

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

ГУБАНКОВ Антон Сергеевич



**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРАМИ С
МАКСИМАЛЬНЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Филаретов В.Ф.

Владивосток

2014

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ВВЕДЕННЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ФОРМИРОВАНИЮ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАНИПУЛЯТОРОВ	12
1.1 Обобщенные подходы к управлению скоростью движения	12
1.2 Управление с использованием профиля скорости	17
1.3 Управление на основе критерия максимального быстродействия	20
1.3 Постановка задачи.....	26
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, НАСТРАИВАЮЩИХСЯ ПО АМПЛИТУДНЫМ ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	28
2.1 Исследование особенностей работы исполнительных устройств при изменении режимов их движения и параметров нагрузки	29
2.2 Описание объекта управления.....	31
2.3 Формирование рабочей частоты входного сигнала на основе кусочно- линейной аппроксимации АЧХ системы.....	33
2.4 Формирование рабочей частоты входного сигнала на основе упрощенного описания АЧХ.....	36
2.5 Синтез системы управления движением манипулятора и транспортной ленты.....	38
2.7 Экспериментальные исследования синтезированных адаптивных систем управления	44
2.8 Выводы	51

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ	52
3.1 Синтез самонастраивающихся систем для стабилизации параметров электроприводов многозвенных манипуляторов на номинальном уровне	53
3.2 Метод формирования программных сигналов управления для электроприводов манипуляторов	59
3.3 Исследование работы синтезированной системы управления.....	61
3.4 Выводы.....	69
4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПО ПРОИЗВОЛЬНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ	71
4.1 Описание подхода к построению адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора	72
4.2 Исследование построенной адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора	77
4.3 Выводы.....	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	93
ПРИЛОЖЕНИЕ	108

СПИСОК ВВЕДЕННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика,
ММ	– многозвенный манипулятор,
ОУ	– объект управления,
РИ	– рабочий инструмент,
РМВ	– реальный масштаб времени,
РО	- рабочий орган,
СК	– система координат,
СКУ	– самонастраивающееся корректирующее устройство,
СУ	– система управления,
ТО	– технологическая операция.

ВВЕДЕНИЕ

С ростом потребности производства в выпуске качественной продукции все более широкое применение в промышленности находят средства автоматизации, неотъемлемой частью которых является робототехническое оборудование содержащее многостепенные промышленные манипуляторы (ММ), которые позволяют выполнять широкий спектр технологических операций (ТО) с высокой производительностью и точностью. В условиях жесткой конкуренции роботы-манипуляторы как средства автоматизации имеют принципиальное отличие, которое заключается в универсальности и скорости перехода на новые операции, что является наиболее важным в обстановке гибкого производственного процесса и высоких требований к качеству выпускаемой продукции.

Наряду с внедрением в действующие производства ММ открывают широкие перспективы для создания принципиально новых технологических процессов, не связанных с весьма обременительными ограничениями, налагаемыми непосредственным участием в них человека (по грузоподъемности, быстродействию, точности, повторяемости и т.п.). При этом труд человека становится более комфортным и интеллектуальным [63].

Очевидно, что точное скоростное выполнение технологических операций способно резко повысить производительность современного робототехнического оборудования, содержащего ММ. Для этого необходимо, чтобы все ТО выполнялись с предельно высокими скоростями, но при этом качество выполняемых операций должно оставаться на требуемом уровне. В настоящее время уже разработано большое количество методов синтеза систем управления (СУ) пространственными движениями ММ [2, 4, 5, 11-14, 36, 40, 42, 60, 61, 63, 66, 122]. Значительный вклад в создание и развитие указанных систем внесли отечественные и зарубежные ученые С.Л. Зенкевич, Е.И. Юревич, Ю.В. Подураев, П.Д. Крутько, А.С. Ющенко, М. Vukobratovic, B. Siciliano, O. Khatib, M.E. Kahn, B. Roth, J.E. Bobrow, K.G. Shin, N.D. McKay и др. Для повышения

динамической точности управления ММ эти СУ (комбинированные, робастные, адаптивные, самонастраивающиеся) используют весьма сложные 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, во-первых, потому, что все реальные динамические системы ввиду их инерционности имеют падающие амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), во-вторых, вид траектории движения рабочего инструмента (РИ) на повышенной скорости его движения существенно влияет на динамическую точность управления, и в-третьих, на предельных скоростях движения эти системы могут обеспечивать указанным объектам 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.

Для предотвращения аварий при использовании традиционных СУ 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. Более того, часто приходилось специально выбирать гладкие траектории движения РИ ММ, которые, как правило, состоят из отрезков прямых и дуг

окружностей, специально дополнительно изменяя программные сигналы управления приводами. Однако, выбор гладких траекторий движения РИ в абсолютной системе координат (СК) все равно не гарантирует плавных траекторий в пространстве обобщенных координат, что во многих случаях может приводить к появлению нежелательных перерегулирований в СУ электроприводами ММ или к необходимости длительных предварительных проверок работы каждого привода ММ при изменениях траекторий движения РИ.

В результате при широком внедрении ММ в реальные технологические процессы неминуемо возникает задача формирования наиболее рациональной (желательно максимально возможной) скорости движения РИ ММ по предписанным пространственным траекториям с целью предельно возможного повышения производительности работы создаваемого робототехнического оборудования с учетом изменяющихся параметров ММ без снижения заданного качества выполняемых ТО с полным исключением возможного входа его отдельных электроприводов в насыщение.

В соответствии с поставленной целью была определена структура диссертации, состоящей из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе диссертации проводится анализ самых распространенных систем формирования скорости движения РИ ММ при их перемещении по заданным пространственным траекториям, которые предложены российскими и зарубежными разработчиками. В процессе анализа было выявлено, что одним из наиболее распространенных подходов решения указанной задачи является использование профиля скорости. Этот профиль определяет зависимость скорости движения рабочего органа ММ от времени при его перемещении из начального положения в конечное. Однако, не смотря на простоту и широкую распространенность этого подхода, при его использовании для решения указанной выше задачи возникают значительные трудности. Поскольку ММ

является гибкой производственной системой, то при переходе от одних видов работ к другим обязательно проводится переналадка оборудования, одним из этапов которой является планирование движения РИ. На этом этапе формируются профили скоростей вращения всех электроприводов ММ, как правило исходя из самых нагруженных режимов их работы, изменения которых в ходе работы ММ не предусматриваются. В результате становится невозможным изменение скорости движения рабочего органа ММ даже в более благоприятных режимах их эксплуатации.

Другим распространенным подходом выбора скорости движения РИ ММ является использование оптимальных по быстродействию СУ электроприводами ММ. Однако, несмотря на то, что этот подход позволяет учитывать ограничения на управляющие моменты при движении по прямолинейным и круговым траекториям, но динамикой самих электроприводов все равно пренебрегается. Более того, использование этого подхода сопряжено с существенными вычислительными затратами уже на этапе планирования движений РИ. Это не позволяет использовать его для управления ММ в реальном масштабе времени в ходе выполнения реальных ТО.

На основе результатов детального анализа особенностей и недостатков известных подходов и методов решения обозначенной задачи, в последнем разделе первой главы конкретизируются цель и задачи исследования по разработке метода синтеза адаптивных СУ ММ, обеспечивающих их предельное быстродействие без снижения заданного высокого качества выполнения ТО. Выявляются различные пути достижения поставленной цели и определяется возможность создания различных методов синтеза указанных адаптивных СУ ММ, основанная на различных способах специальной настройки параметров программных сигналов всех исполнительных электроприводов манипуляционных механизмов. Обосновывается стратегия и последовательность действий, которая должна позволить создать соответствующие методы, на основе которых будут синтезированы адаптивные

СУ ММ для разных условий эксплуатации, способные гарантировать высокое качество и относительно простую практическую реализацию создаваемых систем.

Во второй главе разработан метод синтеза легко реализуемых адаптивных систем управления, которые в зависимости от текущих значений непрерывно изменяющихся параметров ОУ могут поддерживать максимально возможную скорость работы РО 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. В рассматриваемой главе на примере одностепенного манипулятора с использованием АЧХ его исполнительного привода предложен метод синтеза адаптивных СУ, обеспечивающих колебательные движения рабочего органа (РО) этого манипулятора с непрерывно изменяющейся частотой в зависимости от амплитуды предстоящего движения и момента инерции рассматриваемого ОУ.

Для исследования качества работы синтезированных адаптивных СУ было проведено численное моделирование и эксперименты на реальном электроприводе, управляющем перемещениями одностепенного манипулятора. Результаты математического моделирования и натурных экспериментов показали, что при гармоническом входном сигнале и заданных законах изменения амплитуды и суммарного момента инерции, приведенного к валу электродвигателя перемещающегося манипулятора, синтезированная адаптивная СУ без превышения заданного уровня динамической ошибки 0,015 рад позволяет более чем в 4,2 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.

В третьей главе на основе разработанного во второй главе метода рассмотрен синтез системы формирования программных сигналов управления для многостепенного манипулятора, выполняющего технологические операции с объектами, расположенными на паллете, которая находится в его рабочей зоне. В этой главе программные сигналы предлагается формировать в виде отдельных участков плавных кривых (участков гармонических сигналов). В качестве указанных воздействий, подаваемых на входы каждого электропривода ММ, в главе предлагается использовать сигналы, являющиеся частями гармонических кривых разной частоты. Для обеспечения инвариантности показателей качества работы каждого электропривода перемещающегося манипулятора к эффектам взаимовлияния между его степенями подвижности (для стабилизации их параметров, а значит и коэффициентов уравнения на номинальном уровне) в СУ каждым электроприводом введены самонастраивающиеся корректирующие устройства (СКУ).

В четвертой главе предложен метод формирования максимально высокой скорости движения РО ММ по пространственным траекториям с учетом ограничений сигналов по току и входному напряжению исполнительных электроприводов. При этом предельно быстрые движения ММ по произвольным пространственным траекториям обеспечиваются с помощью синтезированных СУ, гарантирующих нахождение его электроприводов на конечных участках их линейных зон в преднасыщенном состоянии. При этом заданная динамическая точность управления указанным движением ММ в целом определяется качеством используемых СУ электроприводов каждой степени подвижности, неизменно работающих в линейной зоне управления.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и обобщающие выводы по этим результатам.

В целом по теме диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе 4 из них в рекомендуемых ВАК РФ научных журналах и 4 патентов на изобретения. Отдельные положения диссертации докладывались на четырех международных (в том числе из перечня Scopus и Web of Science), восьми всероссийских и пяти региональных конференциях.

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ФОРМИРОВАНИЮ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАНИПУЛЯТОРОВ

Современные СУ манипуляционных систем имеют множество классификаций [11, 60, 63, 64, 122]. Самые распространенные из них: по типу алгоритма управления (программный, адаптивный, интеллектуальный), по типу движения (непрерывные (контурные), дискретные (позиционные "от точки к точке"), цикловые (по упорам), по виду управляемых переменных (управление по положению, по скорости, по силе или моменту). Часто эти способы применяются в комбинации с одновременным применением по разным координатам или в виде некоторой функциональной зависимости управляемой переменной от другой, либо с последовательным переходом от одного способа управления к другому. Например, манипуляторы, предназначенные для дуговой сварки и резки, механической обработки и нанесения покрытий имеют явно выраженное контурное управление, причем во многих режимах они должны перемещаться в пространстве по заданным траекториям с различными законами изменения скорости.

1.1 Обобщенные подходы к управлению скоростью движения

Известные манипуляционные системы могут работать как в режиме только скоростного управления, так и в режиме движения по сложной траектории с заданной скоростью. К первому типу относится управление по вектору скорости (см., например, [11, 36, 60, 65, 122, 136]).

Известно, что для каждого конкретного манипулятора всегда имеет место соотношение:

$$r = f(q), \quad (1.1)$$

однозначно связывающее вектор его обобщенных координат $q \in R^n$, где n – число степеней подвижности манипулятора, с вектором $r \in R^6$ положения и ориентации его РО в рабочем пространстве. Определение r по заданному q принято называть прямой задачей кинематики, которая, рассматривается и решается в многочисленных работах [34, 60, 64, 66, 81] для конкретных видов соотношения (1.1), определяемого различными кинематическими схемами манипуляторов.

Согласно (1.1) можно записать

$$\frac{dr^{\text{ж}}}{dt} = \dot{r}^{\text{ж}} = J(q)\dot{q}^{\text{ж}}, \quad (1.2)$$

где $\dot{r}^{\text{ж}} \in R^6$ и $\dot{q}^{\text{ж}} \in R^n$ - желаемые значения векторов $\dot{r}$ и $\dot{q}$, соответственно; $J \in R^{6 \times n}$ - якобиан от $q^{\text{ж}}$, элементы которого имеют вид $J_{mi} = \partial f_m / \partial q_i$, $m = \overline{1,6}$; $i = \overline{1,n}$. Из уравнения (1.2) видно, что при осуществлении управления по вектору скорости связь между векторами $\dot{r}$ и $\dot{q}$ является линейной. Когда $\dot{r}$ и $\dot{q}$ имеют одинаковую размерность, манипулятор не имеет избыточных степеней свободы и якобиан может быть инвертирован, т.е.

$$\dot{q}^{\text{ж}} = J^{-1}(q)\dot{r}^{\text{ж}}. \quad (1.3)$$

На рисунке 1.1 показана структурная схема управления манипулятором по вектору скорости в соответствии с выражением (1.3).

В тех случаях, когда матрица $J(q)$ не имеет обратной (т.е. она вырождена или не является квадратной), в выражении (1.3) вместо $J^{-1}(q)$ используется псевдообратная матрица J^+ [60, 89].

Выражение (1.3) лежит в основе многих методов формирования скорости движения РИ, закрепленного в РО манипулятора. Например, управление по

вектору скорости часто используется в системах полуавтоматического управления [6, 11], когда вектор скорости движения РО формирует человек. Этот же вид управления применяется для силового управления манипуляторами, когда априорно неизвестно местоположение обрабатываемой поверхности изделий [44, 95, 112]. При этом прижатый с некоторым заданным усилием по нормали к заготовке рабочий инструмент перемещается с заданной тангенциальной скоростью вдоль контура изделия без предварительного знания пространственного расположения этого контура.

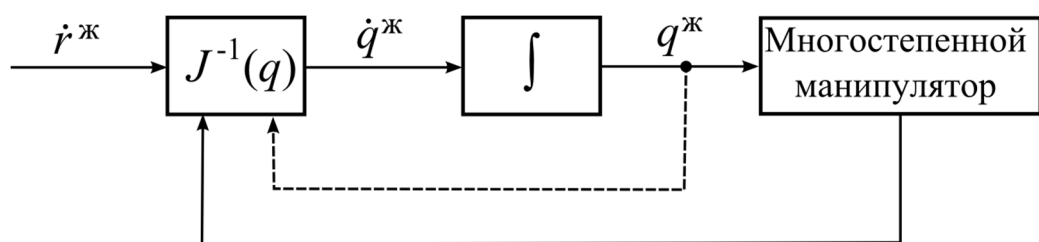


Рис. 1.1. Управление манипулятором по вектору скорости

Тем не менее, применить выражение (1.3) на практике можно только в относительно простых случаях, когда не нужно отслеживать сложную пространственную траекторию с заданной динамической точностью в ходе выполнения ММ сложных технологических операций. Однако в большинстве случаев современного промышленного производства [7] (при дуговой сварке, лазерной и гидроабразивной резке, механической обработке, нанесении покрытий и клеев и др.), используются методы контурного управления движением РО ММ [28, 72, 136], в которых СУ скоростью представляют собой локальные подсистемы в контуре управления положением. Таким образом, рассматривать существующие подходы к формированию скорости движения РИ необходимо с учетом СУ положением робототехнических систем.

В работах [20, 21, 63] общая задача обеспечения движения РО ММ по заданной траектории в пространстве разделяется на подзадачи стабилизации относительно этой траектории и организации желаемого режима продольного движения по ней за счет применения относительного и продольного управления.

Недостатком этого подхода является необходимость построения различных достаточно сложных алгоритмов для реализации соответствующих управляющих воздействий.

Другой способ [10, 58] заключается в обеспечении требуемых параметров пространственного движения РО с помощью универсальных робастных законов формирования управляющих воздействий для отдельных каналов управления. При этом требуется формировать специальные параметрические уравнения заданной кривой, но вопросы реализации желаемого скоростного режима движения ОУ остаются по существу открытыми.

В работе [38] рассматривается система управления скоростью вращения электроприводов, входящих в состав ММ, металлообрабатывающих станков, прокатных станов и т.д. Эта система построена по принципу подчиненного регулирования, где в качестве регулятора скорости используется ПИ-регулятор, охваченный параметрической обратной связью, в которой задействована модель ОУ. Однако использование этой модели в СУ скоростью движения РО ММ затруднено, поскольку синтезируемая СУ в основном предназначена для отработки с заданным уровнем качества ступенчатых входных воздействий.

Известен метод управления полем скоростей движения РО ММ [99, 100, 103]. Согласно указанному методу для каждой точки рабочего пространства задается вектор скорости указанного движения, который направлен к заданной траектории. Таким образом, из любой точки рабочего пространства, двигаясь в указанном вектором направлении, РО попадет на желаемую траекторию. Этот способ формирования движения РО ММ можно использовать когда синхронизация и координация движений ММ более важна, чем скорость движения по траектории. Однако указанный метод обладает большой вычислительной сложностью, обусловленной длительным вычислением указанного выше поля скоростей, и не позволяет изменять режим движения ММ в РМВ.

Известен также метод синтеза СУ ММ [12-14] на основе желаемых

дифференциальных уравнений, учитывающих порядок их уравнений и требования к качеству управления. После выражения старшей производной из желаемого уравнения и подстановки ее в уравнение объекта с переменными параметрами находится требуемый закон управления. Этот метод получил название: метод обратной задачи динамики. С его помощью формируется такой закон управления, при котором скорость движения ОУ может изменяться в соответствии с желаемой функцией. Однако для такого сложного объекта, каким является ММ, этот закон управления будет иметь очень сложную практическую реализацию.

Для решения задачи повышения быстродействия в работе [3] синтез закона управления ММ также предлагается выполнять на основе решения обратной задачи динамики. Согласно предлагаемому методу сигнал управления формируется по принципу обратной связи. Достоинство этого метода заключается в обеспечении приближения РО ММ к целевой точке или к заданной траектории по экспоненте или с малым перерегулированием. Для манипуляторов с малым числом степеней подвижности после пренебрежения массами звеньев и гравитационными силами синтезируемый регулятор имеет достаточно простую практическую реализацию, несмотря на то, что обратные связи формируются в декартовых СК. Если же динамические характеристики ММ учитываются, то даже при пренебрежении электрическими постоянными времени их электродвигателей существенно усложняется практическая реализация всех синтезируемых регуляторов. Более того, при использовании предлагаемого метода для сохранения высокого качества управления требуется наличие больших коэффициентов усиления в прямых цепях электроприводов ММ, что, в свою очередь, часто приводит к их чрезмерно большой чувствительности к помехам, возможной потере устойчивости и к появлению зон насыщения.

Проблема выхода приводов ММ на ограничения по скорости может быть исключена путем пропорционального снижения указанных скоростей в сочленениях ММ [83]. Метод, приведенный в этой работе, основан на синтезе

наблюдателя возмущений и учитывает ограничение на развиваемый в электроприводах ММ момент [67, 68]. При этом динамикой самих приводов пренебрегают. Более того, сам метод сопряжен с существенными вычислительными затратами в случае использования сложных ММ.

В работе [59] предложен метод синтеза СУ режимом движения РО ММ, которая автоматически формирует максимально возможную текущую скорость их перемещения вдоль траектории с заданной динамической точностью. Однако эти системы лишь косвенно могут учитывать возможный вход в насыщение отдельных электроприводов ММ, а определение реального отклонения РИ от заданной траектории является довольно сложной задачей.

Приведенный выше анализ известных методов управления скоростями движения различных динамических объектов показал, что ни один из них не может быть использован для качественного управления режимами движения ММ.

1.2 Управление с использованием профиля скорости

Известно [11, 72, 76, 84, 94, 124, 133, 134], что для ММ с цикловым и позиционным управлением процесс движения РО от точки к точке (или от упора до упора) состоит из трех этапов: разгона, движения с постоянной скоростью и торможения. В этом случае профиль скорости будет трапецеидальным (см. рис. 1.2, а). Однако для современных промышленных ММ этот профиль скорости не используется, так как при смене этапов движения приводит к скачкообразному изменению ускорения, что, в свою очередь, приводит к существенному ухудшению качества переходных процессов. Для исключения этой негативной ситуации предложено несколько методов, но все они заключаются в том, чтобы профиль скорости принял более гладкую форму, например, S-образную форму, как показано на рисунке 1.2, б.

Существует несколько методов контурного управления ММ с одновременным заданием скорости движения РО по траектории в виде заранее сформированного профиля. Одной из основных проблем при таком комбинировании является формирование гладкого замедления движения и плавная остановка РИ в заданной точке пространства без появления ползучей скорости. Если же замедление начинается слишком рано, то движение с малой скоростью до заданной точки в каждом производственном цикле может значительно снизить производительность всего манипуляционного комплекса в целом. С другой стороны резкое торможение способно вызывать рывки в работе или причинить вред оборудованию [114]. Оба эти недостатка приводят к значительным проблемам синхронизации в общей работе ММ.

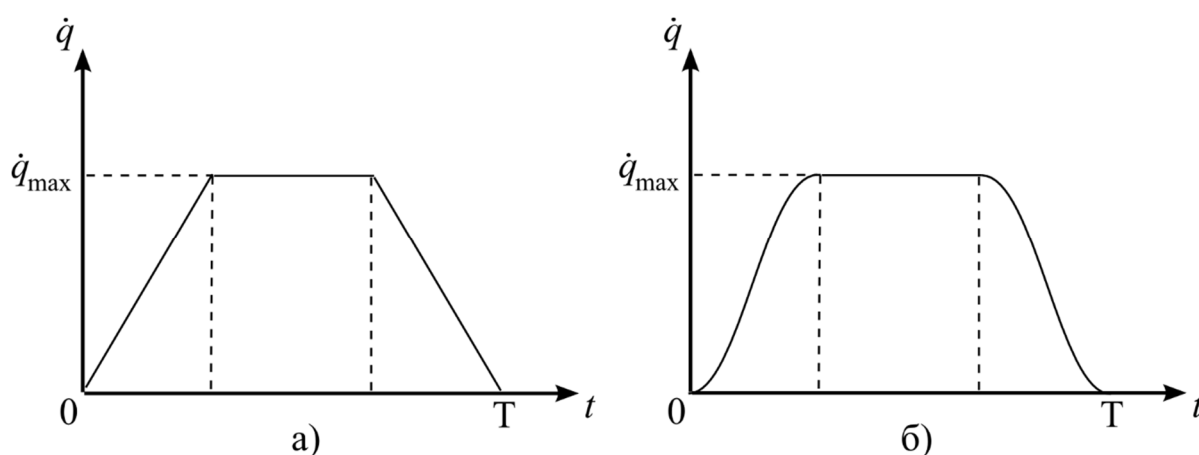


Рис. 1.2. Профили скоростей при скоростном управлении

Одним из способов использования профиля скорости является применение ПИД-регуляторов для управления скоростью вращения электроприводов ММ. При этом используется некая интегральная составляющая, которая обеспечивает достижение РО заданного положения при отработке всего профиля скорости. При этом используется допущение о точном непрерывном измерении скорости движения ОУ. Однако, указанный подход плохо применим на практике, поскольку положение ОУ в явном виде не контролируется.

Для повышения точности непрерывного измерения скорости движения ОУ иногда используется комбинирование вышеописанного метода с управлением по

скорости, которая зависит от расстояния до конечной точки движения. При этом предлагается разделять фазу торможения на два этапа. На первом этапе происходит торможение с максимальным замедлением, а на втором ускорение выбирается таким, чтобы обеспечить заданное качество переходных процессов. Однако, указанный метод ведет к существенному затягиванию времени переходного процесса и требует точной настройки параметров для создания непрерывного профиля скорости.

Другим способом, используемым во многих контроллерах для управления движением электроприводов, является управление, строящееся на основе приращений положения [80]. При этом желаемое положение ОУ рассчитывается путем интегрирования профилей их скорости, а в качестве СУ используется дискретный ПИД-регулятор. Одним из преимуществ указанного способа является простота реализации. Однако, в случае необходимости формирования в процессе работы нескольких режимов движения ОУ использование этого способа наоборот существенно затрудняет практическую реализацию СУ.

Схемы подчиненного регулирования широко распространены в СУ промышленными сервоприводами. Часто для обеспечения отработки заданного профиля скорости во внутреннем контуре используется ПИ-регулятор, а во внешнем контуре для управления положением – П-регулятор. Наряду с ПИ-регуляторами в контуре управления скоростями может использоваться псевдодифференциальная обратная связь [82, 104, 105, 107, 109]. Оба указанных регулятора позволяют по-разному настраивать параметры качества работы сервоприводов. Однако, как и в предыдущем случае, если режим движения ОУ меняется от одного производственного цикла к другому, то практическое использование указанного подхода весьма затруднительно.

Таким образом, ни один из приведенных выше методов управления с использованием профиля скорости также не позволяет качественно управлять движением РИ ММ по сложным пространственным траекториям с нужной скоростью. Более того, не ясно как формировать сам профиль скорости при

изменении режимов движения РИ в процессе выполнения ими сложных ТО, а также в условиях ограничения мощности используемых исполнительных электроприводов.

1.3 Управление на основе критерия максимального быстродействия

В современном промышленном производстве при перемещении РО ММ с заданной ориентацией из одной точки рабочего пространства в другую траектория его движения, как правило, представляет собой отрезок прямой или дугу окружности. Поскольку электроприводы ММ могут развивать только ограниченные по величине силы или моменты, то актуальным является задача прохождения по заданной траектории за минимальное время так, чтобы не нарушались указанные ограничения. Решению задачи управления электроприводами ММ с оптимальным быстродействием посвящено множество работ [74, 78, 79, 91, 92, 96, 101, 108, 119-121, 125-127].

На практике размеры указанных электроприводов ограничены. При этом более мощные приводы имеют большую массу и требуют использования усиленных звеньев. Таким образом, размер электроприводов не может быть увеличен больше некоторого предела. Для исключения возможности вхождения приводов в насыщения разработчики ММ обычно накладывают довольно жесткие ограничения на их угловые скорости и ускорения. Однако именно резкие изменения ускорений обычно обеспечивают повышение быстродействия ММ.

Kahn и Roth были одними из первых, кто применил методы оптимального управления к ММ [96]. Ими рассматривался трехзвенный механизм с последовательной кинематической цепью при ограничениях на управляющие моменты. При расчете оптимальных траекторий движения для этого ММ был предложен алгоритм, основанный на линеаризации его уравнения динамики. Поиск оптимальной траектории движения состоял из двух этапов:

непосредственного планирования траектории [69, 71, 73, 90, 97, 110, 113, 115, 123, 128-130, 135] и оптимизации движения вдоль выбранной траектории. При этом ограничения на скорость движения и ускорение принимались постоянными, а траектория перемещения составлялась из отрезков прямых и дуг окружностей [74].

В работах [74, 121] созданы похожие методы расчета оптимальных управлений для ММ, движущихся вдоль известной траектории. При этом уравнения динамики ММ были переписаны в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка, а ограничения на моменты электроприводов задавались в виде ограничений на ускорения вдоль траекторий движения. Кроме того, на основе этих ограничений строились кривые предельных скоростей движений, которые определяют границы возможных параметров движения на фазовой плоскости. Полагая, что управление ускорением возможно по релейному закону, авторы предложили схему для определения точек переключения в законе управления. Более того, в работе [121] показано, что для оптимального управления требуется только ограниченное множество точек переключения в зависимости от количества участков на траектории, где ускорение выходит на ограничение.

Продолжения исследований, изложенных в работе [121], описаны в работе [108]. Здесь приведено несколько дополнительных свойств кривой предельной скорости движения ОУ, которые позволили в дальнейшем несколько упростить вычисления точек переключения. В работе [93] рассмотренный метод распространен для произвольных траекторий движения ОУ. В [126] авторы ввели дополнительные ограничения для кривой предельной скорости, повысив эффективность исходного алгоритма.

В работе [102] приведено описание ММ с произвольной кинематической схемой и показано, что ограничения на внутренние силы можно рассматривать так же, как и ограничения на моменты используемых электроприводов. В этой же работе показана возможность использования линейного программирования

для расчета ограничений на ускорения. Это позволяет определить электроприводы ММ, которые в процессе их работы могут входить в насыщения.

В работе [78] авторам удалось доказать, что движение ММ вдоль траектории будет оптимально по быстродействию, если формируемые ускорения будут иметь релейный закон переключения. Они воспользовались подходом, предложенным в [74, 121], чтобы записать уравнения динамики ММ в функции от параметров траекторий и использовали обобщение принципа максимума Понтрягина, чтобы показать, что оптимальное по быстродействию управление должно иметь релейный характер.

В работах [117, 119] установлено, что при некоторых условиях метод, предложенный в [74, 121], не дает однозначного результата. Показано, что существуют такие траектории, движение вдоль которых может быть оптимальным и без использования релейного закона переключения ускорения. При этом точки, в которых ускорение по модулю не является максимальным, названы сингулярными точками. Кроме того, показано существование сингулярных дуг. В указанных работах высказывается предположение, что для обеспечения максимального быстродействия, по крайней мере, один из электроприводов ММ должен постоянно работать на пределе своих энергетических возможностей, однако явно этот факт ничем не обосновывается. Более детально условие максимального нагружения одного из приводов описано в работах [83, 111], а в работе [118] сделаны попытки численного обоснования указанного предположения.

Очевидно, что в процессе выполнения ММ некоторых задач траектория движения его РО может непрерывно изменяться в зависимости от изменения окружающей обстановки. В этом случае указанную траекторию требуется формировать в реальном масштабе времени (РМВ), учитывая текущее состояние окружающей среды и самого ММ. Однако создание оптимального по быстродействию движения его РО требует существенных вычислительных затрат, а это часто является препятствием в использовании данных методов на

практике [15, 106].

В общем случае, который соответствует наиболее жестким требованиям к качеству управления скоростью движения ММ, используются двухканальные СУ, включающие релейный канал "быстрого реагирования" и непрерывный канал точного позиционирования [136]. Для канала позиционирования основной задачей является точное позиционирование РИ в заданной точке пространства, а формирование требуемой скорости его перемещения отходит на второй план. В релейном же канале формирование указанной скорости является главной задачей. Синтез релейного управления осуществляется на основе теории и методов оптимального управления. При этом основной здесь является использование критерия максимального быстродействия [19, 41, 60, 122].

В работе [41] предложен метод синтеза оптимального по быстродействию закона управления для приводов, работающих на инерционную нагрузку. При этом задача синтеза решается с учетом фазового ограничения на потребляемую приводом мощность. Суть предлагаемого метода заключается в следующем: вначале синтезируется оптимальный по быстродействию закон управления для базовой системы, которая получится, если приравнять нулю все ее малые постоянные времени, а затем в полученном базовом законе управления приближенно учитывается влияние этих малых постоянных времени. Эта процедура является существенным недостатком указанного метода, поскольку реально приводит к значительному ухудшению качества управления.

Итерационный алгоритм, предложенный в работе [39], основан на использовании метода динамического программирования Беллмана и позволяет учесть ограничения на обобщенные скорости и ускорения всех звеньев ММ. Однако, реализация этого алгоритма требует большое количество итераций, которое может существенно возрасти для некоторых видов траекторий движения РО. Исследования показали, что указанный алгоритм эффективен только в основном на этапе планирования траекторий движения ММ.

В работах [16-18] предлагается использовать метод структурного синтеза

систем функционального управления динамическими объектами. Синтез оптимальных регуляторов в указанных работах осуществляется на основе декомпозиции систем, для которых определяется специальная функция, обеспечивающая оптимальное по быстродействию достижение цели, и соответствующее управляющее воздействие с учетом вводимых ограничений на координаты систем. Затем строится субоптимальное управление, которое формируется с помощью введения в релейный элемент гистерезиса или линейного участка для учета смены знака управляющего воздействия при попадании системы на линию переключения. Недостатком этого метода является то, что он применим только в том случае, когда управляющие воздействия изменяются скачкообразно.

В работе [33] рассмотрен алгоритм аналитического синтеза оптимального по быстродействию программного управления системой взаимосвязанных исполнительных приводов упругого ММ. Для реализации этого алгоритма строится двухуровневая СУ, в которой вначале по координатам начального и конечного положения РО ММ в декартовой СК формируется программная траектория его движения, а затем вычисляются управляющие моменты, задающие оптимальные по быстродействию программные режимы движения исполнительных приводов всех степеней подвижности ММ. Недостатком указанного подхода является то, что при формировании управляющих моментов не учитывается динамика исполнительных электроприводов и, как следствие, - ограничения по входным напряжениям и токам в якорных цепях.

В работе [22] 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 СК, в которой перемещается РО. Более того, по мнению самих же авторов, полученный ими закон управления обеспечивает минимальную длительность

переходного процесса только при ступенчатых входных сигналах, которые вообще не используются при контурном управлении ММ.

В работе [37] также рассматриваются оптимальные по быстродействию СУ ММ, обеспечивающие движение их РО вдоль заданных траекторий с максимально возможными скоростями, определяемыми кинематическими схемами этих ММ, а также видом задаваемых траекторий. Однако высокая трудоемкость предлагаемого метода, видимо, не позволит обеспечить его эффективное использование в РМВ для сложных ММ с числом степеней подвижности больше двух.

По результатам проведенного исследования в целом становится ясно, что большинство из рассмотренных выше подходов и методов могут эффективно использоваться только тогда, когда траектории движения РО ММ представляют собой прямую, дугу окружности или их сочетание. Для построения этих траекторий можно использовать сплайны (см., например, [60, 70, 77, 116, 131, 132]). Но ввиду необходимости использования больших вычислительных ресурсов решить поставленную задачу, как правило, удастся только для манипуляторов с малым количеством степеней подвижности и без учета динамики их исполнительных электроприводов.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в настоящее время задача формирования максимально возможной скорости движения РО ММ по сложным криволинейным пространственным траекториям с помощью относительно легко реализуемых СУ еще далека от своего эффективного решения. При этом определяющим в процессе проектирования таких СУ является учет возможного входа исполнительных электроприводов ММ за ограничения по току и напряжению.

1.4 Постановка задачи

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 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.

Поставленную в диссертации проблему повышения скорости движения (производительности) ММ планируется решить с учетом особенностей работы исполнительных устройств при изменении параметров их нагрузки. Вначале предполагается разработать метод синтеза адаптивных СУ, которые с использованием амплитудных частотных характеристик систем по мере изменения параметров ОУ будут обеспечивать максимально возможную

скорость их движения без снижения заданной динамической точности управления. Затем разработанный метод планируется применить для синтеза систем формирования входных сигналов для электроприводов ММ с целью обеспечения движения их РО с максимальной скоростью без появления перерегулирований при подходе к объектам работ. И, наконец, планируется создать метод формирования максимально высокой скорости движения РИ по произвольным пространственным траекториям с учетом реально существующих ограничений сигналов по току и входному напряжению всех исполнительных приводов ММ. Последовательное выполнение всех этих трех этапов позволит создать обобщенный подход к синтезу адаптивных СУ ММ, обеспечивающих движение их РО на предельно возможных скоростях с максимально возможной производительностью без снижения качества выполняемых ТО.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, НАСТРАИВАЮЩИХСЯ ПО АМПЛИТУДНЫМ ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Как было отмечено в главе 1, большинство существующих методов управления манипуляторами не позволяет формировать скорость движения их РО по задаваемым траекториям, а предпринимаемые ранее попытки создания таких СУ приводили к существенным вычислительным затруднениям. Для решения этой задачи во второй главе диссертации разрабатывается метод синтеза адаптивных СУ манипуляторами с переменными параметрами.

Из теории автоматического управления известно [35], что при увеличении амплитуды и частоты входного сигнала динамическая точность реальных систем автоматического управления с падающей АЧХ уменьшается. В результате без использования специальных средств коррекции часто не удается повысить скорость, а следовательно, и производительность работы технологического оборудования без ухудшения качества выполняемых операций [42]. Однако, если параметры указанного оборудования, а значит и его АЧХ в процессе работы меняются, то с учетом этих изменений можно повышать частоту и амплитуду входного сигнала без ухудшения динамической точности управления даже при использовании типовых стационарных корректирующих устройств [46].

Проведенный анализ показывает, что задача создания СУ, которые с помощью достаточно простых технических средств в зависимости от текущих параметров ОУ смогли бы постоянно поддерживать максимально возможную скорость работы технологического оборудования, не ухудшая динамическую точность их управления, в настоящее время является весьма актуальной и еще не решенной.

Ниже будет рассмотрен метод синтеза легко реализуемых адаптивных СУ, которые в зависимости от текущих значений непрерывно изменяющихся

параметров ОУ с использованием их АЧХ могут поддерживать максимально возможную скорость работы манипулятора (выполнения технологических операций) без снижения заданной динамической точности управления.

2.1 Исследование особенностей работы исполнительных устройств при изменении режимов их движения и параметров нагрузки

В процессе выполнения различных технологических операций часто возникают ситуации, когда массо-инерционные характеристики (параметры) ОУ и режимы их движения изменяются в широких пределах. Причем при уменьшении параметров нагрузки на исполнительные приводы появляется возможность повышения скорости их работы без ухудшения динамической точности управления объектами с изменяющимися параметрами. В работе [35] показано, что для перемещения объектов с некоторой рабочей амплитудой A_p , частотой ω_p и динамической ошибкой ε , не превышающей величины 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. 2.1).

Цифрами 1 и 2 на рис. 2.1 обозначены АЧХ при максимальном и минимальном значениях параметров нагрузки системы, соответственно. Из рис. 2.1 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 ОУ 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. 2.1, а величина A_p не изменяется по сравнению с ее первоначальным значением, то без ухудшения динамической точности работы

2.2 Описание объекта управления

Разработка метода синтеза адаптивной системы управления будет выполнена на примере одностепенного манипулятора 1 (см. рис. 2.2), 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.

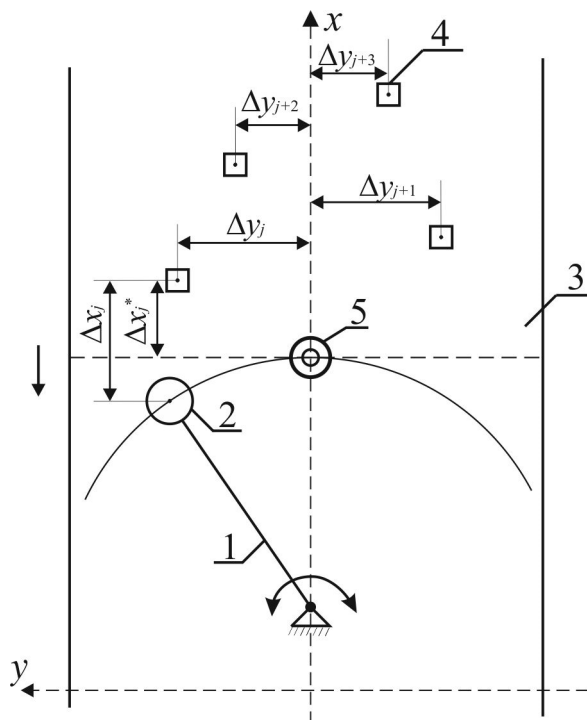


Рис. 2.2 Схема технологического процесса

В качестве исполнительных элементов для манипулятора 1 и ленты 3 (см. рис. 2.2) используются электроприводы с электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. Уравнения электрической и механической цепей этих электродвигателей имеют вид:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_{\omega} \dot{\alpha} = K_y u, \quad (2.1)$$

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

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.

Для обеспечения требуемых показателей качества работы в прямую цепь обоих электроприводов введены типовые последовательные корректирующие устройства, с передаточной функцией вида [1]:

$$W_{kl}(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}, \quad (2.2)$$

где $T_1 = \frac{1}{\omega_{cp}}$, $T_1 > T_2$, $l=1,2$. Выбор частоты среза ω_{cp} АЧХ системы и T_2 зависит от конкретных параметров электропривода и будет описан ниже. С учетом коррекции (2.2) и дифференциальных уравнений (2.1) передаточная функция разомкнутой цепи каждого электропривода будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{K(T_1 s + 1)}{s(T_2 s + 1)(T_3 s^2 + T_4 s + 1)}, \quad (2.3)$$

а АЧХ, построенная на основе передаточной функции (2.3), - вид:

$$A(\omega) = \frac{K\sqrt{1+T_1^2\omega^2}}{\omega\sqrt{(1+T_2^2\omega^2)(1+T_5^2\omega^2)(1+T_6^2\omega^2)}}, \quad (2.4)$$

$$\text{где } T_3 = \frac{LJ_\Sigma}{K_M K_\omega}, \quad T_4 = \frac{RJ_\Sigma}{K_M K_\omega}, \quad T_{5,6} = \frac{T_4}{2} \pm \sqrt{\frac{T_4^2}{4} - T_3}, \quad T_5 > T_6, \quad K = \frac{K_y}{K_\omega i_p}, \quad i_p -$$

передаточное отношение редуктора.

В процессе выполнения манипулятором различных ТО величина J_Σ может непрерывно или дискретно изменяться, принимая значения из диапазона: $J_{\min} \leq J_\Sigma \leq J_{\max}$. В работе полагается, что величина J_Σ изменяется или дискретно, или не более чем на 10% за время переходного процесса в электроприводе. В этом случае может быть использован традиционный аппарат передаточных функций [33].

2.3 Формирование рабочей частоты входного сигнала на основе кусочно-линейной аппроксимации АЧХ системы

Как уже отмечалось ранее, в процессе выполнения различных ТО величины J_Σ и A_p при движении манипулятора (см. рис. 2.2) могут изменяться. В результате (см. рис. 2.1) появляется возможность подстраивать частоту ω_p входного сигнала так, чтобы получать максимально возможную скорость выполнения ТО, не превышая величины ε_d . Из (2.4) видно, что даже для простой системы получить аналитическое выражение, описывающие зависимость $\omega_p = f(A_p, J_\Sigma, \varepsilon_d)$, весьма сложно. Поэтому вначале целесообразно линейно аппроксимировать текущую АЧХ, а затем с помощью полученной линейной зависимости по известной ординате A_p / ε_d уже находить искомую частоту ω_p .

Из рис. 2.3 видно, что аппроксимация некоторого участка АЧХ отрезком прямой (секущей), расположенной между точками с ординатами $A(\omega_1)$ и $A(\omega_2)$, приводит к тому, что при использовании этого отрезка для известной ординаты

A_p / ε_d будет найдена частота ω_p^* (см. абсциссу точки G), большая искомой частоты ω_p (абсцисса точки F на рис. 2.3). Но использование ω_p^* при формировании входного сигнала приведет к тому, что динамическая точность системы ухудшится, превысив ε_d .

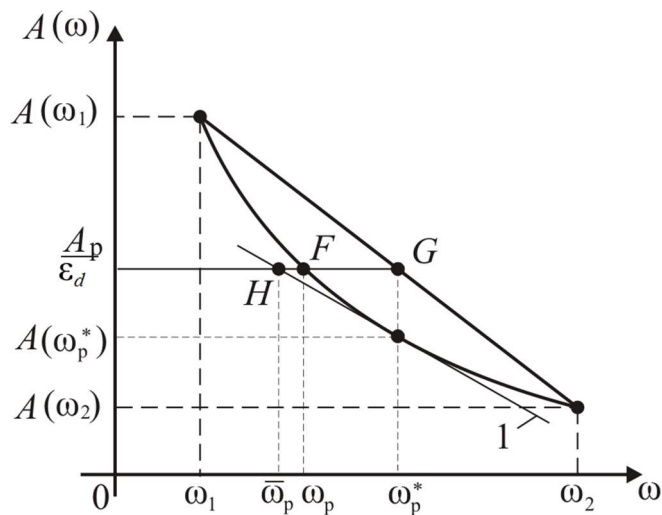


Рис. 2.3. Линейная аппроксимация участка АЧХ

Для устранения указанной негативной ситуации при поиске текущего значения ω_p в работе предлагается использовать другую аппроксимирующую прямую, которая является касательной к АЧХ системы в точке с абсциссой ω_p^* (см. прямую 1 на рис. 2.3). 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. Очевидно, что чем больше k , тем точнее будут осуществляться указанная аппроксимация и выбор ω_p . Однако исследования показали, что для многих систем вполне допустимо выбирать $k = 3$, а указанные отрезки частоты - равными. В результате по формуле (2.4) можно построить $A(\omega)$ (см. рис. 2.1) для любого значения J_Σ системы (2.1), задаться четырьмя опорными точками ($\omega_1 = \omega_{\min}$, $\omega_2 = \frac{1}{3}\omega_{\max} + \frac{2}{3}\omega_{\min}$, $\omega_3 = \frac{2}{3}\omega_{\max} + \frac{1}{3}\omega_{\min}$, $\omega_4 = \omega_{\max}$) и, используя известную формулу прямой, проходящей через две точки [9], найти уравнения всех трех секущих

$$\frac{A(\omega) - A(\omega_k)}{A(\omega_{k+1}) - A(\omega_k)} = \frac{\omega - \omega_k}{\omega_{k+1} - \omega_k}, \quad (k = \overline{1,3}) \quad (2.5)$$

где $(\omega_k, A(\omega_k))$, $(\omega_{k+1}, A(\omega_{k+1}))$ – соответственно, координаты начальной и конечной точек отрезка конкретной секущей.

Из уравнения (2.5) следует, что, если некоторая точка, имеющая ординату A_p / ε_d , находится на одной из указанных выше трех секущих, то абсцисса ω_p^* этой точки может быть рассчитана с помощью выражения

$$\omega_p^* = K_k \left(\frac{A_p}{\varepsilon_d} - A(\omega_k) \right) + \omega_k, \quad (2.6)$$

где $K_k = \frac{\omega_{k+1} - \omega_k}{A(\omega_{k+1}) - A(\omega_k)}$.

Зная величину A_p / ε_d и текущую характеристику $A(\omega)$ можно однозначно определить одну из трех секущих, которая используется в данный момент времени (см. рис. 2.1). Если $A_p / \varepsilon_d > A(\omega_2)$, то используется первая секущая

($k = 1$), если $A(\omega_3) < A_p/\varepsilon_d < A(\omega_2)$, то выбирается вторая секущая ($k = 2$), и, наконец, если $A_p/\varepsilon_d < A(\omega_3)$, то $k = 3$.

После нахождения ω_p^* по (2.6) и затем значения $A(\omega_p^*)$ по (2.4) можно определить уравнение касательной к АЧХ $A(\omega)$ в точке $(\omega_p^*, A(\omega_p^*))$ [9]

$$A(\omega) - A(\omega_p^*) = A'(\omega_p^*)(\omega - \omega_p^*), \quad (2.7)$$

где

$$A'(\omega_p^*) = K \sqrt{\frac{1 + \omega_p^{*2} T_1^2}{(1 + \omega_p^{*2} T_2^2)(1 + \omega_p^{*2} T_5^2)(1 + \omega_p^{*2} T_6^2)}} \left(\frac{T_1^2}{1 + \omega_p^{*2} T_1^2} - \frac{1}{\omega_p^{*2}} - \frac{T_2^2}{1 + \omega_p^{*2} T_2^2} - \frac{T_5^2}{1 + \omega_p^{*2} T_5^2} - \frac{T_6^2}{1 + \omega_p^{*2} T_6^2} \right) -$$

производная $A(\omega)$ (см. выражение (2.4)) в точке $\omega = \omega_p^*$, а из уравнения (2.7) - искомую частоту входного сигнала

$$\bar{\omega}_p = \frac{1}{A'(\omega_p^*)} \left(\frac{A_p}{\varepsilon_d} - A(\omega_p^*) \right) + \omega_p^* < \omega_p, \quad (2.8)$$

которая обеспечит существенное повышение быстродействия рассмотренной выше системы (см. рис. 2.2) при сохранении неравенства $\varepsilon < \varepsilon_d$ для любых значений параметров A_p и J_Σ .

2.4 Формирование рабочей частоты входного сигнала на основе упрощенного описания АЧХ

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. Эти описания в дальнейшем можно использовать для расчета изменяющихся рабочих частот входных сигналов систем при изменениях их параметров. В частности, при малой величине L имеет место неравенство $T_5 \gg T_6$. Если при этом $T_5 \gg T_1$ и $T_5 \gg T_2$, то вместо АЧХ (2.4) можно использовать ее упрощенное аналитическое описание

$$A(\omega) \approx \frac{K}{\omega \sqrt{(1 + T_5^2 \omega^2)}}. \quad (2.9)$$

Вид АЧХ, построенной с использованием выражения (2.9), показан пунктиром на рис. 2.1 (рядом с кривой 1). Из рис. 2.1 видно, что изменения в упрощенной АЧХ, построенной по выражению (2.9), по сравнению с АЧХ, построенной по выражению (2.4), начинаются намного правее рабочих частот реальных входных сигналов и практически не влияют на расчет этих частот. Таким образом, в указанном случае для нахождения ω_p вполне можно использовать выражение

$$\frac{A_p}{\varepsilon_d} = \frac{K}{\omega \sqrt{(1 + T_5^2 \omega^2)}}, \quad (2.10)$$

полученное на основе выражения (2.9). Из (2.10) формируется уравнение

$$T_5^2 \omega^4 + \omega^2 - \frac{K^2 \varepsilon_d^2}{A_p^2} = 0,$$

используемое для нахождения единственного положительного корня

$$\omega_p = \frac{\sqrt{-1 + \sqrt{1 + 4T_5^2 K^2 \varepsilon_d^2 A_p^{-2}}}}{T_5 \sqrt{2}}. \quad (2.11)$$

Из рис. 2.1 видно, что формулу (2.11) можно использовать для определения и высокочастотных ω_p , но в этом случае оценка ω_p будет несколько заниженной. Выражение (2.11) позволяет определять ω_p в РМВ при непрерывных изменениях параметров ОУ. Это удобно для практической реализации используемого алгоритма адаптации, различные модификации которого защищены патентами РФ на изобретение [29-31].

2.5 Синтез системы управления движением манипулятора и транспортной ленты

Из рис. 2.2 видно, что рабочий орган манипулятора при подаче на вход его электропривода гармонического сигнала

$$\alpha^*(t) = A_{pj} \sin(\omega_{pj} t), \quad j = \overline{1, N}, \quad (2.12)$$

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, то есть величину Δy_j относительно оси x и Δx_j^* вдоль этой оси. Технологические операции со всеми объектами выполняются только в крайних положениях манипулятора, когда он отклоняется от оси x на угол

$$A_{pj} = \arcsin(\Delta y_j / l), \quad (2.13)$$

а скорость движения его РО относительно объектов равна нулю.

Транспортерная лента начинает перемещаться на очередную дискретную величину

$$\Delta x_j = \Delta x_j^* + l(1 - \cos A_{pj}) \quad (2.14)$$

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 . Указанные циклы работы повторяются со всеми оставшимися объектами.

Перемещение ленты транспортера на расстояние Δx_j обеспечивается с учетом выражения (2.14) путем поворота ее ведущего колеса на угол

$$\Delta \varphi_j = \Delta x_j / r, \quad (2.15)$$

где r - радиус этого колеса.

Структурная схема предложенной адаптивной СУ манипулятором и конвейерной лентой показана на рис. 2.4. Здесь введены следующие обозначения: ε - сигнал динамической ошибки манипулятора; ЭП 1, ЭП 2 - электроприводы, управляющие манипулятором и транспортером, соответственно; ДП 1, ДП 2 – соответствующие датчики положения; α_1, α_2 - выходные сигналы ДП 1 и ДП 2, соответственно; Р1, Р2 - редукторы; М - манипулятор; К – ведущее колесо транспортера; ТД - телевизионный датчик; БРА - блок расчета амплитуды A_{pj} гармонического сигнала по формуле (2.13); БРТ - блок расчета угла поворота $\Delta \varphi_j$ по формулам (2.14) и (2.15); БИИ – блок идентификации J_Σ , построенный с использованием устройства, описанного в работе [42]; БРЧ - блок расчета ω_{pj} по формулам (2.8) или (2.11) с учетом

текущего значения J_{Σ} .

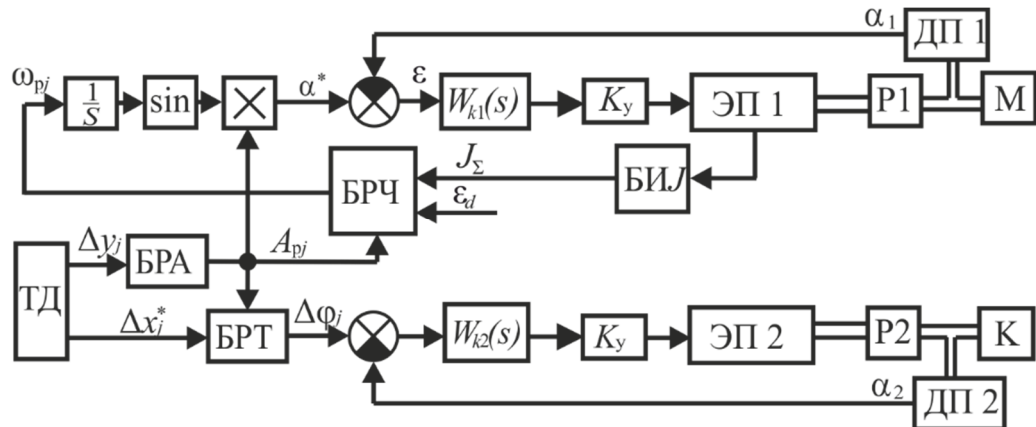


Рис. 2.4. Структурная схема адаптивной системы управления манипулятором и лентой конвейера

Отметим, что для обеспечения стабильной работы СУ манипулятором очередное изменение величины A_{pj} в выражении (2.12), если это необходимо, следует выполнять в момент, когда манипулятор совпадает с осью x , т.е. когда $\alpha^*(t) = 0$.

Поскольку в процессе работы системы частота ω_{pj} , рассчитываемая по формулам (2.8) или (2.11), изменяется скачкообразно, то при вычислении $\alpha^*(t)$ (2.12) с целью исключения скачков этого входного сигнала величину $\omega_{pj}t$ целесообразно рассчитывать с помощью интегратора, на вход которого подается ступенчато изменяющийся сигнал ω_{pj} (см. рис. 2.4).

Ниже будут представлены результаты исследования синтезированных адаптивных СУ манипулятором и транспортной лентой.

2.6 Моделирование работы синтезированных адаптивных систем управления

При моделировании исследовался процесс установки манипулятором

некоторых деталей на девять объектов, поочередно перемещаемых транспортером. Указанные детали помещались в накопитель манипулятора. Гармоническим движением манипулятора длиной $l = 0,4$ м и ведущим колесом транспортера радиусом $r = 0,1$ м управляют одинаковые электроприводы, построенные на основе электродвигателей постоянного тока. Эти приводы имеют следующие постоянные параметры: $K_y = 1500$, $K_m = 0,02$ Нм/А, $K_\omega = 0,02$ Вс, $R = 0,4$ Ом, $L = 0,004$ Гн, $T_1 = 0,024$ с, $T_2 = 0,0012$ с, $i_p = 80$ - передаточное отношение редуктора. 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, а $\varepsilon_d = 0,0015$ рад.

На рис. 2.5 показан закон изменения выходного сигнала электропривода манипулятора в процессе его работы при указанных выше изменениях J_Σ , A_{pj} и ω_{pj} , а на рис. 2.6 – законы изменения ω_{pj} этого сигнала. Цифрами 1 и 2 на рис. 2.6 обозначены частоты, рассчитанные по формулам (2.8) и (2.11), соответственно, а цифрой 3 - частота входного сигнала электропривода манипулятора в системе, не использующей адаптивные подстройки частоты. Из этого рисунка видно, что при расчете ω_{pj} по формулам (2.8) и (2.11) получаются практически одинаковые результаты, хотя с ростом ω_{pj} кривая 2 начинает проходить несколько ниже кривой 1. Причем при указанном изменении параметров нагрузки электропривода манипулятора величина ω_{pj} в адаптивной системе может повышаться более чем в 5,2 раза, значительно увеличивая производительность выполнения технологических операций.

На рис. 2.7 показаны законы перемещения ленты транспортера S и время выполнения одного цикла работ с девятью объектами при использовании адаптивных алгоритмов подстройки ω_{pj} (кривая 1), при постоянном исходном

значении ω_{pj} (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.

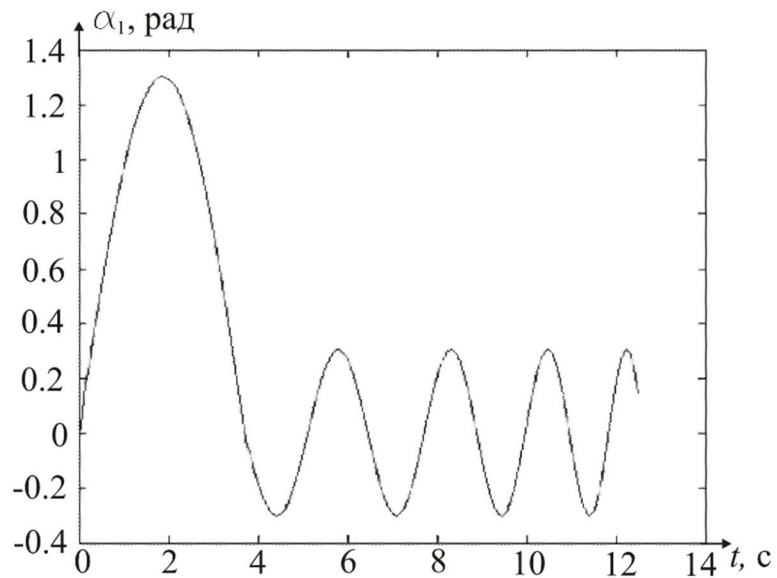


Рис. 2.5. Закон изменения выходного сигнала α_1 электропривода манипулятора

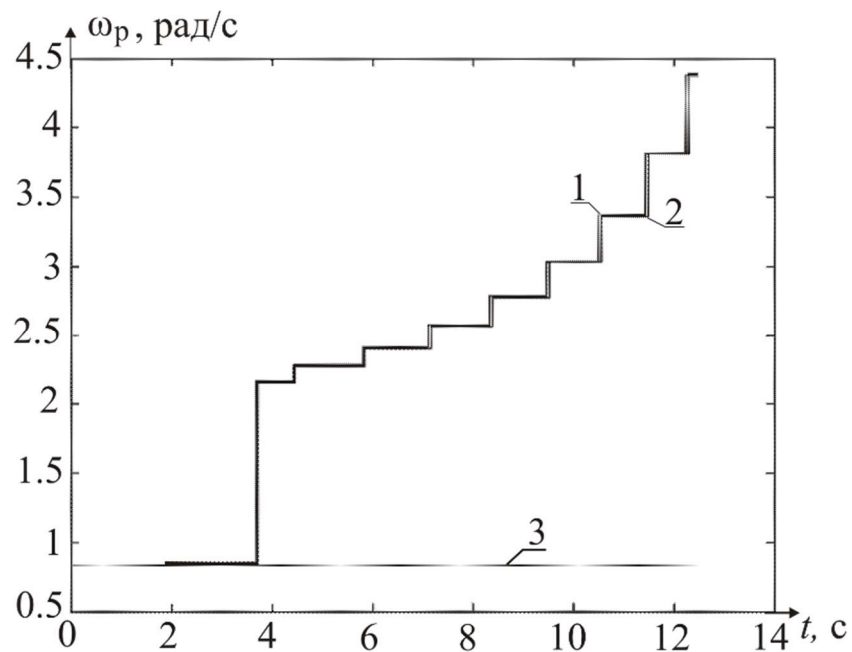


Рис. 2.6. Законы изменения ω_{pj} входного сигнала электропривода манипулятора

Горизонтальные участки кривых на рис. 2.7 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.

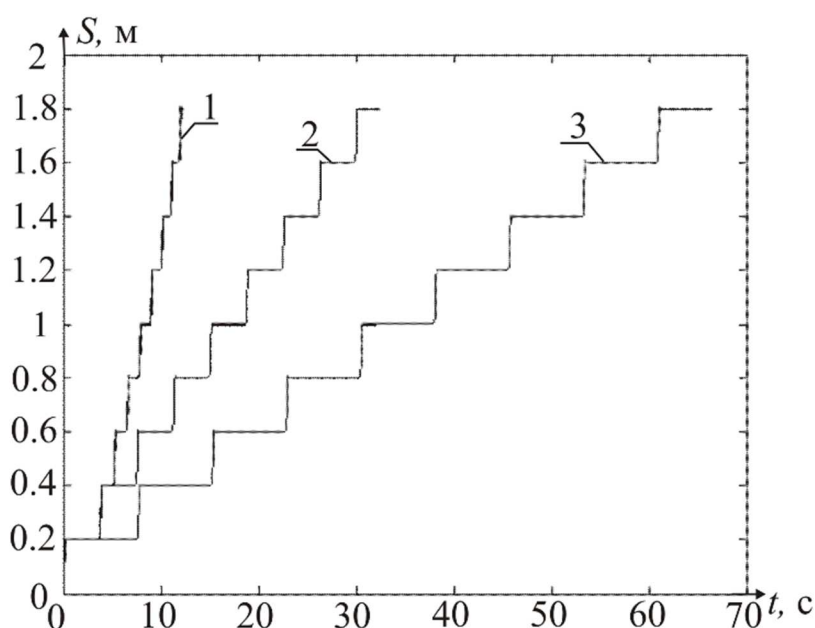


Рис. 2.7. Законы перемещения ленты транспортера при различных законах формирования управляющих сигналов

Из рис. 2.7 видно, что при гармоническом входном сигнале на входе электропривода и заданных выше законах изменения A_p и J_Σ используемая адаптивная СУ за счет повышения частоты указанного сигнала позволяет почти в 2,6 раза увеличить производительность работы используемого оборудования без превышения ε_d . Это подтверждает высокую эффективность адаптивных СУ, синтезированных на основе предлагаемых в данной работе алгоритмов определения рабочей частоты движения манипулятора.

2.7 Экспериментальные исследования синтезированных адаптивных систем управления

С целью проверки работоспособности и эффективности синтезированных на основе разработанного метода адаптивных систем управления динамическими объектами с переменными параметрами помимо математического моделирования осуществлялся анализ показателей качества их работы также и в реальных режимах эксплуатации. Для этого проводились натурные эксперименты для электропривода, управляющего перемещениями манипулятора (см. рис. 2.2), с использованием электромеханического стенда, общий вид которого показан на рисунке 2.8.



Рис. 2.8. Общий вид электромеханического стенда

2.7.1 Описание электромеханического стенда и выполненного эксперимента

Экспериментальные исследования разработанной адаптивной СУ

проводились с использованием лабораторного электромеханического стенда (см. рис. 2.8). Он содержит электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами, сервоусилитель AeroTech BA30 и три узла изменения суммарного момента инерции системы, которые обеспечивают его ступенчатое изменение. Цифровое управление стендом осуществляется с помощью ЭВМ через многофункциональную плату ввода - вывода Sensoray Model 626. С ее помощью собираются и обрабатываются все необходимые сигналы с датчиков, находящихся в стенде, а на входе сервоусилителя формируется управляющее напряжение (см. рис. 2.9).

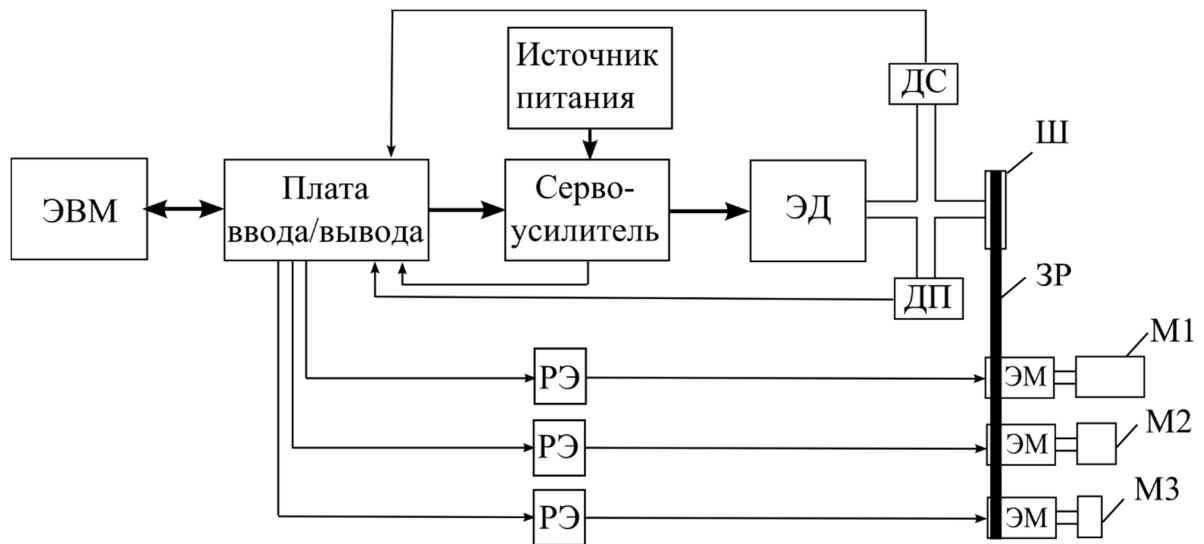


Рис. 2.9. Функциональная схема стенда

На рис. 2.9 введены следующие обозначения: ЭД – электродвигатель; ДП – датчик положения (энкодер); ДС – датчик скорости (тахогенератор); Ш – шестерня; ЗР – зубчатый ремень; РЭ – реле; ЭМ – электромагнитная муфта; M1, M2, M3 – дополнительные массы, подключаемые посредством ЭМ и обеспечивающие возможность дискретного изменения суммарного момента инерции системы. Для управления стендом используется среда MATLAB, которая позволяет быстро и просто изменять структуру и параметры используемой СУ, формировать различные режимы движения объекта

управления и сохранять результаты экспериментов. Основные характеристики лабораторного стенда представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Основные характеристики электромеханического стенда

Наименование параметра	Единицы измерения	Числовое значение
Двигатель постоянного тока		
Активное сопротивление цепи якоря	Ом	0,8
Индуктивность цепи якоря	Гн	0,0008
Коэффициент противо-э.д.с.	Вс/рад	0,225
Коэффициент усиления сервоусилителя		1,82
Коэффициент крутящего момента	Нм/А	0,225
Номинальное напряжение питания	В	56
Номинальный момент	Нм	2,7
Номинальный ток	А	12
Номинальная частота вращения	об./мин.	2000
Разрешение энкодера	имп./об.	2000
Коэффициент передачи тахогенератора	об./мин./В	50
Момент инерции вала электродвигателя и вращающихся частей редуктора	кг·м ²	0,002
Момент инерции массы 1	кгм ²	0,01
Момент инерции массы 2	кгм ²	0,005
Момент инерции массы 3	кгм ²	0,0025
Передаточное число двигатель/инерционная нагрузка	-	52/24
Сервоусилитель AeroTech BA30		
Номинальный ток	А	15
Максимальный ток	А	30
Выходное напряжение	В	160-320

Номинальная мощность	Вт	4080
Многофункциональная плата ввода/вывода Sensoray Model 626		
Цифровые каналы ввода/вывода	шт.	48
Дифференциальные аналоговые каналы ввода (14 бит)	шт.	16
Аналоговые каналы вывода (13 бит);	шт.	4
Счетчики	шт.	24

Проведенный анализ показал, что постоянная времени сервоусилителя на порядок меньше электрической постоянной времени используемого в электромеханическом стенде электропривода. Поэтому динамика усилителя не учитывалась. Также ввиду малости пренебрегалось влиянием сухого трения в рассматриваемом электроприводе.

Суть проводимого эксперимента состояла в том, чтобы с помощью синтезированной адаптивной СУ обеспечить настройку частоты задающего гармонического сигнала при изменениях режима движения электропривода (амплитуды задающего сигнала) и его параметров (суммарного момента инерции нагрузки) так, чтобы скорость его движения была максимальной, а динамическая ошибка не превышала заданного желаемого значения. Это соответствует случаю, когда рассматриваемый электропривод управляет манипулятором 1 (см. рис. 2.2), который устанавливает детали из накопителя 2 в заданные положения на транспортной ленте.

Экспериментальные исследования синтезированной адаптивной СУ проводились при задании гармонического закона изменения (в функции времени) угла поворота вала электропривода с постоянной амплитудой равной 0,3 рад во всем рабочем цикле и с переменной амплитудой, равной 1,3 рад для первой полуволны и 0,3 рад для всех последующих (см. рис. 2.5). При этом суммарный момент инерции изменялся от 0,0385 кгм² до 0,002 кгм², а допустимая ошибка составляла 0,015 рад.

2.7.2 Результаты экспериментальных исследований синтезированной адаптивной системы управления

На рис. 2.10 показаны законы изменения частоты входного сигнала при постоянной амплитуде A_p равной 0,3 рад и различных значениях суммарного момента инерции J_Σ , который во всех экспериментах с начала работы системы и до момента времени t_1 принимал максимальное значение. Кривая 1 на рисунке 2.10 соответствует случаю, когда в момент t_1 релейный элемент электромеханического стенда отключал электромагнитную муфту с М3 (см. рис. 2.9), т.е. J_Σ уменьшался на 0,00525 кг·м². При этом скорость работы увеличивалась незначительно, всего в 1,16 раза.

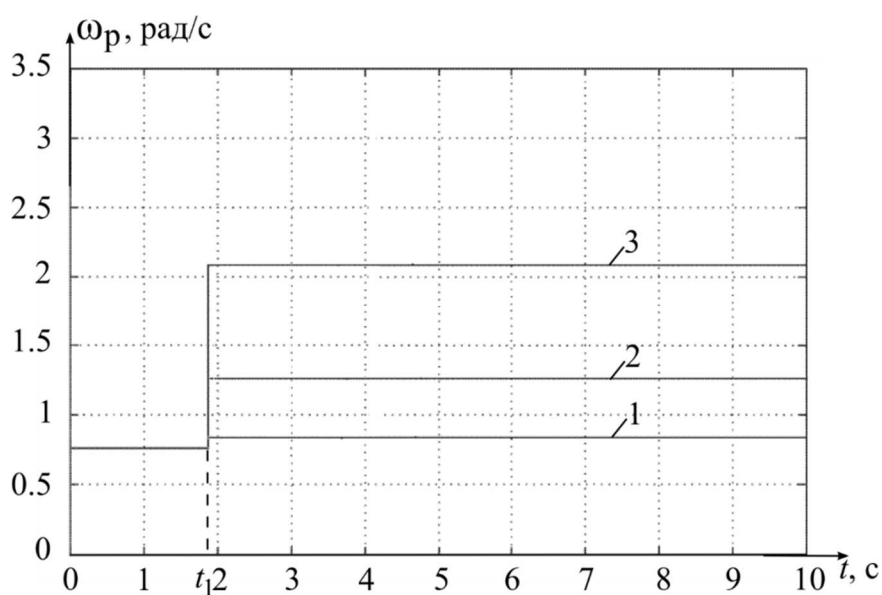


Рис. 2.10. Частота входного сигнала

Кривая 2 соответствует случаю, когда в момент t_1 были отключены М2 и М3, т.е. J_Σ уменьшался на 0,01575 кг·м², что позволяло увеличивать ω_p в 1,69 раза. И наконец, кривая 3 показывает закон изменения ω_p в случае, когда J_Σ изменялся от максимального до минимального значения. При этом ω_p увеличилась в 2,8 раза.

На рисунке 2.11 показан закон изменения ω_p в случае, когда в момент

времени t_1 отключалась МЗ, в момент t_2 амплитуда A_p уменьшалась с 1,3 рад до 0,3 рад, в момент t_3 отключалась М1 и в момент t_4 – М2, а на рис. 2.12 - случай когда в момент t_2 точно также изменялась амплитуда A_p , а в момент t_3 J_Σ изменялся от максимального до минимального значения. В результате частота входного сигнала увеличивалась в 4,1 раза, а время отработки всей траектории снижалось почти в 3 раза, по сравнению с системой, не использующей адаптивную подстройку ω_p . Динамическая ошибка при этом не превышала заданной величины 0,015 рад (см. рис. 2.13).

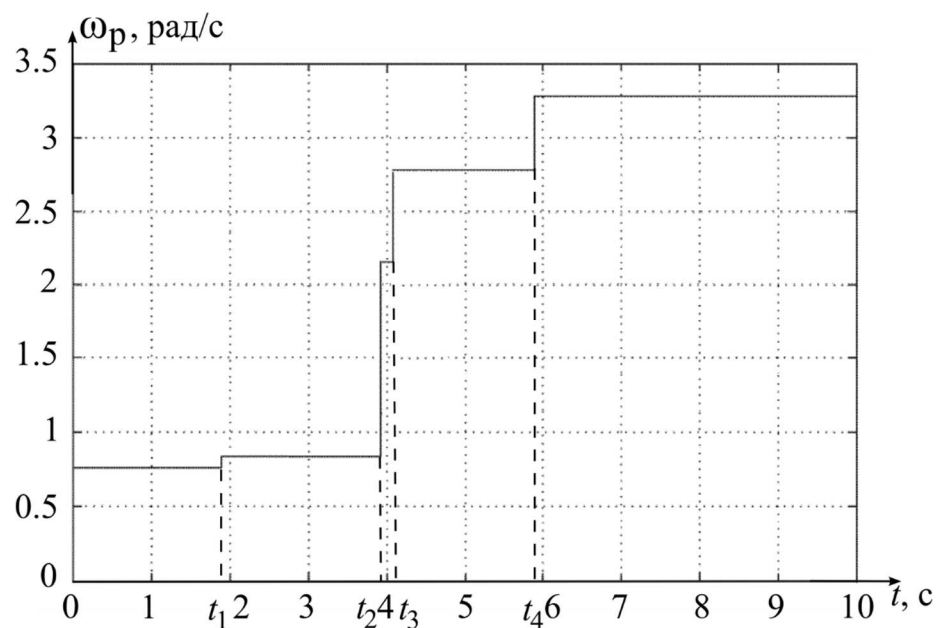


Рис. 2.11. Частота входного сигнала

Экспериментальные исследования проводились для адаптивных СУ в которых расчет величин ω_p выполнялся с использованием выражений (2.8) и (2.11). Поскольку все параметры ОУ были известны, то экспериментально реализованные системы, как и при их математическом моделировании, дали практически одинаковые результаты.

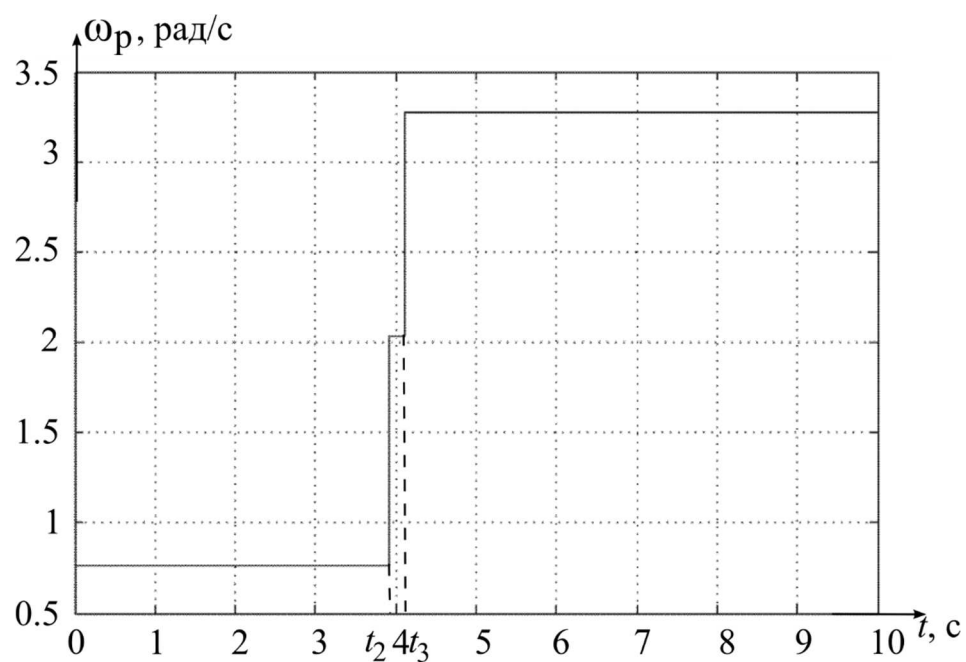


Рис. 2.12. Частота входного сигнала

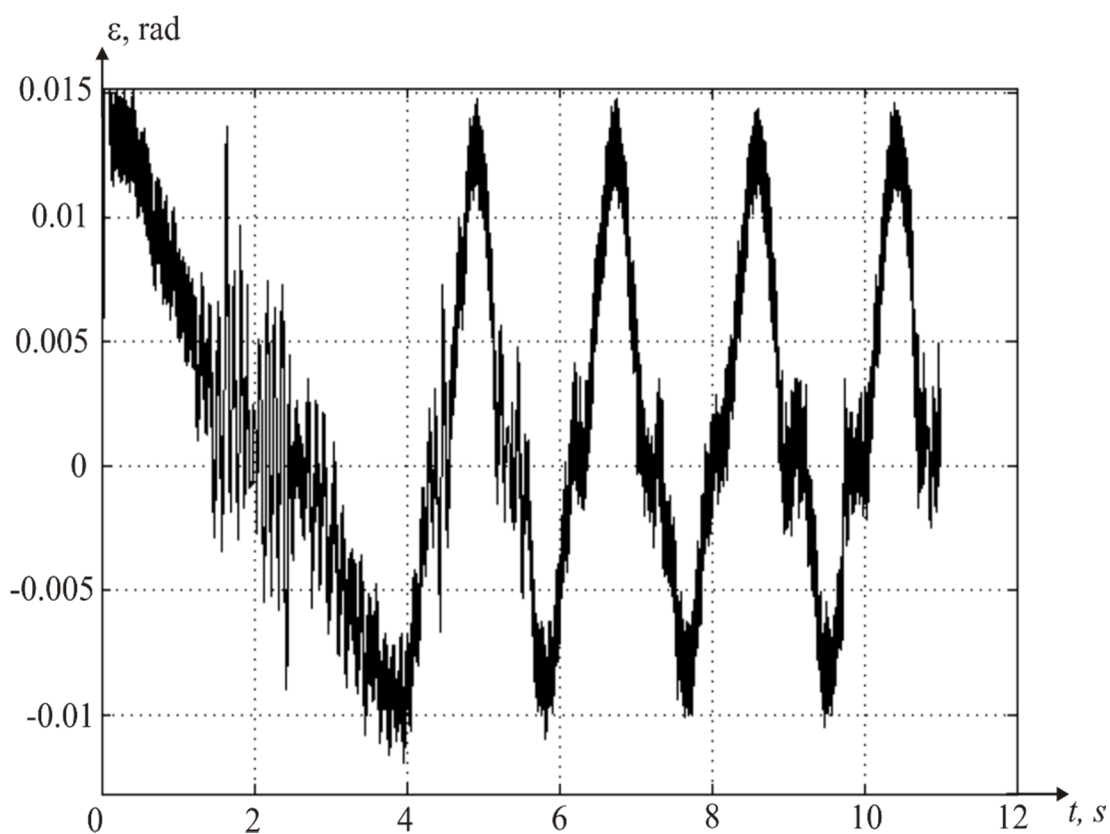


Рис. 2.13. Ошибка электропривода по положению

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что синтезированная адаптивная

система обеспечивает подстройку частоты задающего гармонического сигнала в зависимости от изменяющихся параметров и режима движения, сохраняя при этом заданную динамическую точность работы оборудования. То есть высокая эффективность синтезированной системы и высокое качество ее работы в различных режимах полностью подтвердились.

2.8 Выводы

В данной главе предложен и исследован метод синтеза адаптивных систем, предназначенных для подстройки частоты гармонического движения манипуляционных механизмов с целью повышения скорости (производительности) их работы в процессе изменения параметров нагрузки без снижения динамической точности управления.

1. Было определено, что в зависимости от текущих значений параметров ОУ и амплитуд гармонических входных сигналов без снижения динамической точности управления можно значительно изменять частоту этих сигналов.

2. Подстройка частоты управляющих сигналов осуществляется на основе АЧХ систем и может быть реализована двумя способами. В первом способе вся АЧХ разбивается на три участка. После кусочно-линейной аппроксимации и ряда дополнительных построений вычисляется искомая частота задающего сигнала. Второй способ основан на отбрасывании малых постоянных времени и получении достаточно простого аналитического описания АЧХ, которое в дальнейшем используется для быстрого аналитического расчета изменяющихся рабочих частот входных сигналов систем при изменениях их параметров. Второй способ более пригоден для практического использования.

3. Результаты моделирования и экспериментальных исследований полностью подтвердили эффективность и высокое качество синтезированных систем в различных режимах их работы. Реализация этих систем не представляет затруднений и защищена патентами РФ на изобретения [29-31].

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Согласно предложенной в первой главе последовательности разработки адаптивных СУ для расширения области их применения и достижения поставленной цели диссертации далее распространим рассмотренный выше подход для манипуляторов, имеющих несколько звеньев и несколько степеней подвижности.

ММ, используемые в современном производстве, по возможности должны выполнять рабочие операции с максимальной скоростью, а при переходе от одной детали или изделия к другому должно обеспечиваться плавное перемещение РО с его точной остановкой вблизи объектов работ без нежелательных перерегулирований, которые могут привести к поломкам РИ.

В настоящее время при формировании траекторий движения РИ точки рабочей зоны, в которых расположены детали, интерполируется сплайнами не ниже третьего порядка. А при необходимости обеспечения плавного движения этих РИ порядок сплайнов может повышаться до пятого [60, 77, 116, 131, 132]. При произвольных и постоянных изменениях координат деталей в рабочей зоне ММ вычислительная нагрузка на управляющие ЭВМ существенно возрастает. Более того, для решения поставленной задачи могут использоваться алгоритмы многопараметрической оптимизации [70], обладающие очень большой вычислительной сложностью и требующие использования мощных вычислительных средств для реализации управления в РМВ. В этом случае для сохранения требуемой точности движения РИ на всех участках траекторий устанавливаемая (постоянная) скорость их движения часто специально занижается, настраиваясь на самый неблагоприятный случай нагружения приводов на отдельных участках этих траекторий, с целью исключения брака даже тогда, когда на других участках траекторий она может быть существенно повышена. В результате резко снижается производительность работы ММ в

целом.

Во второй главе был предложен метод подстройки параметров программных сигналов движения простейшего манипулятора на основе АЧХ его приводов, обеспечивающий максимально возможную скорость движения этого манипулятора без снижения заданной динамической точности управления [8, 46, 47, 87, 88]. Этот метод можно применить и для синтеза системы формирования программных сигналов движения ММ, однако при этом необходимо учитывать кинематические и динамические особенности рассматриваемого сложного многосвязного динамического ОУ и непрерывное изменение его конфигурации в процессе выполнения требуемых технологических операций [48].

Целью третьей главы является создание метода синтеза легко реализуемых информационно-управляющих систем для ММ, которые в зависимости от текущего расположения обрабатываемых объектов должны формировать такие программные сигналы для всех электроприводов этих манипуляторов, которые будут обеспечивать движение их РО с максимально возможной скоростью и заданной динамической точностью. При этом подход к объектам работ должен совершаться плавно и без перерегулирования.

3.1 Синтез самонастраивающихся систем для стабилизации параметров электроприводов многозвенных манипуляторов на номинальном уровне

Разрабатываемый метод синтеза системы формирования программных сигналов в данной главе будет рассмотрен на примере двухступенного манипулятора 1 (см. вид сверху на рис. 3.1), совершающего технологические операции с объектами 2, расположенными на неподвижной паллете 3, которая находится в рабочей зоне манипулятора. Каждый рабочий цикл в рабочую зону этого манипулятора подается новая паллета с расположением объектов, отличным от предыдущего. Во многих случаях технологические операции со

всеми объектами выполняются только тогда, когда скорость движения РО ММ относительно них становится равной нулю. Телекамера 4 находится над паллетом и позволяет определять текущее расположение всех объектов на ней (координаты x_j и y_j в абсолютной СК Oxy , где N – количество объектов на паллете, $j = \overline{1, N}$).

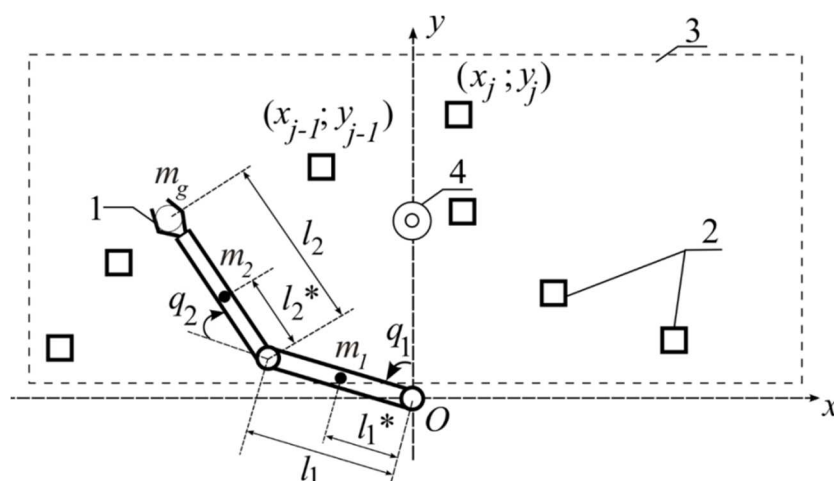


Рис. 3.1. Схема технологического процесса (вид сверху)

Кинематическая схема манипулятора 1 совпадает с кинематической схемой ММ типа SCARA (см. рис. 3.2), где все звенья руки расположены в горизонтальной плоскости, а их вращение осуществляется вокруг вертикальных осей.

Для использования метода, описанного в главе 2, необходимо иметь ОУ с постоянными параметрами, поэтому все параметры ОУ перед применением этого метода необходимо заставить стабилизировать на некотором номинальном уровне с помощью самонастраивающихся корректирующих устройств. Для указанной цели можно использовать подход структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления, который использует методы, специально разработанные для электроприводов ММ [2, 42, 43, 51, 55, 57].

Согласно этим методам вначале необходимо получить аналитические зависимости для обобщенных моментов, действующих на каждую степень

подвижности ММ в процессе перемещения его РИ (см. рис. 3.1) по заданным траекториям. Указанные зависимости несложно найти с помощью уравнения Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial(T - \Pi)}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial(T - \Pi)}{\partial q_i} = P_i, \quad (i = \overline{1, n}),$$

где T - полная кинетическая энергия манипулятора с РИ; Π - полная потенциальная энергия манипулятора с РИ; $L = (T - \Pi)$ - функция Лагранжа; q_i - обобщенные координаты ММ; $\dot{q}_i$ - производная его обобщенных координат; P_i - обобщенные силы (моменты), создаваемые в i - м сочленении ММ для реализации заданного движения i -го звена; $i = \overline{1, n}$ - номер сочленения ММ; n - число его степеней подвижности.



Рис. 3.2. ММ с кинематической схемой типа SCARA

Кинетическая и потенциальная энергии рассматриваемого ММ (см. рис. 3.1) имеют вид:

$$T = \frac{1}{2} \{ J_{n1} + m_1 l_1^{*2} + m_2 l_1^2 + m_g l_1^2 \} \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} \{ J_{n2} + m_2 l_2^{*2} + m_g l_2^2 \} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \\ + l_1 (m_2 l_2^* + m_g l_2) \cos q_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2); \quad (3.1)$$

$$\Pi = 0;$$

где J_{ni} – моменты инерции звена i относительно поперечной оси, проходящей через его центр масс; m_i – масса звена i ; m_g – масса накопителя или РИ, находящихся в РО ММ; l_i – длина звена i ; l_i^* – расстояние от шарнира вращения звена i до его центра масс.

Полный момент, развиваемый в i -ой степени подвижности ММ, перемещающего накопитель или РИ по произвольным траекториям, удобно описать в виде [5]:

$$P_i = H_i(q) \ddot{q}_i + h_i(q, \dot{q}) \dot{q}_i + M_{Ei}(q, \dot{q}, \ddot{q}), \quad (3.2)$$

где $\ddot{q}_i$ – соответствующие ускорения обобщенных координат звеньев ММ; $H_i(q)$ – компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей степени подвижности ММ; $h_i(q, \dot{q})$ – компонента кориолисовых и скоростных сил (для некоторых степеней подвижности ММ она равна нулю); $M_{Ei}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ – моментное воздействие, учитывающее гравитационные силы и эффекты взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ в процессе его движения.

Форма записи уравнения (3.2) позволяет выделить в каждом обобщенном моменте составляющие инерционных и скоростных сил движущихся звеньев, а также другие составляющие эффектов взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ. Влиянием ориентирующих степеней подвижности, расположенных вблизи РО движущегося ММ, изображенного на рис.3.1, будем пренебрегать, поскольку их силовое и моментное воздействие на его переносные

степени подвижности пренебрежимо мало. В результате выражения для компонентов $H_i(q)$, $h_i(q, \dot{q})$, $M_{Ei}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ будут иметь вид:

– для первой степени подвижности манипулятора q_1

$$H_1(q) = J_{n1} + J_{n2} + m_1 l_1^{*2} + m_2 l_2^{*2} + (m_2 + m_g) l_1^2 + m_g l_2^2 + 2l_1(m_2 l_2^* + m_g l_2) \cos q_2,$$

$$h_1(q, \dot{q}) = -2l_1(m_2 l_2^* + m_g l_2) \sin(q_2) \dot{q}_2,$$

$$M_{E1}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = [J_{n2} + m_2 l_2^{*2} + m_g l_2^2 + (m_2 l_2^* + m_g l_2) l_1 \cos q_2] \ddot{q}_2 - l_1(m_2 l_2^* + m_g l_2) \sin q_2 \dot{q}_2^2;$$

– для второй степени подвижности манипулятора q_2

$$H_2(q) = J_{n2} + m_2 l_2^{*2} + m_g l_2^2,$$

$$h_2(q, \dot{q}) = 0,$$

$$M_{E2}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = [J_{n2} + m_2 l_2^{*2} + m_g l_2^2 + (m_2 l_2^* + m_g l_2) l_1 \cos q_2] \ddot{q}_1 + l_1(m_2 l_2^* + m_g l_2) \sin q_2 \dot{q}_1^2.$$

Исполнительными элементами рассматриваемого манипулятора являются электроприводы постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. С учетом дифференциального уравнения электрической цепи якоря каждого электродвигателя и уравнения моментов на его валу [1], а также взаимовлияний между всеми его степенями подвижности [42, 55], i -ый электропривод можно описать уравнением

$$L_i (J_{\Sigma i} + H_i^*) \ddot{\alpha}_i + (L_i \dot{H}_i^* + L_i \dot{h}_i^* + R_i J_{\Sigma i} + R_i H_i^*) \ddot{\alpha}_i + (R_i \dot{h}_i^* + L_i \dot{h}_i^* + K_{\omega i} K_{Mi}) \dot{\alpha}_i + R_i (M_{\text{ср}i} + M_{Ei}^*) + L_i (\dot{M}_{\text{ср}i} + \dot{M}_{Ei}^*) = K_{Mi} K_{yi} u_i, \quad (3.3)$$

где $M_{\text{стр}i}$ – момент сухого трения; $H_i^* = H_i / i_{pi}^2$, $h_i^* = h_i / i_{pi}^2$, $M_{Ei}^* = M_{Ei} / i_{pi}$, $\dot{h}_i^* = \dot{h}_i / i_{pi}^2$ и $\dot{M}_{Ei}^* = \dot{M}_{Ei} / i_{pi}$ – соответствующие величины H_i , h_i , M_{Ei} , $\dot{h}_i$ и $\dot{M}_{Ei}$, приведенные к валам соответствующих электродвигателей.

Желаемое дифференциальное уравнение каждого электропривода с номинальными постоянными параметрами и стабильными динамическими свойствами имеет вид

$$L_i J_{ni} \ddot{\alpha}_i + R_i J_{ni} \dot{\alpha}_i + K_{\omega i} K_{Mi} \dot{\alpha}_i = K_{yi} K_{Mi} \tilde{u}_i, \quad (3.4)$$

где J_{ni} – номинальное значение приведенного момента инерции вала рассматриваемого электродвигателя.

Для получения закона самонастройки, обеспечивающего преобразование уравнения (3.3) с существенно переменными параметрами в уравнение (3.4) с постоянными желаемыми параметрами, воспользуемся подходом, изложенным в работе [42]. Для этого из уравнения (3.4) выразим старшую производную

$$\ddot{\alpha}_i = \frac{1}{L_i J_{ni}} [K_{yi} K_{Mi} \tilde{u}_i - R_i J_{ni} \dot{\alpha}_i - K_{\omega i} K_{Mi} \dot{\alpha}_i] \quad (3.5)$$

и подставим ее в уравнение (3.3). После этой подстановки, в предположении, что при движении i -го электропривода $\dot{M}_{\text{стр}i} = 0$ и с учетом того, что $\dot{H}_i^* = \dot{h}_i^*$, можно получить искомый закон самонастройки

$$u_i = \frac{(J_i + H_i^*)}{J_{ni}} \tilde{u}_i + \frac{2L_i h_i^*}{K_{yi} K_{Mi}} \ddot{\alpha}_i + \frac{1}{K_{yi} K_{Mi}} [L_i \dot{h}_i^* + R_i h_i^* + K_{\omega i} K_{Mi} (1 - \frac{(J_i + H_i^*)}{J_{ni}})] \dot{\alpha}_i + \frac{R_i}{K_{yi} K_{Mi}} [M_{Ei}^* + M_{\text{стр}i}] + \frac{L_i}{K_{yi} K_{Mi}} \dot{M}_{Ei}^*. \quad (3.6)$$

На основе этого закона для каждой степени подвижности ММ можно синтезировать самонастраивающиеся регуляторы [23, 24], решающие указанную задачу стабилизации параметров электроприводов рассматриваемого манипулятора.

Для обеспечения требуемых показателей качества работы соответствующих электроприводов с уже застabilизированными с помощью регуляторов самонастройки параметрами в их прямые цепи вводятся типовые последовательные корректирующие устройства с передаточными функциями вида (2.2). Выбор постоянных времени этих устройств зависит от конкретных параметров электроприводов и будет пояснен ниже.

3.2 Метод формирования программных сигналов управления для электроприводов манипуляторов

После определения координат (x_j, y_j) j -го изделия в рабочей зоне ММ 1 с помощью телекамеры 4 (см. рис. 3.1) и решения обратной задачи кинематики для ММ по методике, описанной, в работе [11], 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 1 (см. рис 3.3), соответствующих необходимому изменению соответствующих обобщенных координат, вычисленных с учетом текущего положения в плоскости каждого из рассматриваемых изделий.

Однако, как показали результаты моделирования и экспериментальных исследований (см. главу 2), при ступенчатых воздействиях приходится существенно увеличивать время выполнения каждого из этапов рабочего цикла, специально ограничивая резко возрастающий ток в обмотках электроприводов в начале движения и обеспечивая приемлемую величину перерегулирования на

конечных участках перемещения РО, которая должна находиться в заданных пределах даже при использовании простейшей последовательной коррекции вида (2.2).

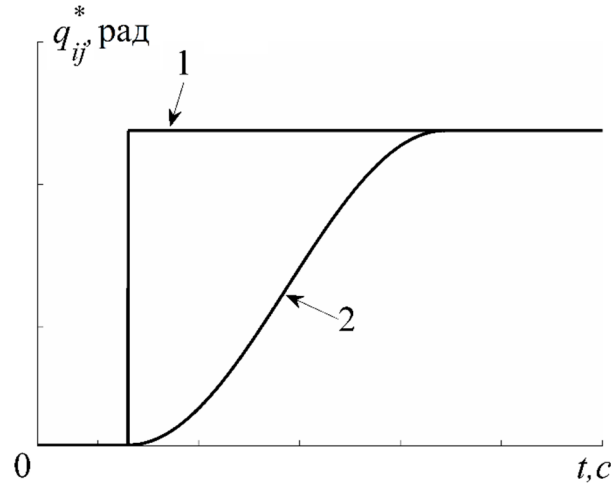


Рис. 3.3. Формы входных сигналов

Но высокое качество переходных процессов и требуемую динамическую точность в рассматриваемых системах при наличии простейших регуляторов (2.2) можно обеспечить и путем формирования программных сигналов 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 (см. кривую 2 на рис. 3.3):

$$q_{ij}^* = \begin{cases} A_{pij} (1 - \cos(\omega_{pij} \tilde{t}_j)) + \tilde{q}_{i,j-1}, & \text{если } \tilde{t}_j \leq \pi / \omega_{pij}; \\ 2A_{pij}, & \text{если } \dot{q}_{ij}^* = 0, \dot{q}_{kj}^* \neq 0, i \neq k, \end{cases} \quad (3.7)$$

где A_{pij} , ω_{pij} - амплитуды и частоты 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 РО у j -1-ого объекта. При этом полагается, что время переходных процессов во всех приводах ММ меньше времени перемещения его РО от одного объекта к другому.

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

В главе 2 было показано, что без снижения динамической точности управления частоту ω_{rij} можно изменять в зависимости от текущих значений параметров ММ и амплитуд гармонических входных сигналов, существенно повышая скорость работы и, соответственно, производительность используемого технологического оборудования без изменения структуры и параметров используемых регуляторов. При этом величины ω_{rij} для очередного перемещения РО могут рассчитываться по формулам (2.8) или (2.11)

В указанном случае при движении РО ММ от одного объекта к другому в ходе одного рабочего цикла i -ый электропривод ММ согласно выражению (3.7) будет отрабатывать часть гармонической траектории, двигаясь с максимальной частотой (скоростью). При этом каждый из двух электроприводов должен отработать угол $2A_{rij}$. Закончив свой поворот, один из них останавливается, ожидая остановки другого.

Эффективность реализации рассмотренного подхода будет исследована ниже.

3.3 Исследование работы синтезированной системы управления

При моделировании исследовался процесс установки рассмотренным ММ некоторых деталей на шесть объектов, размещенных на паллете (см. рис. 3.1) [45]. Указанные детали помещены в накопитель ММ, показанный на рис. 3.1, который имеет следующие параметры: $m_1 = 3,5$ кг, $m_2 = 3,5$ кг, $l_1 = 0,4$ м,

$l_2 = 0,45$ м, $l_1^* = 0,1$ м, $l_2^* = 0,12$ м, $J_{n1} = 0,067$ кгм², $J_{n2} = 0,067$ кгм². Масса накопителя с деталями $m_g = 0,5$ кг. Движениями звеньев ММ управляли одинаковые электроприводы, построенные на основе электродвигателей постоянного тока. Эти электроприводы имеют следующие параметры: $K_y = 800$, $K_M = 0,02$ Нм/А, $K_\omega = 0,02$ Вс, $R = 0,4$ Ом, $L = 0,004$ Гн, $T_1 = 0,07$ с, $T_2 = 0,0035$ с, $i_p = 100$.

В исходном положении ММ $q_{i0}^* = 0$, то есть все его звенья расположены вдоль оси у. Его РО (накопитель) последовательно подходит к объектам, которые располагаются на паллете в следующих точках: (- 0,7; 0,1), (-0,15; 0,65), (-0,6; 0,3), (0,1; 0,7), (0,2; 0,5), (0,1; 0,4). При этом J_Σ у каждого электропривода манипулятора при введении синтезированных самонастраивающихся корректирующих устройств [23, 24] остается неизменным и равным 0,0005 кгм², а $\varepsilon_d = 0,0015$ рад.

На рис. 3.4 показаны сформированные синтезированной системой (в соответствии с выражением (3.7) и рассмотренной методикой) входные программные сигналы электроприводов ММ (см. рис. 3.1), а на рис. 3.5 – законы изменения ω_p в этих сигналах, которые рассчитываются с помощью выражений (2.8) и (2.11) (см. ω_1^*, ω_2^* и ω_1, ω_2 соответственно). Значения ω_1^* и ω_2^* , полученные согласно выражению (2.8), незначительно отличаются от ω_1 и ω_2 , полученных по выражению (2.11). Это объясняется нахождением рабочей точки в процессе работы системы в области низких частот, где АЧХ (2.4) достаточно точно описывается упрощенным аналитическим выражением (2.9).

Из рис. 3.4 видно, что при движении к первому объекту первому звену ММ необходимо отработать почти вдвое больший угол, чем его второму звену. То есть амплитуда входного сигнала, подаваемого на первый электропривод, в два раза больше амплитуды сигнала, подаваемого на второй электропривод. Поэтому для сохранения заданной точности подхода РО к этому объекту (см. рис. 3.5) СУ, используя выражение (2.8) или (2.11), автоматически снижает частоту (скорость)

поворота первого звена. В результате второе звено, не превышая ε_d (см. рис. 3.6) и поворачиваясь на заданный угол с большей скоростью, останавливается и ждет подхода первого звена. Из рис. 3.4 также видно, что при переходе к пятому объекту уже первое звено поворачивается быстрее и ожидает подход второго.

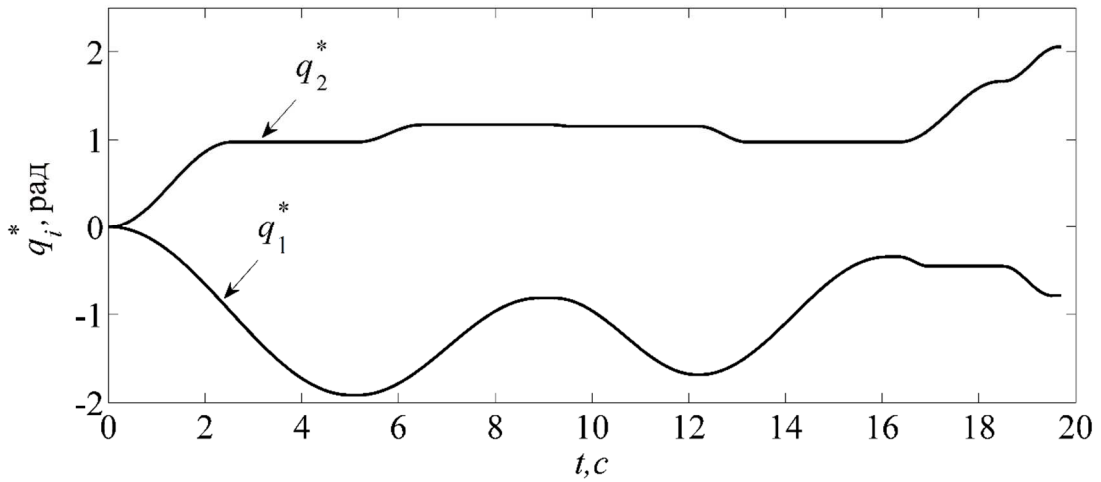


Рис. 2.4. Сформированные программные сигналы электроприводов манипулятора

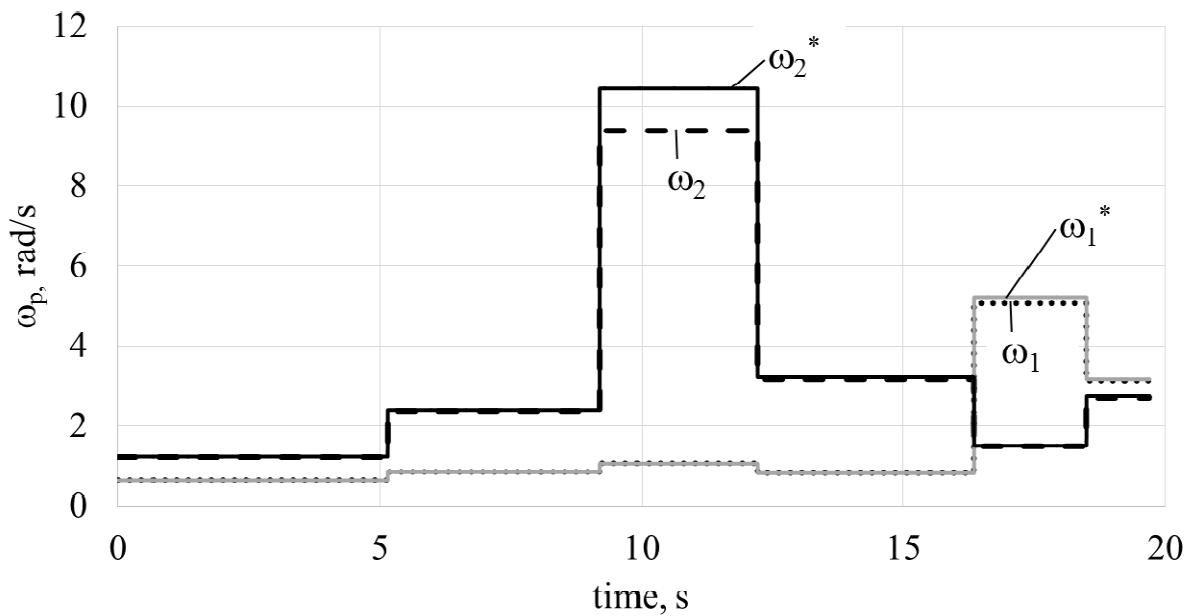


Рис. 3.5. Частоты входных программных сигналов

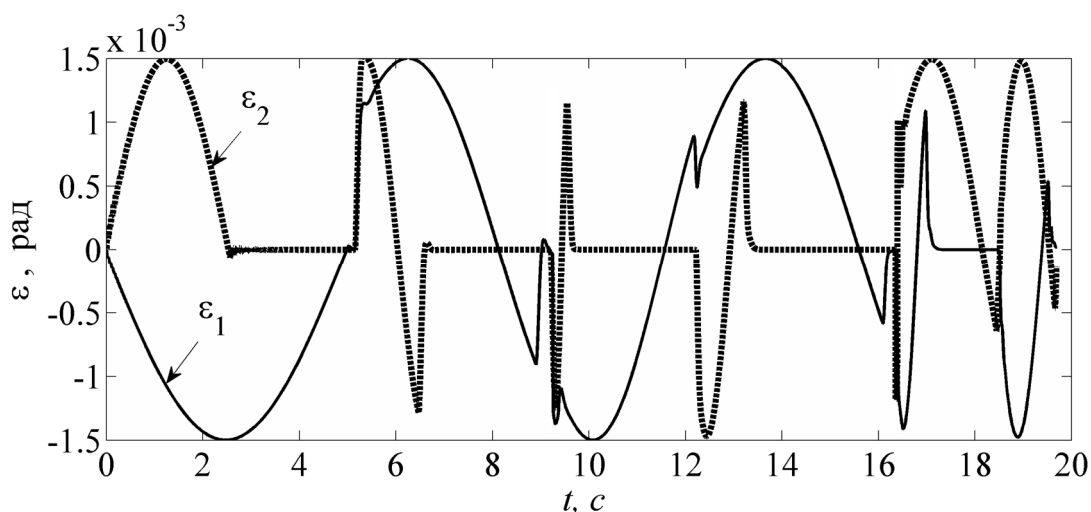


Рис. 3.6. Динамические ошибки движения электроприводов манипулятора, настройка ω_p в которых производится согласно выражению (2.11)

Следует отметить, что наибольшее увеличение (в 4-9 раз) ω_p (см. рис. 3.5) наблюдается при повороте звеньев ММ на углы менее 30 градусов. Результаты проведенных исследований показали, что при использовании во всех электроприводах рассматриваемого ММ корректирующих устройств вида (2.2) общее время выполнения работы с шестью объектами при формировании программных сигналов с помощью выражений (3.7), а ω_p по формулам (2.8) или (2.11) составляет 19,7 с.

Если ω_p выбираются постоянными с учетом заданной точности работы всех электроприводов, то время выполнения этой работы увеличивается до 30,5 с. Если же на входы всех электроприводов ММ будут подаваться ступенчатые сигналы, то с учетом того, что очередная ступенька на соответствующий привод будет формироваться только тогда, когда установившаяся ошибка ее отработки не будет превышать $\varepsilon_d = 0,0015$ рад, время выполнения указанной работы возрастает до 55 с.

То есть за счет подстройки только ω_p удастся в 1,55 раза повысить быстродействие работы ММ, а с учетом введения гармонических программных сигналов это быстродействие может быть повышено в 2,79 раза. Указанное подтверждает высокую эффективность разработанной системы, позволяющей

формировать программные сигналы электроприводов ММ в виде отрезков гармоник с переменной амплитудой и подстраиваемой частотой.

В диссертации проводились исследования качества работы синтезированной адаптивной системы формирования программных сигналов для электроприводов ММ при наличии погрешностей определения их параметров. В ходе моделирования задавались $\pm 10\%$ погрешности в определениях значений L , R , K_m , K_ω и J_Σ . Поскольку значения ω_p , рассчитанные по выражениям (2.8) и (2.11), отличаются незначительно, то далее будут представлены результаты только для адаптивных СУ, использующих выражения (2.8).

На рис. 3.7 и 3.8 показаны законы изменения ω_p для степеней подвижности q_1^* и q_2^* , соответственно, при выполнении ММ описанных выше рабочих операции. Цифрой 1 (черная сплошная линия) на этих рисунках показан закон изменения ω_p при корректно определенных номинальных значениях параметров исполнительных электроприводов, а цифрами 2 (серая сплошная линия) и 3 (серая прерывистая линия) – законы изменения ω_p , соответственно, при реально увеличенной и уменьшенной на 10% величине R по отношению к номинальной (расчетной), которая применялась при проектировании используемой при моделировании адаптивной СУ. Из этих рисунков видно, что при реально увеличенном на 10% по отношению к расчетному значению R (см. кривую 2) величины ω_p максимально уменьшаются на 5,5% по отношению к ω_p , формируемой при номинальных параметрах ОУ, что в результате приводит к повышению точности работы синтезированной адаптивной системы приблизительно на 3,3% по сравнению с заданным уровнем динамической ошибки $\varepsilon_d = 0,0015$ рад. При реально уменьшенном на 10% значении R вычисленное значение ω_p приблизительно на 5,5% больше, чем ω_p , формируемое при номинальных параметрах электроприводов. При этом происходит снижение реальной динамической точности работы рассматриваемых приводов почти на 3,3%.

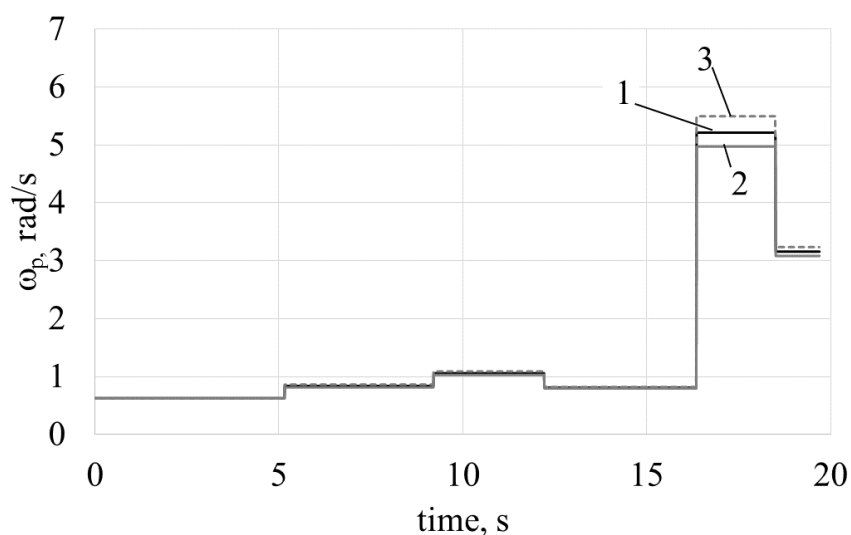


Рис. 3.7 Изменения частот входных программных сигналов для q_1^* при увеличенном и уменьшенном значении R от номинала на 10%

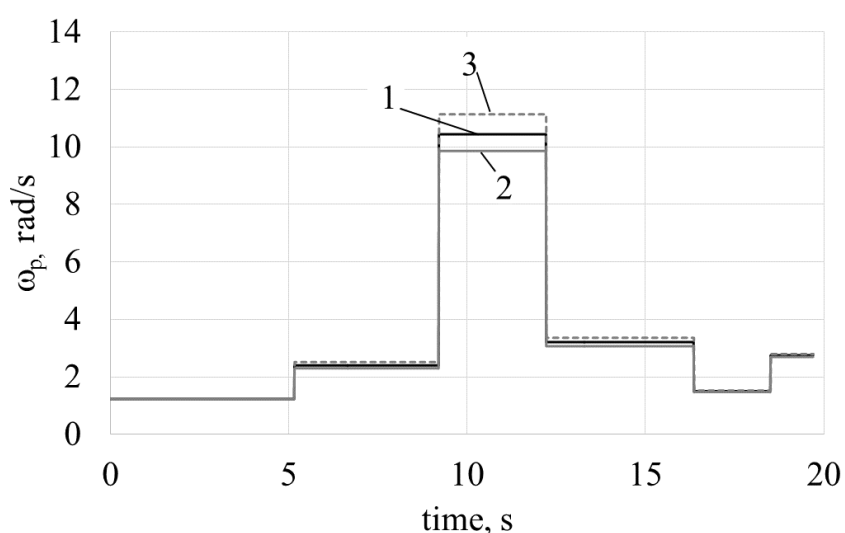


Рис. 3.8 Изменения частот входных программных сигналов для q_2^* при увеличенном и уменьшенном на 10% значении R

При увеличении (уменьшении) реальной величины J_Σ по отношению к номинальной на 10% (см. рис. 3.9 и 3.10) возникает ситуация полностью аналогичная той, которая имела место при изменениях величины R .

При увеличении (уменьшении) на 10% реального значения L по отношению к номинальному происходит весьма незначительное (не более, чем на 0,12%) повышение (снижение) значений ω_p по отношению к частотам,

формируемым при номинальных параметрах ОУ. Это обстоятельство практически никак не сказывается на точности работы синтезированной адаптивной системы.

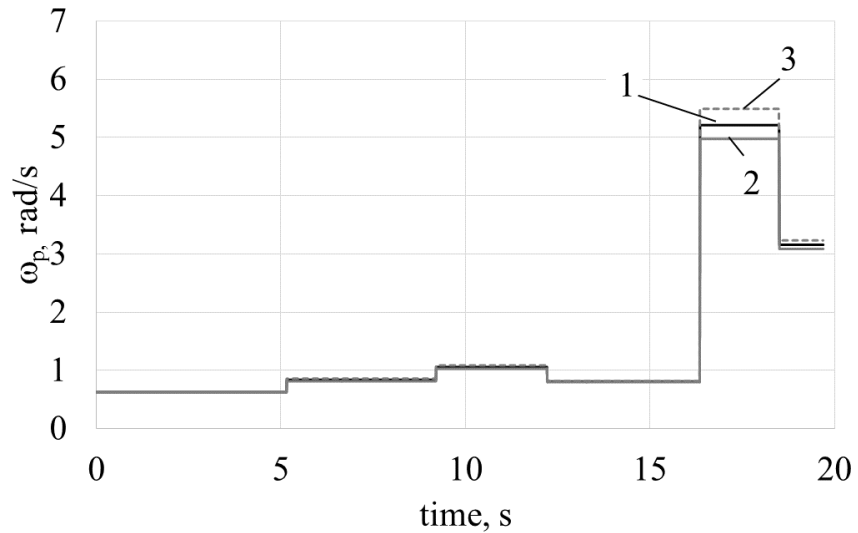


Рис. 3.9 Изменения частот входных программных сигналов для q_1^* при увеличенном и уменьшенном на 10% значении J_Σ

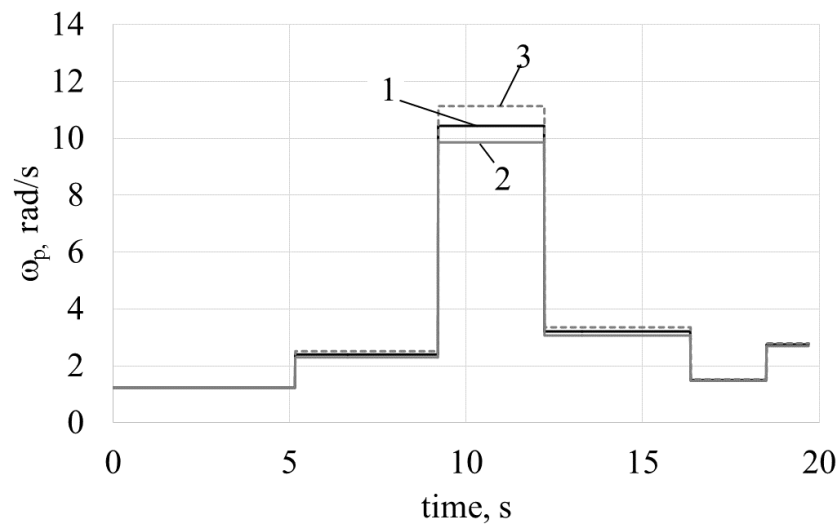


Рис. 3.10 Изменения частот входных программных сигналов для q_2^* при увеличенном и уменьшенном на 10% значении J_Σ

На рис. 3.11 и 3.12 показано влияние погрешностей определения значений коэффициентов K_M и K_ω на расчет ω_p для программных сигналов q_1^* и q_2^* . Цифрой 1 на этих рисунках, как и в предыдущих случаях, обозначены ω_p при

номинальных значениях параметров электроприводов, а цифрами 2 (серая сплошная линия) и 3 (серая прерывистая линия) – законы изменения ω_p , соответственно, при реально увеличенных и уменьшенных на 10% значениях двух коэффициентов K_M и K_ω по отношению к их номинальным (расчетным) величинам, которые применялись при проектировании используемой в процессе моделирования адаптивной СУ.

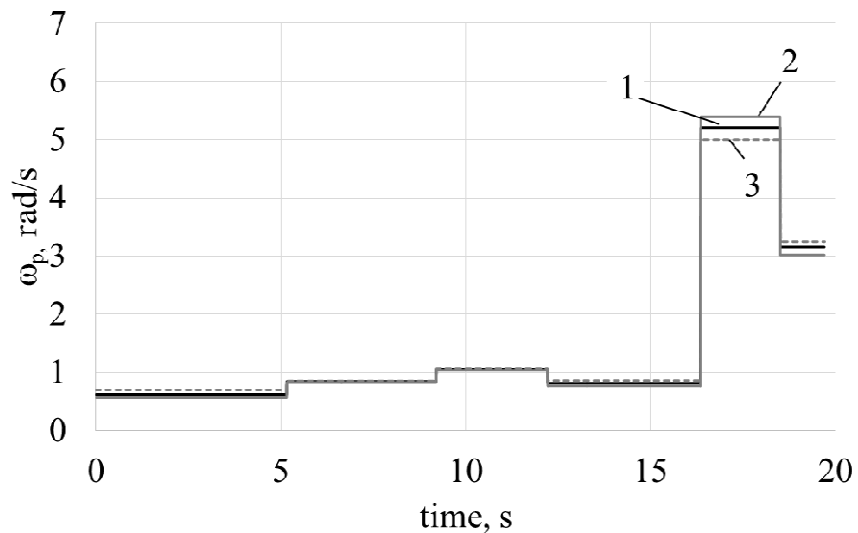


Рис. 3.11 Изменения частот входных программных сигналов для q_1^* при увеличенных и уменьшенных на 10% значениях K_M и K_ω

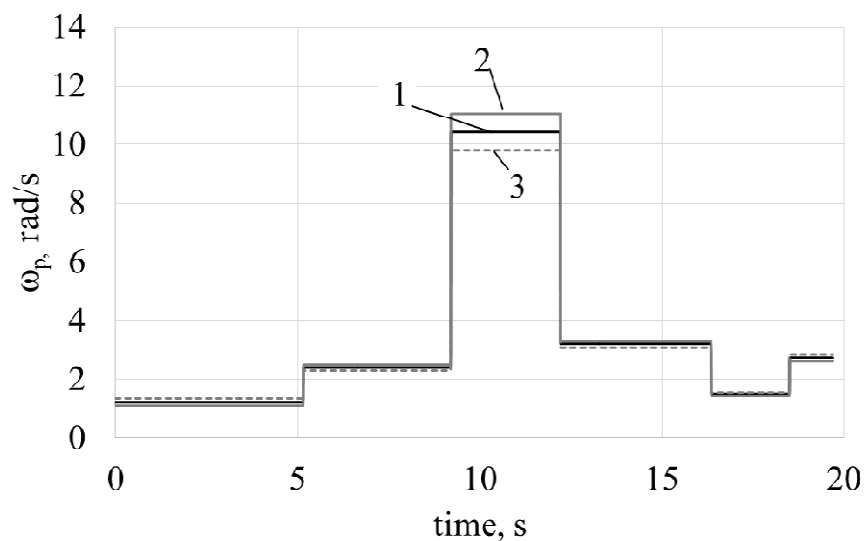


Рис. 3.12 Изменения частот входных программных сигналов для q_2^* при увеличенных и уменьшенных на 10% значениях K_M и K_ω

Из рис. 3.11 и 3.12 видно, что при реально увеличенных на 10% значениях K_M и K_ω по отношению к расчетным (см. кривую 2) результаты формирования ω_p могут почти на 10% превышать ω_p , рассчитанную при номинальных параметрах, а это может привести к увеличению динамической ошибки работы синтезированной адаптивной системы уже почти на 7%. Однако, данные погрешности (до 10%) в расчете ω_p появляются не всегда, а зависят от величины A_{rij} , которая определяется расположением объектов на паллете в рабочей зоне ММ. Исследования показали, что указанная предельная погрешность в определении ω_p происходит только при повороте звеньев ММ на углы менее 30 градусов (см. рис. 3.4).

Таким образом, выполненные исследования показали, что погрешности определения параметров исполнительных электроприводов ММ по разному влияют на величину формируемой ω_p программного сигнала и в конечном итоге на точность работы соответствующих приводов. Однако, весьма существенные погрешности в определении указанных параметров не приводят к резкому снижению качества (точности) работы ММ.

Если же для конкретных манипуляционных систем снижение точности их работы из-за погрешностей определения параметров их приводов окажется недопустимо большим, то в процессе синтеза адаптивных СУ необходимо просто на 7-10% снизить уровень задаваемой динамической ошибки ε_d . Это приведет к автоматическому снижению рассчитываемого значения ω_p и при незначительном понижении быстродействия позволит полностью исключить влияние погрешностей при определении указанных параметров на требуемую динамическую точность работы проектируемых СУ ММ.

3.4 Выводы

1. В третьей главе предложен метод построения системы формирования программных сигналов для электроприводов ММ, при отработке которых

указанные электроприводы обеспечивают движения его звеньев с максимальной скоростью без снижения заданного уровня динамической точности.

2. Показано, что при формировании входных сигналов для электроприводов ММ в виде (3.7) обеспечивается плавный подход РО ММ к объектам работ (без перерегулирования). Реализация, настройка и эксплуатация предлагаемой системы не вызывает затруднений.

3. Результаты выполненного математического моделирования полностью подтвердили эффективность и высокое качество синтезированной с помощью предложенного метода СУ для ММ в различных режимах его работы.

4. 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.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПО ПРОИЗВОЛЬНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

В данной главе рассмотрен метод синтеза адаптивных систем формирования скорости движения по произвольным траекториям РО ММ, но уже с учетом реальных физических ограничений используемых приводов. Однако, в отличие от большинства существующих методов, в которых рассматриваются в основном ограничения на управляющие моменты, а траектории представляют собой прямые линии или дуги окружностей, здесь будет полностью учтена динамика электроприводов ММ. Более того, синтезируемые с помощью предложенного подхода системы будут иметь простую практическую реализацию.

Ранее уже отмечалось, что для увеличения производительности манипуляционного оборудования необходимо, чтобы все технологические операции выполнялись на предельно высоких скоростях, но при этом качество выполняемых операций должно оставаться на требуемом уровне [52-54, 56]. В настоящее время уже разработано большое количество методов синтеза СУ, которые могут обеспечить ММ высокую динамическую точность при быстром перемещении по всем участкам сложных пространственных траекторий (особенно с большой кривизной), но только при условии, когда все их 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 и каналами управления без входа в насыщения. 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 аварийных ситуаций. Для устранения этих

ситуаций при использовании традиционных СУ приходится снижать программную скорость движения РИ ММ по заданным траекториям, уменьшая производительность их работы даже в тех случаях, когда все их приводы на многих участках заданных траекторий еще имеют значительный запас мощности для управления.

В результате задача формирования скорости движения РИ ММ по траекториям с целью повышения производительности их работы с учетом возможного входа их отдельных электроприводов в насыщения по-прежнему является актуальной и все еще нерешенной.

Целью данной главы является 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.

4.1 Описание подхода к построению адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора

Как было отмечено выше, задачей разрабатываемых адаптивных СУ является обеспечение предельно быстрого движения РИ ММ по задаваемым траекториям, при котором ни один из используемых электроприводов не входит в насыщение или в зону существенной нелинейности, сохраняя высокую динамическую точность управления. То есть это предельно быстрое движение РИ ММ по произвольным пространственным траекториям с помощью синтезированной СУ, непрерывно формирующей режим этого движения, должно поддерживаться таким, при котором один или несколько его электроприводов постоянно должны находиться на конечных участках их линейных зон в преднасыщенном состоянии [49, 50, 85, 86]. При этом заданная динамическая точность управления указанными движениями ММ в целом

должна определяться качеством СУ электроприводов каждой степени подвижности ММ, постоянно работающих в их линейных зонах.

Для решения поставленной в данной главе задачи предлагается использовать следующий подход к построению адаптивной системы формирования скорости движения ММ.

1. Вначале для придания каждому электроприводу перемещающегося ММ свойства инвариантности показателей качества работы к эффектам взаимовлияния между всеми его степенями подвижности (для стабилизации их параметров, а следовательно, и коэффициентов уравнений, которыми они описываются, на номинальном уровне) в СУ каждым электроприводом вводятся СКУ, синтез которых подробно описан в работе [42].

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, указанными в работе [35].

3. Далее решается обратная задача кинематики [11, 60], 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 по методу, описанному в работе [98].

5. И, наконец, строится алгоритм формирования предельно возможной скорости движения РИ ММ, который будет рассмотрен ниже.

На рис. 4.1 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.

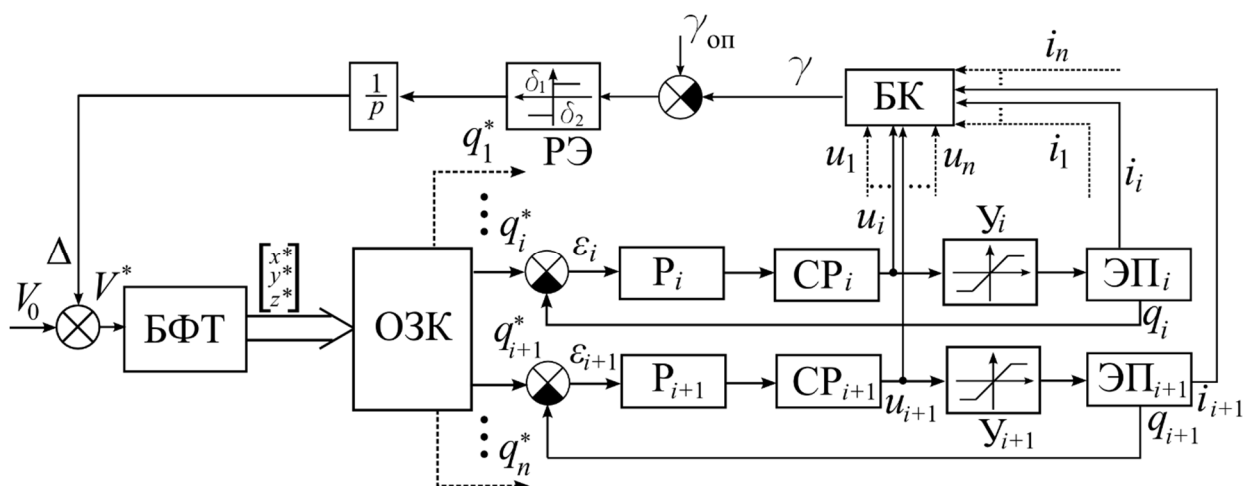


Рис. 4.1. Схема адаптивной системы формирования предельно возможной скорости движения РИ ММ

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^* (подробное описание работы этого блока дано в работах [59, 98]); x^* , y^* , z^* – программные значения положения РИ ММ в декартовой СК; ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики, формирующий программные значения q_i^* входных сигналов для всех электроприводов ЭП_{*i*} ММ; СР_{*i*} – самонастраивающиеся регуляторы; Р_{*i*} – типовые регуляторы; У_{*i*} – усилители; p – символ дифференцирования; ε_i – ошибки следящих электроприводов всех степеней подвижности ММ; u_i – сигналы на входах соответствующих усилителей; i_i – токи якорной цепи электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами или с независимым возбуждением; 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; $\gamma_{\text{оп}} = \text{const}$ – опорное значение.

При движении РИ ММ по задаваемой пространственной траектории допустимая величина результирующей динамической ошибки этого движения обеспечивается введением в прямую цепь каждого электропривода ММ двух

регуляторов P_i и CP_i с учетом того, что все эти электроприводы работают в их линейной зоне без входа в насыщение.

Пока все электроприводы ММ работают в линейной зоне, т.е. выполняется неравенство $|\gamma_{оп}| > |\gamma|$, а разность $\gamma_{оп} - \gamma$ положительна, согласно схеме, изображенной на рис. 4.1, 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 $|\gamma_{оп}| < |\gamma|$, 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, подбираясь посредством моделирования.

Исследования показали, что для работы всех электроприводов ММ в их линейных зонах при перемещении РИ по траекториям с малой кривизной достаточно формировать γ (см. рис. 4.1) в виде:

$$\gamma = \max(|u_1|, \dots, |u_i|, \dots, |u_n|), \quad (4.1)$$

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

$$\gamma = \max(|i_1|, \dots, |i_i|, \dots, |i_n|) . \quad (4.2)$$

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 (4.2) 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 (4.1) или (4.2), зависит от кинематических характеристик ММ, 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:

$$\gamma = K_1 \max(|u_1|, \dots, |u_i|, \dots, |u_n|) + K_2 \max(|i_1|, \dots, |i_i|, \dots, |i_n|), \quad (4.3)$$

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 (4.1) или (4.2) величина $\gamma_{\text{оп}}$, 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 ($i = \overline{1, n}$), а при

выборе γ в виде (4.3) величина $\gamma_{\text{оп}}$ может уменьшаться на 20-30% по сравнению с указанными максимально допустимыми значениями $|u_i|$ или $|\dot{i}_i|$.

Таким образом, построенная схема (см. рис. 4.1) и описанный алгоритм работы адаптивной системы формирования скорости должны обеспечивать перемещение РИ ММ по произвольным гладким траекториям на предельно возможных скоростях с заданной динамической точностью, которая обеспечивается с помощью типовых корректирующих устройств 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, непрерывно удерживая эти и остальные электроприводы ММ в линейных зонах их работы без входа в насыщение.

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

Исследование разработанной адаптивной системы проводилось с использованием универсального ММ типа PUMA, показанного на рис. 4.2. Этот ММ позволяет выполнять любые операции в своей рабочей зоне [63], но в то же время является одним из самых сложных с точки зрения управления [4, 11, 60, 63].

В процессе моделирования разработанных адаптивных систем в составе указанного манипулятора учитывались только его переносные степени подвижности, а влиянием ориентирующих степеней пренебрегалось, поскольку их силовое и моментное воздействие на остальные степени подвижности движущегося ММ пренебрежимо мало.

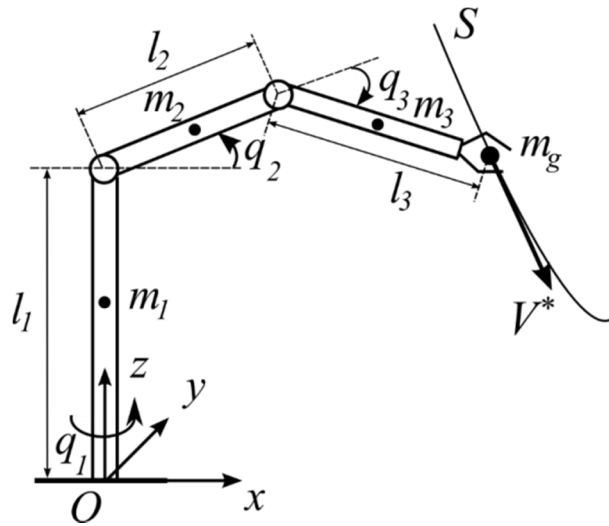


Рис. 4.2. Кинематическая схема манипулятора типа PUMA

На рис. 4.2 использованы следующие обозначения и заданы следующие параметры: $Oxyz$ – Декартова СК; S - формируемая траектория; $l_1 = l_2 = l_3 = 0,5$ м – длины звеньев ММ; $J_{s1} = 0,1$ кгм², $J_{s2} = 0,007$ кгм², $J_{s3} = 0,005$ кгм² – моменты инерции звеньев ММ относительно их продольных осей; $J_{n2} = 0,14$ кгм², $J_{n3} = 0,2$ кгм² - моменты инерции соответствующих звеньев относительно их центров масс, перпендикулярных продольным осям; $m_g = 5$ кг, $m_1 = 25$ кг, $m_2 = m_3 = 15$ кг – соответственно, массы РИ и его звеньев.

В качестве исполнительных элементов ММ были выбраны три одинаковых электропривода постоянного тока со следующими параметрами: $R = 0,5$ Ом; $L = 0,0005$ Гн; $K_\omega = 0,04$ Вс; $J = 10^{-3}$ кгм² - момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора; $i_p = 100$; $K_y = 800$; $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = -1$; $u_{\max} = \pm 27$ В - ограничение по входному напряжению.

Передаточные функции всех трех регуляторов P_i ($i = \overline{1,3}$) для трех рассматриваемых электроприводов выбранного ММ, синтезированные стандартными методами теории автоматического управления, имеют вид:

$$W_{pi}(p) = \frac{(0.128p + 1)(0.189p + 1)}{(0.0125p + 1)(0.87p + 1)}, \quad (4.4)$$

а законы самонастройки для CP_i получены аналогично тем, которые описаны в третьей главе (см. выражение (3.6)) и детально изложены в работах [25-27]. Следует отметить, что в процессе выполнения диссертации, были рассмотрены и более сложные манипуляторы, чем представленный на рис. 4.2. В частности, для манипулятора типа PUMA, но с добавленными тремя линейными степенями подвижности, обеспечивающими его перемещение в пространстве относительно обрабатываемого изделия, была синтезирована и запатентована [28] самонастраивающаяся СУ, стабилизирующая переменные параметры нагрузки электроприводов на номинальном уровне этого более сложного ММ.

В процессе моделирования сначала была исследована работа системы без настройки скорости движения РИ ММ по гармоническим траекториям, которые описываются выражениями $y(x) = 0.15\sin(6x) + 0.1$, $y(x) = 0.15\sin(14x) + 0.1$ (они на рис. 4.3 обозначены цифрами 1 и 2, соответственно), а также по круговой траектории радиусом 0.15 м, обозначенной на рис. 4.3 цифрой 3.

Далее выполнены исследования синтезированной СУ (см. рис. 4.1) этого ММ при перемещениях его РИ по тем же траекториям. При движениях РИ ММ центральная точка его основания имела постоянные координаты $O(0;0)$.

На рис. 4.4 показаны движения РИ ММ по траекториям 1 - 3 с использованием только традиционных регуляторов (4.4), когда $V^* = \text{const}$ выбиралась максимально допустимой, при которой в процессе движения РИ по всем участкам указанных траекторий величина динамической ошибки $\varepsilon_{\text{дин}}$ не превышала заданного значения. Для траектории 1 с малой кривизной $V^* = 0,37$ м/с и $\varepsilon_{\text{дин}} = 2$ мм, а для траекторий 2 и 3 с большой кривизной $\varepsilon_{\text{дин}} = 3$ мм, а V^* принималась равной 0,2 м/с и 0,17 м/с соответственно.

На рис. 4.4а – 4.4в показаны процессы изменения $\varepsilon_{\text{дин}}$ и координат x^*, y^* при перемещении РИ по траекториям 1-3, соответственно, с указанной постоянной скоростью. 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 этих рисунков видно, что в процессе перемещения РИ ММ по заданным траекториям с

постоянной V^* величины ошибок $\varepsilon_{\text{дин}}$ не превышают заданных выше значений. При этом отклонения РИ от заданных траекторий менее 1 мм.

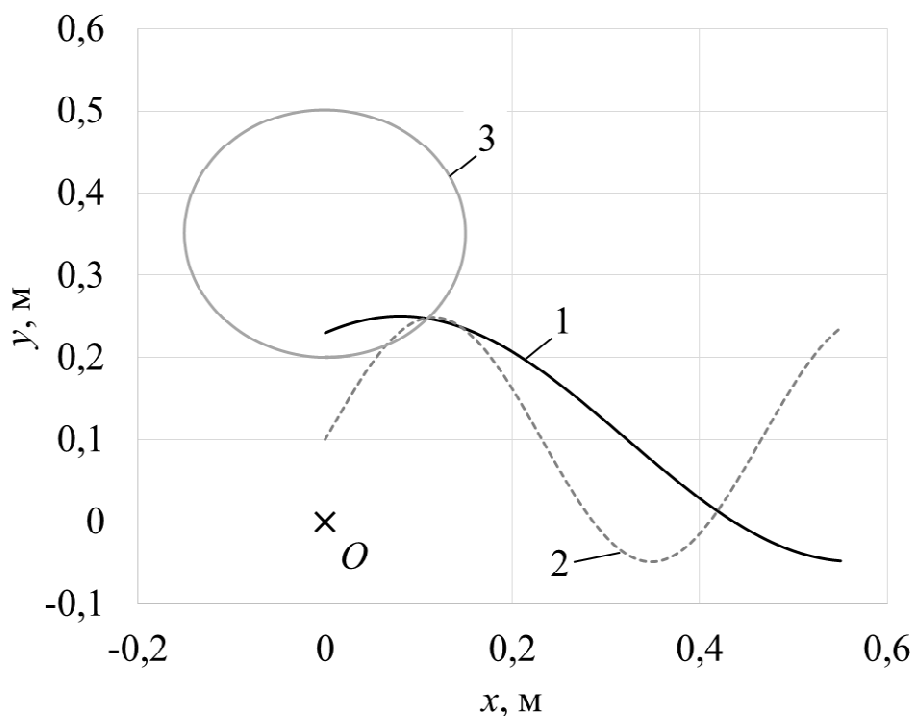
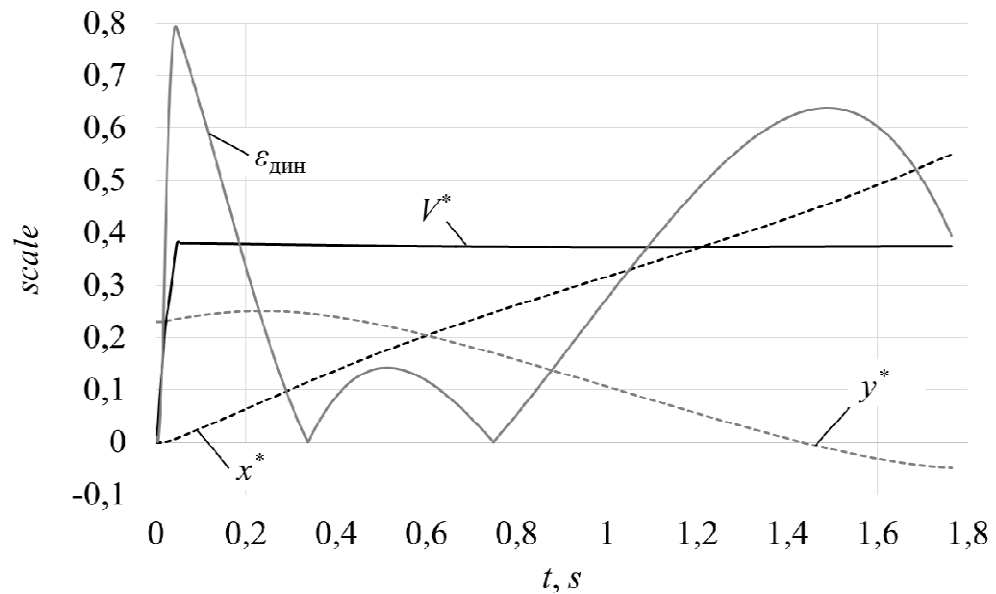


Рис. 4.3. Траектории движения РИ ММ

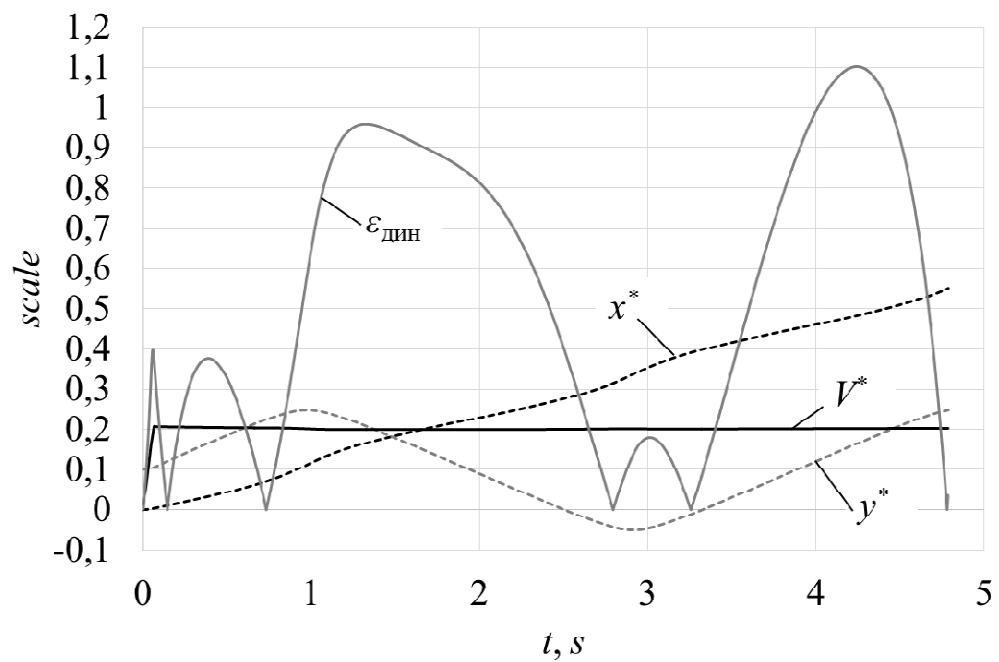
На рис. 4.5а и 4.5б, соответственно, показаны входные напряжения и токи в якорных цепях всех электроприводов ММ при выполнении РИ двух оборотов по окружности 3 (см. рис. 4.3). Из этих рисунков видно, что максимальные значения напряжений не превышает 10 В, а максимальные значения токов – 20 А. То же самое имеет место и при движении РИ по траекториям 1 и 2. То есть при указанном движении ММ еще остается довольно большой запас по токам и входным напряжениям, за счет которых можно повышать скорость движения РИ ММ по указанным траекториям. Для решения этой задачи и предназначена синтезированная система (см. рис. 4.1).

Вначале рассмотрим движение РИ ММ с синтезированной адаптивной системой по траектории 1 с малой кривизной (см. рис. 4.3), когда сигнал γ формируется с использованием выражения (4.1), а $\gamma_{\text{оп}} = 21 \text{ В}$. Из рис. 4.6 видно,

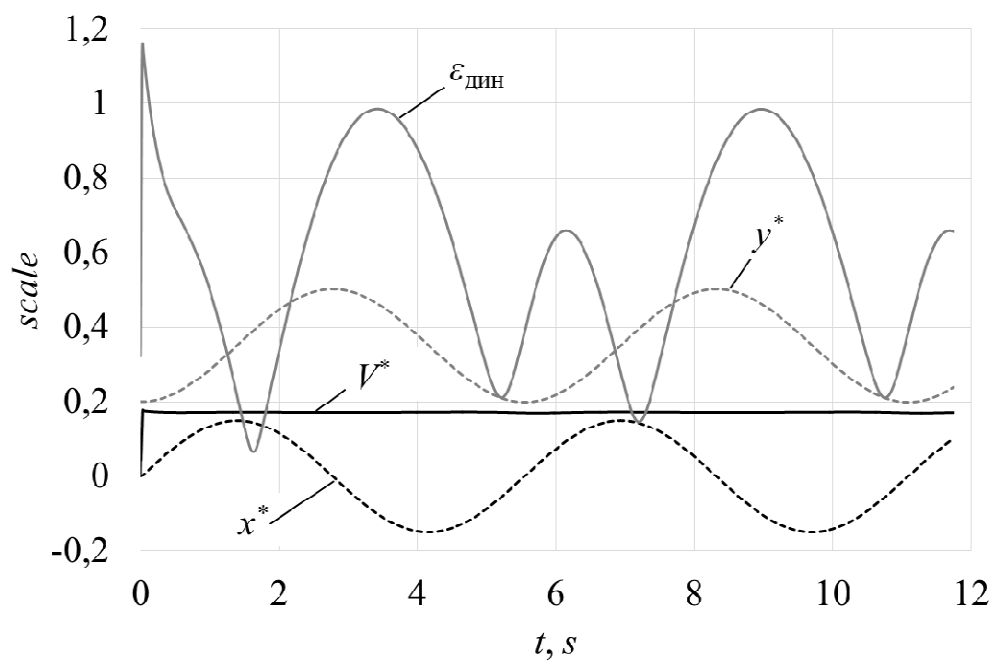
что в преднасыщенном состоянии при этом движении ММ все время находится один из его электроприводов, обеспечивая максимально допустимую скорость перемещения РИ: вначале первый (см. u_1), затем второй (см. u_2) и, наконец, третий (см. u_3). На рис. 4.7 показаны токи в якорных цепях электродвигателей ММ при работе указанной системы.



а)

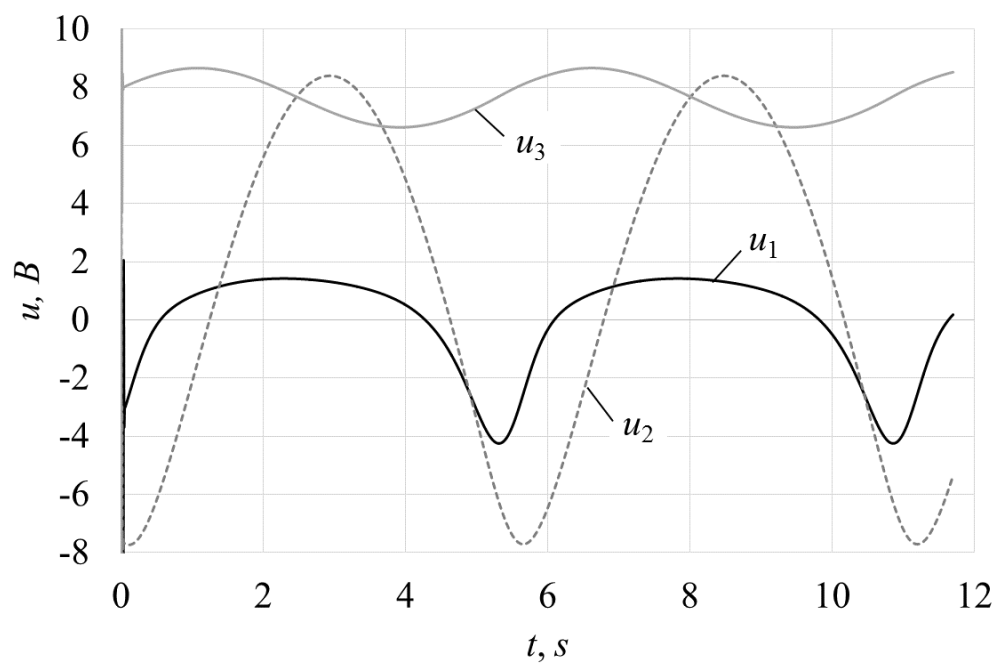


б)

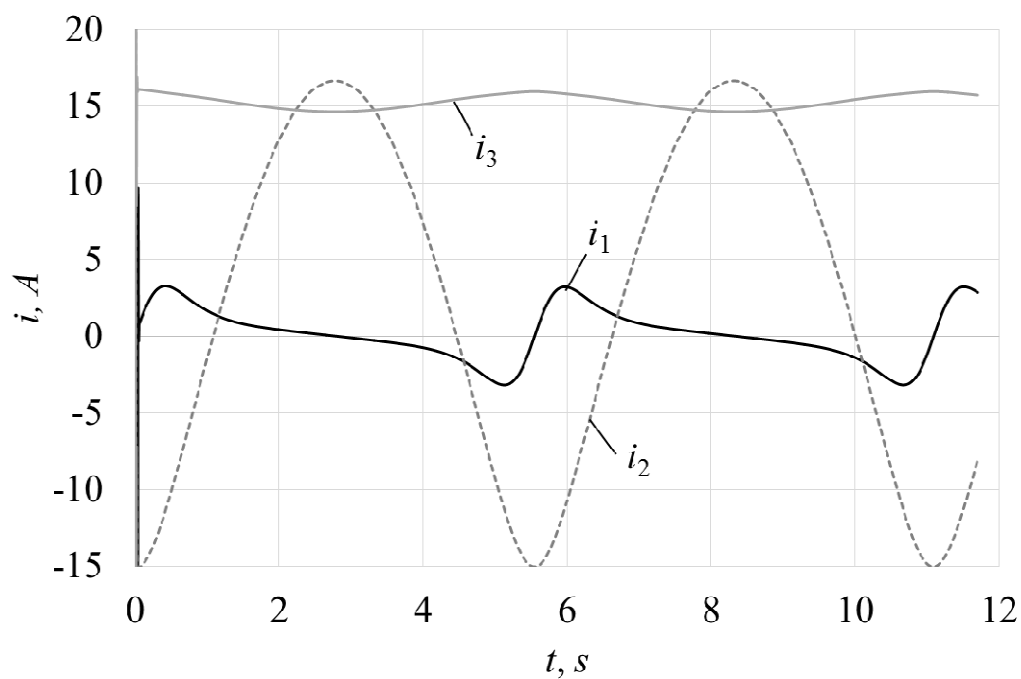


в)

Рис. 4.4. Процессы изменения y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при движениях РИ ММ по траекториям 1 – 3 при $V^* = \text{const}$.



а)



б)

Рис. 4.5. Входные напряжения и токи якорных цепей электроприводов ММ при движении РИ по окружности 3 при $V^* = \text{const}$.

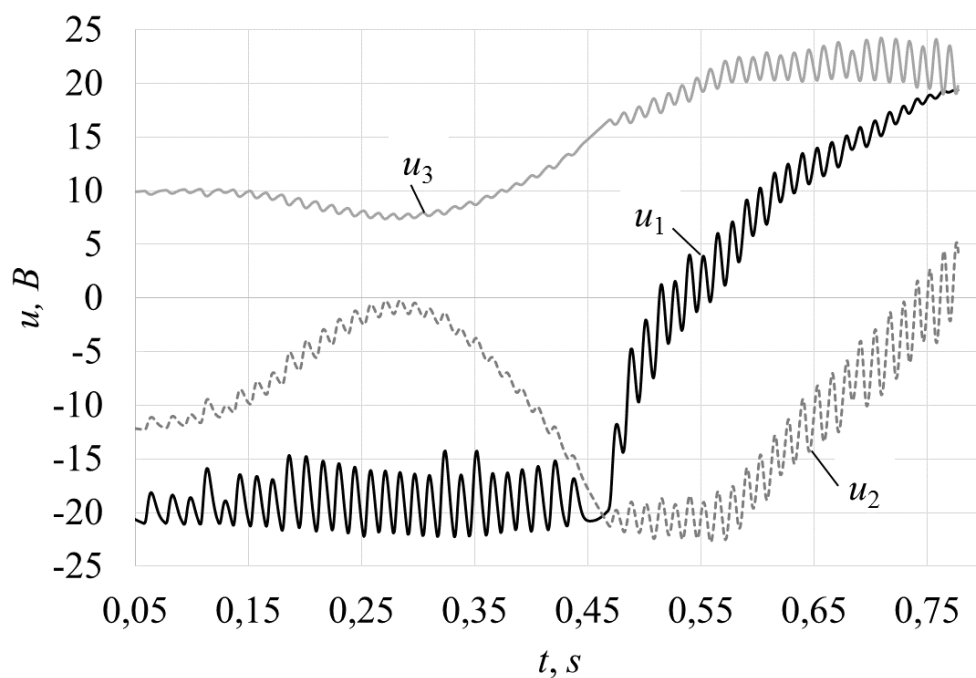


Рис. 4.6. Входные напряжения электроприводов манипулятора

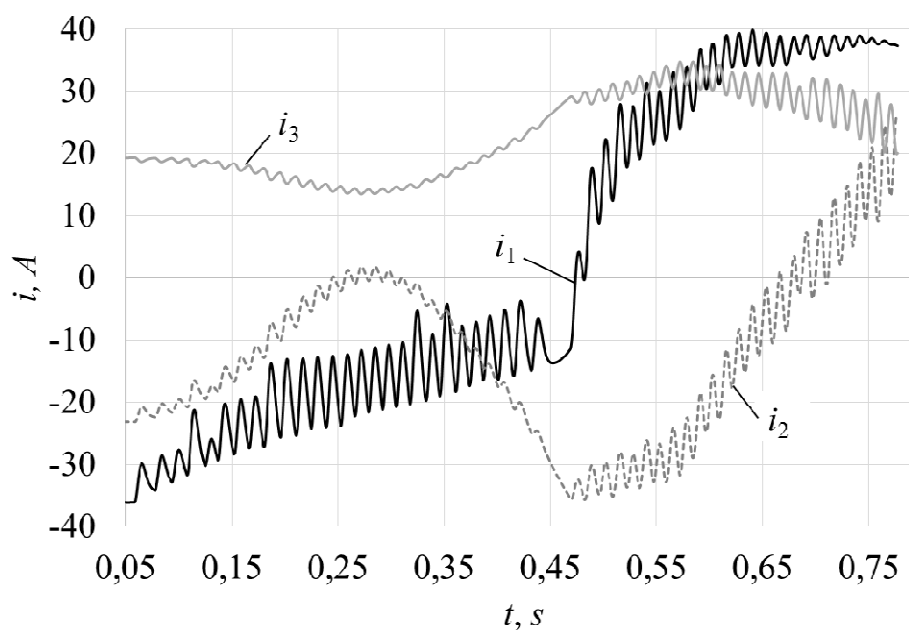


Рис. 4.7. Токи в якорных цепях электродвигателей ММ

На рис. 4.8 показаны процессы изменения V^* , y^* , x^* и $\varepsilon_{\text{дин}}$ при перемещении РИ по траектории 1. 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 $\varepsilon_{\text{дин}}$, которая не превышает 2 мм. При этом отклонение РИ от указанной траектории не превышает 1 мм.

Как было отмечено выше, максимальная постоянная скорость, при которой РИ ММ может пройти по траектории 1 без превышения $\varepsilon_{\text{дин}} = 2$ 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 (4.1), позволяет в 2,3 раза уменьшить время выполнения указанного движения.

На рис. 4.9 - 4.11, соответственно, приведены токи и входные напряжения во всех электродвигателях ММ, а также процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при движении РИ по траектории 1, но при формировании сигнала γ уже по выражению (4.2). Из рис. 4.9 видно, что токи во всех электродвигателях ММ не превышают заданного опорного значения $\gamma_{\text{оп}} = 20$ А. При этом в преднасыщенном состоянии находится вначале первый i_1 , а потом третий i_3

электродвигатель. Из рис. 4.11 видно, что в этой системе максимальная скорость движения РИ по траектории становится в 1,29 раза меньше по сравнению с ранее рассмотренной системой, а общее время выполнения всего движения увеличивается в 1,34 раза. Однако величина $\varepsilon_{\text{дин}}$ за все время работы в отличие от прежней системы не превышает 1,5 мм.

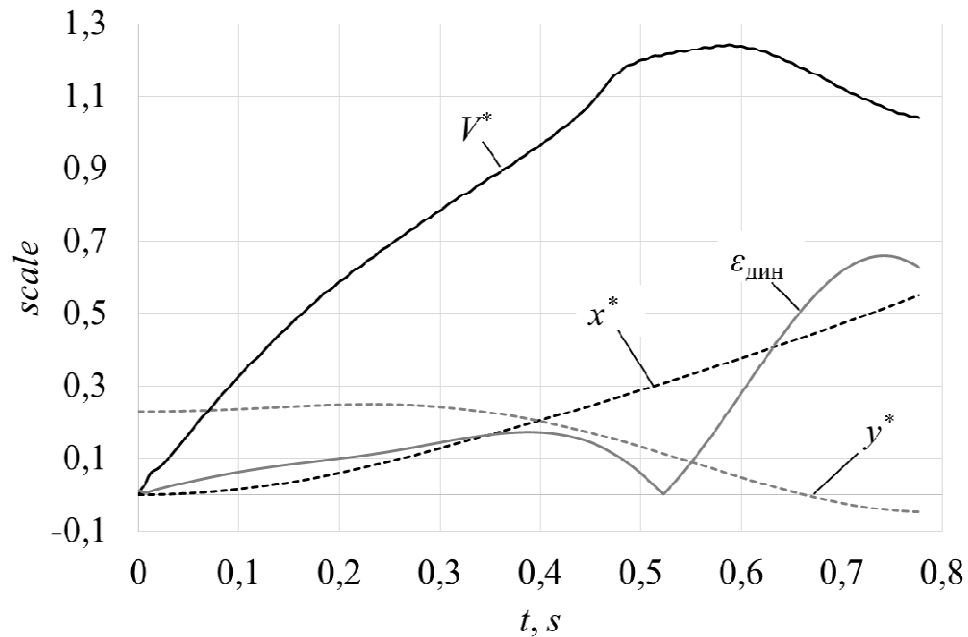


Рис. 4.8. Процессы изменения V^* , y^* , x^* , $\varepsilon_{\text{дин}}$ при определении γ по (4.1)

Уменьшение скорости движения РИ ММ по траектории при формировании γ в соответствии с выражением (4.2) объясняется тем, что в сигналах тока содержится информация о внешнем моменте на каждый электропривод, а он увеличивается (в данном случае для второго электропривода) по мере "раскладывания" ММ в процессе его движения (см. траекторию 1 на рис. 4.3).

На рис. 4.12 – 4.13, соответственно, показаны токи и входные напряжения в электродвигателях ММ при движении РИ ММ по траектории 2 (см. рис. 4.3), если γ определяется по выражению (4.2).

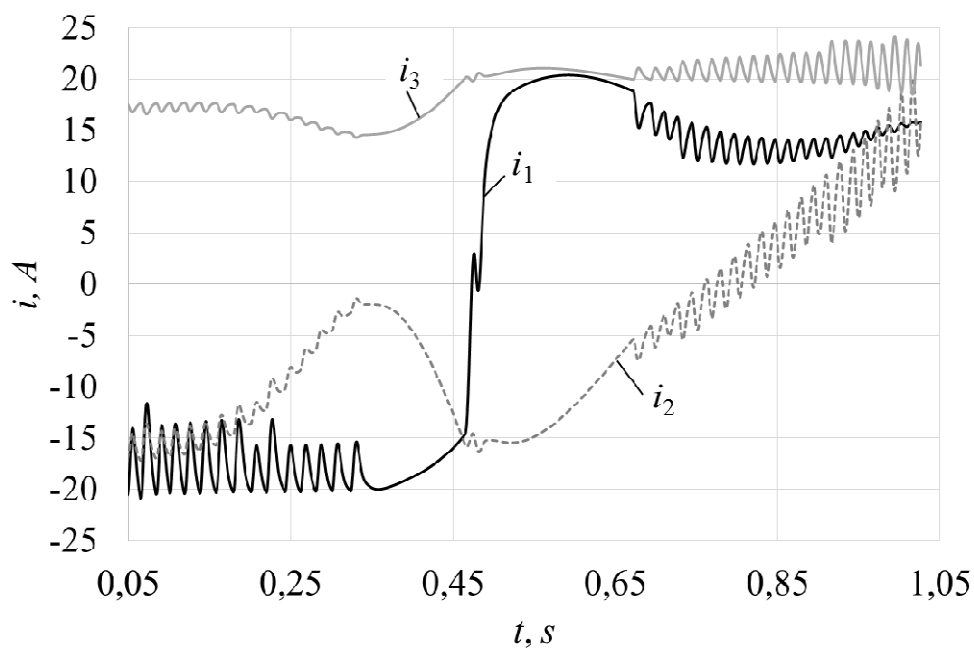


Рис. 4.9. Токи в якорных цепях электродвигателей ММ

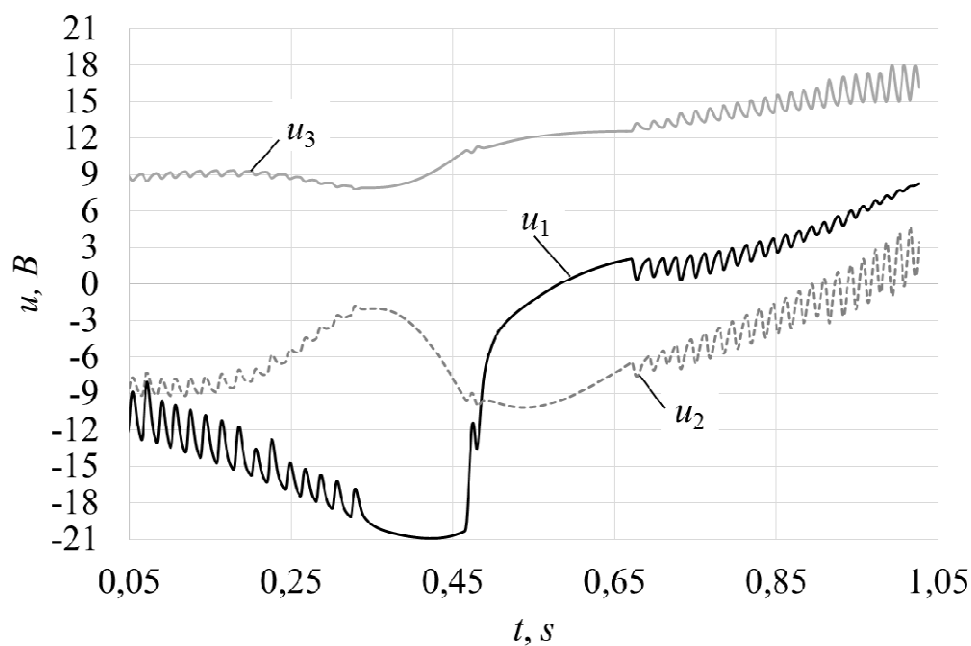


Рис. 4.10. Входные напряжения электроприводов ММ

Из рис. 4.12 видно, что адаптивная система за счет подстройки скорости постоянно поддерживает один из электроприводов в преднасыщенном состоянии. Наблюдаемые кратковременные всплески токов объясняются 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 остается менее 3 мм на скорости 0,65 м/с.

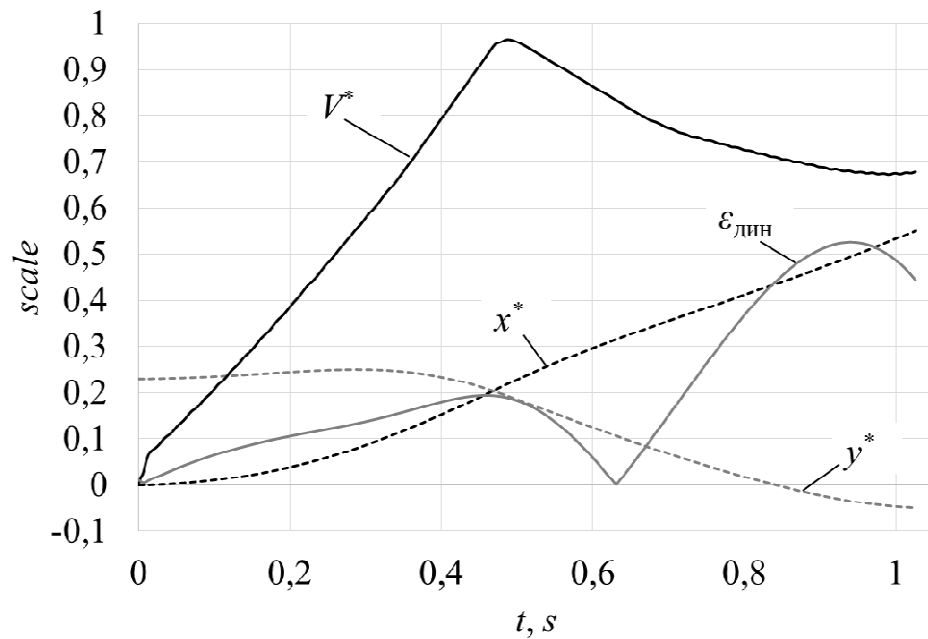


Рис. 4.11. Законы изменения $V^*, y^*, x^*, \varepsilon_{\text{дин}}$ при определении γ по выражению (4.2)

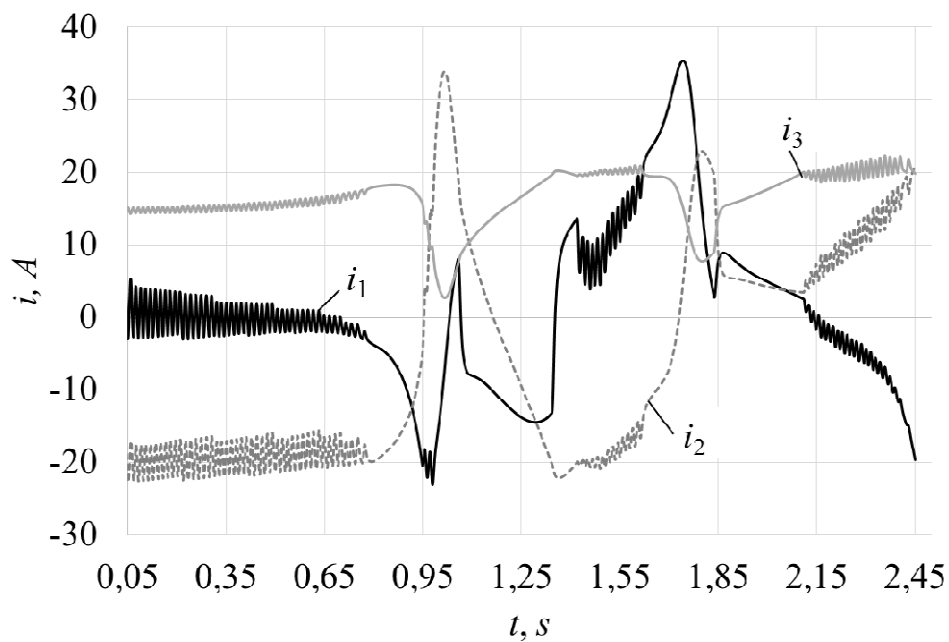


Рис. 4.12. Токи в электроприводах ММ

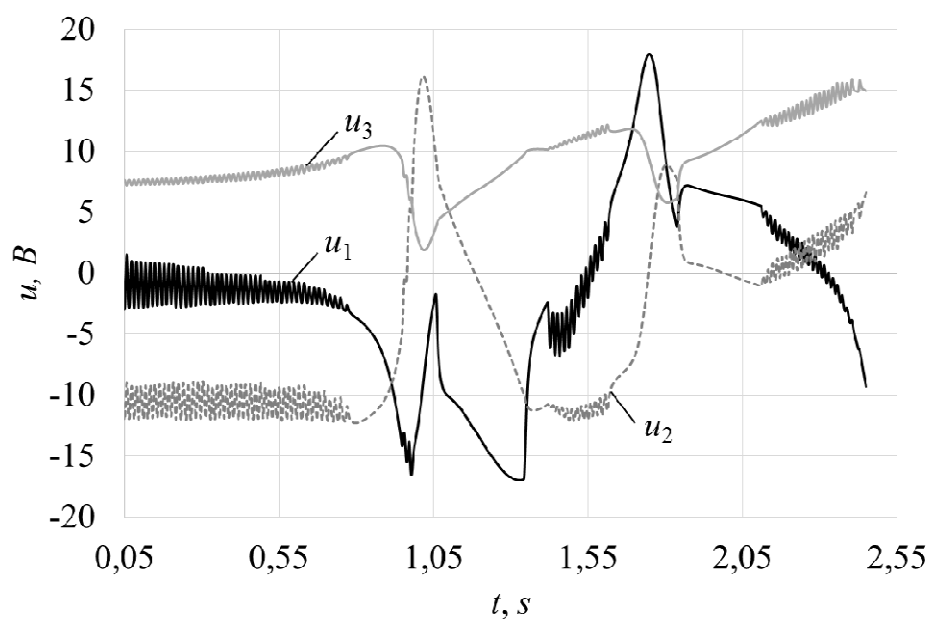


Рис. 4.13 Входные напряжения электроприводов ММ

На рис. 4.14 показаны изменения скорости $V_{(2)}^*$ РИ ММ и ошибки $\varepsilon_{\text{дин}(2)}$ в системе, формирующей сигнал γ в виде (4.2), а также $V_{(3)}^*$ и $\varepsilon_{\text{дин}(3)}$ системы, формирующей сигнал γ в виде (4.3), когда $K_1 = 2$, $K_2 = 1$, а $\gamma_{\text{оп}} = 40$, при их движениях по траектории 2 (см. рис 4.3).

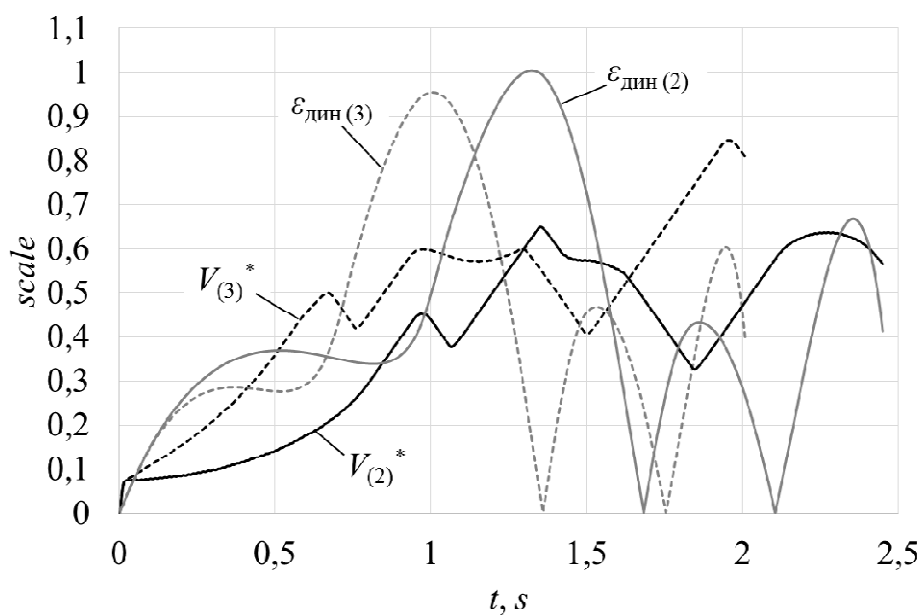


Рис. 4.14. Законы изменения $V_{(2)}^*$ и $\varepsilon_{\text{дин}(2)}$ при определении γ по выражению (4.2) и законы изменения $V_{(3)}^*$ и $\varepsilon_{\text{дин}(3)}$ при определении γ по (4.3)

Из рис.4.14. видно, что при практически одинаковой величине $\varepsilon_{\text{дин}}$ учет входных напряжений электроприводов позволяет увеличить максимальную скорость движения РИ в 1,31 раза. При этом по сравнению с системой, настраиваемой только по токам, в 1,25 раза повышается производительность работы ММ. В целом же по сравнению с системой, работающей с постоянной V^* и с тем же предельным значением $\varepsilon_{\text{дин}}$ (см. рис. 4.4б), время движения РИ ММ с по траектории 2 уменьшается в 1,92 раза при определении γ по выражению (4.2) и в 2,4 раза при задании γ по выражению (4.3).

На рис. 4.15 показаны процессы изменения $V_{(2)}^*$ и $\varepsilon_{\text{дин}(2)}$ при выполнении РИ ММ двух оборотов по круговой траектории 3 (см. рис 4.3) в адаптивной системе (см. рис. 4.1) при задании сигнала γ в виде (4.2), а также законы изменения $V_{(3)}^*$ и $\varepsilon_{\text{дин}(3)}$ при определении γ по (4.3). Из рис. 4.15 видно, что адаптивная система, учитывающая и токи, и входные напряжения, также работает быстрее системы (в 1,12 раза), использующей при настройке V^* сигнал γ вида (4.2). А ее производительность по сравнению с системой, работающей на постоянной скорости (см. рис. 4.4в), повышается в 2,43 раза.

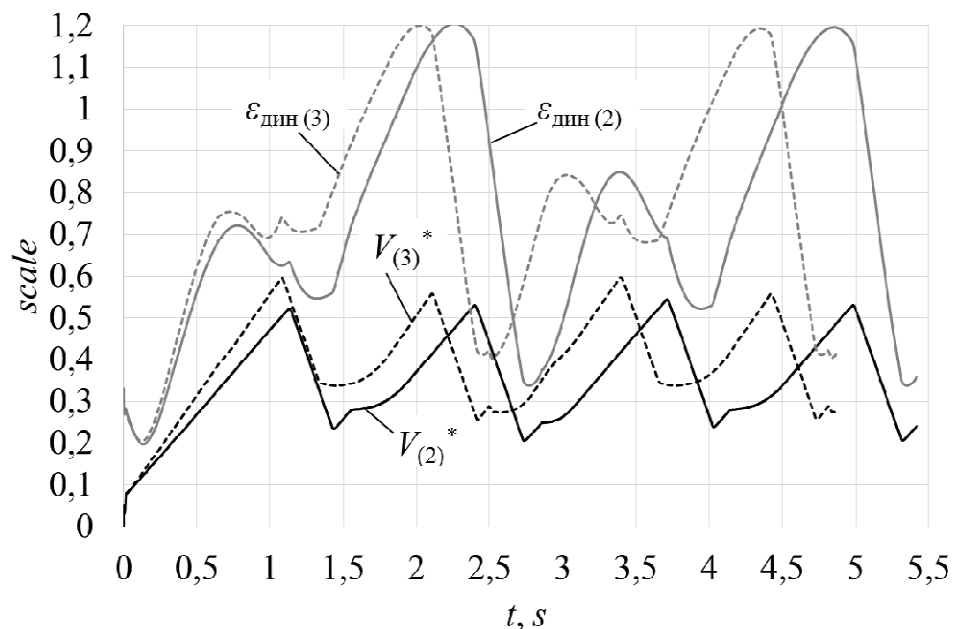


Рис. 4.15. Законы изменения $V_{(2)}^*$, $\varepsilon_{\text{дин}(2)}$ и $V_{(3)}^*$, $\varepsilon_{\text{дин}(3)}$ при движении РИ по круговой траектории и задании γ по выражению (4.2) и (4.3), соответственно

Следует отметить, что за счет выбора параметров $\gamma_{оп}$, K_1 и K_2 в выражении (4.3) можно достигать различных сочетаний V^* и $\varepsilon_{дин}$, что очень удобно при практической реализации предложенных систем. При этом уменьшения $\varepsilon_{дин}$ можно добиться и за счет введения в следящие системы всех электроприводов ММ более качественных типовых регуляторов.

4.3 Выводы

В четвертой главе диссертации рассмотрен метод построения адаптивной системы, позволяющей формировать предельно возможные скорости движения РИ ММ по произвольным пространственным траекториям на основе информации о входных напряжениях и токах якорных цепей всех используемых в ММ электроприводов.

1. Синтезируемые адаптивные системы не допускают входа электроприводов ММ в режим насыщения, приводящий к резкому снижению динамической точности управления РИ ММ, а поддерживают такой режим движения, при котором один или несколько его электроприводов постоянно находятся на конечных участках их линейных зон в преднасыщенном состоянии. При этом удастся резко повысить производительность технологических операций, выполняемых ММ.

2. Предложено несколько вариантов настройки скоростей движения РИ ММ по произвольным траекториям. В зависимости от вида этих траекторий, а также наличия сигналов датчиков тока и напряжения можно использовать настройку скорости только по входным напряжениям, только по величинам протекающих якорных токов и с использованием обеих этих величин.

3. Результаты исследования разработанных адаптивных систем полностью подтвердили их эффективность в различных режимах эксплуатации ММ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработан и апробирован новый подход к синтезу адаптивных СУ ММ, способных обеспечить выполнение технологических операций, связанных с перемещениями РИ по сложным траекториям, на предельно высоких скоростях без снижения заданной динамической точности и с учетом возможного входа усилительных и исполнительных электроприводов ММ в насыщение.

При этом были получены следующие новые результаты:

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

2. Разработан метод синтеза адаптивных систем формирования программных сигналов, которые обеспечивают движение РО простых манипуляторов по участкам гармонических траекторий и вспомогательного технологического оборудования 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.

5. Предложены и запатентованы конкретные технические решения,

используемые при реализации реальных технологических процессов с использованием синтезированных адаптивных систем. Практическая реализация, настройка и эксплуатация всех предложенных решений не вызывает принципиальных затруднений.

6. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность и высокое качество работы адаптивных СУ, синтезированных на основе разработанных в диссертации методов, в различных режимах эксплуатации манипуляционных механизмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев В.Д., Ивкин А.М., Кулешов В.С. и др.: Под ред. Лакоты Н.А. Основы проектирования следящих систем. М.: Машиностроение, 1978. – 391 с.
2. Бойчук Л. М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.
3. Воробьев Е.Н., Письменная Е.В. Синтез алгоритма управления движением манипулятора по заданной траектории на основе динамической модели исполнительного механизма // Машиноведение. - 1983. - №2. - С. 50-54.
4. Вукобратович М, Стокич Д., Кирчаиски И. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами: Пер. с англ. под ред. Е.П. Попова и А.С. Ющенко. – М.; Мир, 1989. – 376 с.
5. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами. Теория и приложения. – М.: Наука, 1985. – 384 с.
6. Гориневский Д.М., Формальский А.М. Об устойчивости движений упругого манипулятора с обратной связью по силе // Механика твердого тела. - 1985. - №3. - С. 49-56.
7. Григорьев С. Н., Андреев А. Г., Ивановский С. П. Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники // Мехатроника, автоматизация, управления. № 1. 2013. С. 30-34.
8. Губанков А.С. Адаптивное управление скоростью работы электроприводов с переменными моментами инерции // Материалы 2-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (CD-ROM). –М: 2009. - С. 1-8.
9. Гусак А.А., Гусак Г.М., Бричикова Е.А. Справочник по высшей математике. Мн.: ТетраСистемс, 1999. - 640 с.
10. Дыда А.А., Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез системы с переменной структурой для управления движением подводного аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2000. -№1. - С. 155-162.

11. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004. – 478 с.
12. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 464 с.
13. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. -М.: Машиностроение, 2004. - 576 с.
14. Крутько П.Д. Управление исполнительными системами роботов. – М.: Наука, 1991. – 336 с.
15. Лавров А. О., Петров В. В., Федунев Б. Е. Оперативное конструирование двумерной траектории выхода подвижного объекта в заданную точку с заданным курсом. Часть I. Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №2. С. 54-59.
16. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2006. - №6. - С. 17-22.
17. Медведев М.Ю. Синтез замкнутых оптимальных по быстродействию управлений каскадными нелинейными динамическими системами с ограничениями на координаты // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2009. - №7. - С. 2-6.
18. Медведев М.Ю. Синтез замкнутых субоптимальных по быстродействию управлений многосвязными нелинейными динамическими системами // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2009. - №12. -С. 2-8.
19. Мерриэм К.У. Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью. – М.: Мир, 1967. – 549 с.
20. Мирошник И.В. Геометрические методы синтеза и управление пространственным движением нелинейных динамических систем // Известия ВУЗов. Приборостроение. - 2000. - №1-2. - С. 23-30.

21. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. - СПб.: Наука, 2000. - 549 с.
22. 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.
23. Патент РФ № 2057001. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. Бюл. № 9. 1996.
24. Патент РФ № 2057002. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. Бюл. № 9. 1996.
25. Патент РФ № 2063866. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. БИ № 20,1996.
26. Патент РФ № 2066626. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. БИ № 26,1996.
27. Патент РФ № 2115539. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. БИ № 20,1998.
28. Патент РФ № 2355563. Устройство для управления приводом робота / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Зуев А.В. Бюл. № 14, 2009.
29. Патент РФ № 2399080. Самонастраивающийся электропривод / Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Бюл. № 25, 2010.
30. Патент РФ № 2450300. Самонастраивающийся электропривод / Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Бюл. № 13, 2012.
31. Патент РФ № 2460110. Самонастраивающийся электропривод / Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Бюл. № 24, 2012.
32. Пашков Н.Н. Аналитический синтез оптимальных траекторий программного движения многозвенного манипулятора // Приложение к журналу "Мехатроника, автоматизация, управление". Робототехнические системы. - 2008. - №9. - С. 10-15.

33. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М.: Наука, 1980. - 244 с.
34. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. – М.: Наука, 1976. – 104 с.
35. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1978. - 256 с.
36. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. –М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1978. – 400 с.
37. Пшихопов В.Х. Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Известия вузов. Электромеханика. 2007. №1. С. 51-57.
38. Пьявченко Т.А., Моисеева Е.В. Параметрическая коррекция динамики электропривода на основе метода технического оптимума // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 4. - С. 14-20.
39. Рудакова А.В., Кузик О.В. Использование метода динамического программирования Беллмана в задачах оптимизации быстродействия манипулятора // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 2003. - №1(11). - С. 31-35.
40. Управляющие системы промышленных роботов /Под ред. Макарова И.М. и Чиганова В.А. — М.: Машиностроение, 1984, 288 с.
41. Фалдин Н.В., Липатов А.Ю., Моржов А.В. Синтез оптимального по быстродействию объемного силового гидропривода при задании ограничения на потребляемую мощность. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2010. - № 3. - С. 39-44.
42. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2000. - 304 с.

43. Филаретов В.Ф. Синтез самонастраивающихся систем управления электроприводами манипуляционных механизмов // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 1989. – № 12. – С. 24– 28.
44. Филаретов В.Ф., Legnani G., Ruggeri S. Система автоматического управления манипулятором типа «SCARA» для выполнения силовых рабочих операций на боковых поверхностях заготовок произвольной формы // Мехатроника, автоматизация, управления. № 8. 2010. С. 21-29.
45. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Разработка системы формирования программных сигналов для электроприводов манипулятора // Труды XV международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, Россия, 25-28 июня, 2013. С. 582-587.
46. 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.
47. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез системы автоматической настройки параметров входного сигнала для электромеханического манипуляционного комплекса // Материалы международной научно-технической конференции: «Мехатроника, автоматизация и управление». Дивноморское. 2009. - С. 115-118.
48. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез системы формирования программных сигналов для электроприводов многозвенных манипуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. - № 5. - 2013. - С. 30-34.
49. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. - №4. – Т. 11. - 2013. - С. 19-25.
50. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Солкан М.В. Синтез системы формирования программных сигналов управления манипуляционным роботом с

учетом ограничения мощности исполнительных элементов // Материалы 4-ой Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011). Дивноморское, 2011, Т. 2. С. 269-271.

51. Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Никифоров М. А. Разработка самонастраивающихся регуляторов для электроприводов многозвенных манипуляторов со сложной кинематической схемой // Мехатроника, автоматизация, управления. – 2002. – № 5. – С. 2–7.

52. 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". 2011. С. 411- 418.

53. 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 конкурсовыставки научно-технического творчества молодежи для молодых ученых «Исследователь будущего», Владивосток, 01- 02 декабря 2011 г. / Под редакцией Н.В. Воеводиной – Владивосток : Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. С. 37-41.

54. 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 международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, Россия, 25-28 июня 2013. С. 423-428.

55. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Разработка роботизированного комплекса для механической обработки нежестких пространственных композитных изделий вертолетов // Известия ВУЗов.

Машиностроение. 2011. Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». - С. 67-75.

56. 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 // Сборник докладов Национальной научно-технической конференции. Москва, 2011. С.58-63.

57. Филаретов В.Ф., Корзун А.И. Адаптивное управление исполнительными элементами манипуляционного робота// Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1987. - № 4. – С. 74 – 79.

58. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Сравнительный анализ различных систем управления движением подводного аппарата // Сборник трудов ДВО РИА. Вып. 8. - Владивосток: ДВГТУ, 2003. - С. 28-44.

59. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47-54.

60. Фу. К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. – 624 с.

61. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы. — М.: Наука, 1989, 368 с.

62. Юревич Е.И. Основы робототехники (2-е изд.). Издательство БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

63. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами. – СПб.: БХВ-Петербург, 2000. –171 с.

64. Agah A., Bekey G. Sociorobotics: One to Many Robots. - "Artificial Intelligence and Information — Control Systems of Robots". Singapore: World Scient.Publ.,1994, p.123-135.

65. Alonge F., D'Ippolito F. State Estimation of a Mobile Manipulator via Non-uniformly Sampled Position Measurements // Proc. of 18th IFAC World Congress, Milano, Italy. - 2011. - P. 11526-11531.
66. Angeles J. Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms. – Springer, 2007. – 544 p.
67. Arai H., Tanie K. Path tracking control of a manipulator considering torque saturation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. №1, Vol. 41, 1994. P. 25-31.
68. Arai H., Tanie K. Real-time path tracking with torque limits by using a disturbance observer // Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, US, 1994. P. 1859-1866.
69. Ata A. A., Myo T. R. Collision-free trajectory planning for manipulators using generalized pattern search. International Journal of Simulation Modelling. №4, Vol. 5, 2006. P. 145-154.
70. Ayten K. Koray, Iravani P., Sahinkaya M. Necip. Optimum trajectory planning for industrial robots through inverse dynamics // Proc. of 8th International conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2011). Noordwijkerhout, The Netherlands. 2011. Vol. 1. P. 105-110.
71. Bianco L., Guarino C. Minimum-time trajectory planning of manipulators under dynamic constraints. International Journal of Control. №13, Vol. 75, 2002. P. 967-980.
72. Bjorkman M., Brogardh T., Hanssen S., Lindstrom S.-E., Moberg S., Norrlof M. A New Concept for Motion Control of Industrial Robots // Proc. of 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea. - 2008. - P. 15714-15715.
73. Bobrow J. E. Optimal robot path planning using the minimum time criterion. IEEE Journal of Robotics and Automation , №4, Vol. 4, 1988. P. 443-450.
74. Bobrow J.E., Dubowsky S., Gibson J.S. Time-optimal control of robotic manipulators along specified path. Int. J. Robotic Reserch. №3, Vol. 4, 1985. P. 3-17.

75. Bulut S., Terzioğlu M. B. Joint angle variations analyses of the two link planar manipulator in welding by using inverse kinematics // Robotica. - 2006. - Vol. 24. - №3. P. 355-363.
76. Butler J., Haack B., Tomizuka M. Reference generation for high speed coordinated motion of a two axis system // Proc. of Symposium on Robotics, Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineering. - 1998. - P. 457-470.
77. Cao B., Dodds G. I., Irwin J. W. Constrained-time efficient and smooth cubic spline trajectory generation for Industrial robots // IEEE Transactions on Control Theory and Applications. №5, Vol. 144, 1997. P. 467-475.
78. Chen Y., Desrochers A.A. Structure of minimum-time control law for robotic manipulators with constrained paths. Proc. of 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Scottsdale, US, 1989. P. 971-976.
79. Chen Y., Huang J, Wen T.Y. A Continuation Method for Time-Optimal Control Synthesis for Robotic Point to Point Motion. Proc. of 32nd Conference on Decision and Control. San Antonio, Texas, US. December, 1993. P. 1628 - 1632.
80. Cho J.U., Jeon J.W. A motion-control chip to generate velocity profiles of desired characteristics // ETRI Journal, №5, Vol. 27, 2005. P. 563-568.
81. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices// Trans. ASME. J. Appl. Mechanics. – 1955. – P. 215–221.
82. Ellis G., Lorenz R.D. Comparison of motion control loops for industrial applications. IEEE IAS Annual Meeting, October 1999. Vol. 4. P. 2599-2605.
83. Eom K.S., Suh I.H., Chung W.K. Disturbance observer based path tracking control of robot manipulator considering torque saturation. Journal of Mechatronics. №3, Vol. 11, 2001. P325-343.
84. Erkorkmaz K., Altintas Yu. High speed CNC system design. Part I: Jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation // Machine Tools & Manufacture. - 2001.- Vol. 41. - P. 1323-1345.

85. Filaretov V., Gubankov A. Synthesis of adaptive control system for formation of program speed of multilink manipulator // Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 132, 2011. P. 347-350. DOI 10.1007/978-3-642-25899-2_47.
86. Filaretov V., Gubankov A. Adaptive system forming extremely high speed of multilink manipulator gripper // Proc. of the 23rd International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, 2012-10-21/28. Volume 23, No.1, P. 0473-0476. (CDROM version)
87. Filaretov V., Gubankov A. Synthesis of the adaptive control system with tuning of the input signal parameters // Proc. of the 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education". Vienna, Austria, 2009, pp. 187-188.
88. 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 (CD-ROM). Lappeenranta, Finland. 2010, pp. 1-9.
89. Fragkopoulos C., Graser A. Sampling based path planning for high DoF manipulators without goal configuration // Proc. of 18th IFAC World Congress, Milano, Italy. - 2011. - P. 11568-11573.
90. Furukawa T. Time-Subminimal Trajectory Planning for Discrete Non-linear Systems. Engineering Optimization. №3, Vol. 34, 2002. P. 219-243.
91. Geering P., Guzzella L., Hepner S.A.R., Onder C.H. Time-Optimal Motions of Robots in Assembly Tasks. IEEE Transactions on Automatic Control. №6, Vol. AC-31, 1986. P. 512-518.
92. Heinzinger G., Jacobs P., Canny J., Paden B. Time-Optimal Trajectories for a Robot Manipulator: A Provably Good Approximation Algorithm. Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati, Ohio, US. May 1990. P. 150-156.
93. Huang H.-P., McClamroch N.H. Time-optimal control for a robot contour following problem. IEEE Trans. Robotics and Automation. №2, Vol. 4, 1988. P. 140 - 149.

94. Jeong S.-Y., Choi Y.-J., Park P.-G., Choi S.-G. Jerk limited velocity profile generation for high speed industrial robot trajectories // CD-ROM Proc. of the 16th IFAC World Congress on Automatic Control, Czech Rep., Prague. – 2005. – File 03478. – P. 1–6.
95. Jinno M., Yoshimi T., Abe A. Force controlled grinding robot system for unstructured task // Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Raleigh. - 1992. - P. 1117-1124.
96. Kahn M.E., Roth B. The near-minimum-time control of open-loop articulated kinematic chains. ASME J. Dyn. Syst., Meas., Contr. September 1971. P.164-172.
97. Kunz T., Stilman M. Manipulation planning with soft task constraints // Proc. of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012). Vilamoura, Algarve, Portugal. 2012. P. 1937-1942.
98. Lebedev A.V. Synthesis of Desirable Trajectories of Dynamic Objects Spatial Movement // Proc. of The 6th IASTED International Conf. Intelligent Systems and Control. Honolulu, Hawaii, USA, 2004. P.36-39.
99. Li P.Y., Horowitz R. Passive velocity field control (PVFC): Part I-Geometry and robustness // IEEE Trans. Automatic Control. №9, Vol. 46, 2001. P. 1346 – 1359.
100. Li P.Y., Horowitz R. Passive velocity field control of mechanical manipulators // IEEE Trans. Robotics Automation № 4, Vol. 15, 1999. P. 751–763.
101. Lin C.S., Chang P.R., Luh J.Y.S. Formulation and Optimization of Cubic Polynomial Joint Trajectories for Industrial Robots. IEEE Transactions on Automatic Control. №12, Vol. AC-28, 1983. P. 1066-1074.
102. McCarthy J.M., Bobrow J.E. The number of saturated actuators and constraint forces during time-optimal movement of a general robotic system. IEEE Trans. Robotics and Automation. №3, Vol. 8, 1992. P. 407-409.

103. Moreno-Valenzuela J. Velocity field control of robot manipulators by using only position measurements // Journal of the Franklin Institute. № 344, 2007. P. 1021–1038.
104. Ohm D.Y. A PDFF Controller for tracking and Regulation in motion control. Proc. of 18th PCIM Conf. USA, Philadelphia, October 21-26, 1990. P. 26-36.
105. Ohm D.Y. Analysis of PID and PDF compensators for motion control systems. IEEE IAS Annual Meeting. USA, Denver, October 2-7, 1994. P. 1923-1929.
106. Omrčen D., Žlajpah L, Nemec B. Compensation of velocity and/or acceleration joint saturation applied to redundant manipulator. Robotics and Autonomous Systems. №55, 2007. P. 337-344.
107. Perdikaris G.A. A Microprocessor Algorithm for Digital Servo Loops. Conf. of Applied Motion Control. USA, Minneapolis, June, 1985. P. 64-68.
108. Pfeiffer F., Johanni R. A concept for manipulator trajectory planning. IEEE J. Robotics and Automation. №2, Vol. RA-3, 1987. P. 115-123.
109. Phelan R.M. Automatic Control Systems. Cornell University press, Ithaca, New York. 1977.
110. Pledel P. Actuator constraints in point to point motion planning of manipulators. Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control. Vol. 2, 1995. P. 1009-1010.
111. Pledel P., Bestaoui Y. Actuator constraints in point to point motion planning of manipulators. Proc. of IECON 2000. Nagoya, Japan, 2000. P.2255-2260.
112. Raibert M. H., Craig J. J. Hybrid Position/Force Control of Manipulators // ASME Journal of Dyn. Syst., Meas., and Control. - 1981. - Vol. 102. - P. 126-133.
113. Rajan V. Minimum time trajectory planning. IEEE Proceedings of the international conference on Robotics and Automation. St. Louis, US, 1985. Vol. 2. P.759-764.
114. Ryu H.-M., Sul S.-K. Position control for direct landing of elevator using time-based position pattern generation. IEEE IAS Annual Meeting, October, 2002. Vol. 1. P. 644-649.

115. Sakamoto K., Kawamura A. Trajectory planning using optimum Solution of variational problem. Power Conversion Conference. Yokohama, Japan, 1993. P. 666-671.
116. Saramago S. F. P., Junior V. S. Using B-splines for optimal trajectory planning // Science and Engineering Journal. №17, Vol. 1, 1999. P. 106-114.
117. Shiller Z. On singular points and arcs in path constrained time optimal motions. ASME, Dyn. Syst. Contr. Division DSC-42. №42, 1992. P. 141-147.
118. Shiller Z., Dubowsky S. On computing the global time-optimal motions of robotic manipulators in the presence of obstacles. IEEE Trans. Robotics and Automation. №6, Vol. 7, 1991. P. 785-797.
119. Shiller Z., Lu H.-H. Computation of path constrained time optimal motions with dynamic singularities. ASME, Dyn. Syst., Meas., Contr. №114, 1992. P. 34-40.
120. Shin K.G., McKay N.D. A Dynamic Programming Approach to Trajectory Planning of Robotic Manipulators. IEEE Transactions on Automatic Control. №6, Vol. AC-31, 1986. P. 491-500.
121. Shin K.G., McKay N.D. Minimum-time control of robotic manipulators with geometric constraints. IEEE Trans. Automatic Control. №AC-30, Vol. 6, 1985. P. 531-541.
122. Siciliano B., Khatib O. Handbooks of robotics. – Springer, 2008. – 1628 p.
123. Simon D. Optimal robot motions for repetitive tasks. Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control. Tucson, AZ, US. Vol. 4, 1992. P. 3130-3134.
124. Simon D., Isik C. Optimal trigonometric robot joint trajectories // Robotica. - 1991. - Vol. 9. - №4. P. 379-386.
125. Singh S., Leu M.C. Optimal Trajectory Generation for Robotic Manipulators using Dynamic Programming. ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. №109, 1987. P. 88-96.

126. Slotine J.-J. E., Yang H.S. Improving the efficiency of time-optimal path-following algorithms. *IEEE Trans. Robotics and Automation*. №1, Vol. 5, 1989. P. 118-124.
127. Sontag E.D., Sussmann H.J. Remarks on the Time-Optimal Control of Two Links Manipulators // *Proc. of 24th Conference on Decision and Control*. Fort Lauderdale, Florida, US. December, 1985. P. 1646-1652.
128. Sucan I.A., Chitta S. Motion planning with Constraints using configuration space approximations // *Proc. of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*. Vilamoura, Algarve, Portugal. 2012. P. 1904-1910.
129. Tian L., Collins C. An effective robot trajectory planning method using genetic algorithm. *Journal of Mechatronics*. № 14, 2004. P. 455-470.
130. Tian L., Collins C. Motion planning for redundant manipulators using a floating point genetic algorithm. *Journal of Intelligent and Robotic Systems, Theory and Applications*. №3-4, Vol. 38, 2003. P. 297-312.
131. Tse K.-M., Wang C.-H. Evolutionary optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial Robots // *Proceedings of the IEEE International Conference on Man, System and Cybernetics*. San Diego, US. Vol. 4, 1998. P. 3272-3276.
132. Wang C.-H., Horng J.-G. Constrained minimum-time path planning for robot manipulators via virtual knots of the cubic B-spline functions // *IEEE Transactions on Automatic Control*. №5, Vol. 35, 1990. P. 573-577.
133. Wang F.-C., Yang D.C.H. Nearly arc-length parameterized quintic-spline interpolation for precision machining // *Computer Aided Design*. -1993. -Vol. 25. -№ 5. -P. 281-288.
134. Weck M., Ye G. Sharp corner tracking using the ikf control strategy // *Annals of CIRP*. - 1990. -Vol. 39. -№ 1. - P. 437-441.

135. Won J.-H., Choi B.-W., Chung M. Smooth joint trajectory planning for a point-to-point task. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS 91. Japan, 1991. P. 1299-1303.

136. Zanchettin A.M., Paolo Rocco P. On the use of functional redundancy in industrial robotic manipulators for optimal spray painting // Proc. of 18th IFAC World Congress, Milano, Italy. - 2011. - P. 11495-11500.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акты внедрения результатов диссертационной работы

«Утверждаю»

И. о. генерального директора

ОАО «Дальприбор»



Ф. И. Церр

2014 г.

АКТ

использования результатов,
диссертационной работы А.С. Губанкова «Адаптивное управление
манипуляторами с максимальным быстродействием»

Настоящий акт составлен о том, что в ОАО «Дальприбор» используются результаты, полученные в диссертационной работе А.С. Губанкова при выполнении некоторых механических операций. В ходе последующего расширения модернизации механического производства будут использованы адаптивные системы формирования режимов движения рабочих органов манипуляторов с учетом ограничений сигналов по току и входному напряжению всех электроприводов этих манипуляторов.

Предварительные исследования показали, что за счет использования предложенных адаптивных систем управления удастся в 1,3 – 1,5 раза увеличить производительность промышленных манипуляторов без снижения качества выпускаемой продукции.

Заместитель главного инженера
по ТПП

Д. В. Жуков



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и
инновациям ДВФУ

А.В. Цхе

июня 2014 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы «Адаптивное управление манипуляторами с максимальным быстродействием» ст. преподавателя кафедры Автоматизации и управления Инженерной школы ДВФУ Губанкова Антона Сергеевича в научную работу и учебный процесс кафедры Автоматизации и управления Дальневосточного федерального университета (направление подготовки магистров 220400.68 – Управление в технических системах, 221000.68 – Мехатроника и робототехника).

Комиссия в составе председателя, профессора кафедры Автоматизации и управления, д.т.н., профессора А.Н. Жирабка и членов: доцента кафедры Автоматизации и управления, к.т.н. А.А. Кацурина, доцента кафедры Автоматизации и управления, к.т.н. А.В. Зуева составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы ст. преподавателя кафедры Автоматизации и управления Губанкова А.С. на тему «Адаптивное управление манипуляторами с максимальным быстродействием» внедрены в научную работу и учебный процесс кафедры Автоматизации и управления Дальневосточного федерального университета, а именно:

1. адаптивные системы формирования программных сигналов, которые обеспечивают движение рабочих органов манипуляторов по участкам гармонических траекторий и вспомогательного технологического оборудования с максимально возможной скоростью;

2. система управления многостепенным манипулятором, которая в зависимости от текущего расположения обрабатываемых объектов формирует такие программные сигналы для всех электроприводов этого манипулятора, которые обеспечивают движение рабочего органа с максимально возможной скоростью и заданной динамической точностью, обеспечивая подход рабочего органа к объектам работ без перерегулирования;

3. адаптивные системы формирования предельно возможных программных скоростей движения рабочих органов многостепенных манипуляторов по всем участкам задаваемых пространственных траекторий с учетом ограничений сигналов по току и входному напряжению всех электроприводов этих манипуляторов.

Председатель комиссии:

д.т.н., профессор А.Н. Жирабок

Члены комиссии:

к.т.н. А.А. Кацурин

к.т.н. А.В. Зуев