

УДК 624

Л.В. Барашова, аспірантка*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ВИБРОИЗОЛИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА
ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПОВОРОТЕ РУКИ**

При согласовании времени оптимального поворота руки с периодом собственных колебаний манипулятора (вокруг вертикальной оси), т.е. время вращения руки кратно периоду первого тона собственных колебаний, угол поворота его первая и вторая производные равны нулю в конечный момент времени, что приводит к уменьшению погрешности позиционирования (уменьшается перемещение центра масс схвата).

Ключевые слова: динамика манипулятора, частоты колебаний, оптимальное управление, численное интегрирование уравнений, уменьшение погрешности позиционирования.

Движения манипулятора (например, оптимальный поворот руки) приводит к деформации амортизаторов, изменению их реакций; изменяется также положение центра масс манипулятора и, как следствие, положение центра масс схвата с объектом манипулирования, что существенно влияет на точность позиционирования.

В работе [1] оценено влияние деформации системы амортизации на перемещение центра масс схвата при изменении положения руки, а в задаче синтеза найдены управляющие воздействия. В [2] исследованы вынужденные колебания объекта как абсолютно твердого тела в случае упругопластического подвеса при динамическом воздействии. В [3] приводятся результаты эксперимента, выполненного на основании интегрирования системы дифференциальных уравнений движения объекта на амортизаторах.

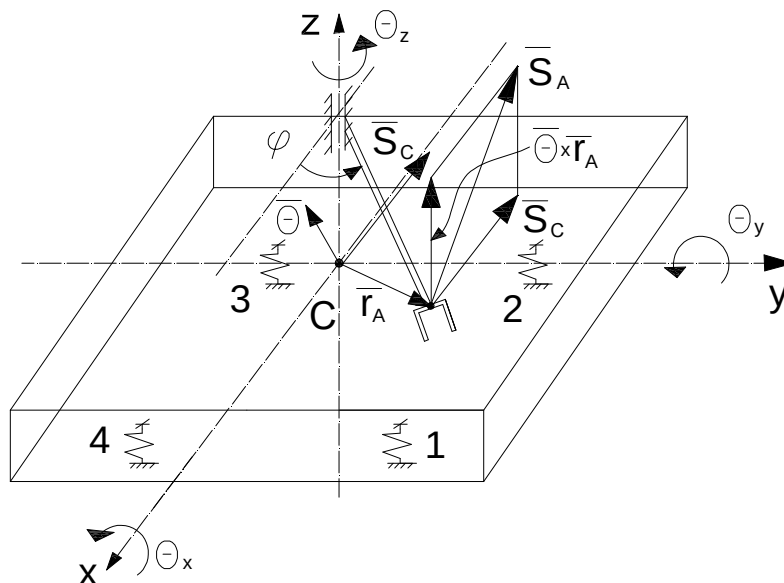
В [4] на основании численного интегрирования уравнений динамики манипулятора найдены рассмотрены проекции линейного перемещения, скорости и ускорения центра масс манипулятора, возникающие вследствие поворота руки. Однако, колебания виброизолированного манипулятора вследствие выполнения рабочих операций, которые существенно влияют на точность позиционирования, все еще недостаточно изучены.

Целью исследования является оценка влияния параметров оптимального закона поворота руки манипулятора на его колебания и погрешность позиционирования (на линейные и угловые перемещения, скорости и ускорения центра масс манипулятора, а так же на перемещения центра масс схвата с грузом).

Манипулятор с системой виброизоляции изображен на рисунке 1. Неподвижная система координат XYZ связана с центром масс манипулятора C . Уравнения динамики виброизолированного манипулятора имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{U}_C + C_u U_C + C_{uy} \theta_y + C_{uz} \theta_z = -m\ddot{\xi}_x + P_x; \\ m\ddot{V}_C + C_v V_C + C_{vx} \theta_x + C_{vz} \theta_z = -m\ddot{\xi}_y + P_y; \\ m\ddot{W}_C + C_w W_C + C_{wx} \theta_x + C_{wy} \theta_y = -m\ddot{\xi}_z + P_z; \\ I_x \ddot{\theta}_x + C_{vx} V_C + C_{wx} W_C + D_x \theta_x + D_{xy} \theta_y + D_{xz} \theta_z = -B_x + M_x^P; \\ I_y \ddot{\theta}_y + C_{uy} U_C + C_{wy} W_C + D_{xy} \theta_x + D_y \theta_y + D_{yz} \theta_z = -B_y + M_y^P; \\ I_z \ddot{\theta}_z + C_{uz} U_C + C_{vz} V_C + D_{xy} \theta_x + D_{yz} \theta_y + D_z \theta_z = -B_z + M_z^P, \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса объекта; P_x, P_y, P_z – проекции на оси X, Y, Z главного вектора задаваемых сил; M_x^P, M_y^P, M_z^P – проекции на оси X, Y, Z главного момента задаваемых сил; I_x, I_y, I_z – физические моменты инерции манипулятора относительно осей X, Y, Z соответственно; $\ddot{\xi}_x, \ddot{\xi}_y, \ddot{\xi}_z$ – ускорения переносного движения (переносное движение обусловлено вибрационным кинематическим перемещением основания, к которому крепится объект); $C_u, C_v, C_w, C_{uy}, C_{uz}, C_{vz}, C_{wx}, C_{wy}, C_{vx}, D_x, D_y, D_z, D_{xy}, D_{yz}, D_{xz}$ – жесткостные параметры, B_x, B_y, B_z – моменты инерции во вращательном движении.

Рисунок 1 – Схема виброизолированного манипулятора U_A, V_A, W_A

Неизвестными являются: перемещения центра масс манипулятора (U_C, V_C, W_C), углы поворота манипулятора ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) относительно осей, проходящих через центр масс.

Поворот руки осуществлялся по обоснованному в [1] закону: $\varphi(t) = \frac{\varphi^*}{2\pi} (pt - \sin pt)$, где φ^* – угол, на который необходимо повернуть руку; $p = \frac{2\pi}{T}$, T – общее время поворота руки из исходного в конечное состояние.

Исходные данные: $P_x = 0$, $P_y = 0$, $P_z = P_m + P_r$, $M_z = I_p \ddot{\varphi}$, $M_x = P_r \cdot l \cdot \sin \varphi$, $M_y = P_r \cdot l \cdot \cos \varphi$, где $P_m = 0,8P$ – собственный вес манипулятора, $P_r = 0,2P$ – собственный вес полезного груза; P – вес манипулятора; l – длина руки манипулятора.

Относительное угловое ускорение руки при ее оптимальном повороте $\epsilon_e = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\varphi^* p^2}{2\pi} \sin pt$. Из дифференциального уравнения вращения руки следует $M = I_p \epsilon_e$, где $I_p = m_g l^2$; $m_g = P_r / g$.

При вращении руки (с полезным грузом) изменяются моменты инерции всей системы относительно осей X и Y , они вычислены следующим образом:

$$I_x = I_x^* + m_g l^2 \sin^2 \varphi, \quad I_y = I_y^* + m_g l^2 \cos^2 \varphi,$$

где I_x^*, I_y^* – моменты инерции системы без груза.

После определения перемещения центра масс манипулятора перемещения центра масс схвата (рисунок 1, точка A) находятся по формулам:

$$U_A = U_C + Z_A \theta_y - Y_A \theta_z, \quad V_A = V_C - Z_A \theta_x + X_A \theta_z, \quad W_A = W_C - X_A \theta_y + Y_A \theta_x,$$

где координаты X_A и Y_A изменяются в связи с поворотом руки на угол φ ; они соответственно вычисляются как $X_A = l \cos \varphi$, $Y_A = l \sin \varphi$. Общее перемещение центра масс схвата

$$f_A = \sqrt{U_A^2 + V_A^2 + W_A^2}.$$

В пакете Maple найдены собственные частоты. Частоты при $\varphi = 0$ равны: $21,58 \text{ c}^{-1}$, $23,66 \text{ c}^{-1}$, $48,3 \text{ c}^{-1}$, $180,61 \text{ c}^{-1}$, $194,33 \text{ c}^{-1}$, $245,6 \text{ c}^{-1}$. При повороте руки собственные частоты меняются, например, так при $\varphi = \pi/4$ они равны: $23,66 \text{ c}^{-1}$, $25,77 \text{ c}^{-1}$, $28,47 \text{ c}^{-1}$, $137,92 \text{ c}^{-1}$, $189,3 \text{ c}^{-1}$,

194,34 c^{-1} ; при $\varphi = \pi/2$ они равны 19,55 c^{-1} , 23,67 c^{-1} , 54,54 c^{-1} , 131,47 c^{-1} , 194,34 c^{-1} , 333,56 c^{-1} , т.е. частоты являются функциями угла поворота.

Для проверки правильности определения частот собственных колебаний использовалось численное интегрирование системы уравнений свободных колебаний при ненулевых начальных условиях, и строились графики зависимости перемещений от времени, по которым найдены периоды и частоты.

Например, для углового перемещения вокруг вертикальной оси интегрирование осуществлялось при начальных условиях: при $t = 0$ $U_C = 0$, $dU_C/dt = 0$, $V_C = 0$, $dV_C/dt = 0$, $W_C = 0$, $dW_C/dt = 0$, $\theta_x = 0$, $d\theta_x/dt = 0$, $\theta_y = 0$, $d\theta_y/dt = 0$, $\theta_z = 1$, $d\theta_z/dt = 0$.

По графику поворота вокруг вертикальной оси от времени определены период и частота свободных колебаний вокруг вертикальной оси: $T_{\theta_z} = 0,26$ с; $\omega_{\theta_z} = 2\pi/T_{\theta_z} = 6,283/0,26 = 24$ c^{-1} .

Частота собственных колебаний манипулятора вокруг вертикальной оси равна $\omega_{\theta_z} = 23,67$ c^{-1} ; она в данном случае не меняется при повороте руки, не изменяется также частота поступательных колебаний по оси Z, остальные частоты меняются.

В численном эксперименте внешнее возмущение обусловлено только вращением руки (вибрации основания отсутствуют). Время поворота руки согласовано с периодом собственных колебаний

манипулятора вокруг вертикальной оси $T = \frac{2\pi}{p}$, где $p = \frac{\omega_{\theta_z}}{4} = 5,92$ c^{-1} , следовательно $T = \frac{2\pi}{5,92} = 1,06$ с.

Интегрирование уравнений (1) осуществлялось при исходных данных:

ОМ:=233: масса объекта;

XXI:=36.75:YYI:=35.87:ZZI:=13.1: физические моменты инерции

p:=5.92:ff:=1.57:l:=2:P:=9.8*ОМ: Pr:=0.2*P: Pm:=0.8*P:

Координаты точек крепления амортизаторов:

X:=[0.223,0.223,-0.207,-0.207]:

Y:=[0.2,-0.19,-0.19,0.2]:

Z:=[-0.6235,-0.6235,-0.6235,-0.6235]:

Динамические жесткости амортизаторов:

CU:=[0.17*10⁷,0.17*10⁷,0.17*10⁷,0.17*10⁷]:

CV:=[0.9*10⁶,0.9*10⁶,0.9*10⁶,0.9*10⁶]:

CW:=[0.22*10⁷,0.22*10⁷,0.22*10⁷,0.22*10⁷]:

Результаты приведены на рисунке 2. Из графиков рисунка 2 (б, г, е) следует, что в конечный момент времени угловое перемещение вокруг вертикальной оси, его первая и вторая производные близки к нулю.

Проведен ряд экспериментов при другом времени поворота руки, как согласованным с периодом собственных колебаний ($T = 1,327$ с, $T = 0,796$ с), так и без согласования ($T = 1,256$ с, $T = 0,897$ с.). Результаты сведены в таблицы 1 – 5.

Таблица 1 – Максимальные линейные и угловые перемещения центра масс манипулятора (при разном времени поворота руки)

T , с	$U_C^{\max}$, мм	$V_C^{\max}$, мм	$W_C^{\max}$, мм	$\theta_x^{\max}$, $\times 10^{-3}$ рад	$\theta_y^{\max}$, $\times 10^{-3}$ рад	$\theta_z^{\max}$, $\times 10^{-3}$ рад
1,06	2,8323	1,8549	0,5562	2,8016	4,579	19,485
1,256	2,8566	1,8403	0,5563	2,7737	4,5779	13,134
0,897	2,7936	1,954	0,5561	2,7932	4,5823	30,214
1,327	2,8623	1,8298	0,5563	2,748	4,5775	10,632
0,796	2,7523	2,0685	0,5559	2,7357	4,5848	40,934

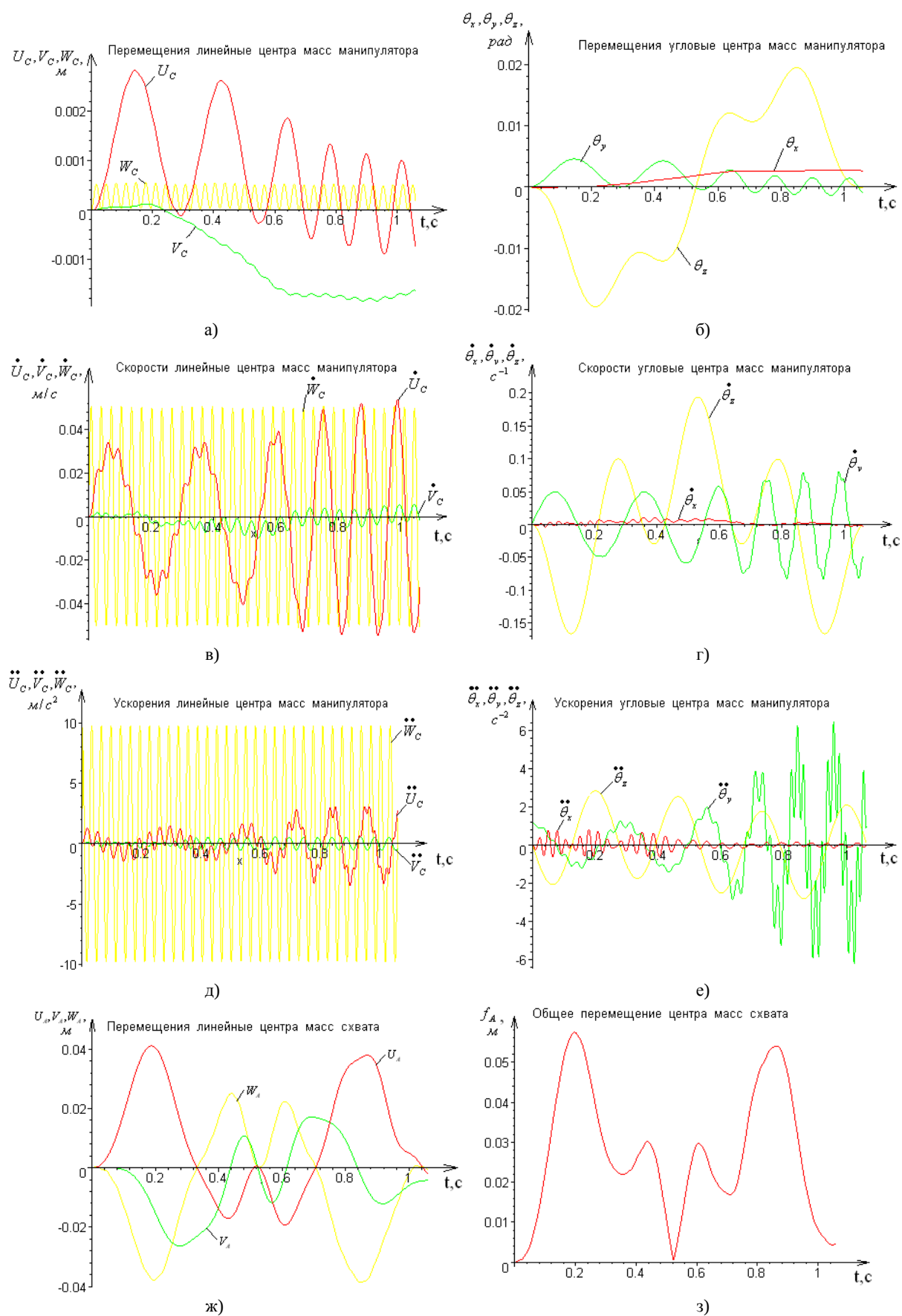


Рисунок 2 — Графики зависимостей линейных и угловых перемещений центра масс манипулятора и схвата, их первых и вторых производных

Таблица 2 – Максимальные линейные и угловые ускорения центра масс манипулятора (при разном времени поворота руки)

$T, \text{с}$	$d^2U_c^{\max}/dt^2, \text{м/с}^2$	$d^2V_c^{\max}/dt^2, \text{м/с}^2$	$d^2W_c^{\max}/dt^2, \text{м/с}^2$	$d^2\theta_x^{\max}/dt^2, \text{с}^{-2}$	$d^2\theta_y^{\max}/dt^2, \text{с}^{-2}$	$d^2\theta_z^{\max}/dt^2, \text{с}^{-2}$
1,06	3,4726	0,5821	9,8358	0,7995	6,4865	2,8257
1,256	3,8166	0,7979	9,834	0,9075	8,2198	1,6095
0,897	3,1129	0,541	9,8732	0,8063	4,8444	5,0334
1,327	3,9662	0,7657	9,834	0,8841	8,6044	1,3303
0,796	3,304	0,6601	9,8559	0,8003	5,6027	7,6419

Таблица 3 – Перемещения центра масс схвата в точке позиционирования (при разном времени поворота руки)

$T, \text{с}$	$ U_A , \text{мм}$	$ V_A , \text{мм}$	$ W_A , \text{мм}$	$ f_A , \text{мм}$
1,06	1,858	4,2545	0,603	4,6815
1,256	6,5474	2,3612	3,2004	7,6607
0,897	6,5713	8,5411	9,7731	14,548
1,327	1,8384	4,2821	0,9531	4,7565
0,796	2,2073	4,2876	1,6238	5,0885

Таблица 4 – Линейные и угловые перемещения центра масс манипулятора в конечный момент времени (при разном времени поворота руки)

$T, \text{с}$	$ U_c , \text{мм}$	$ V_c , \text{мм}$	$ W_c , \text{мм}$	$ \theta_x , \times 10^{-3} \text{ рад}$	$ \theta_y , \times 10^{-3} \text{ рад}$	$ \theta_z , \times 10^{-3} \text{ рад}$
1,06	0,7365	1,6357	0,1815	2,6621	1,0294	0,0509
1,256	0,9472	1,6343	0,0883	2,7299	1,3438	2,352
0,897	0,9267	1,693	0,245	2,6793	1,3611	4,8955
1,327	0,7282	1,6362	0,8909	2,6488	1,0778	0,0506
0,796	0,9234	1,6689	0,4466	2,64	1,3292	0,0250

Таблица 5 – Линейные и угловые скорости центра масс манипулятора в конечный момент времени (при разном времени поворота руки)

$T, \text{с}$	$ dU_c/dt , \text{см/с}$	$ dV_c/dt , \text{см/с}$	$ dW_c/dt , \text{см/с}$	$ d\theta_x/dt , \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	$ d\theta_y/dt , \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	$ d\theta_z/dt , \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$
1,06	3,223	0,1729	4,9439	2,6147	48,28	0,3756
1,256	0,1605	0,0572	4,0857	1,5532	19,15	64,018
0,897	0,4177	0,2354	50,387	1,7742	7,8538	283,83
1,327	3,383	0,5196	1,3549	1,1262	63,164	0,4273
0,796	2,3353	0,3431	3,4147	0,6594	36,708	0,3067

Выводы

1. При оптимальном повороте руки счет поворота руки деформируются амортизаторы, возникают перемещения центра масс манипулятора и, следовательно, центра масс схвата с грузом, что приводит к погрешности позиционирования.

2. При согласовании времени оптимального поворота руки с периодом собственных колебаний в конечный момент времени угловое перемещение вокруг вертикальной оси (в связи с деформацией системы), его первая и вторая производные близки к нулю, что повышает точность позиционирования.

3. Параметр оптимального поворота руки p назначается в соответствии с требуемым (минимальным) временем поворота и ограничением на ускорение (с ростом времени поворота, уменьшаются ускорения, таблица 2).

Дальнейшие исследования связаны с синтезом оптимального управления виброизолированным упругим манипулятором, работающем в условиях детерминированных и случайных воздействий.

Библиографический список использованной литературы

1. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; под ред. Бохонского А.И. — Севастополь: СевНТУ, 2007. — 296 с.
2. Бохонский А.И. Исследование колебаний объекта военной техники с физически нелинейным подвесом / А.И. Бохонский, А.В. Исаев, Т.В. Мозолевская // Сб. науч. тр. СВМИ им. П.С. Нахимова. — Севастополь, 2003. — Вып. 3. — С. 47–56.
3. Бохонский А.И. Защита от динамических воздействий объектов как абсолютно твердых тел / А.И. Бохонский // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 1997. — Вып. 6. — С. 7–14.
4. Бохонский А.И. Колебания виброизолированного манипулятора при выполнении рабочих операций / А.И. Бохонский, Л.В. Барашова // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 110. — С. 142–145.

Поступила в редакцию 18.10.2010 г.

Барашова Л.В. Зменшення похибки позиціонування віброізолюваного маніпулятора за умови оптимального повороту руки

Узгоджуючи час оптимального повороту руки з періодом власних коливань маніпулятора (навколо вертикальної осі), тобто час обертання руки кратно періодові першого тону власних коливань, кут повороту, його перша і друга похідні дорівнюють нулеві в кінцевий момент часу, що забезпечує зменшення похибки позиціонування (зменшується переміщення центра мас схвата).

Ключові слова: динаміка маніпулятора, частоти коливань, оптимальне керування, чисельне інтегрування рівнянь, зниження похибки позиціонування.

Barashova L.V. Error Decrease in Positioning of the Vibroinsulated Manipulator at the Optimum Turn of a Hand

At the coordination of time for the optimum turn of a hand with the period of own fluctuations of the manipulator (around the vertical axis), that is, the time of rotation of a hand is multiple to the period of the first tone of own fluctuations, a turning angle and its first and second derivatives are equal to zero at the final moment of time, that results in error decrease in positioning (movement of the grab mass center decreases).

Keywords: dynamics of the manipulator, frequency of fluctuations, optimum control, numerical integration of the equations, error decrease of positioning.