

УДК 62-503.57

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ ОШИБКИ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А.В. Лекарева^а

^а Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация
Адрес для переписки: tasya671@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.06.16, принята к печати 01.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лекарева А.В. Обеспечение инвариантности ошибки по возмущению в системах автоматического управления траекторными перемещениями технологических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 787–795. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795

Аннотация

Рассмотрено комбинированное управление в системах автоматического управления траекторными перемещениями технологических объектов. Представлены результаты исследования обеспечения инвариантности системы по возмущающему воздействию на примере технологического манипулятора, реализующего процесс гидрорезания нефтепроводов. В основу управления положена реализация положений четвертой модифицированной формы инвариантности с использованием методов самонастройки. Представлен анализ результатов, полученных с использованием двух способов коррекции. Сущность первого способа состоит во введении дополнительной составляющей в уже сформированное управляющее воздействие и формировании ее канала. Основу второго способа составляет коррекция управляющих воздействий на стадии их формирования в устройстве управляющих воздействий. Результаты исследования показали высокую эффективность применения предложенных способов коррекции. Оба способа коррекции имеют примерно одинаковую точность. Показано, что коррекция в устройстве формирования управляющих воздействий является предпочтительной, так как не затрагивает свойств внутреннего контура системы. Показана необходимость применения звена с переменным коэффициентом передачи, значение которого определяется параметрами технологической траектории. Результаты работы могут найти практическое применение при повышении точностных характеристик систем автоматического управления технологическими манипуляторами траекторного типа.

Ключевые слова

комбинированное управление, четвертая модифицированная форма инвариантности, контур адаптации, технологическая траектория, манипуляционный робот

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00638 мол_а

DISTURBANCE ERROR INVARIANCE IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL OBJECT TRAJECTORY MOVEMENT

A.V. Lekareva^а

^а Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation
Corresponding author: tasya671@rambler.ru

Article info

Received 15.06.16, accepted 01.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795

Article in Russian

For citation: Lekareva A.V. Disturbance error invariance in automatic control systems for technological object trajectory movement. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 787–795. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795

Abstract

We consider combined control in automatic control systems for technological objects trajectory movements. We present research results of the system disturbance invariance ensuring on the example of the technological manipulator that implements hydrocutting of the oil pipelines. Control is based on the propositions of the fourth modified invariance form with the use of bootstrapping methods. The paper presents analysis of results obtained by two different correction methods.

The essence of the first method lies in injection of additional component into the already established control signal and formation of the channel for that component. Control signal correction during the signal synthesis stage in the control device constitutes the basis for the second method. Research results have shown high efficiency of application for both correction methods. Both methods have roughly the same precision. We have shown that the correction in the control device is preferable because it has no influence on the inner contour of the system. We have shown the necessity of the block usage with the variable transmission coefficient, which value is determined by technological trajectory parameters. Research results can be applied in practice for improvement of the precision specifications of automatic control systems for trajectorial manipulators.

Keywords

combined control, the fourth modified invariance form, adaptation contour, technological trajectory, handling robot

Acknowledgements

Research is carried out under financial support of the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project No. 16-38-00638 mol_a.

Введение

Основная задача разработки регуляторов в системах автоматического управления (САУ) технологическими объектами траекторного типа состоит в обеспечении заданных точностных показателей качества. Среди объектов управления подобного типа можно выделить:

1. многокоординатные манипуляционные роботы, промышленные станки с числовым программным управлением (представляющие собой прямоугольные многосвязные системы управления) [1, 2], регулируемые величинами которых являются пространственные координаты схвата (исполнительного устройства);
2. автономные транспортные системы (задача управления которыми состоит в стабилизации движения относительно заданной программной траектории, а также в поддержании заданной скорости контурного движения по данной траектории). САУ данных объектов принадлежат к системам программного управления или следящим системам с медленно меняющимися параметрами входных воздействий.

Характерной особенностью рассматриваемых объектов является дополнительное неопределенное возмущение, которое может быть обусловлено следующими факторами:

1. геометрически-силовым взаимодействием соседствующих пар координат;
2. динамическими нагрузками со стороны объекта или выполняемого технологического процесса;
3. неточностью базирования или неопределенностью расположения технологической траектории в пространстве (случай, когда фактическая траектория отличается от программной). Прежде всего, это относится к САУ такими технологическими процессами, как сборка, сварка, гидрорезание и т.п.

Применение положений теории инвариантности при построении САУ различными динамическими объектами широко распространено в силу его явных преимуществ перед типовыми методами коррекции, основанными на повышении коэффициента усиления разомкнутой цепи, построении систем с астатизмом n -го порядка, введении корректирующих звеньев в прямую цепь или в контуры обратных связей. Все они обнаруживают противоречие между снижением вынужденной и переходной составляющих ошибки и обеспечением удовлетворительного переходного процесса, в том числе обостряя вопрос устойчивости САУ.

Комбинированное управление лишено подобных недостатков – введение инвариантных входов повышает точность, не изменяя свойств внутреннего контура системы [3–5]. При этом наибольшими возможностями для систем рассматриваемого типа обладает четвертая форма инвариантности, при применении которой удастся скомпенсировать не только установившуюся, но и переходную составляющие ошибки [3].

Постановка задачи

Обратимся к двухкоординатной системе, реализующей технологический процесс по заданной программной траектории в декартовой системе XOY . Отклонение фактической траектории движения от заданной будем рассматривать как дополнительное неопределенное возмущение Δf . Ошибки в каналах приводов определяются согласно выражениям

$$\begin{aligned} (H_{x_n} p^n + H_{x_{n-1}} p^{n-1} + \dots + H_{x_1} p + H_{x_0}) \delta_x(p) &= (B_{x_m} p^m + B_{x_{m-1}} p^{m-1} + \dots + B_{x_1} p + B_{x_0}) g_{xy}(p) + \\ &+ (L_{x_k} p^k + L_{x_{k-1}} p^{k-1} + \dots + L_{x_1} p + L_{x_0}) (f_{xy}(p) + \Delta f_{xy}(p)); \\ (H_{y_n} p^n + H_{y_{n-1}} p^{n-1} + \dots + H_{y_1} p + H_{y_0}) \delta_y(p) &= (B_{y_m} p^m + B_{y_{m-1}} p^{m-1} + \dots + B_{y_1} p + B_{y_0}) g_{yx}(p) + \\ &+ (L_{y_k} p^k + L_{y_{k-1}} p^{k-1} + \dots + L_{y_1} p + L_{y_0}) (f_{yx}(p) + \Delta f_{yx}(p)), \end{aligned} \tag{1}$$

где $H_{x_0}, \dots, H_{x_n}; H_{y_0}, \dots, H_{y_n}; B_{x_0}, \dots, B_{x_m}; B_{y_0}, \dots, B_{y_m}; L_{x_0}, \dots, L_{x_k}; L_{y_0}, \dots, L_{y_k}$ – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами математических моделей каналов координат X и Y объекта; $g_{xy}(p), g_{yx}(p), f_{xy}(p), f_{yx}(p)$ – соответственно проекции вектора задания $G(x,y)$ и возмущения $F(x,y)$ в опе-

раторной форме; $\delta_x(p)$, $\delta_y(p)$ – суммарные ошибки в каналах координат X и Y объекта соответственно; $\Delta f_{xy}(p)$, $\Delta f_{yx}(p)$ – дополнительные неопределенные возмущения в каналах координат X и Y ; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Связь операторного представления с передаточными функциями САУ записывается как

$$W_x(p) = \frac{H_x(p) - B_x(p)}{B_x(p)}, \quad W_y(p) = \frac{H_y(p) - B_y(p)}{B_y(p)},$$

$$V_x(p) = \frac{L_x(p)}{B_x(p)}, \quad W_y(p) = \frac{L_y(p)}{B_y(p)},$$

где $W_x(p)$, $W_y(p)$ – передаточные функции САУ по управляющему воздействию каналов координат X и Y соответственно; $V_x(p)$, $V_y(p)$ – передаточные функции САУ по возмущению каналов координат X и Y .

При управляющем $G(x,y)$ и возмущающем $F(x,y)$ воздействиях, детерминированных и стационарных на участке движения, составляющие установившихся ошибок в каналах приводов можно представить как

$$\delta_x(p) = \delta_{g_{xy}}(p) + \delta_{f_{xy}}(p) + \delta_{\Delta f_{xy}}(p);$$

$$\delta_y(p) = \delta_{g_{yx}}(p) + \delta_{f_{yx}}(p) + \delta_{\Delta f_{yx}}(p),$$

где $\delta_{g_{xy}}(p)$, $\delta_{g_{yx}}(p)$ – составляющие ошибок в каналах, обусловленные действием управляющего воздействия; $\delta_{f_{xy}}(p)$, $\delta_{f_{yx}}(p)$ – составляющие ошибок в каналах, обусловленные действием возмущения; $\delta_{\Delta f_{xy}}(p)$, $\delta_{\Delta f_{yx}}(p)$ – составляющие ошибок от дополнительного неопределенного возмущения Δf .

Трактовка четвертой формы инвариантности для системы, определяемой выражением (1), имеет следующий вид:

$$L_x(p)\Delta f_{xy}(p) - L_{2x}(p)\Delta f_{2xy}(p) = 0;$$

$$L_y(p)\Delta f_{yx}(p) - L_{2y}(p)\Delta f_{2yx}(p) = 0.$$

Таким образом, необходимо искусственное введение в систему специальных источников компенсационных сигналов Δf_{2xy} , Δf_{2yx} и формирование их каналов $L_{2x}(p)$, $L_{2y}(p)$.

В системах управления технологическими объектами траекторного типа независимо от способа разложения технологической траектории на управляющие функции одна из координат может рассматриваться как аргумент, а другая – как его функция. Пусть Y – независимая координата, тогда технологическая траектория может быть представлена в виде

$$X = f(Y).$$

Пусть сопрягающая расчетная траектория имеет вид

$$X_n = K_n Y_n,$$

где K_n – расчетный угловой коэффициент равный тангенсу угла, образованного заданной траекторией $X = f(Y)$ и положительным направлением оси OY .

Отклонение фактической и расчетной траекторий представим через отклонение коэффициента K_n . Здесь следует также иметь в виду, что расчетное X_n и фактическое значение X_ϕ нужно рассматривать относительно расчетного значения Z_n . Тогда

$$\Delta X_n = K_n Y_n - K_\phi Y_n, \quad \Delta X_n = \Delta K Y_n,$$

где K_ϕ – фактическое значение углового коэффициента.

В свою очередь, $Y_n = X_n / K_n$, следовательно,

$$\Delta X = \frac{\Delta K}{K_n} X_n = K_\Delta X_n, \tag{2}$$

где $K_\Delta = \frac{\Delta K}{K_n}$.

Как следует из (2), ΔX пропорционально зависит от X_n . Отклонение ΔX имеет место на выходе системы, поэтому в (2) следует учитывать ошибки по управляющему воздействию, т.е.

$$\Delta X(p) = K_\Delta [X(p) + \delta_g(p)]. \tag{3}$$

Однако в рассматриваемом процессе интересующее нас изменение координаты функции ΔX возникает при фактической координате аргумента Z , поэтому вторая составляющая в данном случае не влияет на формирование закона корректирующей поправки. Она учитывается при выделении моментной ошибки из суммарной. Для этого из суммарной ошибки вычитаются составляющие, обусловленные программным управляющим воздействием, определяемые через коэффициенты ошибок.

При медленном изменении возмущающего воздействия и при работе в зоне упругих деформаций диссипативными потерями можно пренебречь. Природу возникновения Δf при несовпадении траекторий можно рассматривать как [6]

$$F(p) = K_F, \quad \Delta f(p) = K_F \Delta X(p). \quad (4)$$

Составляющие ошибки по возмущающему воздействию представим в виде ряда

$$\delta(t) = \delta_{mc}(t) + \delta_{mk}(t) + \delta_{md}(t) + \dots, \quad (5)$$

где δ_{mc} , δ_{mk} , δ_{md} – соответственно статическая, кинетическая и динамическая ошибки по возмущению.

Ряд (5) можно также представить в виде

$$\delta_m(t) = C_{m0}f_0 + C_{m1}f'(t) + C_{m2}f''(t) + \dots \quad (6)$$

где C_{mi} , $i < 1, 2, 3, \dots$ – коэффициенты ошибок по возмущению.

С учетом (2)–(6) для рассматриваемого процесса приведем возмущение к входной координате в следующем виде:

$$f_0 = K_{mx}g_n; \quad f'(t) = K_{mx}V_n; \quad f''(t) = K_{mx}\varepsilon_n, \quad (7)$$

где $K_{mx} = K_F \Delta K$.

Тогда с учетом (7) условие четвертой формы инвариантности можно привести к виду

$$B_{2x}(p)\Delta g_{xy}(p) - L_x(p)\Delta f_{xy}(p) = 0; \quad (8)$$

$$B_{2y}(p)\Delta g_{yx}(p) - L_y(p)\Delta f_{yx}(p) = 0.$$

Выражение (8) является основой модифицированной четвертой формы инвариантности. Здесь принципиальным моментом является парирование моментного возмущения за счет формирования дополнительной составляющей только по управляющему воздействию [7].

Формирование дополнительной составляющей Δg обеспечивается выражениями

$$\Delta g_{xy}(p) = \frac{L_x(p)\Delta f_{xy}(p)}{B_{2x}(p)}; \quad (9)$$

$$\Delta g_{yx}(p) = \frac{L_y(p)\Delta f_{yx}(p)}{B_{2y}(p)}.$$

Выделение составляющей ошибки, пропорциональной Δf , из суммарной ошибки канала осуществляется исключением двух других детерминированных составляющих, которые могут быть получены, например, с помощью эталонной модели или информации с силомоментных датчиков, и обработкой сигнала тока исполнительного двигателя [8].

Важной особенностью САУ рассматриваемого типа является взаимосвязь каналов по входным воздействиям, т.е. выполнение условия (9) возможно в различных вариантах формирования составляющих $\Delta g_{xy}(p)$, $\Delta g_{yx}(p)$:

1. введение дополнительных составляющих в каждом канале;
2. введение дополнительной составляющей в канал координаты-функции;
3. реализации перекрестной коррекции между каналами.

Для формирования алгоритмов дополнительного управления используем методику, предложенную в работе [9]. Введем для оценки точности ошибку

$$\delta_m^2(t) = \lambda_1 \delta_{mc}^2(t) + \lambda_2 \delta_{mk}^2(t) + \lambda_3 \delta_{md}^2(t) + \dots \quad (10)$$

Ряд (10) ограничим тремя членами, соответствующими вариантам изменения закона возмущающего воздействия – постоянного, с постоянными скоростью и ускорением. Представим их как интегральные квадратичные функции от соответствующих составляющих ряда (10)

$$\delta_{mc}^2(t) = \beta_0 \int_0^t \delta_{mc}^2(t) dt; \quad \delta_{mk}^2(t) = \beta_1 \int_0^t \delta_{mk}^2(t) dt; \quad \delta_{md}^2(t) = \beta_2 \int_0^t \delta_{md}^2(t) dt. \quad (11)$$

Для рассматриваемой совокупности минимизация каждой составляющей ряда (10) с учетом (11) может быть обеспечена формированием эквивалентной составляющей управляющего воздействия U_0 , U_1 , U_2 при выполнении условий

$$\frac{d\delta_{mc}^2(t, U_0)}{dU_0} = \beta_0 \int_0^{t_i} \delta_{mc}(t, U_0) \frac{d\delta_{mc}(t, U_0)}{dU_0} dt = 0;$$

$$\frac{d\delta_{mk}^2(t, U_1)}{dU_1} = \beta_1 \int_0^{t_i} \delta_{mk}(t, U_1) \frac{d\delta_{mk}(t, U_1)}{dU_1} dt = 0; \quad (12)$$

$$\frac{d\delta_{md}^2(t, U_2)}{dU_2} = \beta_2 \int_0^{t_i} \delta_{md}(t, U_2) \frac{d\delta_{md}(t, U_2)}{dU_2} dt = 0.$$

Анализируя выражения (12) с учетом (4)–(6) и полагая, что переменными являются только параметры U , можно записать:

$$\frac{d\delta_{mc}(t, U_0)}{dU_0} = v_0 X; \quad \frac{d\delta_{mk}(t, U_1)}{dU_1} = v_1 V; \quad \frac{d\delta_{md}(t, U_2)}{dU_2} = v_2 \varepsilon.$$

Ошибки ряда (6) с учетом (7) определяются как

$$\delta_{mc}(t) = K_{mx} \frac{1}{K_M} g_{\Pi} = \beta_0 g_{\Pi};$$

$$\delta_{mk}(t) = C_{m1} K_{mx} V_{\Pi} = \beta_1 V_{\Pi};$$

$$\delta_{md}(t) = C_{m2} K_{mx} \varepsilon_{\Pi} = \beta_2 \varepsilon_{\Pi}.$$

Формирование корректирующих поправок для закона управления выполняется методом последовательных приближений. Изменение параметров можно полагать пропорциональным изменению самой функции, тогда алгоритмы контуров формирования корректирующих сигналов определяются как

$$\begin{aligned} U_0 &= v_0 \int_0^{t_i} \delta_{mc}(t, U_0) g_{\Pi} dt; \\ U_1 &= v_1 \int_0^{t_j} \delta_{mk}(t, U_1) V_{\Pi} dt; \\ U_2 &= v_2 \int_0^{t_k} \delta_{md}(t, U_2) \varepsilon_{\Pi} dt. \end{aligned} \tag{13}$$

Реализация алгоритмов, представленных в выражении (13), возможна с использованием двух способов коррекции. Сущность первого способа состоит во введении дополнительной составляющей в уже сформированное управляющее воздействие и формировании ее канала. Основу второго способа составляет коррекция управляющих воздействий на стадии их формирования в устройстве управляющих воздействий (УФУВ). Результаты исследования рассматриваемых алгоритмов коррекции управляющих воздействий применительно к однокоординатной системе с симулятором внешних воздействий представлены в работах [10–12].

Исследование алгоритмов коррекции на примере технологического робота гидрорезания нефтепроводов

Рассмотрим применение данных алгоритмов адаптивной коррекции в многокоординатной САУ. В качестве объекта исследования выступает технологический манипулятор для гидрорезания нефтепроводов с целью дальнейшего осуществления контрольно-профилактических работ. Манипулятор имеет 6 степеней подвижности (q_1, \dots, q_6), при этом обобщенные координаты q_1, q_2, q_3 образуют несущую систему механизма, а q_4, q_5, q_6 обеспечивают движение по нормали к поверхности резания (исполнительная система манипулятора). Регулируемой координатой системы являются координаты режущей кромки гидрореза, перемещаемого по технологической траектории над поверхностью резания.

Следует выделить два типовых вида технологических траекторий резания:

1. прямоугольные поверхности при виде по нормали спереди с максимальными размерами $0,5 \times 1,0$ м;
2. окружности при виде по нормали к поверхности резания (поверхности, образуемые при пересечении двух цилиндров) с размерами до максимального диаметра трубы [13].

В качестве дополнительного неопределенного возмущения принимается разность между фактической и программной траекторией движения, обусловленная неполной определенностью пространственного положения поверхности трубопровода, а также возможными деформациями его поверхности. Для определения координат расположения поверхности резания в пространстве применяется поисково-аналитический алгоритм – метод двух сечений [14]. В основе его лежат поисковые движения с контролем конечных точек на технологической поверхности и фиксация линейных и угловых отклонений координатных осей в плоскости и пространстве. Поисковые движения выполняются непосредственно манипулятором, контроль необходимых параметров и фиксация значений определяются информационно-измерительной системой, построенной по принципу дифференциальной вилки [15].

Рассмотрим взаимодействие исполнительных приводов, отвечающих за угловые перемещения по обобщенным координатам q_2, q_3 , что соответствует контурам 2, 3. Структурные схемы моделей исследуемых взаимосвязанных контуров с каналами адаптации, реализованными в соответствии с первым и вторым способами коррекции, представлены на рис. 1.

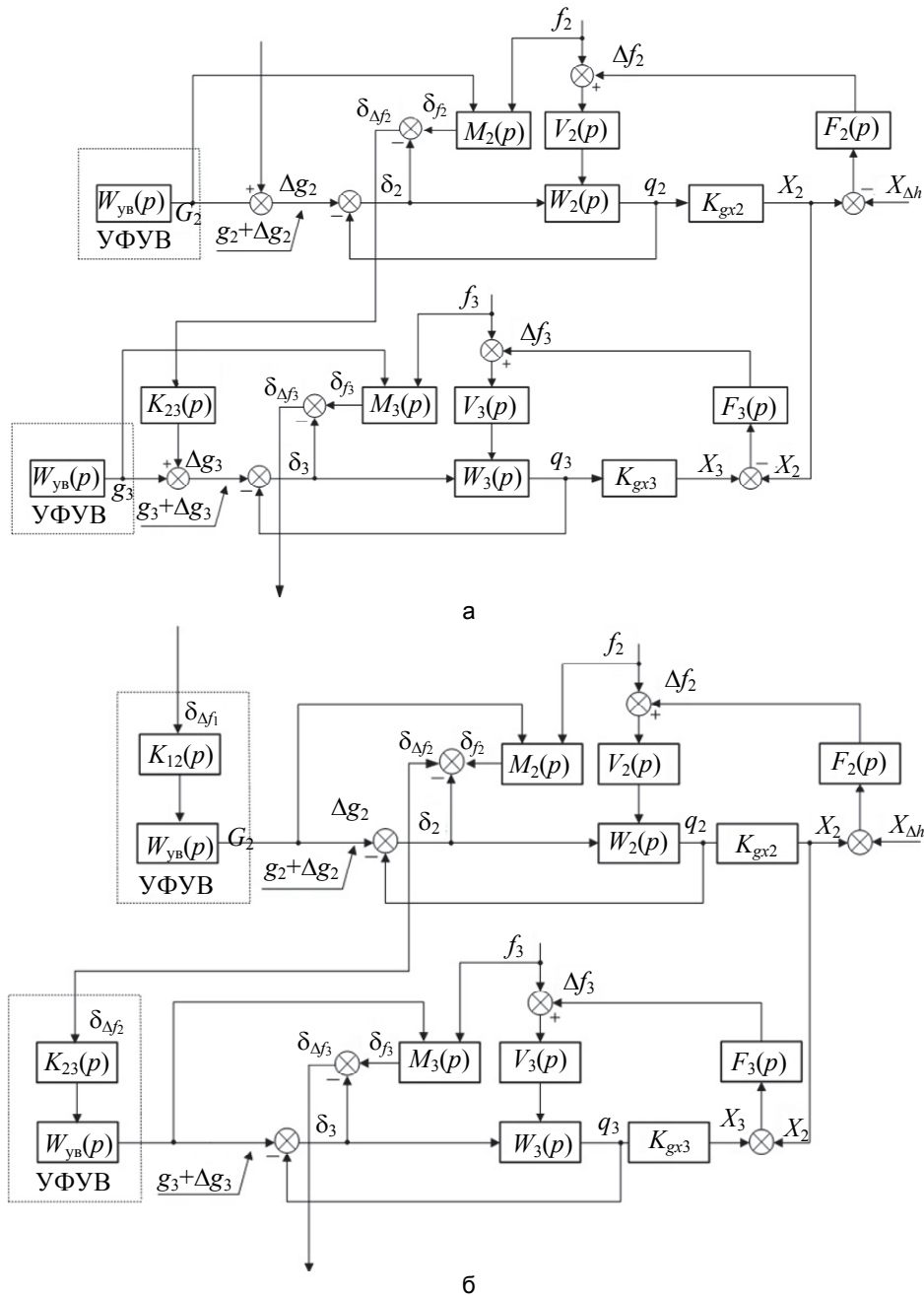


Рис. 1. Структурные схемы двухкоординатной системы с формированием дополнительного управления: введение автономной составляющей в уже сформированное управляющее воздействие (а); коррекция управляющего воздействия в устройстве его формирования (б)

На схемах (рис. 1) обозначены: $W_2(p), W_3(p)$ – передаточные функции приводов, отвечающих за угловые перемещения по обобщенным координатам q_2, q_3 соответственно; $W_{yв}(p)$ – передаточная функция УФУВ; $V_2(p), V_3(p)$ – передаточные функции по возмущению приводов координат q_2 и q_3 соответственно; $K_{12}(p), K_{23}(p)$ – передаточные функции звеньев адаптации управляющих сигналов в контурах 2, 3 соответственно; $g_2(p), f_2(p), g_3(p), f_3(p)$ – управляющие и возмущающие воздействия для приводов q_2 и q_3 соответственно; X_2, X_3 – составляющие компонент контрольной точки исполнительного устройства (ИУ) технологического манипулятора (точки среза сопла) на горизонтальную плоскость по оси X регулируемых координат приводов q_2 и q_3 , получаемые через масштабирующие коэффициенты K_{gx2}, K_{gx3} ; δ_2, δ_3 – суммарные ошибки систем приводов 2 и 3 соответственно; $\Delta f_2, \Delta f_3$ – дополнительное неопределенное возмущение в контурах 2 и 3; $\delta_{f_2}, \delta_{f_3}$ – составляющие ошибок системы приводов q_2 и q_3 соот-

ветственно, обусловленные возмущающими воздействиями; $\delta_{M_2}, \delta_{M_3}$ – составляющие ошибок контуров 2 и 3, вызванные дополнительным неопределенным возмущением; $\Delta g_2, \Delta g_3$ – дополнительные составляющие управляющего воздействия для приводов координат q_2 и q_3 . С использованием модели привода по возмущению $M_2(p)$ (модель контура по возмущению образована статическими зависимостями первого и второго коэффициента ошибки по моменту), а также детерминированных составляющих ошибки по задающему воздействию, составляющая δ_{M_2} выделяется во втором контуре и через контур адаптации $K_{23}(p)$ вводится в третий как дополнительная составляющая Δg_3 .

Результаты исследования

В ходе исследования рассмотрена работа контура адаптации при движении по типовым технологическим траекториям. Проведем анализ характеристик приводов второй и третьей обобщенных координат. На рис. 2 представлены кривые изменения проекций траектории движения в координатных плоскостях, где обозначено: 1 – траектория движения ИУ манипулятора без применения динамической коррекции; 2 – траектория движения, полученная с применением методов адаптации. Рис. 3 демонстрирует графики изменения координат ИУ при движении по технологической траектории без контура адаптации, где обозначено: 1 – график задания координаты ИУ; 2 – график изменения координаты ИУ; 3 – координатная ошибка.

На рис. 4 представлены графики ошибок положения в САУ с каналами адаптации, реализованными согласно структурным схемам, представленным на рис. 1. Значение ошибок близко к нулю и отвечает требованиям, предъявляемым к технологическому манипулятору со стороны процесса гидрорезания. При этом оба способа коррекции демонстрируют примерно одинаковую точность, однако в силу несомненных преимуществ коррекции, не затрагивающей основного контура привода, второй метод является наиболее предпочтительным.

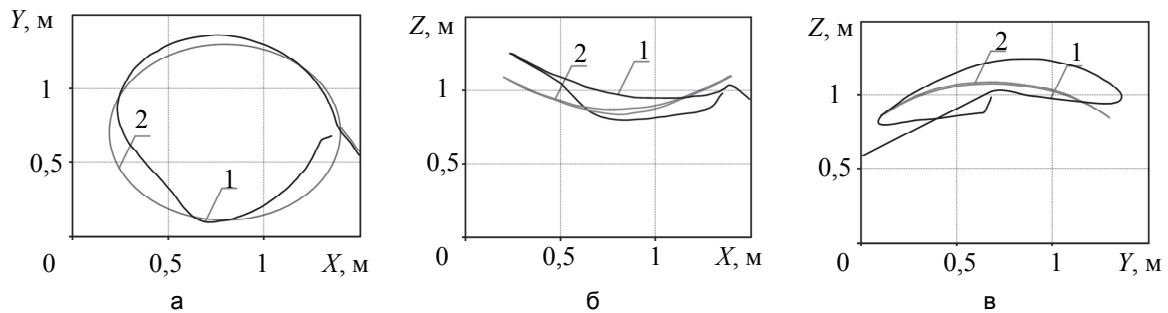


Рис. 2. Кривые изменения проекций траектории движения исполнительного устройства манипулятора в плоскости: XOY (а); XOZ (б); YOZ (в)

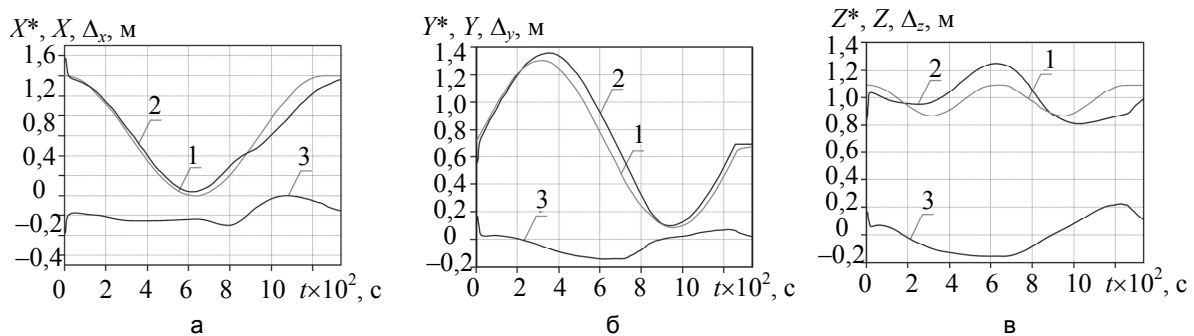


Рис. 3. Графики изменения координат исполнительного устройства при движении по технологической траектории без коррекции и координатной ошибки: координаты X (а); координаты Y (б); координаты Z (в): X^*, Y^*, Z^* – графики изменения программно заданных координат исполнительного устройства по осям OX, OY, OZ соответственно, обозначенные цифрой 1; X, Y, Z – графики изменения фактических координат X, Y, Z исполнительного устройства манипулятора при движении по технологической траектории, обозначенные цифрой 2; $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ – графики изменения ошибок движения исполнительного устройства манипулятора по технологической траектории в проекции на оси OX, OY, OZ , обозначенные цифрой 3

Характеристики САУ второй координаты и контуров перекрестной корректирующей связи приведены на рис. 5. Анализ полученных результатов свидетельствует о необходимости применения в канале адаптации блока с переменным коэффициентом передачи, параметры которого определяются параметрами технологической траектории.

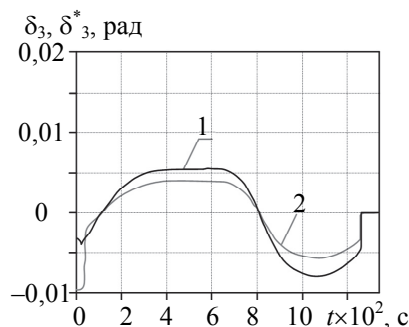


Рис. 4. Траекторная ошибка после коррекции управляющего воздействия:

1 – траекторная ошибка δ_3 при использовании первого способа коррекции; 2 – траекторная ошибка δ_3^* при использовании второго способа коррекции

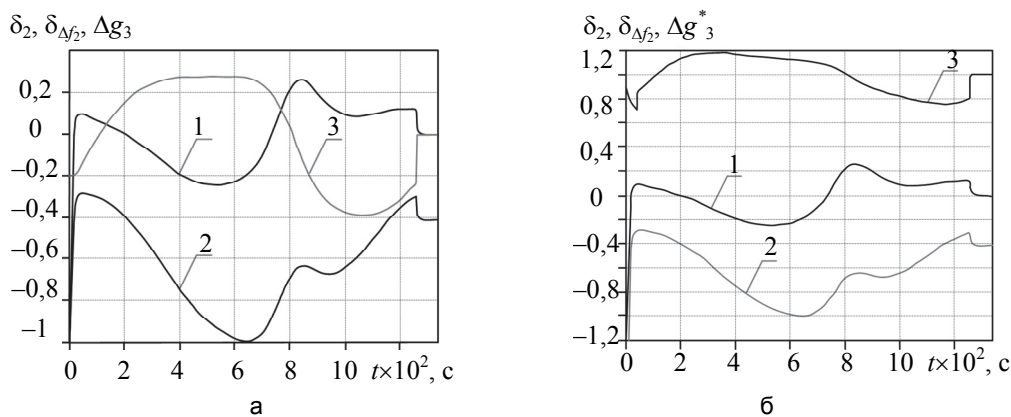


Рис. 5. Характеристики привода второй координаты и перекрестной компенсирующей связи при компенсации дополнительного неопределенного возмущения путем формирования дополнительной автономной составляющей в управляющее воздействие привода обобщенной координаты q_3 : 1 – график изменения ошибки системы управления δ_2 второго сочленения; 2 – график моментной составляющей ошибки $\delta_{\Delta f_2}$; 3 – график изменения дополнительной составляющей управления Δg_3 в третьем приводе технологического робота (а); при парировании дополнительного возмущения путем коррекции управляющего воздействия в устройстве его формирования: 1 – график изменения ошибки системы управления δ_2 второго сочленения; 2 – график моментной составляющей ошибки $\delta_{\Delta f_2}$; 3 – графики изменения коэффициента коррекции управляющего воздействия Δg_3^* (б)

Заключение

Обеспечение инвариантности ошибки по возмущению в системах автоматического управления траекторными перемещениями технологических объектов возможно реализацией модифицированной четвертой формы инвариантности.

Взаимосвязь управляющего и возмущающего воздействий создает возможность приведения возмущающего воздействия к управляющему и обеспечивает реализацию четвертой формы инвариантности за счет применения методов самонастройки. Самонастройка возможна с помощью двух способов формирования дополнительной составляющей в управляющем воздействии.

Результаты исследования алгоритмов адаптации на примере многокоординатного технологического манипулятора подтверждают целесообразность и высокую эффективность их применения в многокоординатных системах. При этом оба способа демонстрируют примерно одинаковую точность. Однако коррекция в устройстве формирования управляющих воздействий не затрагивает свойств внутреннего контура системы, поэтому является предпочтительной. Параметры звена с переменным коэффициентом передачи в канале адаптации определяются параметрами выполняемого технологического процесса, а также параметрами траектории.

Литература

1. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического управления. М.: Энергия, 1970. 288 с.
2. Мирошник И.В. Согласованное управление

References

1. Morozovskii V.T. *Mnogosvyaznye Sistemy Avtomaticheskogo Upravleniya* [Multiconnected Systems of the Automatic Control]. Moscow, Energiya Publ., 1970, 288 p.

- многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 128 с.
3. Потапов А.М. Основы расчета и проектирования линейных следящих систем. Ч. II. Л.: ЛМИ, 1980. 96 с.
 4. Кухтенко А.И. Проблема инвариантности в автоматике. Киев, 1963. 376 с.
 5. Яворский В.Н., Бессонов А.А., Коротаев А.И., Потапов А.М. Проектирование инвариантных следящих приводов. М.: Высшая школа, 1963. 475 с.
 6. Егоров И.Н., Кобзев А.А., Мишулин Ю.Е., Немонтов В.А. Управление робототехническими системами с силомоментным очувствлением. Владимир: ВлГУ, 2005. 276 с.
 7. Кобзев А.А., Махфуз А.А. Особенности реализации четвертой формы инвариантности в системах программного управления // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 18, №22(125). С. 102–105.
 8. Легаев В.П., Кобзев А.А., Генералов Л.К. Модельное управление точностью обработки на металлорежущих станках. Владимир: ВлГУ, 2010. 166 с.
 9. Новоселов Б.В., Горохов Ю.С., Кобзев А.А., Щитов А.И. Автоматы-настройщики следящих систем. М.: Энергия, 1975. 264 с.
 10. Кобзев А.А., Новикова Н.А., Лекарева А.В., Махфуз А.А. Исследование алгоритмов динамической коррекции движения в робототехнических системах // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 114.
 11. Кобзев А.А., Новикова Н.А., Лекарева А.В., Махфуз А.А. Анализ алгоритмов коррекции программной траектории в устройстве формирования управляющего воздействия для приводов робототехнических систем // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 74.
 12. Кобзев А.А., Новикова Н.А., Лекарева А.В. Исследование алгоритмов адаптации управляющего воздействия для приводов робототехнических систем с помощью симулятора межкоординатных перемещений // Известия вузов. Электромеханика. 2015. №3. С. 50–56.
 13. Архипов А.Н., Кобзев А.А., Лекарева А.В., Махфуз А.А., Петухов Е.Н. Анализ роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 73.
 14. Архипов А.Н., Кобзев А.А., Еропова Е.В., Лекарева А.В., Махфуз А.А. Согласование осей объекта и манипулятора при гидрорезании нефтепроводов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-24. С. 5329–5334.
 15. Кобзев А.А., Лекарева А.В. Согласование осей мобильного технологического робота и объекта манипулирования // Оборонная техника. 2015. №11-12. С. 201–205.
 2. Miroshnik I.V. *Soglasovannoe Upravlenie Mnogokanal'nymi Sistemami* [Coordinated Control of Multi-Channel Systems]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990, 128 p.
 3. Potapov A.M. *Bases of Calculation and Design of Linear Servo Systems*. Part II. Leningrad, LMI Publ., 1980, 96 p. (In Russian)
 4. Kukhtenko A.I. *Problema Invariantnosti v Avtomatike* [The Problem of Invariance in Automation]. Kiev, 1963, 376 p.
 5. Yavorskii V.N., Bessonov A.A., Korotaev A.I., Potapov A.M. *Designing of Invariant Servo Drives*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1963, 475 p.
 6. Egorov I.N., Kobzev A.A., Mishulin Yu.E., Nemontov V.A. *Upravlenie Robototekhnicheskimi Sistemami s Silomomentnym Ochuvstveniem* [Robotic Systems Management with Force-Torque Sensing]. Vladimir, VISU Publ., 2005, 276 p.
 7. Kobzev A.A., Mahfouz A.A. Features of realization of the fourth form of invariancy in systems of programmed control. *Izvestia VSTU*, 2013, vol. 18, no. 22, pp. 102–105.
 8. Legaev V.P., Kobzev A.A., Generalov L.K. *Model'noe Upravlenie Tochnost'yu Obrabotki na Metallorezhushchikh Stankakh* [Modal Control of Processing Precision at Metal Cutting Machines]. Vladimir, VISU Publ., 2010, 166 p.
 9. Novoselov B.V., Gorokhov Yu.S., Kobzev A.A., Shchitov A.I. *Avtomaty-Nastroishchiki Sledyashchikh Sistem* [Automatic-Adjusters of Servo Systems]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 264 p.
 10. Kobzev A.A., Novikova N.A., Lekareva A.V., Mahfouz A.A. Research of the dynamic movement correction in robot systems. *Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 3, p. 114.
 11. Kobzev A.A., Novikova N.A., Lekareva A.V., Mahfouz A.A. Analysis of the program trajectory correction algorithms in device that produces control signals to drives of robot systems. *Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 6, p. 74.
 12. Kobzev A.A., Novikova N.A., Lekareva A.V. Analysis of the algorithms of adaptation of the managing detector of influence for drives of robotic systems by means of the simulator of intercoordinate perturbations. *Russian Electromechanics*, 2015, no. 3, pp. 50–56.
 13. Arkhipov A.N., Kobzev A.A., Lekareva A.V., Mahfouz A.A., Petukhov E.N. Analysis of robotization of process of hydrocutting of oil pipelines. *Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 6, p. 73.
 14. Arkhipov A.N., Kobzev A.A., Eropova E.V., Lekareva A.V., Mahfouz A.A. Coordination of axes of object and the manipulator when hydrocutting oil pipelines. *Fundamental Research*, 2015, no. 2–24, pp. 5329–5334.
 15. Kobzev A.A., Lekareva A.V. Axes matching of mobile robot technology and manipulation object. *Oboronnaya Tekhnika*, 2015, no. 11-12, pp. 201–205.

Автор

Лекарева Анастасия Владимировна – аспирант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, tasya671@rambler.ru

Author

Anastasia V. Lekareva – postgraduate, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, tasya671@rambler.ru