



СТЕБУЛЯНИН

Михаил Михайлович,
кандидат технических наук, доцент, начальник управления подготовки научных кадров (МГТУ «Станкин»)



СИНИЦЫН

Андрей Геннадьевич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» (МГТУ «Станкин»)

Контурное управление манипуляционным роботом в режиме априорной неопределенности закона движения

М.М. Стебулянин, А.Г. Сеницын

В работе предложен кинематический алгоритм контурного управления манипуляционными роботами, направленный на оперативное формирование программы движения манипулятора. Приведено математическое обоснование алгоритма и правила настройки параметров уравнения управления. Представлено математическое моделирование процесса преследования роботом движущейся цели, по результатам которого сделаны выводы об эффективности работы алгоритма и ограничениях на его применение.

Ключевые слова: манипуляционный робот, контурное управление, кинематический алгоритм, преследование.

The article presents a new path control kinematic algorithm for industrial manipulators, designed for real-time control applications. Mathematical justification of the control equation and rules of parameters choice are given. Based on the simulation results presented in section 4, the conclusions on the algorithm's efficiency and its application constraints have been drawn.

Keywords: industrial manipulator, path control, kinematic control algorithm, tracking mode.

Одной из задач контурного управления n -звенным манипуляционным роботом является определение закона изменения обобщенных координат $q(t) \in R^{nx1}$, обеспечивающего желаемый закон изменения квазиординат рабочего органа $r_d(t) \in R^{6x1}$ в физическом пространстве. Традиционные алгоритмы контурного управления предполагают необходимость многократного решения обратной задачи кинематики в условиях полной априорной определенности технологической среды, что не всегда достижимо. Например, при выполнении роботизированной операции разгрузки движущегося конвейера [1], детали на котором ориентированы произвольно, применение жесткого программирования системы управления (СУ) манипулятора невозможно. В подобных условиях априорной неопределенности закона движения $r_d(t)$ необходимо использовать альтернативные алгоритмы. В данной работе в качестве альтернативы предлагается кинематический алгоритм, позволяющий определять функцию $q(t)$ на основании заданного закона $r_d(t)$ без решения ОЗК.

Кинематическое управление целевым движением

Задачу движения рабочего органа представим, как задачу преследования целевого триэдра, изменяющего положение и ориентацию относительно неподвижной базовой системы координат (СК).

Обозначим:

$r_d(t)=[s_d(t) \theta_d(t)]$, $r_f(t)=[s_f(t) \theta_f(t)]$ — заданный и фактический закон движения рабочего органа соответственно;

$s_d(t) \in R^{3 \times 1}$, $s_f(t) \in R^{3 \times 1}$ — радиус-векторы положения целевого триэдра и положения центра СК, связанной с рабочим органом, соответственно;

$\theta_d(t) \in R^{3 \times 1}$, $\theta_f(t) \in R^{3 \times 1}$ — векторы конечного поворота, характеризующие ориентацию целевого триэдра и ориентацию СК, связанной с рабочим органом, относительно неподвижной базовой СК соответственно;

$e_{fd}(t)=r_d(t)-r_f(t)$ — составной вектор ошибки положения/ориентации СК, связанной с рабочим органом, относительно целевого триэдра;

$q_d(t)$, $q_f(t)$ — векторы обобщенных координат манипулятора в целевом и фактическом положении соответственно.

Под задачей контурного управления понимается задача определения функции $q_f(t)$ в зависимости от желаемого закона движения $r_d(t)$. Кинематический подход заключается в выборе закона управления ошибкой $e_{fd}(t)$, заданного в виде уравнения собственного движения устойчивого звена, например, колебательного:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_{fd} + k_1 \dot{e}_{fd} + k_2 e_{fd} &= 0, \\ k_1 = 2\xi\lambda, \quad k_2 = \lambda^2, \quad 0 < \lambda < 1, \end{aligned} \tag{1}$$

Задачу рассмотрим для 6-звенного манипулятора ($q_d(t) \in R^{6 \times 1}$, $q_f(t) \in R^{6 \times 1}$).

Производная вектора ошибки $e_{fd}(t)$ составит:

$$\dot{e}_{fd} = \dot{r}_d - \dot{r}_f. \tag{2}$$

Векторы скоростей $\dot{q}_f(t)$ и $\dot{r}_f(t)$ связаны уравнением:

$$\dot{q}_f(t) = J^{-1}(q_f) \dot{r}_f(t), \tag{3}$$

где $J(q) \in R^{6 \times 6}$ — матрица Якоби функции $r_f(q_f)$, которую можно представить в виде блочной матрицы:

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_s(q) \\ J_\theta(q) \end{bmatrix}.$$

Здесь $J_s(q) \in R^{3 \times 6}$, $J_\theta(q) \in R^{3 \times 6}$ — якобианы функций перемещения и ориентации соответственно.

Продифференцировав уравнение (3) с учетом (2), получим желаемый закон изменения обобщенных ускорений манипулятора, соответствующий движению $r_d(t)$ в физическом пространстве:

$$\ddot{q}_f(t) = J^{-1}(q_f)(\ddot{r}_d - \ddot{e}_{fd}) + (J^{-1}(q_f))(\dot{r}_d - \dot{e}_{fd}). \tag{4}$$

После подстановки в (4) уравнения управления (1) получим:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_f(t) = J^{-1}(q_f)(k_1 \dot{e}_{fd} + k_2 e_{fd} + \ddot{r}_d) + \\ + (J^{-1}(q_f)) \cdot (\dot{r}_d - \dot{e}_{fd}). \end{aligned} \tag{5}$$

Проинтегрировав дважды уравнение (5), вычислим искомую функцию времени $q_f(t)$.

Настройка параметров уравнения управления

Параметром настройки движения преследования целевого триэдра является угловая частота λ свободных колебаний звена (1).

Введем управление величиной λ , обеспечивающее монотонное убывание функции $\varphi(t)$ — угла между векторами $\dot{r}_f(t)$ и $\dot{r}_d(t)$. Выберем следующий критерий качества процесса преследования:

$$\frac{d}{dt}(\cos \varphi(\lambda)) > 0. \tag{6}$$

Выражая $\cos \varphi$ через скалярное произведение векторов \dot{r}_d и $\dot{r}_f = J(q_f)\dot{q}_f$, преобразуем неравенство (6) к следующему виду:

$$\dot{r}_d^T J \dot{q}_f + \dot{r}_d^T J \dot{q}_f + \dot{r}_d^T J \ddot{q}_f - (\dot{r}_d^T J \dot{q}_f) A > 0, \quad (7)$$

где $A = \frac{d}{dt} \left(\frac{|\dot{r}_d^T J \dot{q}_f|}{|\dot{r}_d^T J \dot{q}_f|} \right) = \frac{d}{dt} (\ln(|\dot{r}_d^T J \dot{q}_f|))$.

Из уравнений (2) и (3) выразим вектор фактических обобщенных скоростей:

$$\dot{q}_f = J^{-1} (\dot{r}_d - \dot{e}_{fd}). \quad (8)$$

С учетом уравнений (5) и (8) из (7) получим следующее квадратичное неравенство относительно λ :

$$a\lambda^2 + b\lambda + c > 0,$$

где $a = \dot{r}_d^T e_{fd}$; $b = 2\xi \dot{r}_d^T \dot{e}_{fd}$;

$c = 2\dot{r}_d^T \ddot{r}_d - \dot{r}_d^T \ddot{e}_{fd} - (\dot{r}_d^T J \ddot{q}_f) A$.

Величина λ задает динамику управления. Следует сказать, что завышенные значения приводят к перегрузке по потребной мощности движения преследования. Кроме того, величина λ должна быть согласована с возможностями следящего привода. Однако справедливо и то, что занижение λ приводит к возрастанию ошибки e_{fd} в начальной фазе преследования и, как следствие, к затягиванию переходного процесса. В связи с этим, алгоритм вычисления λ должен быть дополнен интервальными ограничениями на результат.

Также, во избежание скачков обобщенных ускорений необходимо ограничивать производную функции $\lambda(t)$.

Очевидно, что величина λ на каждом такте управления должна рассчитываться в зависимости от значений меньшего λ_1 и большего λ_2 корня уравнения $a\lambda^2 + b\lambda + c = 0$, с учетом знаков его коэффициентов и дискриминанта. Предполагаются следующие правила выбора:

- 1) если $a > 0, D > 0, \lambda > \lambda_2$, — дискриминант;
- 2) если $a < 0$, то $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$;
- 3) если $a > 0, D < 0$, то λ может принимать любое положительное значение;
- 4) если $a = 0, b > 0$, то $\lambda > c / b$;
- 5) если $a = 0, b < 0$, то $\lambda < c / b$.

Необходимо отметить, что во втором случае при $D < 0$ условие (6) невыполнимо, однако, указанный алгоритм позволяет минимизировать скорость возрастания угла φ .

Моделирование алгоритма

Структура математической модели представлена на рис. 1.

Для учета влияния динамических свойств исполнительной системы была использована модель трехконтурного следящего привода постоянного тока, замкнутого по положению. При выборе стандартных настроек на оптимум по модулю данный привод может быть приближенно описан передаточной функцией эквивалентного колебательного звена [3]:

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\zeta Tp + 1},$$

где T — постоянная времени; ζ — коэффициент демпфирования.

Для математического описания приводов всех трех степеней подвижности использовался принцип самого медленного звена как наиболее неблагоприятный.

Если принять гипотезу о превалировании располагаемых энергетических ресурсов и исключить из рассмотрения фактор взаимовлияния приводов через исполнительный механизм робота, то можно считать постоянную времени T практически неизменной. В действительности постоянство приведенных моментов инерции имеет место при наличии в приводах редукторов с большими передаточными отношениями [4].

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе была рассмотрена модель привода с малой постоянной времени: $T = 0,018$ с и коэффициентом демпфирования $\zeta = 0,55$. Указанные значения параметров T и ζ обеспечивают следующие характеристики переходной функции колебательного звена: время переходного процесса $\tau = 0,12$ с и перерегулирование $\sigma = 20$ %. Анализ работы алгоритма в данных условиях позволяет оценить при управлении величиной λ качество процесса преследования.

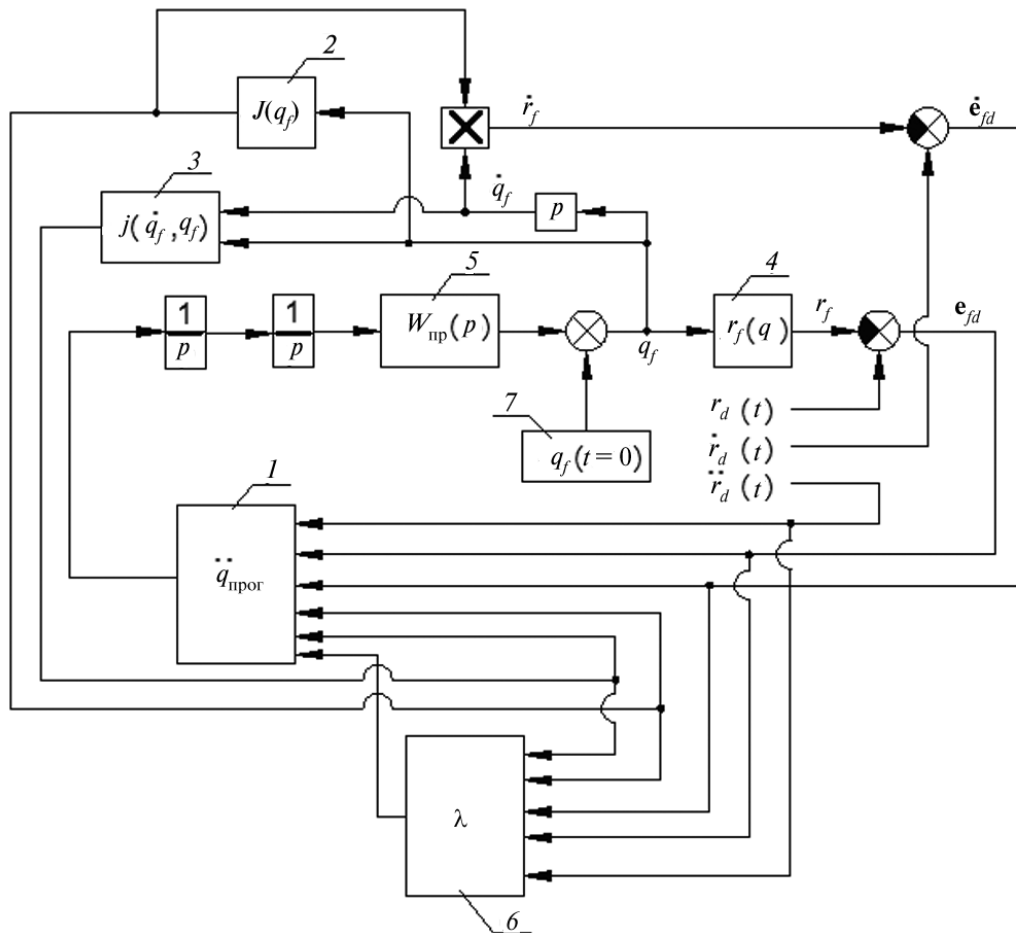


Рис. 1. Общая структура математической модели:

1 — блок расчета программных значений обобщенных ускорений на основании уравнения (5), 2 и 3 — блоки расчета якобиана и его первой производной по времени не дифференциальным способом [2]; 4 — блок решения прямой задачи кинематики; 5 — блок, моделирующий влияние динамических свойств приводов на обработку программного закона изменения обобщенных координат; 6 — блок расчета оптимальных значений λ в соответствии с рассмотренным алгоритмом; 7 — начальные условия для функции $q_f(t)$

Задачей второго этапа моделирования является оценка робастности предложенного алгоритма с точки зрения его устойчивости к изменению приведенных моментов инерции и постоянных времени приводов. В связи с этим для приводов всех степеней подвижности величина постоянной времени была увеличена вдвое по сравнению с исходным значением: $T=0,036$ с.

Моделирование проводилось для 3-звенного манипулятора с кинематической схемой транспортных степеней подвижности робота KUKA KR-30-3 [5].

В качестве примера рассмотрим случай, когда задан желаемый закон движения полюса рабочего органа ($r_d(t) = s_d(t)$):

$$\begin{cases} s_{dx}(t) = 0,25 \sin(0,5t) + 1,25; \\ s_{dy}(t) = -0,3t + 1,5; \\ s_{dz}(t) = 0,3, \end{cases} \quad (9)$$

где $s_{dx}(t)$, $s_{dy}(t)$, $s_{dz}(t)$ — проекции радиус-вектора полюса $s_d(t)$ на оси X, Y, Z базовой СК.

В качестве «угловых» ограничений на λ выбираем следующие:

- $\lambda \in (3; 21)Z$;
- $|\dot{\lambda}(t)| < 80 \frac{1}{c^2} Z$;
- начальное значение $\lambda_0 = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}$.

Система уравнений (9) описывает движение начала целевой СК по синусоидальной траектории, лежащей в плоскости, параллельной

плоскости XU базовой СК. В начальный момент времени ошибка по положению составляла $|e_{fd}| = 0,8$ м. Значение коэффициента ξ из уравнения (1) управления ошибкой e_{fd} составляло 0,8.

Моделирование проводилось для следующих случаев: а) при постоянных значениях $\lambda = \lambda_{\min}$, $\lambda = \lambda_{\max}$, $\lambda = \lambda_0$ и б) при управлении величиной λ .

Результаты моделирования при $T=0,018$ с графически представлены на рис. 2–5.

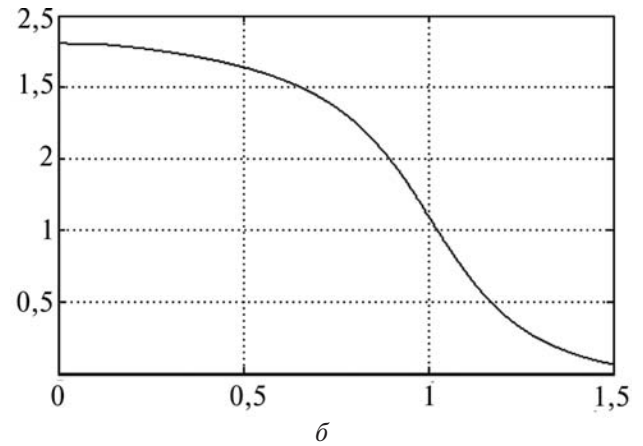
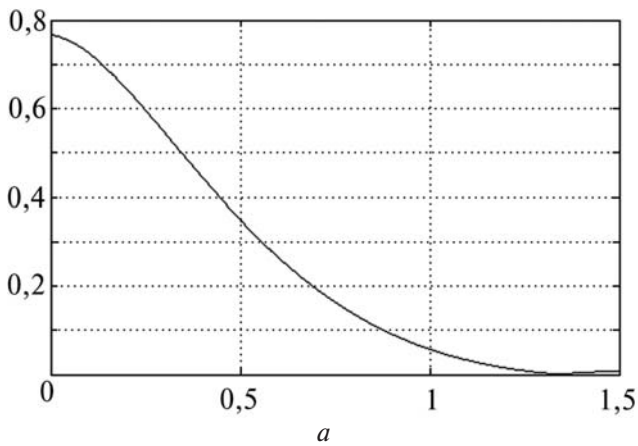


Рис. 2. Изменение нормы вектора $e_{fd}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при $\lambda = \lambda_{\min}$

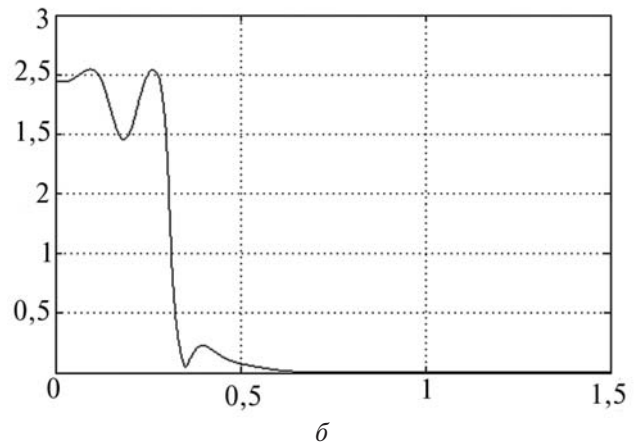
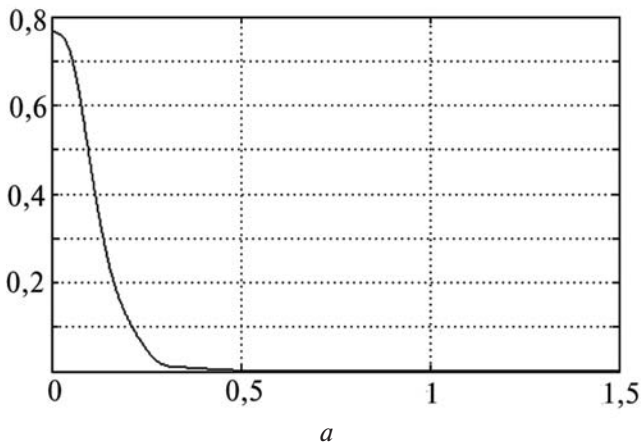


Рис. 3. Изменение нормы вектора $e_{fd}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при $\lambda = \lambda_0$

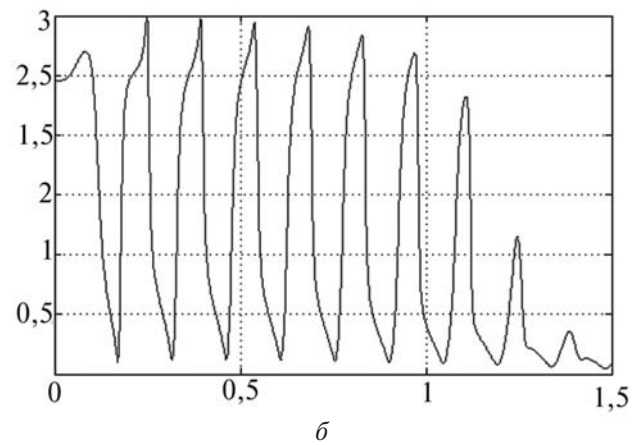
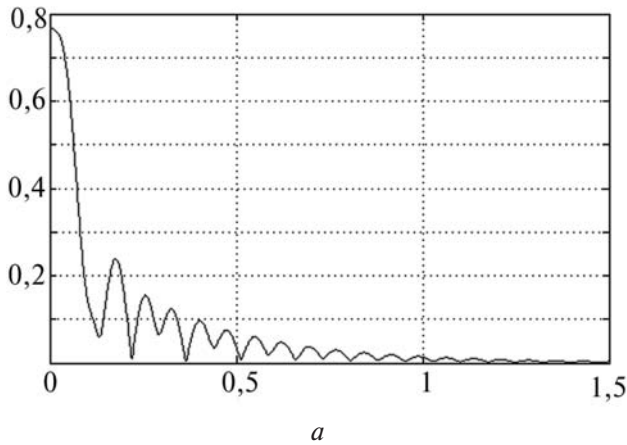


Рис. 4. Изменение нормы вектора $e_{fd}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при $\lambda = \lambda_{\max}$

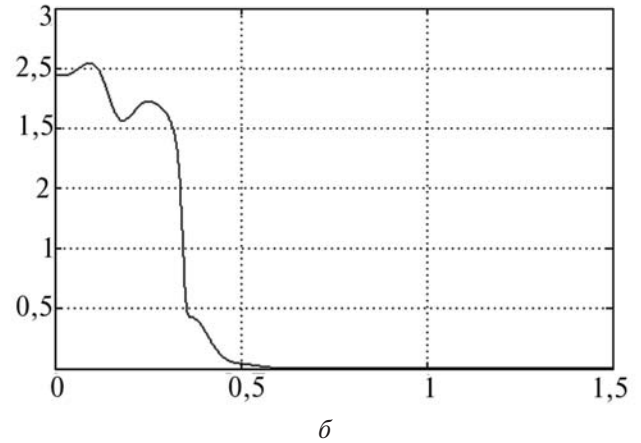
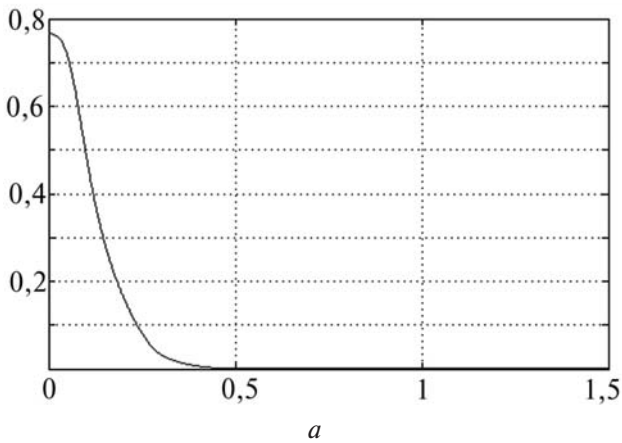


Рис. 5. Изменение нормы вектора $e_{fd}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при управлении величиной λ

Для исследования работы алгоритма при удвоенной постоянной времени привода $T = 0,036$ с верхний предел λ для сохранения устойчивости движения был снижен до значения $\lambda_{\max} = 11 \text{ с}^{-1}$. Процесс преследования иллюстрируют рис. 6—9.

Выводы

1. Анализ переходных процессов подтверждает возможность влиять на процесс устойчивого преследования цели за счет изменения угловой частоты λ в уравнении управления, при этом алгоритм настройки λ позволяет достичь

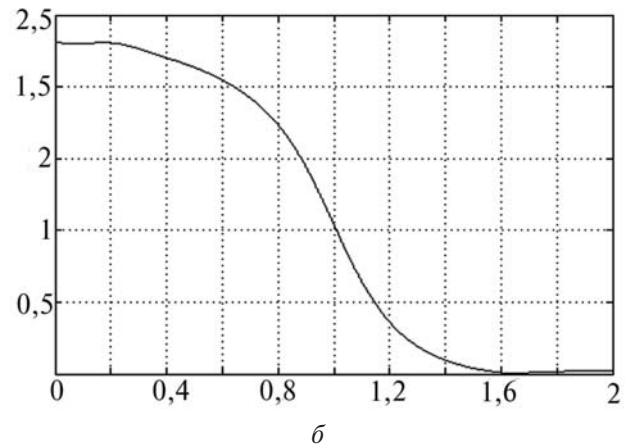
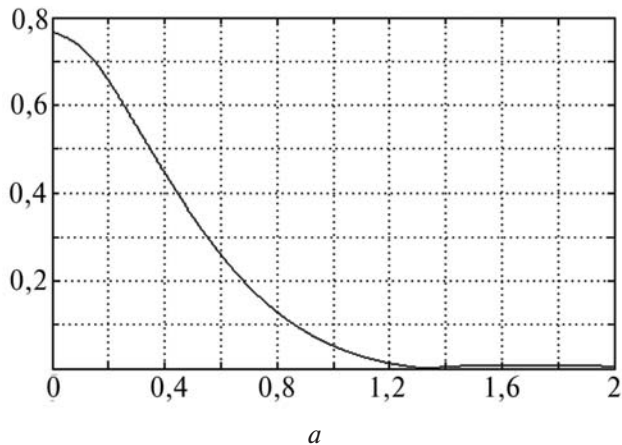


Рис. 6. Изменение нормы вектора $e_{fd}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при $\lambda = \lambda_{\min}$

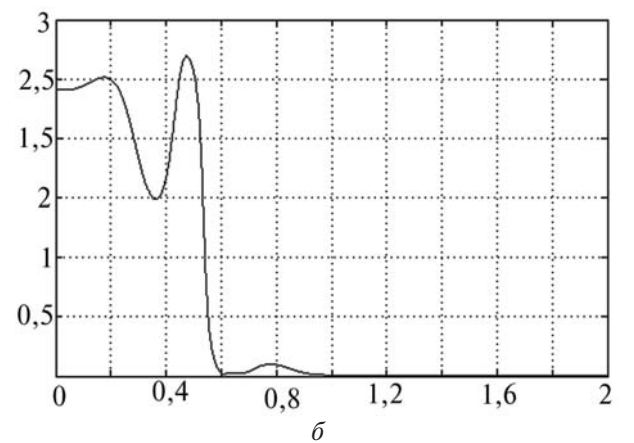
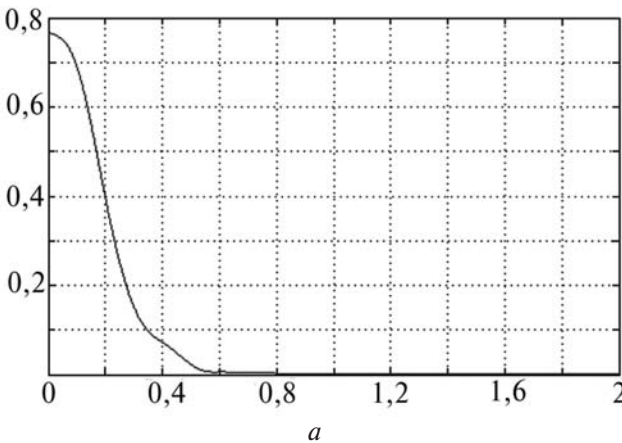


Рис. 7. Изменение нормы вектора $e_{fd}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при $\lambda = \lambda_0$

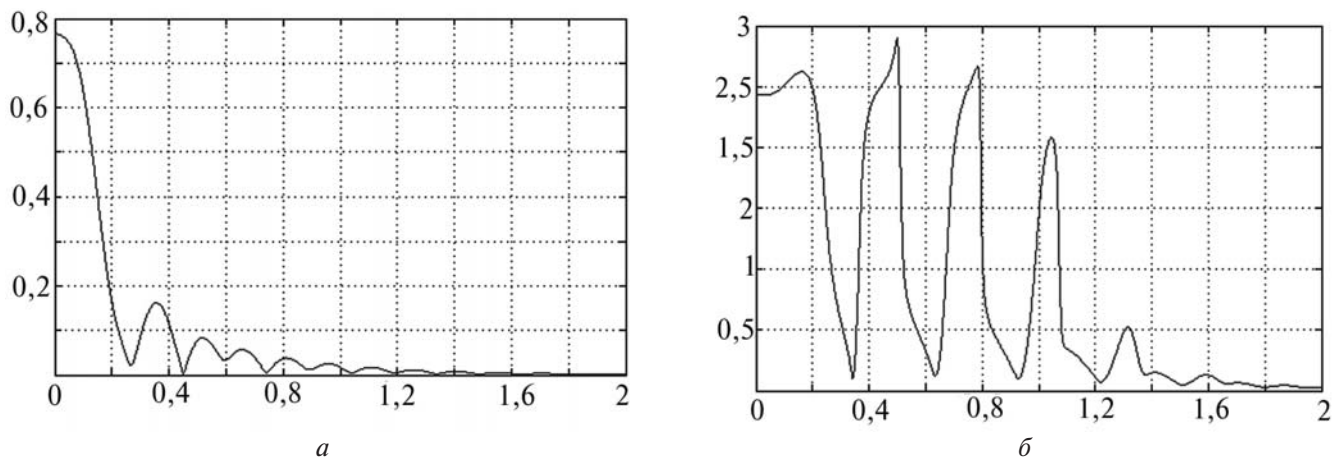


Рис. 8. Изменение нормы вектора $e_{id}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при $\lambda = \lambda_{\max}$

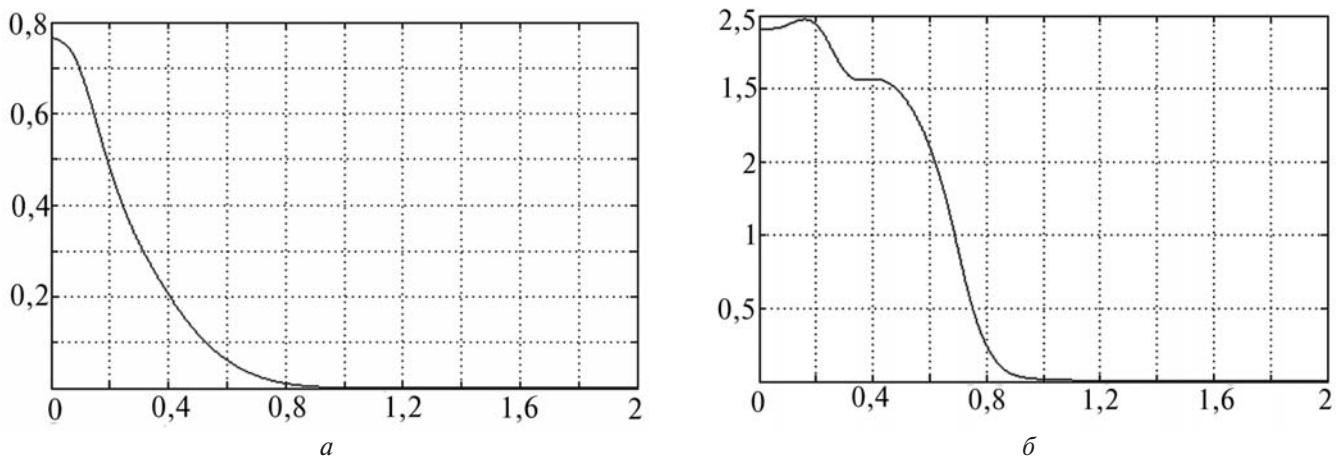


Рис. 9. Изменение нормы вектора $e_{id}(t)$ (а) и угла $\varphi(t)$ (б) при управлении величиной λ

плавного и монотонного снижения нормы вектора ошибки при сохранении высокого быстродействия.

Эффективность выбора оптимальных значений λ в соответствии с рассмотренным алгоритмом подтверждается сравнением переходных процессов, представленных на рис. 3 и 5. Управление величиной λ позволило повысить монотонность убывания функции $\varphi(t)$ в средней и заключительной фазе переходного процесса при сохранении быстродействия. Обеспечить более высокую плавность изменения угла φ затруднительно из-за наличия угловых ограничений, накладываемых на λ , и требований к скорости протекания переходных процессов.

2. Увеличение постоянных времени приводов T приводит к снижению эффективности управления угловой частотой эталонного звена. В связи с этим применение алгоритма опе-

ративного кинематического управления роботом предъявляет достаточно жесткие требования к динамике приводов его исполнительного механизма.

Литература

1. Sitti M., Bosma I., Denker A. Visual Tracking For Moving Multiply Object: An Integration Of Vision And Control. IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics, ISIE'95, Athens. P. 535—540.
2. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л. Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 392 с.
4. Казмиренко В.Ф., Баранов М.В., Илюхин Ю.В. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов; Под ред. В.Ф. Казмиренко. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
5. Kuka Robotics Project Book. Version 6,5. Kuka Robotics Corporation. July 01, 2010. 20 p.

Статья поступила 29.06.2011 г.