

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КОРРЕКЦИИ ПРОГРАММНОЙ ТРАЕКТОРИИ В УСТРОЙСТВЕ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПРИВОДОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кобзев А.А., Новикова Н.А., Лекарева А.В., Махфуз А.А.

ФГБОУ ВПО «Владимирский Государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия (600000, Владимир, ул. Горького, 87), e-mail: kobzev42@mail.ru

В данной статье представлен один из возможных вариантов коррекции технологической траектории для координатных приводов исполнительных органов роботов, цель управления, которыми состоит в обеспечении технологического процесса, выполняемого по некоторой, заранее заданной или неопределенной, траектории с обеспечением требуемого вектора усилия при внешних флуктуирующих возмущениях. Эта проблема особенно актуальна в случаях, когда действительная траектория отличается от программной и требуется переход на фактическую, например, при управлении мобильными роботами, а также в технологическом оборудовании с большим моментом инерции и высокой динамикой. В качестве объекта исследования выступает привод перемещения с главной обратной связью по положению исполнительного механизма. Привод смежной координаты реализован в виде симулятора межкоординатных возмущений. Управление основано на положениях четвертой формы инвариантности. Рассмотренный способ самонастройки предусматривает коррекцию уровней сигналов производных на стадии формирования управляющего воздействия. Данный метод адаптации рассмотрен на примере двух структур, первая из которых предусматривает формирование дополнительной составляющей управления, как функции разности координат приводов, а вторая - как функции моментной ошибки от нерасчетного возмущения. Коррекция управляющего воздействия в устройстве его формирования выполняется на программном уровне и не влечет изменений основного контура привода, т.е. не затрагиваются внутренние свойства, а, следовательно, и динамические характеристики привода. Результаты моделирования свидетельствуют, что необходимым элементом является звено с переменным коэффициентом передачи. В работе проведен анализ точности системы управления в режиме движения с постоянной скоростью и при отработке гармонического входного сигнала для каналов адаптации сигнала задания по положению, скорости и ускорению. В ходе моделирования получены зависимости коэффициента передачи в канале адаптации. Результаты проведенных исследований подтверждают работоспособность рассмотренных алгоритмов.

Ключевые слова: коррекция технологической траектории, инвариантность, симулятор межкоординатных возмущений, устройство формирования управляющего воздействия.

ANALYSIS OF THE PROGRAM TRAJECTORY CORRECTION ALGORITHMS IN DEVICE THAT PRODUCES CONTROL SIGNALS TO DRIVES OF ROBOT SYSTEMS

Kobzev A.A., Novikova N.A., Lekareva A.V., Mahfuz A.A.

Vladimir State University of a name of A.G. and N.G. Stoletovykh Vladimir, Russia (600000, Vladimir, street Gorky, 87), e-mail: kobzev42@mail.ru

In this article presented one of the possible variants of the technological trajectory correction for coordinate robot drives. The goal in controlling these devices is to get the work done according to program trajectory which can be precalculated or random. Also it needs to provide intended force vector when there are random external interferences. This problem is palpitant one when real trajectory is different to preprogrammed one, and needed to transfer a trajectory into a real one, one of the examples is a control of the mobile robots, or in technological tools with high momentum and dynamics. The research object is a drive with main mechanism state feedback. Conterminal coordinate drive made as a simulation of the conterminal points of interference. Control is based on a state of the 4th form of the indifference. This method of the self-regulation is capable to correct fluxion level signals in the beginning of the command signal. Adaptation method was researched as two structures, first is a function capable generate additional control signal, second is function of the instant error in case of unpredicted interference. Correction of the signal is made on a program level at the stage of development of the signal, which leads us to the change of the main drive profile. That means without changing internal preferences (not changing dynamic drive parameters). The research result is a link with non-constant parameters. System precision analysis was made in a movement mode with constant speed and system is capable to process harmonic signal for adaptation following signals: speed, acceleration, position. Research shows dependency of the commitment coefficient in adaptation channel. Results show proof of the alorythms.

Keywords: technological trajectory correction, invariant, palpitant interferences simulation, control signal generation device.

В ряде мехатронных и робототехнических систем цель управления состоит в обеспечении технологического процесса, выполняемого по некоторой, заранее заданной или неопределенной, траектории с обеспечением требуемого вектора усилия при внешних флуктуирующих возмущениях. Эта проблема особенно актуальна в случаях, когда действительная траектория отличается от программной и требуется переход на фактическую, например, при управлении мобильными роботами, роботами для гидрорезания нефтепроводов, а также в технологическом оборудовании с большим моментом инерции и высокой динамикой.

Широкое распространение для САУ отмеченного типа получило управление, основанное на положениях теории инвариантности, в частности, управление, построенное на модифицированной четвертой форме инвариантности. По сравнению с другими методами коррекции введение инвариантных входов повышает точность, не изменяя свойств замкнутого контура системы. Реализация модифицированной четвертой формы инвариантности возможна использованием методов самонастройки, один из которых состоит в коррекции программной траектории, при ее разложении в интерполяторе на задающие для приводов воздействия, на стадии их формирования в устройстве формирования управляющего воздействия (УФУВ). Коррекция управляющего воздействия в устройстве его формирования выполняется на программном уровне и не влечет изменений основного контура привода, т.е. не затрагиваются внутренние свойства, а, следовательно, и динамические характеристики привода.

Принципиальное значение для рассматриваемого способа коррекция управляющей программы является процедура разложения заданной траектории на управляющие для приводов сигналы. Для оценки возможности реализации адаптивных алгоритмов управления составим дискретную модель работы УФУВ в режимах интерполяции. Рассмотрим формирование дополнительного управления, приводящие к коррекции программной траектории, в конечном итоге, к введению дополнительной составляющей в управляющее для приводов воздействие. Данный вопрос разберем на примере наиболее распространенного метода интерполяции - оценочной функции (ОФ) и для наиболее распространенных видов траектории - прямая линия и дуга окружности [2, 3].

Для организации управления вдоль заданной кривой (прямой) $Z=f(X)$ отыскивается такая функция S , которая удовлетворяет условиям, обозначенным на рис. 1: 1) делит плоскость одного квадранта, где организуется управление, например XOZ , на две

подплоскости U_+ и U_- ; 2) в подплоскости S_+ функция $S > 0$; 3) в подплоскости S_- функция $S < 0$; 4) на заданной траектории функция $S=0$.

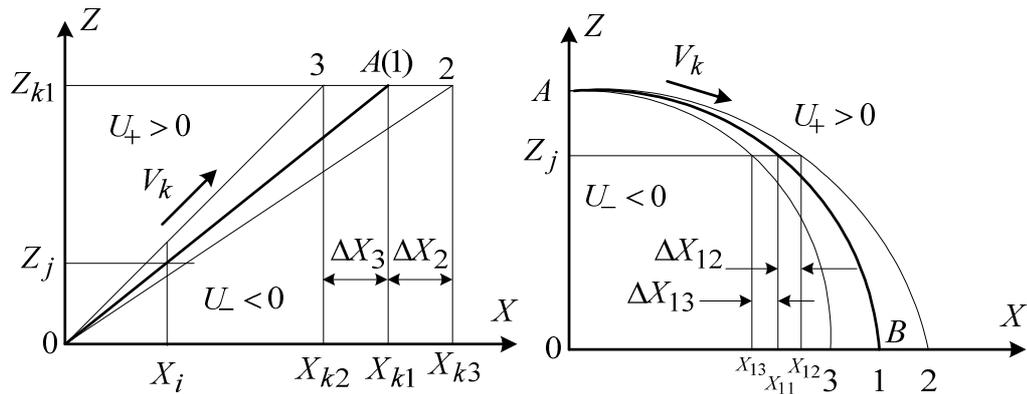


Рис. 1. Организация движения по методу ОФ

Алгоритм управления по ОФ предусматривает движение шагами по каждой координате в зависимости от знака ОФ в сторону, приближающую программную точку к идеальной траектории. В области всех значений аргументов это предусматривает вычисление ОФ, определение ее знака, и в зависимость от него формирование приращений Δx , Δz . На частоте f_0 определяется новое значение ОФ согласно выражений

$$\begin{aligned} U_{i+1,j}[nT_0] &= U_{i,j}[(n-1)T_0] \pm Z_a \text{ при шаге по } Z; \\ U_{i,j+1}[nT_0] &= U_{i,j}[(n-1)T_0] \pm X_a \text{ при шаге по } X, \end{aligned} \quad (1)$$

где знаки перед X_a , Z_a , определяются квадрантом.

Условия выполнения элементарных координатных приращений можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Delta z_{j+1}[nT_0] &= \begin{cases} 1 \forall U_{i,j+1} \vee U_{i+1,j} < 0; \\ 0 \forall U_{i,j+1} \vee U_{i+1,j} > 0; \end{cases} \\ \Delta x_{i+1}[nT_0] &= \begin{cases} 0 \forall U_{i+1,j} \vee U_{i,j+1} < 0; \\ 1 \forall U_{i+1,j} \vee U_{i,j+1} > 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где: i, j — число предыдущих приращений соответственно по координатам X, Z .

На частоте $1/T_k$ формируется управляющее для привода воздействие. Из выражений (1) - (2) следует: 1) в формировании приращений используются только значения координат конечной точки X_a, Z_a , задаваемые в программе и являющиеся для данного участка константами; 2) для изменения траектории достаточно изменить значение одной из координат конечной точки - аргумента, причем независимо от метода интерполяции; 3) в силу принципа разложения заданного контура на управляющие воздействия и двухчастотного преобразования при изменении вектора положения автоматически

изменяются проекции вектора скорости; 4) при неизменной в процессе выполнения технологической операции траектории достаточна разовая коррекция параметра X_a или Z_a .

При движении по дуге окружности метод ОФ определяет элементарные координатные приращения в виде

$$\begin{aligned} V_{i+1,j}[nT_0] &= V_{i,j}[(n-1)T_0] \pm 2x_i[(n-1)T_0] + 1; \\ V_{i,j+1}[nT_0] &= V_{i,j}[(n-1)T_0] \pm 2z_j[(n-1)T_0] + 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где знаки перед вторым слагаемым определяются квадрантом и направлением движения.

В зависимости от знака ОФ приращения формируются в соответствии с логическими уравнениями

$$\begin{aligned} \Delta z_{i+1}[nT_0] &= \begin{cases} 1 \forall U_{i,j+1} \vee U_{i+1,j} < 0; \\ 0 \forall U_{i,j+1} \vee U_{i+1,j} > 0; \end{cases} \\ \Delta z_{j+1}[nT_0] &= \begin{cases} 0 \forall U_{i+1,j} \vee U_{i,j+1} < 0; \\ 1 \forall U_{i+1,j} \vee U_{i,j+1} > 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражений (3) - (4) следует, что в отличие от линейной интерполяции здесь для формирования приращений используются текущие координаты X_i , Z_i .

Особенности реализации. Большинство рассматриваемых технологических операций выполняются с постоянной или медленно изменяющейся скоростью. Тогда, составляющая моментной ошибки $\delta_{\Delta f}$, обусловленная отклонением программной и фактической траекторий, может быть получена путем вычитания из текущей ошибки детерминированных составляющих ошибок: кинетической по управляющему и статической по возмущающим.

Рассмотрим сначала коррекцию при движении по прямолинейному участку в плоскости. Дополнительное управление Δg_x должно выполняться за счет изменения значения координаты (функции) конечной точки X_a , используемой в процедурах (2), при получении интерполяционных импульсов. Новое значение X_a^* определяется как

$$X_a^* = X_a \pm \Delta X_a,$$

где знак "+" или "-" определяется знаком моментной минимизируемой ошибки.

Дополнительная составляющая ΔX_a будет определяться

$$\Delta X_a[nT_a] = \begin{cases} \sum_{a=1}^l \delta_{\Delta f}[kT_c] \cdot 1[aT_a] \forall \delta_{\Delta f} > 0; \\ - \sum_{a=1}^l \delta_{\Delta f}[kT_c] \cdot 1[aT_a] \forall \delta_{\Delta f} < 0, \end{cases} \quad (5)$$

где l – число шагов до выполнения условия $\delta_{\Delta f} = 0$. Здесь частота T_a определяет частоту изменения X_a в соответствующей ячейке памяти.

При движении по дуге окружности коррекция значений текущей координаты функции (координаты) изменяется аналогично по зависимости

$$X_i^* = X_i \pm \Delta X_i$$

Данный метод адаптации рассмотрен на примере двух структур, представленных на рис. 2. На схемах обозначены: $W_1(p)$ – передаточная функция привода с кинематической передачей и объектом управления; $V(p)$ – передаточная функция привода по возмущению; $K(p)$ – передаточная функция звена адаптации управляющего сигнала; g_0, f – управляющее и возмущающее воздействия привода соответственно; X, X_0 – непосредственно регулируемая координата и координата смежного привода соответственно; δ – суммарная ошибка системы; Δf – отклонение фактического усилия от расчетного; δ_{f0} – составляющая ошибки системы, обусловленная возмущающим воздействием; $\delta_{\Delta f}$ – моментная составляющая ошибки; Δg – дополнительная составляющая управляющего воздействия.

В зависимости от управляющего воздействия звено $K(p)$ имеет передаточную функцию:

$$\begin{aligned} g(p) = X; \quad X = const; \quad K(p) = \gamma_0 / p; \\ g(p) = V / p; \quad V = const; \quad K(p) = \gamma_1 / p; \\ g(p) = \varepsilon / p^2; \quad \varepsilon = const; \quad K(p) = \gamma_2 / p. \end{aligned}$$

Где: X – регулируемая координата исследуемого привода; V – скорость входного сигнала исследуемого привода; ε – ускорение исследуемого привода; $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ – коэффициенты передачи в канале формирования дополнительного управления.

Моделирование структур (рис.2) с каналом адаптации сигнала задания по положению, скорости и ускорению было реализовано в среде пакета программы MatLab – Simulink. В частности, проводился анализ точности системы управления в режиме движения с постоянной скоростью и при отработке гармонического входного сигнала. В роли объекта исследования выступает привод перемещения с главной обратной связью по положению исполнительного механизма. Привод включает в себя два внутренних контура: по напряжению и частоте вращения двигателя и ПИД регулятор.

Главное возмущающее воздействие, обусловлено геометрически-силовым взаимодействием координатных приводов, вызывающим отклонение фактической траектории исполнительного органа от заданной. В качестве привода смежной координаты выступает симулятор межкоординатных возмущений. В зависимости от вида сигнала задания его выходная координата описывается уравнениями:

Случай 1. Канал адаптации по положению

$$X_0 = \begin{cases} (X \pm (0,01 \div 0,1) \cdot X) \quad \forall x(t) = X; \\ (X \pm (0,01 \div 0,1) \cdot X) \cdot \sin \omega t \quad \forall x(t) = X \cdot \sin \omega t. \end{cases}$$

Случай 2. Канал адаптации по скорости

$$X_0 = (V \pm (0,01 \div 0,15) \cdot V) \cdot t \quad \forall x(t) = V \cdot t.$$

Случай 3. Канал адаптации по ускорению

$$X_0 = (\varepsilon \pm (0,01 \div 0,15) \cdot \varepsilon)^2 \cdot t/2 \quad \forall x(t) = \varepsilon^2 \cdot t/2.$$

Где: X_0 – координата смежного привода; V_0 – скорость привода второй координаты; ε_0 – ускорение симулятора межкоординатных возмущений.

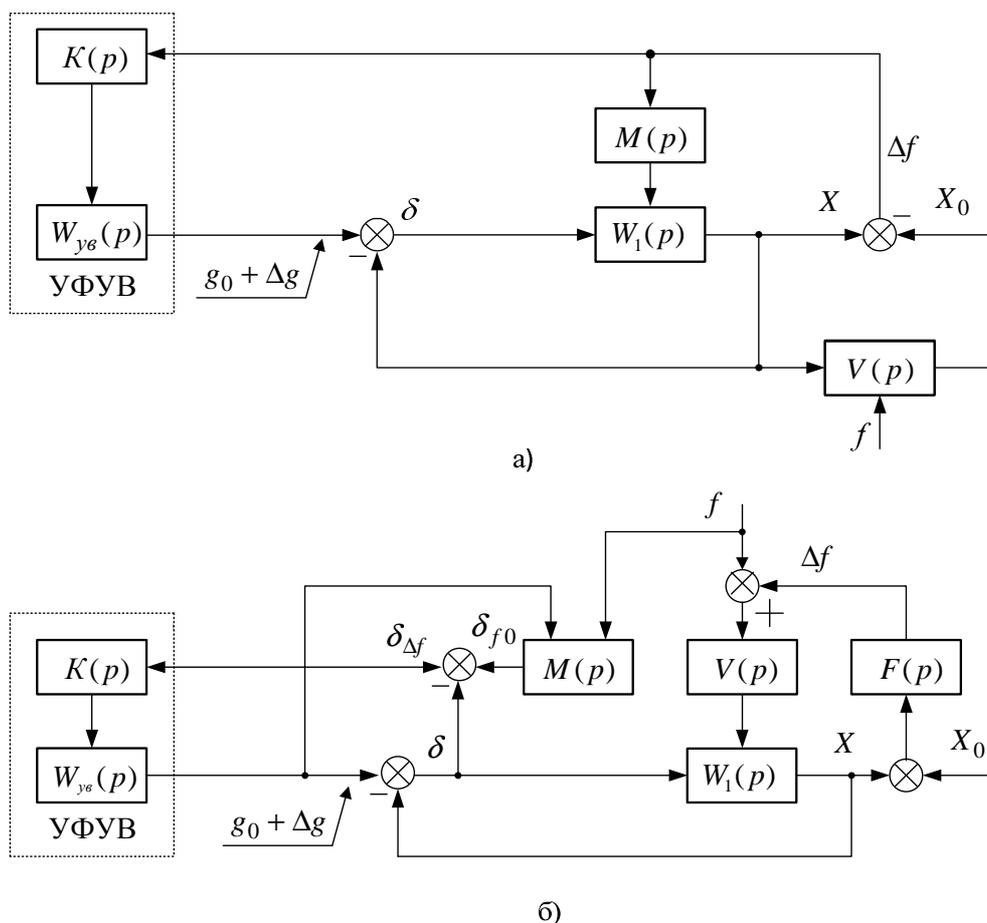


Рис. 2. Структурные схемы САУ с коррекцией управляющего воздействия привода в устройстве его формирования

Исследования проводились в режиме изменения момента нагрузки $M_n(t)$, обусловленного влиянием «другой» координаты, в интервале от 1 до 5 Нм (при номинальном моменте привода 2 Нм). В ходе моделирования плавно изменялась скорость задания управляющего воздействия в диапазоне 10...80 мм/с для каналов адаптации по положению и скорости, а также ускорение входного сигнала в пределах от 1 до 20 мм/с² для канала адаптации по ускорению. Соотношение координат, скоростей и ускорений приводов варьировалось от 1 до 10 %. Исследуемый привод в режиме движения с постоянной скоростью имеет ошибку положения, обусловленную влиянием симулятора смежной координаты и изменяющуюся в пределах от 5 до 10 %. Результаты моделирования САУ в режиме отработки гармонического входного сигнала показали, что вследствие внешних

межкоординатных возмущений на выходе системы управления наблюдается установившаяся динамическая ошибка (10 % от амплитуды задающего сигнала). Данные показатели не отвечают требованиям, предъявляемым к системам управления отмеченного типа. Введение контура адаптации позволяет свести к минимуму влияние внешних возмущений при выполнении технологического процесса по заранее заданной траектории и при необходимости осуществить переход на новую траекторию. На рис. 3 представлены графики изменения выходной координаты привода с контуром адаптации и без него, в режиме движения с постоянной скоростью и при обработке САУ гармонического входного сигнала. На рис. 2 цифрами обозначены: 1 – график изменения выходной координаты САУ без контура адаптации; 2 – график изменения выходной координаты САУ с контуром адаптации; 3 – отклонение положения инструмента Δx от заданной траектории. Рис. 4 демонстрирует графики изменения показателей САУ в течение времени процесса компенсации. На рис. 4,а представлены основные показатели САУ для канала адаптации по положению, при $t_{пк} = 5с$, $V=10$ мм/с, $\Delta x=5\%$, $M_n = 5$ Нм. На рис. 4,б изображены основные показатели САУ для канала адаптации по скорости, при $t_{пк} = 5с$, $v=10$ мм/с, $v/v_0=5\%$, $M_n = 5$ Нм. На рис. 4,в показаны основные показатели САУ для канала адаптации по ускорению, при $t_{пк} = 5с$, $\varepsilon=5$ мм/с², $\varepsilon/\varepsilon_0=10\%$, $M_n = 5$ Нм.

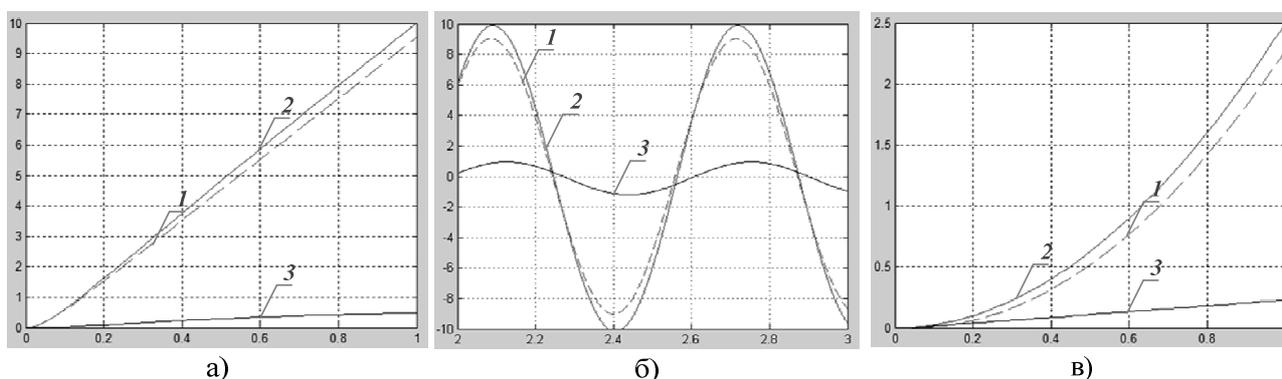


Рис.3. Исследование показателей точности САУ:

а) графики изменения выходной координаты САУ в режиме движения с постоянной скоростью, для каналов адаптации по скорости и положению ($V=10$ мм/с, $\Delta x=5\%$, $M_n = 5$ Нм); б) графики изменения выходной координаты САУ при обработке гармонического входного сигнала для канала адаптации по положению ($A=10$, $\omega=10$ рад/с, $M_n = 5$ Нм); в) графики изменения выходной координаты САУ для канала адаптации сигнала задания по ускорению ($\varepsilon=5$ мм/с², $\varepsilon/\varepsilon_0=10\%$, $M_n = 5$ Нм)

В ходе моделирования получены зависимости коэффициента передачи звена $K(p)$ в канале адаптации от скорости (частоты) задающего воздействия для контура адаптации по скорости и положению, а также от ускорения сигнала задания для контура адаптации по ускорению. На рис. 5 представлен график зависимости коэффициента передачи от частоты задающего воздействия при обработке гармонического сигнала соответственно.

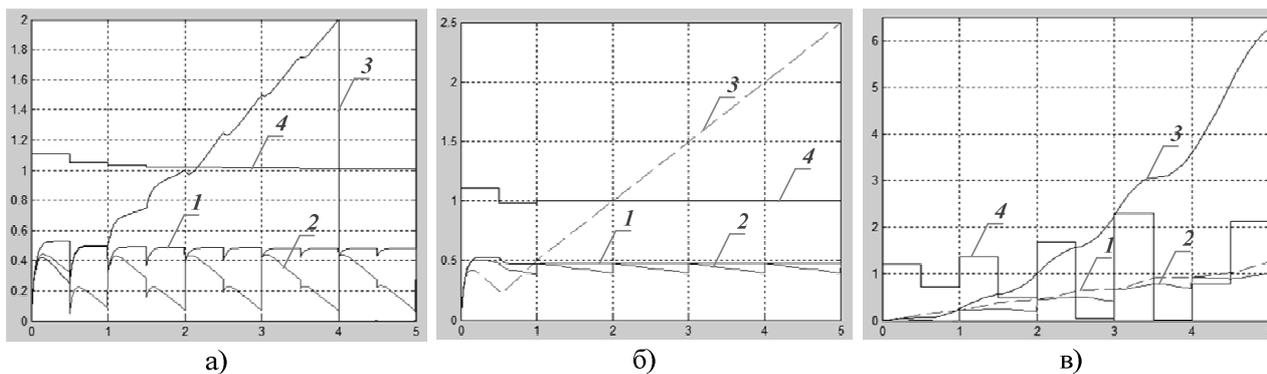


Рис. 4:

1 – график изменения ошибки системы управления δ ; 2 – график моментной составляющей ошибки $\delta_{\Delta f}$; 3 – график отклонения фактического усилия от расчетного Δf ; 4 – график изменения коэффициента коррекции управляющего сигнала g^*

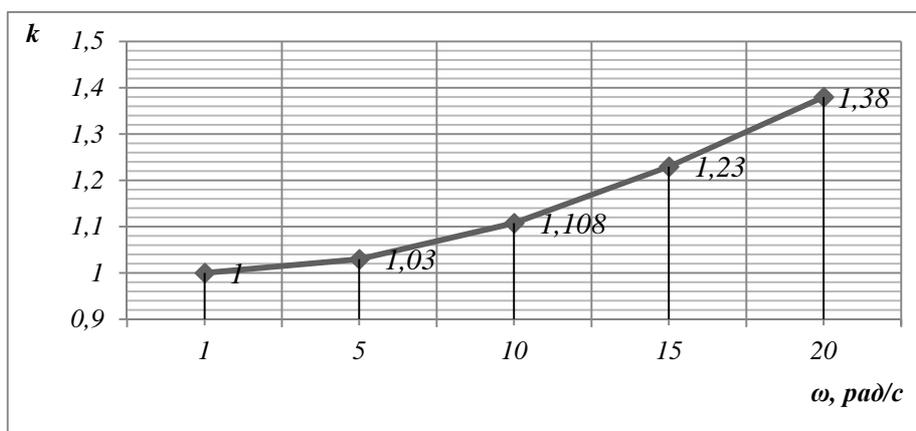


Рис. 5. График изменения коэффициента коррекции управляющего сигнала, в зависимости от частоты сигнала задания

Выводы

1. Применение четвертой формы инвариантности в мехатронных и робототехнических системах дает возможность выполнения динамической коррекции движения.
2. Исследуемый способ реализации контура адаптации, предусматривает коррекцию уровней сигналов производных на стадии формирования управляющего воздействия в процессе выполнения технологического процесса.
3. Коррекция управляющего воздействия в устройстве его формирования выполняется на программном уровне и не влечет изменений основного контура привода, т.е. не затрагиваются внутренние свойства, а, следовательно, и динамические характеристики привода. Причем, эта коррекция носит разовый характер при неизменной фактической траектории.
4. Результаты проведенных исследований подтверждают работоспособность рассмотренных алгоритмов.

Список литературы

1. Бойчук Л.М. Синтез координирующих систем автоматического управления. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
2. Игнатъев М.Б. Об инвариантности голономных автоматических систем // Теория инвариантности и ее применение в системах автоматического управления. – М.: Наука, 1964.
3. Кобзев А.А. Адаптация управляющего воздействия в приводах сборочного робота // Известия ВУЗ. Электромеханика. – 1991. – №12. – С. 73-79.
4. Кобзев А.А., Махфуз А.А. Особенности реализации четвертой формы инвариантности в системах программного управления // Известия ВолгГТУ, серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2013. – выпуск 18, № 22(125). – С. 102-105.
5. Управление многокоординатными приводами инерционных объектов на основе принципа вложенных контуров / Б.В. Новоселов, А.А. Кобзев, В.А. Немонтов, А.А. Бессонов // Оборонная техника. – 2006. – №8. – С. 17-20.
6. Kobzev A.A., Maxfus A.A. Systems of multi-coordinate drives of the technological equipment with cross diverse communications // TRANSPORT, ECOLOGY – STRAIGHT DEVELOPMENT. – 2012 – Т. 19. – Р. 487-492.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки», ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир;

Новоселов Б.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ОАО «ВНИИ «СИГНАЛ», г. Ковров.