

С.Т. МЕЛКОНЯН, С.А. САРГСЯН, М.Г. АРУТЮНЯН,  
К.Г. СТЕПАНЯН, Ю.Л. САРКИСЯН

## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БИОМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

Рассмотрены задачи динамического анализа и оптимального управления биомехатронных систем, образованных конечностями человека и электромеханическими устройствами реабилитации и усиления их двигательных функций, построенных на базе манипуляционных механизмов с антропоморфной структурой.

**Ключевые слова:** биомехатронная система, реабилитационное устройство, манипуляционный механизм, динамический анализ, оптимальное управление, уравнения Лагранжа-Максвелла.

**Введение.** Разработка систем, ориентированных на восстановление физической трудоспособности и полноценной жизнедеятельности человека, является одной из важных и насущных проблем современного общества. Временная или постоянная потеря двигательных функций человека компенсируется посредством разнообразных реабилитационных устройств различного уровня совершенства [1-3]. Известны, в частности, простейшие механические системы ортезов, дублирующих кинематические функции конечностей человека и восполняющих их жесткость и несущую способность. Однако они имеют ограниченный диапазон возможностей, позволяющих их использование только при функционировании нервно-мышечной системы. Возможности подобных реабилитационных устройств несколько расширяются использованием механических разгрузателей: пружин, уравнивающих силы тяжести сегментов конечностей, что позволяет прикладывать минимальные мышечные двигательные усилия [3].

Более совершенны и универсальны реабилитационные устройства, снабженные электромеханическими, гидравлическими и пневматическими приводами, значительно расширяющими спектр их полноценных приложений. Последние могут быть использованы при наличии более серьезных проблем опорно-двигательного аппарата, а также в целях увеличения физических возможностей человека в специальных областях его деятельности, таких как военная и космическая [4].

Наиболее высокий уровень рассматриваемых систем представлен мехатронными реабилитационными устройствами, располагающими возможностями реализации управляемых двигательных функций человека. Этот

класс реабилитационных устройств, существенно отличаясь от описанных выше, обладает характерными признаками робототехнических систем [3-5] и известен как робототехнические реабилитационные устройства.

Проблема разработки медицинских роботов имеет комплексный характер, охватывая ряд вопросов биомедицины, механики, робототехники, электромеханики и оптимального управления. Однако применительно к реабилитационным устройствам может быть очерчен конкретный круг задач, а также выделены особенности, сужающие и ограничивающие рамки исследования. В частности, таковыми являются требования обеспечения портативности, уравновешенности, малой энергоемкости, дешевизны и оптимальной управляемости исследуемого класса устройств [4].

В статье рассмотрены задачи динамического анализа и оптимального управления биомехатронных систем реабилитационных устройств конечностей человека, построенных на базе разомкнутых кинематических цепей, лежащих в основе антропоморфных манипуляторов. Использованы методология и вычислительные методы, разработанные авторами в [6] с применением дифференциальных уравнений Лагранжа-Максвелла для голономных систем. Описанные в [6] алгоритмы динамического анализа и оптимального управления электромеханических манипуляторов произвольной структуры здесь значительно модифицированы и усовершенствованы с упрощением вычислительного процесса.

**1. Динамическое исследование биомехатронных систем.** Специфика моделирования биомехатронных систем обусловлена совместной и согласованной работой биологической и электромеханической систем, синергетически интегрированных, дополняющих друг друга и действующих совместно для достижения цели восполнения и усиления двигательных функций человека. Существенные особенности моделируемых систем проявляются как в их структуре, так и кинематике и динамике. Таковыми являются подвижности в кинематических парах, ограничения, накладываемые на перемещения, скорости и ускорения, а также массы звеньев и приводов.

Модель биомехатронной системы, включающей реабилитационное устройство, параллельно соединенное с конечностью человека и дублирующее ее кинематику, представлена схематично на рис. 1 (здесь не показаны приводы).

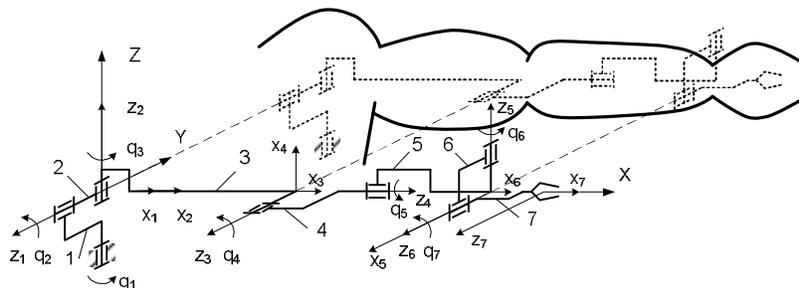


Рис. 1. Структурная схема реабилитационного устройства конечности

Особенностями биомехатронных систем являются также элементы управления, каковыми могут служить как микроконтроллеры, вмонтированные в приводы, так и нейросенсоры, связанные с биологической частью системы. Целью динамического исследования является определение электрических напряжений, токов и мощностей приводов, обеспечивающих заданное движение системы. При этом по требуемой мощности могут быть подобраны приводы реабилитационного устройства.

Предполагается, что управление его движениями осуществляется электродвигателями постоянного тока, которые размещены в кинематических парах. Тогда поведение системы будет описываться известными уравнениями Лагранжа-Максвелла в виде

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}(p, q)\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk}(p, q)\dot{q}_j\dot{q}_k + a_i(p, q)I_i = Q_i(p, q), \quad (1)$$

$$L_i\dot{I}_i + b_i(p, q, \dot{q}, I) = U_i - I_i R_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ ,  $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$ ,  $\ddot{q} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n)$  - вектор-функции обобщенных координат, скоростей и ускорений механической части системы;  $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$  - вектор-функция сил тока, возникающих в роторах электродвигателей;  $p = (p_1, p_2, \dots, p_v)$  - вектор постоянных параметров электромеханической системы;  $U_i$  - напряжения в роторах;  $R_i$  - сопротивления в электроцепях, а  $a_{ij}(p, q)$ ,  $a_{ijk}(p, q)$ ,  $a_i(p, q)$ ,  $Q_i(p, q)$  и  $b_i(p, q, \dot{q}, I)$  - известные функции названных параметров.

На основе уравнений (1) и (2) разработан универсальный метод решения прямой и обратной задач динамики мехатронной системы [6].

Анализ показывает, что при построении оптимальных движений мехатронных систем без введения дополнительных сил приходится решать смешанную задачу динамики, постановка и алгоритм реализации которой приводятся ниже.

Допустим, заданы вектор постоянных параметров электромеханической системы  $p = (p_1, p_2, \dots, p_v)$ , а также законы изменения

$$q_j = q_j(t), \quad \dot{q}_j = \dot{q}_j(t), \quad \ddot{q}_j = \ddot{q}_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

обобщенных координат, скоростей и ускорений ее механической части. Требуется определить законы изменения напряжений  $U_i = U_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в электрических цепях в зависимости от времени так, чтобы они обеспечили заданные законы изменения (3) обобщенных координат системы. Задача решается численным методом по следующему алгоритму.

1. В период времени  $[0, \tau]$  движения электромеханической системы вводим равномерно распределенную сетку  $0, t_1, t_2, \dots, t_N = \tau$ ,  $t_r = r \cdot \Delta t$ ,  $\Delta t = \tau / N$  ( $r = 0, 1, 2, \dots, N$ ).

2. Для момента времени  $t = t_r$  ( $r = 0, 1, 2, \dots, N$ ) определяем значения  $q_{jr} = q_j(t_r)$ ,  $\dot{q}_{jr} = \dot{q}_j(t_r)$ ,  $\ddot{q}_{jr} = \ddot{q}_j(t_r)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  обобщенных координат, скоростей и ускорений механической части.

3. Подставляя значения  $q_j = q_{jr}$ ,  $\dot{q}_j = \dot{q}_{jr}$ ,  $\ddot{q}_j = \ddot{q}_{jr}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) обобщенных координат, скоростей и ускорений в систему уравнений (1) и решая ее относительно сил тока  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), получаем их значения  $I_{ir} = I_i(t_r)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в момент времени  $t = t_r$ .

4. Осуществляя пункты 1-3 данного алгоритма для случаев  $r = 0, 1, 2, \dots, N$ , получаем искомые значения указанных параметров в узловых точках построенной выше сетки.

5. Принимая обобщенные ускорения  $\dot{I}_i$  электрической части постоянными в период времени  $[t_r, t_{r+1}]$  ( $r = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ), определяем их значения в моменты времени  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$  с помощью выражений

$$\dot{I}_{jr} = \frac{I_{i(r+1)} - I_{ir}}{\Delta t}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad r = 0, 1, 2, \dots, N.$$

6. Подставляя для каждого момента времени  $t_r$  ( $r=0,1,2,\dots,N$ ) значения обобщенных координат, скоростей и ускорений  $q_j = q_{jr}$ ,  $\dot{q}_j = \dot{q}_{jr}$ ,  $I_i = I_{ir}$ ,  $\dot{I}_i = \dot{I}_{ir}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) в систему уравнений (2) и решая ее относительно напряжений  $U_i$ , получаем их значения  $U_{ir} = U_i(t_r)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $r = 0, 1, 2, \dots, N$ ) в момент времени  $t=t_r$ .

**2. Численный пример: динамический анализ экзоскелетона.** Рассмотрена система с четырьмя степенями свободы (рис.2), образованная реабилитационным устройством и нижней конечностью человека, которая представляет собой частный случай модели, приведенной на рис.1.

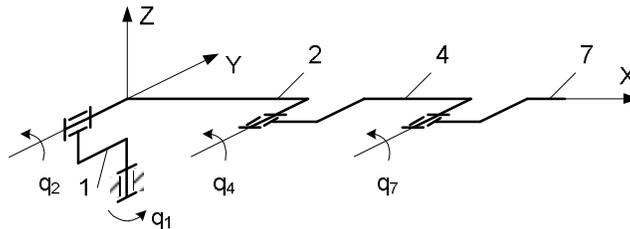


Рис. 2. Схема четырехподвижного экзоскелетона нижней конечности

Задача решена по алгоритму, приведенному выше, при следующих значениях масс:  $m_2 = 8 \text{ кг}$ ,  $m_4 = 4 \text{ кг}$ ,  $m_7 = 1 \text{ кг}$  и длин  $l_2 = 0,4 \text{ м}$ ,  $l_4 = 0,4 \text{ м}$ ,  $l_7 = 0,2 \text{ м}$  звеньев 2, 4 и 7. Выбраны электромоторы типа ПЯ-125 ( $m_p = 1 \text{ кг}$ ,  $m_{ct} = 1,5 \text{ кг}$ ) для привода 2-го звена, ПЯ-50 ( $m_p = 0,5 \text{ кг}$ ,  $m_{ct} = 1,5 \text{ кг}$ ) - для приводов 1-го и 4-го звеньев и ПЯ-20 ( $m_p = 0,4 \text{ кг}$ ,  $m_{ct} = 0,4 \text{ кг}$ ) - для привода 7-го звена. Передаточные отношения редукторов приводов составляют:  $u_1 = u_4 = u_7 = 50$ ,  $u_2 = 100$ .

В соответствии с возможными движениями конечности выбраны следующие законы изменения обобщенных координат:

$$q_1(t) = \frac{\pi}{9} \sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right), \quad q_2 = \frac{\pi}{2} \sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right) - \frac{\pi}{6}, \quad q_4 = \frac{\pi}{3} \left(1 - \frac{1}{2} \sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right)\right),$$

$$q_7 = \frac{\pi}{3} \left(1 + \frac{1}{3} \sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right)\right) \text{ для } t \in [0; 2,25], \text{ графики которых приведены на}$$

рис. 3.

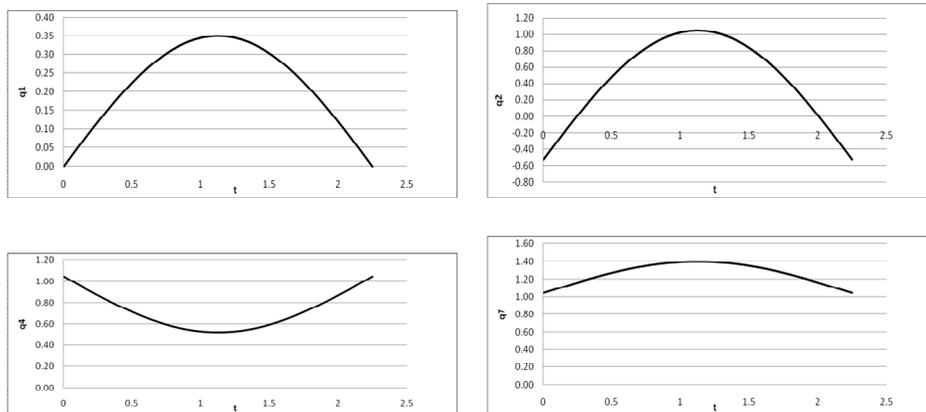


Рис. 3. Законы изменения обобщенных координат экзоскелетона

В результате численного моделирования получены зависимости от времени сил, напряжений и мощностей тока якорей приводов. Законы изменения мощностей приводов представлены на рис. 4.

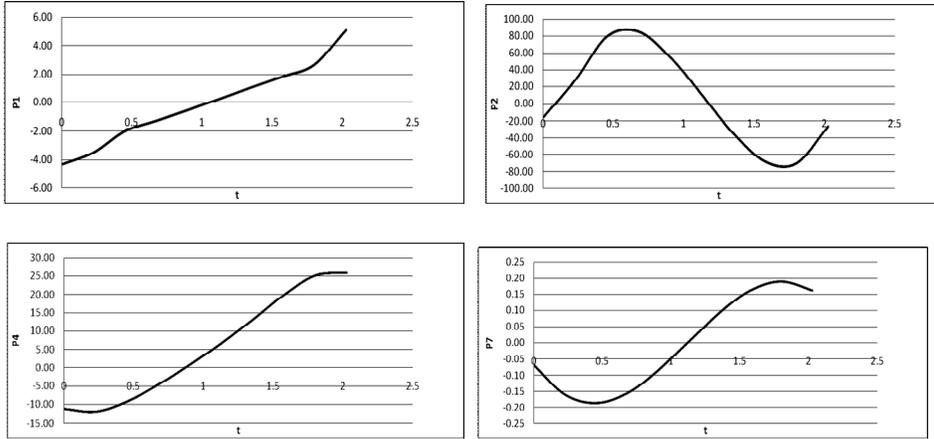


Рис. 4. Электрические мощности приводов экзоскелетона

**3. Оптимальное управление биомехатронных систем.** Наличие большого числа степеней свободы в мехатронных системах позволяет осуществлять движения их исполнительных механизмов различными способами, что, в свою очередь, позволяет при построении движений учитывать ряд дополнительных условий. В частности, представляется возможным из множества законов движения выбрать такие, которые минимизируют заданные критерии качества, характеризующие эффективность функционирования системы. Такие требования приводят к задачам оптимального управления, которые в данном случае можно сформулировать следующим образом.

Допустим, поведение мехатронной системы описывается системами уравнений (1)-(2). Обозначим вектор-функции обобщенных координат и ускорений механической части соответственно через  $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$  и  $\dot{q}(t) = (\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_n(t))$ , вектор-функцию обобщенных координат электрической части -  $I(t) = (I_1(t), I_2(t), \dots, I_k(t))$ , а вектор-функцию напряжений электрической части -  $U(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t))$ . В дальнейшем пару  $(q(t), \dot{q}(t))$  назовем фазовыми координатами, а  $U(t)$  - функцией управления или просто управлением.

Допустим, задан также критерий качества

$$\Psi_0(q, \dot{q}, I, U) = \int_0^{\tau} f_0(q, \dot{q}, I, U) dt, \quad (4)$$

оценивающий работу мехатронной системы, а также его начальное

$$C_0 = (q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}, \dot{q}_{10}, \dot{q}_{20}, \dots, \dot{q}_{n0}) \quad (5)$$

и конечное

$$C_\tau = (q_{1\tau}, q_{2\tau}, \dots, q_{n\tau}, \dot{q}_{1\tau}, \dot{q}_{2\tau}, \dots, \dot{q}_{n\tau}) \quad (6)$$

состояния в моменты времени  $t=0$  и  $t=\tau$ , где функция  $f_0(q, \dot{q}, I, U)$  определена постановкой задачи.

Требуется из всех возможных фазовых координат  $(q(t), \dot{q}(t))$  и функций управления  $U(t)=(U_1(t), \dots, U_n(t))$  определить такие, которые удовлетворяют уравнениям (1) и (2) и, переводя систему из начального состояния (5) в конечное (6), минимизируют критерий качества (4) при ограничениях:

$$f_{1j}(t) \leq q_j(t) \leq f_{2j}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$f_{3j}(t) \leq \dot{q}_j(t) \leq f_{4j}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n,$$

$$f_{5i}(t) \leq I_i(t) \leq f_{6i}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$f_{7i}(t) \leq U_i(t) \leq f_{8i}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad i=1, 2, \dots, n,$$

где  $f_{1j}(t), f_{2j}(t), \dots, f_{8j}(t)$  - известные функции.

Для решения рассматриваемой задачи можно применить известные численные методы оптимального управления. Однако в данном случае это приведет к громоздким вычислениям. Ниже приводится упрощенный итерационный метод решения указанной задачи, который учитывает ограничения (7) и (8).

Для решения задачи предлагаемым методом в период времени  $[0, \tau]$  движения системы вводится равномерно распределенная сетка  $0, t_1, t_2, \dots, t_N = \tau$ ,  $t_r = r \cdot \Delta t$ ,  $\Delta t = \tau / N$  ( $r = 0, 1, 2, \dots, N$ ). Далее по узловым точкам сетки дискретизируются критерий качества (4) и ограничения (7) и (8), в результате чего они представляются в виде

$$\Psi_0 = \sum_{r=0}^N f_0(q_r, \dot{q}_r, I_r, U_r) \Delta t, \quad (9)$$

$$f_{1j}(t_r) \leq q_j(t_r) \leq f_{2j}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

$$f_{3j}(t_r) \leq \dot{q}_j(t_r) \leq f_{4j}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n,$$

$$f_{5i}(t_r) \leq I_i(t_r) \leq f_{6i}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

$$f_{7i}(t_r) \leq U_i(t_r) \leq f_{8i}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad i=1, 2, \dots, n.$$

Решение задачи ищем в виде полиномов

$$q_j(t) = \varphi_{j0}(t) + \sum_{l=1}^m \varphi_{jl}(t) c_{jl}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

удовлетворяющих граничным условиям (5) и (6), где

$$\varphi_{j0}(t) = q_{j0} + \dot{q}_{j0}t + (3(q_{j\tau} - q_{j0}) - (\dot{q}_{j\tau} + 2\dot{q}_{j0})\tau)\tau^{-2}t^2 + (2(q_{j0} - q_{j\tau}) + (\dot{q}_{j0} + \dot{q}_{j\tau})\tau)\tau^{-3}t^3,$$

$$\varphi_{jl}(t) = l\tau^{l+1}t^2 - (l+1)\tau^l t^3 + t^{l+3}.$$

Нетрудно заметить, что при таком предположении искомыми параметрами в поставленной задаче являются коэффициенты  $c_{jl}$  полиномов (12) и функция управления  $U(t) = (U_1(t), \dots, U_n(t))$ , которые определяются по следующему алгоритму.

1. В  $n \times m$ -мерном пространстве искомого параметров  $c = (c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1m}, \dots, c_{n1}, c_{n2}, \dots, c_{nm})$  выбираем произвольную начальную точку  $c^0$  и с учетом полученных из (12) законов изменения обобщенных координат механической части мехатронной системы решением смешанной задачи динамики, приведенной выше, определяем параметры  $I_{ir}^0$  и  $U_{ir}^0$  ( $i = 1, 2, \dots, n, r = 0, 1, 2, \dots, N$ ) электрической части, а затем вычисляем значение  $\psi_0^0$  критерия качества (9). Отметим, что начальную точку выбираем так, чтобы выполнялись все ограничения (10) и (11).

2. Вокруг точки  $c^0$  строим гиперкуб со стороной  $2\delta$  и с помощью датчика случайных чисел в гиперкубе генерируем  $N_1$  равномерно распределенных точек  $c^k$  ( $k = 1, 2, \dots, N_1$ ).

3. Для всех точек  $c^k$  по аналогии с пунктом 1 настоящего алгоритма из решения смешанной задачи динамики определяем значения  $q_{jr}^k, \dot{q}_{jr}^k, \ddot{q}_{jr}^k, I_{ir}^k, U_{ir}^k$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n, r = 0, 1, \dots, N$ ) искомого параметров в узловых точках построенной сетки.

4. Для полученных значений  $q_{jr}^k, \dot{q}_{jr}^k, I_{ir}^k$  и  $U_{ir}^k$  проверяем ограничения (10) и (11) и среди индексов  $k$  выбираем те, для которых они выполняются.

5. Для полученных индексов  $k$  вычисляем значения  $\psi_0^k$  критерия качества (9) и среди них определяем такое значение  $k_0$ , при котором

$$\psi_0^{k_0} = \min_{\{k\}} \psi_0^k.$$

6. Проверяем условие  $\psi_0^{k_0} \leq \psi_0$ . Если оно выполняется, то точку  $c^0$  заменяем точкой  $c^{k_0}$  и переходим к пункту 2 настоящего алгоритма. В противном случае, размеры  $2\delta$  гиперкуба уменьшаем в два раза и снова переходим к пункту 2.

Решение задачи заканчивается, когда размеры гиперкуба удовлетворяют условию  $2\delta \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  - заданная точность вычислений. Полученные на

последнем этапе значения искомым параметров представляют решения поставленной задачи.

**4. Численный пример: оптимальное управление экзоскелетом.** Рассмотрена система с четырьмя степенями свободы (см.рис.2), образованная реабилитационным устройством и нижней конечностью человека.

Критерием (9) оптимальности управления выбрана электрическая мощность приводов устройства, которая в данном случае принимает следующий вид:

$$\Psi = \sum \left( (U_1 I_1)^2 + (U_2 I_2)^2 + (U_4 I_4)^2 + (U_7 I_7)^2 \right).$$

Задача решена по алгоритму, приведенному выше, при тех же параметрах системы (см. п. 3) и следующих краевых условиях:  $q_{10} = 0$ ,  $\dot{q}_{10} = \frac{\pi^2}{9\tau}$ ,  $q_{1\tau} = 0$ ,  $\dot{q}_{1\tau} = -\frac{\pi^2}{9\tau}$ ,  $q_{20} = -\frac{\pi}{6}$ ,  $\dot{q}_{20} = \frac{\pi^2}{2\tau}$ ,  $q_{2\tau} = -\frac{\pi}{6}$ ,  $\dot{q}_{2\tau} = -\frac{\pi^2}{2\tau}$ ,  $q_{40} = \frac{\pi}{3}$ ,  $\dot{q}_{40} = -\frac{\pi^2}{6\tau}$ ,  $q_{4\tau} = \frac{\pi}{3}$ ,  $\dot{q}_{4\tau} = \frac{\pi^2}{6\tau}$ ,  $q_{70} = \frac{\pi}{3}$ ,  $\dot{q}_{70} = \frac{\pi^2}{9\tau}$ ,  $q_{7\tau} = \frac{\pi}{3}$ ,  $\dot{q}_{7\tau} = -\frac{\pi^2}{9\tau}$ .

Алгоритм реализован при следующих начальных значениях искомым параметров:  $c_{11} = 0, c_{12} = 0, c_{21} = 0, c_{22} = 0, c_{41} = 0, c_{42} = 0, c_{71} = 0, c_{72} = 0$ , для которых критерий качества равен  $\Psi_0 = 70270$ . Получены следующие значения искомым параметров:  $c_{11} = 0,502, c_{12} = -2,196, c_{21} = -0,221, c_{22} = -5,381, c_{41} = 0,148, c_{42} = 0,531, c_{71} = 2,324, c_{72} = -1,07$ , при которых целевая функция принимает значение  $\Psi = 8123$ .

На рис. 5 и 6 приведены графики изменения обобщенных координат и мощностей приводов звеньев, соответственно, пунктирными линиями - до оптимизации, а сплошными - после оптимизации.

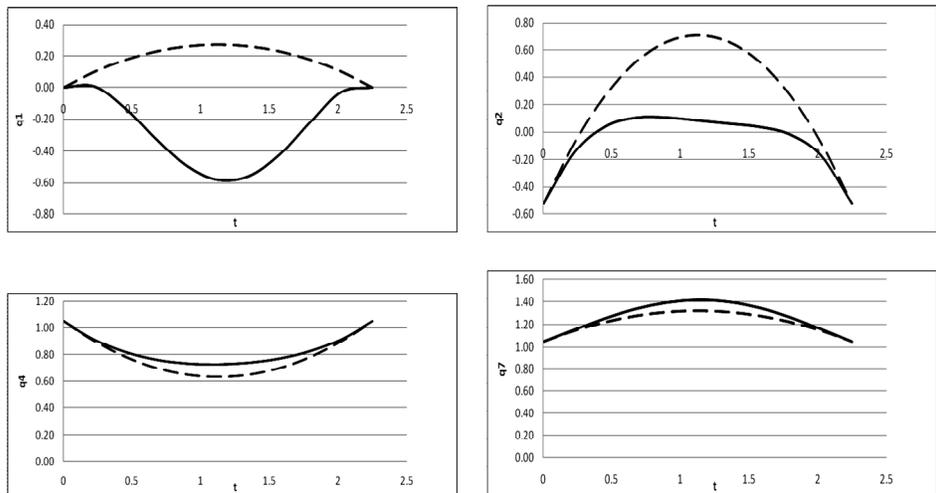


Рис. 5. Законы изменения обобщенных координат экзоскелетона до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) оптимизации

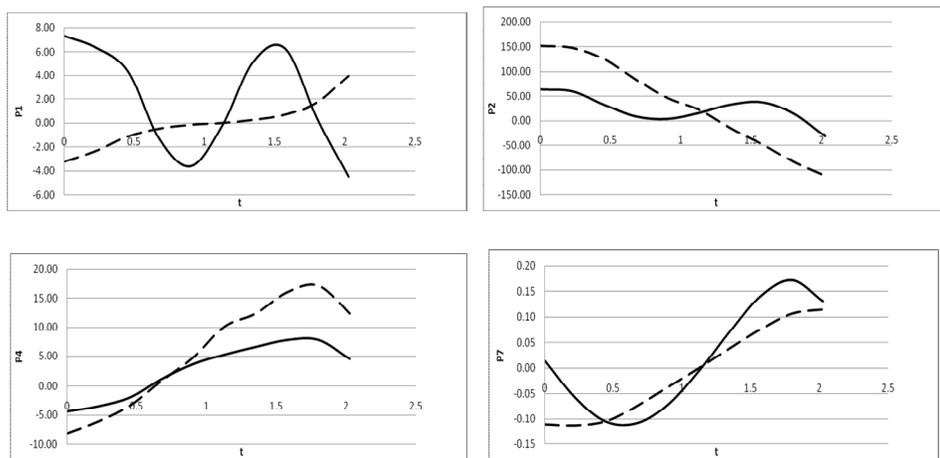


Рис. 6. Электрические мощности приводов экзоскелетона до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) оптимизации

**Заключение.** Составлена динамическая модель биомехатронной системы конечности человека с экзоскелетом и решена смешанная задача ее динамики. На основании общей математической теории оптимальных процессов рассмотрена задача оптимального управления реабилитационных устройств конечностей человека, построенных на базе антропоморфных манипуляционных механизмов с разомкнутой кинематической цепью. Представление решения задачи в виде степенных рядов позволило значительно сократить число искомых

параметров, что, в свою очередь, привело к уменьшению объема вычислений. Эффективность алгоритма проиллюстрирована на примере оптимального управления четырехподвижным экзоскелетом по критерию минимума энергозатрат.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Agrawal S.K. and Fattah A.** Theory and design of an orthotic device for full or partial gravity-balancing of a human leg during motion// IEEE Transactions of Neural Systems and Rehabilitation Engineering.- 2004.-Vol.12, N2.-P.157-165.
2. **Arakelian V. and Ghazaryan S.** Gravity balancing of the human leg taking into account the spring mass// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR).- Brussels, Belgium, 2006.-P.630-635.
3. **Arakelian V. and Ghazaryan S.** Improvement of balancing accuracy of robotic systems: Application to leg orthosis for rehabilitations devices// Journal of Mechanism and Machine Theory.-2008.-43(5).-P.565-575.
4. **Казарян С.Д., Аракелян В.А., Арутюнян М.Г.** Динамический анализ статически уравновешенного приводного ортопедического устройства ноги // Вестник Инженерной академии Армении.-2008.-Т.5, N3. - С. 420-423.
5. **Ստեփանյան Շ.Գ., Արզումանյան Շ.Ս., Մելքոնյան Ս.Ս.** Բժշկական նշանակության սարքերի էլեկտրամեխանիկական համակարգերի դինամիկական վերլուծությունը // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողով: Նյութերի ժողովածու. - Երևան, 2010.-Հատոր 2, N 1. - Էջ.74-78:
6. **Мелконян С.Т., Степанян К.Г., Арзуманян К.С., Саркисян Ю.Л.** Оптимальное управление манипуляторами с учетом характеристик электроприводов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. – Том LXIII, N 2. – С. 111 – 122.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 02.02.2011.

Մ.Տ. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ, Ս.Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Մ.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ,  
Կ.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՄԱՐԴՈՒ ՎԵՐՁՈՒՑԹՆԵՐԻ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՈՂԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ  
ԿԵՆՍԱՄԵԽԱՏՐՈՆԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՂԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ  
ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄ

Դիտարկված են մարդու վերջույթներից և դրանց շարժողական ֆունկցիաները փոխարինող և ուժեղացնող էլեկտրամեխանիկական վերականգնողական սարքերից կազմված կենսամեխատրոնային համակարգերի ղինամիկական վերլուծության և օպտիմալ կառավարման խնդիրները: Ուսումնասիրվող ռոբոտատեխնիկական սարքերը կառուցվում են անտրոպոմորֆ կառուցվածքով մանիպուլյացիոն մեխանիզմների հիման վրա:

**Առանցքային բառեր.** կենսամեխատրոնային համակարգ, վերականգնողական սարք, մանիպուլյացիոն մեխանիզմ, ղինամիկական վերլուծություն, օպտիմալ կառավարում, Լագրանժ-Մաքսվելի հավասարումներ:

S.T. MELKONYAN, S. A. SARGSYAN, M.G. HARUTYUNYAN,  
K.G. STEPANYAN, YU.L. SARKISSYAN

DYNAMIC ANALYSIS AND OPTIMAL CONTROL OF BIOMECHATRONIC SYSTEMS OF  
REHABILITATION DEVICES FOR HUMAN EXTREMETIES

Problems of dynamic analysis and optimal biomechatronic systems control of electromechanical devices for the rehabilitation and reinforcement of human motor functions are considered. The robotic devices under consideration are based on the manipulation mechanisms with an open looped anthropomorphic structure.

**Keywords:** biomechatronic system, rehabilitation device, manipulation mechanism, optimal control, Lagrange-Maxwell equations.