

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.514

Гурко А. Г.¹, Янчевский И. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Украина

²Д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры теории машин и механизмов, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина

ГАРАНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

Рассматривается задача управления движением манипуляционного робота при наличии в его модели параметрической неопределенности и действии неконтролируемых возмущений. Предложен робастный регулятор, основанный на методе вычисляемого момента, в котором для вычисления дополнительного управления, обеспечивающего компенсацию действия неопределенных факторов, используется гарантированный подход, согласно которому значения этих факторов известны лишь с точностью до принадлежности некоторым множествам. Для оптимизации управления использован квадратичный критерий качества. Эффективность предложенного решения подтверждено результатами численного моделирования.

Ключевые слова: манипуляционный робот, регулятор с вычисляемым моментом, гарантированное управление, множество возможных состояний.

НОМЕНКЛАТУРА

PBM – регулятор с вычисляемым моментом;

\mathbb{R} – множество действительных чисел;

n – количество звеньев манипуляционного робота;

p – количество измеряемых выходных координат системы;

K – момент квантования;

N – количество моментов квантования;

E – единичная матрица;

$\mathbf{q}^d, \dot{\mathbf{q}}^d, \ddot{\mathbf{q}}^d$ – $(n \times 1)$ -векторы желаемых обобщенных координат, их скоростей и ускорений;

$\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ – $(n \times 1)$ -векторы фактических обобщенных координат, их скоростей и ускорений;

$D(\mathbf{q})$ – симметричная положительно определенная $(n \times n)$ -матрица инерции робота;

$F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – $(n \times 1)$ -вектор, включающий все центробежные и кориолисовы компоненты, силы трения и силы гравитации;

\mathbf{M} – $(n \times 1)$ -вектор действующих на звенья робота управляющих моментов;

\mathbf{M}_L – $(n \times 1)$ -вектор действующих на звенья робота возмущающих моментов;

$\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}, \ddot{\mathbf{e}}$ – ошибки слежения по положению, по скорости и по ускорению, соответственно;

$\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_v$ – $(n \times n)$ -матрицы коэффициентов обратных связей по положению и по скорости;

$\boldsymbol{\eta}$ – неопределенность;

$\hat{(\cdot)}$ – оценка параметра;

$\tilde{(\cdot)}$ – разность между действительным значением параметра и его оценкой;

$\mathbf{a} \in \mathbb{R}^n$ – основное управляющее воздействие;

$\delta \mathbf{a} \in \mathbb{R}^n$ – дополнительное управляющее воздействие;

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2n}$ – вектор координат состояния;

$\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ – вектор результатов измерений;

\mathbf{v} – вектор шумов измерений;

$\mathbf{g}, \boldsymbol{\omega}$ – заданные функции;

V – функция Ляпунова;
 J – целевой функционал;
 Ω – информационное множество;
 $\partial\Omega$ – совокупность граничных элементов множества Ω .

ВВЕДЕНИЕ

Манипуляционные роботы с быстродействующими и высокоточными системами управления движением крайне востребованы при автоматизации различных технологических операций в самых разных отраслях промышленности, в медицине и в научных исследованиях. Как правило, управление движением таких роботов осуществляется в условиях неопределенности. Эта неопределенность может быть связана с упрощениями, принимаемыми при построении моделей манипуляционных роботов, неполнотой информации о значениях таких параметров как массы и моменты инерции звеньев, силы трения в сочленениях, возможные внешние возмущения и шумы измерений. Кроме того, некоторые характеристики, например, масса объекта, с которым оперирует манипулятор, могут значительно изменяться в процессе его функционирования. Указанные неопределенности оказывают существенное влияние на эффективность работы системы управления, и даже стать причиной потери системой устойчивости.

Для обеспечения инвариантности системы управления роботом по отношению и имеющимся факторам неопределенности разрабатываются различные регуляторы [1–19], в основе которых лежат разнообразные подходы. Однако, большинство из них не нашло практического применения в силу различных недостатков, таких как, например, сложность реализации регулятора, большое количество итераций при расчете управления, необходимость измерения всех координат вектора состояния и т. д.

Целью данной работы является разработка эффективного и относительно простого с вычислительной точки зрения регулятора для управления движением манипуляционного робота в условиях неопределенности.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представим динамическую модель n -звенного манипулятора в виде [13]:

$$D(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) = M. \quad (1)$$

В классической постановке задачи управления манипулятором широко используется линеаризация обратной связью [12, 13], в результате которой получают следующий закон управления:

$$M = D(q)a + F(q, \dot{q}). \quad (2)$$

В этом уравнении, при использовании РВМ, значение a определяется выражением:

$$a = \ddot{q}^d + K_v \dot{e} + K_p e, \quad (3)$$

где матрицы K_v и K_p подлежат определению.

Сопоставив уравнения (1)–(3) получаем линейное уравнение для ошибки $\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0$, которое устойчиво при положительно определенных матрицах K_v и K_p .

Так как при синтезе управления значения входящих в (2) параметров известны приближенно, то приходится пользоваться их оценками:

$$M = \hat{D}(q)a + \hat{F}(q, \dot{q}), \quad (4)$$

На основании (4) и (1) следует:

$$\ddot{q} = a - \eta(q, \dot{q}, a), \quad (5)$$

где $\eta = (E - D^{-1}(q)\hat{D}(q))a - D^{-1}(q)\tilde{n}(q, \dot{q})$. В дальнейшем для простоты записи функциональные зависимости будем опускать. Тогда, с учетом (3) и (5), получим

$$\ddot{e} = \ddot{q}^d - a + \eta. \quad (6)$$

Таким образом, задача управления движением манипуляционного робота по заданной траектории сводится к поиску закона управления a , который бы компенсировал ошибку в нелинейной нестационарной системе (6).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для борьбы с неопределенностями η разрабатываются различные схемы адаптивных и робастных регуляторов [1–9], среди которых эффективным является адаптивный регулятор со скользящим режимом [2, 5, 6]. Обзоры существующих решений по применению такого типа регулятора к управлению манипуляторами можно найти в [6, 9, 10]. Вместе с тем следует отметить, что недостатком, присущим таким регуляторам, является необходимость борьбы с дребезгом фазовой траектории вдоль линии переключения [10, 11].

Распространенным подходом к управлению манипуляционными роботами при отсутствии неопределенности является использование РВМ [12, 13]. Достоинства РВМ: потенциально высокая точность слежения за заданной траекторией, малые коэффициенты обратной связи, малые затраты энергии [1]. Однако на эффективность применения РВМ для управления манипуляционными роботами существенно влияют неопределенности, поэтому исследования по совершенствованию РВМ с целью обеспечения его робастности по отношению к неопределенностям являются актуальными. Среди публикаций последних лет следует отметить [1, 9–19]. В частности, в [12] описан регулятор с компенсатором, в закон управления которого добавлены динамические фильтры ошибок по положению и по скорости. В книге [13] приведены РВМ, в которых вместо точных значений параметров математической модели робота используются их оценки. Это позволяет уменьшить объем вычислений в режиме реального времени. Компенсация же ошибок управления, вызванных отклонениями оценочных значений математической модели от номинальных, осуществляется путем вычисления дополнительных управляющих воздействий.

В [14] рассмотрено два непараметрических регрессионных метода для уточнения параметров модели робота в реальном времени. Результаты этой оценки ис-

пользовались для управления манипулятором при помощи РВМ. В результате реализована адаптивная система управления. В [15] описан метод робастного управления манипулятором, основанный на РВМ и прямом методе Ляпунова. В работе [11] описан модифицированный РВМ, который, фактически, является вариантом регулятора со скользящим режимом.

В [10] предложены две адаптивные схемы управления манипуляционным роботом, которые сочетают в себе РВМ и компенсаторы неопределенностей, использующие аппарат нечеткой логики. Комбинации РВМ с регуляторами на нечеткой логике для оценки и компенсации неопределенностей описаны также в [9, 11, 16, 17]. Ф. Пилтан с соавторами использовал математические средства нечеткой логики для настроек коэффициентов РВМ [18, 19].

Все приведенные системы помимо очевидных достоинств обладают и некоторыми недостатками, например, вычислительной сложностью, зависимостью от субъективных мнений экспертов [9] и проч.

При управлении динамическими системами в условиях неопределенности развивается так называемый игровой подход, при котором предполагается, что неопределенные факторы известны с точностью до принадлежности заданным информационным множествам. В процессе управления строятся новые множества, представляющие собой гарантированную оценку состояния системы, а управляющее воздействие отыскивается из условия минимизации некоторого функционала, тогда как неопределенные факторы стремятся его максимизировать [20–24]. Полученное управляющее воздействие гарантирует достижение цели управления при любых допустимых реализациях факторов неопределенности. Представляется перспективной разработка системы управления движением манипуляционным роботом на основе указанного подхода.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При синтезе гарантированного управления в качестве информационных множеств рассматриваются или выпуклые многогранники, или аппроксимирующие их с целью упрощения вычислений эллипсоиды. Однако в последнем случае появляется дополнительная погрешность аппроксимации. В [23] авторами настоящей работы предложено применение математических средств теории R-функций, особенностью которых является относительная простота и гибкость с точки зрения автоматизации программирования, для построения эволюционирующих во времени информационных множеств в виде многогранников. В [24] приведена процедура синтеза управления, основанная на введенном понятии дна функции Ляпунова, позволяющая существенно минимизировать объем вычислений при определении оптимального управления динамическим объектом в условиях неопределенности. В настоящей работе представлено развитие полученных в [23, 24] результатов на новый класс объектов, в частности, на системы управления движением манипуляционных роботов.

Рассмотрим дискретную систему управления движением манипуляционного робота. Пусть система подвержена действию неопределенных внешних возмущений $\boldsymbol{\eta}_k$, в качестве априорной информации относительно которых известна принадлежность некоторым компактным множествам $\Omega_k^{\boldsymbol{\eta}}$ ($\boldsymbol{\eta}_k \in \Omega_k^{\boldsymbol{\eta}}$, $k=0, 1, \dots, N$). Каждая $\boldsymbol{\eta}_k$ может принимать любое значение из соответствующего множества $\Omega_k^{\boldsymbol{\eta}}$ с равной вероятностью.

Для системы (6) найдем закон управления \mathbf{a}_k , гарантирующий ее асимптотическую устойчивость и обеспечивающий оптимальный в смысле выбранного критерия качества результат слежения за заданной траекторией для любого значения $\boldsymbol{\eta}_k$.

Примем

$$\mathbf{a}_k = \ddot{\mathbf{q}}_k^d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_k + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_k + \delta \mathbf{a}_k. \quad (7)$$

Введем вектор состояния:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_k \\ \dot{\mathbf{e}}_k \end{bmatrix}.$$

Тогда ошибка движения замкнутой системы может быть записана в виде линейного разностного уравнения:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \{ \boldsymbol{\eta}_k - \delta \mathbf{a}_k \}, \quad k=0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

где \mathbf{A} и \mathbf{B} – матрицы размерности $(2n \times 2n)$ и $(2n \times n)$, соответственно:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ -\mathbf{K}_p & -\mathbf{K}_v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}.$$

В результате измерения вектора \mathbf{x}_k формируется вектор результатов измерений \mathbf{y}_k :

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k), \quad k=1, 2, \dots, N-1. \quad (9)$$

Целью управления примем минимизацию функционала вида:

$$\mathbf{J}_k(\mathbf{x}_k, \delta \mathbf{a}_k) = \mathbf{V}_k(\mathbf{x}_{k+1}) + \boldsymbol{\omega}_k(\mathbf{x}_k, \delta \mathbf{a}_k), \quad (10)$$

где заданная функция $\boldsymbol{\omega}_k$ определяет, например, затраты на реализацию управления.

Для корректной постановки задачи минимизации функционала (10) необходимо доопределить информацию о неопределенностях $\boldsymbol{\eta}_k$. Так как значения $\boldsymbol{\eta}_k$ могут с равной вероятностью принимать любое значение из множества $\Omega_k^{\boldsymbol{\eta}}$, то приходится рассматривать такие значения, которые максимизируют критерий (10).

Ограниченность информации о $\boldsymbol{\eta}_k$ и \mathbf{v}_k в виде соответствующих множеств приводит к тому, что в результате измерения (9) выходных координат системы, информация о значении текущих координат состояния робота получается в виде множественной оценки $\mathbf{x}_k \in \Omega_k^{\Gamma}$. Для расчета управления необходимо получение точечной оценки $\mathbf{x}_{k+1}^{\mathbf{u}} \in \Omega_{k,k+1}^{\mathbf{w}}$ состояния системы из информационного множества возможных состояний $\Omega_{k,k+1}^{\mathbf{w}}$ исполь-

зують точку, которая либо обеспечивает максимум некоторому функционалу качества [20], либо удовлетворяет условию минимума ошибки в наилучшем случае (чебышевский центр). Ориентация на значение \mathbf{x}^u , максимизирующее функционал, в частном случае (10), предпочтительнее, поскольку такой подход позволяет учитывать не только минимум ошибки, но и затраты ресурсов на реализацию управления, а также ограничения на их значения. Таким образом, задача синтеза системы управления сводится к известной из теории дифференциальных игр минимаксной задаче:

$$\min_{\delta \mathbf{a}_k \in \Omega_k^u} \max_{\boldsymbol{\eta}_k \in \Omega_k^\eta} \max_{\mathbf{v}_k \in \Omega_k^v} \max_{\mathbf{x}_k \in \Omega_k^f} \mathbf{J}_k(\mathbf{x}_k, \delta \mathbf{a}_k). \quad (11)$$

Очевидно, что решение задачи (11) гарантирует определенный результат, зависящий от вида критерия \mathbf{J}_k , при любых допустимых реализациях факторов неопределенности.

Описание множества возможных состояний системы управления манипуляционным роботом будем производить в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Пусть в произвольный момент квантования k имеется оценка состояния системы в виде $\mathbf{x}_k \in \Omega_k^f$. Производится преобразование:

$$\Omega_{k,k+1}^f = \mathbf{A} \Omega_k^f, \quad (12)$$

где $\Omega_{k,k+1}^f$ множество, представляющее собой прогноз возможных состояний $\mathbf{x}_{k+1}^f \in \Omega_{k,k+1}^f$ системы в $[k+1]$ -й момент, в которые она должна перейти в свободном движении между k -м и $[k+1]$ -м моментами квантования из состояния $\mathbf{x}_k \in \Omega_k^f$.

2. Строится новое множество $\Omega_{k,k+1}^w$ с учетом влияния внешних возмущений $\boldsymbol{\eta}_k$ на элементы множества $\Omega_{k,k+1}^f$ путем трансформации (размывания) множества $\Omega_{k,k+1}^f$ при помощи преобразования:

$$\Omega_{k,k+1}^w = \Omega_{k,k+1}^f \cup \mathbf{B}_k \partial \Omega_k^\eta. \quad (13)$$

Множество $\Omega_{k,k+1}^w$, таким образом, представляет собой прогноз возможных состояний системы в $[k+1]$ -й момент под влиянием неопределенности $\boldsymbol{\eta}_k$.

3. Находится значение $\mathbf{x}_{k+1}^u \in \Omega_{k,k+1}^w$ состояния системы, которое используется для расчета управляющего воздействия $\delta \mathbf{a}_k$, минимизирующего функционал качества (11).

4. Производится перемещение множества $\Omega_{k,k+1}^w$ найденным управлением $\delta \mathbf{a}_k$. При этом формируется новое информационное множество Ω_{k+1}^u , представляющее собой априорную оценку состояния системы, в которые она перейдет к моменту $[k+1]$ после применения управления $\delta \mathbf{a}_k$ и условиях наличия неопределенности $\boldsymbol{\eta}_k$.

5. Осуществляется новое измерение выходных координат системы с целью получения апостериорной оценки $\mathbf{x}_{k+1} \in \Omega_{k+1}^r$ состояния системы в момент квантования $[k+1]$, где

$$\Omega_{k+1}^r = \Omega_{k+1}^u \cap \Omega_{k+1}^v. \quad (14)$$

Далее приведенная выше процедура итерационно повторяется. Структурная схема изложенной системы управления манипуляционным роботом приведена на рис. 1.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки эффективности предложенного решения выполнено моделирование системы управления движением двухзвенным плоским манипуляционным роботом, динамика которого описывается уравнением (1) со следующими параметрами [17]: $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})$,

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -C_{12} \dot{q}_2 & -C_{12} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ C_{12} \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} G_1 g \\ G_2 g \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 - M_{L1} \\ M_2 - M_{L2} \end{bmatrix},$$

где $D_{11} = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos q_2$,

$D_{12} = D_{21} = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2$; $D_{22} = m_2l_2^2$,

$C_{12} = m_2l_1l_2 \sin q_2$; $G_1 = (m_1 + m_2)l_1 \cos q_2 + m_2l_2 \cos(q_1 + q_2)$,

$G_2 = m_2l_2 \cos(q_1 + q_2)$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; M_{Li} ($i=1,2$) – внешние возмущения.

Параметры звеньев манипуляционного робота приведены в табл. 1.

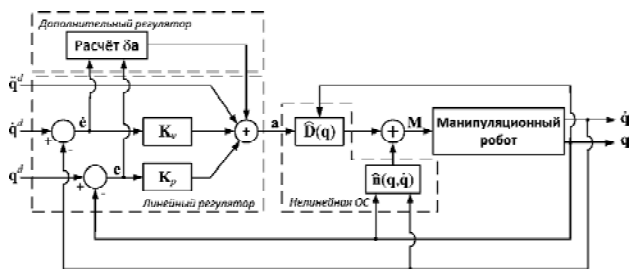


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления манипуляционным роботом

Таблица 1 – Параметры звеньев манипуляционного робота и внешнее возмущение

№ звена, i	Масса, m_i кг	Длина, l_i м	Внешние возмущения, M_{Li} Нм
1	2,74	0,115	$\sin(2t)$
2	2,01	0,130	$2\cos(4t)$

Желаемые траектории q_i^d $i=1,2$ движения звеньев описывается выражением:

$$q_i^d = b_i(1 - e^{-2t^3}) + c_i(1 - e^{-2t^3})\sin(\omega_i t), \text{ рад}, \quad (16)$$

где $b_1 = \pi/4$ рад, $b_2 = \pi/3$ рад, $c_1 = \pi/9$ рад, $c_2 = \pi/6$ рад, $\omega_1 = 4$ рад/с и $\omega_2 = 3$ рад/с.

Движение начиналось при начальных условиях $q_1(0) = 0,25$ рад, $q_2(0) = -0,3$ рад, $\dot{q}_i(0) = \ddot{q}_i(0) = 0$ ($i=1,2$). В процессе моделирования измерялись только значения обобщенных координат q_i ($i=1,2$) с неизвестным, но ограниченным по значению, случайным шумом $|v_i| \leq 0,00872$ рад, скорости изменения обобщенных координат не измерялись. На звенья робота действовали возмущения в виде внешних моментов M_{Li} ($i=1,2$), при этом регулятору была известна лишь интервальная оценка указанных возмущений (табл. 1). В качестве цели управления было принято решение задачи (12), где

$$V_k = x_{k+1}^T P x_{k+1}; \quad \omega_k = \delta a_k^T R \delta a_k:$$

$$P = \begin{bmatrix} 5,242 & 1,120 \\ 1,120 & 1,858 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

С целью достижения независимого управления звеньями робота матрицы K_p и K_v выбраны диагональными со следующими значениями ненулевых элементов: $\{K_p\}_{11} = \{K_p\}_{22} = 100$, $\{K_v\}_{11} = \{K_v\}_{22} = 20$. Период квантования был принят 0,05 с. Построение эволюционирующих во времени множеств осуществлялось при помощи R-функций.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования представлены на рис. 2–4. Рис. 2 отображает эффективность отработки системой управления желаемых траекторий. Здесь time – время, tracking error – ошибка управления, desired trajectory – желаемая траектория, actual trajectory – реальная траектория.

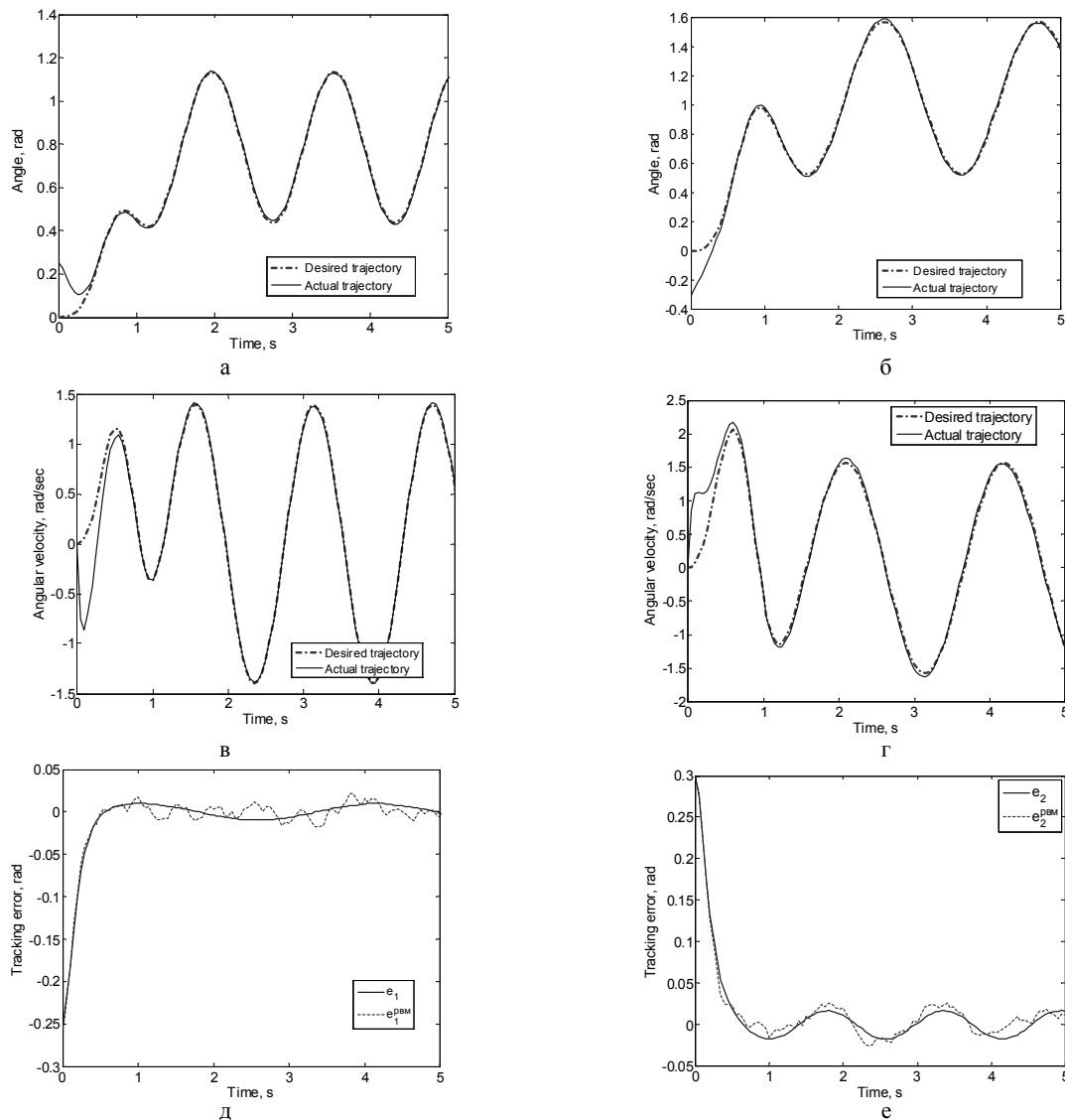


Рисунок 2 – Отработка желаемых траекторий движения: а – угол поворота первого звена (Angle); б – угол поворота второго звена (Angle); в – угловая скорость первого звена (Angular velocity); г – угловая скорость второго звена (Angular velocity); д – ошибки управления для первого звена (Tracking error); е – ошибки управления для второго звена (Tracking error)

Для сравнения на рис. 2,д,е вместе с кривыми ошибок e_i ($i=1,2$) слежения за желаемой траекторией робота с предлагаемым регулятором приведены кривые ошибок $e_i^{\text{РВМ}}$ ($i=1,2$) робота с классическим РВМ. Действующие на звенья манипуляционного робота управляющие и возмущающие моменты приведены на рис. 3.

На рис. 4 приведены спрогнозированные множества Ω^Γ возможных состояний системы и истинные состояния \mathbf{x}^t для момента $k=N$. Построение множеств Ω^Γ производилось при помощи выражений (12)–(14).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что предлагаемый регулятор обеспечивает высокое качество управления движением (рис. 2): большая начальная ошибка отработки заданной траектории, вызванная ненулевыми начальными условиями, компенсируется за 0,5 с. После этого момента желаемые и фактические траектории достаточно близки несмотря на действие неопределенных внешних возмущений и шумов измерений. Значения абсолютной ошибки по положению не превышают 0,0095 рад и 0,01705 рад для первого и второго звена, соответственно, что составляет 2% и 2,3% (рис. 2,д,е). Из рис. 2,д,е также легко видеть преимущество предлагаемого регулятора перед классическим РВМ.

Как видно из рис. 3, регулятор обеспечивает плавное изменение управляющих моментов, что положительно сказывается на динамике исполнительных приводов робота.

Рис. 4 иллюстрирует высокую точность прогноза возможных значений координат состояния системы. Очевидно, что уменьшение меры множества Ω^Γ повысит качество управления, поэтому на этапе проектирования регулятора необходим тщательный анализ возможных факторов неопределенности и интервалов их возможных изменений. Обеспечить более высокое качество управления можно также путем коррекции меры множеств на каждом шаге квантования по результатам наблюдений за функционированием системы, т.е. приданием регулятору адаптивных свойств.

Следует также отметить, что двухзвенный манипулятор в качестве объекта при моделировании выбран исключительно из соображений наглядности, и на практике количество n звеньев манипуляционного робота ограничивается лишь вычислительной мощностью управляющей ЭВМ.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена актуальная задача управления движением манипуляционного робота в условиях неопределенности. Для ее решения разработан новый регулятор, основанный на игровом подходе в рамках концепции гарантированного управления. Данный регулятор

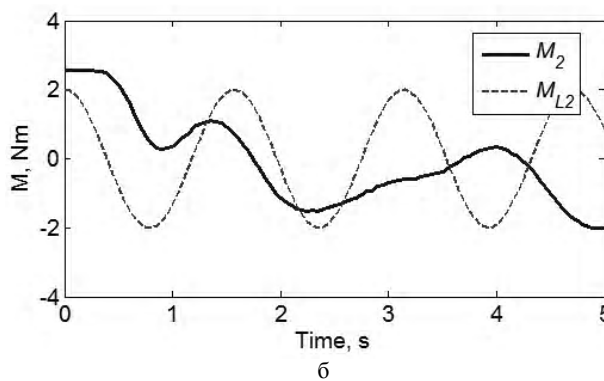
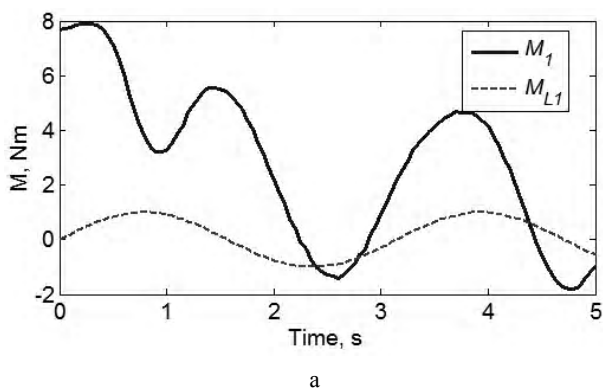


Рисунок 3 – Управляющий M и возмущающий M_L моменты: а – для первого звена; б – для второго звена

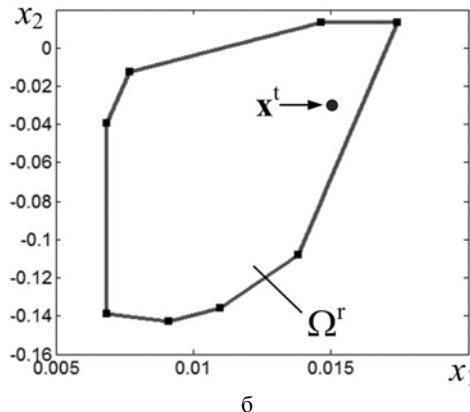
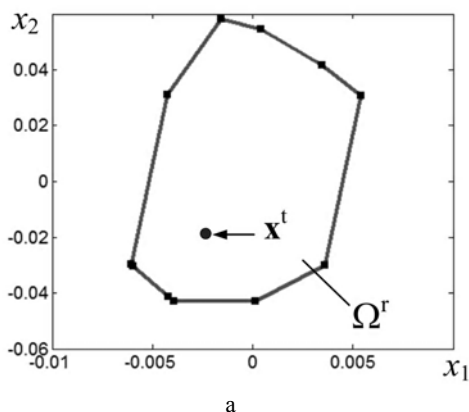


Рисунок 4 – Множества Ω^Γ возможных состояний и истинные состояния \mathbf{x}^t системы: а – для первого звена; б – для второго звена

предполагает наличие двух контуров: первый контур рассчитывает основное управляющее воздействие при помощи метода вычисляемого момента, а назначение второго – определение дополнительного управления, компенсирующего действие неопределенных факторов на основе дифференциальной игры с квадратичным функционалом качества.

Практическая ценность предложенного регулятора заключается в гарантированном получении близких к оптимальным законов управления при любых допустимых реализациях факторов неопределенности, а также в относительно невысоких требованиях к вычислительным ресурсам.

Недостатком регулятора является то, что действующие на систему факторы далеко не всегда будут стремиться обеспечить максимальное значение критерия качества. Повышение качества управления возможно за счет введения дополнительного контура адаптации, уточняющего в процессе управления оценки неопределенных параметров. С решением этой задачи связаны наши дальнейшие исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках выполнения госбюджетной научно-исследовательской работы «Разработка моделей и методов синтеза системы автоматического управления рабочим оборудованием экскаватора» (номер государственной регистрации 0113U000175).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Peng W. Computed torque control-based composite nonlinear feedback controller for robot manipulators with bounded torques / W. Peng, Z. Lin, J. Su // *IET Control Theory & Applications*. – 2009. – Vol. 3, № 6. – P. 701–711. DOI: 10.1049/ietcta.2008.0259
- Kuo T. C. Trajectory control of a robotic manipulator utilizing an adaptive fuzzy sliding mode / T. C. Kuo // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 65. – P. 913–917.
- Yan R. Adaptive learning tracking control of robotic manipulators with uncertainties / R. Yan, K. Tee, H. Z. Li // *Journal of Control Theory and Applications*. – 2010. – Vol. 8, № 2. – P. 160–165. DOI: 10.1007/s11768-010-0010-2
- Mohanty A. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates / A. Mohanty, B. Yao // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2011. – Vol. 19, № 3. – P. 567–575. DOI: 10.1109/TCST.2010.2048569
- Neural network-based sliding mode adaptive control for robot manipulators / [T. Sun, H. Pei, Y. Pan, H. Zhou, Zhang C.] // *Neurocomputing*. – 2011. – Vol. 74, № 14. – P. 2377–2384. DOI: 10.1016/j.neucom.2011.03.015
- Position control of robot manipulator: design a novel SISO adaptive sliding mode fuzzy PD fuzzy sliding mode control / [F. Piltan, N. Sulaiman, S. Allahdadi, M. Dialame, A. Zare] // *International Journal of Artificial Intelligence and Expert System*. – 2011. – Vol. 2, № 5. – P. 208–228.
- Yang Z. J. Decentralized adaptive robust control of robot manipulators using disturbance observers / Z. J. Yang, Y. Fukushima, P. Qin // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2012. – Vol. 20, № 5. – P. 1357–1365. DOI: 10.1109/TCST.2011.2164076
- Robust control of robot manipulators based on uncertainty and disturbance estimation / [J. P. Kolhe, M. Shaheed, T. S. Chandar, S. E. Talole] // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. – 2013. – Vol. 23, № 1. – P. 104–122. DOI: 10.1002/rnc.1823
- Abbaszadeh E. Control of robot manipulator with uncertain dynamics by adaptive fuzzy controller / E. Abbaszadeh, M. Haddad-Zarif [Electronic resource] // *Journal of Intelligent Automation Systems*. – 2014. – Access mode: http://ijas.shahroodut.ac.ir/article_225_0.html.
- Adaptive fuzzy computed-torque control for robot manipulator with uncertain dynamics / [Y. Chen, G. Y. Ma, S. X. Lin, J. Gao] // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2012. – Vol. 9. – P. 201–209. DOI: 10.5772/54643
- Acho L. Computed-torque-plus-compensation-plus-chattering controller of robot manipulators [Electronic resource] / L. Acho, Y. Vidal, P. Francesc // *Contemporary Robotics – Challenges and Solutions*; ed. A. D. Rodi. – InTech, 2009. – Access mode: <http://www.intechopen.com/books/contemporary-robotics-challenges-and-solutions/computed-torque-plus-compensation-plus-chattering-controller-of-robot-manipulators> DOI: 10.5772/7803
- Kelly R. *Control of Robot Manipulators in Joint Space* / R. Kelly, V. Santibanez, A. Loria. – Berlin : Springer, 2005. – 452 p.
- Springer handbook of robotics* / [eds. B. Siciliano, O. Khatib]. – Springer, 2008. – 1611 p.
- Nguyen-Tuong D. Computed torque control with nonparametric regression models / D. Nguyen-Tuong, M. Seeger, J. Peters // *American Control Conference, Seattle, USA 11–13 June 2008 : proceedings*. – Los Alamitos : IEEE, 2008. – P. 212–217. DOI: 10.1109/ACC.2008.4586493
- Robotics: modelling, planning and control / [B. Siciliano, L. Sciacivico, L. Villani, G. Oriolo]. – Springer. – 2009. – 632 p.
- Chen Y. Adaptive fuzzy and robust H_∞ compensation control for uncertain robot / Y. Chen, G. Ma, S. Lin, J. Gao // *International Journal of Robotics and Automation*. – 2013. – Vol. 2, № 4. – P. 174–188. DOI: 10.11591/ijra.v2i4.2763
- Robust adaptive inverse dynamics control for uncertain robot manipulator / [Y. Chen, G. Mei, G. Ma, S. Lin, J. Gao] // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. – 2014. – Vol. 10, № 2. – P. 575–587.
- Design of model free adaptive fuzzy computed torque controller: applied to nonlinear second order system / [F. Piltan, N. Sulaiman, A. Jalali, F. D. Narouei] // *International Journal of Robotics and Automation*. – 2011. – Vol. 2, № 4. – P. 232–244.
- Design novel nonlinear controller applied to robot manipulator: design new feedback linearization fuzzy controller with minimum rule base tuning method / F. Piltan, M. Keshavarz, A. Badri, A. Zargari // *International Journal of Robotics and Automation*. – 2012. – Vol. 3, № 1. – P. 1–18.
- Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации : монография / В. М. Кунцевич. К. : Наук. думка, 2006. – 264 с.
- Kurzanski A. B. Optimization of output feedback control under set-membership uncertainty / A. B. Kurzanski, P. Varaiya // *Journal of optimization theory and applications*. – 2011. – Vol. 151, № 1. – P. 11–32. DOI: 10.1007/s10957-011-9861-z
- Kurzanski A. B. Output feedback guaranteed tracking control through finite observers / A. B. Kurzanski, P. A. Tothilin // *Conference on Decision and Control: 52nd international conference, Florence, Italy, 10–13 December: proceedings*. – IEEE, 2013. – P. 4448–4453. DOI: 10.1109/CDC.2013.6760574
- Гурко А. Г. Оценивание вектора состояния динамической системы в условиях неопределенности / А. Г. Гурко, В. М. Колодяжный // *Кибернетика и системный анализ*. – 2013. – № 6. – С. 23–31.
- Гурко А. Г. Управление дискретной системой при ограниченных возмущениях / А. Г. Гурко, И. Ф. Еременко // *Проблемы управления и информатики*. – 2011. – № 6 – С. 1–11.

Статья поступила в редакцию 23.09.2014.

После доработки 07.10.2014.

Гурко О. Г.¹, Янчевський І. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна

²Д-р фіз.-мат. наук, доцент, професор кафедри теорії машин та механізмів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна

ГАРАНТОВАНЕ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА

Розглядається задача управління рухом маніпуляційного робота при наявності в його моделі параметричної невизначеності та дії неконтрольованих збурень. Запропоновано робастний регулятор, що заснований на методі обчислюваного моменту, в якому для обчислення додаткового управління, що забезпечує компенсацію дії невизначених факторів, використовується гарантований підхід, згідно якого значення цих факторів відомі лише з точністю до приналежності деяким множинам. Для оптимізації управління використаний квадратичний критерій якості. Ефективність запропонованого рішення підтверджено результатами чисельного моделювання.

Ключові слова: маніпуляційний робот, регулятор з обчислювальним моментом, гарантоване управління, множина можливих станів.

Gurko A. G.¹, Yanchevskiy I. V.²

¹PhD, Associate professor, Associate Professor of department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

²Dr.Sc., Associate Professor, Professor of department of theory of machines and mechanisms, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

GUARANTEED CONTROL OF ROBOT-MANIPULATOR MOVEMENT

The problem of a robot-manipulator movement under parametric uncertainties and uncontrolled disturbances has been considered. The robust controller based on the computed torque control using to calculate additional control that enables compensation of uncertain factors action a guaranteed approach, according to which values of these factors are known only to the limits of a certain set membership, has been proposed. The quadratic performance criterion for control optimization has been used. The efficiency of the proposed solution is confirmed with numerical simulation.

Keywords: robot-manipulator, computed torque control, guaranteed control, set of probable states.

REFERENCES

1. Peng W., Lin Z., Su J. Computed torque control-based composite nonlinear feedback controller for robot manipulators with bounded torques, *IET Control Theory & Applications*, 2009, Vol. 3, No. 6, pp. 701–711. DOI: 10.1049/iet-cta.2008.0259
2. Kuo T. C. Trajectory control of a robotic manipulator utilizing an adaptive fuzzy sliding mode, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, Vol. 65, pp. 913–917.
3. Yan R., Tee K., Li H. Z. Adaptive learning tracking control of robotic manipulators with uncertainties, *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, Vol. 8, No. 2, pp. 160–165. DOI: 10.1007/s11768-010-0010-2
4. Mohanty A., Yao B. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, Vol. 19, No. 3, pp. 567–575. DOI:10.1109/TCST.2010.2048569
5. Sun T., Pei H., Pan Y., Zhou H., Zhang C. Neural network-based sliding mode adaptive control for robot manipulators, *Neurocomputing*, 2011, Vol. 74, No. 14, pp. 2377–2384. DOI: 10.1016/j.neucom.2011.03.015
6. Piltan F., Sulaiman N., Allahdadi S., Dialame M., Zare A. Position control of robot manipulator: design a novel SISO adaptive sliding mode fuzzy PD fuzzy sliding mode control, *International Journal of Artificial Intelligence and Expert System*, 2011, Vol. 2, No. 5, pp. 208–228.
7. Yang Z. J., Fukushima Y., Qin P. Decentralized adaptive robust control of robot manipulators using disturbance observers, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, Vol. 20, No. 5, pp. 1357–1365. DOI: 10.1109/TCST.2011.2164076
8. Kolhe J. P., Shaheed M., Chandar T. S., Talole S. E. Robust control of robot manipulators based on uncertainty and disturbance estimation, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2013, Vol. 23, No. 1, pp. 104–122. DOI: 10.1002/rnc.1823
9. Abbaszadeh E., Haddad-Zarif M. Control of robot manipulator with uncertain dynamics by adaptive fuzzy controller, *Journal of Intelligent Automation Systems*, 2014, [Electronic resource], Access mode: http://jias.shahroodut.ac.ir/article_225_0.html.
10. Chen Y., Ma G. Y., Lin S. X., Gao J. Adaptive fuzzy computed-torque control for robot manipulator with uncertain dynamics, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, Vol. 9, pp. 201–209. DOI: 10.5772/54643
11. Aho L., Vidal Y., Francesc P. editor A.D. Rodi. Computed-torque-plus-compensation-plus-chattering controller of robot manipulators, *Contemporary Robotics – Challenges and Solutions; InTech*, 2009, [Electronic resource], Access mode: <http://www.intechopen.com/books/contemporary-robotics-challenges-and-solutions/computed-torque-plus-compensation-plus-chattering-controller-of-robot-manipulators>
12. Kelly R., Santibanez V., Loria A. Control of Robot Manipulators in Joint Space. Springer, 2005, 452 p.
13. Springer handbook of robotics. [eds. B. Siciliano, O. Khatib], Springer, 2008, 1611 p.
14. Nguyen-Tuong D., Seeger M., Peters J. Computed torque control with nonparametric regression models, *American Control Conference*. Seattle, USA 11–13 June 2008, proceedings, IEEE, 2008, pp. 212–217. DOI: 10.1109/ACC.2008.4586493
15. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: modelling, planning and control. Springer, 2009, 632 p.
16. Chen Y. Ma G., Lin S., Gao J. Adaptive fuzzy and robust H_∞ compensation control for uncertain robot, *International Journal of Robotics and Automation*, 2013, Vol. 2, No. 4, pp. 174–188. DOI: 10.11591/ijra.v2i4.2763
17. Chen Y. Mei G., Ma G., Lin S., Gao J. Robust adaptive inverse dynamics control for uncertain robot manipulator, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2014, Vol. 10, No. 2, pp. 575–587.
18. Piltan F., Sulaiman N., Jalali A., Narouei F. D. Design of model free adaptive fuzzy computed torque controller: applied to nonlinear second order system, *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, Vol. 2, No. 4, pp. 232–244.
19. Piltan F., Keshavarz M., Badri A., Zargari A. Design novel nonlinear controller applied to robot manipulator: design new feedback linearization fuzzy controller with minimum rule base tuning method, *International Journal of Robotics and Automation*, 2012, Vol. 3, No. 1, pp. 1–18.
20. Kuncевич V. M. Управління в умовах неопределенності: гарантовані результати в задачах управління і ідентифікації: монографія, Київ, Nauk. dumka, 2006, 264 p.
21. Kurzhanski A. B., Varaiya P. Optimization of output feedback control under set-membership uncertainty, *Journal of optimization theory and applications*, 2011, Vol. 151, No. 1, pp. 11–32. DOI: 10.1007/s10957-011-9861-z
22. Kurzhanski A. B., Tochilin P. A. Output feedback guaranteed tracking control through finite observers, *Conference on Decision and Control, 52nd international conference*, Florence, Italy, 10–13 December: proceedings, IEEE, 2013, pp. 4448–4453. DOI: 10.1109/CDC.2013.6760574
23. Gurko A. G., Kolodjazhnyj V. M. Оценіваніе вектора состоіанія динаміческој системы в условиях не-определенности, *Кібернетика і системні аналіз*, 2013, No. 6, pp. 23–31.
24. Gurko A. G., Eremenko I. F. Управління дискретної системи при обмежених впливах, *Проблеми управління і інформатики*, 2011, No. 6, pp. 1–11.