УДК 681.51.011+519.87

УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ПРИ СУЩЕСТВЕННОМ ВЛИЯНИИ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ

А.А. Брагина

Разработан алгоритм управления движением манипуляционного робота (МР) при существенном влиянии возмущающих моментов. Синтез закона управления, обеспечивающего асимптотически устойчивое движение рабочего органа в точку программной траектории, проведен методом функций Ляпунова на основе полной нелинейной математической модели манипулятора сэлектроприводами, полученной в форме уравнений Лагранжа-Максвелла.

Ключевые слова: нелинейная динамическая модель, синтез управлений, функции Ляпунова.

В робототехнике при управлении роботом-манипулятором возможны воздействия различных внешних возмущений как в зоне его рабочего органа, так и вне ее, что особенно важно учитывать при работе в экстремальных средах.

К основным причинам ухудшения качества управления роботом относятся непредсказуемые изменения моментов нагрузки на выходных валах приводов, воздействие сил вязкого и сухого трения, усиление дестабилизирующего взаимовлияния подсистем. Так как не представляется возможным построение точной математической модели внешних возмущений, используются способы их оценки, реализуемые с помощью различных вычислительных устройств и датчиков косвенных переменных, называемых наблюдателями силы [3–4]. Они осуществляют вычисление величины внешних возмущений по математической модели манипулятора и информации о положениях и скоростях его степеней подвижности. На вход модели подаются значения составляющих вектора координат и управляющие воздействия на приводы. В результате решения задачи динамики выдается оценка силы взаимодействия манипулятора с внешней средой. Одним из типов наблюдателей являются устройства, использующие полную математическую модель манипулятора вместе с системой приводов.

В работе прямым методом Ляпунова решена задача движения МР из произвольной точки $x_0 \in X_0 \subset R^n$ в точку программной траектории x°. Полная нелинейная модель динамики получена для трехзвенного МР с электроприводами, с распределенными массами звеньев, рабочим органом которого является тело вращения, представляющее собой шлифовальный круг. Обобщенные координаты манипулятора η_λ, η_μ λ,μ =1,2,3 определяются углами поворота его звеньев. Обобщенными координатами электроприводов являются заряды $q_{a\lambda}$, $q_{b\lambda}$, λ=1,2,3, протекающие через поперечные сечения обмоток якоря и возбуждения соответствующих электродвигателей. Модель динамики МР с рабочим органом построена в форме уравнений Лагранжа-Максвелла [1–2]^

$$\begin{cases}\left(L_{a\lambda\mu}-L_b^{\upsilon\gamma}M_{\gamma\lambda}M_{\upsilon\mu}\right)\dot{I}_{a\mu}+L_b^{\nu\gamma}\left(n_\gamma-2M_{\gamma\mu}I_{a\mu}\right)\dfrac{\partial M_{\nu\lambda}}{\partial\eta_\beta}\dot{\eta}_\beta=\\ =-R_{\lambda\mu}I_{a\mu}+U_\lambda^{\circ}\\ \vartheta_{\lambda\mu}\ddot{\eta}_\mu+\theta_{\lambda,\mu\nu}\dot{\eta}_\mu\dot{\eta}_\nu+L_b^{\nu\gamma}(n_\gamma-M_{\gamma\mu}I_{a\mu})\dfrac{\partial M_{\nu\beta}}{\partial\eta_\lambda}I_{a\beta}+\\ +p\left(\dfrac{\partial\psi_\lambda}{\partial\eta_\mu}-\dfrac{\partial\psi_\mu}{\partial\eta_\lambda}\right)\dot{\eta}_\mu=-B_{\lambda\mu}\dot{\eta}_\mu-\dfrac{\partial W_p(\eta)}{\partial\eta_\lambda}-M_\lambda^{\tilde{n}\grave{o}}-M_\lambda^{\eth}-M_\lambda^{\tilde{n}\ddot{e}}\end{cases}\qquad(1)$$

λ,μ,ν=1,2,3,

с учетом возмущающих моментов: $M_\lambda^{\tilde{n}\grave{o}}$ – момента сухого трения в элементах механической передачи, $M_\lambda^{\eth}$ – момента, действующего на подающее рабочий орган звено, $M_{\lambda}^{\text{ñё}}$ – момента, обусловленного силовыми воздействиями случайного характера.

Здесь $\vartheta_{\lambda\mu}$ – тензор инерции манипулятора, $I_{a\lambda} = \dot{q}_{a\lambda}$, $I_{b\lambda} = \dot{q}_{b\lambda}, \dot{\eta}_{\lambda}$ – обобщенные скорости системы, $L_{a\lambda\mu}$, $L_{b\lambda\mu}$ – тензоры индуктивности, $M_{\lambda\mu}$ – тензор взаимной индуктивности обмоток якоря и возбуждения электродвигателей приводов, $I_{a\beta}$ – циклическая скорость, $\theta_{\lambda,\mu\nu}$ – символ Кристоффеля первого рода метрического тензора $\vartheta_{\lambda\mu}$, тензор $L_b^{\lambda\mu}$: $L_b^{\lambda\mu} L_{b\mu\nu} = \delta_{\nu}^{\lambda}$, δ_{ν}^{λ} – символ Кронекера, n_{γ} – первые интегралы системы, ψ_{λ} – функция, связывающая проекции вектора угловой скорости рабочего органа на оси связанной с ним подвижной системы координат с эйлеровыми углами, p – отнесенный к угловой скорости рабочего органа импульс. Обобщенные силы даются равенствами:

$$N_{\lambda} = -R_{\lambda\mu} I_{a\mu} + U_{\lambda}^{\circ}, \quad M_{\lambda} = -B_{\lambda\mu}\dot{\eta}_{\mu} - \frac{\partial W_p}{\partial \eta_{\lambda}}(\eta), \quad \lambda, \mu = 1,2,3,$$

где $R_{\lambda\mu}$, $B_{\lambda\mu}$ – тензоры, определяющие диссипацию электромагнитной и механической энергий системы, соответственно, $W_p(\eta)$ – потенциальная энергия манипулятора, $\dfrac{\partial W_p(\eta)}{\partial \eta_{\lambda}}$ – потенциальные силы, действующие на степень подвижности с номером λ, U_{λ}° – синтезируемое управление.

Нежелательные силовые явления не удается преодолеть, используя приводы только с линейной обратной связью по выходным переменным подсистем, тем более что коэффициенты усиления регулятора имеют конструктивные ограничения. Эффективное средство компенсации названных возмущающих факторов дают алгоритмы управления сигнального типа с релейной составляющей, обеспечивающие достаточную скорость адаптивных процессов. Поэтому алгоритмы целесообразно использовать для управления объектом при наличии возмущающих факторов с ограниченным диапазоном их изменения при большой скорости. Теоретической основой построения алгоритмов сигнального типа являются методы теории устойчивости и теории систем с переменной структурой.

Построим алгоритм управления методом функций Ляпунова. При синтезе управлений будем полагать, что скорость изменения возмущающего случайного момента $M_{\lambda}^{\text{ñё}}$ достаточно велика, но по величине он ограничен: $\left|M_{\lambda}^{\text{ñё}}\right| \le \bar{M}_{\lambda}$=const. Согласно подходу к синтезу управлений с использованием алгоритмов сигнального типа управление $U_\lambda = R_{\lambda\mu} I_{a\mu} - \alpha\left(J_\lambda + \delta_\lambda^\mu \frac{\Delta I_{a\mu}}{\rho} \right)$, полученное в [1], должно быть дополнено релейной составляющей $U_\lambda^{\text{ñï}}$ и реализоваться в виде:

$$U_\lambda^\circ = U_\lambda + U_\lambda^{\text{ñï}}, \tag{2}$$

где $\lambda, \mu, \nu = 1,2,3$; $U_\lambda \in R^s$, R^s – ограниченное замкнутое множество, выбираемое, исходя их ресурсов управления, ρ, α – положительные постоянные), $\Delta\eta_\lambda$, $\Delta I_{a\lambda}$ – возмущения, введенные как разность между текущими и программными значениями обобщенных координат и скоростей, $J_\lambda = \left(L_{a\lambda\mu} - L_b^{\nu\gamma} M_{\gamma\mu} M_{\nu\lambda} \right) I_{a\mu} - \left(L_{a\lambda\mu} - L_b^{\nu\gamma} M_{\gamma\mu}^\circ M_{\nu\lambda}^\circ \right) I_{a\mu}^\circ + L_b^{\nu\gamma} n_\gamma \frac{\partial M_{\nu\lambda}}{\partial \eta_\beta} \Delta\eta_\beta$ – интеграл возмущенного движения приведенной системы (1).

Построим управление:

$$U_\lambda^{\text{ñï}} = -k_{\lambda\mu}^{\text{ñï}} \left| \dot\eta_\mu \right| \operatorname{sign}\left\{ J_\lambda + \frac{1}{\rho} \delta_\lambda^\mu \Delta I_{a\mu} \right\}, \ \lambda, \mu = 1,2,3, \tag{3}$$

где $k_{\lambda\mu}^{\text{ñï}}$ – диагональная матрица, положительные элементы которой выбираются, исходя из ресурсов управления, величин возмущающих моментов и требований, предъявляемых к качеству управления.

Оценим устойчивость движения МР при управлении вида (2). Структуру функции Ляпунова V оставим прежней [1]:

$$V = \frac{1}{2} \vartheta_{\lambda\mu} \dot\eta_\lambda \dot\eta_\mu + \frac{1}{2}\left(L_{a\lambda\mu} - L_b^{\nu\gamma} M_{\gamma\lambda} M_{\nu\mu} \right) \Delta I_{a\lambda} \Delta I_{a\mu} + W_p(\Delta\eta) + \rho J_\lambda J_\lambda$$

$\lambda, \mu, \nu, \gamma = 1,2,3$.

Производная в силу системы (1) функции Ляпунова с учетом возмущающих моментов примет вид:

$$\begin{aligned} \dot V = {} & -B_{\lambda\mu} \dot\eta_\lambda \dot\eta_\mu + \rho\left(U_\lambda^\circ - R_{\lambda\mu} I_{a\mu} \right)\left(J_\lambda + \frac{1}{\rho} \delta_\lambda^\mu \Delta I_{a\mu} \right) - p \frac{\partial \psi_\lambda}{\partial \eta_\mu} \dot\eta_\mu \dot\eta_\lambda + \\ & + p \frac{\partial \psi_\mu}{\partial \eta_\lambda} \dot\eta_\lambda \dot\eta_\mu - k_{\lambda\mu}^{\text{ñò}} \dot\eta_\lambda \operatorname{sign}\left\{ \dot\eta_\mu \right\} - M_\lambda^{\text{ð}} \dot\eta_\lambda - M_\lambda^{\text{ñë}} \dot\eta_\lambda, \end{aligned} \tag{4}$$

$\lambda, \mu, \nu = 1,2,3$.

Подставив в (4) U_λ°, с учетом (3) и равенства нулю гироскопических слагаемых, получим выражение полной производной функции Ляпунова в силу системы (1):

$$\dot{\mathrm{V}} = -\mathrm{B}_{\lambda\mu}\dot{\eta}_\lambda\dot{\eta}_\mu - \rho\alpha\left(\left(\mathrm{L}_{\text{à}\lambda\mu} + \frac{1}{\rho}\delta_\lambda^\mu\right)\Delta\mathrm{I}_{\mathrm{a}\mu} + \mathrm{I}_{\text{â}\nu}\frac{\partial\mathrm{M}_{\nu\beta}}{\partial\eta_\beta}\Delta\eta_\beta\right)^2 -$$
$$-\mathrm{k}_{\lambda\mu}^{\text{ñò}}\dot{\eta}_\lambda \operatorname{sign}\left\{\dot{\eta}_\mu\right\} - \mathrm{M}_\lambda^{\text{ñë}}\dot{\eta}_\lambda - \mathrm{k}_{\lambda\mu}^{\text{ð}}\dot{\eta}_\lambda\dot{\eta}_\mu - \tag{5}$$
$$-\rho\mathrm{k}_{\lambda\mu}^{\text{ñï}}\left|\left(\mathrm{L}_{\text{à}\lambda\mu} + \frac{1}{\rho}\delta_\lambda^\mu\right)\Delta\mathrm{I}_{\mathrm{a}\mu} + \mathrm{I}_{\text{â}\nu}\frac{\partial\mathrm{M}_{\nu\beta}}{\partial\eta_\beta}\Delta\eta_\beta\right|\left|\dot{\eta}_\mu\right|,$$

λ,μ,ν=1,2,3.

В процессе работы при биениях шлифовального круга слагаемое, относящееся к подающему круг звену в выражении ($-\mathrm{M}_\lambda^{\text{ñë}}\dot{\eta}_\lambda$), отрицательно при наличии контакта с рабочей поверхностью или равно нулю. Так как этот знак не определен для остальных звеньев МР, производная $\dot{\mathrm{V}}$ отрицательна при выполнении неравенства:

$$\bar{\mathrm{M}}_\lambda \le \rho\mathrm{k}_{\lambda\mu}^{\text{ñï}}\left|\left(\mathrm{L}_{\text{à}\lambda\mu} + \frac{1}{\rho}\delta_\lambda^\mu\right)\Delta\mathrm{I}_{\mathrm{a}\mu} + \mathrm{I}_{\text{â}\nu}\frac{\partial\mathrm{M}_{\nu\beta}}{\partial\eta_\beta}\Delta\eta_\beta\right|,\ \lambda,\mu,\nu=1,2,3. \tag{6}$$

При врезании рабочего органа скорости $\dot{\eta}_\lambda$ остальных звеньев манипулятора равны нулю или ничтожно малы, и отрицательность $\dot{\mathrm{V}}$ гарантируется даже при обращении правой части неравенства (6) в нуль. Так как составляющая $\mathrm{U}_\lambda^{\text{ñï}}$ (3) не учитывает характера взаимовлияния подсистем МР, которая может быть как стабилизирующей, так и дестабилизирующей, элементы $\mathrm{k}_{\lambda\mu}^{\text{ñï}}$ следует выбирать, руководствуясь неравенством (6), исходя из условий получения требуемой точности с как можно меньшими их значениями.

Таким образом, в области существования функции Ляпунова V может быть выделено некоторое множество, являющееся предельным множеством исследуемой системы (1), где эта система диссипативна. Элементы множества определяются конкретными данными, полученными от устройства-наблюдателя, допустимыми ошибками по положению всех степеней подвижности манипулятора и параметрами систем управления приводами.

Результаты моделирования показывают, что построенный алгоритм управления обеспечивает величину отклонений составляющих вектора состояния системы от заданных значений в пределах, допустимых для качественной работы МР.

Библиографический список

1. Брагина, А.А. Обратная задача в управлении динамической системой / А.А. Брагина // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Математическое моделирование и программирование». – 2012. – № 40. – С. 159–163.

2. Ширяев, В.И. Об управлении манипуляционным роботом в условиях неопределенности / В.И. Ширяев, А.А. Брагина // Экстремальная робототехника- робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды. Труды 7-го международного симпозиума. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2013. – С.134–141.

3. Alcocer, A. Forceestimation and control in robot manipulators / A. Alcocer, A. Robertsson, A. Valera, R. Johansson // 7th Symposium on robot control (SYROCO”03). – Wroclaw, Poland. – 2003. – Pp. 31–36.

4. Попов, А.В. О способах оценки внешних возмущений при построении системы безопасности управления движением робота-манипулятора / А.В. Попов // Экстремальная робототехника. Сборник докладов международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2011. – С.129–132.