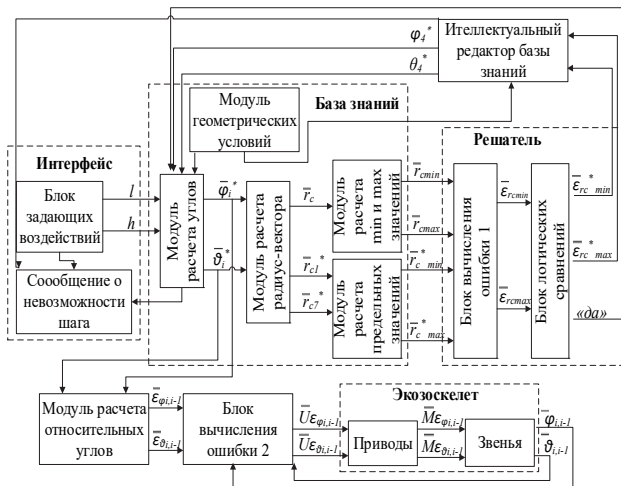


Рис. 6. Структурная схема системы управления экзоскелетом

— пользовательский интерфейс, при помощи которого происходит обмен данными между оператором и специально разработанным симулятором, моделирующим походку экзоскелета (к нему относятся блок задающих воздействий, где пользователь задает высоту и длину шага, которые должны быть реализованы экзоскелетом, а также индикатор, извещающий о невозможности осуществления шага с заданными параметрами);

— база знаний, которая представляет собой набор правил, регулирующих положение звеньев экзоскелета таким образом, чтобы походка была устойчивой, а также позволяет по углам наклона звеньев системы вычислить координаты ее центра масс, их предельные, минимальные и максимальные значения;

— решатель, который на основании значений координат центра масс системы и его положения относительно опорной площадки принимает решения о возможности реализации шага или о необходимости корректировки углов наклона звеньев;

— интеллектуальный редактор базы знаний, в котором при необходимости происходит корректировка углов наклона звеньев

устройства, а в случае ее невозможности этот блок передает соответствующую информацию на пользовательский интерфейс.

Необходимость использования экспертной системы обусловлена тем, что задача управления экзоскелетом при реализации им квазистатической походки является многокритериальной, трудноформализуемой, требует принятия решений в реальном времени с малыми временами ответа.

Блок задающих воздействий генерирует необходимые значения высоты h и длины l шага устройства в зависимости от времени. Вектор задающих воздействий имеет вид:

$$\bar{R}^* = (h \quad l)^T, \quad (25)$$

$$h = f(t, H), 0 < h \leq H, \quad l = f(t, L), 0 < l \leq L, \quad (26)$$

где H, L — значения высоты и длины шага.

Эти данные поступают в базу знаний, образованную пятью другими модулями: расчета углов, расчета проекций центра масс объекта, расчета предельных значений, расчета минимальных и максимальных значений, модуля геометрических условий. Модуль расчета углов исходя из значений высоты и длины шага определяет законы изменения абсолютных углов φ_i^* , θ_i^* звеньев экзоскелета:

$$\varphi_i^*, \bar{\theta}_i^* = f(\bar{R}^*), \quad (27)$$

$$\bar{\varphi}_i^* = (\varphi_1^* \quad \varphi_2^* \quad \varphi_3^* \quad \varphi_4^* \quad \varphi_5^* \quad \varphi_6^* \quad \varphi_7^*)^T, \quad (28)$$

$$\bar{\theta}_i^* = (\theta_1^* \quad \theta_2^* \quad \theta_4^* \quad \theta_6^* \quad \theta_7^*)^T \quad (29)$$

с учетом накладываемых на движение звеньев связей: $x_{C1} = const$, $y_{C1} = const$, $z_{C1} = 0$ — шаг левой ногой, $x_{C7} = const$, $y_{C7} = const$, $z_{C7} = 0$ — шаг правой ногой; $\varphi_1 = \varphi_7 = 0$; $\theta_1 = \theta_7 = 0$; $\theta_4 = f(\theta_2)$; $\theta_2 = \theta_6$; $\varphi_3 - \varphi_2 \geq 0$; $\varphi_5 - \varphi_6 \geq 0$; $70^\circ \leq \varphi_4 \leq 90^\circ$; $75^\circ \leq \theta_4 \leq 105^\circ$; $z_{C7}(x_{C7})$, $y_{C7}(x_{C7})$ — шаг левой ногой, $z_{C1}(x_{C1})$, $y_{C1}(x_{C1})$ — шаг правой ногой, а также с учетом ограничений, обусловленных характерными положениями механизма. Все ограничения записаны в модуле геометрических условий. Если по результатам расчета получаются значения углов, не попадающие в допустимые диапазоны, то с модуля расчета углов подается сигнал на интерфейс, где выводится сообщение

о невозможности реализации шага с заданными пользователем законами изменения его высоты и длины.

Вычисленные углы передаются на модуль расчета центра масс экзоскелета для определения области равновесия вертикального положения устройства. В данном блоке происходит расчет проекции положения центра масс системы x_C, y_C в горизонтальной плоскости во время реализации шага исходя из значений углов поворота звеньев по формулам, приведенным выше.

Для проверки системы на вертикальное равновесие сигналы $\bar{r}_{C\min}$ и $\bar{r}_{C\max}$, а также $\bar{r}_{C\min}^*$ и $\bar{r}_{C\max}^*$ поступают в решатель. В блоке вычисления ошибки 1 происходит определение ошибок \mathcal{E}_{rC} между сигналами:

$$\bar{\mathcal{E}}_{rC} = (\mathcal{E}_{rC\min} \quad \mathcal{E}_{rC\max})^T, \quad (30)$$

$$\bar{\mathcal{E}}_{rC\min} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_{xC\min} & \mathcal{E}_{yC\min} \\ \mathcal{E}_{xC\max} & \mathcal{E}_{yC\max} \end{pmatrix}^T, \quad (31)$$

$$\mathcal{E}_{xC\min} = x_{C\max}^* - x_{C\max}^{\min1-3}, \quad \mathcal{E}_{yC\min} = y_{C\max}^* - y_{C\max}^{\min1-3}. \quad (32)$$

Значения ошибок передаются на блок логических сравнений. Данный блок работает следующим образом. При выполнении условия:

$$(\mathcal{E}_{rC\min} < 0) \wedge (\mathcal{E}_{rC\max} > 0) \quad (33)$$

проекция центра масс устройства располагается внутри опорной площадки, то есть система устойчива, сигнал «да», являющийся флагом, поступает на модуль расчета углов базы знаний. При этом значения углов $\bar{\varphi}_i^*$ и $\bar{\theta}_i^*$ передаются на блок расчета относительных углов, в котором осуществляется переход от абсолютных углов к относительным:

$$\bar{\varphi}_{i,i-1}^* = \bar{\varphi}_i^* - \bar{\varphi}_{i-1}^*, \quad \bar{\theta}_{i,i-1}^* = \bar{\theta}_i^* - \bar{\theta}_{i-1}^*. \quad (34)$$

Полученные углы передаются на блок вычисления ошибки 2, где сравниваются с фактическими значениями относительных углов $\bar{\varphi}_{i,i-1}$ и $\bar{\theta}_{i,i-1}$, генерируемых приводами устройства, на выходе этого блока формируются ошибки рассогласования $\bar{\mathcal{E}}_{\varphi_{i,i-1}}$, $\bar{\mathcal{E}}_{\theta_{i,i-1}}$ между сигналами:

$$\bar{\mathcal{E}}_{\varphi_{i,i-1}} = \bar{\varphi}_{i,i-1}^* - \bar{\varphi}_{i,i-1}, \quad \bar{\mathcal{E}}_{\theta_{i,i-1}} = \bar{\theta}_{i,i-1}^* - \bar{\theta}_{i,i-1}. \quad (35)$$

Эти ошибки передаются на регулятор, который генерирует напряжения $\bar{U}_{\varepsilon\varphi_{i,i-1}}$, $\bar{U}_{\varepsilon\theta_{i,i-1}}$, поступающие на приводы экзоскелета:

$$\bar{U}_{\varepsilon\varphi_{i,i-1}} = f(\bar{\varepsilon}_{\varphi_{i,i-1}}), \bar{U}_{\varepsilon\theta_{i,i-1}} = f(\bar{\varepsilon}_{\theta_{i,i-1}}). \quad (36)$$

Приводы, в свою очередь, формируют моменты $\bar{M}_{\varepsilon\varphi_{i,i-1}}$, $\bar{M}_{\varepsilon\theta_{i,i-1}}$:

$$\bar{M}_{\varepsilon\varphi_{i,i-1}} = f(\bar{U}_{\varepsilon\varphi_{i,i-1}}), \bar{M}_{\varepsilon\theta_{i,i-1}} = f(\bar{U}_{\varepsilon\theta_{i,i-1}}), \quad (37)$$

поступающие на звенья устройства и обеспечивающие их повороты на фактические относительные углы $\bar{\varphi}_{i,i-1}$ и $\bar{\theta}_{i,i-1}$.

Если условие (33) не выполняется, то на выходе блока логических сравнений формируются сигналы ошибок $\varepsilon_{rC\min}^*$ и $\varepsilon_{rC\max}^*$, не соответствующие указанным выше неравенствам (33), которые затем поступают в интеллектуальный редактор базы знаний, где формулируются правила пересчета углов φ_4 и θ_4 наклона корпуса в двух плоскостях (или в одной в зависимости от того, по одной или по двум осям проекции центра масс экзоскелета выходят за пределы опорной площадки), передающиеся затем в базу знаний. Для изменения положения центра масс устройства вдоль оси Ox осуществляется дополнительный наклон корпуса вперед или назад (корректировка угла φ_4), а для варьирования положения ординаты точки C увеличивается или уменьшается угол отклонения корпуса системы от вертикали во фронтальной плоскости путем пересчета углов $\theta_2=\theta_6$, θ_4 . Корректировка осуществляется по специальному набору правил в зависимости от численного значения ошибки $\varepsilon_{rC\min}^*$ и $\varepsilon_{rC\max}^*$. В общем виде эти правила можно представить следующим образом:

$$\varphi_4^* = \begin{cases} \varphi_{4(1)}^*, & 0 \leq \left| \varepsilon_{xC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{xC\max}^* \right| \\ \varphi_{4(2)}^*, & \left| \varepsilon_{\varphi_{4(1)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{xC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{xC\max}^* \right| \\ \varphi_{4(3)}^*, & \left| \varepsilon_{\varphi_{4(2)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{xC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{xC\max}^* \right| \\ \varphi_{4(4)}^*, & \left| \varepsilon_{\varphi_{4(3)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{xC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{xC\max}^* \right| \\ \varphi_{4(5)}^*, & \left| \varepsilon_{\varphi_{4(4)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{xC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{xC\max}^* \right| \end{cases} \quad \theta_4^* = \begin{cases} \theta_{4(1)}^*, & 0 \leq \left| \varepsilon_{yC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{yC\max}^* \right| \\ \theta_{4(2)}^*, & \left| \varepsilon_{\theta_{4(1)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{yC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{yC\max}^* \right| \\ \theta_{4(3)}^*, & \left| \varepsilon_{\theta_{4(2)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{yC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{yC\max}^* \right| \\ \theta_{4(4)}^*, & \left| \varepsilon_{\theta_{4(3)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{yC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{yC\max}^* \right| \\ \theta_{4(5)}^*, & \left| \varepsilon_{\theta_{4(4)}^*} \right| < \left| \varepsilon_{yC\min}^* \right| \leq \left| \varepsilon_{yC\max}^* \right| \end{cases}, \quad (38)$$

где $\varphi_{4(1)}^* - \varphi_{4(5)}^*$, $\theta_{4(1)}^* - \theta_{4(5)}^*$ — новые формулы расчета углов наклона корпуса вдоль осей Ox и Oy соответственно, $\varepsilon_{\varphi_{4(1)}^*}^* - \varepsilon_{\varphi_{4(5)}^*}^*$ — значения границ областей ошибки $\varepsilon_{x_{Cmin}}^*$ или $\varepsilon_{x_{Cmax}}^*$, $\varepsilon_{\theta_{4(1)}^*}^* - \varepsilon_{\theta_{4(5)}^*}^*$ — значения границ областей ошибки $\varepsilon_{y_{Cmin}}^*$ или $\varepsilon_{y_{Cmax}}^*$, что схематично показано на рисунке 7. То есть ошибка может находиться в одной из пяти областей, диапазоны которых ограничены значениями $\varepsilon_{\varphi_{4(1)}^*}^* - \varepsilon_{\varphi_{4(5)}^*}^*$ и $\varepsilon_{\theta_{4(1)}^*}^* - \varepsilon_{\theta_{4(5)}^*}^*$, по мере увеличения индекса проекция центра масс устройства вдоль соответствующей оси удаляется от границ опорной площадки.

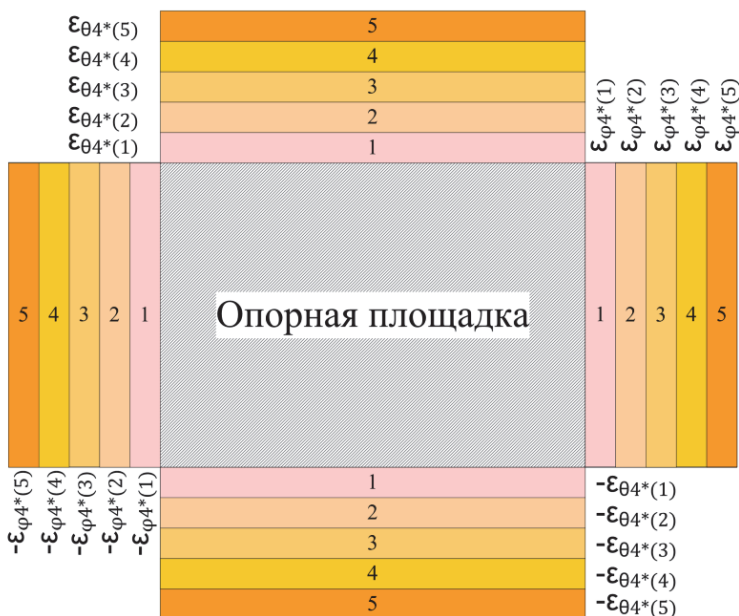


Рис. 7. Области 1-5 ошибок выхода проекции центра масс устройства за пределы опорной площадки

Более детально формулы для корректировки углов можно записать, как показано ниже. Если значение ошибки лежит в области 1, то угол наклона корпуса будет высчитываться по той же формуле, что и изначально, но с добавлением корректирующего слагаемого, где $k_{\varphi_{4(1)}^*}^*$, $k_{\theta_{4(1)}^*}^*$ — некоторый коэффициент, являющийся функцией ошибки

$k_{\varphi 4(1)}^* = f(\mathcal{E}_{x_{C\min,max}}^*), k_{\theta 4(1)}^* = f(\mathcal{E}_{y_{C\min,max}}^*)$. Знак « \leftrightarrow » в формулах (39-43)

справедлив для ошибки $\mathcal{E}_{r_{C\min}}^*$, а знак « \leftrightarrow » — для $\mathcal{E}_{r_{C\max}}^*$.

$$\varphi_{4(1)}^* = \varphi_4^* \mp \varphi_4^* k_{\varphi 4(1)}^* \quad \theta_{4(1)}^* = \theta_4^* \mp \theta_4^* k_{\theta 4(1)}^* \quad (39)$$

В случае, когда ошибка лежит в области 2, угол наклона корпуса $\varphi_{4(2)}^*$, $\theta_{4(2)}^*$ рассчитывается из условия, чтобы соответствующая проекция его центра масс совпадала не с серединой опорной площадки, а была удалена от нее на четверть в сторону, противоположную заваливанию устройства:

$$\bar{r}_{C4} = \bar{r}_{C\min}^* + [\bar{r}_{C\max}^* - \bar{r}_{C\min}^*] / 2 \pm [\bar{r}_{C\max}^* - \bar{r}_{C\min}^*] / 4, \quad (40)$$

где $\bar{r}_{C4} = (x_{C4} \quad y_{C4})^T$.

Для области 3 при расчетах углов наклона корпуса происходит корректировка формулы, справедливой для области 2:

$$\varphi_{4(3)}^* = \varphi_{4(2)}^* \mp \varphi_{4(2)}^* k_{\varphi 4(3)}^* \quad \theta_{4(3)}^* = \theta_{4(2)}^* \mp \theta_{4(2)}^* k_{\theta 4(3)}^*, \quad (41)$$

где $k_{\varphi 4(3)}^* = f(\mathcal{E}_{x_{C\min,max}}^*), k_{\theta 4(3)}^* = f(\mathcal{E}_{y_{C\min,max}}^*)$.

Если ошибка находится в области 4, то углы наклона корпуса $\varphi_{4(4)}^*$, $\theta_{4(4)}^*$ определяются исходя из условия, чтобы соответствующие проекции его центра масс лежали на границах опорной площадки, противоположных направлениям заваливания экзоскелета:

$$\bar{r}_{C4} = \bar{r}_{C\min}^* + [\bar{r}_{C\max}^* - \bar{r}_{C\min}^*] / 2 \pm [\bar{r}_{C\max}^* - \bar{r}_{C\min}^*] / 2, \quad (42)$$

Для ошибки, расположенной в области 5, происходит корректировка законов расчета углов $\varphi_{4(4)}^*$, $\theta_{4(4)}^*$ следующим образом:

$$\varphi_{4(5)}^* = \varphi_{4(4)}^* \mp \varphi_{4(4)}^* k_{\varphi 4(5)}^* \quad \theta_{4(5)}^* = \theta_{4(4)}^* \mp \theta_{4(4)}^* k_{\theta 4(5)}^*, \quad (43)$$

где $k_{\varphi 4(5)}^* = f(\mathcal{E}_{x_{C\min,max}}^*), k_{\theta 4(5)}^* = f(\mathcal{E}_{y_{C\min,max}}^*)$.

Для проверки расположения полученных в интеллектуальном редакторе углов наклона корпуса в допустимых диапазонах в него поступает сигнал с модуля геометрических условий базы знаний. Если

углы лежат в соответствующих диапазонах, то скорректированные сигналы φ_4^* и θ_4^* поступают в модуль расчета углов базы знаний. Если же для корректировки походки экзоскелета требуется наклонить корпус на недопустимый угол, то сигнал с интеллектуального редактора передается в пользовательский интерфейс, на экране которого выводится сообщение об ошибке задающих воздействий. Шаг устройством не совершается.

6. Моделирование походки экзоскелета. В процессе разработки и проектирования экзоскелета возникает множество проблем, связанных с правильностью расчетов, выбором конкретных элементов механизмов, их свойств, мощности приводов, а также поведением устройства и его отдельных элементов в различных условиях. Обычно для того, чтобы решить возникшую задачу, необходимо пройти долгий и дорогостоящий путь, включающий в себя проектирование, изготовление опытного образца, его испытание, анализ результатов и внесение изменений в проект. Чаще всего требуется не одна итерация для достижения желаемого результата. Однако часть вопросов можно решить без производства опытного образца при помощи симуляции.

Поэтому для моделирования походки экзоскелета и проверки адекватности разработанных математической модели, логических правил экспертной системы и системы управления был разработан специальный симулятор. Рассмотрим пример виртуальной симуляции походки экзоскелета с длиной шага $L=0,28$ м и высотой шага $H=0,01$ м. Симулятором были сгенерированы следующие законы изменения абсолютных углов в сагиттальной (рисунок 8а) и фронтальной (рисунок 8б) плоскостях.

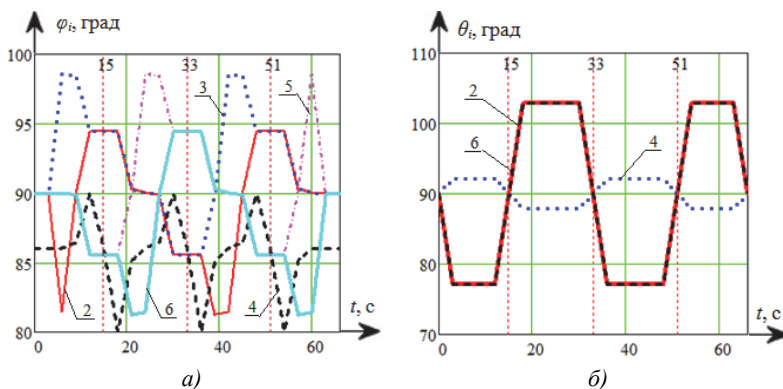


Рис. 8. Графики временных зависимостей изменения абсолютных углов: а) $\varphi_i(t)$; б) $\theta_i(t)$ (номер кривой соответствует индексу угла)

Как видно по приведенным графикам, все ограничения, накладываемые на значения углов, соблюдаются. Углы наклона стоп (звеньев 1 и 7) к осям Ox и Oy нулевые и на рисунке 8 не показаны. Вертикальные линии соответствуют моментам переключения между шагами правой и левой ноги.

Центр масс системы в плоскости Oxy при этом движется, как показано на рисунке 9. Условно каждый из шагов, за исключением первого, можно разбить на четыре участка 1-4 (в первом шаге нет участка 1). Первый участок соответствует двухопорной фазе шага, во время которой происходит перенос центра масс системы в сагиттальной плоскости с опорной ноги предыдущего шага на опорную ногу текущего шага (например, с левой на правую для второго шага) за счет изменения угла наклона корпуса. Начальное положение первого шага уже таково, что центр масс системы располагается внутри опорной площадки в плоскости Oxy . На участке 2 при двухопорной фазе шага аналогичный перенос наблюдается во фронтальной плоскости. Участок 3 характеризует одноопорную фазу шага, центр масс системы перемещается в положительном направлении оси Ox за счет движения переносимой ноги вперед, угол наклона корпуса устройства к оси Ox при этом увеличивается для предотвращения опрокидывания системы. Четвертый этап соответствует переносу центра масс устройства во фронтальной плоскости с опорной стопы, а также его симметричному расположению между двумя опорными ногами вдоль оси Ox .

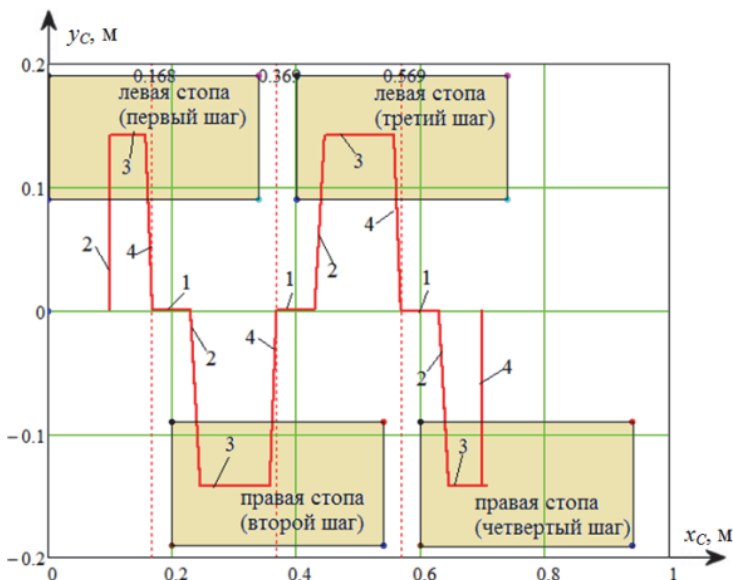


Рис. 9. График траектории центра масс устройства в плоскости Oxy

Таким образом, на основании анализа рисунка 9 можно сделать вывод о том, что сформулированные логические правила, образующие экспертную систему, позволяют разработать устойчивую квазистатическую походку экзоскелета. Это достигается тем, что центр масс системы во время каждого шага всегда располагается внутри опорной площадки.

7. Заключение. Работа посвящена разработке экспертной системы в виде логических правил, обеспечивающей реализацию устойчивой квазистатической походки экзоскелета за счет расположения центра масс устройства в пределах опорной площадки, то есть в области вертикального равновесия. Для осуществления вышесказанного в работе разработана математическая модель устройства, представленная в виде пространственного одиннадцатизвенного механизма, звенья которого соединены однокоординатными цилиндрическими шарнирами. Для определения координат центра масс системы рассматривалось движение объекта в сагитальной и фронтальной плоскостях во время шага левой и правой ногой, в результате анализа которого получены соответствующие формулы и условия переключения между ними, определяемые тем, какой ногой в данный момент реализуется шаг. Предложена структурная схема системы управления агрегатом, в которой в качестве задающих воздействий рассматриваются требуемые высота и длина шага устройства. На основании предложенной математической модели и системы управления был получен набор законов изменения абсолютных углов, обеспечивающих адекватную походку устройства. В дальнейшем планируется протестировать разработанную походку на опытном образце экзоскелета, что позволит усовершенствовать алгоритмы экспертной системы управления.

Литература

1. *Алексеева Л.А., Голубев Ю.Ф.* Модель динамики шагающего аппарата // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1975. № 3. С. 72–80.
2. *Белецкий В.В.* Динамика двуногой ходьбы // Изв. АН СССР. МТТ. 1975. № 3. С. 3–14. № 4. С. 3–13.
3. *Васенин В.А., Велерштейн Р.А., Формальский А.М.* Передвижение антропоморфных механизмов при импульсных воздействиях // Динамика управляемых систем. Новосибирск: Наука. 1979. С. 53–71.
4. *Александров А.М., Зацепин М.Ф., Тубеев Ш.Х.* Управление корпусом двуногого шагающего аппарата в фазе опоры на одну ногу // Труды Московского энергетического института. М.: МЭИ. 1977. Вып. 331. С. 93–96.
5. *Raibert M.H.* Legged robots that balance // MIT press. 1986.

6. *Vukobratovic M., Juricic D.* Contribution to the synthesis of biped gait // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1969. vol. 1. pp. 1–6.
7. *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.
8. *Павловский В.Е., Шелике А.Г.* Нейросетевые системы локализации для андроидного робота // Препринты ИПИМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 84. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-84>. (дата обращения: 26.10.2013).
9. *Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е.* Формирование упрощенной траектории движения двуногого шагающего робота // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №. 3. С. 51–58.
10. *Алексеев Р.А.* Разработка алгоритма ходьбы двуногого робота // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. №. 28. С. 123–132.
11. *Beranek R., Ahmadi M.A.* Learning behavior based controller formaintaining balance in robotic locomotion // Intell. Robot. Syst. 2016. vol. 82. pp. 189–205.
12. *Khusainov R., Afanasyev I., Magid E.* Anthropomorphic robot modelling with virtual height inverted pendulum approach in Simulink: step length and robot height influence on walking stability // Int. Conf. on Artificial Life and Robotics. 2016. pp. 208–211.
13. *Costa e Silva E., Costa M.F., Erthagen W., Bicho E.* Global vs. local nonlinear optimization techniques for human-like movement of an anthropomorphic robot // AIP Conference Proceedings. 2015. vol. 1648. no. 1. pp. 140004.
14. *Khusainov R., Shimchik I., Afanasyev I., Magid E.* Toward a human-like locomotion: modelling dynamically stable locomotion of an anthropomorphic robot in simulink environment // IEEE International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2015. vol. 2. pp. 141–148.
15. *Sugihara T., Nakamura Y., Inoue H.* Real-time humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002. pp.1404–1409.
16. *Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Savin S.I.* The modeling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism // Assistive robotics: proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR. 2015. pp. 175–182.
17. *Jatsun S.F., Savin S.I., Yatsun A.S.* Parameter Optimization for Exoskeleton Control System Using Sobol Sequences // ROMANSY 21 — Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 21st CISM-IFTOMM Symposium. Udine. Italy.2016. pp. 361–368.
18. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Gaponov I.* Study on a Two-Stage Control of a Lower-Limb Exoskeleton Performing Standing-Up Motion from a Chair // Robot Intelligence Technology and Applications. 2016. vol. 4. pp. 113–122.
19. *Jatsun S., Savin S., Bezmen P.* Modelling of exoskeleton movement in verticalization process // International Conference on Pure Mathematics — Applied Mathematics (PM-AM 2015). Vienna. Austria. 2015. pp. 83–87.
20. *Яцун С.Ф. и др.* Экзоскелеты: управление движением экзоскелета нижних конечностей при ходьбе // Юго-Зап. гос. ун-т: монография. Курск. 2016. 185 с.

Ворочаева Людмила Юрьевна — к-т техн. наук, старший преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный

университет (ЮЗГУ). Область научных интересов: мехатроника, робототехника, математическое моделирование, системы управления, механика. Число научных публикаций — 50. mila180888@yandex.ru; ул. 50 лет Октября, 94, к. 218, Курск, 305040; р.т.: +7(4712)222626, Факс: +7(4712)222626.

Яцун Андрей Сергеевич — к-т техн. наук, старший преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). Область научных интересов: мехатроника, робототехника, программное обеспечение, схемотехника, электронные компоненты. Число научных публикаций — 78. ayatsun@yandex.ru; ул. 50 лет Октября, 94, к. 218, Курск, 305040; р.т.: +7(4712)222626, Факс: +7(4712)222626.

Яцун Сергей Федорович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). Область научных интересов: мехатроника, робототехника, моделирование мобильных роботов, моделирование и расчет многозвенных систем. Число научных публикаций — 508. teormeh@inbox.ru; ул. 50 лет Октября, 94, к. 218, Курск, 305040; р.т.: +7(4712)222626, Факс: +7(4712)222626.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-39-00008).

L.Yu. VOROCHAEVA, A.S. YATSUN, S.F. JATSUN
**CONTROLLING A QUASISTATIC GAIT OF AN
 EXOSKELETON ON THE BASIS OF THE EXPERT SYSTEM**

Vorocheva L.Yu., Yatsun A.S., Jatsun S. F. Controlling a Quasistatic Gait of an Exoskeleton on the basis of the Expert System.

Abstract. The article discusses the design of an expert system and a control algorithm of a quasistatic gait of an exoskeleton, which guarantees the stability of the device in the vertical position, on the basis of which mathematical modelling of the object's motion is carried out. In this work we present an analytical scheme of the device in the form of an eleven-link mechanism, whose links are connected with each other by single-coordinate hinges, which describes the exoskeleton's motion in two planes: sagittal and frontal. The position of the center of mass, whose coordinates change depending on the position of the legs and body, has been determined. We have developed logical rules that form the expert system and ensure a stable gait of the exoskeleton by placing the center of mass inside the support polygon. Results of numerical modelling of the system step in a specially designed virtual simulator have been obtained.

Key words: lower-limb exoskeleton, expert system, spatial multi-link system, centre of mass, control system, stability margin, support surface, range of vertical equilibrium.

Vorocheva Lyudmila Yurievna — Ph.D., senior lecturer of mechanics, mechatronics and robotics department, Southwest State University (SWSU). Research interests: mechatronics, robotics, mathematical modelling, control system, mechanics. The number of publications — 50. mila180888@yandex.ru; 50 let Oktyabrya, 94, room 218, Kursk, 305040; office phone: +7(4712)222626, Fax: +7(4712)222626.

Yatsun Andrey Sergeevich — Ph.D., senior lecturer of mechanics, mechatronics and robotics department, Southwest State University (SWSU). Research interests: mechatronics, robotics, software development, circuit technology, electronic components. The number of publications — 78. ayatsun@yandex.ru; 50 let Oktyabrya, 94, room 218, Kursk, 305040; office phone: +7(4712)222626, Fax: +7(4712)222626.

Jatsun Sergey Fedorovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of mechanics, mechatronics and robotics department, Southwest State University (SWSU). Research interests: mechatronics, robotics, modeling of mobile robots, modelling and analysis of multi-link systems. The number of publications — 508. teormeh@inbox.ru; 50 let Oktyabrya, 94, room 218, Kursk, 305040; office phone: +7(4712)222626, Fax: +7(4712)222626.

Acknowledgements. This research is supported by RSF (grant 14-39-00008).

Reference

1. Alekseeva L.A., Golubev Yu.F. [Model of dynamics of the walking device]. *Izv. ANSSSR. Tehnicheskaya kibernetika – New. ASUSSR. Technical cybernetics*. 1975. vol. 3. pp. 72–80. (In Russ).
2. Beletsky V.V. [Dynamics of biped walking]. *Izv. ANSSSR. MTT – New. ASUSSR. MTT*. 1975. vol. 3. pp. 3–14. vol. 4. pp. 3–13. (In Russ).
3. Vasenin V.A., Velerstein R.A., Formalsky A.M. [Movement of anthropomorphous mechanisms at pulse influences]. *Dinamika upravlyayemykh system – Dynamics of the operated systems*. Novosibirsk: Nauka. 1979. pp. 53–71. (In Russ).

4. Alexandrov A.M., Zatssepina M.F., Tubeev Sh.H. [Control of the case of the biped walking device in a support phase on one leg]. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta – Proceedings of the Moscow Power Engineering Institute*. 1977. vol. 331. pp. 93–96. (In Russ).
5. Raibert M.H. *Legged robots that balance*. MIT press. 1986.
6. Vukobratovic M., Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1969. vol. 1. pp. 1–6.
7. Lavrovsky E.K., Pismennaya E.V. [About regular walking of an exoskeleton of the lower extremities at deficiency of the operating influences]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki – Russian magazine of biomechanics*. 2014. vol. 18. no. 2. pp. 208–225. (In Russ).
8. Pavlovsky V.E., Shelike A.G. *Neyrossetevyye sistemy lokalizatsii dlya androïdnogo robota* [Neural network systems of localization for android robot]. Preprint IPM im. M.V.Keldyshata. 2012. vol. 84. 16 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-84> (accessed: 26.10.2013). (In Russ).
9. Kovalchuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. [Formation of the simplified trajectory of the movement of the biped walking robot]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye – News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2011. vol. 3. pp. 51–58.
10. Alekseev R.A. [Development of an algorithm of walking of the biped robot]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy mekhaniki i optiki – Scientific and technical messenger of information technologies, mechanics and optics*. 2006. vol. 28. pp. 123–132.
11. Beranek R., Ahmadi M. A. Learning behavior based controller for maintaining balance in robotic locomotion. *Intell. Robot. Syst.* 2016. vol. 82. pp. 189–205.
12. Khusainov R., Afanasyev I., Magid E. Anthropomorphic robot modelling with virtual height inverted pendulum approach in Simulink: step length and robot height influence on walking stability. *Int. Conf. on Artificial Life and Robotics*. 2016. pp. 208–211.
13. Costa e Silva E., Costa M. F., Erhagen W., Bicho E. Global vs. local nonlinear optimization techniques for human-like movement of an anthropomorphic robot. *AIP Conference Proceedings*. 2015. vol. 1648. vol. 1. p. 140004.
14. Khusainov R., Shimchik I., Afanasyev I., Magid E. Toward a human-like locomotion: modelling dynamically stable locomotion of an anthropomorphic robot in simulink environment. *IEEE International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2015. vol. 2. pp. 141–148.
15. Sugihara T., Nakamura Y., Inoue H. Real-time humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2002. pp. 1404–1409.
16. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Savin S.I. The modeling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism. *Assistive robotics: proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR*. 2015. pp. 175–182.
17. Jatsun S.F., Savin S.I., Yatsun A.S. Parameter Optimization for Exoskeleton Control System Using Sobol Sequences. *ROMANSY 21 — Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 21st CISM-IFTOMM Symposium*. Udine. Italy. 2016. pp. 361–368.
18. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Gaponov I. Study on a Two-Stage Control of a Lower-Limb Exoskeleton Performing Standing-Up Motion from a Chair. *Robot Intelligence Technology and Applications*. 2016. vol. 4. pp. 113–122.
19. Jatsun S., Savin S., Bezmen P. Modelling of exoskeleton movement in verticalization process. *International Conference on Pure Mathematics – Applied Mathematics (PM-AM 2015)*. Vienna. Austria. 2015. pp. 83–87.
20. Jatsun S.F. et al. *Ekzoskelety: upravleniye dvizheniyem ekzoskeleta nizhnikh konechnostey pri khodbe* [Control the movement of the exoskeleton of lower limbs when walking]. Yugo-Zapadnyy universitet: monografiya. Kursk. 2016. 185 p. (In Russ.).