# ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МНОГОЗВЕННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА\*

Г.Я. Пановко, С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун

В работе рассматривается математическая модель многозвенной электромеханической системы на примере экзоскелета нижних конечностей. Приведено описание движения экзоскелета в процессе вертикализации, предложены структура системы автоматического управления и метод определения задающих воздействий, позволяющий сохранить вертикальную устойчивость электромеханической системы. Введены критерии качества работы системы автоматического управления, произведен анализ влияния параметров электроприводов на качество работы системы. Найдены области параметров электродвигателей, обеспечивающие приемлемое качество выполняемого движения согласно предложенным критериям.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, экзоскелет, вертикализация, управляемый электропривод, система автоматического управления.

## FEATURES OF MOTION CONTROL OF A COMPOUND-CHAIN ELECTROMECHANICAL SYSTEM ALLOWING FOR ELECTRIC DRIVE PERFORMANCE

#### G.Ya. Panovko, S.F. Yatsun, S.I. Savin, A.S. Yatsun

The work discusses a mathematical model of a compound-chain electromechanical system by the example of a lower limb exoskeleton. Its motion at vertical adjustment is described; structure of automotive control system is proposed as well as a technique for determining the driving actions allowing the electromechanical system keeps a vertical balance. Criteria for quality of an automotive control system work are defined; influence of electric drive performance on the system work quality is analyzed. Fields of electric engines parameters providing acceptable quality of motion were find out.

**Keywords:** electromechanical system, exoskeleton, vertical adjustment, controllable electric drive, automatic control system.

#### Введение

Электромеханические системы широко применяются в транспортных средствах, промышленном оборудовании, роботах и др. Особенно распространенным типом электромеханических систем являются многозвенные механизмы, состоящие из твердых тел, соединенных активными шарнирами. Такие механизмы снабжаются управляемыми электроприводами, наборами сенсоров и бортовыми вычислителями, причем последние обеспечивают обработку и передачу информации, а также реализуют работу регулятора, генерируя управляющие сигналы, подаваемые на драйверы электродвигателей.

Современные электроприводы характеризуются набором параметров, включающим электромеханические характеристики электродвигателя, передаточное отношение и коэффициент полезного действия редуктора, свойства и тип установленных датчиков и генератора управляющего напряжения (усилителя мощности). Нелинейный характер работы как используемых сенсоров и усилителей мощности, так и самого электродвигателя оказывает существенное влияние на движение механизма [1–2].

<sup>\*</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-39-00008).

<sup>2</sup> 

Теоретические основы электромеханических систем представлены в публикациях [3–6], где рассматриваются общие вопросы моделирования таких систем. В частности, в монографии [5] приведены расчетные схемы для управляемого электропривода.

Одним из характерных примеров электромеханических систем являются экзоскелеты, которые находят приложения в медицине, индустриальном производстве, военном деле. В работах [6-8] показано, что при вертикализации экзоскелета, когда все его звенья выстраиваются по одной вертикальной прямой, для обеспечения устойчивого движения необходимо применять специальные алгоритмы управления, гарантирующие движение центра масс электромеханической системы экзоскелета по заданной траектории. В работах [9-11] приведены методы получения и результаты обработки сенсорной информации, а в публикациях [12-16] представлены исследования вопросов проектирования систем управления экзоскелетов. В работах [17-18] показано, что тип выбранного привода может оказать существенное влияние на качество работы экзоскелета. В то же время, особенности управления движением такими многозвенными электромеханическими системами с учетом свойств электропривода изучены недостаточно.

Целью настоящей работы является исследование влияния основных параметров электродвигателей на характер движения электромеханической системы.

#### Объект исследования

В качестве многозвенной электромеханической системы будем рассматривать экзоскелет нижних конечностей, осуществляющий вертикализацию позы человека. Прототипом послужил экзоскелет, изготовленный в Юго-Западном государственном университете (рис. 1).

В состав экзоскелета входят две ноги, каждая из которых состоит из трех звеньев (стопы, голени и бедра) и корпус, на котором закреплен блок управления, включающий бортовой вычислитель и усилители мощности. Звенья экзоскелета приводятся в движение поворотными электроприводами, установленными в шарнирах. Электроприводы выполнены на основе коллекторных электродвигателей.





#### Математическая модель электромеханической системы

Примем допущение, что в процессе вертикализации экзоскелета его стопы остаются неподвижными, голени и бедра движутся попарно параллельно в сагиттальной плоскости, а оси вращения суставов человека и шарниров экзоскелета совпадают. При таких допущениях для описания движения экзоскелета в процессе вертикализации можно использовать модель плоского многозвенного механизма (рис. 2).

На рисунке 2 использованы обозначения:  $C_i$  – центр масс *i*-го звена ( $i = \overline{1,4}$ );  $\varphi_i$  – угол, определяющий ориентацию *i*-го звена;  $m_i$  и  $l_i$  – масса и длина *i*-го звена соответственно; точки  $O_2$ ,  $O_3$  и  $O_4$  – шарниры, соединяющие соседние звенья.



динамика и прочность машин

Момент, приложенный в *j*-м суставе, обозначим  $M_{j+1,j}$  ( $j = \overline{1,3}$ ). Для описания состояния электромеханической системы введем вектор обобщенных координат  $\vec{q} = \begin{bmatrix} \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \end{bmatrix}^T$  и вектор токов  $\vec{I} = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 \end{bmatrix}^T$ , где  $I_j$  – ток, протекающий в обмотках якоря *j*-го привода.

Запишем выражения для координат центра масс механизма:

$$x_{C} = x_{O1} + \sum_{i=1}^{4} K_{i} \cos(\varphi_{i});$$
  

$$y_{C} = y_{O1} + \sum_{i=1}^{4} K_{i} \sin(\varphi_{i});$$
(3)

$$K_1 = l_1 (M - 0, 5m_1) / m;$$
(4)

$$K_2 = l_2 (0, 5m_2 + m_3 + m_4) / m;$$

$$K_{3} = l_{3} (0, 5m_{3} + m_{4}) / m;$$

$$K_{4} = 0, 5l_{4}m_{4} / m,$$
(5)

где  $x_{O1}$ ,  $y_{O1}$  – координаты точки  $O_1$ ;  $K_i$  – коэффициенты (i = 1, 4); m – полная масса системы.

Устойчивость вертикального положения механизма можно обеспечить, выбрав траекторию движения общего центра масс так, чтобы его вертикальная проекция оставалась в пределах контура опорного полигона. В рассматриваемом случае это эквивалентно выполнению условия:

$$x_{O2} < x_C(t) < x_{O1} \quad \forall t \in [0 \quad t_f].$$
 (6)

Уравнения движения механической системы можно записать в векторной форме следующим образом (вывод уравнений динамики в такой форме приведен в работе [19]):

$$\mathbf{A}(\vec{q})\vec{\ddot{q}} + \vec{C}(\vec{q},\vec{\dot{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \vec{\Phi}(\vec{\dot{q}}) = \mathbf{B}\vec{M} , \quad (7)$$

где **А** – матрица, определяющая инерционные свойства системы;  $\vec{q}$  и  $\vec{q}$  – векторы обобщенных скоростей и ускорений соответственно;  $\vec{C}$  – вектор центробежных и кориолисовых сил;  $\vec{G}$  – вектор потенциальных сил;  $\vec{\Phi}$  – вектор диссипативных сил, полученных дифференцированием диссипативной функции Релея;  $\vec{M} = [M_{21} \ M_{32} \ M_{43}]^{\text{T}}$  – вектор моментов электроприводов; **В** – матрица, связывающая вектор моментов электроприводов с создаваемыми ими обобщенными силами.

Компоненты  $a_{ij}$  матрицы А находятся по формуле

$$a_{ij} = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}_i \partial \dot{q}_j},$$

где T – кинетическая энергия системы (в работе [7] приведено точное выражение для этой матрицы);  $\dot{q}_i$  и  $\dot{q}_j$  – *i*-й и *j*-й компоненты вектора  $\vec{q}$ .

Матрица В имеет вид:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (8)

Электропривод управляет движением шарниров по схеме, приведенной на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема электропривода:  $u_j$  – управляющее напряжение, подаваемое на усилитель мощности;  $u_{j,\text{ шим}}$  – напряжение, генерируемое усилителем мощности и подаваемое на обмотки электродвигателя;  $M_{j,\text{ в}}$  – момент на валу электродвигателя;  $q_{j,\text{ в}}$  – угол поворота вала электродвигателя;  $\dot{q}_{j,\text{ в}}$  – угловая скорость вала электродвигателя

2

4

Усилитель мощности (выполненный на основе драйверной схемы) создает высокочастотный широтно-импульсно модулированный (ШИМ) сигнал, подаваемый на обмотки электродвигателя. На валу электродвигателя установлен инкрементальный энкодер (датчик угла поворота), а на выходном валу редуктора – абсолютный энкодер. Показания всех датчиков передаются в информационную систему робота. Каждый датчик характеризуется своей разрядностью и частотой опроса.

Для управления движением звеньев экзоскелета, в дополнение к уравнению (3), запишем систему уравнений Кирхгофа для обмоток якоря коллекторных электродвигателей в векторной форме:

$$\mathbf{L}\frac{d\vec{I}}{dt} + \mathbf{R}\vec{I} + \mathbf{C}_e\vec{q} = \vec{u} ; \qquad (9)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0\\ 0 & L_2 & 0\\ 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix}, \ \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0\\ 0 & R_2 & 0\\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \ \mathbf{C}_e = \begin{bmatrix} N_1 C_{e,1} & 0 & 0 \\ 0 & N_2 C_{e,2} & 0 \\ 0 & 0 & N_3 C_{e,3} \end{bmatrix}, \ (11)$$

где  $N_j$  – передаточное отношение *j*-го редуктора;  $\eta_j$  – его коэффициент полезного действия;  $L_j$  – коэффициент индуктивности *j*-го электродвигателя;  $R_j$  – активное сопротивление его обмоток;  $C_{e,j}$  – постоянная ЭДС электродвигателя.

Константы  $C_{e, j}$  определяются из соотношений

$$\omega_{\mathbf{x},j}C_{e,j} = u_{\mathbf{H},j},$$

где  $\omega_{x,j}$  – угловая скорость холостого хода вала *j*-го электродвигателя;  $u_{\mu,j}$  – номинальное напряжение для *j*-го двигателя. Используем упрощенную модель, определяющую связь между токами, протекающими в обмотках электродвигателя и моментом, создаваемым электроприводом:

$$\vec{M} = \mathbf{C}_{\tau} \vec{I} ; \qquad (12)$$

$$\mathbf{C}_{\tau} = \begin{bmatrix} \eta_1 N_1 C_{\tau,1} & 0 & 0\\ 0 & \eta_2 N_2 C_{\tau,2} & 0\\ 0 & 0 & \eta_3 N_3 C_{\tau,3} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $C_{\tau,j}$  – постоянная момента *j*-го электродвигателя.

Константы  $C_{\tau,j}$  определяются из равенства

$$I_{\mathrm{H},j}C_{\mathrm{\tau},j}=M_{\mathrm{H},j},$$

где  $I_{{}_{\mathrm{H},j}}$  – номинальный ток в обмотках *j*-го электродвигателя;  $M_{{}_{\mathrm{H},j}}$  – его номинальный момент.

Полученная система уравнений позволяет решать две задачи:

1) по заданному закону движения механизма и значениям токов получать управляющее напряжение;

2) по заданному закону изменения управляющих напряжений находить закон движения механизма.

Далее будет рассматриваться случай, когда управляющие напряжения определяются как функции ошибки управления.

#### Система автоматического управления

Рассмотрим работу системы автоматического управления (САУ) экзоскелета, осуществляющего вертикализацию. Задачей системы управления является обеспечение управляемого перемещения центра масс механизма по заданной траектории.

На рисунке 4 показана структурная схема системы автоматического управления.



Рис. 4. Структурная схема системы автоматического управления

динамика и прочность машин

Здесь обозначены:  $x_c^*(t)$  и  $y_c^*(t)$  – желаемый закон движения центра масс в проекциях на декартовы оси;  $\phi_4^*(t)$  – желаемый закон изменения угла  $\phi_4$ ;  $\vec{q}^*$  – желаемые значения обобщенных координат;  $\vec{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$  – ошибка управления, определяемая как

$$\vec{e} = \vec{q}^* - \vec{q} \ . \tag{14}$$

Система управления работает следующим образом. Первый блок системы управления определяет желаемые значения обобщенных координат и их производных, используя выражения (17) и (18), приведенные далее. Второй блок генерирует управляющие воздействия на основе информации о текущем значении ошибки управления и ее производных, его работа описывается следующим уравнением:

$$\vec{u} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \Big( \ddot{q}^* + \mathbf{K}_p \vec{e} + \mathbf{K}_d \vec{e} \Big), \qquad (15)$$

где  $\mathbf{K}_p$  и  $\mathbf{K}_d$  – диагональные матрицы коэффициентов регулятора.

В работе [20] предложен метод настройки такого рода регуляторов с привлечением методов численной оптимизации. Здесь будем использовать коэффициенты регулятора, полученные по этой методике.

Исследование вопросов точности работы систем управления, использующих регулятор (15), было проведено и опубликовано в работах [7, 21].

Третий блок системы управления описывается уравнениями (9)–(13), а четвертый – уравнениями (7).

Будем рассматривать случай, когда траектория центра масс задана полиномиальной функцией:

$$x_{C} = \sum_{p=0}^{3} \left( a_{p,x} \cdot t^{p} \right), \ y_{C} = \sum_{p=0}^{3} \left( a_{p,y} \cdot t^{p} \right), \quad (16)$$

где  $a_{p,x}$  и  $a_{p,y}$  – коэффициенты полиномов.

Способ нахождения этих коэффициентов, позволяющий обеспечить выполнение условия (6), приведен в работе [22].

Определение значений обобщенных координат, обеспечивающих желаемый закон движения центра масс в декартовых координатах, составляет обратную задачу кинематики. Для получения однозначного решения обратной задачи зададим закон изменения угла  $\phi_4$  и учтем ограничения, накладываемые на взаимную ориентацию звеньев подвижностью суставов человека. Тогда задача нахождения обобщенных координат, обеспечивающих движение центра масс по траектории (16), имеет единственное решение:

$$\varphi_2^* = -\arccos\left(\frac{\chi_1^2 + \chi_2^2 + K_1^2 - K_2^2}{2K_1\sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2}}\right) + \alpha ; \quad (17)$$

$$\phi_3^* = \arccos\left(\frac{\chi_1^2 + \chi_2^2 + K_2^2 - K_1^2}{2K_2\sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2}}\right) + \alpha.$$
(18)

Переменные  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  и  $\alpha$  определяются следующим образом:

$$\chi_1 = \sum_{p=0}^{3} \left( a_{p,x} \cdot t^p \right) - K_1 - K_4 \cos(\varphi_4); \quad (19)$$

$$\chi_2 = \sum_{p=0}^{3} \left( a_{p,y} \cdot t^p \right) - K_1 - K_4 \sin(\varphi_4); \quad (20)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\chi_1}{\sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2}}\right). \tag{21}$$

Таким образом, работа первого блока системы управления, генерирующего задающее воздействие  $\vec{q}^* = [\phi_2^* \quad \phi_3^* \quad \phi_4^*]^T$ , определяется формулами (17)–(21).

Разработанная САУ позволяет реализовать вертикализацию экзоскелета без потери вертикальной устойчивости, обеспечивая движение центра масс механизма по заданной траектории.

#### Численное моделирование движения электромеханической системы

В этом разделе приведены результаты численного моделирования управляемого движения электромеханической системы. При моделировании ее движения были использованы следующие значения параметров:  $m_2 = 9,6$  кг,  $m_3 = 16,8$  кг,  $m_4 = 53,6$  кг,  $l_2 = 0,51$  м,  $l_3 = 0,51$  м,  $l_4 = 0,68$  м,  $L_j = 0,01$  Гн,  $R_j = 0,807$  Ом,  $N_j = 132$ ,  $\eta_i = 0,8$ .

Значения масс и длин звеньев подобраны так, чтобы учесть влияние массо-габаритных параметров человека [19]. Примем, что все использованные электродвигатели имеют одина-ковые параметры  $C_{e,j} = C_e$ ,  $C_{\tau,j} = C_{\tau}$ ,  $j = \overline{1,3}$ .

Поставим задачу определения значений констант электродвигателей  $C_e$  и  $C_{\tau}$ , обеспечивающих приемлемое качество работы системы управления экзоскелета, согласно следующим критериям:

$$J_e = \int (\vec{e}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \vec{e}) dt ; \qquad (22)$$

6

$$J_I = \int (\vec{I}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \vec{I}) dt \,, \tag{23}$$

где Q и D-матрицы весовых коэффициентов.

В случае, когда выбраны единичные матрицы, выражения (22) и (23) преобразуются к виду:

$$J_e = \int (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) dt ; \qquad (24)$$

$$J_I = \int (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) dt \,. \tag{25}$$

Будем считать, что пара параметров  $C_e$ и  $C_{\tau}$  обеспечивает приемлемое качество работы САУ, если выполняются условия:

$$J_e < J_e^{\max}, \ J_I < J_I^{\max}.$$
 (26)

Построим поверхность  $J_e = J_e(C_e, C_{\tau})$ , каждая точка которой получена совместным решением систем уравнений (7) и (9) и вычислением значения  $J_e$ , соответствующего полученному решению, с помощью формулы (24). Значения коэффициентов  $C_e$  и  $C_{\tau}$  будут изменяться в следующих диапазонах:

$$C_{\tau} \in [0,02 \quad 0,034], \ C_{e} \in [0,02 \quad 0,08].$$
 (27)

Анализируя полученную поверхность (рис. 5), заметим, что значение параметра  $C_{\tau}$  оказывает значительно большее влияние на величину  $J_e$ , чем значение  $C_e$ . Можно показать, что при достаточно большом  $C_{\tau}$  значение  $C_e$  можно выбирать произвольно в рассмотренном диапазоне (27), сохраняя качество работы системы управления по критерию (24). Данное наблюдение проиллюстрировано на рис. 6, где показана область в пространстве параметров  $C_e$ ,  $C_{\tau}$  при  $J_e$ , удовлетворяющему условию

$$J_e < 0.1$$
 (28)

Изображение на рис. 6 свидетельствует о том, что величина  $C_e$  оказывает влияние на принадлежность  $J_e$  к одной из областей только тогда, когда  $C_{\tau} \in [0,023; 0,028]$ . При  $C_{\tau} < 0,023$ условие (28) не выполняется вне зависимости от выбора  $C_e$ , а при  $C_{\tau} > 0,028$  оно выполняется при любом  $C_e \in [0,02; 0,08]$ .

Рассмотрим влияние значений параметров  $C_e$ ,  $C_{\tau}$  на критерий качества (26). Для этого построим поверхность  $J_I = J_I (C_e, C_{\tau})$  (рис. 7).

При увеличении значения параметра  $C_{\tau}$  на 10% (с величины 0,022 до 0,0242) функция  $J_I$  уменьшилась на 38%, тогда как при анало-











Рис. 7. Поверхность  $J_I = J_I (C_e, C_{\tau})$ 



Рис. 8. Области в пространстве параметров  $C_e, C_{\tau}$ : 1 – область, где выполняется условие (29);

2 - область, где указанное условие не выполняется



Рис. 9. Временные зависимости обобщенных координат и их желаемые значения при  $C_e = 0,0315$  и  $C_{\tau} = 0,024$ :  $1 - \varphi_2(t); 2 - \varphi_3(t), 3 - \varphi_4(t);$  $4 - \varphi_2^*(t); 5 - \varphi_3^*(t); 6 - \varphi_4^*(t)$ 



 $1 - \varphi_2(t); 2 - \varphi_3(t); 3 - \varphi_4(t);$  $4 - \varphi_2^*(t); 5 - \varphi_3^*(t); 6 - \varphi_4^*(t)$  гичном изменении  $C_e$  функция  $J_I$  изменилась лишь на 0,2 %. Таким образом, параметр  $C_{\tau}$ оказывает большее влияние, чем  $C_e$ , как на величину  $J_I$ , так и на  $J_e$ . Это сходство в поведении критериев  $J_I$  и  $J_e$  объясняется тем, что значения токов связаны со значением ошибки управления через уравнения (9) и (15).

Найдем область в пространстве параметров  $C_e$ ,  $C_{\tau}$ , где  $J_I$  удовлетворяет условию

$$J_I < 3000$$
. (29)

Искомая область показана на рис. 8.

Условие (29) накладывает более строгие ограничения на значения  $C_{\tau}$ , чем условие (28), делая допустимыми значения  $C_{\tau} > 0,03$  при любом  $C_e$  и  $C_{\tau} > 0,029$  при  $C_e > 0,07$ .

Для того чтобы изучить характер движения электромеханической системы, для констант, попадающих в область 1 на рис. 6, построим временные зависимости обобщенных координат для случая, когда  $C_e = 0,0315$  и  $C_{\tau} = 0,024$  (рис. 9).

Максимальное значение ошибки управления в процессе движения механизма составило 0,042 рад. Рассмотрим, как изменится характер движения экзоскелета при уменьшении  $C_{\tau}$ на 8 %, до  $C_{\tau} = 0,022$ . Временные зависимости обобщенных координат для этого случая показаны на рис. 10.

Для данного случая максимальное отклонение временных зависимостей обобщенных координат от желаемых значений значительно возросло и составило 2 рад. На практике это может привести к потере управляемости механизма и его падению. Этот пример показывает, что выбор коэффициентов  $C_e$  и  $C_{\tau}$  оказывает существенное влияние на поведение рассматриваемой электромеханической системы. Предложенные критерии качества позволяют производить выбор желаемых значений  $C_e$ и  $C_{\tau}$  и подбирать электроприводы с соответствующими характеристиками.

#### Заключение

В данной работе была рассмотрена математическая модель многозвенной электромеханической системы на примере экзоскелета нижних конечностей с учетом свойств электропривода и системы управления. Было описано движение экзоскелета в процессе вертикализации, приведены области параметров электродвигателей обеспечивающие приемлемое качество выполняемого движения. В статье описана система автоматического управления, предложен метод определения задающих воздействий, позволяющий сохранить вертикальную устойчивость электромеханической системы. Введены критерии качества работы системы автоматического управления, произведен анализ влияния параметров электроприводов на качество работы системы управления.

### Список литературы

- 1. Jatsun S., Savin S., Bezmen P. Modelling of exoskeleton movement in verticalization process // Proceedings of the International Conference on Pure Mathematics – Applied Mathematics (PM-AM 2015), Vienna, Austria, 2015. P. 83–87.
- 2. *Ленк А.* Электромеханические системы. М.: Энергоиздат, 1982. 472 с.
- Розанов Ю.К., Соколова Е.М. Электронные устройства электромеханических систем. М.: Академия, 2004. – 272 с.
- Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. М.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
- 5. Акимов Л.В., Колотило В.И. Электромеханические системы скорости и положения с наблюдателями состояния. Харьков: ХГПУ, 1999. – 81 с.
- Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, R. Turlapov // InMechatronics and its Applications (ISMA), 2015. 10th International Symposium on 2015 Dec 8. IEEE. P. 1–6.
- Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization / S. Jatsun, S. Savin, B. Lushnikov, A. Yatsun // ITM Web of Conferences. 2016. Vol. 6. 01001 (5 pages).
- System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology / S. Jatsun, S. Savin, B. Lushnikov, A. Yatsun // ITM Web of Conferences. 2016. Vol. 6. 03006 (5 pages).
- Wearable gait measurement system with an instrumented cane for exoskeleton control / *M. Hassan, H. Kadone, K. Suzuki, Y. Sankai //* Sensors. 2016. Vol. 14. No. 1. P. 1705–1722.
- 10. Contreras-Vidal Jose L., and Robert G. Grossman. NeuroRex: A clinical neural interface roadmap

for EEG-based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton // Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013. 35th Annual International Conference of the IEEE. IEEE, 2013. P. 1579–1582.

- Kiguchi K., Takakazu T., Toshio F. Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals // Fuzzy Systems, IEEE Transactions on 12.4. 2004. P. 481–490.
- 12. *Aphiratsakun N., Manukid P.* Balancing control of AIT leg exoskeleton using ZMP based FLC // International Journal of Advanced Robotics Systems 6.4. 2009. P. 319–328.
- Aphiratsakun N., Kittipat C., Manukid P. Design and Balancing Control of AIT Leg EXoskeleton-I (ALEX-I). ICINCO-RA (1). 2008. P. 151–158.
- Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // The International Journal of Robotics Research. May 2006. Vol. 25. No. 5–6. P. 561–573.
- 15. On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) / *H. Kazerooni, JL Racine, L. Huang, R. Steger* // In Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE international conference on 2005 Apr 18, IEEE. P. 4353–4360.
- Steger R., Kim S., Kazerooni H. Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // In Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on 2006 May 15, IEEE. P. 3469–3476.
- Pratt J., Krupp B. and Morse C. Series elastic actuators for high fidelity force control // Industrial Robot: an International Journal. 2002. Vol. 29. No. 3. P. 234–241.
- A series elastic-and bowden-cable-based actuation system for use as torque actuator in exoskeleton-type robots / J.F. Veneman, R. Ekkelenkamp, R. Kruidhof, F.C. van der Helm, H. van der Kooij // The International Journal of Robotics Research. 2006. Vol. 25. No. 3. P. 261–281.
- 19. *Craig J.J.* Introduction to robotics: mechanics and control // Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. 2005. Vol. 3. P. 48–70.
- 20. Синтез параметров регулятора экзоскелета, с использованием lpt последователь-

ностей / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, И.А. Яковлев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. 2015. № 4 (17). С. 24–31.

21. Яцун С.Ф., Савин С.И., Яцун А.С. Синтез регулятора системы автоматического управления экзоскелетом для вертикализации пациентов // Перспективные задачи и системы управления. Материалы XI Всероссийской научной конференции, Ростов-на-Дону, 2016. С. 64–74.

22. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, A. Malchikov // In Advances in Robot Design and Intelligent Control. 2016. P. 165–172.

Материал поступил в редакцию 08.04.2016

ПАНОВКО Григорий Яковлевич E-mail: gpanovko@yandex.ru Тел.: (499) 135-30-47	Доктор технических наук, профессор. Заслуженный деятель науки РФ, зав. лабораторией вибромеханики ИМАШ РАН, действительный член Рос- сийской инженерной академии и Международной академии наук высшей школы. Сфера научных интересов – общие вопросы нелинейных колебаний машин и технологического оборудования, применение вибрации для интен- сификации технологических процессов в различных областях техники (ви- бротехника), виброзащита машин, приборов, оборудования. Автор шести монографий, более 150 научных статей, 15 патентов.
<b>ЯЦУН</b> Сергей Федорович E-mail: teormeh@inbox.ru Тел.: (4712) 22-26-26	Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой механики, ме- хатроники и робототехники ЮЗГУ. Сфера научных интересов – мобильная робототехника, методы синтеза и анализа систем автоматического управ- ления робототехнических систем, вибрационная техника. Автор 10 моногра- фий, более 300 научных статей, 94 патентов.
САВИН Сергей Игоревич E-mail: savin@swsu.ru Тел.: (4712) 22-26-26	Кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры механи- ки, мехатроники и робототехники ЮЗГУ. Сфера научных интересов – прин- ципы управления экзоскелетами, вопросы математического моделирования механических систем, методы численной оптимизации. Автор одной моно- графии, более 30 научных статей, 20 патентов.
ЯЦУН Андрей Сергеевич Е-mail: ayatsun@ya.ru Тел.: (4712) 22-26-26	Кандидат технических наук. Заведующий лабораторией мехатроники и ро- бототехники ЮЗГУ. Сфера научных интересов – цифровые системы автома- тического управления, общие вопросы управления робототехническими си- стемами, вибрационная техника. Автор двух монографий, более 70 научных статей, восьми патентов.