

О.Н. ГАСПАРЯН, С.Г. АРАБЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ L_1 АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ИСКУССТВЕННОЙ РУКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
ОБРАТНОЙ ДИНАМИКИ**

Проведено исследование системы управления искусственной рукой с N степенями свободы с учетом динамики исполнительных двигателей. С целью компенсации влияния неизвестного внешнего возмущения построена L_1 адаптивная система управления отдельными звеньями искусственной руки.

Ключевые слова: искусственная верхняя конечность, робот-манипулятор, адаптивная система управления L_1 , метод обратной динамики.

В статье предлагается новый подход к построению системы управления искусственной рукой (ИР) (рис. 1), основанный на применении методов теории L_1 адаптивного управления, который дает возможность обеспечить быструю адаптацию системы с сохранением её робастности [1,2].



Рис. 1. Внешний вид верхней искусственной конечности человека

Известно, что искусственная рука человека конструктивно относится к роботам-манипуляторам и динамика последних описывается сложной системой нелинейных взаимосвязанных уравнений, причем число степеней свободы ИР может достигать 27 [3].

Уравнение динамики N -мерного манипулятора в матричном виде [3] с учетом динамики исполнительных двигателей (ИД) постоянного тока имеет вид [4,5]

$$M^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + g^*(q) = \tau + \sigma, \quad (1)$$

где q - N-мерный вектор обобщенных координат,

$$M^*(q) = [diag\{I_{Mi}\} + diag\{1/k_i^2\}M(q)],$$

$M(q)$ есть симметричная, положительно определенная матрица, зависящая от общей конфигурации и называемая матрицей (или тензором) инерции; I_{Mi} - моменты инерции роторов ИД, а k_i - коэффициенты передачи редукторов;

$$C^*(q, \dot{q}) = [diag\{C_{Mi}C_{ei}/r_i\} + diag\{M_{Frv_i}\} + diag\{1/k_i^2\}C(q, \dot{q})],$$

C_{Mi} - коэффициенты по моменту ИС; C_{ei} - коэффициенты противо-ЭДС, а r_i - активные сопротивления цепи ротора; $C(q, \dot{q})$ - матрица кориолисовых и центробежных сил; M_{Frv_i} - моменты вязкого трения в механических передачах,

$$g^*(q) = diag\{1/k_i^2\}g(q),$$

$g(q)$ – вектор гравитационных сил [1]; τ - вектор управляющих моментов, приложенных к звеньям, а $\sigma \in [\sigma_a, \sigma_b]$ - постоянное векторное возмущение.

Для разработки системы управления ИР применим известный в робототехнике метод обратной динамики [3], который линеаризует уравнения движения и сводит многомерную систему уравнений ИР к совокупности N отдельных интегрирующих звеньев второго порядка. Как показано в [6], вводя соответствующие коэффициенты обратных связей для обобщенных координат и их производных, можно также получить необходимое распределение корней характеристического уравнения линеаризованной ИР.

Если выбрать закон управления в соответствии со следующим уравнением:

$$\tau = r + u, \quad (2)$$

где r - постоянный сигнал уставки, а

$$u = C^*(q, \dot{q})\dot{q} - diag(K_{li})\dot{q} + M^*(q)\ddot{q} - \ddot{q}I + g^*(q) - diag(K_{oi})q, \quad (3)$$

K_{oi} и K_{li} – постоянные коэффициенты регулятора обратной динамики, которые выбираются исходя из желаемого распределения корней линеаризованных уравнений ИР, то можно записать следующее выражение для m -го ($m=1, 2, \dots, N$) звена ИР:

$$\ddot{q}_m + K_{1m}\dot{q}_m + K_{0m}q_m = r_m + \sigma_m. \quad (4)$$

Подчеркнем, что обобщенные координаты q_m , а также переменные r_m и $\sigma_m = \text{const}$ в (4) являются скалярными и описывают движение m -го изолированного звена ИР. Структурные схемы системы управления ИР с предложенной модификацией метода обратной динамики приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

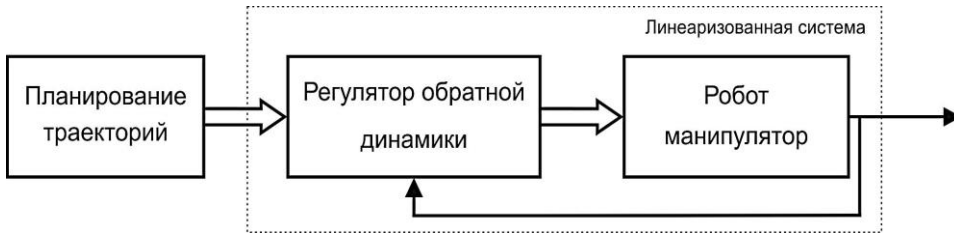


Рис. 2. Структурная схема системы с регулятором обратной динамики

Линейное уравнение (4) описывает динамику звеньев ИР, развязанных путем применения метода обратной динамики (т.е. изолированных).

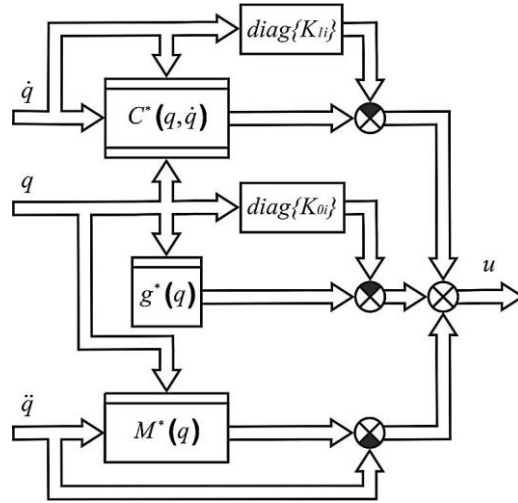


Рис. 3. Схема реализации метода обратной динамики

Уравнения движения каждого отдельного звена представляются в пространстве состояний в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + b(u(t) + \sigma(t)), \quad x(0) = 0, \\ y(t) &= c^T x(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $x = [q, \dot{q}]^T$ (здесь и далее будем для простоты опускать индекс m).

Уравнения наблюдающего устройства системы имеют ту же форму [1]:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + b(u(t) + \hat{\sigma}(t)), \quad \hat{x}(0) = 0, \\ \hat{y}(t) &= c^T \hat{x}(t),\end{aligned}\quad (6)$$

где через $\hat{\bullet}$ обозначаются наблюдаемые величины (оценки вектора состояний).

Ошибка оценки определяется следующим уравнением:

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t). \quad (7)$$

Из (5) и (6) вытекает, что

$$\dot{\varepsilon}(t) = A\varepsilon(t) + b\tilde{\sigma}(t), \quad (8)$$

где $\tilde{\sigma}(t) = \sigma(t) - \hat{\sigma}(t)$.

В соответствии с теорией адаптивного управления L_1 [1,2] управляющий сигнал системы в операторном виде дается следующим уравнением:

$$u(s) = C(s)(k_g r(s) - \hat{\sigma}(s)), \quad (9)$$

где $C(s)$ – передаточная функция низкочастотного фильтра ($C(0) = 1$), а

$$k_g = -1 / (c^T A^{-1} b). \quad (10)$$

В качестве закона компенсации возмущений на основе общей теории адаптивного управления с эталонной моделью имеем [1,2]

$$\dot{\hat{\sigma}}(t) = \Gamma b^T P \varepsilon(t), \quad (11)$$

где Γ – коэффициент адаптации, который выбирается исходя из требуемой скорости адаптации. Проблема устойчивости системы адаптивного управления рассмотрена в [6], где показано, что данная система управления асимптотически устойчива при любых значениях Γ .

На рис. 4 приведена блок-схема системы с наблюдающим устройством и адаптивным законом компенсации возмущений.

Можно показать, что уравнения движения адаптивной системы с наблюдающим устройством имеют в операторной форме вид

$$y(s) = w(s)C(s)k_g r(s) + w(s)[1 - C(s)[1 + w_0(s)]^{-1} w_0(s)]\sigma(s), \quad (12)$$

где $w_0(s)$ – передаточная функция замкнутого контура адаптивной системы управления, которая дается следующим выражением:

$$w_0(s) = \frac{\Gamma}{s} b^T P (sI - A)^{-1} b. \quad (13)$$

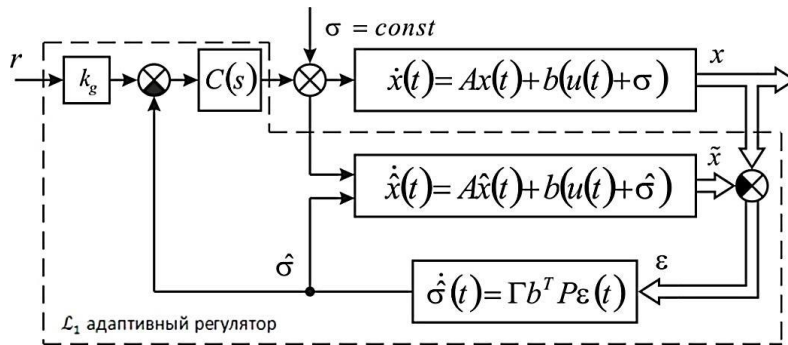


Рис. 4. Структурная схема замкнутой адаптивной системы управления L_1

В среде SIMULINK программного пакета MATLAB разработана динамическая модель приведенной адаптивной системы на основе нелинейных взаимосвязанных уравнений движения 6 - степенного антропоморфического робота-манипулятора PUMA 560 [7] при следующих значениях параметров регулятора обратной динамики: $K_0 = 4$, $K_1 = 5$, $\sigma \in [-0,003, 0,003]$. Моделирование было проведено при следующих значениях Γ : 10^5 , 10^6 , 10^7 . Отметим, что при моделировании системы учитывалось также сухое (кулоново) трение в механических передачах: $M_{FrC} = 0,0005$.

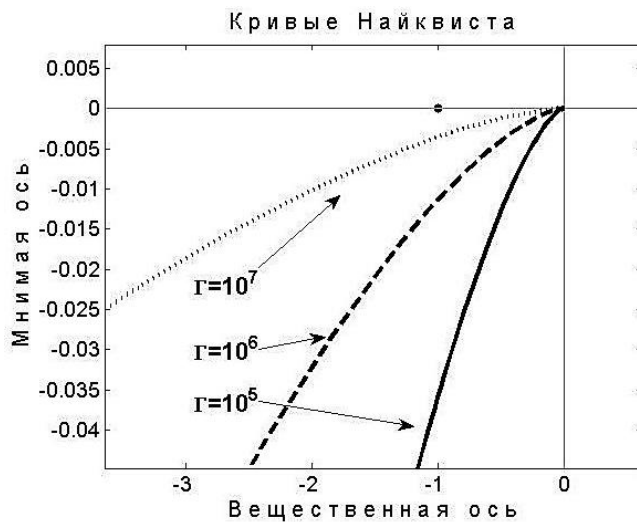


Рис. 5. Кривые Найквиста передаточной функции $w_0(s)$ (13) при разных значениях коэффициента Γ

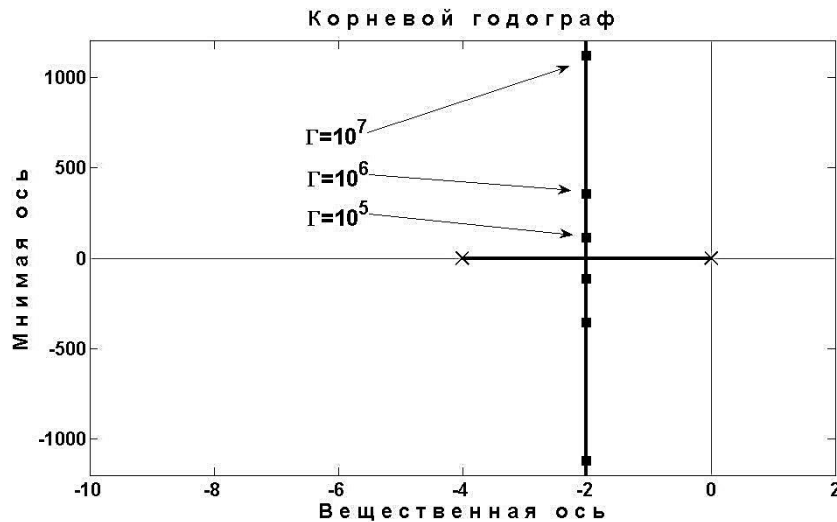


Рис. 6. Корневые годографы замкнутой системы с передаточной функцией $w_0(s)$ (13) при изменении коэффициента Γ

На рис. 5 и 6 приведены частотные и корневые характеристики передаточной функции $w_0(s)$ (13). Из корневого годографа видно, что увеличение скорости адаптации Γ действительно не влияет на устойчивость системы, так как при увеличении коэффициента Γ корни замкнутой адаптивной системы двигаются в бесконечность параллельно мнимой оси, оставаясь в левой полуплоскости.

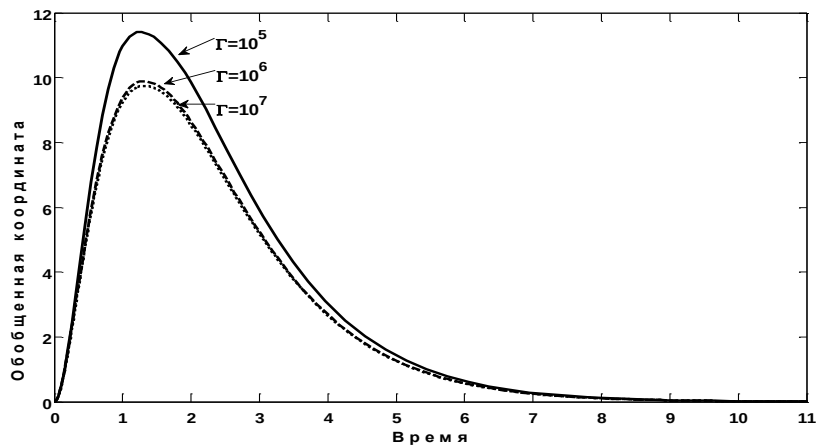


Рис. 7. График изменения обобщенной координаты первого звена

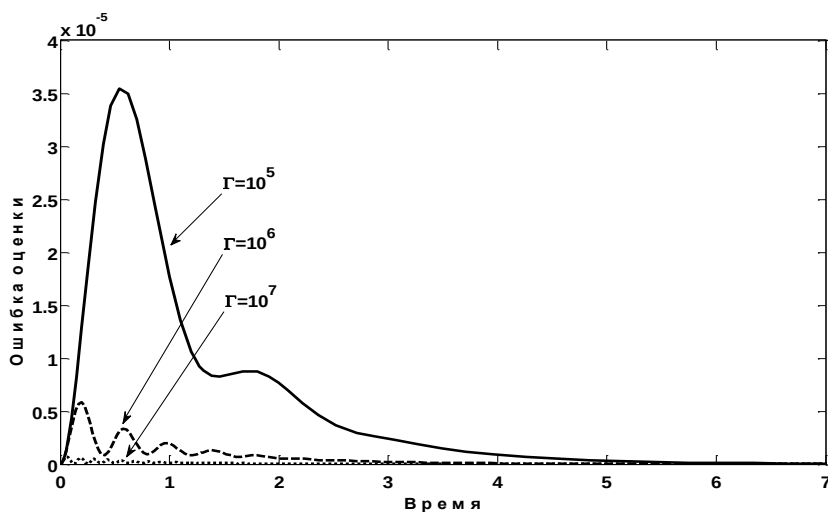


Рис. 8. График изменения ошибки предсказания

В качестве примера графики на рис. 7 и 8 описывают переходные процессы в отдельном (в данном случае - первом) звене манипулятора при различных значениях коэффициента адаптации Γ .

Приведенные результаты исследования позволяют утверждать, что применение принципов L_1 адаптивного управления в сочетании с методом обратной динамики дает возможность получать большие значения коэффициента адаптации без потери устойчивости системы управления ИР, обеспечивая в то же время независимость движения отдельных звеньев последней.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта № SCS 13-2B305.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hovakimyan N. and Cao C.** L1 Adaptive Control Theory.- Philadelphia, 2010.
2. **Cao C. and Hovakimyan N.** Design and Analysis of a Novel L1 Adaptive Control Architecture with Guaranteed Transient Performance // IEEE Transactions on Automatic Control. - March, 2008. - Vol. 53, №2.- P. 586-591.
3. **Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar.** Robot Modeling and Control. – 2006.- 478 p.
4. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования.- М.: Наука, 2003. – 560 с.
5. **Буниятиян Л.М.** Проектирование системы управления искусственной руки с учетом динамики исполнительных двигателей // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2013. - Т. 66, N1. - С. 35-45.

6. **Արաքյան Ս.Գ.** Արհեստական ձեռքի ադապտիվ կառավարման համակարգի մշակումը հակադարձ դինամիկայի մեթոդով // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. Մաս 1.- Երևան, 2013.- էջ 192-196:
7. **Corke Peter I.** The Unimation Puma Servo System, CSIRO. - Australia, 1994.- 54 p.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 21.02.2014.

Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ս.Գ. ԱՐԱԲՅԱՆ

**ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՁԵՌՔԻ L_1 ԱԴԱՊՏԻՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ
ՀԱԿԱՂԱՐԶ ԴԻՆԱՄԻԿԱՑԻ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Կատարվել է ազատության N աստիճան ունեցող արհեստական ձեռքի հետազոտում՝ գործադիր շարժիչների դինամիկայի հաշվառմամբ: Արտաքին անհայտ վրդովմունքի ազդեցության չեզոքացման նպատակով մշակվել է արհեստական ձեռքի առանձին օղակների L_1 ադապտիվ կառավարման համակարգ:

Առանցքային բառեր. վերին արհեստական վերջույթ, ռոբոտ-մանիպուլյատոր, L_1 ադապտիվ կառավարման համակարգ, հակադարձ դինամիկայի մեթոդ:

O.N. GASPARYAN, S.G. ARABYAN

**INVESTIGATING THE L_1 ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF AN ARTIFICIAL
ARM BY USING THE METHOD OF INVERSE DYNAMICS**

A control system of an N -degree-of-freedom artificial arm is investigated considering the dynamics of executive motors. In order to compensate the external unknown disturbances, an L_1 adaptive control system is designed for each link of the artificial arm.

Keywords: upper artificial limb, robot-manipulator, L_1 adaptive control system, method of inverse dynamics.