

На правах рукописи

ГУБАНКОВ Антон Сергеевич

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРАМИ С
МАКСИМАЛЬНЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Владивосток – 2015

Работа выполнена в лаборатории робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Научный руководитель: Филаретов Владимир Федорович,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный
изобретатель РФ, заведующий лабораторией
робототехнических систем ИАПУ ДВО РАН,
г. Владивосток

Официальные оппоненты: Стажков Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной механики,
автоматики и управления, Балтийский
государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург

Костенко Владимир Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий лабораторией исполнительных
устройств и систем телеуправления, Институт
проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН», г. Москва

Защита состоится «27» февраля 2015 г. в 10 часов на заседании
диссертационного совета Д 005.007.01 при Институте автоматизации и процессов
управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН и
на сайте <http://www.iacr.dvo.ru/russian/institute/dissertation/represent.html>

Автореферат разослан « » января 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.007.01,
к.т.н.



Н.Н. Петрунко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для увеличения производительности современного робототехнического оборудования, содержащего многостепенные манипуляторы (ММ), необходимо, чтобы все технологические операции (ТО) выполнялись с предельно высокими скоростями, но при этом качество выполняемых операций должно оставаться на требуемом уровне. На сегодняшний день в мире уже разработано большое количество методов синтеза систем управления (СУ) пространственным движением ММ. Значительный вклад в их создание и развитие внесли многие отечественные и зарубежные ученые (С.Л. Зенкевич, Е.И. Юревич, Ю.В. Подураев, П.Д. Крутько, М. Vukobratovic, М.Е. Kahn, В. Roth, J.E. Bobrow, K.G. Shin, N.D. McKay и др.). Для повышения динамической точности управления ММ эти СУ (комбинированные, робастные, адаптивные) используют сложные и дорогие регуляторы, включающие глобальные, локальные и адаптивные каналы управления. Однако, при повышении скорости движения объекта управления (ОУ) по заданным пространственным траекториям эти системы часто не обеспечивают требуемое качество управления, либо в некоторых случаях вообще становятся неработоспособными. Это происходит потому, что все реальные динамические системы ввиду их инерционности имеют падающие амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Также вид траектории движения рабочего инструмента (РИ) на повышенной скорости его движения существенно влияет на динамическую точность управления. И, наконец, на предельных скоростях движения существующие системы могут обеспечивать указанным ОУ высокую динамическую точность управления на всех участках отслеживания сложных пространственных траекторий только при условии, что их приводные механизмы обладают достаточным ресурсом управления, т.е. способны отработать сигнал любого программного движения ММ и одновременно компенсировать возникающие негативные эффекты динамического взаимовлияния между соответствующими степенями подвижности и каналами управления без выхода их характеристик за ограничения по току или входному напряжению. Если же хотя бы один из приводов ММ входит в режим насыщения, то РИ ММ неминуемо сходит с задаваемой траектории, приводя к браку или даже к возникновению аварийной ситуации. При использовании традиционных СУ для предотвращения аварий приходилось либо настраивать регуляторы в электроприводах ММ на самый нагруженный режим работы, ухудшая их инерционные характеристики, либо снижать программную скорость движения РИ, уменьшая производительность работы оборудования в целом даже в благоприятных условиях ее эксплуатации. В результате при внедрении ММ в производство неминуемо возникает задача формирования наиболее рациональной (желательно максимально возможной) скорости движения РИ ММ по предписанным пространственным траекториям с целью предельно

возможного повышения производительности работы робототехнического оборудования с учетом изменяющихся параметров ММ без снижения заданного качества выполняемых ТО с полным исключением возможного входа его отдельных электроприводов в насыщение.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка новых методов синтеза адаптивных СУ ММ, способных обеспечить выполнение с их помощью различных технологических операций на предельно возможных скоростях без снижения заданной динамической точности движения и с учетом возможного входа исполнительных электроприводов в насыщение.

Для успешного решения указанной выше проблемы были поставлены следующие задачи.

1. Разработать метод синтеза адаптивных систем формирования программных сигналов, которые обеспечивают движение манипуляторов с максимально возможной скоростью с учетом изменения параметров их исполнительных элементов и с сохранением заданной динамической точности.

2. Разработать метод синтеза легко реализуемых СУ ММ, которые в зависимости от текущего расположения обрабатываемых объектов должны формировать такие программные сигналы для всех исполнительных приводов, которые будут обеспечивать движение рабочих органов (РО) с максимально возможной скоростью и заданной динамической точностью, но при этом подход к объектам работ должен совершаться вообще без перерегулирования.

3. Разработать метод синтеза адаптивных систем формирования предельно возможных программных скоростей движения РО ММ вдоль заданных пространственных траекторий с учетом ограничения сигналов по току и входному напряжению всех исполнительных электроприводов.

Методы исследования. В процессе выполнения диссертации использовались методы теории автоматического управления, дифференциальных уравнений, теоретической механики, а также методы численного моделирования разработанных систем управления.

Научная новизна.

1. Предложен и обоснован новый метод синтеза адаптивных систем управления, которые за счет настройки частоты входного сигнала на основе АЧХ ОУ с переменными параметрами способны поддерживать максимально возможную скорость движения объекта без снижения заданной динамической точности управления.

2. Для электроприводов ММ разработан метод формирования задающих воздействий в виде частей гармонических сигналов с автоматически настраиваемой частотой, что позволяет обеспечить движение РО с максимальной средней скоростью и плавный подход к объектам работ с учетом их текущего расположения в рабочей области.

3. Предложен метод непрерывной подстройки скорости движения РО ММ по заданным пространственным траекториям до ее предельно возможной величины, определяемой непосредственно в процессе управления (на основе информации о текущих значениях токов и напряжений на входах электродвигателей) из условия постоянного нахождения одного или нескольких исполнительных электроприводов на конечных участках их линейных зон в преднасыщенном состоянии.

Практическая значимость и реализация результатов работы. На основе разработанных в диссертации методов могут создаваться легко реализуемые адаптивные СУ исполнительными электроприводами ММ, формирующие такие входные сигналы, параметры которых непрерывно подстраиваются по мере изменения параметров ОУ, обеспечивая максимально возможную скорость их движения без снижения заданной динамической точности управления и учитывая возможные выходы отдельных усилительных и исполнительных элементов на ограничения.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при выполнении научно-исследовательских работ кафедрой «Автоматизации и управления» Дальневосточного федерального университета в рамках государственных контрактов с Министерством образования и науки РФ № 02.G25.31.0025 от 12.02.2013 г. и № 07.514.11.4062 от 12 октября 2011 г., а также в учебном процессе ДВФУ (при подготовке магистров по направлению 221000.68 «Мехатроника и робототехника»). Эти результаты также используются в ОАО «Дальприбор» (г. Владивосток) при выполнении операций зачистки изделий.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются корректным применением используемых методов исследования, результатами численного моделирования и эксперимента. Результаты исследования соответствуют основным общепринятым теоретическим и практическим положениям.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 6-ой Дальневосточной конф. студентов и аспирантов по математическому моделированию (Владивосток, 2007 г.), 7-ом международном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых стран АТР (Владивосток, 2007 г.), научных конф. «Вологдинские чтения» (Владивосток, 2007, 2008 и 2010 гг.), 20th и 23rd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education" (Вена, Австрия, 2009 г., Задар, Хорватия, 2012 г.), международной научно-технической конф.: «Мехатроника, автоматизация и управление» (Дивноморское, 2009 г.), 2-й Всероссийской конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2009 г.), 1st Joint Int. Conf. on Multibody System Dynamics (Лаппеенранта, Финляндия, 2010 г.), Всероссийском конкурсе «Вертолеты XXI века» (Москва, 2011 г.), 4-ой Всероссийской мультikonф. по проблемам управления (Дивноморское, 2011 г.),

международной научно-технической конф. «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2011 г.), 3rd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Шэнчжэнь, Китай, 2011 г.), Национальной научно-технической конф. (Москва, 2011 г.), Всероссийской открытой конкурсе-выставке «Исследователь будущего» (Владивосток, 2012 г.), Пятой традиционной школе-семинаре «Управление, информация и оптимизация» (Солнечногорск, 2013 г.), XV Международной конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2013 г.) и на расширенном семинаре лаборатории робототехнических систем ИАПУ ДВО РАН (Владивосток, 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, и 4 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований. Основное содержание работы изложено на 107 страницах машинописного текста. Работа содержит 42 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки адаптивных систем управления ММ с максимальным быстродействием, определены цели и задачи исследования, дано общее содержание диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ систем формирования скоростей движения РИ ММ при их перемещении по заданным пространственным траекториям. Было выявлено, что одним из наиболее распространенных подходов решения этой задачи является использование различного профиля скорости. Однако, не смотря на простоту и широкую распространенность, при использовании этого подхода возникают трудности с подстройкой скорости движения РО ММ в различных режимах их эксплуатации.

Другим распространенным подходом выбора скорости движения РО ММ является использование оптимальных по быстродействию СУ электроприводами. Этот подход позволяет учитывать ограничения на управляющие моменты электроприводов, но их динамикой пренебрегается. Более того, использование этого подхода сопряжено с существенными вычислительными затратами уже на этапе планирования траекторий движения РО, что не позволяет использовать его для управления ММ в реальном масштабе времени в ходе выполнения реальных операций.

На основе результатов детального анализа особенностей и недостатков известных подходов и методов решения обозначенной задачи в последнем разделе первой главы конкретизирована цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена разработка метода синтеза легко реализуемых адаптивных систем управления, которые в зависимости от текущих значений непрерывно изменяющихся параметров ОУ с

использованием их АЧХ могут поддерживать максимально возможную скорость работы технологического оборудования (выполнения технологических операций) без снижения заданной динамической точности управления. Поскольку в процессе выполнения различных технологических операций часто возникают ситуации, когда массо-инерционные характеристики (параметры) ОУ и режимы их движения изменяются в широких пределах, то при уменьшении нагрузки на исполнительные приводы ММ появляется возможность повышения скорости их работы без ухудшения динамической точности управления. Из линейной теории автоматического управления известно, что для перемещения объектов с некоторой рабочей амплитудой A_p , частотой ω_p и динамической ошибкой ε , не превышающей ε_d , необходимо, чтобы АЧХ $A(\omega)$ всей рассматриваемой системы на частоте $\omega_p = \omega_p^A$ не проходила ниже точки A с ординатой A_p / ε_d (см. рис. 1).

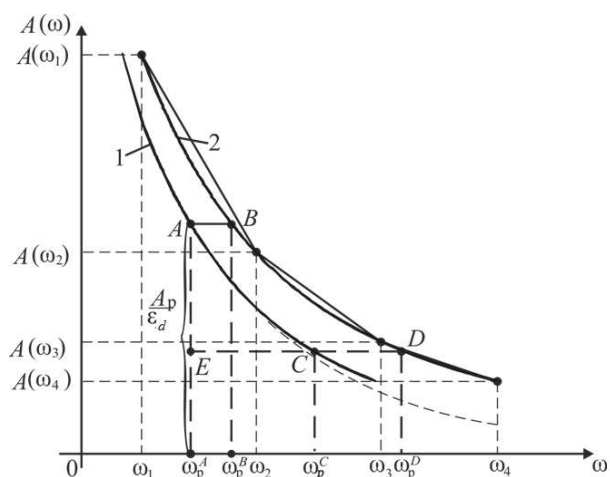


Рис. 1. АЧХ для различных значений параметров системы

Цифрами 1 и 2 на рис. 1 обозначены АЧХ при максимальном и минимальном значениях параметров нагрузки системы, соответственно. Из рис.1 видно, что, если величина параметра A_p уменьшается, то точка A смещается вниз и совпадает, например, с точкой E . В этом случае при неизменных параметрах ОУ, т.е. при неизменном виде АЧХ, при сохранении той же самой ε_d можно использовать уже новую

повышенную частоту ω_p^C гармонического входного сигнала, повышая скорость перемещения объекта и тем самым производительность работы всей системы в целом. Если же параметры ОУ изменяются таким образом, что АЧХ системы принимает вид кривой 2 на рис.1, а величина A_p не изменяется по сравнению с ее первоначальным значением, то без ухудшения динамической точности работы системы точка A может быть горизонтально перемещена в точку B на кривой 2. Очевидно, что в этом случае для увеличения скорости работы оборудования можно использовать повышенную частоту входного сигнала - ω_p^B . Если же величина A_p уменьшается, то точка E с учетом вида кривой 2 при сохранении заданной динамической точности управления может быть смещена уже в точку D . При этом частота гармонического входного сигнала может быть повышена уже до значения ω_p^D .

Разработка метода синтеза адаптивной системы управления выполнена на примере одностепенного манипулятора 1 (см. рис. 2), совершающего

колебательные движения накопителя деталей 2 с амплитудой A_p и частотой ω_p над движущейся транспортной лентой 3 с объектами 4, с которыми требуется выполнять некоторые ТО. При этом сами объекты могут располагаться на различном расстоянии Δy_j от центральной оси x транспортной ленты. РО манипулятора при подаче на вход его электропривода гармонического сигнала $\alpha^*(t) = A_{pj} \sin(\omega_{pj}t)$, $j = \overline{1, N}$ будет перемещаться с частотой ω_{pj} по дуге окружности, радиус которой l совпадает с длиной звена манипулятора, где N – количество объектов, установленных на транспортной ленте. Телекамера 5, находится над этой лентой и позволяет определять расположение очередного объекта на ней. Технологические операции со всеми объектами выполняются только в крайних положениях манипулятора, когда он отклоняется от оси x на угол $A_{pj} = \arcsin(\Delta y_j / l)$, а скорость движения его РО относительно объектов равна нулю. Транспортная лента начинает перемещаться на очередную дискретную величину $\Delta x_j = \Delta x_j^* + l(1 - \cos A_{pj})$ только после выполнения технологической операции с предыдущим объектом и затем останавливается в ожидании подхода РО манипулятора к вновь перемещенному объекту, расположенному уже на другой стороне относительно оси x .

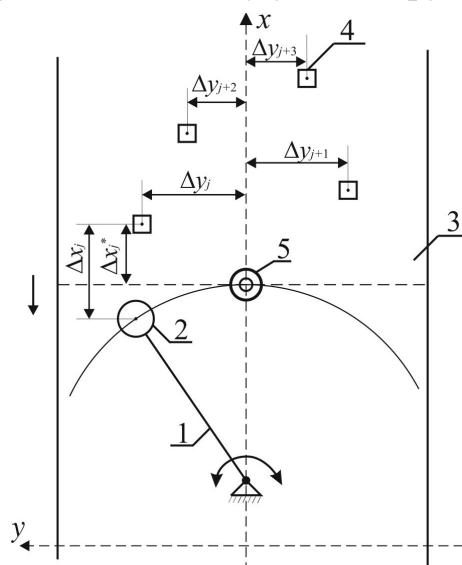


Рис. 2. Схема технологического процесса

В качестве исполнительных элементов для манипулятора 1 и ленты 3 (см. рис.2) используются электроприводы с электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. Уравнения электрической и механической цепей этих электродвигателей имеют вид:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_\omega \dot{\alpha} = K_y u, \quad (1)$$

$$M_d = J_\Sigma \ddot{\alpha} = K_m i,$$

где R , L – соответственно, активное сопротивление и индуктивность якорной цепи электродвигателя; K_m , K_ω – соответственно, коэффициенты крутящего момента и противоЭДС; K_y – коэффициент усиления усилителя мощности; u , i – соответственно, напряжение и ток в якорной цепи электродвигателя; M_d – момент, развиваемый электродвигателем; J_Σ – суммарный момент инерции, приведенный к валу электродвигателя; $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ – соответственно, скорость и ускорение вращения вала электродвигателя.

которая является касательной к АЧХ системы в точке с абсциссой ω_p^* (см. прямую 1 на рис. 3). Получив уравнение этой касательной, несложно определить абсциссу точки H с ординатой A_p/ε_d , всегда удовлетворяющую неравенству $\bar{\omega}_p < \omega_p^*$. Очевидно, что выбор $\bar{\omega}_p$ приведет к некоторому снижению быстродействия системы, но при этом всегда будет выполняться неравенство $\varepsilon \leq \varepsilon_d$. Исследования показали, что для реальных систем $\bar{\omega}_p$ в большинстве случаев находится вблизи ω_p .

При линейной аппроксимации всей АЧХ диапазон рабочих частот $[\omega_{min}; \omega_{max}]$ системы может быть разбит на k произвольных по величине отрезков в зависимости от величины этого диапазона и кривизны получаемой АЧХ. Исследования показали, что для многих систем вполне допустимо выбирать $k = 3$, а указанные отрезки частоты - равными. В результате по формуле (3) можно построить $A(\omega)$ (см. рис.1) для любого значения J_Σ системы (1), задаться четырьмя опорными точками ($\omega_1 = \omega_{min}$, $\omega_2 = \omega_{max}/3 + 2\omega_{min}/3$, $\omega_3 = 2\omega_{max}/3 + \omega_{min}/3$, $\omega_4 = \omega_{max}$) и, используя известную формулу прямой, проходящей через две точки, найти уравнения всех трех секущих. Далее из соответствующего уравнения для некоторой точки с ординатой A_p/ε_d может быть рассчитана абсцисса ω_p^* . После нахождения ω_p^* по и затем значения $A(\omega_p^*)$ по (3) и ее производной $A'(\omega_p^*)$ можно определить уравнение касательной к АЧХ $A(\omega)$ в точке $(\omega_p^*, A(\omega_p^*))$ и из него найти искомую частоту входного сигнала

$$\bar{\omega}_p = (A_p/\varepsilon_d - A(\omega_p^*))(A'(\omega_p^*))^{-1} + \omega_p^* < \omega_p, \quad (4)$$

которая обеспечит существенное повышение быстродействия рассмотренной выше системы (см. рис. 2) при сохранении неравенства $\varepsilon < \varepsilon_d$ для любых значений параметров A_p и J_Σ .

Довольно часто передаточные функции систем имеют много постоянных времени, которые оказывают влияние на вид их АЧХ только в высокочастотных областях, далеких от рабочих частот. В результате указанными малыми постоянными времени можно пренебречь и получить достаточно простые аналитические описания АЧХ. В частности, при малой величине L имеет место неравенство $T_3 \gg T_4$. Если при этом $T_3 \gg T_1$ и $T_3 \gg T_2$, то вместо АЧХ (3) можно использовать ее упрощенное аналитическое описание и из него получить выражение для расчета частоты:

$$\omega_p = \sqrt{-1 + \sqrt{1 + 4T_3^2 K^2 \varepsilon_d^2 A_p^{-2}}} (T_3 \sqrt{2})^{-1} \quad (5)$$

Из рис. 1 видно, что формулу (5) можно использовать для определения и высокочастотных ω_p , но в этом случае оценка ω_p будет несколько заниженной. Выражение (5) позволяет определять ω_p в реальном масштабе времени при непрерывных изменениях параметров объекта управления. Это удобно для практической реализации используемого алгоритма адаптации.

Для исследования работы синтезированных адаптивных систем управления было проведено численное моделирование. При моделировании исследовался процесс установки манипулятором некоторых деталей на девять объектов, поочередно перемещаемых транспортером, объекты на транспортере располагались таким образом, что для первого объекта $A_{pj} = 1,3$ рад, а для всех последующих $A_{pj} = 0,3$ рад. При этом J_Σ изменялся от 0,001 до 0,0002 кгм², уменьшаясь скачкообразно на величину 0,0001 кгм² на каждом цикле поворота манипулятора.

На рис. 4 показан закон изменения выходного сигнала электропривода манипулятора в процессе его работы при указанных выше изменениях J_Σ и A_{pj} . На рис. 5 показаны законы перемещения ленты транспортера S и время выполнения одного цикла работ с девятью объектами при использовании адаптивных алгоритмов подстройки ω_{pi} (кривая 1), при постоянном исходном значении ω_{pi} (кривая 2) и при использовании в качестве входного сигнала электропривода манипулятора не гармонического, а ступенчатого сигнала той же величины (кривая 3). При этом во всех трех случаях значение ϵ_d оставалось постоянным. Горизонтальные участки кривых на рис. 5 соответствуют времени простоя транспортера в ожидании подхода манипулятора, а наклонные – времени его перемещения. Увеличенное время выполнения одного рабочего цикла в системе со ступенчатым входным сигналом объясняется резким повышением тока в обмотках электродвигателя в начале его движения. Этот ток специально ограничивался по величине с целью сохранения работоспособности используемого электромеханического оборудования.

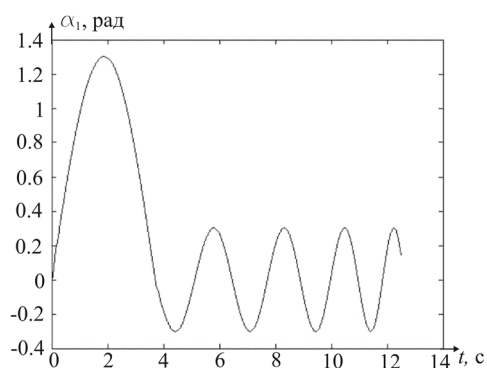


Рис. 4. Закон изменения выходного сигнала α_1 электропривода манипулятора

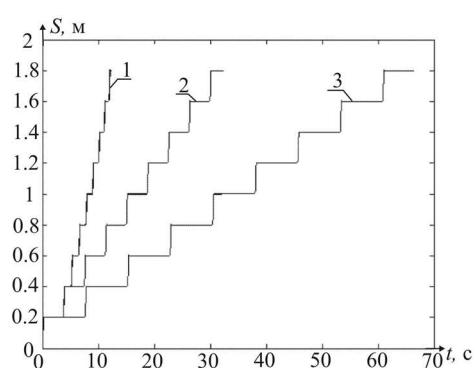


Рис. 5. Законы перемещения ленты транспортера

В диссертации были проведены натурные эксперименты для электропривода, управляющего перемещениями манипулятора (см. рис. 2), с использованием электромеханического стенда, общий вид которого показан на рис. 6. На рис. 7 показан закон изменения ω_p в случае, когда в моменты времени t_1 , t_3 и t_4 изменялся J_Σ , а в момент t_2 амплитуда A_p уменьшалась с 1,3 рад до 0,3 рад. Динамическая ошибка при этом не превышала заданной величины 0,015 рад (см. рис. 8).

Результаты математического моделирования и натурных экспериментов показали, что при гармоническом входном сигнале и заданных выше законах изменения A_p и J_Σ используемая адаптивная система управления без превышения ε_d позволяет более чем в 4,1 раза увеличить частоту гармонических перемещений манипулятора и за счет этого в 2,6 раза увеличить производительность всей системы в целом, по сравнению с системой, не использующей подстройку частоты.



Рис. 6. Общий вид электромеханического стенда

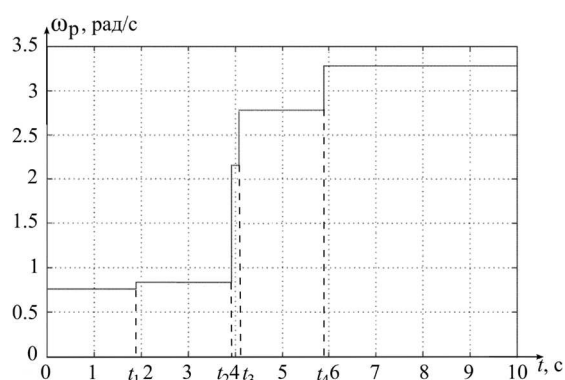


Рис. 7. Частота входного сигнала

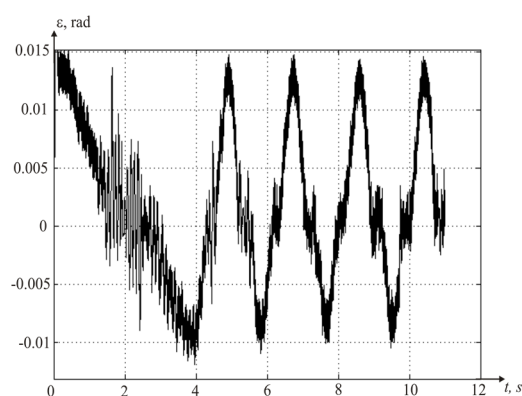


Рис. 8. Ошибка электропривода по положению

В третьей главе на основе разработанного во второй главе метода рассмотрен синтез системы формирования программных сигналов на примере двухступенного манипулятора 1 (см. рис. 9), совершающего ТО с объектами

2 расположенными на паллете 3, которая находится в рабочей зоне манипулятора. Каждый рабочий цикл в рабочую зону манипулятора подается новая паллета с расположением объектов, отличным от предыдущего. ТО со всеми объектами выполняются только тогда, когда скорость движения РО ММ относительно них равна нулю. Телекамера 4, находится над паллетом и позволяет определять текущее расположение всех объектов на ней (координаты x_j и y_j в абсолютной системе координат Oxy , где j – количество объектов на паллете).

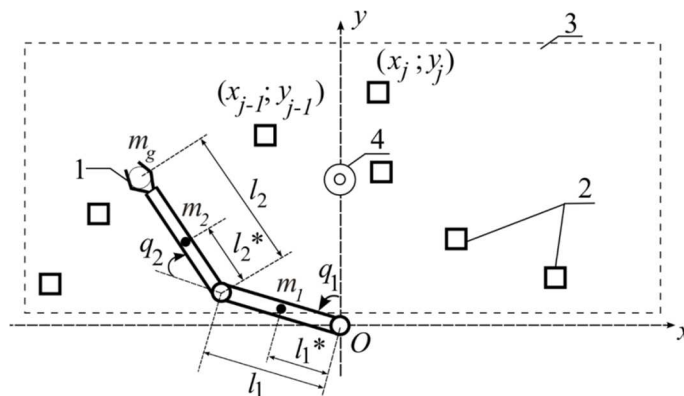


Рис. 9. Схема технологического процесса

Исполнительными элементами ММ (см. рис. 9) являются электроприводы постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. Для использования метода, описанного в главе 2, необходимо иметь ОУ с постоянными параметрами, поэтому все параметры ОУ перед применением этого метода необходимо заставить стабилизироваться на некотором номинальном уровне с помощью самонастраивающихся корректирующих устройств (СКУ). Для указанной цели можно использовать подход структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления (Бойчук Л. М.), который использует методы, специально разработанные для электроприводов ММ (Филаретов В.Ф.).

После определения координат (x_j, y_j) j -го изделия в рабочей зоне двухзвенного манипулятора 1 с помощью телекамеры 4 (см. рис. 9) и решения обратной задачи кинематики несложно найти обобщенные координаты $\tilde{q}_{1j}^*(x_j, y_j)$ и $\tilde{q}_{2j}^*(x_j, y_j)$ этого манипулятора, соответствующие рассматриваемому изделию. Очевидно, что перенос РО ММ от одного изделия к другому может осуществляться путем последовательной подачи на входы соответствующих электроприводов ступенчатых воздействий. Однако, как показано в главе 2, при ступенчатых воздействиях приходится существенно увеличивать время выполнения каждого из этапов рабочего цикла. В данной главе предлагается формировать программные сигналы в виде отдельных участков плавных кривых (участков гармонических сигналов). В качестве таких воздействий, подаваемых на входы каждого электропривода, в работе предлагается использовать сигналы, являющиеся участками гармонических кривых разной частоты:

$$q_{ij}^* = \begin{cases} A_{pij}(1 - \cos(\omega_{pij} \tilde{t}_j)) + \tilde{q}_{i,j-1}, & \text{если } \tilde{t}_j \leq \pi/\omega_{pij}; \\ 2A_{pij}, & \text{если } \dot{q}_{ij}^* = 0, \dot{q}_{kj}^* \neq 0, i \neq k, \end{cases} \quad (6)$$

где A_{pij} , ω_{pij} - амплитуды и частоты (формируемые согласно (4) или (5)) программных сигналов q_{ij}^* ; \tilde{t}_j - время выполнения j -ой операции, которое обнуляется в начале каждой операций; $\tilde{q}_{i,j-1}$ - обобщенные координаты степеней подвижности манипулятора, соответствующие нахождению его рабочего органа у j -1-ого объекта; $i = \overline{1, n}$; n - число степеней подвижности ММ. При этом полагается, что время переходных процессов во всех приводах манипулятора меньше времени перемещения его РО от одного объекта к другому.

В начале работы ММ находится в исходном положении, т.е. $q_{i0}^* = 0$. При этом амплитуды входных программных сигналов для всех его электроприводов вычисляются по формуле $A_{pij} = 0,5(\tilde{q}_{ij} - \tilde{q}_{i,j-1})$.

Результаты проведенного в данной главе численного моделирования показали, что только за счет подстройки ω_p , удастся в 1,55 раза повысить быстродействие работы всей системы, а с учетом введения гармонических программных сигналов это быстродействие повышается в 2,79 раза. Показано, что даже весьма значительные погрешности определения основных параметров используемых электроприводов ММ не приводят к существенному ухудшению качества работы системы, синтезированной на основе предложенного метода.

В четвертой главе рассмотрено создание и исследование метода построения адаптивной системы формирования предельно возможных программных скоростей движения РИ ММ вдоль задаваемых пространственных траектории с учетом ограничения сигналов по току и входному напряжению всех их электроприводов. Для решения поставленной в данной главе задачи предложен подход.

1. Вначале для придания каждому электроприводу перемещающегося ММ свойства инвариантности показателей качества работы к эффектам взаимовлияния между всеми его степенями подвижности в СУ вводятся СКУ.

2. Затем для обеспечения требуемых показателей качества работы соответствующих электроприводов с уже застabilизированными с помощью СКУ параметрами в их прямые цепи вводятся типовые последовательные корректирующие устройства, параметры которых рассчитываются традиционными методами.

3. Далее решается обратная задача кинематики, для нахождения законов изменения всех обобщенных координат q_i ММ, которые будут являться входными сигналами для соответствующих следящих электроприводов ММ.

4. После этого задается аналитическое описание желаемой траектории движения РИ ММ в пространстве $y = f(x)$, $z = f(x)$ и находятся законы изменения координат $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ во времени.

5. И, наконец, строится алгоритм формирования предельно возможной скорости движения РИ ММ.

На рисунке 10 показана обобщенная схема управления ММ, реализующая описанный выше подход и содержащая контур формирования скорости движения РИ по предписанной траектории и СУ электроприводами каждой степени подвижности ММ. На этой схеме введены следующие обозначения: V_0 , V^* – соответственно, начальная и формируемая скорости движения РИ ММ; БФТ – блок формирования траектории движения РИ с учетом текущего значения V^* ; x^* , y^* , z^* – программные значения положения РИ ММ в декартовой системе координат; ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики, формирующий программные значения q_i^* входных сигналов для всех электроприводов ЭП_i ММ; СР_i – самонастраивающиеся регуляторы; P_i – типовые регуляторы; Y_i – усилители; p – символ дифференцирования; q_i – обобщенные координаты ММ; ε_i – ошибки следящих электроприводов всех степеней подвижности ММ; u_i – сигналы на входах соответствующих усилителей; i_i – токи якорной цепи электродвигателей; БК – блок выбора критерия оценки; γ – безразмерный сигнал на выходе БК; δ_1 , δ_2 – пороговые значения релейного элемента РЭ; Δ – величина приращения скорости движения РИ ММ; $\gamma_{\text{оп}}$ – опорное значение.

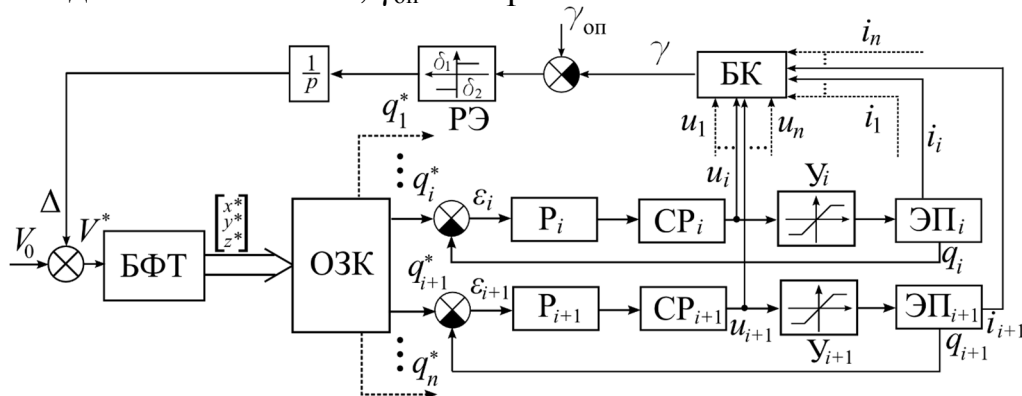


Рис. 10. Схема адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения РИ ММ

Пока все электроприводы ММ работают в линейной зоне, выполняется условие $|\gamma_{\text{оп}}| > |\gamma|$, и разность $\gamma_{\text{оп}} - \gamma$ положительна. В этом случае согласно схеме на рис. 10 скорость движения РИ ММ по предписанной траектории будет увеличиваться с постоянным ускорением δ_1 . Если же некоторые входные сигналы БК (u_i или i_i) начнут превышать установленные для них пороговые значения, за которыми начинаются проявляться зоны значительных нелинейностей электродвигателей или даже зоны их насыщения, то начинает выполняться условие $|\gamma_{\text{оп}}| < |\gamma|$, и разность $\gamma_{\text{оп}} - \gamma$ 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 линейных зонах при перемещении РИ по пространственным траекториям с малой кривизной достаточно формировать γ (см. рисунок 10) в виде:

$$\gamma = \max(|u_1|, \dots, |u_i|, \dots, |u_n|), \quad (7)$$

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 токов i_1, \dots, i_n в якорных цепях всех электроприводов ММ:

$$\gamma = \max(|i_1|, \dots, |i_i|, \dots, |i_n|). \quad (8)$$

Это объясняется тем, что ток якоря i_i в отличие от напряжения u_i 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 (8) предложенная 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 (7) или (8), зависит от кинематических схем ММ и требований к динамической точности движения РИ, а также от наличия и доступности соответствующих датчиков.

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

$$\gamma = K_1 \max(|u_1|, \dots, |u_i|, \dots, |u_n|) + K_2 \max(|i_1|, \dots, |i_i|, \dots, |i_n|), \quad (9)$$

где K_1 и K_2 – некоторые положительные весовые коэффициенты, значения которых определяются в процессе моделирования или экспериментально. Результаты выполненных исследований показали, что при выборе γ в виде (7) или (8), величина $\gamma_{оп}$, как правило, выбирается примерно на 20% меньше максимально допустимого значения $|u_i|$ или $|i_i|$, при которых работа всех электроприводов ММ еще осуществляется в их линейных зонах, а при выборе

γ в виде (9) величина $\gamma_{оп}$ может уменьшаться на 20-30% по сравнению с указанными максимально допустимыми значениями $|u_i|$ или $|i_i|$.

Исследование разрабатываемой адаптивной системы проводилось с использованием универсального ММ типа PUMA. На рис. 11 и 12 приведены результаты численного моделирования при движении РИ ММ по траектории с малой кривизной $y(x)=0.15\sin(6x)+0.1$, сигнал γ формируется с использованием выражения (7), а $\gamma_{оп} = 21$ В. Из рис. 11 видно, что в преднасыщенном состоянии все время находится один из его электроприводов, обеспечивая максимально допустимую скорость перемещения РИ: вначале первый (см. u_1), затем второй (см. u_2) и, наконец, третий (см. u_3). На рис. 12 используются следующие масштабы: $V^* = \text{scale } 1$ м/с; $x^*, y^* = \text{scale } 1$ м; $\varepsilon_{дин} = \text{scale } 0,0025$ м. Из этого рисунка видно, что V^* РИ ММ по этой траектории вначале возрастает до 1,24 м/с, а затем уменьшается для сохранения требуемого уровня $\varepsilon_{дин}$, 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 превышения $\varepsilon_{дин} = 2$ мм и входа его движителей в насыщение, составляет всего 0,37 м/с. В результате разработанная адаптивная система, формирующая сигнал γ в соответствии с выражением (7), позволяет в 2,3 раза уменьшить время выполнения указанного движения.

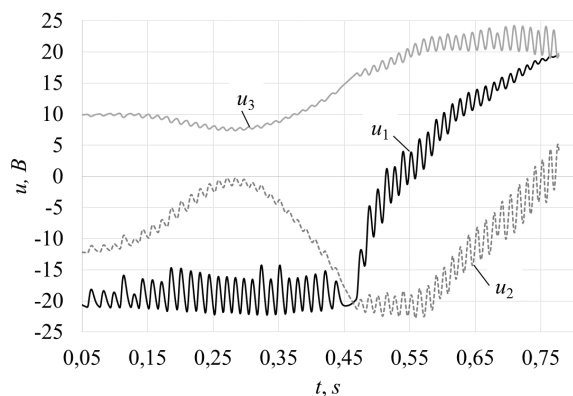


Рис. 11. Входные напряжения электроприводов ММ

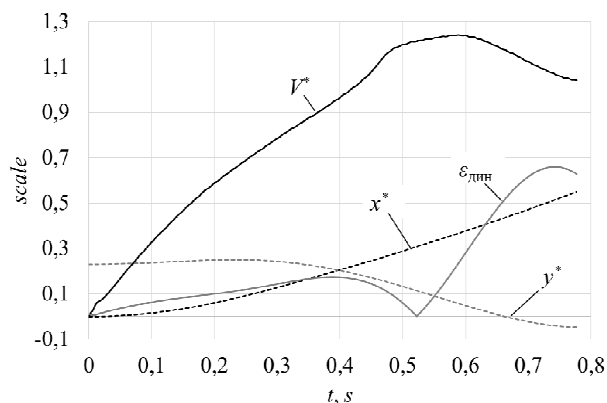


Рис. 12. Законы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{дин}$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена новая концепция синтеза высокоточных адаптивных СУ ММ, которая основана на непрерывной подстройке скорости движения их РО по произвольно задаваемым траекториям.

2. Разработан метод синтеза адаптивных систем формирования программных сигналов, которые обеспечивают движение РО простых манипуляторов по участкам гармонических траекторий с максимально возможной скоростью с учетом изменения параметров исполнительных элементов и с сохранением заданной динамической точности.

3. Разработан метод синтеза легко реализуемых СУ для ММ, которые в зависимости от текущего расположения обрабатываемых объектов формируют такие программные сигналы для всех электроприводов этих манипуляторов, которые обеспечивают движение их РО с максимально возможной скоростью и заданной динамической точностью. При этом подход РО ММ к объектам работ совершается плавно и без перерегулирования.

4. Разработан метод синтеза адаптивных систем формирования предельно возможных программных скоростей движения РО ММ по всем участкам задаваемых пространственных траекторий с учетом ограничений сигналов по току и входному напряжению всех электроприводов этих ММ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез адаптивных систем управления, настраиваемых по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2010. - № 1. - С. 15-21.

2. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Разработка роботизированного комплекса для механической обработки нежестких пространственных композитных изделий вертолетов // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 2011.- №13. - С. 67-75.

3. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2013.- Т.11. - №4. - С. 19-25.

4. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез системы формирования программных сигналов для электроприводов многозвенных манипуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2013. - № 5. - С. 30-34.

5. Патент РФ № 2355563. Устройство для управления приводом робота / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Бюл. № 14, 2009.

6. Патент РФ № 2399080. Самонастраивающийся электропривод / Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Бюл. № 25, 2010.

7. Патент РФ № 2450300. Самонастраивающийся электропривод / Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Бюл. № 13, 2012.

8. Патент РФ № 2460110. Самонастраивающийся электропривод / Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Бюл. № 24, 2012.

9. Filaretov V., Gubankov A. Synthesis of the adaptive control system with tuning of the input signal parameters // Proc. of the 20th Int. DAAAM Symp. "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education". Vienna, Austria. - 2009. - P. 187-188.

10. Filaretov V.F., Gubankov A.S. Synthesis of Program Control Signals for Mechatronic Sistem's Motion Speed // The 1st Joint Int. Conf. on Multibody System Dynamics. Lappeenranta, Finland. - 2010. - P. 1-9. (CD-ROM).

11. Filaretov V., Gubankov A. Synthesis of adaptive control system for formation

of program speed of multilink manipulator // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2011. - Vol. 132. - P. 347-350.

12. Filaretov V., Gubankov A. Adaptive system forming extremely high speed of multilink manipulator gripper // Proc. of the 23rd Int. DAAAM Symp. Zadar, Croatia. - 2012. - Vol. 23. - №1. - P. 0473-0476. (CDROM version).

13. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез системы автоматической настройки параметров входного сигнала для электромеханического манипуляционного комплекса // Материалы международной научно-технической конф.: «Мехатроника, автоматизация и управление». Дивноморское. - 2009. - С. 115-118.

14. Губанков А.С. Адаптивное управление скоростью работы электроприводов с переменными моментами инерции // Мат. 2-й Всероссийской конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва. - 2009. - С. 1-8. (CD-ROM).

15. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Мурсалимов Э.Ш. Разработка и исследование подходов к созданию роботизированного комплекса для точной механической обработки и доводки пространственных корпусных композитных изделий вертолетов // Сб. докладов Национальной научно-технической конф. Москва. - 2011. - С.58-63.

16. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Солкан М.В. Синтез системы формирования программных сигналов управления манипуляционным роботом с учетом ограничения мощности исполнительных элементов // Мат. 4-ой Всероссийской мультikonф. по проблемам управления (МКПУ-2011). Дивноморское. - 2011. - Т. 2. - С. 269-271.

17. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Автоматический роботизированный комплекс для точной механической обработки и доводки пространственных корпусных композитных изделий вертолетов // Материалы международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника 2011". Санкт-Петербург. - 2011. - С. 411- 418.

18. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Разработка системы формирования программных сигналов для электроприводов манипулятора // Труды XV межд. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, Россия. - 2013. - С. 582-587.

19. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Интеллектуальная информационно-коммуникационная система для управления роботизированным комплексом механической обработки сложных корпусных композитных изделий вертолетов и легких самолетов // Материалы Всероссийской открытой конкурс-выставки научно-технического творчества молодежи для молодых ученых «Исследователь будущего», Владивосток. - 2012. - С. 37-41.

20. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Разработка архитектуры интеллектуальной информационно-управляющей системы робототехнического комплекса для механической обработки нежестких композитных

изделий сложной формы// Труды XV межд. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, Россия. - 2013. - С. 423-428.

21. Губанков А.С. Моделирование и исследование динамики мехатронных механизмов с учетом ограничения мощности их исполнительных элементов // Материалы 6-й Дальневосточной конференции студентов и аспирантов по математическому моделированию, ДВГУ, Владивосток.- 2007. - С. 4-5

22. Gubankov A.S. Synthesis of adaptive control systems by electric motors with the variable moments of inertia // Материалы докл. 7-го международного форума студентов, аспирантов и молодых ученых стран АТР. Владивосток, ДВГТУ. - 2007. - С. 78-79.

23. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез адаптивных систем управления электроприводами с переменными моментами инерции // Материалы научной конференции «Вологдинские чтения. Радиоэлектроника, информатика, электротехника». Владивосток, ДВГТУ. - 2007. - С. 7-8.

24. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез адаптивной системы управления скоростью работы электромеханического манипуляционного комплекса. Материалы научной конференции «Вологдинские чтения. Радиоэлектроника, информатика, электротехника». Владивосток, ДВГТУ. - 2008. - С. 18-19.

25. Филаретов В. Ф., Губанков А.С., Солкан М.В. Синтез системы формирования программных сигналов управления манипуляционным роботом // Материалы научной конференции «Вологдинские чтения. Радиоэлектроника, информатика, электротехника». Владивосток, ДВГТУ. - 2010. - С. 102-104.

Личный вклад автора. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Работы [14, 21, 22] выполнены автором самостоятельно. В работах [1, 3, 4, 6-13, 18, 23-24] руководителем поставлены задачи, а соискателем получены основные научные результаты. В работах [2, 5, 15-17, 19, 20, 25] автором разработаны системы формирования режимов движения для многостепенных манипуляторов, выполнен синтез самонастраивающихся систем управления для нескольких степеней подвижности.

Губанков Антон Сергеевич

Адаптивное управление манипуляторами с максимальным быстродействием

Автореферат

Подписано к печати
Формат 60×84/16.

Усл. п. л. 1.0.
Тираж 100.

Уч.-изд. л. 0.84
Заказ .

Издано ИАПУ ДВО РАН. г. Владивосток, Радио, 5.
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.
г. Владивосток, Радио, 5.