

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ



Международный журнал
Входит в Перечень ВАК

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д.т.н., проф. В.Б. Авдеев, Л.П. Андрианова, к.пед.н., проф. Г.Н. Арсеньев, д.т.н. К.Ю. Гаврилов,
д.т.н. С.Г. Капустян, Prof., Dr.sc. Dr.mult.h.c., President of DAAAM International, TU Wien, Austria B. Katalinic,
д.т.н., проф. А.М. Краснов, д.т.н., проф. А.П. Кирсанов, д.т.н., проф. А.И. Логвин, д.т.н., проф. В.И. Меркулов,
д.т.н., проф. В.Н. Минаев, д.т.н., проф. А.И. Николаев, д.т.н., проф. В.Е. Пряничников, д.т.н.,
проф. С.И. Почуев, к.т.н., проф. О.Ф. Самарин, д.т.н., проф. В.А. Сарычев, д.т.н., проф. В.В. Соломенцев,
д.т.н., проф. Е.М. Сухарев, д.т.н., проф. Г.В. Рыбина, д.т.н., проф. В.Н. Татаринов, д.т.н.,
проф. Б.Г. Татарский (зам. главного редактора), д.т.н., проф. В.П. Харьков, д.т.н., проф. С.П. Хрипунов, д.т.н.,
проф. К.В. Черевков, Prof., Rector of the Zadar University, Croatia A. Uglesic

Главный
редактор
докт. техн. наук,
проф.
В. С. Верба

В НОМЕРЕ:

Международная научная школа «Интеллектуальная роботроника»*

**Научные и инженерные проблемы интеллектуализации и автоматизации
в машиностроении и робототехнике**

Содержание

№ 4, т. 11, 2013 г.

Интеллектуальные и адаптивные роботы

Синергетический эффект создания научных школ –
основные направления «Интеллектуальной роботоники»

3

БИОНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

Биологически адекватные принципы управления экзоскелетом руки человека
Фролов А.А., Бирюкова Е.В., Бобров П.Д., Платонов А.К., Пряничников В.Е.

7

Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа
многостепенного манипулятора по произвольной траектории

Филаретов В.Ф., Губанков А.С.

19

Разработка метода синтеза системы аккомодации к дефектам в электроприводах манипуляционных роботов

Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А.

26

Сценарии и программы бионических сборочных систем, моделируемых с использованием роботов АМУР

Branko Katalinic, Paulina Cesarec, Roman Kettler, Пряничников В.Е.

34

* По решению редакционной коллегии журнала «Информационно-измерительные и управляющие системы» материалы взяты из журнала «Интеллектуальные и адаптивные роботы» (главный редактор – д.т.н., директор Международной лаборатории «Сенсорика» В.Е. Пряничников).

УДК 621.865.8

Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории

© Авторы, 2013

В. Ф. Филаретов*д.т.н., профессор, зав. лабораторией, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, зав. кафедрой «Автоматизация и управление», Дальневосточный федеральный университет***А. С. Губанков***ст. преподаватель, кафедра «Автоматизация и управление», Дальневосточный федеральный университет*

E-mail: gubankov@iacp.dvo.ru

Предложен метод формирования максимально высокой скорости движения схвата многозвенного манипулятора по пространственной траектории с учетом ограничений сигналов по току и входному напряжению его исполнительных приводов. Исследованы различные режимы работы синтезированной системы при отработке пространственных траекторий движения рабочего органа, имеющих различную кривизну.

Ключевые слова: предельная скорость, многостепенный манипулятор, ограничение, адаптивная система, точность.

In a paper the forming method of maximum speed on a space trajectory of multilink manipulator gripper is offered. It takes into account restrictions of current and input voltage of actuators. Various modes of work of the synthesized system are researched at spatial trajectories having various curvature.

Keywords: maximum velocity, multilink manipulator, restriction, adaptive control system, accuracy.

Введение

Для увеличения производительности робототехнического оборудования, содержащего многостепенные манипуляторы (ММ), необходимо, чтобы все технологические операции выполнялись с предельно высокой скоростью, но при этом качество выполняемых операций должно оставаться на требуемом уровне. В настоящее время разработано большое количество методов синтеза систем управления (СУ) пространственным движением ММ [1–3]. Для повышения динамической точности управления ММ эти СУ (комбинированные, робастные, адаптивные, самонастраивающиеся) используют весьма сложные регуляторы, включающие глобальные, локальные и адаптивные каналы управления. Кроме того, эти СУ могут обеспечить указанным объектам высокую динамическую точность при быстром перемещении по всем участкам сложных пространственных траекторий (особенно с большой кривизной) только при условии, что все приводные механизмы обладают достаточным ресурсом мощности, т.е. способны отработать сигнал любого программного движения ММ и одновременно компенсировать возникающие негативные эффекты динамического взаимовлияния между всеми его степенями подвижности без входа в насыщения.

Если хотя бы один из приводов ММ входит в режим насыщения, то рабочий инструмент (РИ) ММ сходит с задаваемой траектории, приводя к браку или даже к возникновению аварийной ситуации. Для устранения указанной ситуации при использовании традиционных СУ приходится снижать программную скорость движения РИ ММ по заданным траекториям, уменьшая производительность его работы даже в тех случаях, когда все его приводы еще имеют значительный запас мощности для управления.

В работе [4] рассмотрен метод синтеза оптимального по быстродействию электропривода постоянного тока при ограничении на потребляемую мощность. Однако использование этого метода для ММ вызывает затруднения при получении в аналитическом виде требуемых законов управления ввиду сложных нелинейных преобразований, необходимых при использовании абсолютной системой координат (СК), в которой перемещается схват. Более того, полученный закон управления обеспечивает минимальную длительность переходного процесса только при ступенчатых входных сигналах, которые не используются при контурном управлении ММ.

В работе [5] также рассматриваются оптимальные по быстродействию СУ электромеханическими ММ, обеспечивающие движение их РИ вдоль заданных траекторий с максимально возможной скоростью, определяемой кинематической схемой этого ММ, а также видом задаваемой траектории. Однако высокая трудоемкость данного метода, видимо, не позволит обеспечить его эффективное использование в реальном масштабе времени для сложных ММ с числом степеней подвижности больше двух.

В работе [6] предложен метод синтеза СУ режимом движения РИ ММ, которая автоматически формирует максимально возможную текущую скорость его перемещения вдоль траектории с заданной динамической точностью. Однако эта система лишь косвенно может учитывать возможный вход в насыщение отдельных электроприводов ММ, а определение отклонения РИ от траектории является довольно сложной задачей.

Таким образом, задача формирования скорости движения РИ ММ по траектории с целью повышения производительности его работы с учетом возможного входа его отдельных электроприводов в насыщение является актуальной и все еще нерешенной.

Цель работы: создание и исследование адаптивной системы формирования предельно возможной программной скорости движения РИ ММ вдоль заданной пространственной траектории с учетом ограничения сигналов по току и входному напряжению всех его электроприводов.

Описание адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора

Задачей разрабатываемой адаптивной СУ является обеспечение предельно быстрого движения РИ ММ по задаваемой траектории, при котором ни один из его электроприводов не входит в насыщение или в зону существенной нелинейности, сохраняя высокую динамическую точность управления. Это означает, что предельно быстрое движение ММ по произвольной пространственной траектории с помощью специальной СУ, формирующей режим его перемещения, должно поддерживаться таким, при котором один или несколько его электроприводов постоянно будут находиться на конечных участках их линейных зон в преднасыщенном состоянии. При этом заданная динамическая точность управления указанным движением ММ в целом будет определяться качеством СУ электроприводов каждой его степени подвижности, работающих в их линейных зонах.

На рис. 1 показана обобщенная схема управления ММ, содержащая контур формирования скорости движения РИ по предписанной траектории и СУ электроприводами каждой степени подвижности ММ: V_0 , V^* – начальная и формируемая скорость движения РИ ММ; БФТ – блок формирования траектории движения РИ с учетом текущего значения V^* (подробное описание работы этого блока дано в работах [6, 7]); x^* , y^* , z^* – программные значения положения РИ ММ в декартовой СК; ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики, формирующий программные значения q_j^* входных сигналов для всех электроприводов ЭП_j ММ; СР_j – самонастраивающиеся регуляторы; Р_j – типовые регуляторы; У_j – усилители; p – символ дифференцирования; q_j – обобщенные координаты ММ; ε_j – ошибки следящих электроприводов; u_j – сигналы на входах соответствующих усилителей; i_j – сила токов якорной цепи электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами или с независи-

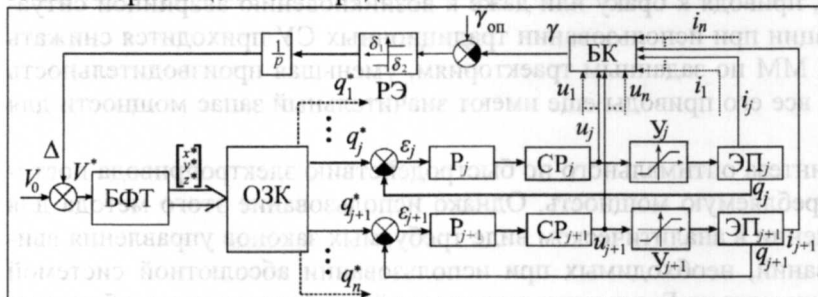


Рис. 1. Схема адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения РИ ММ

мым возбуждением; БК – блок выбора критерия оценки; γ – безразмерный сигнал на выходе БК; δ_1 , δ_2 – пороговые значения релейного элемента РЭ; Δ – приращение скорости движения РИ ММ; $\gamma_{оп}$ – опорное значение; $j = \overline{1, n}$; n – число степеней подвижности ММ.

При движении РИ ММ по задаваемой пространственной траек-

тории допустимая величина результирующей динамической ошибки этого движения обеспечивается введением в прямую цепь каждого электропривода ММ двух регуляторов P_j и CP_j с учетом того, что все электроприводы работают в их линейной зоне без входа в насыщение. При этом самонастраивающиеся регуляторы CP_j стабилизируют параметры указанных электроприводов на номинальном уровне [1], а типовые регуляторы P_j , параметры которых рассчитываются традиционными методами [8], обеспечивают заданную динамическую точность работы соответствующих электроприводов.

Пока все электроприводы ММ работают в линейной зоне, выполняется условие $|\gamma_{оп}| > |\gamma|$, и разность $\gamma_{оп} - \gamma$ положительна. В этом случае (согласно схеме на рис. 1) скорость движения РИ ММ по предписанной траектории будет увеличиваться с постоянным ускорением δ_1 . Если некоторые входные сигналы БК (u_j или i_j) начнут превышать установленные для них пороговые значения, за которыми начинают проявляться зоны значительных нелинейностей электродвигателей или даже зоны их насыщения, то начинает выполняться условие $|\gamma_{оп}| < |\gamma|$, и разность $\gamma_{оп} - \gamma$ становится отрицательной. В этом случае скорость движения РИ ММ по траектории начнет снижаться с постоянным ускорением δ_2 , повышая тем самым динамическую точность управления ММ. Значения δ_1 и δ_2 зависят от динамических свойств электроприводов ММ, а также от используемых СУ и подбираются посредством моделирования.

Исследования показали, что для работы всех электроприводов ММ в их линейной зоне при перемещении РИ по траекториям с малой кривизной достаточно формировать γ (см. рис. 1) в виде

$$\gamma = \max(|u_1|, \dots, |u_j|, \dots, |u_n|), \quad (1)$$

т.е. использовать информацию только о величинах напряжений $u_1, \dots, u_n$, подаваемых на входы соответствующих усилителей. При этом происходит выбор самого нагруженного электропривода ММ и определяется предельно возможная скорость движения РИ по траектории с сохранением заданного уровня динамической ошибки. Если же пространственная траектория движения имеет существенную кривизну, то сигнал γ следует формировать на основе измерений силы токов $i_1, \dots, i_n$ в якорных цепях всех электроприводов ММ:

$$\gamma = \max(|i_1|, \dots, |i_j|, \dots, |i_n|). \quad (2)$$

Это объясняется тем, что сила тока в якоре i_j в отличие от напряжения u_j является более информативным сигналом, поскольку он формируется с учетом противоЭДС и пропорционален текущей скорости вращения электропривода. Кроме того, он пропорционален развиваемому электроприводом моменту, а значит и ускорению вращения ротора электродвигателя. При использовании выражения (2) система начинает быстрее снижать скорость движения РИ ММ при подходе к участкам траектории с большой кривизной. Величина кривизны отдельных участков траектории, определяющая целесообразность использования выражения (1) или (2), зависит от кинематических характеристик ММ и требований к динамической точности движения РИ.

Однако, как показали исследования, существует большое количество траекторий, при движении по которым для обеспечения работы всех электроприводов ММ в их линейных зонах информации только о напряжении $u_1, \dots, u_n$ или только о силе тока $i_1, \dots, i_n$ недостаточно. В этом случае сигнал γ следует формировать по закону:

$$\gamma = K_1 \max(|u_1|, \dots, |u_j|, \dots, |u_n|) + K_2 \max(|i_1|, \dots, |i_j|, \dots, |i_n|), \quad (3)$$

где K_1 и K_2 – некоторые положительные весовые коэффициенты, значения которых определяются в процессе моделирования или экспериментально. Результаты исследований показали, что при выборе γ в виде (1) или (2), величина $\gamma_{оп}$, как правило, выбирается примерно на 20% меньше максимально допустимого значения $|u_j|$ или $|i_j|$, при которых работа всех электроприводов ММ еще осуществляется в их линейных зонах ($j = \overline{1, n}$), а при выборе γ в виде (3) величина $\gamma_{оп}$ может уменьшаться на 20...30 % по сравнению с указанными максимально допустимыми значениями $|u_j|$ или $|i_j|$.

Таким образом, построенная адаптивная система формирования скорости (рис. 1) должна обеспечивать перемещение РИ ММ по произвольным гладким траекториям на предельно возможной скорости с заданной динамической точностью, которая обеспечивается с помощью типовых корректирующими устройствами за счет формирования таких программных сигналов, подаваемых на входы каждого канала управления электроприводами ММ, которые обеспечивают предельно напряженную работу одного или нескольких из этих электроприводов, удерживая эти и остальные электроприводы ММ в линейных зонах их работы без входа в насыщение.

Исследование адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора

Исследование разрабатываемой адаптивной системы проводилось с использованием ММ типа PUMA, показанного на рис. 2. При этом учитывались только его переносные степени подвижности. Здесь использованы следующие обозначения и заданы следующие параметры: $Oxyz$ – декартова система координат; S – формируемая траектория; $l_1 = l_2 = l_3 = 0,5$ м – длина звеньев ММ; $m_1 = 5$ кг, $m_2 = 25$ кг, $m_3 = 15$ кг – соответственно массы груза и его звеньев; $J_{s1} = 0,1$ кг·м², $J_{s2} = 0,007$ кг·м², $J_{s3} = 0,005$ кг·м² – моменты инерции этих звеньев относительно их продольных осей; $j_{n2} = 0,14$ кг·м², $j_{n3} = 0,2$ кг·м² – моменты инерции соответствующих звеньев относительно их центра масс, перпендикулярных продольным осям.

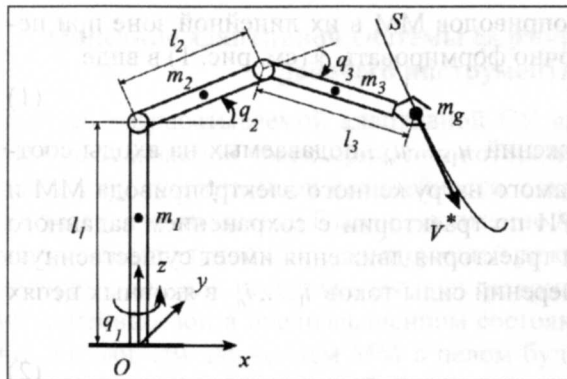


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора типа PUMA

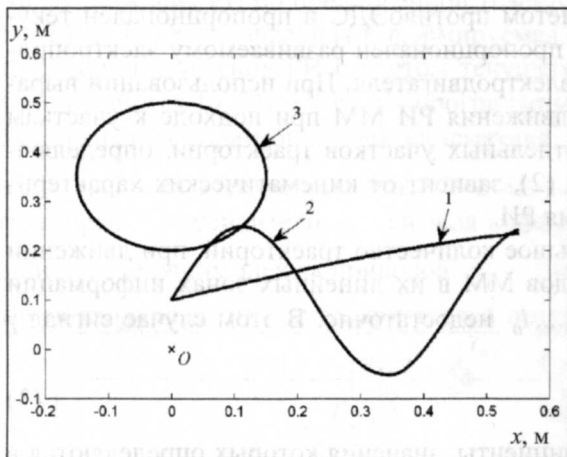


Рис. 3. Траектории движения РИ ММ

Рассмотрим движение РИ ММ по траектории с малой кривизной (см. кривую 1 на рис. 3), когда сигнал y формируется с использованием выражения (1), а $u_{оп} = 21$ В. Из рис. 4 видно, что один из электроприводов манипулятора все время находится в преднасыщенном состоянии при этом движении ММ, обеспечивая максимально допустимую скорость перемещения РИ: вначале первый (u_1), затем второй (u_2) и, наконец, третий (u_3).

В качестве исполнительных элементов ММ были выбраны три одинаковых электропривода постоянного тока со следующими параметрами: $R = 0,5$ Ом – активное сопротивление якорной цепи; $L = 0,0005$ Гн – индуктивность якорной цепи; $K_{\omega} = 0,04$ В·с – коэффициент противоЭДС; $K_M = 0,04$ Н·м/А – моментный коэффициент; $J = 10^{-3}$ кг·м² – моменты инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора; $i_p = 100$ – передаточное отношение редуктора; $K_y = 800$ – коэффициент усиления усилителя мощности; $u_{max} = \pm 27$ В – ограничение по входному напряжению. В системе на рис. 1 $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = -1$.

Передаточные функции всех регуляторов P_j ($j = 1, 3$) имеют вид

$$W_{pj}(p) = \frac{(0,128p + 1)(0,189p + 1)}{(0,0125p + 1)(0,87p + 1)},$$

а схемы соответствующих CP_j ($j = 1, 3$) даны и детально описаны в работах [9–11].

На рис. 3: 1 и 2 – траектории, описываемые выражениями $y(x) = 0,15\sin(2x) + 0,1$, $y(x) = 0,15\sin(14x) + 0,1$ соответственно; 3 – круговая траектория радиусом 0,15 м, по которой движется РИ ММ (рис. 2). Основание ММ имеет координаты $O(0; 0)$.

На рис. 5 показаны процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при перемещении РИ по траектории 1. Здесь и далее используются следующие масштабы: $V^* = \text{scale } 1 \text{ м/с}$; $y^* = \text{scale } 1 \text{ м}$; $x^* = \text{scale } 1 \text{ м}$; $\varepsilon_{\text{дин}} = \text{scale } 0,0025 \text{ м}$. Из этого рисунка видно, что скорость V^* движения РИ ММ по этой траектории вначале возрастает до 1,1 м/с, а затем уменьшается для сохранения требуемого уровня динамической ошибки $\varepsilon_{\text{дин}}$ РИ, которая не превышает 2 мм. При этом отклонение РИ от указанной траектории не превышает 1 мм.

Максимальная постоянная скорость, при которой РИ ММ может пройти по траектории 1 без резкого возрастания динамической ошибки, превышающей 2 мм, за счет входа его движителей в насыщение, составляет всего 0,37 м/с. В результате разработанная адаптивная система, формирующая сигнал y в соответствии с выражением (1), позволяет в 1,96 раза уменьшить время выполнения указанного движения.

На рис. 6 и 7 дана зависимость силы тока в соответствующих электродвигателях ММ от времени и процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при движении РИ по той же траектории 1, но при формировании сигнал y уже в соответствии с выражением (2).

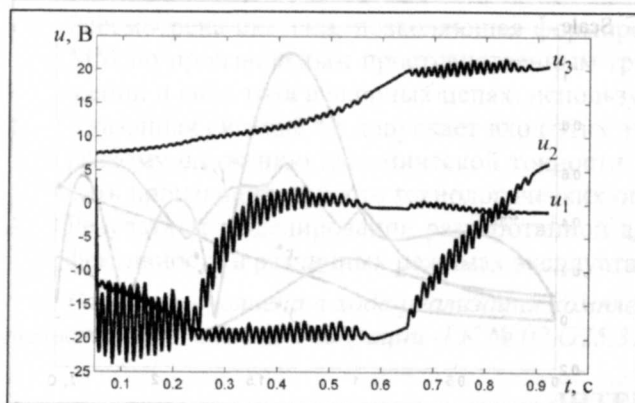


Рис. 4. Входы напряжения электродвигателей манипулятора

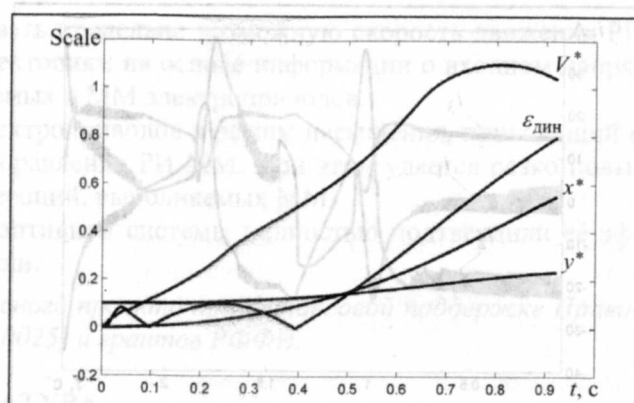


Рис. 5. Процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при определении y по выражению (1)

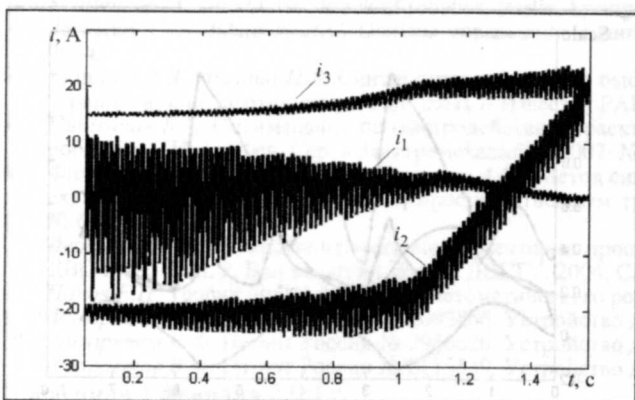


Рис. 6. Графики зависимости силы тока в якорных цепях электродвигателей ММ от времени

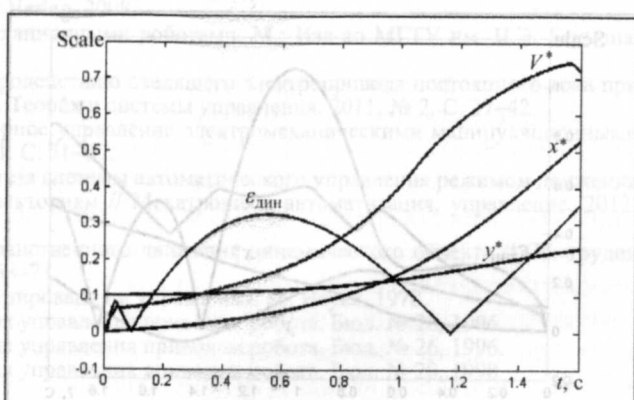


Рис. 7. Процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при определении y по выражению (2)

Из рис. 6 видно, что сила тока во всех электродвигателях ММ не превышает заданное опорное значение $i_{\text{оп}} = 20 \text{ А}$, при этом в преднасыщенном состоянии находится вначале второй i_2 , а потом третий i_3 электродвигатель. Высокочастотные колебания силы тока создаются за счет использования СР₁. Из рис. 7 видно, что в данной системе максимальная скорость движения РИ по траектории становится в 1,47 раза меньше по сравнению с первой системой, а общее время выполнения всего движения в 1,68 раза больше. Однако величина $\varepsilon_{\text{дин}}$ за все время работы в отличие от прежней системы не превышает 0,8 мм.

Уменьшение скорости движения РИ ММ по траектории при формировании γ в соответствии с выражением (2) объясняется тем, что в сигналах тока содержится информация о внешнем моменте на каждый электропривод, а он увеличивается (в данном примере для второго электропривода) по мере раскладывания исполнительного органа манипулятора в процессе его движения (см. траекторию 1 на рис. 3).

На рис. 8 и 9 дана зависимость силы тока в электродвигателях ММ от времени и показаны процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при движении РИ ММ по траектории 2 (см. рис. 3), если γ определяется по выражению (2).

Из рис. 8 видно, что адаптивная система за счет подстройки скорости постоянно поддерживает один из электроприводов в преднасыщенном состоянии. Наблюдаемые кратковременные всплески токов объясняются наличием перегибов на траектории и, как следствие, сменой знака скорости в соответствующих степенях подвижности ММ. Однако для электродвигателей постоянного тока кратковременное двукратное превышение номинального значения тока является вполне допустимым. При этом максимальное значение $\varepsilon_{\text{дин}}$ для указанного сложного движения РИ менее 3 мм на скорости 0,6 м/с.

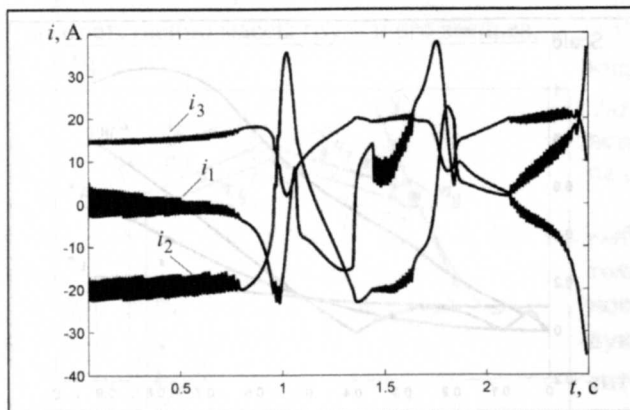


Рис. 8. Графики зависимости силы тока в электроприводах манипулятора от времени

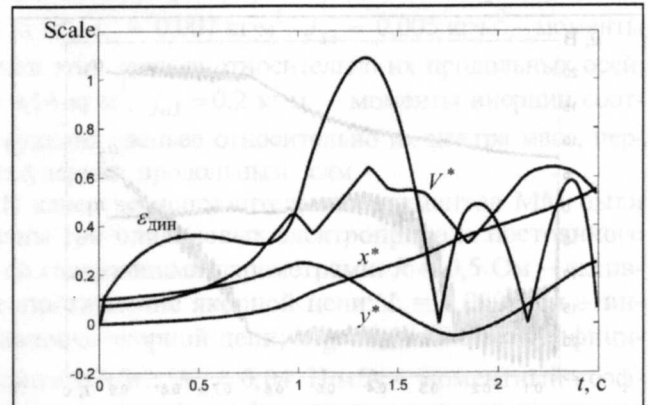


Рис. 9. Процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при определении γ по выражению (2)

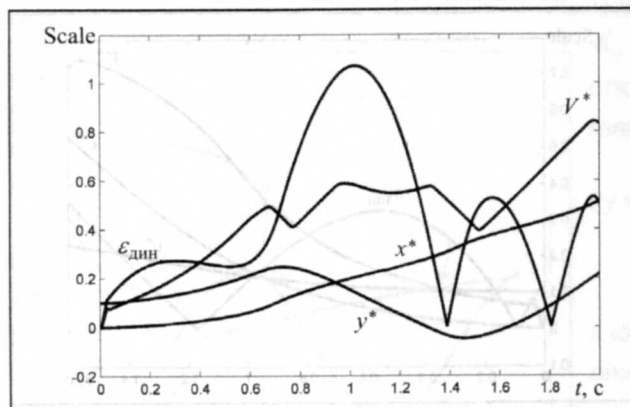


Рис. 10. Процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при определении γ по выражению (3) и движении РИ по гармонической траектории

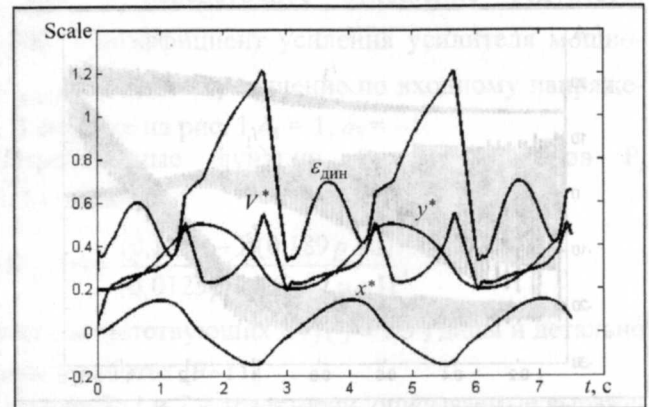


Рис. 11. Процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при определении γ по выражению (3) и движении РИ по круговой траектории

На рис. 10 показаны процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при движении РИ ММ по гармонической траектории 2 (см. рис. 3), но при задании сигнала γ в виде (3). При этом $\gamma_{\text{оп}} = 40$, а коэффициенты в выражении (3) равны $K_1 = 2$, $K_2 = 1$. Из рис. 9 и 10 видно, что при практически одинаковом уровне $\varepsilon_{\text{дин}}$ учет входных напряжений электроприводов позволяет увеличить максимальную скорость движения РИ в 1,37 раза, что по сравнению с ранее рассмотренной системой, настраиваемой только по

тока, повышает производительность работы ММ на 25%. В целом же, по сравнению с системой, работающей с постоянной V^* и с тем же предельным значением $\varepsilon_{\text{дин}}$, время движения по траектории 2 уменьшается в 2,4 раза.

На рис. 11 показаны процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при движении РИ ММ по круговой траектории 3 (см. рис 3) в адаптивной системе (см. рис. 1) при задании сигнала y в виде (3). Эта система, как и в предыдущем случае, работает на 27 % быстрее системы, использующей при настройке V^* сигнал y вида (2). А ее производительность по сравнению с системой, работающей на постоянной скорости, повышается в 2,55 раза.

Следует отметить, что за счет выбора параметров $\gamma_{\text{оп}}$, K_1 и K_2 можно получать различные сочетания V^* и $\varepsilon_{\text{дин}}$. При этом уменьшение $\varepsilon_{\text{дин}}$ можно получить и за счет введения в следящие системы всех электроприводов ММ более качественных регуляторов.

Заключение

1. Рассмотрена система, позволяющая формировать предельно возможную скорость движения РИ ММ по произвольным пространственным траекториям на основе информации о входном напряжении и силе тока в якорных цепях, используемых в ММ электроприводах.
2. Указанная система не допускает вход этих электроприводов в режим насыщения, приводящий к резкому снижению динамической точности управления РИ ММ. При этом удается резко повысить производительность технологических операций, выполняемых ММ.
3. Результаты моделирования разработанной адаптивной системы полностью подтвердили ее эффективность в различных режимах эксплуатации.

Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (ГК № 02.G25.31.0025) и грантов РФФИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2000.
2. Siciliano B., Khatib O. Handbook of robotics. Berlin. Springer Verlag. 2008.
3. Зенкевич С.Л., Юценко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.
4. Моржов А.В., Фалдин Н.В. Синтез оптимального по быстродействию следящего электропривода постоянного тока при ограничении на потребляемую мощность // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 2. С. 27–42.
5. Пилюхов В.Х. Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Изв. вузов. Сер. «Электромеханика». 2007. № 1. С. 51–57.
6. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Конопкин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47–54.
7. Лебедев А.В. Формирование желаемой траектории пространственного движения динамического объекта // Сб. трудов ДВО РАН. Вып. 9. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2004. С. 68–71.
8. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М: Наука. 1978.
9. Филаретов В.Ф. Патент России № 2063866. Устройство для управления приводом робота. Бюл. № 20, 1996.
10. Филаретов В.Ф. Патент России № 2066626. Устройство для управления приводом робота. Бюл. № 26, 1996.
11. Филаретов В.Ф. Патент России № 2115539. Устройство для управления приводом робота. Бюл. № 20, 1998.

Поступила 1 февраля 2013 г.

Formation of extremely high-speed motion of the effector of a multi-joint manipulator by arbitrary trajectory

© Authors, 2013

V. F. Filaretov, A. S. Gubankov

In a paper the forming method of maximum speed on a space trajectory of multilink manipulator gripper is offered. It takes into account restrictions of current and input voltage of actuators. Various modes of work of the synthesized system are researched at spatial trajectories having various curvature.