УДК 621.01

К. С. ШОЛАНОВ, Б. К. КУСАИНОВ

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ РОБОТА

In the process of operation of manipulation robot the load's changes on drives in his mobility degrees cause the essential change in dynamics of drives control. The dynamics of control for the electromechanical drive rotation of manipulation robot link is considered. With the aim to stabilize desired dynamics, the adaptive algorithm of drive control was designed. The changes of load on drives are described by variable quantities of moment of inertia and external moment of load. The quantities of moment of inertia and external moment of drive load, necessary to form the control algorithm, are determined in observation device. The observation devices are considered to identify the moment of inertia with the known and unknown external moments of drive load. The asymptotic stability of the suggested algorithms of observation devices operation is proved.

Приводы степеней подвижности манипуляционных роботов (МР) при выполнении ими производственных операций испытывают переменные нагрузки, которые вызваны изменением конфигурации МР в процессе движения, массы и габаритов перемещаемых грузов, а также технологическими факторами и др.

Нагрузка приводов может изменяться в широких пределах и вызывать существенное изменение динамических свойств управления приводами – вплоть до потери работоспособности. Поэтому возникает задача построения в каждой степени подвижности МР адаптивной к нагрузке системы управления (СУ) приводом, динамические свойства которой не зависят от изменений нагрузки.

Уравнения электромеханического привода вращения звена МР с двигателем постоянного тока (ДПТ) можно представить в виде [1]

$$J\ddot{\varphi}_{д} + k_{\omega} k_m R_{Я}^{-1} \dot{\varphi}_{д} = k_{ум} k_m R_{Я}^{-1} u - M_{н}/i, \quad (1)$$

где $J = J(q, \xi)$ – момент инерции нагрузки привода, зависящий от вектора q обобщенных координат МР, вектора ξ параметров МР и перемещаемого им груза (геометрические, масса-инерционные параметры и т.д.); $M_н = M_н(q, \dot{q}, \xi)$ – момент нагрузки привода, обусловленный взаимовлиянием движений по разным степеням подвижности МР, моментами от сил тяжести звеньев МР, груза и т.д.; $\varphi_д$ – угловая координата вала двигателя; i – передаточное отношение редуктора; u – управляющее воздействие; $k_{ум}$ – коэффициент передачи усилителя мощности; k_ω, k_m, $R_Я$ – параметры ДПТ.

Следовательно, изменения нагрузки привода в процессе работы МР характеризуются переменными величинами момента инерции $J = J(q, \xi)$ и внешнего момента $M_н = M_н(q, \dot{q}, \xi)$ нагрузки привода.

Управляющее воздействие привода сформируем в следующем виде:

$$u = k_{дп} k_п \left(\varphi^* - \varphi\right) - k_{дс} k_{ос} \dot{\varphi}_д \ , \ (2)$$

где $k_{дп}$, $k_{дс}$ – коэффициенты передачи датчиков положения и угловой скорости вала двигателя; $k_п$, $k_{ос}$ – коэффициенты усиления регуляторов положения и обратной связи по скорости двигателя; φ^*, φ – требуемое и действительное положения вращательного звена РМ.

Подставляя алгоритм управления (2) в уравнение привода (1) и учитывая кинематическое соотношение $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_д / i$, получаем уравнение замкнутой СУ вращением звена МР:

$$\frac{JiR_Я}{k_{ум} k_m k_{дп} k_п} \ddot{\varphi} + \frac{\left(k_\omega + k_{ум} k_{дс} k_{ос}\right) i}{k_{ум} k_{дп} k_п} \dot{\varphi} + \varphi = \varphi^* - \frac{R_Я}{i\, k_{ум} k_m k_{дп} k_п} M_н \ . \ (3)$$

Таким образом, динамика СУ вращательной степенью подвижности МР описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка, управляемую часть которой можно привести в соответствие с моделью колебательного звена:

$\tau^2 \ddot{\varphi} + 2\zeta\, \tau \dot{\varphi} + \varphi = \varphi^*$, (4)

где

$\tau = \left(JiR_Я \middle/ \left(k_{ум}\, k_m\, k_{дп}\, k_п \right) \right)^{1/2}$, (5)

$\zeta = 0{,}5\left(k_\omega + k_{ум}\, k_{дс}\, k_{ос} \right)\left(i\, k_m \middle/ \left(k_{ум}\, k_{дп} k_п\; J R_Я \right) \right)^{1/2}$ (6)

– постоянная времени и коэффициент демпфирования СУ.

Из выражений (5) и (6) видно, что при увеличении момента инерции J возрастает постоянная времени τ и уменьшается коэффициент демпфирования ζ; т.е. быстродействие и демпфирование системы ухудшаются. С целью стабилизации быстродействия и демпфирования СУ на всем диапазоне изменения момента инерции, т.е. $\forall J \in [J_{\min}, J_{\max}]$, потребуем, чтобы на ступенчатое воздействие $\varphi^*(t) = 1(t)$ переходный процесс длился не более T, с и без перерегулирования $(\sigma = 0)$. Воспользовавшись упрощенными соотношениями

$T \cong 3\tau, \qquad \sigma = 0$ при $\zeta = 1$ (7)

и выражениями (5), (6) для τ и ζ, сформируем управляющие параметрические воздействия регуляторов положения $k_п$ и обратной связи по скорости $k_{дс}$ СУ в зависимости от изменений момента инерции J [2]:

$k_п(J) = k_1 J$, (8)

$k_{ос}(J) = k_2 J - k_3$, (9)

где $k_1 = 9\, i\, R_Я / \left(k_{ум}\, k_m k_{дп} T^2 \right)$, $k_2 = 6 R_Я / \left(k_{ум}\, k_m k_{дс} T \right)$, $k_3 = k_\omega / \left(k_{ум}\, k_{дс} \right)$ – постоянные параметры регуляторов.

Подставив (8) и (9) в выражение (2), сформируем следующий алгоритм управления электромеханическим приводом, адаптивный к изменениям момента инерции и внешнего момента нагрузки привода:

$u(\varphi, \dot{\varphi}_д, J, M_н) = \left(k_{дп}\, k_1 \left(\varphi^* - \varphi \right) - k_{дс}\, k_2\, \dot{\varphi}_д \right) J + k_{дс}\, k_3\, \dot{\varphi}_д + k_4 M$, (10)

где $M = M_н / i$ – приведенный к валу двигателя внешний момент нагрузки, $k_4 = R_Я \left(k_m\, k_{ум} \right)^{-1}$ – постоянная. Здесь слагаемое $k_4 M$ компенсирует изменения внешнего момента нагрузки, устраняя тем самым статическую ошибку привода.

Если величины момента инерции J и внешнего момента M нагрузки привода известны, то, подставив полученный алгоритм адаптивного управления (10) в уравнение электромеханического привода (1), можно убедиться в том, что динамика адаптивной к нагрузке СУ описывается дифференциальным уравнением (4) с заданными параметрами $\tau = T/3$, $\zeta = 1$, и, следовательно, обеспечивается адаптивная стабилизация динамики управления степенью подвижности РМ.

На практике необходимые для формирования алгоритма управления (10) величины момента инерции J и внешнего момента M нагрузки привода в процессе работы МР изменяются в широких пределах и могут быть неизвестными, например, при перемещении МР неизвестных грузов. В этой связи возникает задача оценки непрограммируемых изменений этих величин в целях компенсации их влияния на динамику СУ. Для решения этой задачи в работе [3] предлагается следующее наблюдающее устройство (НУ) идентификации неизвестной величины $1/J$ момента инерции нагрузки ДПТ с учетом его измеряемого (известного) внешнего момента нагрузки M:

$$d\hat{\omega}_д \big/ dt = \left(1/\hat{J}\right)\left(k_m\, i_Я - M\right) + \lambda\, k_{дс}\left(\omega_д - \hat{\omega}_д\right),$$

$$d\left(1/\hat{J}\right)/\,dt = \beta\left(k_m\, i_Я - M\right)k_{дс}\left(\omega_д - \hat{\omega}_д\right) \quad (11)$$

с начальными условиями: $\hat{\omega}_д(0) = 0$, $\hat{J}^{-1}(0) = J_{CP}^{-1}$, где $\hat{\omega}_д$ – оценка угловой скорости $\omega_д = \dot{\varphi}_д$ вала двигателя; $1/\hat{J}$ – оценка величины $1/J$ момента инерции нагрузки; $J_{CP} = \left(J_{\min} + J_{\max}\right)/2$ – среднее значение из возможного диапазона изменений J; $i_Я$ – ток якоря ДПТ, измеряется датчиком тока; λ, β – положительные постоянные.

Рассмотрим устойчивость адаптивного НУ при идентификации переменной J^{-1} ДПТ с учетом его момента нагрузки M. Если ввести обозначения $e = \omega_д - \hat{\omega}_д$ и $\nu = 1/J - 1/\hat{J}$ и принять во внимание, что

$$d\omega_д / dt = (1/J)(k_m\, i_Я - M)$$

(как следствие из уравнения моментов на валу ДПТ: $J d\omega_д / dt = k_m\, i_Я - M$), то алгоритм работы НУ в координатах e и ν может быть описан уравнениями:

$$de/dt = (k_m\, i_Я - M)\nu - \lambda\, k_{дс}\, e,$$

$$d\nu/dt = -\beta(k_m\, i_Я - M)k_{дс}\, e. \quad (12)$$

При этом принимаются начальные условия: $e(0) = 0$, $\nu(0) = J^{-1} - J_{CP}^{-1}$ и на основании гипотезы квазистационарности считается, что на временном интервале, соответствующем переходному процессу в НУ, изменение величины J^{-1} отсутствует.

Докажем, что положение равновесия системы уравнений (12) асимптотически устойчиво, т.е. $\lim\limits_{t\to\infty} e = 0$ и $\lim\limits_{t\to\infty} \nu = 0$. Рассмотрим функцию Ляпунова в виде положительно-определенной квадратичной формы ошибки e и параметра ν:

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}\frac{1}{\beta k_{дс}}\nu^2,$$

тогда ее полная производная по времени, взятая с учетом (12), будет равна

$$\frac{dV}{dt} = -\lambda k_{дс} e^2.$$

Функция dV/dt должна быть отрицательно-определенной в пространстве переменных e и ν, т.е.

$$\frac{dV}{dt}(e, \nu) = 0 \text{ при } e \equiv 0 \text{ и } \nu \equiv 0.$$

Для этого доказывается, что при $e \equiv 0$ имеем и $\nu \equiv 0$. Для доказательства рассматривается система уравнений (12) при тождественном равенстве нулю ошибки e. Поскольку при этом производная ошибки по времени равна нулю, то система уравнений (12) принимает вид

$0 = (k_m\, i_Я - M)\nu,\ \ d\nu/dt = 0.$ (13)

В установившемся режиме привода $k_m\, i_Я = M$. Процесс оценки величины J^{-1} в НУ протекает значительно быстрее основного переходного процесса в системе (за счет соответствующего выбора λ и β), поэтому при $e \equiv 0$ очевидно тождественное равенство нулю параметра ν, так как переходный процесс в наблюдаемой системе еще не закончился и $k_m\, i_Я - M \neq 0$. Следовательно, функция dV/dt является отрицательно-определенной и при построении НУ согласно выражениям (11) оценка $\hat{J}^{-1}$ асимптотически приближается к величине J^{-1} момента инерции нагрузки привода с учетом его момента нагрузки M.

Для использования оценки $\hat{J}^{-1}$ вместо величины момента инерции J в алгоритме адаптивного управления (10) необходимо предварительно в блоке деления осуществить операцию $\hat{J} = 1/\left(\hat{J}^{-1}\right)$.

В рассмотренном НУ предполагается, что внешний момент нагрузки M привода измеряется датчиком момента, так как для работоспособности НУ необходимо, чтобы в любой момент времени ее величина была известной. В целях упрощения измерения внешнего момента нагрузки целесообразно ее величину M оценивать в НУ наряду с величиной J^{-1} момента инерции, тогда динамические процессы в «механической» части привода будут идентифицированы в НУ полностью и устранится влияние погрешности датчика момента на работу НУ. Поэтому в работе [4] алгоритм работы НУ для ДПТ предлагается в следующем виде:

$d\hat{\omega}_д/dt = \left(1/\hat{J}\right)\left(M_д - \hat{M}\right) + \lambda\, k_{дс}\left(\omega_д - \hat{\omega}_д\right),$

$$d\left(1/\hat{J}\right)/dt=\beta\left(M_{д}-\hat{M}\right)k_{дс}\left(\omega_{д}-\hat{\omega}_{д}\right),\ (14)$$

$$d\hat{M}/dt=-\alpha\,k_{дс}\left(\omega_{д}-\hat{\omega}_{д}\right)$$

с начальными условиями: $\hat{\omega}_{д}(0)=0$, $\hat{J}^{-1}(0)=J_{CP}^{-1}$, $\hat{M}(0)=0$, где $\hat{M}$ – оценка приведенного внешнего момента нагрузки M; α,β,λ – положительные постоянные.

Рассмотрим устойчивость адаптивного НУ идентификации переменных J^{-1} и M. Введем обозначения $e=\omega_{д}-\hat{\omega}_{д}$, $\nu=1/J-1/\hat{J}$ и $\mu=M-\hat{M}$ и примем во внимание, что $d\omega_{д}/dt=(1/J)(M_{д}-M)$, тогда алгоритм работы НУ в координатах e, ν и μ может быть описан уравнениями:

$$\frac{de}{dt}=\frac{1}{J}(M_{д}-M)-\frac{1}{\hat{J}}\left(M_{д}-\hat{M}\right)-\lambda\,k_{дс}\,e,$$

$$\frac{d\nu}{dt}=-\beta\left(M_{д}-\hat{M}\right)k_{дс}\,e,\ (15)$$

$$\frac{d\mu}{dt}=\alpha\,k_{дс}\,e.$$

При этом примем начальные условия: $e(0)=0$, $\nu(0)=J^{-1}-J_{CP}^{-1}$, $\mu(0)=0$ – и на основании гипотезы квазистационарности будем считать, что на временном интервале, соответствующем переходному процессу в НУ, величины J^{-1} и M не изменяются.

Докажем, что положение равновесия системы уравнений (15) асимптотически устойчиво, т.е. $\lim\limits_{t\to\infty}e=0$, $\lim\limits_{t\to\infty}\nu=0$ и $\lim\limits_{t\to\infty}\mu=0$. Рассмотрим положительно-определенную функцию Ляпунова вида

$$V=\frac{1}{2}e^{2}+\frac{1}{2\beta k_{дс}}\nu^{2}+\frac{1}{2\alpha\,k_{дс}\,J}\mu^{2}.$$

Здесь $J=\mathrm{const}$, так как соответствует интервалу квазистационарности.

С учетом того, что

$\mu = M - \hat{M} = \left(M_{\partial} - \hat{M} \right) - \left(M_{\partial} - M \right),$

запишем полную производную функции V по времени на основании системы уравнений (15):

$$\frac{dV}{dt} = -\lambda k_{\partial c} e^2 .$$

Покажем, что $\nu \equiv 0$, $\mu \equiv 0$ при $e \equiv 0$. Для этого рассмотрим систему уравнений (15) при $e \equiv 0$:

$$0 = \frac{1}{J}\left(M_{\partial} - M\right) - \frac{1}{\hat{J}}\left(M_{\partial} - \hat{M}\right), \ \frac{d\nu}{dt} = 0, \ \frac{d\mu}{dt} = 0 .$$

Равенство нулю первого выражения означает, что $1/J = 1/\hat{J}$ и $M = \hat{M}$, поэтому при $e \equiv 0$ очевидно тождественное равенство нулю параметров $\nu = 1/J - 1/\hat{J}$ и $\mu = M - \hat{M}$. Следовательно, функция dV/dt является определенно-отрицательной и при построении НУ согласно выражениям (14) оценки $1/\hat{J}$ и $\hat{M}$ асимптотически приближаются к величинам $1/J$ момента инерции и внешнего момента M нагрузки привода. Сходимость процесса оценки зависит от коэффициентов λ, β и α, которые практически всегда могут быть выбраны из условия протекания в НУ процессов оценки быстрее основного переходного процесса в приводе.

Таким образом, управление электромеханическими приводами манипуляционного робота, число которых равно степени подвижности робота, осуществляется согласно алгоритму (10). При этом значения неизвестных величин J (момента инерции) и M (внешнего момента нагрузки привода), вычисляются в наблюдающем устройстве системы управления, которое выдает дискретные значения $\hat{J}$ и $\hat{M}$. Такая система обеспечивает адаптивное управление по отношению к нагрузке и позволяет стабилизировать дополнительные параметры робота в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шоланов К.С.* Кибернетические машины. Алматы: Эверо, 2008. Кн. 1. 299 с.
2. А.ч. 2967 РК. Устройство для автоматического управления роботом-манипулятором / Джолдасбеков У.А., Молдабеков М.М., Кусаинов Б.К.; опубл. 15.03.96, Бюл. № 1. 7с.
3. Пред. патент № 5616 РК. Система управления приводом робота / Джолдасбеков У.А., Молдабеков М.М., Кусаинов Б.К.; опубл. 15.12.97, Бюл. № 5. 6 с.
4. Пред. патент № 7672 РК. Адаптивная система управления приводом / Джолдасбеков У.А., Молдабеков М.М., Кусаинов Б.К.; опубл. 15.06.99, Бюл. № 6. 6 с.