

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РУХУ ТА ПАРАМЕТРІВ ДВОЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА З АКТИВНИМИ Й ПАСИВНИМИ ПРИВОДАМИ

Досліджується керований рух дволанкового маніпулятора у вертикальній площині, який виконує циклічну транспортну операцію під дією активних і пасивних приводів. Пасивні приводи подано як комбінацію лінійних пружин і демпферів. Сформульовано задачу оптимізації законів руху маніпулятора та конструкційних параметрів пасивних приводів. За цільовий функціонал вибрано енергозатрати на виконання циклічної транспортної операції. Розроблено алгоритм наближеного розв'язання задачі, який ґрунтується на параметризації узагальнених координат маніпулятора множиною заданих функцій, використанні концепції обернених задач динаміки та чисельних процедур нелінійного математичного програмування.

Актуальність задач оптимізації маніпуляційних систем зумовлена відносно широким розповсюдженням цих систем у різних галузях техніки і промисловості та постійною потребою у підвищенні технічного рівня і якості їх функціонування [9, 12]. Серед маніпуляційних роботів особливе місце займають дволанкові маніпулятори. Ці дволанкові системи є складовими частинами більшості маніпуляційних роботів антропоморфного типу, в яких лінійні розміри двох суміжних ланок значно перевищують розміри решти ланок. При цьому основний обсяг транспортних рухів маніпулятора здійснюють саме ці дві ланки. Тому дволанкові маніпуляційні системи вже тривалий час привертають увагу багатьох дослідників.

Задачі оптимізації режимів керувань дволанкових маніпуляторів досліджувались, зокрема, в працях [1, 11, 12, 15, 17]. У роботі [1] розглянуто задачу розрахунку субоптимальних (за швидкодією) програмних режимів керування для дволанкового маніпулятора. Розв'язок будується у чотирипараметричному класі кусково-сталих режимів керування. Аналогічна задача про найшвидший поворот дволанкового маніпулятора досліджується в [11]. Значна частина монографії [12] присвячена задачам побудови оптимальних і субоптимальних програмних керувань для дволанкового маніпулятора. У статтях [15, 17] досліджуються задачі керування дволанковим маніпулятором з одним активним приводом, розміщеним біля шарніра на нерухомій базі. Для віддаленого шарніру привід відсутній. Керування відповідною ланкою здійснюється за допомогою інерційних сил, що виникають при динамічній взаємодії ланок.

Починаючи з середини 90-х років, все активніше проводяться дослідження маніпуляційних систем, у яких, крім активних приводів, діють пасивні приводи (наприклад, пружинно-демпферні механізми). Такі приводи особливо виправдовують себе на циклічних транспортних операціях, коли маніпулятор переносить вантаж із початкового стану в кінцевий і повертається назад у початковий стан без вантажу. Як свідчать результати досліджень [3, 8], для одноланкового маніпулятора раціональний підбір параметрів лінійного в'язкопружного пасивного приводу дозволяє суттєво зменшити енергозатрати активного приводу. Задачі оптимізації параметрів пружинно-демпферних приводів для широкого класу механічних систем розглянуто в статті [4]. У [13] для триланкового маніпулятора запропоновано підхід до апроксимації отриманих субоптимальних режимів активних керувань пасивними силами, що генеруються пружинно-демпферними приводами. У працях [14, 16] досліджуються субоптимальні режими керування чотириланковим маніпуляційним роботом з активними та пасивними приводами, який здійснює циклічну транспортну операцію. Формулюється низка задач розрахунку активних керувань і параметрів пружинно-демпферних приводів за умови мінімізації цільового функціоналу (швидкодія, енергоза-

трати тощо). Для розв'язання використовуються методи параметричної оптимізації. Задачі оптимізації законів руху нелінійних локомотивних (крокуючих) систем антропоморфного типу з активними та пасивними приводами у різноманітних постановках досліджувалися, зокрема, у працях [5–7]. Розв'язки цих задач будуються за допомогою методів параметричної оптимізації з використанням кубічних згладжувальних сплайнів [5, 7], поліномів і тригонометричних рядів [6].

У пропонованій статті досліджуються субоптимальні режими керування дволанковим маніпулятором, що здійснює плоскопаралельний рух під дією активних і пасивних (в'язкопружних) приводів. Формулюється задача розрахунку таких програмних керувань активних приводів і конструкційних параметрів пасивних приводів маніпулятора, які забезпечують виконання циклічної транспортної операції з мінімальними енергозатратами. Розроблено методику побудови субоптимального розв'язку сформульованої задачі, що ґрунтується на параметризації узагальнених координат маніпулятора сумою полінома третього степеня і скінченного тригонометричного ряду та розв'язанні отриманої внаслідок цього задачі нелінійного математичного програмування. Ефективність методики проілюстровано результатами числового моделювання.

1. Механічна модель та рівняння руху. Розглянемо дволанковий маніпулятор антропоморфного типу, схематично зображений на рис. 1. Маніпулятор складається із двох твердих тіл (ланок) G_1 і G_2 , з'єднаних між собою циліндричним шарніром O_2 . Ланка G_1 за допомогою циліндричного шарніра O_1 зв'язана з нерухомою основою, на кінці другої ланки (в точці B) закріплено захват (з вантажем). Осі шарнірів O_1 і O_2 паралельні між собою. Маніпулятор здійснює рух у вертикальній площині OXY , який відбувається внаслідок взаємодії сили тяжіння, моментів сил u_1 і u_2 , що генеруються активними приводами, і моментів сил p_1 і p_2 , які створюються пасивними приводами. Пасивний привід подаємо у вигляді комбінації лінійної пружини і демпфера. Активний u_i і пасивний p_i моменти сил прикладені у шарнірі O_i , $i = 1, 2$. З метою спрощення математичної моделі маніпулятора вважаємо, що його шарніри є ідеальними, а маса захвата (разом із вантажем) зосереджена у точці B . Інерційністю рухомих частин пасивних приводів нехтуємо, а їх масу враховуємо в масо-інерційних характеристиках відповідних ланок.

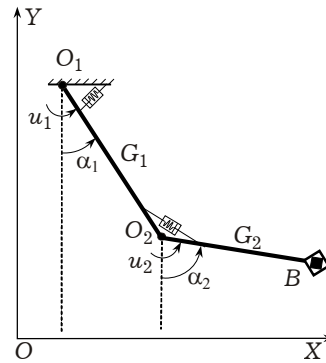


Рис. 1

Введемо позначення: α_i – кут відхилення тіла G_i від вертикалі; m_i , r_i – маса тіла G_i і відстань від його центра маси до точки O_i ; J_i – момент інерції тіла G_i відносно осі шарніра O_i , $i = 1, 2$; $a = |O_1O_2|$, $b = |O_2B|$ – довжини ланок маніпулятора; m – маса вантажу; g – прискорення сили тяжіння. Тоді рух досліджуваного маніпулятора можна описати системою нелінійних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned}
 I_1 \ddot{\alpha}_1 + aK[\ddot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \dot{\alpha}_2^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)] + gD \sin \alpha_1 &= \\
 &= u_1 - u_2 - p_1 + p_2, \\
 I_2 \ddot{\alpha}_2 + aK[\ddot{\alpha}_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \dot{\alpha}_1^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)] + gK \sin \alpha_2 &= u_2 - p_2, \\
 p_1 = c_1(\alpha_1 - \theta_1) + k_1 \dot{\alpha}_1, \quad p_2 = c_2(\alpha_2 - \alpha_1 - \theta_2) + k_2(\dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_1), & \quad (1)
 \end{aligned}$$

де c_i, θ_i – коефіцієнт жорсткості пружини та кут її ненапруженого стану, k_i – коефіцієнт в'язкості демпфера, $i = 1, 2$; $I_1 = J_1 + a^2(m_2 + m)$; $I_2 = J_2 + b^2m$; $K = r_2m_2 + bm$; $D = r_1m_1 + a(m_2 + m)$. Тут і нижче крапкою зверху над величиною позначено диференціювання за часом t . Співвідношення (1) є рівняннями Лагранжа другого роду [10], що описують рух дволанкового маніпулятора під дією активних u_1, u_2 і пасивних p_1, p_2 керувань. Коли пасивні приводи відсутні ($c_i = k_i = 0, i = 1, 2$) і маніпулятор здійснює рух у горизонтальній площині ($g = 0$), рівняння (1) співпадають (з точністю до позначень) з рівняннями руху дволанкового маніпулятора, отриманими в [1].

2. Постановка та алгоритм розв'язання задачі оптимізації. Нехай маніпулятор здійснює циклічну транспортну операцію, яка полягає в перенесенні вантажу (маси m) із початкового положення у заданий стан протягом часу T_1 і повернення без вантажу в початкове положення за час T_2 . При цьому тривалістю перебування маніпулятора у стані розвантаження нехтуємо, вважаючи, що час виконання всієї циклічної операції $T = T_1 + T_2$ і рух маніпулятора при $t \in [T_1, T]$ не залежить від його руху при $t \in [0, T_1]$. У момент часу $t = T_1$ другі похідні $\ddot{\alpha}_1(t), \ddot{\alpha}_2(t)$ і відповідно керування $u_1(t), u_2(t)$ мають розрив першого роду.

Задамо кінематичні характеристики циклічної транспортної операції, а саме, задамо положення та швидкості маніпулятора в початковий момент часу $t = 0$, у момент часу розвантаження $t = T_1$ і в кінцевий момент $t = T$:

$$\begin{aligned} \alpha_i(0) = \alpha_i(T) = \alpha_i^{(0)}, \quad \alpha_i(T_1) = \alpha_i^{(1)}, \\ \dot{\alpha}_i(0) = \dot{\alpha}_i(T_1) = \dot{\alpha}_i(T) = 0, \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (2)$$

а також обмеження на кутові координати ланок у процесі їх руху

$$\alpha_1^{\min} \leq \alpha_1(t) \leq \alpha_1^{\max}, \quad \alpha_2^{\min} \leq \alpha_2(t) - \alpha_1(t) \leq \alpha_2^{\max}, \quad t \in [0, T]. \quad (3)$$

У (2) величини $\alpha_i^{(0)}, \alpha_i^{(1)}$ – задані сталі параметри циклічної операції.

Позначимо через $\xi_i = (c_i, k_i, \theta_i)$ вектор конструкційних параметрів i -го пружинно-демпферного приводу. Очевидно, що параметри пасивних приводів повинні задовольняти обмеження

$$0 \leq c_i \leq c_i^{\max}, \quad 0 \leq k_i \leq k_i^{\max}, \quad \theta_i^{\min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

де величини $c_i^{\max}, k_i^{\max}, \theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}$ вибираються на підставі оцінок реальних значень параметрів пасивних приводів промислових маніпуляторів.

Нехай на активні керування маніпулятора накладено обмеження

$$u_i^{\min} \leq u_i(t) \leq u_i^{\max}, \quad t \in [0, T], \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Сформулюємо задачу оптимізації. Знайти такі керування $u_1^*(t), u_2^*(t)$, $t \in [0, T]$, і такі параметри пасивних приводів ξ_1^*, ξ_2^* , які з огляду на рівняння (1) при обмеженнях (4), (5) забезпечать виконання маніпулятором циклічної операції (2), (3) з мінімальним значенням функціонала [5–8]

$$E = \int_0^T [|u_1(t)\dot{\alpha}_1(t)| + |u_2(t)(\dot{\alpha}_2(t) - \dot{\alpha}_1(t))|] dt. \quad (6)$$

Функціонал E виражає механічну роботу активних приводів при виконанні маніпулятором циклічної транспортної операції. Зауважимо, що підінтегральна функція в (6) має розрив першого роду при $t = T_1$.

Відмітимо деякі особливості сформульованої задачі оптимального керування (з параметром). По-перше, рівняння руху маніпулятора (1) є суттєво нелінійними, по-друге, цільовий функціонал (6) недиференційовний (за

Фреше). Все це, а також наявність обмежень (3), (5) сильно ускладнює розв'язування задачі та не дає змоги побудувати її точний розв'язок.

Пропонуємо алгоритм наближеного розв'язування сформульованої задачі, який ґрунтується на параметризації узагальнених координат маніпулятора множиною заданих функцій і зведенні вихідної задачі до відповідної задачі нелінійного математичного програмування. За параметри оптимізації вибираємо коефіцієнти параметризації узагальнених координат маніпулятора та конструкційні параметри пасивних приводів, а виконання обмежень (3), (5) забезпечуємо методом зовнішніх штрафних функцій [2].

Для параметризації узагальнених координат α_1, α_2 на кожному із проміжків циклічної операції використовуємо суму полінома третього степеня і скінченного тригонометричного ряду [3, 6, 8, 13, 14, 16, 18]:

$$\alpha_i = \begin{cases} f_i^{(0)}(t), & t \in [0, T_1], \\ f_i^{(1)}(t), & t \in (T_1, T], \end{cases}$$

$$f_i^{(\tau)} = \sum_{j=0}^3 c_{ij}^{(\tau)} \Delta_\tau^j + \sum_{k=1}^n (a_{ik}^{(\tau)} \cos k\omega_\tau \Delta_\tau + b_{ik}^{(\tau)} \sin k\omega_\tau \Delta_\tau), \quad (7)$$

де $c_{ij}^{(\tau)}, a_{ik}^{(\tau)}, b_{ik}^{(\tau)}, j = 0, 1, 2, 3, k = 1, \dots, n, i = 1, 2, \tau = 0, 1$, – шукані коефіцієнти параметризації; $\Delta_0 = t, \omega_0 = 2\pi/T_1, \Delta_1 = t - T_1, \omega_1 = 2\pi/T_2$. Коефіцієнти полінома визначаємо з умов циклічної операції (2)

$$c_{i0}^{(\tau)} = \alpha_i^{(\tau-1)} - \sum_{k=1}^n a_{ik}^{(\tau)}, \quad c_{i1}^{(\tau)} = -\omega_\tau \sum_{k=1}^n k b_{ik}^{(\tau)},$$

$$c_{i2}^{(\tau)} = \frac{3}{T_\tau^2} (\alpha_i^{(\tau+1)} - \alpha_i^{(\tau)} - T_\tau c_{i1}^{(\tau)}), \quad c_{i3}^{(\tau)} = -\frac{2}{3T_{\tau+1}} c_{i2}^{(\tau)}, \quad \tau = 0, 1, \quad (8)$$

де $\alpha_i^{(2)} = \alpha_i^{(0)}, i = 1, 2$. Кутові швидкість $\dot{\alpha}_i(t)$ і прискорення $\ddot{\alpha}_i(t)$ обчислюємо диференціюванням виразів (7).

Накладені на рух системи обмеження (3), (5) подаємо у інтегральній формі [5]

$$Q_{\alpha_1} = \int_0^T [([\alpha_1^{\min} - \alpha_1]_+)^2 + ([\alpha_1 - \alpha_1^{\max}]_+)^2] dt,$$

$$Q_{\alpha_2} = \int_0^T [([\alpha_2^{\min} - \alpha_2 + \alpha_1]_+)^2 + ([\alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_2^{\max}]_+)^2] dt,$$

$$Q_{u_i} = \int_0^T [([u_i^{\min} - u_i(t)]_+)^2 + ([u_i - u_i^{\max}]_+)^2] dt, \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\text{де } [v]_+ = \begin{cases} v, & v > 0, \\ 0, & v \leq 0. \end{cases}$$

Після підстановки параметризованих функцій $\alpha_i, \dot{\alpha}_i, \ddot{\alpha}_i, i = 1, 2$, у рівняння руху (1) та розв'язання оберненої задачі динаміки знаходимо відповідні активні керування u_1, u_2 . Отримані керування є функціями шуканих коефіцієнтів тригонометричних рядів (7) і параметрів пасивних приводів ξ_1, ξ_2 , внаслідок чого функціонал (6) і зображення (9) зводяться до функцій тих самих параметрів. В результаті отримуємо задачу умовної мінімізації функції багатьох змінних:

$$Q_0(\mathbf{C}) \rightarrow \min_{\mathbf{C}}, \quad \mathbf{Q}(\mathbf{C}) = \mathbf{0}, \quad (10)$$

де \mathbf{C} – вектор параметрів оптимізації, компонентами якого є параметри $a_{ik}^{(\tau)}, b_{ik}^{(\tau)}, c_i, k_i, \theta_i, \tau, i = 1, 2, k = 1, \dots, n$. Цільова функція $Q_0(\mathbf{C})$ формується на основі функціонала (6), вектор-функція \mathbf{Q} – на основі співвідношень (9).

3. Числове моделювання динаміки маніпулятора. Опишемо результати числового розв'язання сформульованої вище задачі оптимального керування. Розглядали маніпулятор, ланки якого мають кільцевий поперечний переріз зі сталими зовнішнім 0.1 м і внутрішнім 0.094 м діаметрами та густиною матеріалу 7850 кг/м^3 , а також довжинами $a = 0.8 \text{ м}$, $b = 0.5 \text{ м}$. Відповідно до цих значень маємо: $m_1 = 5.74 \text{ кг}$, $m_2 = 3.59 \text{ кг}$, $J_1 = 1.23 \text{ Нм}^2$, $J_2 = 0.3 \text{ Нм}^2$, $r_1 = 0.4 \text{ м}$, $r_2 = 0.25 \text{ м}$. Масу вантажу задавали $m = 4 \text{ кг}$, параметри циклічної операції: $\alpha_1^{(0)} = 0$, $\alpha_2^{(0)} = \pi/10$, $\alpha_1^{(1)} = \pi/3$, $\alpha_2^{(1)} = 2\pi/3$, $T_1 = 4 \text{ с}$, $T_2 = 2 \text{ с}$. Обмеження (3)–(5), накладені на рух маніпулятора та параметри його пасивних приводів, задавали згідно з даними табл. 1.

Таблиця 1

z	$\alpha_1, \text{рад}$	$\alpha_2, \text{рад}$	$u_1, \text{Нм}$	$u_2, \text{Нм}$	$c_1, \text{Нм}$	$k_1, \text{Нмс}$	$\theta_1, \text{рад}$	$c_2, \text{Нм}$	$k_2, \text{Нмс}$	$\theta_2, \text{рад}$
z^{\max}	$\pi/2$	π	100	50	50	10	$\pi/2$	20	5	π
z^{\min}	$-\pi/2$	0	-100	-50	0	0	0	0	0	0

Кількість членів тригонометричного ряду в (7) покладали $n = 3$. В результаті загальна кількість параметрів оптимізації становила 30. Для розв'язування задачі (10) використовували метод Розенброка [19] спільно з методом зовнішніх штрафних функцій [2]. Початковий крок методу Розенброка становив 0.001, коефіцієнт зміни довжини кроку – 3. Проводились 2 ітерації методу зовнішніх штрафних функцій, де на першій ітерації коефіцієнти $\lambda_i = 10^2$, а на другій – $\lambda_i = 10^3$. Точність за параметрами оптимізації і значенням цільової функції становили відповідно 10^{-6} і 10^{-4} , час розв'язування задачі (10) на комп'ютері AMD Sempron 2200+МГц – близько 5 хв.

Отриманий субоптимальний режим руху маніпулятора характеризується значеннями коефіцієнтів параметризації, поданими у табл. 2, а також значеннями параметрів пасивних приводів: $c_1 = 41.6 \text{ Нм}$, $k_1 = 0$, $\theta_1 = 1.57 \text{ рад}$, $c_2 = 15.49 \text{ Нм}$, $k_2 = 0$, $\theta_2 = 1.72 \text{ рад}$. Під час оптимізації за 14 ітерацій методу Розенброка значення функціонала (6) було зменшене приблизно в 2.5 рази та остаточно стало рівним $E^* = 40.7 \text{ Дж}$.

Таблиця 2

Коефіцієнти параметризації	$\tau = 0 \quad (t \in [0, T_1])$		$\tau = 1 \quad (t \in [T_1, T])$	
	$i = 1 \quad (\alpha_1)$	$i = 2 \quad (\alpha_2)$	$i = 1 \quad (\alpha_1)$	$i = 2 \quad (\alpha_2)$
$c_{i0}^{(\tau)}$	0.028005	0.570367	1.113239	2.271003
$c_{i1}^{(\tau)}$	0.212562	-1.659721	-0.425953	-1.747111
$c_{i2}^{(\tau)}$	0.036928	1.578585	-0.146468	1.285489
$c_{i3}^{(\tau)}$	-0.006155	-0.263097	0.048823	-0.428497
$a_{i1}^{(\tau)}$	-0.074578	-0.201034	-0.102277	-0.121349
$b_{i1}^{(\tau)}$	-0.199154	0.745685	0.245032	0.829145
$a_{i2}^{(\tau)}$	0.077832	0.003367	0.054375	-0.056460
$b_{i2}^{(\tau)}$	0.046770	0.152706	-0.069365	-0.150537
$a_{i3}^{(\tau)}$	-0.031259	-0.058541	-0.018139	0.001201
$b_{i3}^{(\tau)}$	-0.009902	0.001838	0.009761	0.009350

Графічні залежності (від часу t) кінематичних та динамічних характеристик побудованого енергетично субоптимального процесу зображено на рис. 2–5. Тут час t виражено в секундах, кути α_1 , α_2 – в радіанах, моменти сил u_1 , u_2 – в Нм. Зазначимо, що проміжок часу $t \in [0, 4]$ відповідає фазі перенесення вантажу в кінцеве положення, $t \in [4, 6]$ – повернення маніпулятора (без вантажу) у початковий стан. На рис. 2, 3 наведено графіки кутових координат α_1 , α_2 та швидкостей $\dot{\alpha}_1$, $\dot{\alpha}_2$ ланок маніпулятора. На графіках бачимо, що кутові характеристики ланок при побудованому субоптимальному режимі руху маніпулятора задовольняють умови циклічної операції (2) та обмеження (3). При цьому рух ланок маніпулятора на кожній із фаз циклічної операції є безреверсним. Отримані субоптимальні моменти сил u_1 , u_2 зображено на рис. 4, 5 (криві 1). Тут для порівняння наведено моменти (криві 2), отримані при розв’язанні вищенаведеної задачі для маніпулятора без пасивних приводів. При цьому мінімальні енерговитрати системи становлять $E^* = 121.4$ Дж, тобто бачимо, що введення в досліджувану маніпуляційну систему лінійних в’язкопружних пасивних приводів дозволяє суттєво (у 3 рази) зменшити енерговитрати активних приводів. Важливим при цьому є також те, що порогові (максимальні за абсолютною величиною) значення керуючих зусиль активних приводів зменшуються приблизно на 30%.

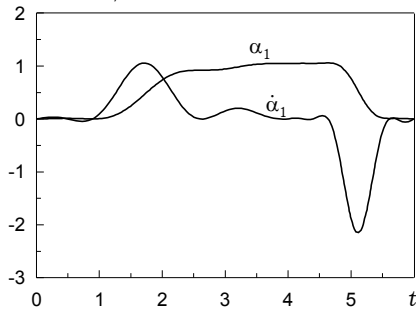


Рис. 2

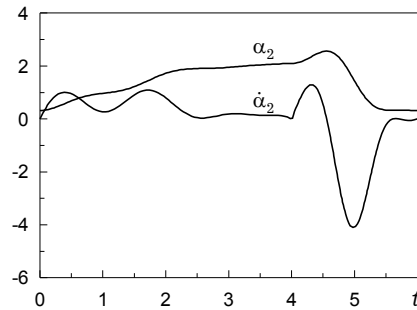


Рис. 3

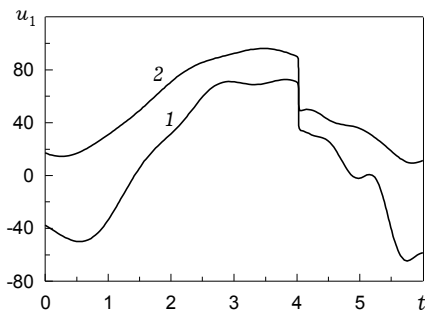


Рис. 4

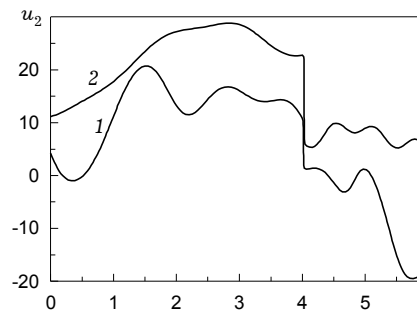


Рис. 5

4. Висновки. Для дволанкового маніпулятора, який під дією активних і пасивних приводів виконує циклічні транспортні операції у вертикальній площині, розроблено чисельно-аналітичний алгоритм і програму для розв’язання задачі сукупної оптимізації законів руху системи та конструкційних параметрів пасивних приводів з метою мінімізації енерговитрат. Алгоритм ґрунтується на параметризації узагальнених координат системи множиною заданих функцій (поліноми, тригонометричні ряди), розв’язанні обернених задач динаміки та використанні методів нелінійного математичного програмування. Результати числових експериментів свідчать про ефективність алгоритму та програми, які дають можливість за допомогою сучасних комп’ютерних систем за відносно короткий час (~5 хв.) побудувати субоптимальний керований процес для дволанкового маніпулятора.

Аналіз числових результатів показує, що введення лінійно-в'язкопружного приводу в конструкцію дволанкового маніпулятора дозволяє суттєво (в окремих випадках у 3 рази) зменшити енерговитрати активних приводів маніпулятора на циклічних транспортних операціях. При цьому максимальні значення активних моментів сил є меншими порівняно з відповідними значеннями для маніпулятора без пасивних приводів.

Перспективою подальших досліджень може бути аналіз впливу конструкторських параметрів дволанкового маніпулятора, зокрема, параметрів пасивних приводів, на якісні та кількісні характеристики побудованих субоптимальних законів руху системи.

1. Аветисян В. В., Болотник Н. Н., Черноусько Ф. Л. Оптимальные программные движения двухзвенного манипулятора // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1985. – № 3. – С. 123–131.
2. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование: Теория и алгоритмы. – Москва: Мир, 1982. – 583 с.
3. Бербюк В., Кудин М., Boström A., Peterson V. Енергетично-оптимальний рух напівпасивно-керованого одноступенчатого маніпулятора // Механіка та машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 55–60.
4. Бербюк В. Е., Бострём А. Е. Проблемы оптимизации управляемых многосвязных систем с пружинно-демпферными приводами // Прикл. механика. – 2001. – **37**, № 7. – С. 115–123.
5. Бербюк В. Е., Демидюк М. В., Литвин Б. А. Математическое моделирование и оптимизация ходьбы человека с протезированной голенью // Проблемы управления и информатики. – 2005. – № 3. – С. 128–144.
6. Бербюк В. Е., Нищенко Н. И. Энергетически-оптимальное управление движением человека в фазе опоры на протезированную ногу // Проблемы управления и информатики. – 1997. – № 2. – С. 75–86.
7. Бербюк В. Е., Демидюк М. В., Литвин Б. А. Параметрична оптимізація ходи та пружних характеристик пасивних приводів двохланкового крокуючого робота // Вісн. Київ. ун-та. Кібернетика. – 2002. – № 3. – С. 7–9.
8. Бербюк В. Е., Кудин М. І. Математичне моделювання субоптимального руху напівпасивно керованих механічних систем // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 1999. – **42**, № 3. – С. 117–124.
9. Кириченко М. Ф., Крак Ю. В., Сорока Р. О. Оптимізація маніпуляційних робіт. – Київ: Либідь, 1990. – 144 с.
10. Лурье А. И. Аналитическая механика. – Москва: Физматгиз, 1961. – 824 с.
11. Формальский А. М. Об оптимальном по быстродействию управлении поворотом плоского двузвенника // Прикл. математика и механика. – 1996. – **60**, № 2. – С. 250–259.
12. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. – Москва: Наука, 1989. – 386 с.
13. Ширко М. І. Енергетично-субоптимальне керування плоским триланковим маніпулятором // Вибір і обробка інформації. – 2002. – № 16 (92). – С. 53–58.
14. Verbyuk V., Lidberg M. Time-optimal control of semi-passively actuated closed-loop chain robots // Proc. 33rd Int. Symp. Robotics (Oct. 7–11, 2002, Stockholm, Sweden). – 2002. – P. 221–226.
15. Hirohiko A., Susumu T. Position control of a two degree of freedom manipulator with a passive joint // IEEE. Trans. on Industr. Electronics. – 1991. – **38**, No 1. – P. 15–20.
16. Lidberg M., Verbyuk V. Optimization of controlled motion of closed-loop chain manipulator robots with different degree and type of actuation // SACTA. – 2002. – **4**, No. 2. – P. 56–73.
17. De Luca A., Mattone R., Oriolo G. Control of an underactuated mechanical systems: Application to the planar 2R robot // Proc. 35th Conf. on Decision and Control. Kobe, Japan. – 1996. – P. 1455–1460.
18. Nagurka M., Yen V. Fourier-based optimal control of nonlinear dynamic systems // Trans. ASME. J. Dynam. Systems, Measur. and Control. – 1990. – **112**, No. 3. – P. 19–26.
19. Rosenbrock H. H. An automatic method for finding the greatest and least value of a function // The Comput. J. – 1960. – **3**. – P. 175–184.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ДВУХЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА С АКТИВНЫМИ И ПАССИВНЫМИ ПРИВОДАМИ

Исследуются управляемые движения двухзвенного манипулятора в вертикальной плоскости, выполняющего циклическую транспортную операцию под действием активных и пассивных приводов. Пассивные приводы представляются комбинацией линейных пружин и демпферов. Сформулирована задача оптимизации законов движения манипулятора и конструктивных параметров пассивных приводов. В качестве целевого функционала выбраны энергозатраты на выполнение транспортной операции. Разработан алгоритм приближенного решения задачи, основанный на параметризации обобщенных координат манипулятора множеством заданных функций и использовании концепции обратных задач динамики и численных методов нелинейного математического программирования.

MOTION MODES AND PARAMETERS OPTIMIZATION OF TWO-LINK ACTIVELY AND PASSIVELY ACTUATED MANIPULATOR

The motion of a actively and passively actuated two-link manipulator performing the cyclic pick-and-place operations in the vertical plane has been investigated. Passive actuators have been modeled as non-inertial spring-damper-like actuators. The problem on the combined optimization of the motion of manipulator and spring and damper parameters has been formulated. An algorithm for approximate solution of this problem based on parameterization of generalized coordinates by a set of given functions, and on using the inverse dynamic problem method as well as numerical procedures of nonlinear mathematical programming has been developed.

Ин-т прикл. проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів,

Одержано
30.03.07