

УДК 521.1, 681.51.011

Проблемы построения системы управления ходьбой экзоскелетона нижних конечностей с помощью гидроцилиндров

**Лавровский Э. К.¹, Письменная Е. В.^{1,*},
Комаров П. А.¹**

[*epismen@yandex.ru](mailto:epismen@yandex.ru)

¹НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе рассматривается динамика пассивного и активного экзоскелета (с дополнительной нагрузкой и без) при плоской, регулярной, одноопорной ходьбе человека-оператора по ровной, горизонтальной поверхности. Экзоскелет имеет аналогичное человеку строение и связан с оператором при помощи упругих лямок в некоторых точках тела. В активном режиме строилось на основе полных уравнений динамики управление экзоскелетом, обеспечивающее отслеживание желаемых движений в коленных шарнирах с требуемым качеством переходных процессов. Как в случае идеальных двигателей, так и для гидроприводов моделирование показало правильность построенных алгоритмов и высокую точность реализации задаваемой походки, а также выявило существенное влияние коэффициентов демпфирования и упругости лямок.

Ключевые слова: пассивный и активный экзоскелет, биомеханическая модель человека в экзоскелете, управление экзоскелетом, желаемые моменты сил

1. Введение

Рассматривается плоская, одноопорная, регулярная ходьба экзоскелетона, надетого на человека, по ровной, горизонтальной поверхности – как с грузом, так и без него. Механизмы подобного типа призваны помочь как здоровому человеку при перемещении тяжёлых грузов, или при длительной ходьбе, так и людям с ограниченными двигательными возможностями (ослабленные, либо парализованные люди).

Экзоскелетон расположен частично за спиной и по бокам тела человека, в его «рюкзаке» может находиться дополнительный точечный груз P . Тело человека и конструкция экзоскелетона, хотя она и повторяет человеческое тело, не слиты вместе: контакт поддерживается лишь в восьми точках тела при помощи упругих лямок, которые рассматриваются как упругие линейные пружинки с различными коэффициентами упругости и демпфирования. Таким образом, экзоскелетон может в некотором смысле повторять диктуемое ему человеком движение. Если конструкция экзоскелетона

«наползает» на человеческое тело, то считается, что это вызывает резкий рост коэффициентов упругости пружинок в соответствующих точках контакта, стремящихся вытолкнуть «железо» из тела.

Задачей организации ходьбы аппарата является осуществление движения стопы переносимой ноги, таза и корпуса по заданным, желаемым траекториям. Характерной особенностью подхода в работе является использование только двух управляющих приводов в коленях обеих ног, помимо этого, на аппарат воздействуют упругие силы со стороны крепежных лямок.

В работе рассматриваются два типа режимов управления: в случае «идеального» привода и гидропривода.

2. Динамика аппарата

Рассматривается задача управления биомеханизмом—человеком, интегрированным с экзоскелетом, при перемещении его по ровной горизонтальной поверхности в режиме плоской, регулярной, одноопорной ходьбы. На рис. 1 показана схема аппарата в абсолютной системе осей XYZ , введены обозначения углов, моментов $M_{i,j}$ ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$) в суставах; в стопах ног — в точке (x_{1p}, y_{1p}) опорной ноги приложены силы реакции R_{1x}, R_{1y} , в стопе переносимой ноги (x_{2p}, y_{2p}) силы реакции естественно отсутствуют. Равен нулю также стопный момент в переносимой ноге M_{21} . Определяющими координатами телачеловека являются (x^*, y^*) — координаты тазобедренного сустава, а также углы звеньев тела с вертикалью $(\psi^*, \alpha_1^*, \beta_1^*, \alpha_2^*, \beta_2^*)$. Положение «тела» экзоскелетона описывается одноименными координатами $(x, y, \psi, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$, причем всюду далее считается, что эти координаты относятся именно к экзоскелетону.

Пусть человек-оператор, используя мышечные усилия, движется строго в режиме комфортабельной ходьбы [1]

$$x^* = Vt - \sigma, \quad y^* = h, \quad V = L/T, \quad \sigma = L/2; \quad x_{1p} = y_{1p} = 0 \quad (1)$$

где V — скорость его перемещения, T — период одного шага, L — его длина, h — высота перемещения точки таза над горизонтальной поверхностью перемещения (все эти величины постоянны), причем перемещение его переносимой ноги подчиняется закону

$$x_{2p}^* = -L \cos(\Omega t), \quad y_{2p}^* = \delta^2 \sin^2(\Omega t), \quad \Omega = \pi/T \quad (2)$$

где δ — некоторая константа, задающая высоту траектории переносимой ноги (обычно $\delta^2 = 0.02$ м) и, наконец, угол корпуса ψ^* [1] изменяется по периодическому закону

$$\psi^*(t) = -\frac{ML}{2K_r} \left[ch\omega t - \frac{1 + ch\omega T}{sh\omega T} sh\omega t \right] - \frac{Mx^*}{K_r}, \quad \sigma = \frac{L}{2}, \quad \omega^2 = \frac{K_r g}{J + K_r h} \quad (3)$$

Здесь M, K_r, J – масс-инерционные характеристики человеческого тела, смысл которых будет пояснен ниже, g – ускорение силы тяжести. Экзоскелет только отчасти повторяет такое («желаемое») движение, причем на его истинное движение влияют силы, развиваемые пружинками в точках контакта, а также управляющие моменты, сосредоточенные в коленных шарнирах.

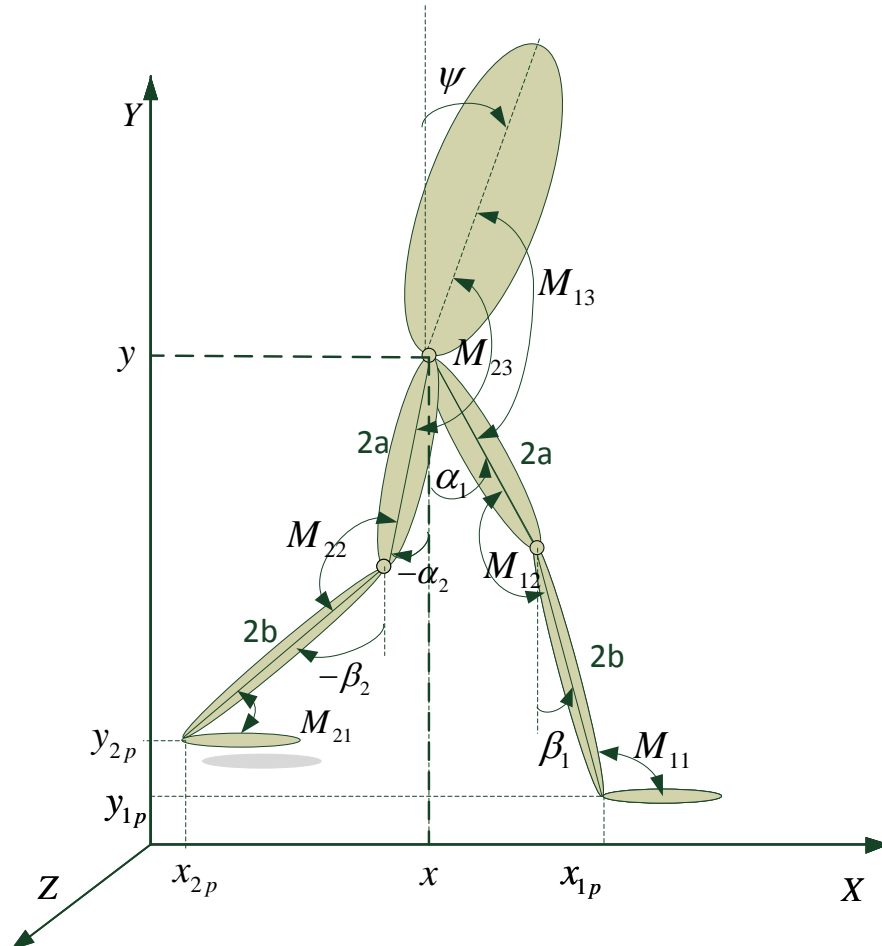


Рис. 1. Схема экзоскелетона в движении

Используя метод Лагранжа, можем получить в общем случае следующую систему [1], описывающую движение экзоскелетона, структурные уравнения которой имеют вид

$$B(z)\|\ddot{z}\| + D(z)\|\dot{z}^2\| + Ag\|\sin z\| = Q_z, \quad (4)$$

где $\|z\| = \|x, y, \psi, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2\|$ – вектор пространства переменных, а $B(z), D(z), A$ – некоторые матрицы. Полный вид этих уравнений приведен, например, в [2].

Здесь обозначено

$$Q_z = \|Q_x, Q_y, Q_\psi, Q_{\alpha_1}, Q_{\beta_1}, Q_{\alpha_2}, Q_{\beta_2}\|^T,$$

где

$$\begin{aligned}
Q_x &= R_{1x} + Q_x^*, \quad R_{2x} = 0 \\
Q_y &= R_{1y} + Q_y^*, \quad R_{2y} = 0 \\
Q_\psi &= -\sum_{i=1}^2 M_{i3} + Q_\psi^*, \\
Q_{\alpha_i} &= -M_{i2} - M_{i3} + 2a(R_{ix} \cos \alpha_i + R_{iy} \sin \alpha_i) + Q_{\alpha_i}^*, \quad i = 1, 2 \\
Q_{\beta_i} &= M_{i2} + 2b(R_{ix} \cos \beta_i + R_{iy} \sin \beta_i) + M_{i1} + Q_{\beta_i}^*, \quad i = 1, 2
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
M &= m_t + 2m_a + 2m_b, \quad J_a^* = J_a + 4m_b a^2, \quad K_a = m_a a_* + 2m_b a, \\
K_b &= m_b b_*, \quad J_{ab} = 2m_b a b_*, \quad K_r = m_t r.
\end{aligned} \tag{6}$$

где R_{ix}, R_{iy} – силы реакций опоры, $2a$ и $2b$ соответственно длины бедер и голеней экзоскелетона (и человека), m_a, m_b их массы, m_t – масса корпуса, r – расстояние центра масс корпуса от таза, a_*, b_* – соответственно расстояния центров масс бедра и голени от таза и коленей ног; J и J_a – моменты инерции соответственно корпуса и бедра относительно точки таза, J_b – момент инерции голени относительно колена. Соотношения (6) определяют некоторые масс-инерционные характеристики, от которых зависят левые части в (4).

Уравнения (4), (5) в принципе пригодны для описания движения как в одноопорной (с мгновенной двуопорной фазой), так и с протяженной двуопорной фазой, а также в режим с протяженной двуопорной фазой, где сочетаются обе фазы. Под номером один понимается передняя опорная, под номером два – задняя, переносимая нога. Стопы человека и экзоскелетона считаются невесомыми.

Заметим, что (в отличие от [1, 2, 3]) данная динамическая система содержит в правых частях формул (5) функции Q^* , которые отражают воздействие пружин (лямок) в точках контакта с телом человека. Они играют важную роль в управлении движением экзоскелетона. Эти Q^* представляют собой виртуальные работы сил f воздействия вязкоупругих пружин в точках крепления по соответствующим координатам лагранжевых уравнений

$$f_x = c\Delta x + d\Delta \dot{x}, \quad f_y = c\Delta y + d\Delta \dot{y} \tag{7}$$

где $c [H \cdot c \cdot m^{-1}]$, $d [H \cdot c \cdot c \cdot m^{-1}]$ – коэффициенты жесткости и демпфирования, а $\Delta x, \Delta y$ – рассогласования по осям x, y координат точек крепления на теле оператора и на аппарате. Расположение восьми точек крепления показано на рис. 2.

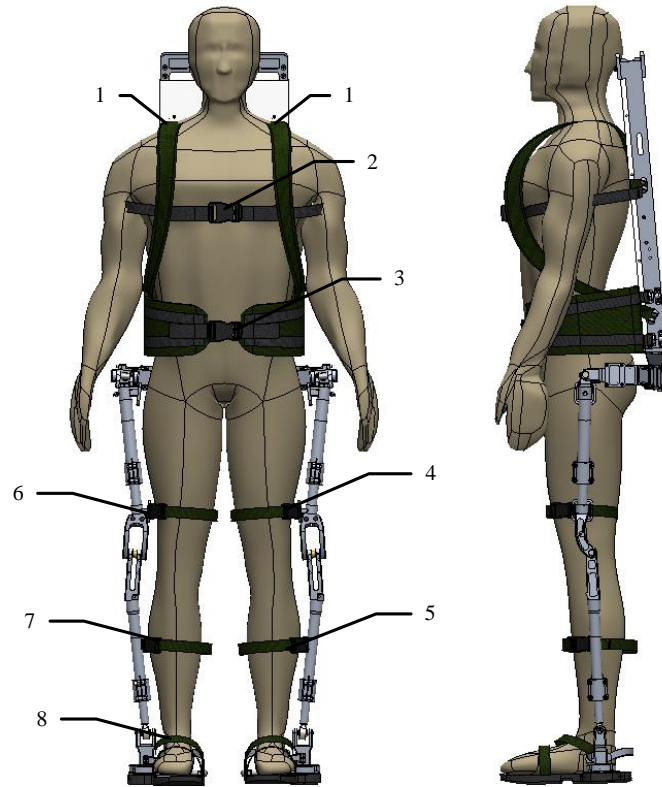


Рис. 2. Человек–оператор в экзоскелетоне

Рама аппарата в отличие от корпуса человека, который моделировался равномерно распределенным, прямолинейным стержнем, рассматривалась как имеющая перевернутую Г-образную форму с горизонтальным (невесомым) участком смещения $smesh = 10$ см, которым она прикреплялась к тазу аппарата. Приведем вид всех функций Q^*

$$Q_x^* = \sum_{i=1}^8 f_x^i, Q_y^* = \sum_{i=1}^8 f_y^i,$$

$$Q_\psi^* = -rop \cdot (f_x^1 \cos \psi + f_y^1 \sin \psi) - rog \cdot (f_x^2 \cos \psi + f_y^2 \sin \psi) + smesh \cdot [\sin \psi \sum_{i=1-3} f_x^i - \cos \psi \sum_{i=1-3} f_y^i],$$

$$Q_{\alpha_1}^* = l_4 \cdot (f_x^4 \cos \alpha_1 + f_y^4 \sin \alpha_1) + 2a \cdot (f_x^5 \cos \alpha_1 + f_y^5 \sin \alpha_1), Q_{\beta_1}^* = l_5 \cdot (f_x^5 \cos \beta_1 + f_y^5 \sin \beta_1),$$

$$Q_{\alpha_2}^* = l_4 \cdot (f_x^6 \cos \alpha_2 + f_y^6 \sin \alpha_2) + 2a \cdot (f_x^7 \cos \alpha_2 + f_y^7 \sin \alpha_2), Q_{\beta_2}^* = l_5 \cdot (f_x^7 \cos \beta_2 + f_y^7 \sin \beta_2) + 2b \cdot (f_x^8 \cos \beta_2 + f_y^8 \sin \beta_2)$$

Верхние индексы в написании сил f отвечают номерам точек крепления. При численных экспериментах было принято, что $rop = 60$ см (высота точки № 1 от таза), $rog = 20$ см (высота точки № 2 от таза), $l_4 = l_6 = 35$ см (расстояние точек № 4 и 6 от таза), $l_5 = l_7 = 30$ см (расстояние точек № 5 и 7 от коленного сустава). Масс-инерционные характеристики тела человека брались для нижних конечностей согласно [4] – они приводятся в Приложении. Веса рамы, обоих бедер и голени аппарата принимались равными каждый 5 кг при

равномерном распределении массы. В случае управления движением экзоскелетона при помощи гидроцилиндров веса каждого из бедер и голеней увеличивались еще на 2.5 кг. Принятые параметры комфортабельного движения человека-оператора и некоторые другие динамические параметры приводятся ниже

$$L = 50 \text{ см}, h = 84.5 \text{ см}, T = 0.7 \text{ с}, 2a = 51.4 \text{ см}, 2b = 40.2 \text{ см}; C = 250 \text{ Н/м}, k_d = 0.1 \text{ с};$$

$$M = 89.1 \text{ кг}, m_{im} = 47.6 \text{ кг}, m_{ie} = 5 \text{ кг}, r = 37.05 \text{ см}, smesh = 10 \text{ см}, rol = 45 \text{ см}, P = 50 \text{ кг или } P = 100 \text{ кг};$$

$$K_r = r * m_{im} + P * rol + m_{ie} * \sqrt{(r^2 + smesh^2)}, J = (m_{im} + m_{ie}) * r^2 / 3 + P * (rol^2 + smesh^2)$$

Здесь m_{ie} и m_{im} – массы корпусов экзоскелетона и человек, C – жесткости лямок на корпусе, а коэффициент демпфирования $d = C \cdot k_d$, причем принималось, что жесткости и соответствующие коэффициенты демпфирования на ногах в 12.5 меньше. Приведенные выше величины M , K_r , J использовались в соотношениях формулы (3).

При рассмотрении пассивного варианта экзоскелета, когда управление им осуществляется только за счет лямок, выявлен демпфирующий эффект при рассмотрении упруго-вязких связей между человеком-оператором и экзоскелетом, заключающийся в том, что введение демпфирующих элементов и правильный выбор параметров упругости и демпфирования позволяет существенно снизить уровень вибраций как по угловым характеристикам, так и по силам в лямках. На рисунках 3 ($k_d = 0$) и 4 ($k_d = 0.1$) приведены графики силовых процессов в лямках. Нижние индексы в написании величин F отвечают номерам точек крепления и компонентам этих сил по осям x, y .

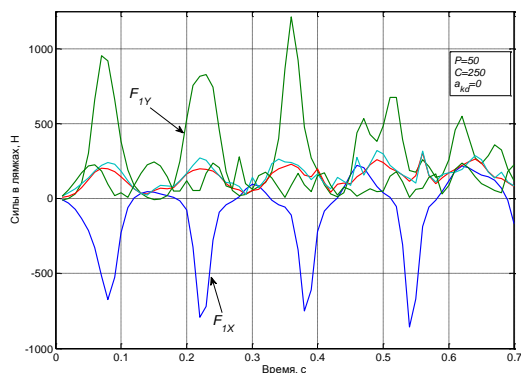


Рис. 3. Графики сил, возникающих в крепежных лямках экзоскелета без демпфирования

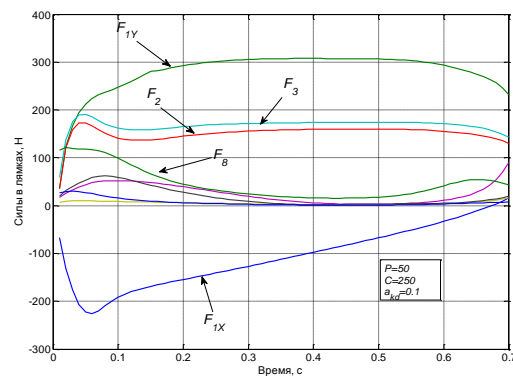


Рис. 4. Графики сил, возникающих в крепежных лямках экзоскелета с демпфированием

Снижение уровня вибраций способствует уменьшению энергетических затрат человека-оператора. В результате этого повышается комфортность использования данного механизма.

3. Построение законов управления движением экзоскелета с идеальным двигателем в коленных шарнирах. Результаты численных исследований алгоритма

Объектом исследования данного раздела является управляемый экзоскелетон с идеальными двигателями, расположенными в коленных шарнирах, который связан с человеком еще и посредством упруго-вязкой системы лямок. Остальные управляющие моменты $M_{i1} = M_{i3} \equiv 0, \quad i = 1, 2$.

В дальнейшем предполагается, что при построении синтеза доступной является информация о всех межзвенных углах и их скоростях. Воспользуемся уравнениями динамики (4), (5) и построим алгоритм управления коленным шарниром экзоскелетона, обеспечивающим желаемое движение в виде

$$\ddot{\varphi}_i = \lambda(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_i^*) + \mu(\varphi_i - \varphi_i^*) + \ddot{\varphi}_i^* \quad (8)$$

где $\varphi_i = \pi - \alpha_i + \beta_i$ – межзвенный угол в i -м ($i = 1, 2$) коленном шарнире, а λ, μ неположительные константы, являющиеся настроечными параметрами системы управления. Величины желаемых углов, скоростей и ускорений $\varphi^*, \dot{\varphi}^*, \ddot{\varphi}^*$ определяются формулами комфортабельной ходьбы человека (1) – (3).

Управляющей функцией является желаемый коленный момент, который затем можно реализовать каким-либо двигателем – электромеханическим, пневматическим или гидродвигателем. Двигатель считается идеальным, если он развивает требуемый момент. Для определения управляющего коленного момента рассматривалась система, состоящая из динамических уравнений (4), (5), условия (8) и дважды продифференцированных кинематических условий в углах, характеризующих неподвижность пятки опорной ноги на подстилающей поверхности. Вся эта система может быть структурно представлена в виде

$$A_1(z, \dot{z}) \|\ddot{z}\| + A_2(z) \|w\| = C(z, \dot{z}), \quad (9)$$

где $\|z\|^T = \|x, y, \psi, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2\|$, $\|w\|^T = \|R_{1x}, R_{1y}, M_{12}, M_{22}\|$ и A_1, A_2, C – некоторые матрицы, зависящие от z, \dot{z} . Это позволяет, решая на каждом шаге интегрирования линейное алгебраическое уравнение (9), определить вторые производные по линейным и угловым переменным $\|\ddot{z}\|$, а также величины $R_{1x}, R_{1y}, M_{12}, M_{22}$. Две последние являются искомыми управляющими функциями $U_{\text{опорной ноги}} = M_{12}$, $U_{\text{переносной ноги}} = M_{22}$.

Построенный алгоритм исследовался методом математического моделирования на ЭВМ. Задавались различные варианты нагрузок на экзоскелетон: 50 кг и 100 кг. Выбор параметров управления исследовался в широком диапазоне значений коэффициентов λ, μ и k_d ; приемлемые результаты были получены, например, при следующих наборах λ, μ

$$\begin{aligned} \mu = -7[1/c^2], \lambda = -10[1/c], \quad \mu = -2[1/c^2], \lambda = -10[1/c], \\ \mu = -1[1/c^2], \lambda = -0.5[1/c], \quad \mu = -12[1/c^2], \lambda = -35[1/c] \end{aligned}$$

Пожалуй, наилучшие результаты были получены при $k_d = 0.1 [c^{-1}]$, они представлены на рисунках 5-10 (звездочками здесь и ниже маркируется желаемый режим), где при различных параметрах λ, μ показано поведение угловых скоростей и силовых переменных процесса. Рисунки 5, 6 относятся к случаю относительно больших $\lambda = -12 [c^{-1}], \mu = -35 [c^{-2}]$. Из этих графиков 5, 6 видно, что большие значения настроечных параметров управления приводят к резкой реакции системы на всякого рода рассогласования, например, начальные. В работе исследовался и другой вариант модели, при которой точность отработки желаемых траекторий заметно повышается. Он заключался в ограничении роста коэффициента жесткости при «проникновении» лямок в тело оператора. Было принято, что увеличение коэффициента C не превышает первоначальную величину в два раза, т.е. $C_{lim} = 2 \cdot C$, что больше отвечает конструкции человеческого тела, состоящего из мягких и твердых тканей. Результаты для такой модели приведены на рисунках 7-10.

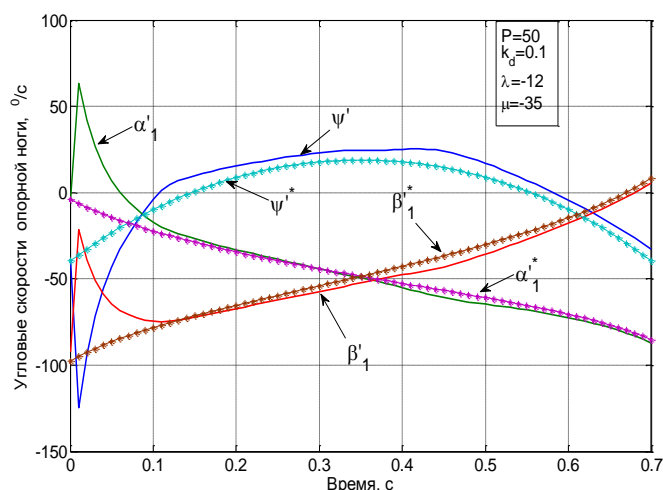


Рис. 5. Графики угловых скоростей опорной ноги экзоскелета

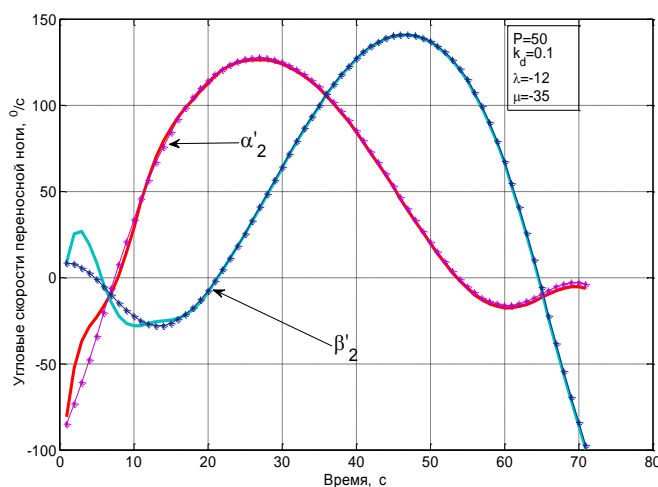


Рис. 6. Графики угловых скоростей переносной ноги экзоскелета

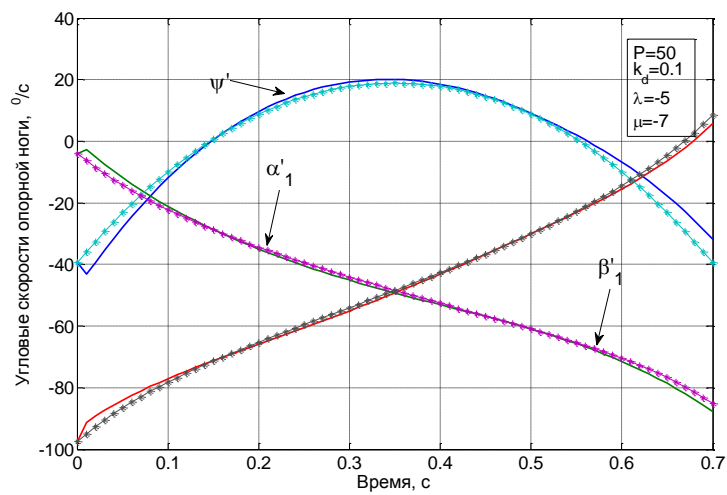


Рис. 7. Графики угловых скоростей опорной ноги экзоскелета

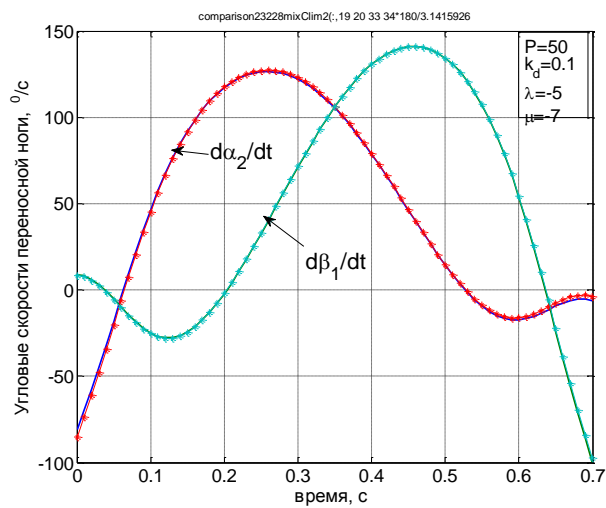


Рис. 8. Графики угловых скоростей переносной ноги экзоскелета

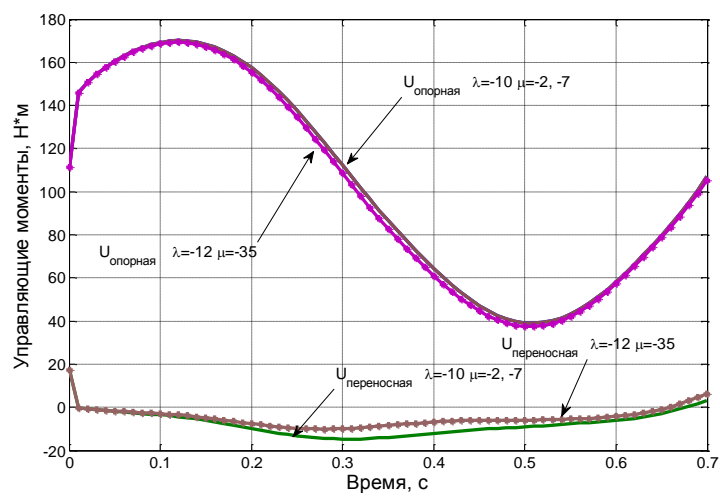


Рис. 9. Графики управляющих моментов экзоскелета.

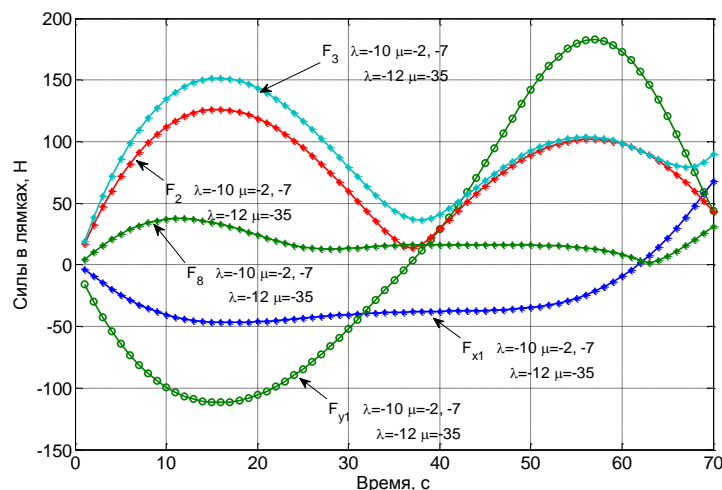


Рис. 10. Графики сил, возникающих в крепежных лямках экзоскелета.

Таким образом, в случае демпфирования силы, моменты и прочие кинематические характеристики изменяются более плавно, а их максимальные значения меньше, чем при отсутствии демпфирования. Заметим, что при увеличении коэффициентов демпфирования больше $0.2 [c^{-1}]$ качество процесса заметно ухудшается и процесс теряет устойчивость. То же самое наблюдается и при уменьшении этих коэффициентов от значения $0.1 [c^{-1}]$. Иными словами, можно подобрать некоторый диапазон коэффициентов демпфирования, при котором получаются приемлемые переходные процессы.

Отдельно отметим энергетические затраты человека–оператора при реализации движения с помощью идеальных коленных двигателей. В случае нагрузки в 50 кг эти затраты составляют 118 Дж для вариантов, представленных на рисунках 7-10.

В случае нагрузки в 100 кг эта же величина составляет 132 Дж. Биомеханический функционал затрат энергии человеком-оператором определялся формулой [1]

$$W = \int_0^T \sum_i |mom_i \cdot \dot{\varphi}_i| dt \quad (10)$$

где φ_i – межзвенные углы человека в суставах, а mom_i – развиваемые им межзвенные моменты сил.

4. Построение законов управления и результаты численных исследований в задаче управления гидроцилиндрами в коленных шарнирах

Одной из возможных реализаций активного движения экзоскелета является использование гидравлического привода. Система состоит из двух гидроцилиндров, конструктивно расположенных между бедрами и голеньями экзоскелета, поршни

которых, осуществляя поступательное движение, обеспечивают угловое перемещение в коленных шарнирах.

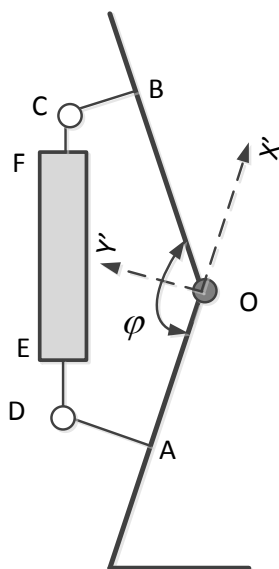


Рис. 11. Схема работы гидроцилиндра в коленном шарнире

Цилиндр имеет две полости, в которые под управлением трехпозиционного серво-распределителя (золотника) поступает (либо не поступает) поток гидравлической жидкости от гидронасоса, поддерживающего давление $P_s = const$. Тем самым, например, в поршневой полости давление P равно $P_1 = P_s$, а в штоковой – атмосферному $P_2 = p_s$. Возникающая в результате работы гидроцилиндра усилие F , давление в полостях P_1, P_2 и удлинение штока l взаимосвязаны и подчиняются при подаче высокого давления в поршневую часть, когда $s > 0$, условиям [5 – 7]

$$\begin{aligned} \frac{d^2 l}{dt^2} &= \frac{1}{M_p} \left[(P_1 A_1 - P_2 A_2) - w \frac{dl}{dt} - F \right] \\ \frac{dP_1}{dt} &= \frac{\beta}{A_1 l} \cdot \left[-A_1 \frac{dl}{dt} - C_{ip} (P_1 - P_2) + c_d \cdot s \cdot \sqrt{\frac{2(P_s - P_1)}{\rho}} \right], \\ \frac{dP_2}{dt} &= \frac{\beta}{A_2 (L_s - l)} \cdot \left[A_2 \frac{dl}{dt} + C_{ip} (P_1 - P_2) - c_d \cdot s \cdot \sqrt{\frac{2(P_2 - p_s)}{\rho}} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

где A_1, A_2 – площади поршней соответственно в поршневой и штоковой полостях, w – коэффициент трения, β – объемный модуль упругости масла, C_{ip}, c_d – некоторые коэффициенты, ρ – плотность масла, s – регулируемая золотником площадь отверстия для подачи и откачки масла в полостях, L_s – предельная длина штока, M_p – масса штока. Аналогично уравнения (11) выглядят и при подаче высокого давления в штоковую полость. В дальнейшем для простоты предполагалось, что $M_p = 0$, поэтому из первого соотношения в (11) имеем

$$F = (P_1 A_1 - P_2 A_2) - w \frac{dl}{dt}, \quad (12)$$

$$dF / dt = (A_1 \cdot dP_1 / dt - A_2 \cdot dP_2 / dt) - w \cdot d^2 l / dt^2$$

Работа гидроцилиндра связана с перемещением штока, который либо увеличивает, либо уменьшает межзвенный угол $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \pi$ в соответствующем коленном шарнире. Конструкция установки гидроцилиндра влияет на то, как будут связаны между собой удлинение штока l и упомянутый угол φ . При численном исследовании была принята следующая кинематическая схемарасположения гидроцилиндра DEF на экзоскелете (рис. 11): прямая AD перпендикулярна к AO , а CB – к OB ; удлинение штока l есть отрезок DE ; длины всех отрезков (в см) – $FC=0$, $EF=25.5$, $DA=CB=3.5$, $AO=14$, $OB=33.5$. Поэтому

$$DC = l + 25.5 = \sqrt{1330.5 - 913.5 \cos \varphi - 332.5 \sin \varphi} \quad \text{в [см]}$$

Расчеты показывают, что при этом плечо силы, развиваемой гидроцилиндром $h_L(\varphi)$ относительно коленного шарнира, меняется от 3.51 см при $\varphi = 180^\circ$ до максимального значения 14.52 см при $\varphi = 84^\circ$, а затем убывает до значения 13.65 см при минимально возможном угле $\varphi = \varphi_{\min} = 66^\circ$.

Сформулируем задачу управления гидросистемой экзоскелетона, цель которой обеспечить требуемое угловое движение в коленных шарнирах и одновременно реализовать необходимое силовое воздействие между голенью и бедром. Управление гидроцилиндрами будет основано на отслеживании идеальных моментов, которые обозначим как U_1^\otimes, U_2^\otimes ; они были получены выше в разделе 3; управляющей функцией является величина площади открытия отверстия гидрораспределителя s . Для реализации этого алгоритма необходимо вычисление производных желаемых моментов U_1^\otimes, U_2^\otimes ; в данном алгоритме они вычислялись разностным способом. Знание в каждый момент времени значения текущего межзвенного угла φ , а, значит, и текущего значения плеча $h_L(\varphi)$, позволяет вычислить «идеальную» силу штока F^\otimes , отвечающую тому или иному идеальному моменту U^\otimes , а также dF^\otimes / dt .

В формуле (11) фигурирует первая и вторая производные удлинения поршня dl / dt и $d^2 l / dt^2$. Первую производную можно получить из показаний датчика угла и угловой скорости и учета геометрии расположения гидроцилиндра. При моделировании используемую вторую производную удлинения l приходится учитывать приближенно, рассматривая ее значение с предыдущего шага интегрирования совместной системы, составленной из (4), (5), (12). Следует отметить, что применяемые в механизме гидроцилиндры являются гораздо более мощными и малоинерционными двигателями, чем, скажем, электродвигатели. Поэтому корректно поставленная задача их моделирования требует, в отличие от электродвигателей, использования примерно в сто раз более мелкого шага интегрирования: здесь применялся, в основном, шаг в $\chi = 10^{-5}$ сек.

Это еще один аргумент в пользу возможности использования в соотношениях (12) приближенного значения d^2l/dt^2 .

При построении закона управления будем обеспечивать выполнение закона отклонения текущего значения силы F от ее желаемого значения $F^{\otimes}(t)$ в виде

$$dF/dt = \chi(F - F^{\otimes}) + dF^{\otimes}/dt, \quad \chi < 0 \quad [c^{-1}] \quad (13)$$

С учетом (11) и (12) это приводит к линейному условию для определения управления – площади отверстия гидрораспределителя s .

При численных исследованиях были приняты следующие величины параметров гидроцилиндра

$$\beta = 1600 \text{ МПа}, A_1 = 4\pi \text{ см}^2, A_2 = 3\pi \text{ см}^2, P_s = 7.51 \text{ МПа}, \rho = 850 \text{ кг/м}^3,$$

$$C_{ip} = 10 \text{ см}^5 / \text{Н} \cdot \text{сек}, w = 0.0005 \text{ Н} \cdot \text{сек} / \text{см}$$

Кинематическая вязкость масла μ принималась равной 100 мПа*сек, предельная величина управляющего параметра s гидросистемы равнялась $hole = 0.12 \text{ см}^2$.

В результате синтеза были получены необходимые управляющие воздействия в виде площади открытия золотника, которые подавались на систему динамических уравнений аппарата. Ниже приведены графики переходных процессов экзоскелета, моменты, развиваемые гидроприводами, и силы взаимодействия человека и экзоскелетона; звездочками указаны графики, отвечающие желаемым процессам.

Численные эксперименты проводились при следующих параметрах: $\chi = -10000^{-1} [c]$, $P=50 \text{ кг}$, $C=250 \text{ Н/см}$ (вариант А) и $\chi = -100000^{-1} [c]$, $P=50 \text{ кг}$, $C=250 \text{ Н/см}$ (вариант В). В обоих вариантах $k_d = 0.1 [c]$. Режимы на рисунках 14, 16, 18 отвечают варианту А, им противопоставляются соответствующие графики на рисунках 15, 17, 19, отвечающие варианту В. Рисунки 12, 13 также отвечают варианту В.

Анализ полученных результатов показывает заметное влияние шага моделирования χ на точность исполнения экзоскелетом заданного движения. Видно, что при $\chi = -100000^{-1} [c]$ точность реализации движения и соответственно степень вычислительной устойчивости выше, чем при $\chi = -10000^{-1} [c]$. Из рассмотрения графиков на рисунках 14 и 15 вытекает, что величины управляющих моментов в гидроприводе в случае А почти в два раза превышают величины этих же моментов, полученных в случае В. Это объясняется тем, что отклонения, возникающие в углах и угловых скоростях во втором случае меньше, чем в первом. Отметим, что график управляющего момента на рисунке 15 гораздо ближе к графику управляющего момента, развиваемого идеальным двигателем на рисунке 9; а силовое воздействие на рисунке 17 полностью соответствует силам на рисунке 10. Это подтверждает правильный выбор шага интегрирования в варианте В. Поскольку биомеханический функционал затрат энергии (10) зависит одновременно как от кинематических параметров, так и от управляющих моментов, то следует ожидать, что энергетические затраты при значении

$\chi = -100000^{-1}$ [с] должны быть близки к соответствующему значению функционала в случае идеального двигателя. Действительно, величина W для режима на рисунке 15 в случае нагрузки в 50 кг составляет $W = 118,6$ Дж, а в случае нагрузки в 100 кг равна $W = 130,0$ Дж.

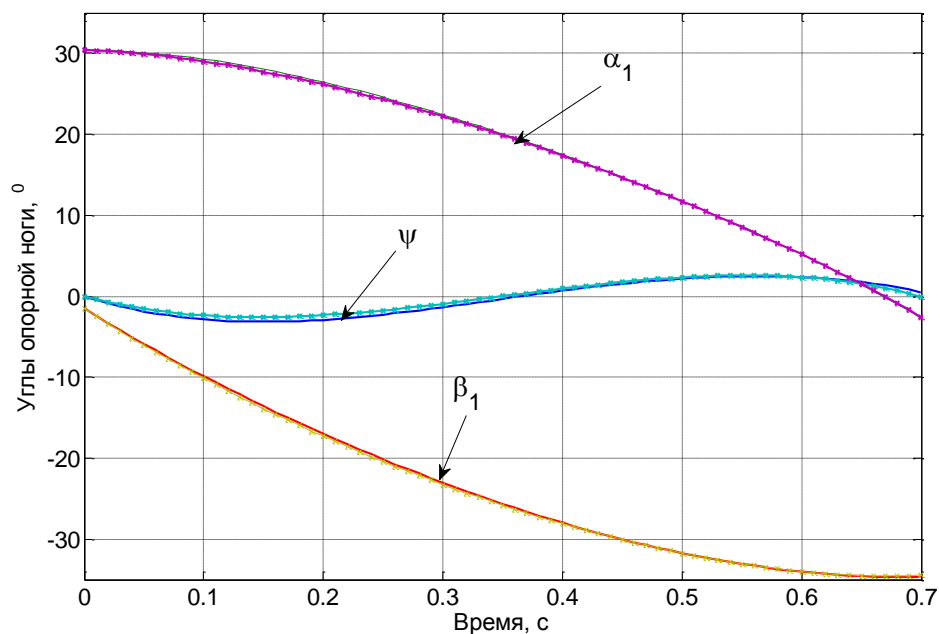


Рис. 12. Графики углов в опорной ноге экзоскелета.

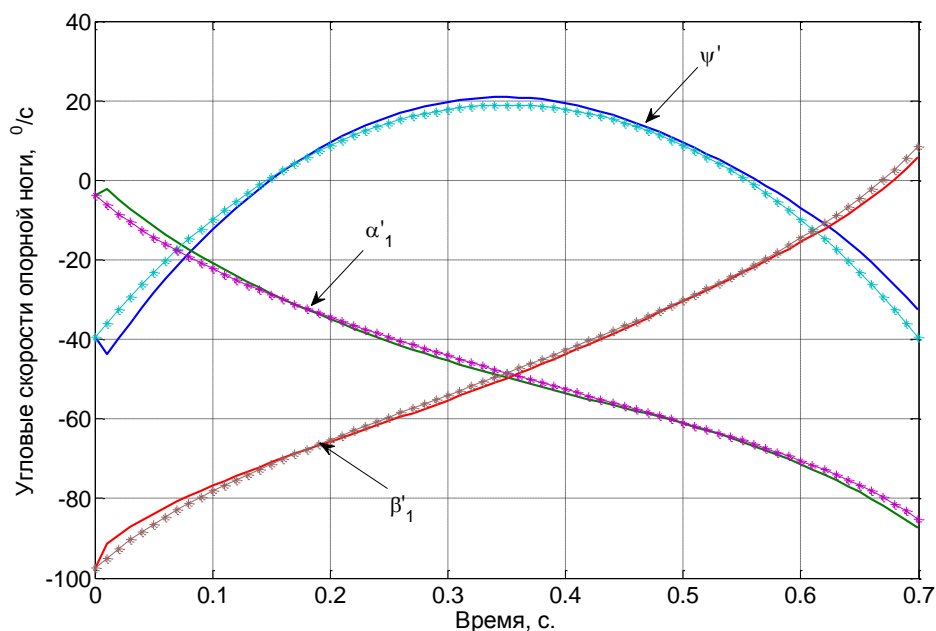


Рис. 13. Графики угловых скоростей в опорной ноге экзоскелета.

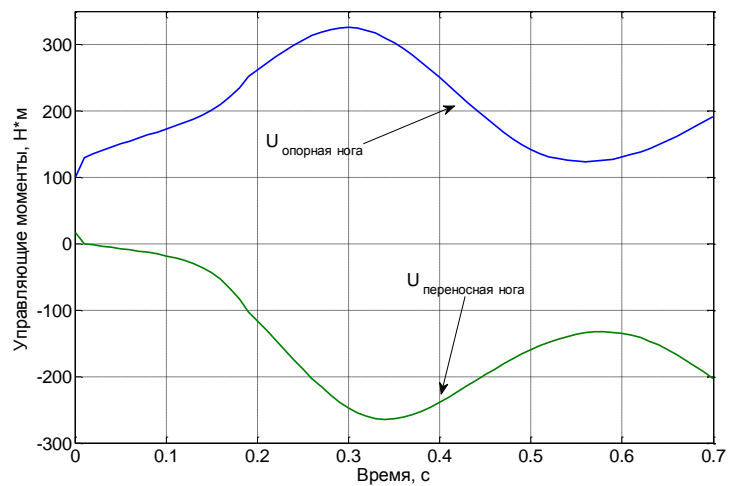


Рис. 14. Графики управляющих моментов.

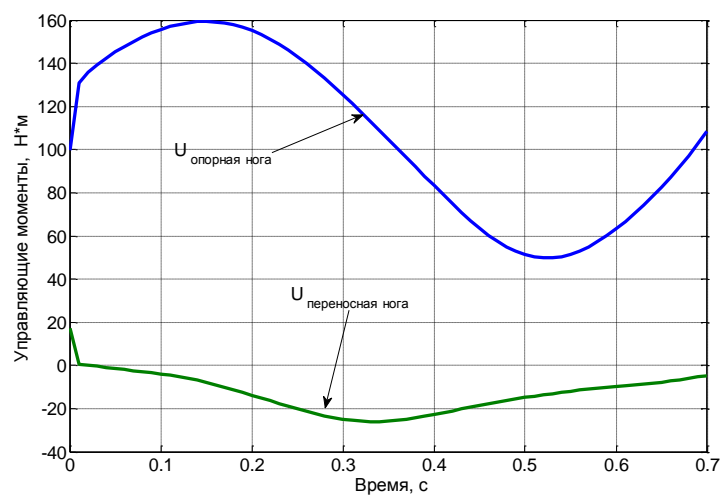


Рис. 15. Графики управляющих моментов.

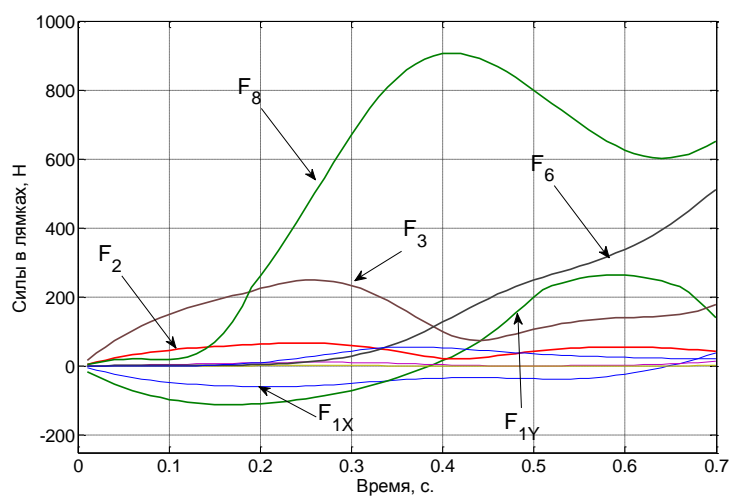


Рис. 16. Графики сил, возникающих в крепежных лямках экзоскелета.

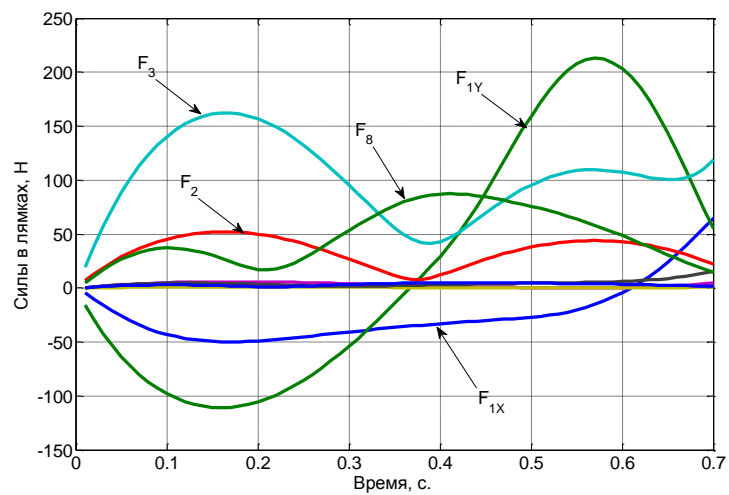


Рис. 17. Графики сил, возникающих в крепежных лямках экзоскелета.

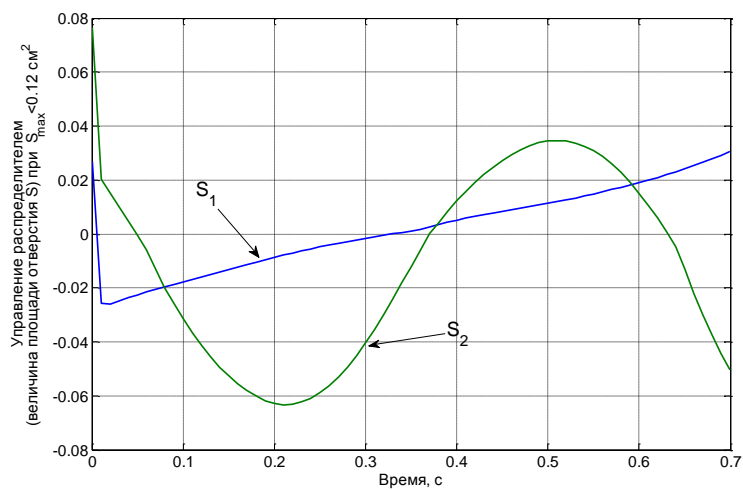


Рис. 18. Графики управляющих величин площадей гидрораспределителя.

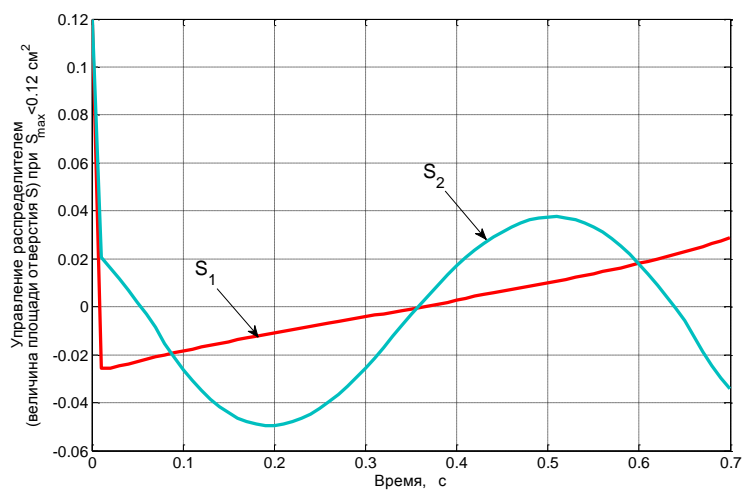


Рис. 19. Графики управляющих величин площадей гидрораспределителя.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 12-01-00800-а.

Приложение

При численном исследовании задачи в качестве модели тела человека была рассмотрена следующая среднестатистическая [4]: рост 1.747 метра, вес 73.4 кг; длины бедер, голеней и корпуса соответственно равны 0.514, 0.402 и 0.741 метра; их веса соответственно 9, 2.9 и 47.6 кг (вес стоп – каждая по 1 кг, высота голеностопного сустава над поверхностью 9 см); $a_* = 0.245$ и $b_* = 0.161$ метра. Корпус человека считался равномерно распределенным по весу, исходя из этого подсчитывались величины K_r и J . Значения других моментов инерции: центральный момент инерции бедра 0.1662 кгм^2 , центральный момент инерции голени 0.0357 кгм^2 . Масса экзоскелетона была принята равной 15 кг: 5 кг – вес корпуса, по 2.5 кг – веса каждого из бедер и голеней, причем их масса всюду распределена равномерно.

Список литературы

1. Белецкий В.В. Двухногая ходьба. М.: Наука, 1984. 286 с.
2. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. Алгоритмы управления экзоскелетом нижних конечностей в режиме одноопорной ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2014. № 1. С. 44-51.
3. Белецкий В.В. Плоские линейные модели двухногого шагания. М., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1973. (Препринт / Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР; № 95).
4. Лавровский Э.К., Воронов А.В. Определение масс-инерциальных характеристик ноги человека // Физиология человека. 1998. № 2. С. 91-101.
5. Muvengei M., Kihui J. Bond Graph Modeling of Inter-Actuator Interactions in a Multi-Cylinder Hydraulic System // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Vol. 74. P. 32-41.
6. Merritt H.E. Hydraulic Control Systems. New York: Wiley and Sons Publishers, 1967.
7. Abbot R.D., McLain N.W., Beard R.W. Validation of synthesis technique for the optimal control of an electro-hydraulic position system // ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2000. Vol. 123, no. 3. P. 377-384.

Creation Problems of Control System of the Lower Limbs Exoskeleton with Hydraulic Cylinders

**E.K. Lavrovsky¹, E.V. Pismennaya^{1,*},
P.A. Komarov¹**

[*epismen@yandex.ru](mailto:epismen@yandex.ru)

¹Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

Keywords: passive and active exoskeleton, biomechanical model of human exoskeleton, exoskeleton control, desired torques

The paper considers a problem of bio-mechanism control i.e. control of integrated human - exoskeleton, with its walking on the level horizontal surface on the flat regular single support foot.

The exoskeleton is a metal rod structure having the same length as a human, but with different mass inertial characteristics. The exoskeleton is able to repeat the human-driven movement. There is a point load in the "backpack" behind human's back. Elastic straps support the contact between the human body and the exoskeleton in eight points.

The article explores the behavior of the exoskeleton in two modes: passive and active. The passive mode characterizes the behavior of the exoskeleton only under the action of forces generated by the human movement in the "comfortable" walking gait. As to the active mode, a difference from the passive one is that in the knee joints of the exoskeleton there are locomotors (propulsions) capable of developing the desired torques.

Active mode investigation was based on the full dynamics equations. Exoskeleton control provided the desired movements in the knee joints with the required quality of transients. In the case of an ideal engine, simulation has shown the correctness of these algorithms and high accuracy of realization of defined gait (including also the angular position of the body exoskeleton) as well as has revealed a significant impact of damping coefficients and elastic straps. The study has demonstrated the possibility for selection factors to ensure a comfortable movement for the human - operator due to abrupt reduction of vibrations in the system. At the same time, decreasing human's energy expenditures calculated by criteria of biomechanical functionality were observed. A model of the exoskeleton was also studied taking into account the dynamic properties of the hydraulic cylinders and the geometry of their position.

The numerical studies allow us to make a sound choice of material for fastening straps of exoskeleton for the human body, to obtain desired parameters for selection of engines for the ac-

tive option as well as to synthesize a control law that satisfies requirements for quality parameters.

References

1. Beletskii V.V. *Dvunogaya khod'ba* [Bipedal walking]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 286 p. (in Russian).
2. Lavrovskii E.K., Pis'mennaya E.V. Control Algorithms Exoskeleton of Lower Limb Single Support Phase Mode and Walk on Flat and Stairs Surfaces. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2014, no. 1, pp. 44-51. (in Russian).
3. Beletskii V.V. *Ploskie lineinye modeli dvunogogo shaganiya* [Plane Linear Models of Biped Pacing]. Preprint no. 95. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, 2013. (in Russian, unpublished).
4. Lavrovskii E.K., Voronov A.V. Determination of Massframe-Inertia Characteristics of a Human Leg. *Fiziologiya cheloveka*, 1998, no. 2, pp. 91-101. (English version of journal: *Human Physiology*, 1998, vol. 24, no. 2, pp. 210-220.).
5. Muvengei M., Kihui J. Bond Graph Modeling of Inter-Actuator Interactions in a Multi-Cylinder Hydraulic System. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, vol. 74, pp. 32-41.
6. Merritt H.E. *Hydraulic Control Systems*. New York, Wiley and Sons Publishers, 1967.
7. Abbot R.D., McLain N.W., Beard R.W. Validation of synthesis technique for the optimal control of an electro-hydraulic position system. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, vol. 123, no. 3, pp. 377-384.