

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Томский политехнический университет»

Гусев Н.В., Букреев В.Г.

**СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГО-
КООРДИНАТНЫМИ СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
Томск 2007

УДК 621.3.011.1: 658.011.56

Б 90

Гусев Н.В., Букреев В.Г.

- Б. 90 Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами: учебное пособие /Н.В. Гусев, В.Г. Букреев – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 213 с.
ISBN

В пособии приведен обзор концепций систем числового программного управления, характеристики некоторых типов электроприводов ведущих производителей, датчиков перемещения и современных контроллеров движения. Представлены основы математического и программного обеспечения для построения инвариантных следящих систем и разработки контроллеров движения. Рассмотрены программная реализация и аппаратное исполнение контроллера движения электроприводами постоянного тока двухкоординатного стола. Приведены имитационные модели и результаты исследований цифро-аналогового следящего электропривода для алгоритмов формирования задающих воздействий при линейной и круговой интерполяции.

Учебное пособие подготовлено на кафедре электропривода и электрооборудования ТПУ и предназначено для студентов направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

УДК 621.3.011.1: 658.011.56

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом Томского политехнического университета

Рецензенты

Дементьев Ю.Н. – зав. кафедрой электропривода и электрооборудования электротехнического института ТПУ, кандидат технических наук, доцент

Бейнарович В.А. - доктор технических наук, профессор Томского университета систем управления и радиоэлектроники

© Томский политехнический университет, 2007

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2007

Введение

Современная сервосистема представляет собой систему управления движением какого-либо исполнительного устройства, в качестве которого обычно выступают различные типы электродвигателей. В общем случае сервосистема состоит из следующих компонентов:

- сервоконтроллер;
- сервопривод;
- электродвигатель;
- датчики обратной связи.

Сервоконтроллер представляет собой микропроцессорное устройство, способное управлять движением исполнительного привода или механизма в реальном масштабе времени. Это устройство может быть одно- или многокоординатным (то есть может управлять движением одной или нескольких координат перемещения одновременно). Программирование сервоконтроллера производится с помощью персонального компьютера (ПК) на языке программирования для данного контроллера. Загруженная программа в сервоконтроллер остается в памяти и управляет работой системы. Результатом работы сервоконтроллера является выдача управляющих сигналов на электропривод в цифровой или аналоговой форме (например, аналоговое напряжение/ток: $\pm 10\text{В}$, $4..20\text{мА}$, $0..20\text{ мА}$ и т.д.), значение которых пропорционально требуемой скорости, перемещению или крутящему моменту. В соответствии с сигналами обратной связи от датчиков положения происходит корректировка траектории движения исполнительного механизма.

Сервопривод - это устройство, принимающее сигналы от сервоконтроллера и сигналы обратной связи по скорости/положению с вала исполнительного двигателя и определяющее рассогласование заданного и текущего сигналов. На основании значения рассогласования для электродвигателя формируется напряжение или ток нужной величины. Приводы классифицируются, в первую очередь, по типам двигателей: переменного либо постоянного тока, щеточные (коллекторные)/бесщеточные и т.д. Сервопривод от обычного электропривода отличается, в основном, повышенной точностью стабилизации скорости/крутящего момента/углового положения вала двигателя, улучшенными динамическими характеристиками (время реакции на изменение скорости/нагрузки), расширенным диапазоном регулирования рабочих скоростей.

Электродвигателем в сервосистеме может служить обычный асинхронный электродвигатель переменного тока, оснащенный датчиком обратной связи и, при необходимости, вентилятором принудительного охлаждения для работы на сверхнизких скоростях либо специальный серводвигатель: бесщеточный двигатель переменного/постоянного тока с постоянными магнитами на роторе, коллекторный двигатель постоянного тока.

Датчики обратной связи представляют собой устройства вырабатывающие сигналы, которые несут в закодированной форме информацию об угловом положении/скорости/направлении вращения вала двигателя. В общем случае датчики обратной связи по положению можно разделить на преобразователи угловых и линейных перемещений.

1. КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ (СЭП)

Разработчики современных систем числового программного управления выделяют 5 основных архитектурных вариантов, которые существуют на рынке. Первый вариант – это классические системы CNC (Computer Numerical Control). Такие системы выпускаются фирмами с богатой традицией производства высококачественной собственной микроэлектронной аппаратуры. Однако эти фирмы под влиянием пользователей технологического оборудования, желающих иметь гибкий интерфейс оператора, предлагают модификацию PCNC-1 с персональным компьютером в качестве терминала (второй вариант). Следующим шагом в развитии систем с ЧПУ стала реализация двухкомпьютерного варианта PCNC-2 (третий вариант). Несколько позднее появились системы PCNC-3, ядро которых реализовано на отдельной плате, устанавливаемой в корпусе промышленного персонального компьютера (четвертый вариант). С бурным развитием микропроцессорной техники и повышением производительности микропроцессоров все большее распространение получает однокompьютерный (пятый) вариант системы PCNC-4. Наиболее наглядно классификация архитектурных решений систем ЧПУ приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Вычислительное устройство	Наименование архитектурных решений				
	CNC	PCNC-1	PCNC-2	PCNC-3	PCNC-4
Персональный		Интерфейс опе-	Интерфейс опе-	Интерфейс опе-	Интерфейс опе-

ком- пьютер		ратора	ратора	ратора	ратора. Ядро ЧПУ. Про- граммно- реализо- ванный контрол- лер элек- троавто- матики
Встроен- ный одно- платный компью- тер				Ядро ЧПУ. Про- граммно- реализо- ванный конт- роллер электроав- томатики	
Интер- фейс		Коммуни- кацион- ный ин- терфейс	Коммуни- кацион- ный ин- терфейс		
Второй компью- тер			Ядро ЧПУ. Про- граммно- реа- лизован- ный конт- роллер электроав- томатики		
Специ- альный про- цессор- ный мо- дуль	Интер- фейс опе- ратора. Ядро ЧПУ. Внешний контрол- лер элек- троавтома-	Ядро ЧПУ. Од- ноплатный контрол- лер элек- троавто- матики			

	тики				
Интерфейс	Управление приводами и электроавтоматикой	Управление приводами и электроавтоматикой	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики
	Объекты управления	Объекты управления	Автономные объекты управления	Автономные объекты управления	Автономные объекты управления

1.1. Системы типа CNC и PCNC-1

К этим типам относится семейство NUM (концерн Schneider, Германия) (рис. 1.1), построенное по принципу многопроцессорных CNC-систем: с ЧПУ-процессором, процессором программируемого контроллера автоматики и графическим процессором. Система NUM оснащается пассивным терминалом или промышленным компьютером с операционной системой Windows-98.

Семейство представлено компактными и модульными версиями, которые различаются числом координат и возможностью формировать независимые каналы ЧПУ из координатных групп, а также использованием традиционных аналоговых или автономных цифровых следящих приводов, подключенных к оптоволоконной сети.

Кроме этого, в зависимости от требований устанавливается различное число входов-выходов электроавтоматики. Вычислительная мощность систем NUM достаточно высока, и этим объясняется широкий набор их функциональных возможностей. Так, предусмотрены сплайновый и полиномиальный (до пятого порядка) алгоритмы интерполяции, пяти-, девятикоординатная интерполяция, пятикоординатная коррекция инструмента, одновременная работа по двум различным управляющим программам, 3D-графика. В системах с терминальным компьютером возможна адаптация интерфейса оператора к запросам конечных пользователей, диалоговое программирование.

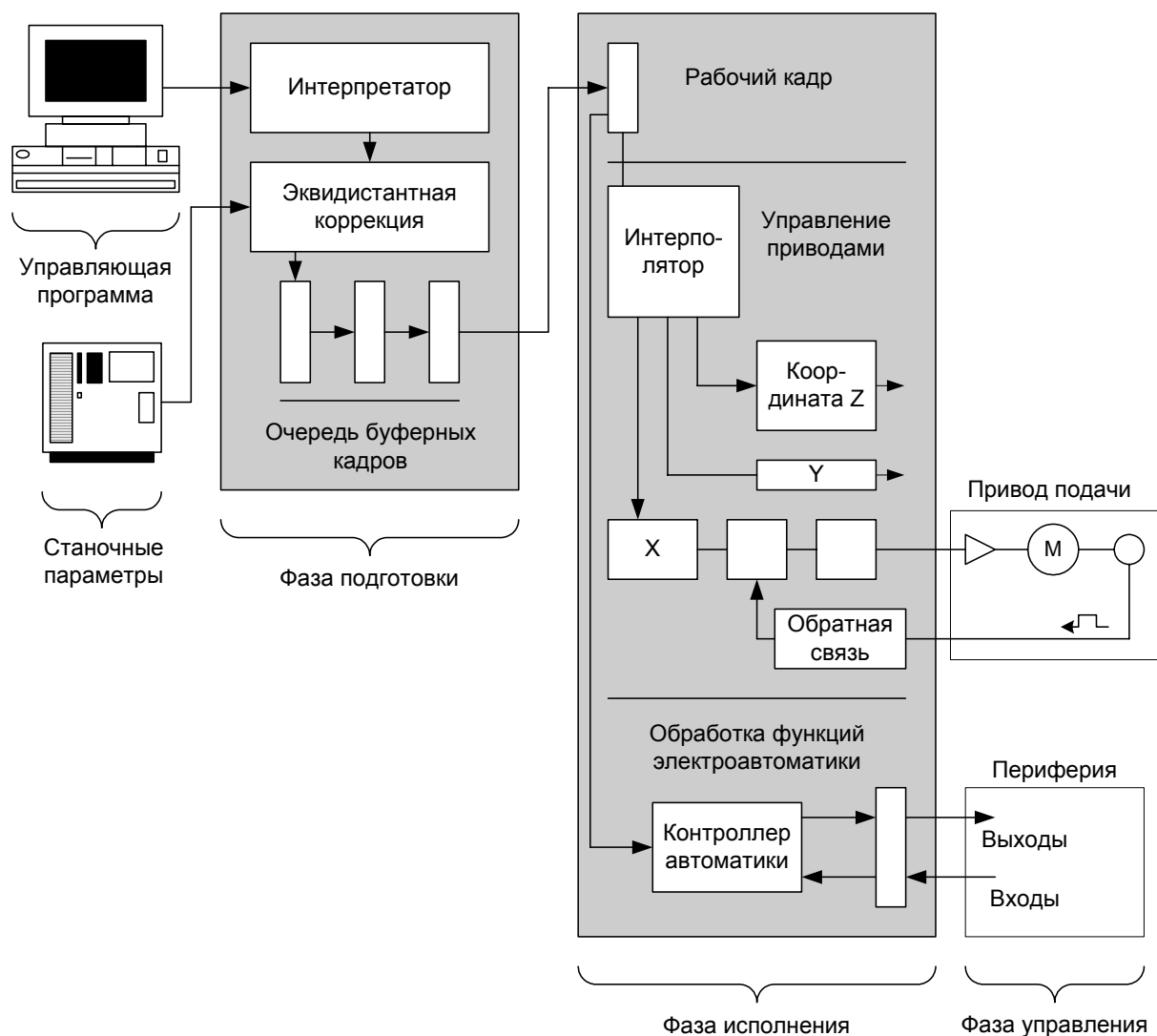


Рис. 1.1. Архитектура системы ЧПУ типа CNC фирмы NUM

Фирма Allen Bradley выпускает широкое семейство систем ЧПУ: от традиционной CNC до системы CNC с персональным компьютером в качестве терминала и системы класса PCNC. Последняя модель (рис. 1.2) выполнена по классической схеме: специализированный промышленный компьютер с операционной системой Windows NT и возможностью разрабатывать пользовательские приложения на Visual Basic, PCI-одноплатный ЧПУ-компьютер, выполняющий все функции ядра, включая программно-реализованный контроллер электроавтоматики. С помощью общего для всей системы терминала осуществляется программирование и редактирование контроллера.

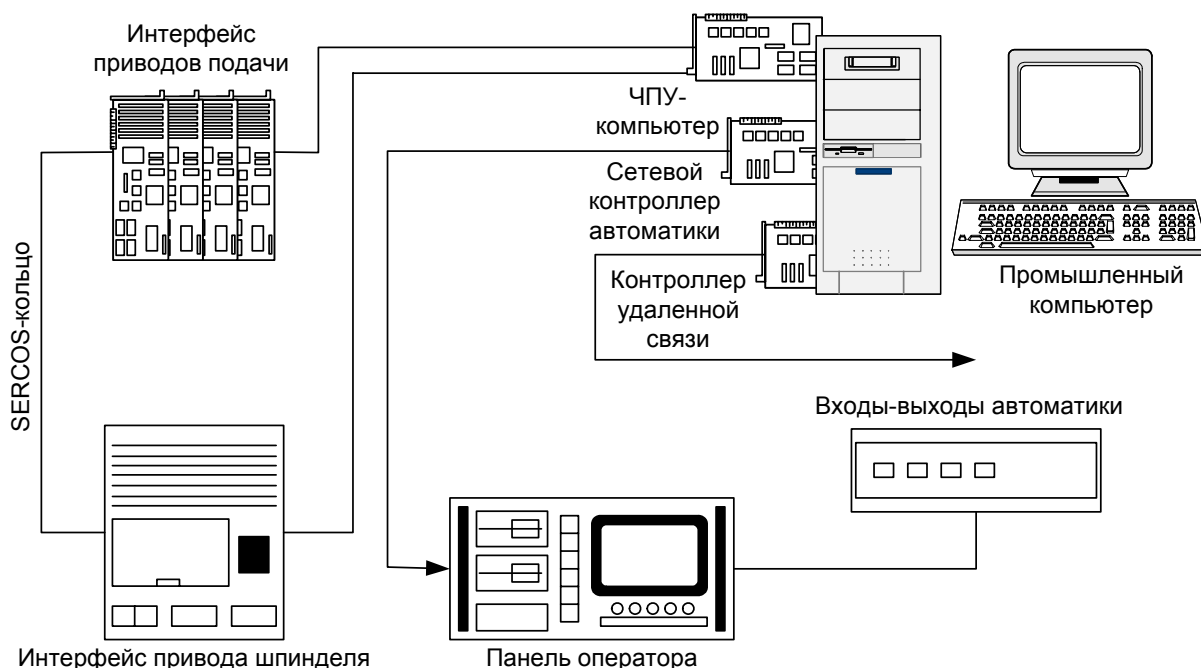


Рис. 1.2. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-1 фирмы Allen-Bradley

1.2. Системы типа PCNC-2

Представителями этого класса являются системы фирм ANDRON, BoschRexroth (Германия). Система ЧПУ фирмы ANDRON представляет собой полный двухкомпьютерный вариант. Ее структура представляет набор модулей (рис. 1.3): терминального компьютера, ЧПУ-компьютера, панели оператора и монитора, удаленных входов-выходов программируемого контроллера, одной или нескольких групп цифровых (SERCOS) приводов подачи и главного привода. Аппаратная часть системы практически полностью состоит из компонент других фирм-производителей.

В состав терминального компьютера входят: материнская плата с процессором Intel Celeron и интегрированными контроллерами SCSI, VGA, TFT, IDE; многофункциональная интерфейсная плата MFA с памятью CMOS-ROM; контроллер коммуникационного канала, связывающего терминальный и ЧПУ-компьютеры. Все платы установлены на пассивной ISA-шине. При этом предусмотрена возможность установки дополнительных резервных плат: внутреннего модема, сетевой платы, SCSI-платы. Для специальных задач возможна установка PC1-плат.

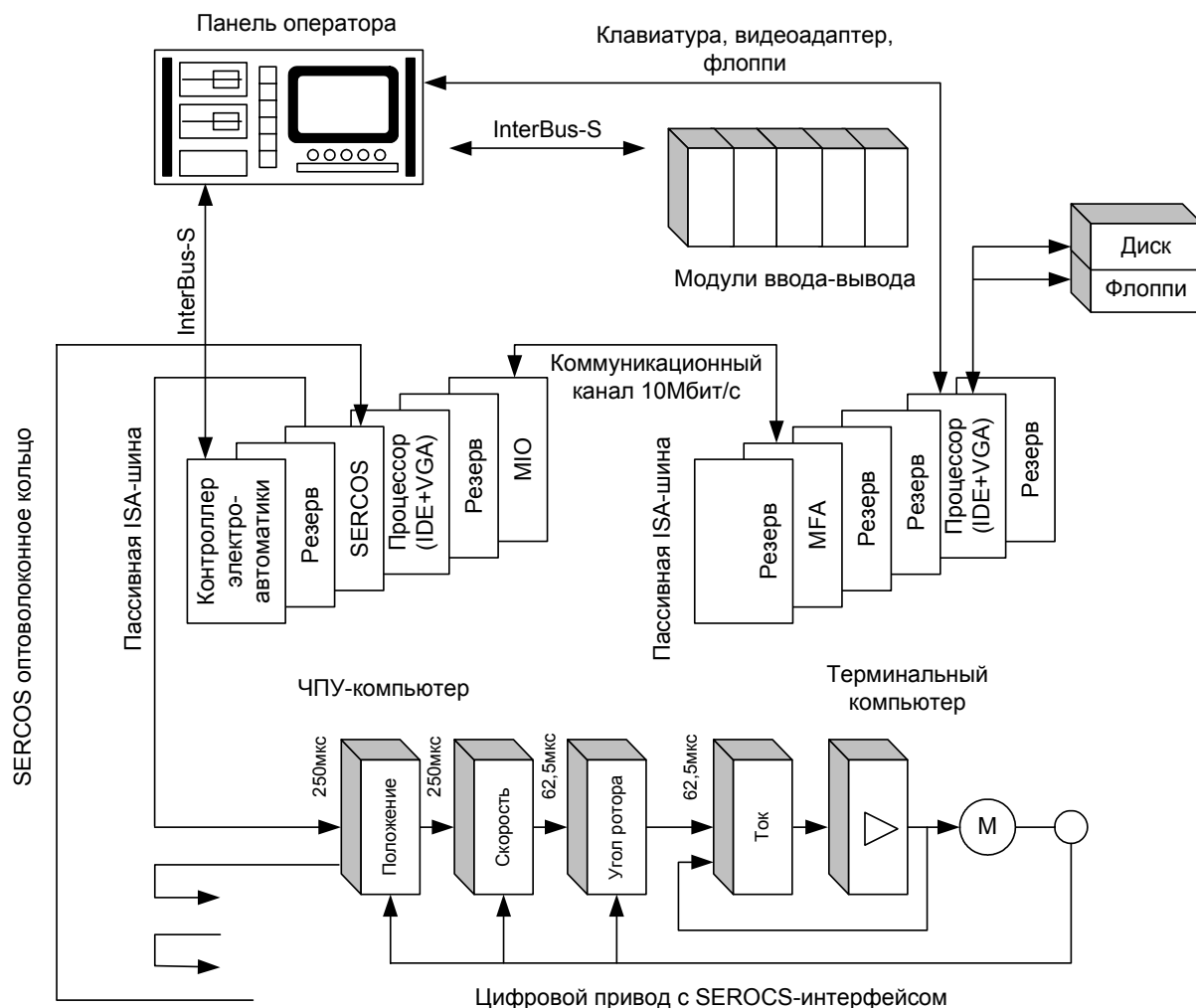


Рис. 1.3. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-2 фирмы FNDRON

В составе ЧПУ-компьютера имеются: материнская плата с процессором Intel Celeron; плата MIO (Main Input-Output) поддержки как коммуникационного интерфейса с терминальным компьютером (со скоростью 10 Мбит/с), так и интерфейса ручного перемещения; плата программируемого контроллера с интерфейсом InterBus-S (с циклом 4 мс для 1024 входов-выходов); одна или несколько плат SERCOS-интерфейса (с микросхемой SERCON410-B). Все платы установлены на пассивной ISA-шине. Каждый SERCOS-интерфейс обслуживает (с периодичностью 0,5 мс) одну группу из трех автономных приводов подачи и одного привода шпинделя. Приводы одной группы включены в кольцевую оптоволоконную сеть.

В подобных платформах систем ЧПУ терминальный компьютер обычно работает под управлением операционной системы Windows NT, а ЧПУ-компьютер оснащается операционной системой жесткого реаль-

ного времени. На прикладном уровне терминальный компьютер открыт для разнообразных приложений и специальных диалогов конечного пользователя.

Система ЧПУ фирмы BoschRexroth (Германия) построена на основе двух высокопроизводительных компьютеров и обладает исключительно мощным набором функций. Терминальный компьютер оснащен операционной системой Windows NT, а ЧПУ-компьютер – операционной системой UNIX. Связь операционных сред осуществляется с помощью протоколов TCP/IP, что позволяет осуществить удаленное администрирование и работу нескольких терминалов с одним ЧПУ-компьютером. В свою очередь, ЧПУ-компьютер обеспечивает многоканальную работу более чем с одной управляющей программой. Прикладное программное обеспечение терминального компьютера и ядра ЧПУ в ЧПУ-компьютере окружены оболочкой из нескольких сот интерфейсных API-функций (Application Interface), которые предоставляют пользователям возможность разрабатывать собственные приложения и расширения. В оболочку терминального компьютера включена мощная DLL-библиотека NCS (Numerical Control System) классов объектов, делающая разработку дополнительных приложений более простой и комфортной. Помимо этого программно реализован контроллер электроавтоматики и цифровой осциллограф для анализа динамики следящего привода,

1.3. Системы типа PCNC-3

Типичным представителем PCNC-3 является система фирмы DeltaTau (Великобритания). Архитектура такой системы предполагает наличие 2-х компьютеров. В отличие от предыдущего типа систем ЧПУ-компьютер выполнен в виде отдельной платы PMAC (Programmable Multi-Axes Controller), устанавливаемой на ISA или PCI шине терминального персонального компьютера (рис. 1.4). Терминальный компьютер с операционной системой Windows NT выполняет классические функции терминальной задачи и функции интерпретатора управляющих программ.

Одноплатный ЧПУ-компьютер PMAC построенный на процессоре Motorola 56300 решает геометрическую и логическую задачи, выполняя функции интерполятора, контроллера управления приводами, программно-реализованного контроллера электроавтоматики. Интерполятор обеспечивает все виды интерполяции (включая сплайн-интерполяцию), алгоритмы разгона и торможения, опережающий просмотр кадров (Look Ahead), циклическое формирование управляющих

воздействий с периодом 440 мкс (в этом же периоде в фоновом режиме работает и контроллер электроавтоматики). Контроллер приводов поддерживает управление 32 координатными осями, сгруппированными в

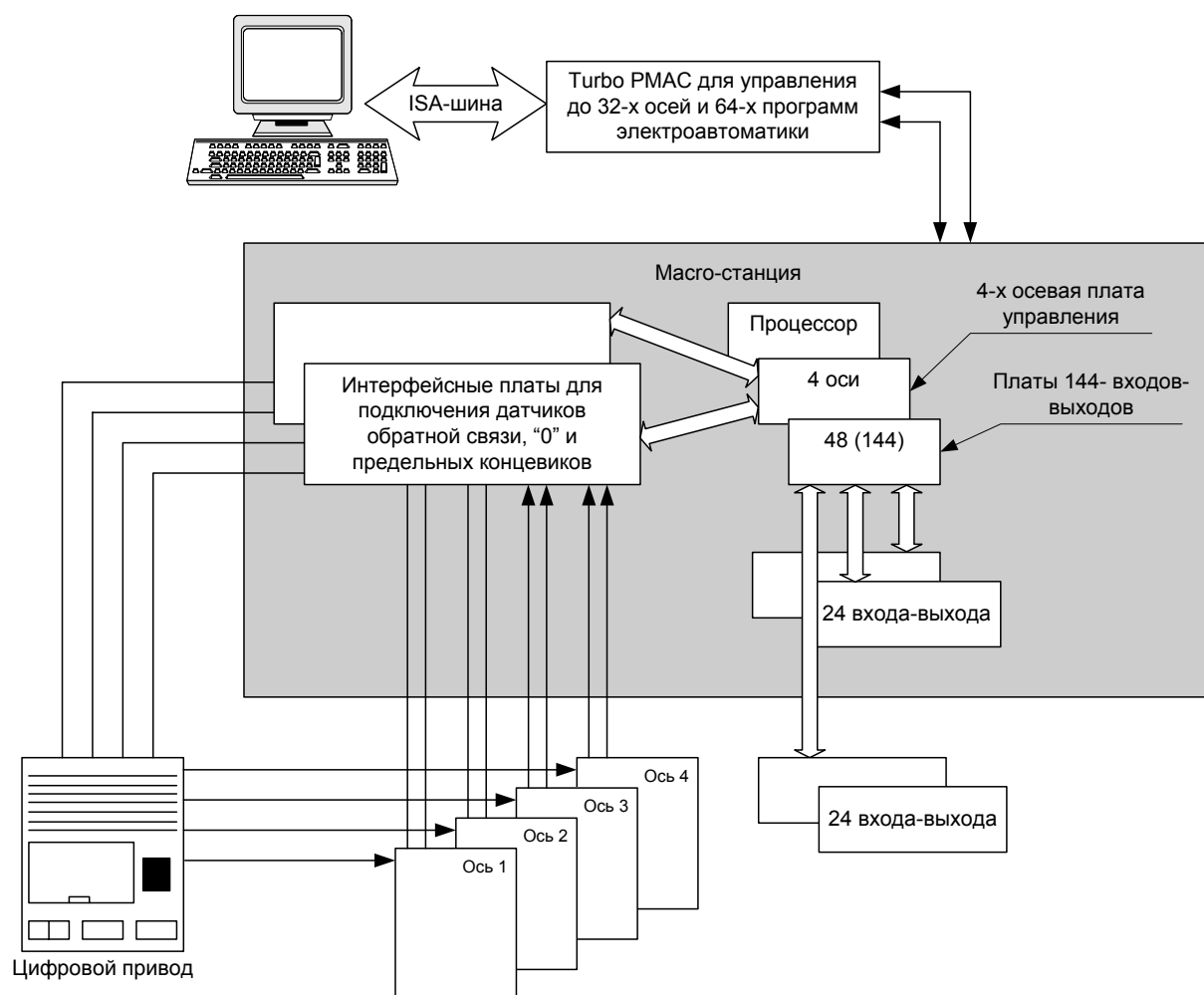


Рис. 1.4. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-3 фирмы DeltaTau

16 координатных систем. Помимо этого он принимает и обрабатывает сигналы обратной связи от датчиков положения, замыкает позиционные контуры, выполняет функции ПИД-регулятора, имитирует в цифровом виде сигналы обратной связи по скорости, вырабатывает (в цифровом виде) широтно-импульсный сигнал для приводов подачи и аналоговый сигнал задания (в пределах $\pm 10V$) для привода главного движения. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики поддерживает параллельное управление 64 циклами электроавтоматики.

Сигналы управления приводами и электроавтоматикой поступают в кольцевой оптоволоконный канал (со скоростью передачи данных 125 Мбит/с) для дистанционного управления своими объектами. Принимаю-

щим устройством служит интеллектуальный периферийный терминал Macro-станция (Motion and Control Ring Optical). Допустимо включение в кольцо нескольких таких терминалов. Терминал замыкает скоростные контуры восьми приводов и принимает сигналы от конечных выключателей и датчиков нулевых точек координатных систем, формирует сигналы управления двигателями любого типа (асинхронными, постоянного тока и др.) с помощью блока Quad Amplifier (для управления четырьмя двигателями общей мощностью до 25 кВт). Периферийный терминал также поддерживает управление электроавтоматикой через модули оптоизолированных входов-выходов.

Концепция такого типа систем ориентированна на построение собственных систем ЧПУ. Конечному пользователю остается только разработка терминальной задачи и интерпретатора в среде промышленного персонального компьютера. Однако при этом следует отметить, что архитектура самих модулей закрыта и недоступна для внесения каких-либо изменений.

1.4. Системы типа PCNC-4

Концепция системы ЧПУ фирмы Beckhoff (Германия) является ярким примером однокомпьютерной архитектуры PCNC. Отличительная особенность заключается в том, что все задачи управления (геометрическая, логическая, терминальная) решены программным путем, без какой-либо дополнительной аппаратной поддержки (рис. 1.5). Внешний интерфейс такой системы строится на базе любой стандартной периферийной шины, в частности, на базе шины LightBus фирмы Beckhoff. Эта шина представляет собой кольцевой канал для передачи сигналов управления автономными следящими приводами, а также и для передачи сигналов электроавтоматики. Доступ к объектам осуществляется с помощью периферийных "терминалов" ввода-вывода.

Операционная среда представляет собой комбинацию ОС Windows NT для поддержания процессов машинного времени и системы TwinCat (Total Windows Control and Automation Technology). Операционная система TwinCat фирмы Beckhoff интегрированная в Windows NT, добавляет ей функции реального времени, не изменяя свойства самой Windows NT. Обмен данными и доступ к прикладным функциям API программных модулей осуществляется через программную шину ADS (Automation Device Specification). Система TwinCat служит центром системной конфигурации, поддерживающим синхронное или асинхронное взаимодействие всех процессов, а также и ввод-вывод сигналов управления. На прикладном уровне в потоках управления

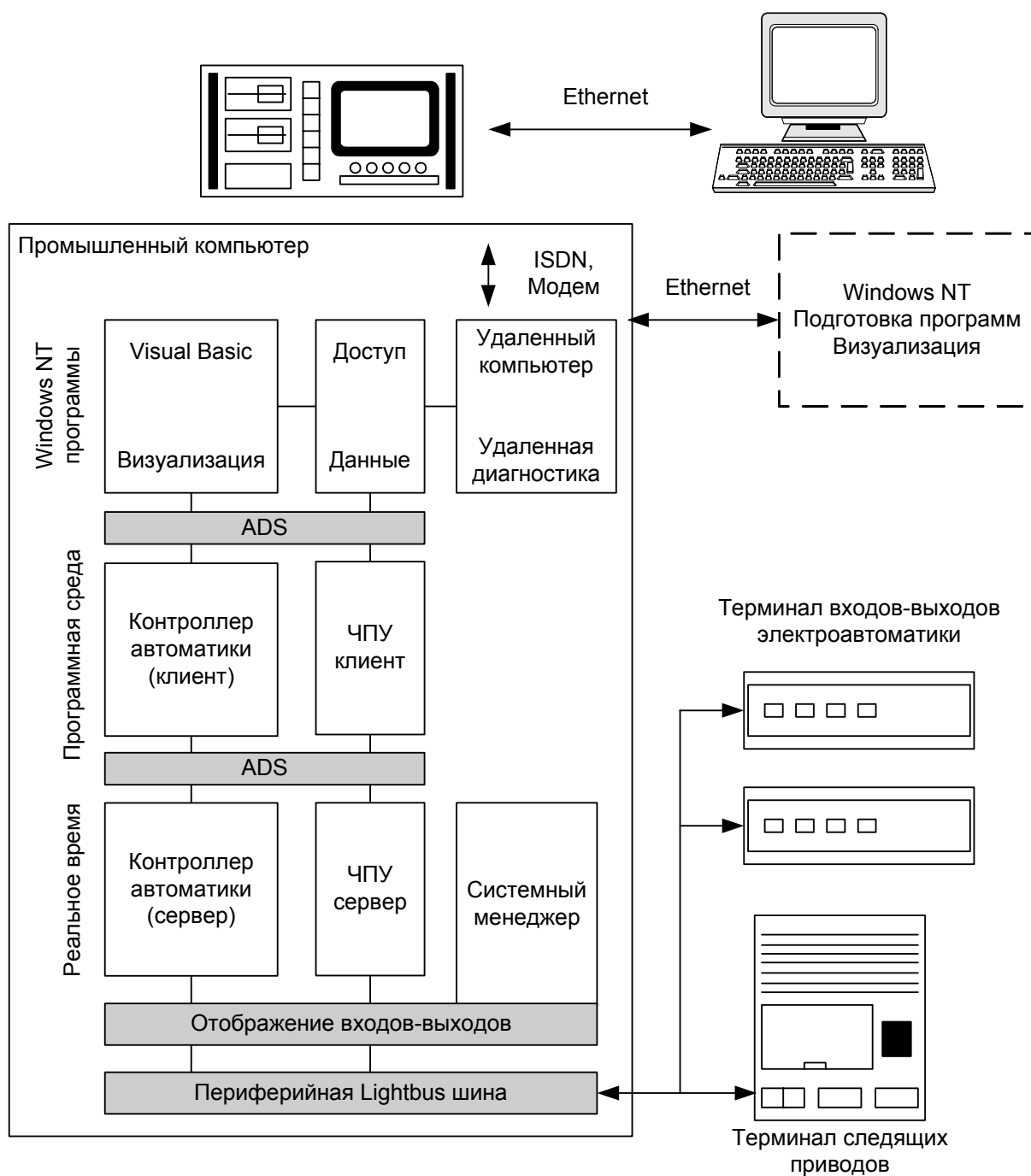


Рис. 1.5. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4

работают программные модули ЧПУ и программируемые контроллеры, имеющие клиентскую часть (для подготовки данных) и серверную часть (для работы в реальном времени). ЧПУ-клиент интерпретирует кадры

управляющей программы в стандарте DIN 66025, а ЧПУ-сервер выполняет интерполяцию в "группах приводов" (по три координаты в группе). Группы в свою очередь формируются с помощью системы TwinCat. Одновременно работают до четырех контроллеров (являющихся виртуальными процессорами, работающими в стандарте IEC 1131-3), каждый из которых решает четыре задачи, имеющие свой приоритет и время цикла.

Рассмотрим еще один пример построения системы ЧПУ типа PCNC-4. Система Power Automation (Германия) построена на основе промышленного персонального компьютера с PCI-шиной (рис. 1.6), операционной системой Windows NT и ядром реального времени.

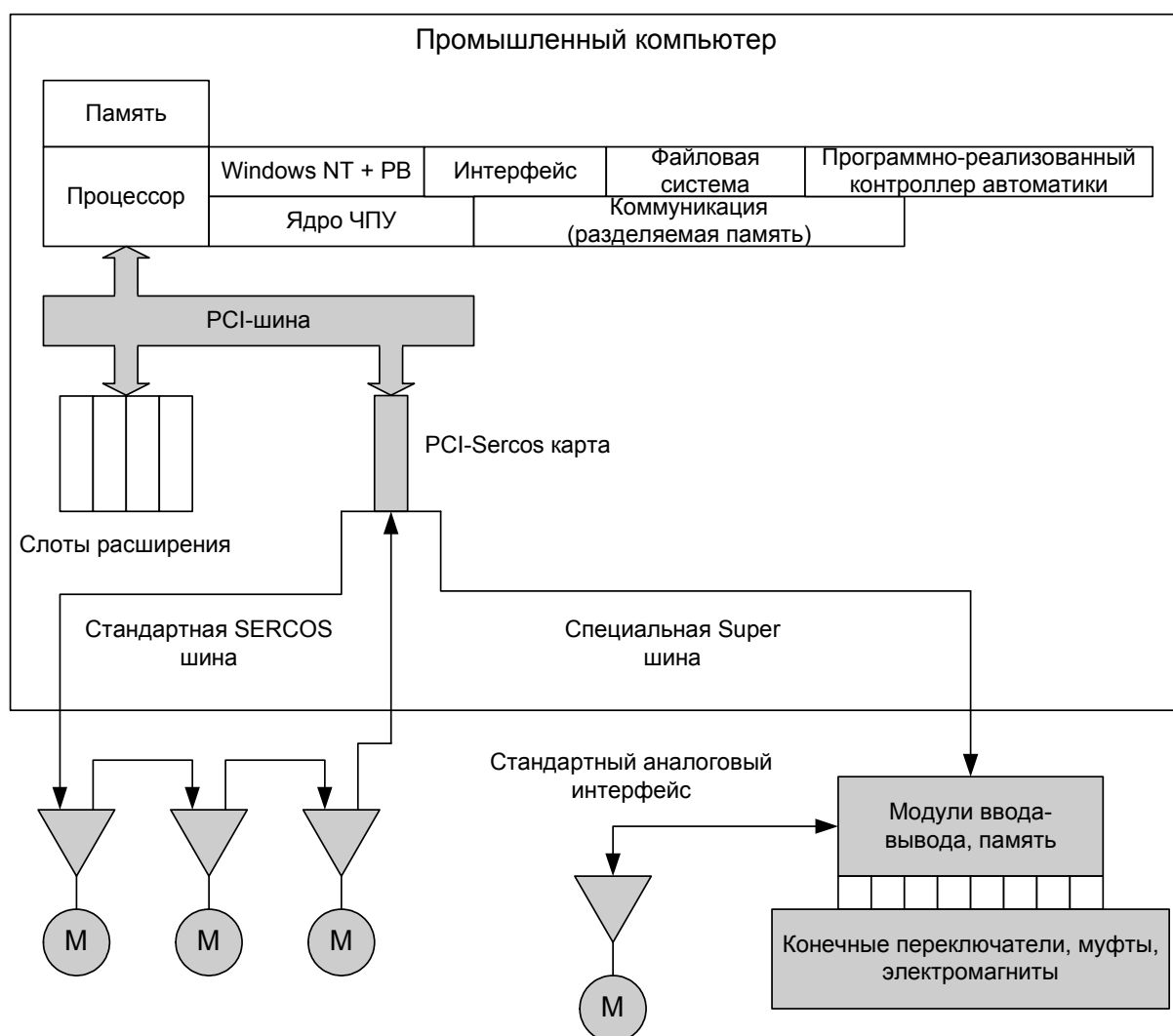


Рис. 1.6. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4 фирмы Power Automation

Операционная система Windows NT обеспечивает работу интерфейса оператора, системы программирования ЧПУ и контроллера электроавтоматики, встроенную САМ-систему, приложений пользователя. Ядро реального времени синхронизирует работу задач ЧПУ и электроавтоматики, выполняет диспетчерские функции в отношении интерпретатора, интерполятора и модуля управления следящими приводами. Одновременно могут работать до восьми каналов ЧПУ и два программно-реализованных контроллера электроавтоматики с разными приоритетами.

Система Power Automation имеет открытую архитектуру, которая допускает расширение функций ядра ЧПУ. Система имеет мощное сетевое окружение как внешнее (Ethernet-TCP/IP, Novell), так и периферийное (восемь оптоволоконных SERCOS-колец для 64 следящих приводов, InterBus-S, Profibus DP, CAN-Bus, ASI-Bus).

1.5. Тенденции развития современных систем с цифровым программным управлением

Из рассмотренного выше обзора современных концепций можно сделать вывод, что очередная смена поколений радикально меняет потребительские свойства, структуру, архитектуру и программное обеспечение систем ЧПУ. Опыт, накопленный в области создания систем ЧПУ к настоящему времени, в значительной мере пересматривается под мощным давлением пользователей и станкостроителей. В борьбе за рынок производители систем ЧПУ уходят от простой эволюции традиционных решений к системам с открытой архитектурой. Причины подобной ситуации заключаются в повышении доли специального технологического оборудования, ориентированного на определенную или групповую технологию, а также в росте популярности систем ЧПУ с интерфейсом управления как у обычного персонального компьютера.

Одним из наиболее значимых признаков системы ЧПУ нового поколения является открытая архитектура, которая предполагает следующие:

- конфигурирование системы у станкостроителя и конечного пользователя;
- интеграцию программных продуктов иных производителей;
- модернизацию системы независимо от изменений базовой платформы;
- доступ к диагностической информации аппаратуры приводов и объекта;
- доступ системы в сетевую коммуникационную среду.

Под конфигурированием системы понимается выбор пользователем собственного диалога с системой, настройку системы на любую версию управляющих программ, добавление новых алгоритмов интерполяции, включение системы в локальную сеть.

Традиционная структура персональных систем ЧПУ обусловлена такими задачами как: геометрическая, логическая, технологическая, диспетчерская, терминальная. В общем виде, структура системы ЧПУ, представленная совокупностью базовых (сплошные линии) и дополнительных модулей (пунктирные линии), приведена на рис. 1.7. К дополнительным модулям отнесены покупные программные средства. Каждый из модулей системы закреплен за определенной задачей управления и является вложенным объектом, то есть обладает алгоритмической структурой и структурой данных, а также интерфейсной оболочкой.

Приведенная структура разделяется на 2-е подсистемы – NC-подсистему и PC-подсистему. NC-подсистема являясь ведущей формирует среду функционирования в реальном времени ЧПУ-ориентированных модулей: интерпретатора (ISO-процессора), интерполятора, встроенного программируемого контроллера, базы данных реального времени. PC-подсистема образует среду Windows-подобного интерфейса пользователя, включая инструментальную систему подготовки и тестирования управляющих программ, а также всевозможные пользовательские приложения.

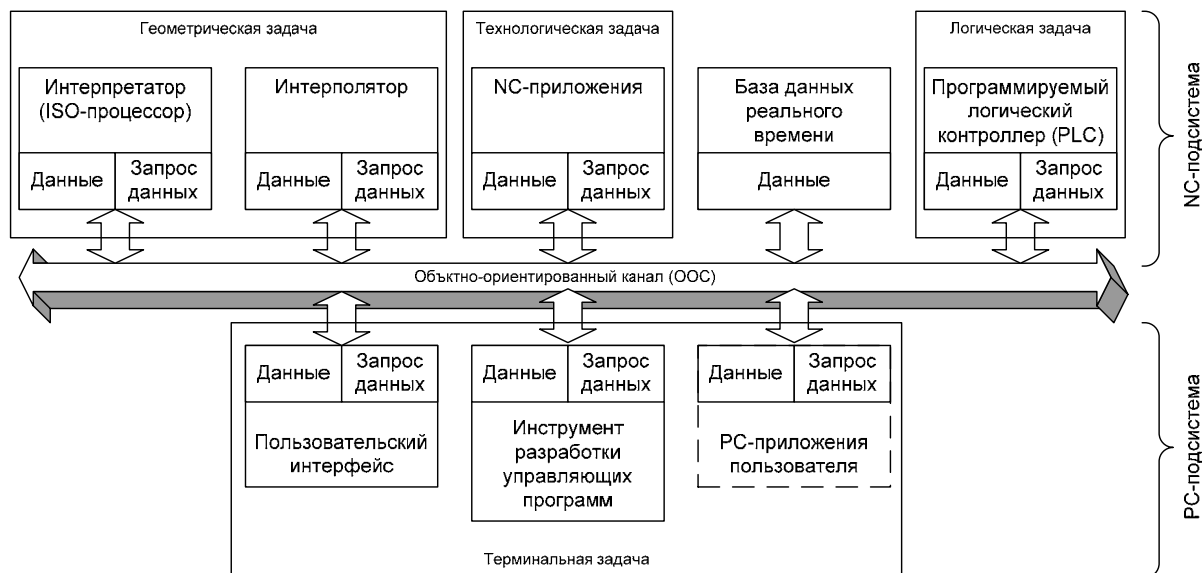


Рис. 1.7. Модульная архитектура системы ЧПУ типа PCNC

Взаимодействие модулей осуществляется посредством объектно-ориентированной магистрали (ООС – Object Oriented Channel), которая не только поддерживает программно-аппаратные коммуникационные протоколы, но и выполняет прикладные серверные функции благодаря специальной объектной оболочке. Это значит, что объектно-ориентированная магистраль служит единым механизмом предоставления модулям информационных услуг. Такая возможность отражена и в самих интерфейсах модулей: они могут предоставлять данные либо запрашивать их. Более подробно описание объектно-ориентированной магистрали изложено в [21].

В отличие от приведенной структуры на рис. 1.7 открытая архитектура позволяет строить более гибкие и сложные системы ЧПУ типа PCNC. Такие системы ориентированы на многокоординатную, высокоскоростную и высокоточную обработку. Современные системы с открытой архитектурой выполняются согласно двухкомпьютерной архитектуре приведенной на рис. 1.8.

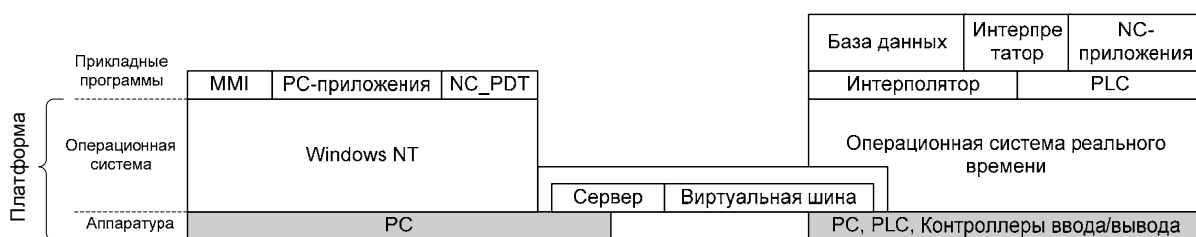


Рис. 1.8. Двухкомпьютерная модель системы PCNC

Из приведенной структуры видно, что PC-подсистема располагается на обычном персональном компьютере, а NC-подсистема на другом NC-компьютере. В роли второго NC-компьютера может выступать традиционный компьютер, оснащенный дополнительными специальными устройствами, или компьютер на базе RISC-процессора. Базовой операционной системой на первом компьютере выступает операционная система, построенная на основе Windows NT. Характерной особенностью данной архитектуры является наличие человеко-машинного интерфейса (Man Machine Interface) и инструмента разработки и верификации управляющих программ (NC_PDT – NC Program Data Tool) расположенных на PC-подсистеме. Инструментальная среда NC_PDT обеспечивает создание и редактирование файлов управляющих программ, осуществляет полный синтаксический контроль кадров управляющей программы, эмулирует отработку управляющей программы. На втором компьютере располагается UNIX-подобная операционная сис-

тема. Она может обеспечить требуемое гарантированное минимальное время отклика. Обмен между двумя операционными системами поддерживается посредством коммуникационного протокола TCP/IP. Включение в эту среду прикладного уровня с функциями доступа к интерфейсам модулей создает виртуальную шину, оказывающую низкоуровневые услуги доступа. Объектная надстройка над этой шиной формирует сервер представляющий единую для обеих подсистем объектно-ориентированную магистраль.

Дальнейшее развитие этой архитектуры представляется в виде однокомпьютерной модели предполагающей наличие только одного PC-компьютера, оснащенного специальными устройствами в виде плат-контроллеров (рис. 1.9). В качестве этих плат могут быть использованы контроллер приводов подачи, программируемый контроллер PCL (Programmable Logic Controller), различные устройства управления технологическим процессом.

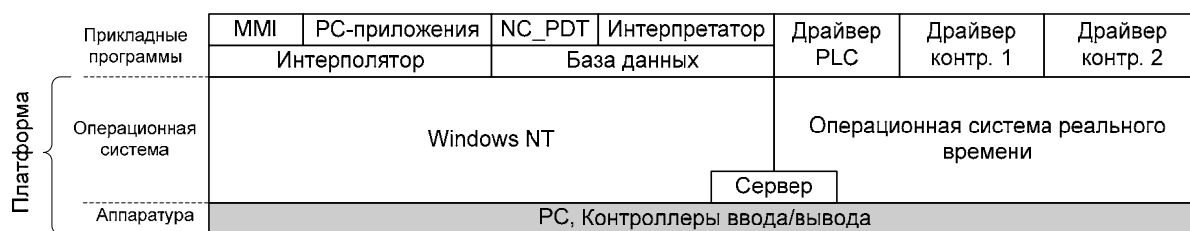


Рис. 1.9. Однокомпьютерная модель системы PCNC

Переход от двухкомпьютерной модели к однокомпьютерной осуществляется формальным переносом программного обеспечения PC-подсистемы в NC-подсистему на уровне задач. Приведенные архитектурные варианты, дают возможность четкого разграничения между системными, прикладными и коммуникационными компонентами, возможность независимого развития любого из этих компонент, как на основе оригинальных разработок, так и путем встраивания программных продуктов иных производителей.

Следует отметить, что наибольшее распространение получают системы ЧПУ, построенные на основе концепции PCNC, нежели чем системы, построенные по концепции CNC. Это, прежде всего, обусловлено возросшим спросом на системы с PCNC и гибкостью адаптации оборудования к конкретным задачам. С ростом производительности современных микропроцессоров разработчики все большее предпочтение отдают однокомпьютерному варианту построения системы с открытой архитектурой. Это дает возможность пользователю программно реали-

зовывать необходимые ему геометрические, логические и терминальные задачи, что в итоге позволяет разработать необходимую систему без значительных капиталовложений. В качестве операционной системы в настоящее время наиболее часто применяют операционные системы, построенные на базе Windows NT и UNIX. Однако Windows NT в связи с большей распространенностью находит большее применение.

1.6. Обзор устройств высокоточного перемещения специальных промышленных механизмов

Современный уровень вычислительных устройств, пройдя несколько ступеней эволюции, позволил разработчикам реализовывать практически без ограничений различные алгоритмы управления технологическим оборудованием. Такое обстоятельство дает возможность современным системам управления электроприводами не только обеспечить высокую точность и производительность системы, но и расширить круг задач, возлагаемых на систему управления. В первую очередь, это проявится в разработках нового технологического оборудования.

Исторически сложилось, что цифровые системы управления разрабатывались для управления электроприводами, установленными на металлорежущих станках и промышленных роботах. В самом общем случае металлорежущие станки предназначены для обработки металла путем снятия стружки. Обработка на таких станках может производиться при помощи одного или нескольких инструментов.

В настоящее время станочный парк металлообрабатывающего оборудования очень велик, но при этом разновидность металлорежущих станков в основном обусловлена конструктивно-технологическими особенностями обрабатываемых деталей. По способу обработки станки подразделяются на *токарные, сверлильные, шлифовальные, фрезерные, строгальные*. По степени универсальности, а также в зависимости от характера производственного процесса, различают станки *универсальные, специализированные и специальные*. Универсальные станки предназначены для обработки однотипных деталей широкой номенклатуры. Специализированные станки служат для обработки деталей, сходных по конфигурации, но имеющих различные размеры. Специальное станочное оборудование предназначено для обработки единичных образцов сложных дорогостоящих изделий.

С развитием числового программного управления появился определенный вид технологических систем – гибкие автоматизированные производства. Они представляют собой группы металлорежущих станков, оснащенных общей системой управления и обеспечивающих тех-

нологический цикл серийного выпуска деталей, включая их складирование и контроль. Современное гибкое автоматизированное производство является сложной автоматической линией, оснащенной станками с числовым программным управлением и управляемой от одной или нескольких ЭВМ.

Для придания требуемой формы и размеров обрабатываемой детали в станках производят перемещение рабочего органа относительно заготовки. Такое движение разделяется на главное движение, за счет которого происходит резание материала, и на движение подачи, с помощью которого снимают новый слой металла. Так, например, в токарных станках главным движением является вращение заготовки, во фрезерных станках – вращение инструмента (фрезы), в шлифовальном – вращение шлифовального круга. Наиболее часто главное движение требует наибольшей установленной мощности его привода по сравнению с мощностями приводов подач. Это обусловлено тем, что различные технологические режимы обработки требуют больших диапазонов изменения скоростей и сил обработки. Таким образом, требования к электроприводам металлорежущих станков формулируются режимом работы станков. Так, например, к электроприводам главного движения предъявляются требования изменения угловой скорости в диапазоне 2,5:1 – 4:1 при постоянной мощности и в диапазоне 10:1 – при постоянном моменте. Электроприводы подач станков с числовым управлением должны обладать широким диапазоном изменения скорости, который достигает 10000:1 и более. Время пуска и торможения такого привода с приведенным моментом инерции механизма, равным моменту инерции двигателя, не должно превышать 0,1с. Жесткие требования также предъявляются к равномерности перемещений на пониженных скоростях, и точности позиционирования (табл. 1.2).

Другой наиболее распространенной областью применения систем с числовым программным управлением является роботизированный комплекс. Роботизация возникла как реакция на потребность автоматизации вспомогательных ручных операций на производствах с вредными условиями труда и на производствах с высоким уровнем автоматизации технологических процессов. Повышение качественных показателей воспроизведения заданных траекторий движения позволило применять роботы в таких областях как сварка, нанесений покрытий, сборка и контроль параметров изделий.

В настоящее время в зависимости от использования промышленных роботов различают манипуляционные и производственные роботизированные технологические комплексы (РТК).

В манипуляционных РТК промышленные роботы выполняют обслуживание основного технологического оборудования, операции транспортирования, загрузки и разгрузки. Основными видами машиностроительного производства, в которых используются манипуляционные роботы, являются литейное производство, термообработка,ковка, обслуживание металлорежущих станков.

В производственных РТК - промышленные роботы используются в качестве основного оборудования и выполняют такие операции как сварка, сборка, нанесение лакокрасочных покрытий. Для таких комплексов характерно цикловое и позиционное управление. Широкое применение промышленных роботов для автоматизации процессов точечной и дуговой сварки стало возможным благодаря появлению быстродействующих микропроцессорных систем управления.

В каждом конкретном случае существуют свои требования и особенности функционирования тех или иных промышленных механизмов, однако при всем их многообразии практически все промышленные механизмы обладают общими режимами работы исполнительных электроприводов:

- режим перемещения рабочего органа (вала электродвигателя) электропривода из одного положения в другое с ограничениями на переменные состояния или без ограничений;
- режим слежения за программным заданием на перемещение рабочего органа или изменение других переменных состояния;
- режим стабилизации скорости движения рабочего органа или стабилизации других переменных состояния.

Исходя из общих особенностей в функционировании промышленных механизмов, можно сформировать требования, которые они должны обеспечивать (табл. 1.2).

Примечание: в числителе приведены параметры существующих, в знаменателе – перспективных промышленных механизмов.

Другими бурно развивающимися областями применения систем с числовым управлением являются системы наведения антенн, слежения за спутниками, наведения телескопов.

Помимо выше описанных областей применения систем с числовым программным управлением в настоящее время большое распространение получают системы лазерной обработки материалов. Это прецизионный лазерный раскрой материалов (металл, дерево и др.) и нанесение рисунка на поверхность материала, обрабатываемого лазером. Основным достоинством лазерного раскроя материалов является отсутствие механического контакта между рабочим инструментом и материалом, ввиду чего отсутствует необходимость в коррекции изношенного инст-

румента, как, например, при фрезеровании. Однако эти отличия накладывают и свои ограничения. Одно из наиболее важных – это высокая точность поддержания заданной контурной скорости перемещения рабочего органа. Так, например, если система обрабатывает перемещение со скоростью, несколько превышающей заданное значение, может быть нарушена требуемая глубина резания обрабатываемого материала. В случае если при обходе заданной траектории скорость перемещения в какой-то ее части была ниже заданной, то это может привести не только к большей глубине прореза, но и значительно большему оплавлению кромок детали. Описанные явления в итоге приводят к потере качества обрабатываемой детали.

Таблица 1.2

Механизмы	Характеристики движения рабочего элемента			Собственная частота колебаний механизма, Гц	Кратность момента инерции механизма
	Скорость, м/с	Ускорение, м/с ²	Точность позиционирования, мм		
Подач станков	$\frac{0,1-0,25}{0,1-0,3}$	$\frac{0,05-0,2}{0,1-0,5}$	$\frac{0,002-0,05}{0,001-0,05}$	15–60	1,2–1,5 (const)
Промышленных роботов для механообработки	$\frac{1-2}{1-3}$	$\frac{2-3}{2-6}$	$\frac{0,1-1,0}{0,02-0,5}$	3–10	2–6 (var)
Промышленных роботов для сборки	$\frac{3-5}{5-10}$	$\frac{3-6}{10-40}$	$\frac{0,05-0,1}{0,01-0,1}$	5–15	2–6 (var)

Основные технологические параметры (с точки зрения системы управления электроприводами), обеспечивающие современные лазерные комплексы, приведены в табл. 1.3.

Обзор различных устройств, содержащих в своем составе цифровую систему управления положением исполнительного органа механизма, показал, что проблема разработки алгоритмов управления электроприводами остается актуальной. Для описания сложных траекторий движения иногда становится недостаточно применение «классических» видов интерполяции (круговая и линейная), как, например, при воспроизведении сложных изображений на поверхности изделия (фирма

LASERSOFT, г. Санкт-Петербург). Ввиду этого становятся востребованными такие виды интерполяции, как сплайн-интерполяция.

Таблица 1.3

Станок (производитель)	Рабочее поле, мм	Вертикальный ход головки лазера, мм	Точность позиционирования, мм	Скорость позиционирования, м/мин	Ускорение, м/с ²
CM15 (Art-Laser, г. Санкт-Петербург)	2500×2500	140	0,02	16	—
LC1225 (ESAB, Швеция)	2500×1250	100	0,05	48	—
LASERCUT (MicroStep, Словакия)	6000×2000	150	0,02	60	—
LASERTEC 80 (DMG, Германия)	900×600	700	0,02	120	11,76

Проведенный обзор показывает, что появление новых технологических производств сопровождается развитием и появлением нового оборудования. Это, в свою очередь, предопределяет появление новых систем управления технологическим оборудованием. В первую очередь, это проявляется в развитии многоуровневых систем управления, построении SCADA-систем. Особое место в этом занимают системы управления многокоординатными электроприводами, поскольку тенденции последних лет показывают, что управление электроприводами перестает быть локальной задачей управления.

1.7. Программные средства систем управления многокоординатными СЭП

Обзор архитектурных решений систем числового программного управления показал, что в настоящее время наиболее актуальными архитектурными решениями являются варианты систем, в основе которых лежит концепция PCNC. Тенденции последних лет отражают тот факт, что в борьбе за рынок разработчики все больше отдают предпочтение однокомпьютерному варианту (PCNC-4). Это, прежде всего, обусловле-

но следующими факторами: гибкостью в адаптации системы управления к конкретному объекту, возможностью конечному пользователю программно реализовывать свои алгоритмы управления, отсутствием значительных капиталовложений. Помимо этого, стоимость оборудования, необходимого для реализации однокомпьютерного варианта, значительно ниже стоимости архитектурных вариантов, реализованных на базе двух вычислительных устройств.

Отличительной особенностью данного решения является - программная реализация приложений пользователя, ядра ЧПУ, интерпретатора и интерполятора. Как правило, программно реализованные алгоритмы управления многокоординатными электроприводами функционируют под управлением операционных систем реального времени.

Следует отметить, что под операционной системой понимается комплекс программ, обеспечивающих управление ресурсами программно-аппаратного комплекса (вычислительной системы) и процессами, использующими эти ресурсы при вычислениях.

По определению Дональда Гиллиеса, системой реального времени является такая система, функционирование которой определяется не только корректностью выполнения вычислений, но и временем получения требуемого результата. Другое определение системы реального времени – это аппаратно-программный комплекс, который должен своевременно и предсказуемо реагировать на поступающие извне раздражители. К таким операционным системам относятся VxWorks, OS-9, PSOS, QNX, LynxOS. Эти системы обладают быстрым временем реакции на события и прерывания, компактностью кода, хорошей встраиваемостью и другими преимуществами, характерными для операционных систем с микроядерной архитектурой. Общими требованиями для всех операционных систем реального времени являются следующие:

- минимальное время отклика на событие;
- предсказуемость;
- возможность безотказной работы в течение длительного времени;
- наличие системы приоритетов;
- возможность параллельного выполнения нескольких задач.

Из вышеперечисленных требований следует, что системы реального времени должны предсказуемо, в пределах максимально допустимого времени, реагировать на различные типы внутренних и внешних событий. Исходные требования к времени реакции системы и другим временным параметрам формируются техническим заданием на систему либо логикой ее функционирования. Исследования различных операционных систем показывают, что для достижения реакции системы в пределах 100мкс используются операционные системы реального времени.

В интервале от 100мкс до 1мс могут быть использованы многозадачные операционные системы с расширениями реального времени UNIX, Linux, Windows NT, CE. В диапазоне до 1мс могут быть использованы классические многозадачные операционные системы, такие как Windows NT/XP, Linux. Достижения максимальной производительности в этом случае зависит от сложности вычислений, производимых в функционирующем программном обеспечении. Однако получить в этом случае гарантированное время реакции невозможно. Поэтому использование таких операционных систем без какой-либо дополнительной доработки ограничивается областями, где опоздание реакции системы не приведет к тяжелым последствиям или эта система используется для моделирования и отработки тех или иных алгоритмов управления технологическим оборудованием.

Опыт применения Windows NT в различных областях автоматизации показывает, что в большинстве случаев данная операционная система без каких либо изменений используется в системах «мягкого реального времени». В большинстве случаев это интеллектуальные терминалы, верхний уровень SCADA-систем. В общей массе производимых устройств с числовым программным управлением операционные системы с интегрированным ядром реального времени (RTX, Falcon, Hyperkernel, IA-SPOX и др.) на сегодняшний день используются редко. Прежде всего, это обусловлено отсутствием аппаратной поддержки большинства современных контроллеров, а также невозможностью построения компактной системы (требования к flash-памяти не менее 10Мбайт). Обзор ОС применяемых в системах с архитектурой типа PCNC приведен в табл. 1.4.

Анализ систем с открытой архитектурой типа PCNC показал, что наиболее часто в качестве операционной системы используется система Microsoft Windows NT с интегрированным ядром реального времени типа RTX (фирма VentureCom). Интегрированные ядра являются сторонними разработками. Многие фирмы, разрабатывающие системы типа PCNC, используют их без дополнительной доработки. Наряду с готовыми решениями также существуют и собственные разработки, например, ядро NCT (Numerical Control Kernel) фирмы Siemens. Помимо операционной системы Windows NT используются специализированные системы, применяемые во встраиваемых системах – Windows CE, RTDOS (Fanuc, Siemens). Их основными достоинствами являются малые требования к памяти и дисковому пространству промышленных ПК, меньшее время реакции системы на внешние события. В отечественных разработках наибольшее применение находят системы PCNC на базе ОС Windows с RTX, а также ставшей уже классической MS DOS.

Таблица 1.4

Производитель	Система PCNC	Интерполяция	Операционная система
СТАНКИН (г.Москва)	WinPCNC	Линейная, круговая	Windows NT+RTX4.1
Siemens (Германия)	802D	Линейная, круговая	RealTime DOS
	840D	Линейная, круговая, кубический сплайн, В-сплайн	Windows NT+NCK / RTUNIX
	840Di	Линейная, круговая, полиномиальная	Windows XP+NCK
НПП «Мо- дель» (г. Нижний Новгород)	NC-2000	Линейная, круговая	Windows NT
	NC-3.5	Линейная, круговая	RTOS
Балт-Систем (г. Санкт- Петербург)	NC 110	Линейная, круговая	MS DOS
	NC 200	Линейная, круговая	MS DOS
	NC 210	Линейная, круговая	MS DOS
Fanuc (Япония)	Series 300is	Информация не из- вестна	Windows CE 4.2
	Series 300i	Информация не из- вестна	Windows XP
	Series 160i	Информация не из- вестна	Windows 2000
МОДМАШ (г. Нижний Новгород)	FMS-3000	Линейная, круговая	MS DOS
	FMS-3100	Линейная, круговая	MS DOS
CandCNC (США)	MP-1000- THC	Линейная, круговая	Windows 2000
МШАК (Армения)	MSH- TURBO- M/U	Линейная, круговая, сплайнами	Windows NT+RTX
	MSH- PC104	Линейная, круговая, сплайнами	Windows NT+RTX

С точки зрения использования алгоритмов интерполяции в отечественных разработках наблюдается значительное отставание от зарубежных аналогов. Большинство отечественных разработок до сих пор комплектуется только линейной и круговой интерполяцией, в то время как разработки фирм Heidenhain, Siemens и др. опционально оснащены

многокоординатной кубической сплайн-интерполяцией и средствами цифровой коррекции, позволяющими минимизировать динамическую ошибку следящей системы. В тех случаях, когда отечественные разработчики применяют сплайн-интерполяцию, используются уже готовые решения зарубежных производителей в виде модулей управления сервоприводами, устанавливаемых в PCI/ISA-слота промышленного или персонального компьютера.

С учетом особенностей операционных систем, а также архитектурных решений систем управления, построенных на базе PCNC, можно сформулировать основные требования к программному обеспечению:

- надежность и предсказуемость (отсутствие нештатных ситуаций связанных с повисанием компьютеров);
- функционирование в режиме реального времени «Real-Time»;
- компактность;
- возможность гибкого изменения алгоритмов функционирования в соответствии с требованиями заказчика;
- поддержка различных интерфейсов связи с технологическим оборудованием.

Одним из наиболее существенных достоинств систем класса PCNC на сегодняшний день является открытость не только архитектуры, но и программного обеспечения. Практическое большинство программных пакетов, поставляемых вместе с такими системами, обычно позволяют производить перенастройку алгоритмов функционирования электроавтоматики и интерфейса оператора. Однако программное обеспечение и алгоритмы функционирования, отвечающие за управления движением, как правило, не раскрываются. Такое обстоятельство, в первую очередь, определено большой конкуренцией между разработчиками систем с числовым программным управлением следящими электромеханическими объектами.

2. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

2.1. Тенденции в развитии сервоприводов

Прогресс в областях электроники и используемых в электротехнике материалов изменили ситуации в технике привода. До сих пор в сервотехнике применялись в основном двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. Главный недостаток двигателей переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока состоит в ограни-

ченной возможности регулирования скорости. Последние достижения в области электроники, особенно в микроконтроллерах, позволяют компенсировать этот недостаток путем использования современных средств управления.

В настоящее время происходит смещение акцентов в приводных системах от двигателей постоянного тока к двигателям переменного тока. Тенденция перехода к синхронным двигателям переменного тока особенно очевидна в сервосистемах, которые почти всегда выполнялись с использованием электроприводов постоянного тока. Новые постоянные магниты, изготовленные из сплавов неодим-железо-бора и самарий-кобальта благодаря их высокой энергоемкости, могут существенно улучшить динамические характеристики двигателя при одновременном снижении массо-габаритных показателей электрических машин.

В современной приводной технике во многих случаях предъявляются жесткие требования к следующим характеристикам:

- погрешности позиционирования;
- погрешности стабилизации скорости;
- широкому диапазону регулирования;
- стабилизации момента вращения;
- перегрузочной способности;
- высокой динамике.

Требования к динамике, складываются из ускоряющихся процессов обработки, увеличению циклов обработки и связанной с ними производительности машины. Высокая точность очень часто определяет возможность использования систем электропривода в новых технологиях. Этим требованиям должны отвечать современные высокодинамичные системы электропривода.

В соответствии с вышесказанным можно дать определение сервоприводу. Сервопривод – это система привода, которая в широком диапазоне регулирования скорости обеспечивает динамичные, высокоточные процессы и обеспечивает хорошую их повторяемость.

Изначально в машиностроительных отраслях сервоприводы были преимущественно вспомогательными приводами (приводы подач в станках, приводы роботов и т.п.). Однако в настоящее время ситуация изменилась, теперь и главные приводы реализуются с использованием сервотехники. Принципиально перечисленных выше качеств можно добиться с использованием: двигателей постоянного тока независимого возбуждения, асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

2.2. Техническое развитие сервоприводов

Первоначально на рынке доминировали пневматические и гидравлические сервоприводы. Привод постоянного тока получил распространение лишь в 60-х годах, с развитием полупроводниковой техники. С точки зрения требований динамики развитие сервоприводов проходило в направлении создания двигателей постоянного тока с малым моментом инерции. В основу получения малого момента инерции ротора были положены два решения. Первое предполагало реализацию якоря двигателя в виде тонкого плоского диска, не содержащего железа, второе – основывалось на получении цилиндрического немагнитного якоря. В обоих случаях в начале 70-х годов стали широко применять постоянные магниты из редкоземельных материалов, обеспечивающих повышенное значение индукции в воздушном зазоре и высокого крутящего момента.

В качестве силовых преобразователей первоначально использовались – аналоговые усилители с силовыми транзисторами и выходным напряжением приблизительно до 100 В. Позже появились тиристорные преобразователи, которые применялись до конца 70-х годов, когда им на смену пришли импульсные преобразователи постоянного тока на ключевых транзисторах. Это сопровождалось значительным повышением изначально низкого коэффициента полезного действия электронных источников питания. Напряжение, которое могло быть получено на выходе электронных источников питания ограничивалось приблизительно на уровне 200 В из-за низкого допустимого напряжения транзисторов и ограничения напряжения между коммутируемыми сегментами коллектора двигателя. Транзисторные преобразователи, как правило, подключали к сети через трансформатор. Это позволяло осуществить согласование выходного напряжения преобразователя с питающей сетью.

Управление контурами скорости и момента было аналоговым, со всеми вытекающими из этого проблемами помехоустойчивости (восприимчивости низковольтных сигналов к наводкам) в широком диапазоне регулирования скорости, характерном для сервоприводов. Для измерения действительной скорости в канале обратной связи применялись тахогенераторы постоянного тока.

Развитие преобразователей частоты, первоначально реализуемых на тиристорах, позднее на силовых транзисторах, привело к повышению использования асинхронных стандартных двигателей переменного тока для приводов с невысокими требованиями по точности управления.

Исследования бесщеточных двигателей, которые могут быть использованы в сервоприводах, были начаты с середины 70-х годов. В

противоположность обычной компоновки двигателя постоянного тока разработчики пришли к перспективному новому решению: якорь на статоре, поле возбуждения на роторе. Так появились бесщеточные двигатели постоянного тока, или двигатели с электронной коммутацией. Эти электрические машины принципиально представляют собой синхронные двигатели (СД) с постоянными магнитами, в которых положение ротора контролируется простым импульсным датчиком положения (энкодером), производящим импульсы по числу полюсов.

В дополнение к электронной бесконтактной коммутации и низкому износу, этот тип привода имеет следующие преимущества:

- пониженный момент инерции из-за отсутствия обмотки на роторе;
- простота охлаждения, так как отвод тепла от статора предпочтительнее, чем от ротора;
- повышенный КПД, так как нет потерь, связанных с обмоткой возбуждения.

Электронная коммутация секций обмотки статора производится каждые 60 электрических градусов и осуществляется датчиком положения ротора (ДПР). Как и коммутация с помощью коллектора в двигателях постоянного тока этот принцип коммутации также реализуется в виде устройства коммутации и имеет блочное исполнение. Для управления скоростью двигателя необходим дополнительный датчик скорости, например тахогенератор.

Параллельно с этим развивалось также и направление по применению в качестве сервопривода асинхронного двигателя переменного тока. Этот тип двигателя недорогой в производстве и имеет дополнительное преимущество с возможностью управления в диапазоне ослабления поля.

С другой стороны, с разработкой бесщеточных двигателей проводились теоретические исследования по так называемой синусной коммутации сервопривода. Принципиально двигатель с синусной коммутацией представляет собой СД с постоянными магнитами, со всеми преимуществами, указанными выше. Однако датчиком положения ротора в этом случае служит резольвер, выходными синусоидальными сигналами которого управляется ток статора машины.

Указанные выше все три типа бесконтактных приводов используются в настоящее время и обеспечивают почти полную замену приводов с коллекторными двигателями с начала 90-х годов. Решающим фактором этих успехов явился прогресс в области полупроводниковой техники.

Развитие высокой степени интеграции, высокоскоростных процессорных систем и модулей энергонезависимой памяти облегчило вне-

дрение цифрового управления. Во всяком случае, функциональные задачи, встречающиеся более или менее часто в индивидуальных технических системах, не так сильно сказывались на цене. Внедрением индивидуального программного обеспечения удалось избежать увеличения количества аппаратных модулей.

Силовые модули в системах управления для всех трех типов бесконтактных приводов основаны на следующем: преобразователь частоты (инвертор), управляемый датчиком положения ротора двигателя, предпочтительнее, чем инвертор с независимым управлением, используемый для стандартных двигателей переменного тока. Функциональные различия состоят только в наличии замкнутой и разомкнутой обратной связи в системе управления. Развитие силовых транзисторов с начала 90-х годов сделало также возможным подключать силовые преобразователи сервоприводов непосредственно к сети без использования сетевого трансформатора.

Таким образом, пройдя несколько этапов эволюции, современный сервопривод представляется сложной системой показанной на рис. 2.1.

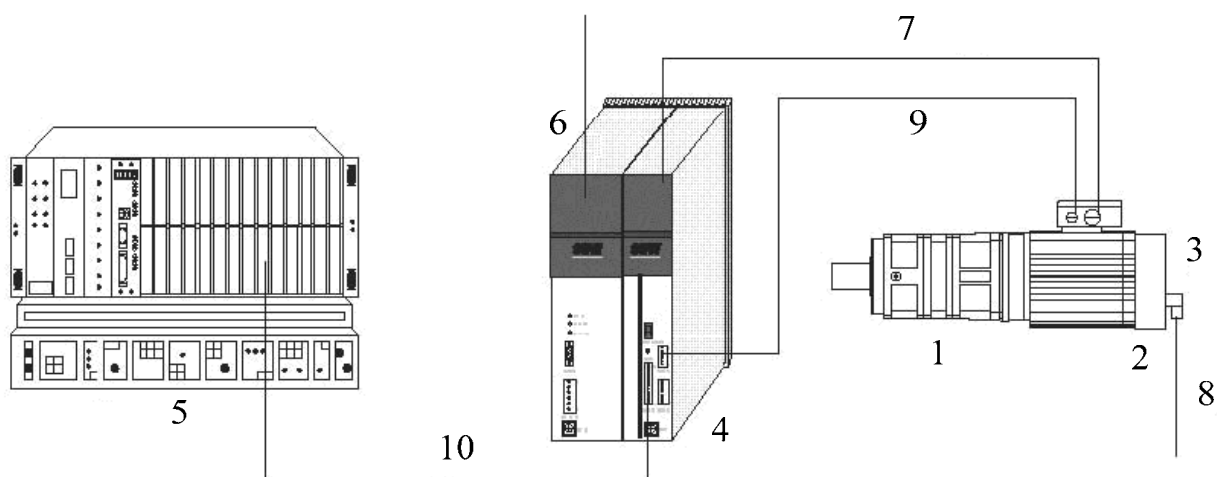


Рис .2.1. Компоненты сервопривода: 1 – двигатель (с редуктором); 2 – датчик обратной связи; 3 – тормоз; 4 – сервоусилитель; 5 – внешняя управляющая система; 6 – сетевой кабель; 7 – кабель двигателя; 8 – кабель тормоза; 9 – кабель датчика обратной связи; 10 – кабель управления

2.3. Области применения сервоприводов

Сервопривод первоначально применялся только в машиностроении при инструментальной обработке материалов. Однако его потенциал был очень быстро реализован в начале 70-х годов в результате рас-

ширения областей обработки, развития промышленных роботов и систем автоматизированной сборки.

В противоположность инструментальной обработке, замена пневматического и гидравлического оборудования шла медленнее, часто из-за больших различий в требованиях к размещению привода. В промышленности обработки материалов и робототехнических системах сначала использовались двигатели постоянного тока с дисковыми роторами совместно с низколюфтовыми планетарными редукторами или другими типами компактных редукторов, обеспечивающих минимизацию массогабаритных показателей привода. Позднее двигатели постоянного тока с дисковыми роторами были заменены бесконтактными двигателями. Теперь, когда автоматизация полностью охватила все области машиностроения, механика машин сильно упростилась с использованием современных индивидуальных приводов. В результате расширился рынок сервоприводов. Сегодня трудно найти сферу деятельности, где нет применения сервоприводам. Наибольшее применение они находят в следующих областях:

- изготовление бумаги;
- изготовление металлического листа;
- упаковка;
- обработка материалов;
- подъемно-транспортное оборудование;
- деревообработка;
- производство строительных материалов.

Сервоприводы широко используются в различных областях, и не все применения имеют высокую динамику. Однако возможности получения высокостабильного или точного управления, широкий диапазон регулирования скорости, высокая помехоустойчивость, малые габариты и вес часто являются решающим фактором их применения.

Благодаря современным цифровым технологиям, сервоприводы сегодня использовать намного легче, чем несколько лет назад. Цифровые технологии предлагают широкий выбор ориентированных на специальное применение возможностей, большое разнообразие устройств связи с объектами (как напрямую, так и через шины интерфейсов) и возможность использовать персональный компьютер для контроля, оптимизации и автоматической настройки привода. Гидравлические и пневматические приводы, упомянутые выше, в настоящее время имеют только отдельные ниши на рынке.

2.4. Обзор наиболее распространенных сервоприводов

Если сравнивать распространенные сегодня системы привода, то базой для сравнения должны служить различные факторы. В качестве критериев сравнения наиболее целесообразно выбрать следующие три принципиальных показателя:

- характеристики двигателей;
- основные характеристики приводов;
- конфигурации системы управления.

Сводные данные по описанным критериям приведены в табл. 2.1. Сравнение приводится для конкретных двигателей близкой мощности с близкой номинальной скоростью.

В табл. 2.1. приняты следующие обозначения:

– под максимальным ускорением понимается максимальное угловое ускорение $a_{\text{МАКС}} = M_{\text{МАКС}} / J_{\text{Д}}$;

– время разгона без нагрузки определяется выражением $t_{\text{РАЗГ}} = \frac{J_{\text{Д}} \cdot n_{\text{Д}}}{9,55 \cdot M_{\text{МАКС}}} = \frac{J_{\text{Д}} \cdot \omega_{\text{Д}}}{M_{\text{МАКС}}}$;

– максимальная динамика определяется по выражению $(a / a_{\text{СЕРВО}}) \cdot 100\%$.

Таблица 2.1

Параметры	Асинхронный двигатель, питающийся от сети	Двигатель постоянного тока	Синхронный двигатель с постоянными магнитами
Мощность, кВт	7,5	8,3	7,5
Скорость, об/мин	2900	3200	3000
Тип / типоразмер	DFV132M2	GFVN160M	DFY112ML
Тип защиты	IP54	IP44	IP65
Охлаждение	Вентилятор	Вентилятор	Самоохлаждение через поверхность
Длина, мм	400	625	390

Полная масса, кг	66	105	38,6
Масса ротора, кг	17	29	8,2
$J_d \times 10^{-4}$, кгм ²	280	496	87,4
Номинальный момент, Нм	24,7	24,7	24
Максимальный момент, Нм	2,6 М _Н	1,6 М _Н	3,0 М _Н
Максимальное ускорение, 1/с ²	1588	797	8238
Максимальная динамика, % (серводвигатель = 100%)	20	10	100
Время разгона без нагрузки, $t_{разг}$, мс	191	420	38

Оценив массу различных двигателей, видно, что синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет наименьшую массу (рис. 2.2). Этот факт является достаточно важным преимуществом данного типа двигателей особенно в случаях установки двигателя на перемещаемом механизме. Соответственно наибольшей массой обладает двигатель постоянного тока.

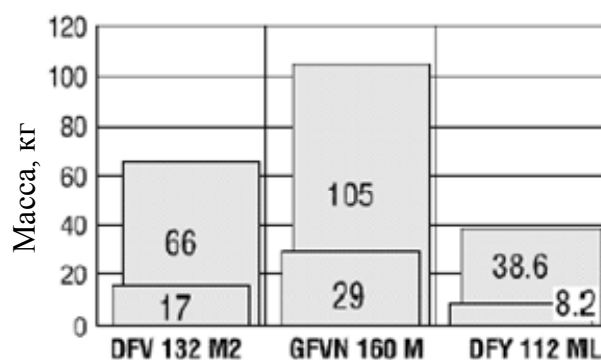


Рис. 2.2. Масса двигателей и роторов

Сравнивая моменты инерции двигателей видно (рис. 2.3), что они особенно сильно различаются. Малый момент инерции двигателя выгоден, если исполнительный орган имеет небольшой момент инерции, приведенный к двигателю. Однако при большом моменте инерции исполнительного органа эта особенность синхронного двигателя оказывается несущественной.

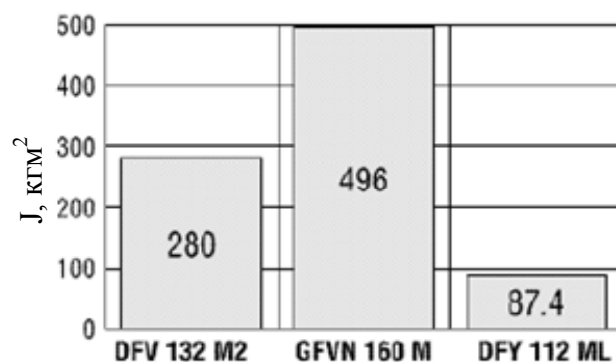


Рис. 2.3. Моменты инерции различных типов двигателей

Сравнение максимальной динамики различных типов двигателей показывает, что синхронные двигатели обладают наиболее высокими показателями по сравнению с другими типами двигателей (рис. 2.4).

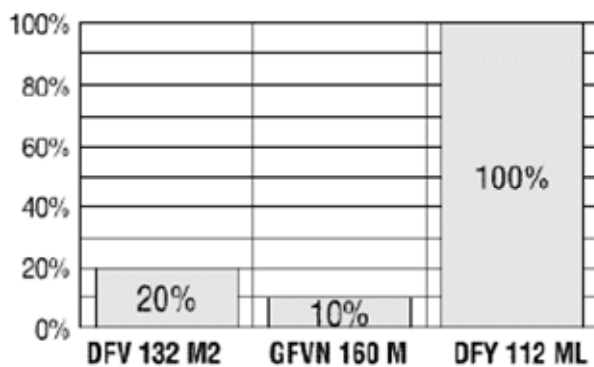


Рис. 2.4. Максимальная динамика

Из табл. 2.1. видно, что вследствие высокого максимального момента $M_{\text{МАКС}}$ и малому моменту инерции, синхронный двигатель имеет весьма малое время разгона без нагрузки, что позволяет рекомендовать его для динамичных электроприводов.

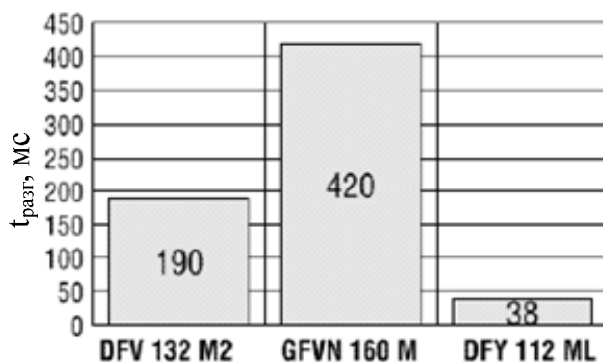


Рис. 2.5. Максимальная динамика

Другим значимым критерием сравнительной оценки систем сервоприводов являются характеристики исполнительных электроприводов. Обзор таких характеристик для различных типов приводов показан в табл. 2.2, 2.3.

Таблица 2.2

Характеристики	Двигатель постоянного тока	Асинхронный двигатель, управляемый от преобразователя частоты (разомкнутый контур U/f)	Асинхронный двигатель, управляемый от преобразователя частоты (замкнутый контур U/f)	Синхронный двигатель
Диапазон регулирования R	100 (300) : 1	10 (20) : 1	100 : 1	300 (10000) : 1
Перегрузка M/M_H (%)	150..200	150	$> M_K^{1)}$	300
$t_{РАЗГ}$ (%) при замкнутом контуре управления (синхронный =100%)	500	450..500	300..400	100
Принудительное охлаждение для широкого диапазона регулирования R	да	да	да	нет
Статический момент	в ограниченной мере	нет	в ограниченной мере	да
Обслуживание (двигателя)	большое	небольшое	небольшое	небольшое
Ремонт (двигателя)	средний	легкий	легкий	сложный
Взаимоза-	да	да	да	возможно

няемость двигателей				
Потребность в запасных частях	большая	небольшая	небольшая (датчик)	большая
Управление большой внешней массой	отлично	хорошо	хорошо	сложно из-за малого $J_{дв}$
Аварийный останов с помощью механич. тормоза двигателя	хорошо	хорошо	хорошо	хорошо ²⁾
4-х квадрантный режим	с возвратом энергии в сеть (рекуперативное торможение)	с тормозным прерывателем / тормозным резистором	с тормозным прерывателем тормозным резистором	с возвратом энергии в сеть или тормозным прерывателем/ тормозным резистором
Возможность позиционирования и точность повторения	зависит от тахогенератора и внешних устройств	отдельно нет, в отличие от замкнутой по скорости системы (зависит от внешних условий – контроллер, тормоз и т.п.)	точность позиционирования приблизительно ± 50 угловых минут	точность позиционирования приблизительно ± 50 угловых минут

Примечание к таблице:

- 1) – когда двигатель питается от преобразователя частоты с возможностью управления скоростью, соответствующий выбор преобра-

зователя частоты позволяет получить максимальный момент двигателя в 300% M_H и более;

- 2) – в синхронных двигателях механический тормоз является только аварийным и стояночным тормозом.

Таблица 2.3

Характеристики	Асинхронный двигатель			Двигатель постоянного тока	Синхронный двигатель
	Прямое подключение к сети	ПЧ с управлением U/f	ПЧ с регулятором		
Тип	DV132S4 1400 об/мин	DV132S4 1400 об/мин	DV132S4 1400 об/мин	GVN132S 3200 об/мин	DFY112M 3000 об/мин
Мощность	5,5 кВт	5,5 кВт	5,5 кВт	5,3 кВт	17,5 Нм (5,5 кВт)
Редуктор	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 33,87$	R82 $i = 31,78$
Тип устройства управления / мощность, ток	Нет	МС 31В 075 5,5 кВт	МС 31В 075 5,5 кВт	MR 315 15 А	MAS 51А- 030 30 А
Пусковой момент M_H	2,4 M_H	1,3 M_H	2,0 M_H	1,5 M_H	3 M_0
Макс. время разгона	230 мс	450 мс	300 мс	620 мс	200 мс
Макс. ускорение $J_{ВНЕШ}/J_{ДВИГ}$	6,7 м / с ² 5,4	3,5 м / с ² 5,4	5,3 м / с ² 5,4	2,43 м / с ² 1,0	7,45 м / с ² 3,4
Торможение	механическое торможение от полной скорости	динамическое торможение, затем механический тормоз	динамическое торможение затем удержание / механический тормоз	динамическое торможение затем механический тормоз	динамическое торможение затем удержание / механический тормоз
Полный тормозной	150 мм	300 мм	190 мм	380 мм	125 мм

путь (приблиз.)					
Теоретическая точность остановки	18 мм	0,4 мм	0,12 мм	0,12 мм	0,05 мм
Практическая точность остановки	около 25 мм	около 3 мм	около 1 мм	около 1 мм	около 0,5 мм

В соответствии с вышесказанным можно выделить следующие достоинства и недостатки рассмотренных сервоприводов. Преимущества:

- хорошее поддержание скорости;
- относительно высокая стоимость системы;
- отличные динамические возможности;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- высокая точность позиционирования;
- статический момент (при нулевой скорости);
- высокая перегрузочная способность ($3 M_0$)

Одним из наиболее значимых недостатков является относительно высокая стоимость системы.

2.5. Характеристики некоторых типов серводвигателей

До недавнего времени сервоприводы выполнялись с использованием бесконтактных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами совместно с тиристорными или транзисторными преобразователями. Сегодня в качестве сервоприводов все шире применяются электроприводы с синхронными двигателями на постоянных магнитах. Их преимуществами по сравнению с приводами постоянного тока являются:

- хорошее соотношение цена/мощность;
- хорошие массогабаритные показатели;
- длительный срок службы;
- высокая перегрузочная способность.

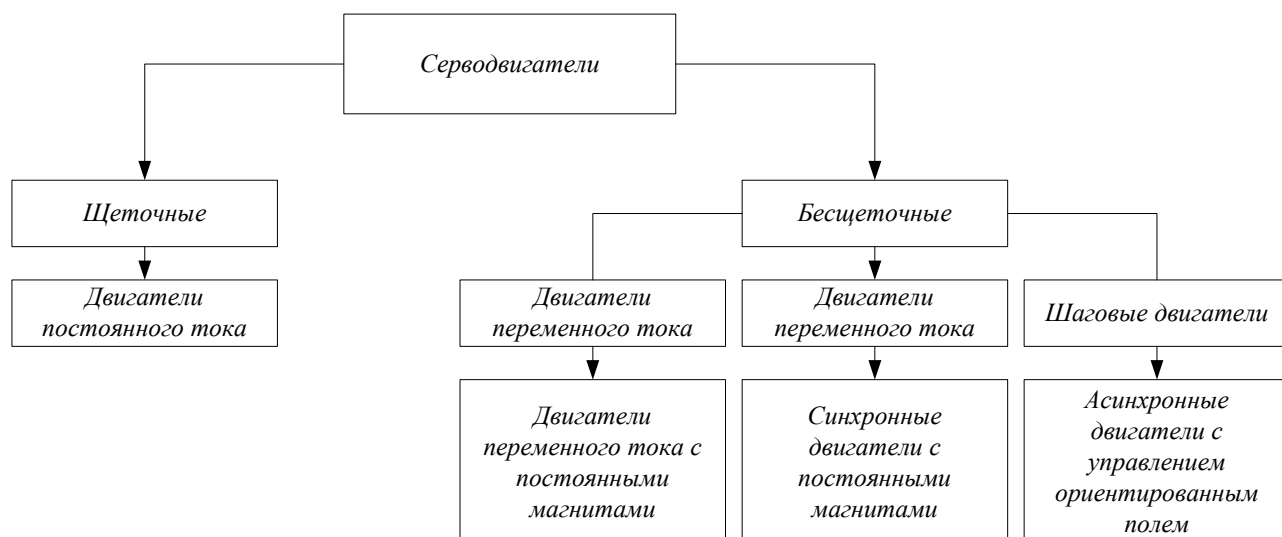


Рис. 2.6. Классификация серводвигателей

Приведенные системы отличаются конструкцией двигателя, конструкцией управляющей системы и типом обратной связи. В качестве примера рассмотрим далее три основные системы:

- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и с управлением ориентированным полем;
- синхронный двигатель с постоянными магнитами (с прямоугольной коммутацией) / бесщеточный двигатель постоянного тока;
- синхронный двигатель с постоянными магнитами (с синусоидальной коммутацией) / бесщеточный двигатель переменного тока.

2.6. Датчики обратной связи в системах управления СЭП

В настоящее время на рынке сервоприводов существует большой выбор датчиков характеризующих скорость и положение вала двигателя (рис. 2.7). В каждом конкретном случае выбор того или иного типа датчика зависит от требуемой точности отработки заданий.

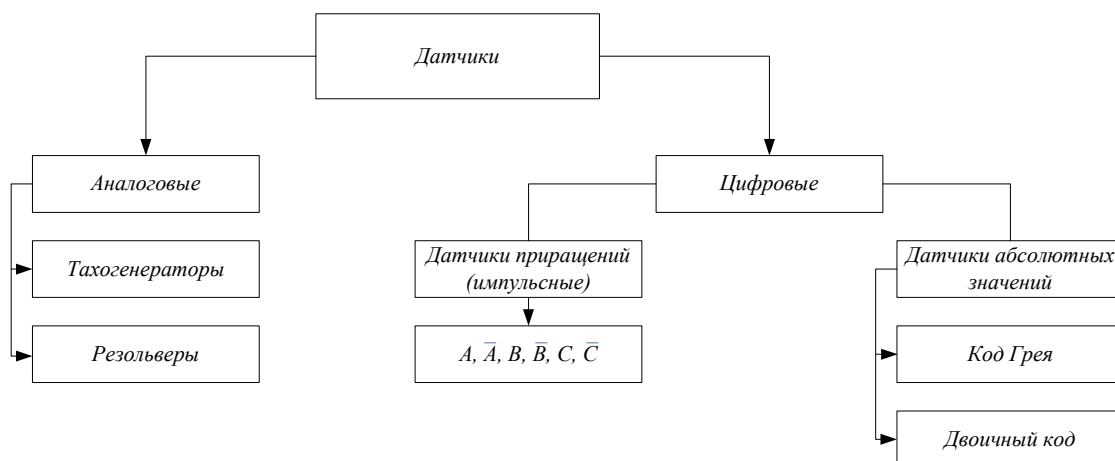


Рис. 2.7. Типы датчиков положения

Одним из важнейших критериев при выборе датчика является грубость системы измерения. Так как датчик устанавливается непосредственно на двигателе, он должен быть нечувствителен к вибрации и изменениям температуры. Другим важным фактором является помехоустойчивость измерительной системы.

В общем случае датчики характеризуются параметрами, приведенными в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Датчик	Измеряемые данные		
	Положение ротора	Положение исполнительного органа	Скорость
Датчик абсолютных значений однооборотный	■	□	□
Датчик абсолютных значений многооборотный	■	■	□
Датчик приращений	□	□	□
Резольвер с АЦП	■	□	■
Тахогенератор			■

Примечание: ■ – непосредственное получение данных, □ – используется с дополнительным преобразованием данных.

Достоинства и недостатки различных систем датчиков приведены в сводной табл. 2.5.

Таблица 2.5

Измерительная система	Достоинства	Недостатки
Датчик приращений	• относительно грубое исполнение • большое разнообразие по разрешающей способности, конструктивному исполнению, интерфейсу	• при потере напряжения исчезает информация о положении
Датчик абсолютных значений	• информация о положении сохраняется при исчезновении напряжения • однозначная связь между положением и выходной величиной • возможна очень высокая разрешающая способность •	• высокая стоимость
Резольвер	• грубое исполнение • устойчивость к температуре и вибрациям • может быть встроен в двигатель • экономия других измерительных систем	• высокие эксплуатационные расходы

Показанное сравнение отражает тот факт, что наиболее предпочтительными с точки зрения стоимости датчика, его надежности и эксплуатации являются резольверы. Однако на сегодняшний день подавляющее большинство разработчиков сервоприводов и станков с числовым программным управлением комплектуют свои системы инкрементными датчиками положения.

2.6.1. Резольвер

Резольвер служит для измерения абсолютного значения положения вала двигателя в пределах одного оборота. Кроме того, сигнал резольвера позволяет получить значение скорости и импульсный сигнал положения.

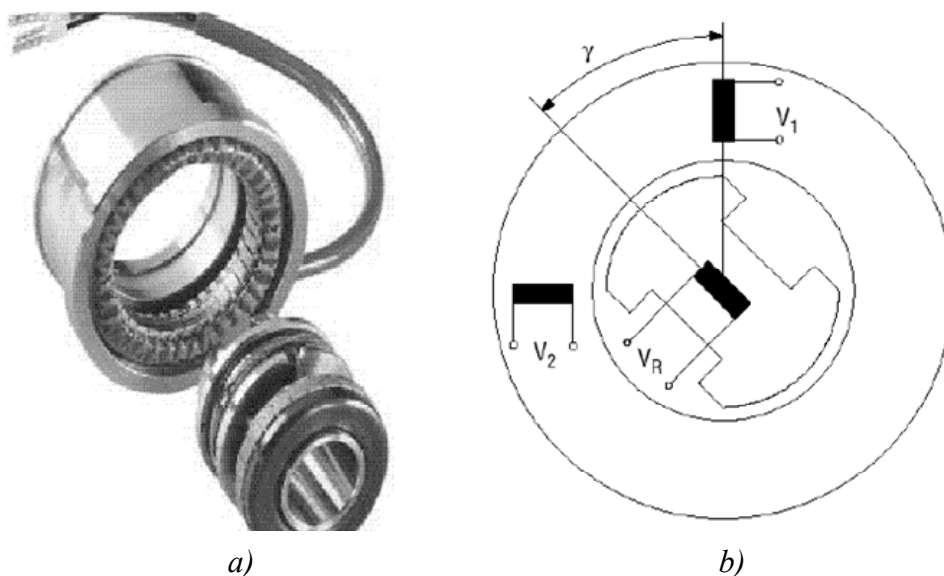


Рис. 2.8. Изображение резольвера – *a)*, схема резольвера – *b)*

Резольвер работает на принципе вращающегося трансформатора и состоит из ротора с обмоткой и статора с обмотками (рис. 2.8). Обмотки статора образуют с обмотками ротора трансформатор. Отличие от вращающегося трансформатора состоит в наличии на статоре двух сдвинутых друг относительно друга на 90^0 обмоток.

Ротор резольвера закрепляется на валу двигателя. Чтобы иметь возможность передать первичное напряжение на ротор, не используя щеточный контакт, на статоре и роторе предусмотрены дополнительные обмотки, с помощью которых первичное напряжение на роторную обмотку передается на трансформаторном принципе. Дополнительная обмотка и рабочая обмотка на роторе соединены между собой электрически, поэтому напряжение возбуждения, передаваемое со статора на ротор через дополнительную обмотку, будет приложено и к рабочей обмотке (обмотке возбуждения) ротора.

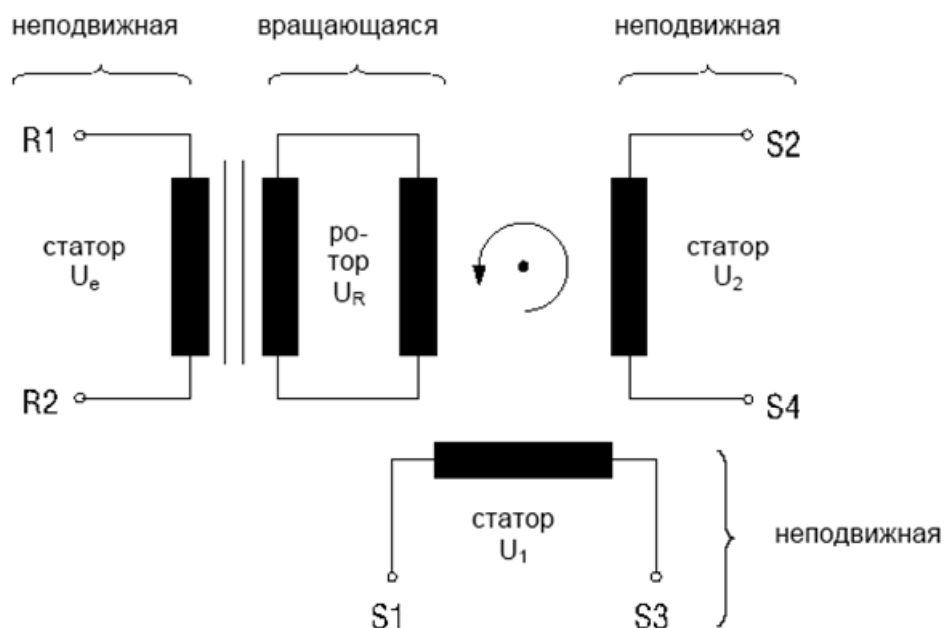


Рис. 2.9. Эквивалентная схема резольвера

В зависимости от положения ротора в рабочих обмотках статора индуцируются напряжения с изменяющейся в функции угла поворота ротора амплитудой. В обмотке статора, через которую проходит полный поток возбуждения при $\gamma = 0^\circ$ напряжение U_1 максимально (рис. 2.8 *b*). При повороте ротора на угол $\gamma = 90^\circ$ напряжение U_1 уменьшается до нуля. Затем напряжение U_1 вновь возрастает до максимума с другой фазой при $\gamma = 180^\circ$. Таким образом, напряжение U_1 имеет огибающую, изменяющуюся по закону косинуса. Напряжение U_2 второй рабочей обмотки сдвинуто относительно U_1 на 90° и имеет при $\gamma = 0^\circ$ нулевое значение. Это напряжение достигает максимума при 90° и затем снова уменьшается до нуля при $\gamma = 180^\circ$. Следовательно, напряжение U_2 изменяет свою амплитуду по закону синуса.

Выходные напряжения U_1 и U_2 в зависимости от входного напряжения U_e меняются следующим образом (рис. 2.10):

$$\begin{aligned} U_e &= U_s \cdot \sin(\omega t), \\ U_1 &= U_s \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\gamma), \\ U_2 &= U_s \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\gamma), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где U_e – опорное напряжение; γ – угловое положение ротора; ω – круговая частота входного напряжения U_e ; U_s – амплитудное значение входного напряжения.

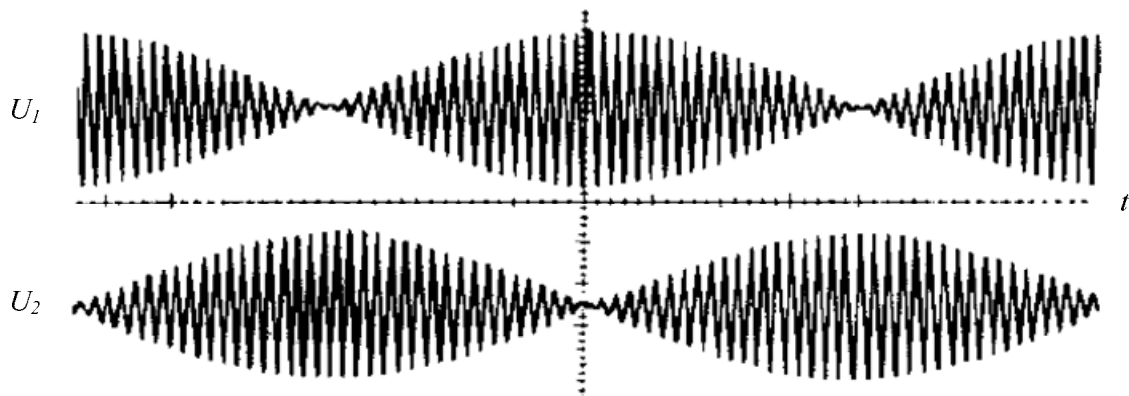


Рис. 2.10. Выходные напряжения резольвера U_1 и U_2

Выходной сигнал резольвера преобразуется в дискретное число в преобразователе «резольвер-код» (РК) серводвигателя. Это цифровое значение подвергается дальнейшей обработке, чтобы получить дополнительную информацию. Во-первых, РК выдает информацию об угловом положении ротора. Во-вторых, одновременно, можно определить скорость двигателя, если подсчитывать импульсы в течение определенного времени и затем усреднить значение скорости. В-третьих, два младших разряда можно использовать:

- для определения направления движения;
- для управления позиционированием.



Рис. 2.11. Структура обработки сигнала резольвера

Генератор опорной частоты (рис. 2.12) через статорную обмотку подает на ротор переменное напряжение около 10В при частоте 7кГц. Дискретное значение числа на реверсивном счетчике 6 преобразуется цифро-аналоговым преобразователем 5. Выходные сигналы U_1 и U_2 статора резольвера умножаются на синус и косинус измеренного значения. Тогда значение на реверсивном счетчике представляет собой угол φ . В результате получаются напряжения:

$$\begin{aligned} U_{F1} &= U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi), \\ U_{F2} &= U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi). \end{aligned} \quad (2.2)$$

В усилителе 2 данные сигналы вычитаются друг из друга. Результат представляет собой разность (ошибку) между углом φ и фактическим углом γ . Ошибка получается в виде:

$$U_{FD} = U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot (\sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi)) = U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\gamma - \varphi). \quad (2.3)$$

В фазочувствительном выпрямителе 3, который включен за сумматором 2, этот сигнал демодулируется, чтобы исключить несущую частоту. Образовавшийся на выходе выпрямителя сигнал U_F пропорционален $\sin(\gamma - \varphi)$. Напряжение U_F поступает на один из входов преобразователя РК и на вход интегратора 4. После интегрирования напряжение ошибки поступает в дальнейшем на вход генератора ГУН 7. В том случае, если между углами γ и φ имеется разность, то интегратор 4 образует на своем выходе выпрямленное напряжение и ГУН 7 вырабатывает импульсы, поступающие в реверсивный счетчик 6.

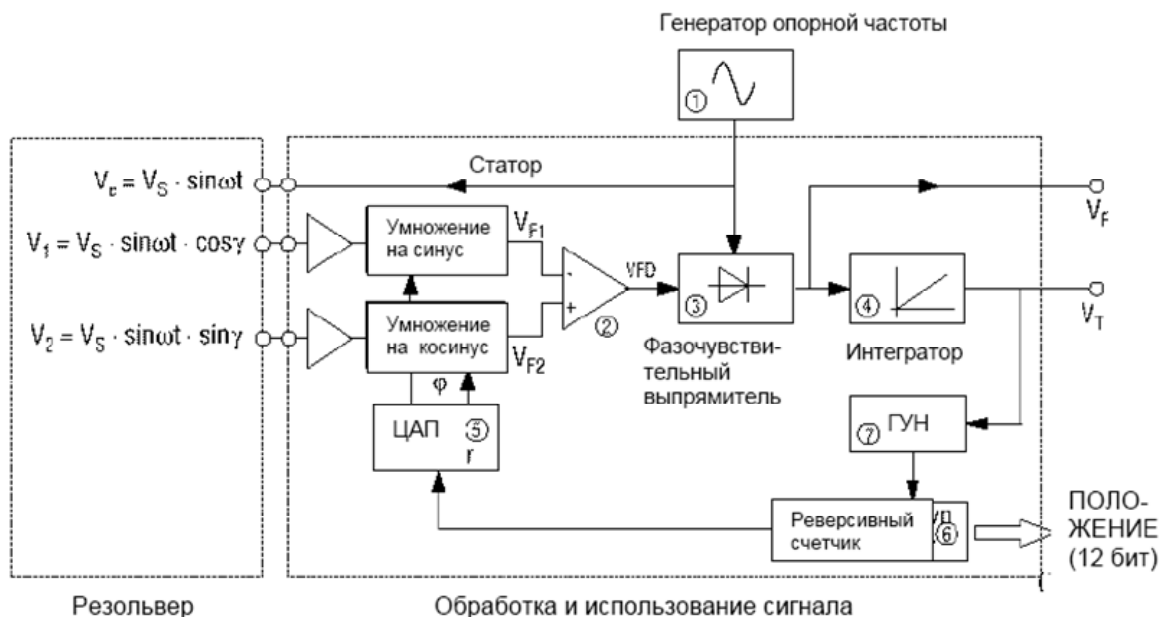


Рис. 2.12. Блок-схема преобразователя «резольвер - код»

Элементы преобразователя РК со 2-го по 7-й образуют замкнутый контур. На входе ГУН 7 сигнал в форме напряжения постоянного тока существует до тех пор, пока разность между значениями γ и φ не сведется к нулю, что означает равенство $\gamma = \varphi$. При этом дискретный сигнал реверсивного счетчика соответствует аналоговому значению угла резольвера.

При непрерывном вращении резольвера ГУН 7 вырабатывает импульсы до тех пор, пока цифровое значение на реверсивном счетчике не совпадет с аналоговым значением углового положения ротора на входе, т.е. пока изменение углового положения ротора не будет уравновешено. Частота ГУН 7 при этом пропорциональна скорости двигателя и резольвера. Из этого следует, что выходное напряжение интегратора также пропорционально скорости. Таким образом, преобразователь «резольвер – код» на выходе имеет напряжение U_T пропорциональное скорости, а также информацию об оборотах резольвера.

Данная схема имеет передаточную функцию интегрирующего контура, причем опорный генератор 1 подключен извне. Ошибка сигнала резольвера пренебрежимо мала ($< 0,05\%$).

2.6.2. Инкрементный датчик угловых перемещений

Преобразователи угловых перемещений (фотоэлектрические) осуществляют преобразование измеряемого перемещения в последовательность электрических сигналов, содержащих информацию о величине и направлении этих перемещений для последующей обработки в сервоприводах или системах с ЧПУ.

В частности преобразователи угловых перемещений могут применяться в измерительных системах, системах программного управления станков и механизмов при определении угловых размеров, перемещений на поворотных рабочих столах, делительных устройствах, антеннах и другом оборудовании.

Принцип работы преобразователей основан на фотоэлектрическом считывании растровых и кодовых сопряжений. В состав преобразователя входит растровое измерительное звено, состоящее из подвижного измерительного растра 1 и неподвижного индикаторного растрового анализатора 2. В состав растрового анализатора входят 4 поля считывания $A, \bar{A}, B, \bar{B}$, каждое из которых имеет пространственный сдвиг относительно предыдущего на $1/4$ периода растра. Параллельный световой поток, сформированный конденсором 7 осветителя 3, проходя через растровое сопряжение, анализируется 4х квадрантным фотоприемником 5. Соединенные соответствующим образом фотоприемники позволяют получить два ортогональных токовых сигнала I_a и I_b , постоянная составляющая которых не зависит от уровня освещенности. Наличие двух ортогональных измерительных сигналов позволяет определить направление перемещения и повысить разрешающую способность преобразователей при обработке этих сигналов в электронных блоках преобразователей.

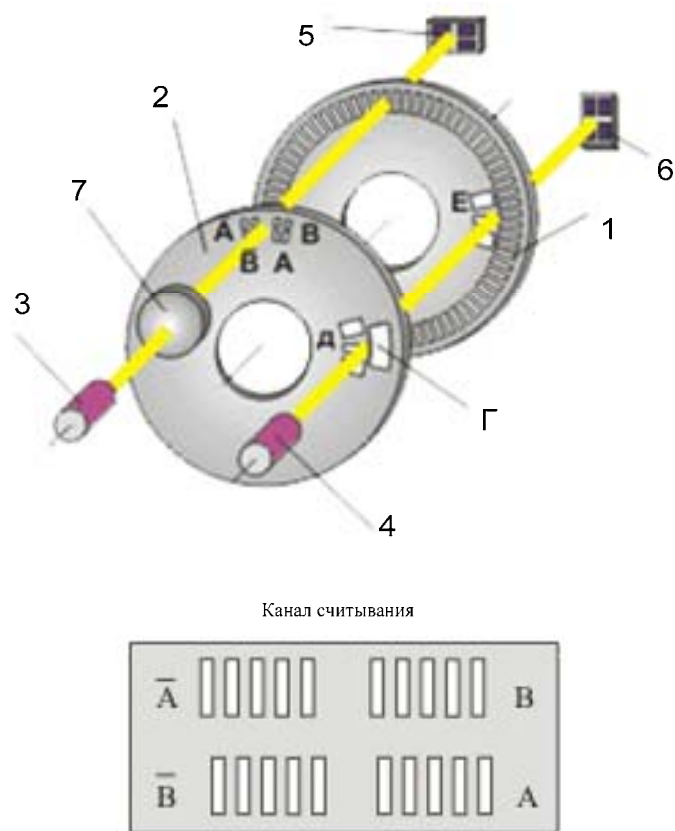


Рис. 2.13. Принцип действия фотоэлектрического датчика

Из рис. 2.14. видно, что сигнал I_a опережает сигнал I_b при вращении по часовой стрелке измерительного лимба, жестко связанного с валом преобразователя.

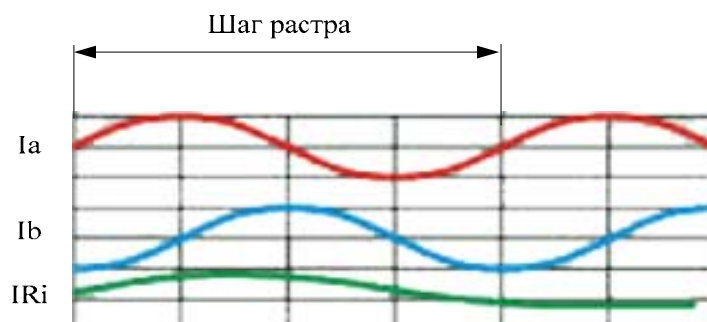


Рис. 2.14. Выходные сигналы датчика

Кроме измерительных сигналов перемещения преобразователь имеет сигнал референтной метки. Этот сигнал, показанный на рисунке 2.14. как IR_i , вырабатывается, в общем случае, один раз за оборот вала и позволяет использовать преобразователь как датчик положения. При

полном совпадении аналогичных кодовых растров Е и Д световой поток, принимаемый одной из секций фотоприемника 6 в 3-4 раза больше, чем при любом другом взаимном положении этих кодовых растров. Ширина сигнала референтной метки по уровню 1/2 от ее амплитуды не превышает периода одного из сигналов перемещения. Для фиксирования этого уровня вне зависимости от интенсивности осветителя 4 организован опорный сигнал: световой поток осветителя 4 через диафрагму Г поступает на вторую секцию фотоприемника 6.

Если требуется определить положение вала преобразователя внутри полного оборота, используется система пространственно-кодированных референтных меток либо вместо референтных меток наносится специальный однородный код положения (квазиабсолютный датчик).

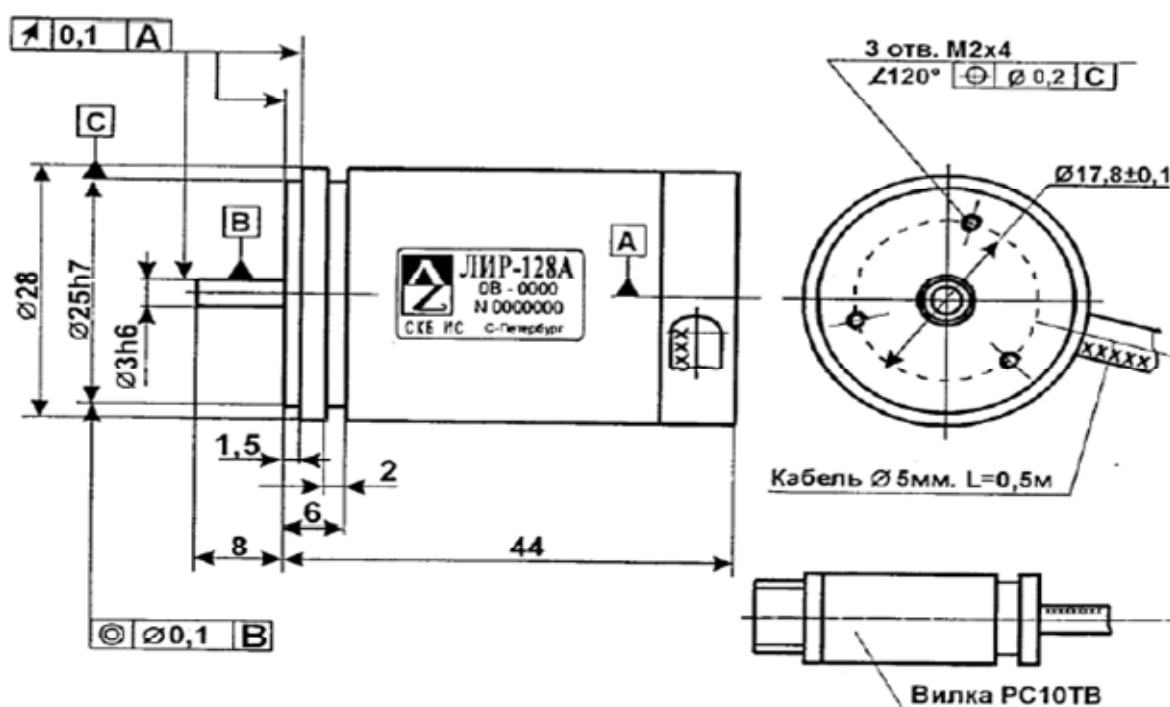


Рис. 2.15. Внешний вид преобразователя ЛИР-128А

В случае применения пространственно-кодированных референтных меток за один оборот вала вырабатывается 20 или 36 сигналов референтных меток, расстояние между которыми различны в шагах растра. Необходимое перемещение вала преобразователя для определения его положения в наихудшем случае составляет 36° или 20° соответственно. Эти преобразователи изготавливаются по спецзаказу.

Наиболее распространенными отечественными преобразователями являются преобразователи фирмы СКБ ИС (г. Санкт-Петербург).

Изображение и паспортные данные преобразователя ЛИР-128А приведены ниже (рис. 2.15, табл. 2.6).

Таблица 2.6

Число штрихов измерительного лимба	2500
Точность	300"
Максимальная скорость вращения вала	10000об/мин
Момент трогания ротора	Не более 0,001Нм
Момент инерции ротора	$6,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Допустимая нагрузка на вал	Не более 5Н
Масса	Не более 0,06кг
Степень защиты	IP64
Интервал рабочих температур	0...70°C
Ударные ускорения	$\leq 300 \text{ м/сек}^2$
Напряжение питания	5В±5%
Ток потребления	Не более 90 мА
Число импульсов	2500
Дискретность отсчета	1296"
Максимальная частота выходного сигнала	160 кГц
Число оборотов вала соответствующее максимальной выходной частоте	3800 об/мин
Форма импульсов	Прямоугольная

2.6.3. Оптический датчик линейных перемещений

Принцип действия линейных датчиков рассмотрим на примере датчика линейных перемещений серии ЛИР, производимого фирмой СКБ ИС (г. Санкт-Петербург).

Преобразователи линейных перемещений осуществляют преобразование измеряемого перемещения в последовательность электрических сигналов, содержащих информацию о величине и направлении этих перемещений для последующей обработки в системах ЧПУ.

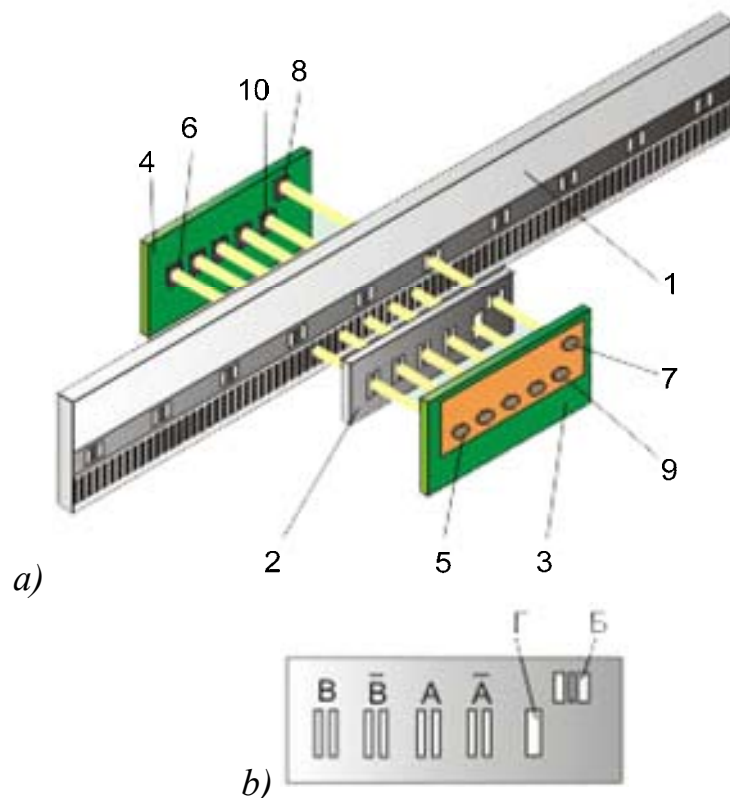


Рис. 2.16. Устройство датчика – *a)*, каналы считывания – *b)*

При относительном перемещении растровой шкалы и индикаторной пластины ее поля считывания $A, \bar{A}, B, \bar{B}$ с шагом растра, соответствующим шагу растра шкалы, реализуют два идентичных канала приема излучения: $A, \bar{A}, B, \bar{B}$. В состав каждого канала входят два поля считывания, растры которых имеют пространственный сдвиг относительно друг друга, равный $1/2$ шага растра и соответственно по два осветителя 5 и фотоприемника 6. Поля считывания канала А имеют пространственный сдвиг растров относительно растров полей считывания канала В, равный $1/4$ шага растра.

Простроенный таким образом канал считывания формирует два ортогональных периодических сигнала Ia и Ib. Диаграмма изменения сигналов аналогична той, что показана на рис. 2.14. Их наличие позволяет определить направление перемещения и повысить разрешающую способность преобразователя. Так, сигнал Ia опережает сигнал Ib при перемещении головки преобразователя от начала отсчета вправо для вариантов 1, 2 и влево – для вариантов 3, 4.

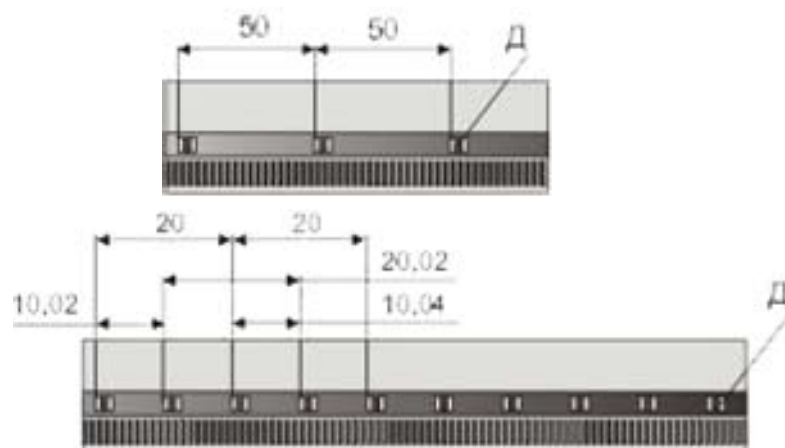


Рис. 2.17. Канал референтной метки

При относительном перемещении растровой шкалы и индикаторной пластины в зоне совмещения полей референтных меток Д и Б происходит модуляция светового потока, излучаемого осветителем 7, и на выходе фотоприемника 8 формируется сигнал референтной метки IR_i с явно выраженным максимумом. Поле диафрагмы Г вместе с осветителем 9 и фотоприемником 10 участвует в выработке опорного сигнала в канале референтной метки.

2.7. Обзор состояния рынка современных сервоприводов

Выбор того или иного электропривода в системах управления перемещением имеет ключевое значение. В частности корректный выбор сервопривода в станках с числовым программным управлением определяет не только показатели качества продукции на выходе, но и показатели экономичности использования ресурсов. Так в одних случаях необходимо добиться предельно-возможных показателей точности, быстродействия, надежности, к.п.д. и т.д., достижимых на современном уровне техники и технологий, а в других найти наиболее простое и экономичное решение. Современное состояние рынка сервоприводов предлагает пользователю большой выбор, поэтому решение тех или иных задач в первую очередь следует рассматривать с позиций выбора оптимального решения из возможных вариантов.

2.7.1. Синхронные сервоприводы Panasonic

В качестве примера сервоприводов фирмы Panasonic рассмотрим линейку сервоприводов MINAS A4. Это новая серия компактных высокопроизводительных сервоприводов (серводвигатель + сервоконтроллер) мощностью от 50 до 5000 Вт.

Отличительной особенностью сервоприводов Panasonic MINAS A4 служит простая и удобная настройка параметров благодаря сочетанию функций автоматической регулировки скорости в режиме реального времени и адаптивного фильтра, позволяющего подстраиваться под резонансную частоту системы.

Сервоконтроллеры MINAS A4 оснащены 2-канальным фильтром компенсации вибраций, возникающих при старте и остановке двигателя. Эта функция особенно актуальна для высокоскоростных применений, при точной обработке твердых материалов и для механизмов с невысокой жесткостью конструкции.

Специализированное программное обеспечение PANATERM™ позволяет быстро запрограммировать сервоконтроллер, провести полную или частичную диагностику, мониторинг состояния и производительности системы. При необходимости сервомоторы Panasonic могут комплектоваться встроенным стояночным тормозом.



Рис. 2.18. Внешний вид сервопривода фирмы Panasonic

Серия Panasonic MINAS A4 включает несколько типоразмеров серводвигателей с различным моментом инерции ротора: сверхнизким, низким, средним и высоким. Основные технические характеристики сервоприводов MINAS A4 приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Напряжение питания	однофазное - 230 В, 50/60 Гц, до 1,5 кВт трехфазное - 230 В, 50/60 Гц, от 0,75 до 5 кВт
Степень защиты	двигателя - IP 65, сервоконтроллера - IP 20
Скорость	3000 об/мин - номинальная, 5000 об/мин - максимальная
Мощность	от 50 до 5000 Вт, 6 типоразмеров
Момент	номинальный 0,16-23,8 Нм, максимальный 0,95-71,4 Нм
Энкодер	инкрементальный 2500 имп/об, абсолютный 17 бит
Управление	скоростью, моментом, позицией

Общие рабочие характеристики сервоконтроллеров серии MINAS A4:

1. Режимы работы:
 - позиционирование;
 - управление скоростью;
 - управление моментом в замкнутом контуре.
 2. Простая настройка регулятора скорости с помощью функции "Автоматическая настройка" в режиме реального времени.
 3. Высокая производительность: полоса пропускания сигнала управления скоростью - 1000 Гц.
 4. Функция "Фильтр подавления вибрации" для уменьшения вибрации при запуске и остановке двигателя.
 5. Компактный размер (от 40 x 130 x 150 мм).
 6. Максимальная частота импульсов при позиционировании - 2 МГц.
- Сервоконтроллеры MINAS A4 делятся на подсерии, каждая подсерия разработана для решения отдельных специфических задач.

Серия MINAS A4 P – точное позиционирование

Общие рабочие характеристики:

1. Позиционирование с использованием комбинации входов/выходов.
2. Простой и экономичный способ позиционирования без дополнительного контроллера, без генератора импульсов.
3. Запоминание до 60 предустановленных позиций.
4. Легкое управление скоростью вручную с помощью опции "Jog".

Области применения:

- технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности;

- координатные столы;
- роботы и порталные манипуляторы;
- упаковочное оборудование;
- подъемно-транспортное и конвейерное оборудование;
- оборудование для легкой и пищевой промышленности.

Серия MINAS A4 A – контроль позиционирования через порт RS 485 (38 кбит/сек)

Общие рабочие характеристики

1. Управление сервоконтроллерами через интерфейс RS 485.
2. Максимальное количество осей - 31.
3. Управление по стандартному LAN-кабелю.

Области применения:

- технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности;
- приводы позиционирования;
- роботы и порталные манипуляторы;
- упаковочное оборудование;
- подъемно-транспортное и конвейерное оборудование;
- оборудование для легкой и пищевой промышленности.

Серия MINAS A4 N – высокоскоростное управление по шине (100 Мбит/сек)

Общие рабочие характеристики

1. Синхронизация и одновременное управление перемещениями (до 32 осей) со скоростью передачи данных 100 Мбит/сек.
2. Различные варианты подключения сервоконтроллера и специализированного контроллера.
3. Управление по стандартному LAN-кабелю.

Области применения:

- технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности;
- точные координатные системы;
- роботы и порталные манипуляторы;
- автоматизированные сборочные линии;
- станочное оборудование;
- упаковочное оборудование;
- подъемно-транспортное и конвейерное оборудование;
- оборудование для легкой и пищевой промышленности.

Серия MINAS A4 T – точное регулирование усилия (давления)

Общие рабочие характеристики

1. Точное замкнутое регулирование усилия по сигналу тензодатчика.

2. Простое программирование системы с помощью комбинации входов/выходов (выбор функции - поиск, дополнительное усилие, фиксированное усилие).
3. Выбор 8 типов команд усилия с помощью комбинации параметров и аналоговых входов.

Области применения:

- оборудование для микроэлектронной промышленности;
- кузнечно-прессовое оборудование;
- штамповочное и печатное оборудование;
- станочное оборудование;
- оборудование для обрабатывающей промышленности.

2.7.2. Синхронные сервоприводы Metronix

Синхронные сервоприводы Metronix – базовый продукт для системных решений в области промышленной автоматизации, предлагаемых компанией Metronix Co., Ltd (Южная Корея) под торговой маркой Any Pack. Сервоприводы Metronix в зависимости от предназначения выпускаются в трех версиях: VS, VP, VK.



Рис. 2.19. Внешний вид сервопривода фирмы Metronix серии VS

Серия VS – стандартная общепромышленная, реализует управление по скорости, моменту (± 10 В) и положению (STEP/DIR) преобразователи частоты серии VS могут работать в следующих режимах:

- Управление позицией при использовании внешнего контроллера, задающего последовательность импульсов.

- Управление скоростью по аналоговому входу или дискретным входам.
- Управление моментом по аналоговому входу в режиме ограничения максимального момента.
- Управление скоростью/позицией.
- Управление скоростью/моментом.
- Управление позицией/моментом.

Для связи преобразователя частоты VS и персонального (промышленного) компьютера используется встроенный COM-порт. При необходимости через конвертор RS232/RS485 преобразователи частоты можно объединить в сеть. Более полные технические характеристики приводов серии VS приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Модель APD-VS		R	01	02	0	05	10	1	2	3	5	75	11
		5			4			5	0	5	0		0
Питающее напряжение*		3 x 200–230 В (+10/-15%), 50/60 Гц											
Параметры двигателей	Уном, В	3 фазы, ШИМ											
	Ином, А	1, 2	1,6 5	1,6 5	3, 2	4,3	6,4	1 1	1 6	2 1	3 2	38	50
	Имакс, А	3, 6	4,9 5	4,9 5	9, 6	12, 9	19, 2	3 3	4 8	6 3	9 6	10 2	12 5
датчик положения	Стандартный	Инкрементальный 5 В, 2000–10000 имп/об											
	Опциональный	Абсолютный 11/13 бит											
Режим управления скоростью	Функция управления	Диапазон регулирования $D_{\omega}=10000$ Максимальная частота $f=400$ Гц											
	Команды на скорость	Аналоговая уставка ± 10 В, цифровая уставка (7 скоростей)											
	Время разгона/торможения, мсек	Линейная, S-образная механическая характеристика, 0–106											
Режим управления позицией	Входная частота импульсов, кГц	500											
	Описание импульсов	А+В сдвинутые по фазе; вперед + назад импульс; направление + импульс											

	Электронное редуцирование	4 скорости, выбираемые дискретно, от 1/50 до 50
Точность поддержания скорости		$\leq \pm 0,01\%$ (при нагрузке 0–100%); $\leq \pm 0,1\%$ (при $t^\circ = 25 \pm 10^\circ \text{C}$)
Режим управления моментом		Аналоговая уставка на момент, $U = \pm 10 \text{ В}$, отклонение от линейной зависимости $< 4\%$
Торможение		Рекуперативное, динамическое
Условия окружающей среды	Диапазон рабочей температуры, $^\circ\text{C}$	от 0 до +50
	Температура хранения, $^\circ\text{C}$	от -20 до +80
	Относительная влажность, %	< 90

Примечание к таблице: * – возможно использование одной фазы.

Специальная серия VP предназначена для выполнения специальных задач:

- Линейно-координатное позиционирование с возможностью выбора до 64 позиций шестью дискретными входами (VP1). Типичная сфера применения – обеспечение линейного перемещения в системах с трансмиссией на шарико-винтовую пару (ШВП).
- Угловое позиционирование с возможностью выбора до 32 позиций пятью дискретными входами (VP2). Типичная сфера применения – поворотные столы, роторные конвейерные линии, устройства автоматической смены инструмента и т. п.
- Позиционирование с использованием подачи дотягивания (VP3). Типичная сфера применения – упаковочные машины, всевозможные виды подающих устройств с позиционированием как по сигналу с энкодера на валу двигателя, так и по метке внешнего дискретного датчика.
- Программируемое пошаговое позиционирование с возможностью выбора до 8 программ тремя дискретными входами (VP5). Каждая программа может иметь до 100 шагов (позиций), сохраняемых в памяти преобразователя частоты.

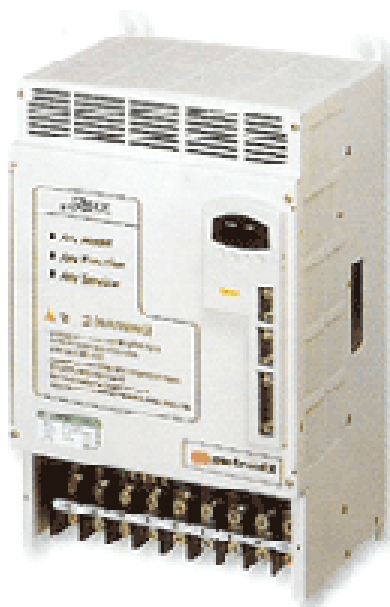


Рис. 2.20. Внешний вид сервопривода фирмы Metronix серии VP

Более полные технические характеристики приводов серии VP приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Модель APD-VP		R	01	02	04	05	10	1	2	3	5	75	11
		5						5	0	5	0		0
Питающее напряжение*		3 x 200–230 В (+10/-15%), 50/60 Гц											
Параметры двигателей	Uном, В	3 фазы, ШИМ											
	Iном, А	1,2	1,65	1,65	3,2	4,3	6,4	11	16	21	32	38	50
	Iмакс, А	3,6	4,95	4,95	9,6	12,9	19,2	33	48	63	96	102	125
Датчик положения	Стандартный	Инкрементальный 5 В, 2000–10000 имп/об											
	Опциональный	Абсолютный 11/13 бит											
Установка позиционирования координат		Установка 64 точек макс. через входные клеммы. Установка 6 позиций, 2 цифровые установки скорости											
Расши-	Кон-	Входы – 20 точек; выходы – 9 точек											

рение ВХО- ДОВ/ВЫХО ДОВ	такты ВХО- да/ВЫХ ода	
	Описа- ние им- пуль- сов	А+В сдвинутые по фазе; вперед + назад импульс; направление + импульс
	Анало- говые входы	Максимально 4 канала, $U=\pm 10\text{ В}$
	Анало- говые выхо- ды	Максимально 2 канала; $U=0..5\text{ В}$
	Выхо- ды эн- кодера	А, В, N каналы с напряжением 5 В; возможность деления частоты импульсов – от 1:1 до 1:16
Торможение		Рекуперативное, динамическое
Условия окру- жающей среды	Диапа- зон ра- бочей темпе- ратуры, °С	от 0 до +50
	Темпе- ратура хране- ния, °С	от -20 до +80
	Относи- тельная влаж- ность, %	<90

Примечание к таблице: * – возможно использование одной фазы.

Серия VK - однофазная версия ПЧ, работает только под управлением контроллера движения (сигнал STEP/DIR).

Обобщенные характеристики сервоприводов Metronix приведены в сводной табл. 2.10.



Рис. 2.21. Внешний вид двигателей фирмы Metronix

Таблица 2.10

Диапазон мощностей	от 0,03 до 11 кВт
Питающее напряжение(3-фазный ток)	200-230 В (+10/-15%), 50 Гц
Диапазон рабочих температур	от 0 до +50 °С
Класс защиты	IP 55; IP 65
Допустимая влажность	<90%
Диапазон регулирования скорости	10000 об/мин
Допустимая перегрузка по моменту	3 x Мн
Неравномерность частоты вращения при температуре от 10 до 25 °С	<±0,1%

Основные преимущества приводов Metronix:

- встроенный комплект рекуператора, позволяющий возвращать энергию в сеть, и встроенный ключ сброса энергии при динамических торможениях;
- тестовый режим работы преобразователей частоты;
- функции устранения вибраций при вращении двигателя и его останове позволяют исключить работу преобразователя частоты в колебательном режиме, как при наладке, так и в эксплуатации;
- возможность использования как относительных, так и абсолютных инкрементальных датчиков положения;
- выбор режима работы системы управления – управление по скорости или по моменту;
- наличие расширенного пакета программного обеспечения позволяет легко и быстро менять функции преобразователя частоты и решать на его базе различные технические задачи (в т. ч. по реализации управления приводами подачи);
- наличие в линейке продукции Metronix двигателей с полым валом позволяет исключить из кинематической схемы промежуточное устройство – соединительную муфту;
- программируемые выходы позволяют строить системы с высокой степенью защиты от различных нештатных ситуаций и с максимальной информативностью для оператора.

Функции, используемые при управлении скоростью:

- автоподстройка коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющей регулятора скорости при изменяющихся моментах инерции;
- свободно программируемый ПИ регулятор скорости позволяет использовать отдельно как пропорциональную, так и интегральную составляющую и легко адаптировать преобразователь частоты для конкретных условий применения;
- использование аналогового и цифрового задания различных скоростей (до 7) с помощью дискретного переключателя;
- устранение ползучей скорости привода с помощью уменьшения чувствительности системы к флуктуациям токов;
- удобное формирование механических характеристик привода при переменных режимах работы, задание времени разгона и торможения, формирование S-образных кривых;
- функция задания реверса исходя из значения аналогового сигнала и с помощью логических сигналов;
- входной ЦАП 12 бит.

Функции, используемые при управлении моментом:

- ограничение момента для адаптации динамических выбросов момента в реальных условиях функционирования механизма;
- момент удержания при нулевой скорости равен моменту сопротивления;
- задание момента в аналоговом формате;
- исключение резонансной частоты исполнительного органа из полосы пропускания контура управления моментом привода.

Функции, используемые при управлении положением:

- встроенный модуль ограничения перемещений исполнительного механизма позволяет организовать безопасные системы позиционирования без датчиков ограничения;
- функция выбора люфта позволяет учитывать реальные зазоры при построении систем позиционирования без реализации этой функции в системах контроля верхнего уровня, что значительно упрощает структуру программы контроллера;
- реализация процесса позиционирования с применением подачи дотягивания;
- встроенный модуль поиска нулевой метки датчика позиции;
- точность позиционирования определяется типом датчика обратной связи.

2.7.3. Синхронные сервоприводы Mitsubishi Electric

Наиболее совершенным сервоприводом фирмы Mitsubishi Electric является сервопривод серии **MR-J2-SUPER**. Изображение сервопривода приведено на рис. 2.22.

Ряд ключевых изменений, реализованных в **Super**-серии, позволил существенно улучшить характеристики сервоприводов Mitsubishi, по сравнению с предыдущей серией MR-J2. Использование, например, быстродействующего RISC-процессора Mitsubishi, позволило значительно улучшить динамические характеристики привода. Серводвигатели **Super**-серии также претерпели изменения: разработана новейшая модель двигателей серии HC-KFS, являющихся самыми компактными и идеально подходящими в качестве приводов механизмов с большим моментом инерции и низкой механической податливостью.

Разрешающая способность, встроенных в двигатели **Super**-серии абсолютных энкодеров, была увеличена с 13 до 17 бит, что существенно улучшило точность синхронизации и позиционирования приводов. Улучшены также коммуникационные возможности привода: дополни-

тельный порт RS422/RS485 позволяет подключить до 32 приводов в единую сеть.



Рис. 2.22. Внешний вид сервопривода MR-J2-SUPER фирмы Mitsubishi Electric

В энкодерах реализована запатентованная Mitsubishi Electric технология, существенно снизившая габаритные размеры датчика и как, следствие, - серводвигателя. В сервоусилителях **MR-J2-Super** используются только оптимизированные компьютерными средствами с точки зрения теплового рассеяния полупроводниковые компоненты, что позволило разместить их в корпусе минимально возможных габаритов. Использование специального микропроцессора Mitsubishi позволило более чем в два раза увеличить полосу пропускания привода: от 250Гц до 550Гц, что, разумеется, крайне важно для механизмов, функционирующих в режиме коротких циклов. Периоды позиционирования также должны занимать минимально возможное время. Данный параметр был также улучшен до 0.9мс, что в сравнении с предыдущей моделью (5мс) значительно меньше.

Алгоритмы автоматической настройки в реальном времени

Интеллектуальные функции, реализованные в **MR-J2-Super**, облегчают установку и наладку привода. Высоко квалифицированным специалистам, востребованным для этого ранее, сейчас не приходится использовать свои глубокие знания. MR-J2-Super действительно не требует глубокого понимания процессов, протекающих в приводе. Некото-

рые интеллектуальные функции реализованы в самом сервоусилителе и функционируют в режиме реального времени, некоторые – в специально разработанном программном обеспечении, используемом на стадии установки и наладки. Одной из таких функций, реализованных в сервоусилителе, является функция автоматической настройки, адаптирующая параметры привода к параметрам постоянно изменяющейся нагрузки. Для правильного функционирования алгоритма автоматической настройки необходимо знать точное соотношение момента инерции двигателя и приводимого механизма. Способ, используемый для определения этого соотношения, должен подходить для различных механических систем и иметь возможность определять и корректировать данное соотношение во время работы. Это означает, что параметры должны определяться в режиме реального времени и во всех возможных, реальных на практике, условиях. Исходными данными для расчета данного соотношения являются значения времени отклика тока и скорости. Тем не менее, при возникновении каких-либо возмущений, например, высокое трение или чрезмерно интенсивное время разгона/торможения, расчетное значение соотношения инерций двигателя и нагрузки может довольно существенно отличаться от реального значения. Традиционные алгоритмы автоматической настройки дают в таких условиях неудовлетворительные результаты, что опять вызывает необходимость вмешательства человека для ручной коррекции параметров. Таким образом, смысл автоматической настройки – теряется. Алгоритм автоматической настройки, разработанный Mitsubishi Electric для **MR-J2-Super**, существенно отличается: он эффективно идентифицирует и отслеживает такого рода режимы, что позволяет исключать ошибки расчета и как следствие, - вмешательство человека для коррекции параметров. Таким образом, для **MR-J2-Super** практически нет ограничений по области применения с точки зрения динамических свойств механизмов, обеспечивая качественное регулирование как для нагрузок с резкими измерениями момента, так и для высокофрикционных нагрузок.

Адаптивная система подавления вибраций

Снижение вибрации является еще одной online-функцией сервопривода. Специально разработанная адаптивная система подавления вибрации автоматически распознает резонансные явления и предотвращает их прогрессирование. После распознавания вибрации выполняется расчет ее составляющих исходя из сигналов обратной связи, после чего активизируются адаптивные алгоритмы фильтрации. Коэффициент демпфирования рассчитывается и корректируется автоматически во время работы, исключая ошибки, возможные при использовании тради-

ционных алгоритмов подавления вибрации, и использующие фиксированные заранее введенные характеристики фильтров.

Еще одно преимущество заключается в том, что даже смещение точки резонанса, вызванном колебаниями нагрузки во время функционирования, автоматически идентифицируются и отслеживаются. Однако, в некоторых случаях (в частности, в диапазоне частот до 1 кГц), различные виды вибрации могут, все же требовать выполнения детального анализа механизма и соответствующего конфигурирования параметров по результатам анализа. Проблема заключается в том, что это требует больших затрат времени и специального программного инструмента, реализующего алгоритм быстрого преобразования Фурье. В прошлом это, как правило, приводило к полному отказу от такого рода исследований и удалению резонансных явлений другими – значительно более трудоемкими способами. Новый сервоусилитель Mitsubishi Electric серии **MR-J2-Super** имеет интегрированную процедуру виброанализа. Данные алгоритмы требуют высокой точности и как следствие, интенсивности расчетов, основная часть вычислений выполняется с помощью компьютера. Программное обеспечение, установленное на компьютере, функционирует следующим образом. Сначала сервоусилитель выдает сигнал задания момента таким образом, что это приводит к вибрации вала двигателя. После этого начинается анализ и расчет резонансных точек, вызывающих нестабильное функционирование, а также определение математической модели механизма. В результате расчетов определяются оптимальные уставки контроллера и фильтра, что позволяет снизить уровень вибрации до минимума и обеспечить максимально лучшие динамические характеристики. Данная функция является стандартной для всех сервоприводов Mitsubishi Electric.

Конфигурационное программное обеспечение также имеет функцию, позволяющую разработчику выполнить оптимизацию привода у себя на столе – при отключенном приводе. Например, можно выполнить симуляцию и определить динамические характеристики механизма на основании математической модели, полученной ранее. Если анализ в режиме online не возможен, можно использовать виртуальную модель. Данный инструмент позволяет моделировать функционирование системы в условиях различных параметров движения и уставок контроллера без необходимости выполнения реальных движений. Это позволяет еще до физического пуска привода определить параметры контроллера и предотвратить тем самым возможные проблемы из-за высокочастотных вибраций.

Новейшие технологии, реализованные в сервоприводах Mitsubishi Electric, не только позволяют сократить период рабочего цикла и увели-

чить точность позиционирования. Многие вспомогательные средства, функционирующие в автоматическом режиме, позволяют настроить сервопривод средствами, реализованными в сервоусилителе или программном обеспечении к нему. Необходимость в использовании каких-либо других программных или аппаратных средствах отсутствует. Реализованные в сервоприводах алгоритмы способны даже отслеживать изменения приводимых механизмов и адаптироваться к ним автоматически. Достижение оптимального результата происходит быстро и легко и не требует наличия опыта и глубоких знаний обслуживающего персонала.

Серия MR-C – является идеальной альтернативой шаговым приводам. Характеристики сервопривода:

- диапазон мощностей от 100 до 400 Вт;
- номинальный момент до - 1,3 Нм;
- перегрузочная способность - до 400%;
- двигатели с абсолютным энкодером 4096 позиций/оборот.

Компактная серия MR-C обладает достоинствами приводов с замкнутым контуром регулирования по ценам приводов с разомкнутым контуром. Обеспечение равномерного плавного вращения всем диапазоне скоростей – от 0 до номинальной скорости, перегрузочная способность – до 400% от номинального момента. Высокие динамические характеристики – для задач с короткими рабочими циклами, значительными пусковыми моментами. Алгоритм адаптивной настройки контуров в реальном времени – автоматическая настройка параметров контуров регулирования исключает необходимость трудоемких настроек и делает установку быстрым и несложным процессом.

Другие важные преимущества данной серии:

- режим пробного пуска предусмотрен с помощью клавиш самого модуля;
- двигатели с ультра-малым моментом инерции серии HC-PQ обеспечивают надежную работу и высокую динамику в режиме коротки рабочих циклов;
- расширенные защитные функции предотвращают выходы из строя как сервоусилителя, так и двигателя;
- соответствие мировым стандартам CE и UL;
- опциональный последовательный интерфейс для подключения компьютера с программным обеспечением под Windows для установки параметров и настройки привода.

Серия MR-J2-CL сочетает в себе сервоусилитель и модуль позиционирования в одном корпусе. Серия MR-J2-CL построена на базе серво-

усилителей хорошо зарекомендовавшей себя серии MR-J2. Интегрированный в MR-J2-CL контроллер может хранить в своей памяти до 8-ми программ по 60 шагов каждая. Каждая программа может быть активирована в любой момент. Модуль также оснащен программируемыми входами/выходами для связи с внешними устройствами.

Кроме упрощения программирования и уменьшения числа кабелей, данный модуль имеет еще одно очень важное достоинство: он является одним из самых быстродействующих сервоприводов на рынке и соответственно идеально подходит для задач одноосевого позиционирования. Основными преимуществами данной серии являются:

- компактный сервоусилитель с интегрированным модулем позиционирования;
- идеально подходит для задач одно-осевого позиционирования;
- может хранить в памяти до 8-ми программ по 60 шагов каждая;
- программируемые входы/выходы;
- автоматическая настройка;
- интерфейсы RS-232 и RS-485;
- подключение до 32 модулей в общую сеть по интерфейсу RS-485;
- отдельный интерфейс для подключения к компьютеру;
- программное обеспечение под Windows® для программирования параметров и настройки контуров регулирования;
- совместимость со всеми двигателями, кабелями и периферийным оборудованием сервоусилителей серии MR-J2;
- импульсный вход для подключения маховика (ручного генератора импульсов) удобен в режиме обучения (ввод координат в ручном режиме).

2.7.4. Синхронные сервоприводы OMRON

Сервоприводы фирмы Omron — это функционально законченные исполнительные устройства, состоящие из управляющего модуля (сервоконтроллера) и сервомотора. Предназначены для работы как в составе сети промышленных ПЛК, так и в автономном режиме. В зависимости от номинальной мощности и типа управления выпускаются несколько серий сервоконтроллеров. Для каждой из серий отдельно поставляется собственная серия сервомоторов модели R88M мощностью от 30 Вт до 5 кВт. Поставляемые модели сервомоторов могут комплектоваться встроенным шифратором и тормозом.

Серия UE – простой универсальный сервопривод малой мощности широкого назначения. Сервоконтроллер серии UE предназначен для управления одним сервомотором посредством импульсного сигнала.

Сервоконтроллер предназначен для работы с сервомоторами серии R88M-UE. Может использоваться как самостоятельное устройство или совместно с ПЛК. Подключаемая панель оператора содержит индикатор и функциональную клавиатуру. Несложная настройка посредством задания основных 10 параметров. Встроенная функция полного контроля параметров системы и выдачи сигналов аварии. Самое лучшее соотношение цена/быстродействие и самое высокое быстродействие во всей U-серии. Может служить альтернативой шаговым системам.



Рис. 2.23. Внешний вид сервопривода OMRON серии UE

- диапазон мощностей управляемого сервомотора: 100-750 Вт;
- диапазон силы тяги сервомотора:
 - установившейся 0,318-2,39 Нм;
 - пиковой 0,96-7,10 Нм.
- напряжение питания - 200-230В (однофазное);
- тип применяемого шифратора - инкрементный (до 1024 отсчетов/об.);
- модель применяемого сервомотора - R88M-UE;
- сигнал управления тормозом – имеется;
- тип сигнала управления – импульсный;
- управление - ручное (панель оператора), программное (по сети);
- контролируемые параметры - частота вращения, сила тяги, состояние устройства.

Серия UT – мощный универсальный сервопривод. Сочетает в себе возможности импульсного и аналогового управления. Предназначен для работы с сервомоторами серии R88M-UT мощностью до 5,5 кВт. Может использоваться как самостоятельное устройство или работать совместно с ПЛК. Подключаемая панель оператора с индикатором и

функциональной клавиатурой. Встроенные функции самонастройки, контроля параметров системы и выдачи сигналов аварии. Обладает расширенным набором команд оператора.

Характеристики сервопривода:

- диапазон мощностей управляемого сервомотора: 1,0-5,5 кВт;
- диапазон силы тяги сервомотора:
 - установившейся 8,34-35,0 Нм
 - при 1500 об./мин;

3,18-15,8 Нм

при 3000 об./мин;

- пиковой 23,3-87,6 Нм при 1500 об./мин;

9,54-44,4 Нм

при 3000 об./мин;

- напряжение питания - 200-230 В (трехфазное);
- тип применяемого шифратора – инкрементальный;
- модель применяемого сервомотора - R88M-UT;
- сигнал управления тормозом – имеется;
- тип сигнала управления - импульсный и аналоговый;
- управление - ручное (панель оператора), программное (по сети);
- контролируемые параметры - частота вращения, сила тяги, состояние устройства.

Серия UA – универсальный сервопривод, по основным характеристикам схожий с серией UE, но в отличие от нее имеющий аналоговое управление. Имеет больший, по сравнению с серией UE и диапазон поддерживаемых мощностей. Сервопривод предназначен для работы с сервомоторами серии R88M-U. Может использоваться как самостоятельное устройство или работать совместно с ПЛК. Подключаемая панель оператора с индикатором и функциональной клавиатурой. Имеет встроенные функции самонастройки, контроля параметров системы и выдачи сигналов аварии. Наличие аналоговых сигналов частоты вращения и момента. Сервоконтроллер отличается очень компактной конструкцией, а сервомоторы R88M-U обладают низким моментом инерции ротора.

На базе серии UA выпускается серия FND-X со встроенным позиционером и полностью цифровым принципом управления на основе дискретного ввода-вывода или по интерфейсу CompoBus-S. Основные технические характеристики сервоконтроллера серии FND-X и типы применяемых сервомоторов идентичны серии UA.



Рис. 2.24. Внешний вид сервопривода OMRON серии UE



Рис. 2.25. Внешний вид сервопривода OMRON серии UA

Основные характеристики сервопривода:

- диапазон мощностей управляемого сервомотора - 30-750 Вт;
- диапазон силы тяги сервомотора:
 - установившейся 0,095-2,39 Нм;
 - пиковый 0,29-7,10 Нм;
- напряжение питания - 200-230В (однофазное);
- тип применяемого шифратора - инкрементный (до 2048 отсчетов/об.), абсолютный (только для FND-X);
- модель применяемого сервомотора - R88M-U;
- сигнал управления тормозом – имеется;
- тип сигнала управления - аналоговый (цифровой для FND-X);
- управление - ручное (панель оператора), программное (по сети);
- контролируемые параметры - частота вращения, сила тяги, состояние устройства.

3. ОБЗОР МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СЭП

Возрастающие требования к точности исполнения заданных траекторий движения электромеханическими системами технологического оборудования, например станков с ЧПУ и промышленных роботов определяют необходимость качественной подготовки массивов управляющих воздействий. При этом производительность работы современного оборудования должна быть максимальной и согласована с предельными возможностями исполнительных приводов электромеханических систем. Для решения этих задач целесообразно использовать такие методы интерполяции, которые позволяют в реальном времени на основе массива дискретных данных сформировать гладкую функцию как на

этапе подготовки задания исполнительным приводам, так и в процессе движения рабочего элемента технологического оборудования.

Интерполяционные задачи возникают также при математическом моделировании электромеханических систем. Для анализа сложных процессов проблемой является вычисление функций, входящих в математическое описание модели. Вычислительные процедуры определения сложных функций могут быть трудоемкими даже при использовании ЭВМ.

Используемые в математических моделях функции задаются как аналитическим способом, так и табличным, при котором функции известны только при дискретных значениях аргументов. При этом ограниченный объем памяти ЭВМ не позволяет хранить подробные таблицы функций.

Поставленные проблемы решаются путем приближенной замены функции $f(x)$ более простой зависимостью $\varphi(x)$, которую нетрудно вычислить при любом значении аргумента x в заданном интервале его изменения.

В настоящее время существует большое количество методов нахождения приближенных функций $\varphi(x)$, что вызвано историческим развитием теории и практики решения прикладных задач. Многие методы возникли как варианты предшествующих, отличаясь от них формой записи, изменением порядка вычислений с целью уменьшения влияния погрешности округлений при вычислениях.

В тоже время развитие вычислительной техники приводит к непрерывному пересмотру и некоторому ограничению применяемых методов. Так при повышении требований к точности конечного результата ряд интерполяционных методов не используется в вычислительной математике. В данной главе рассматриваются методы, не зависящие от шага дискретизации аргумента, что наиболее вероятно в практических задачах.

3.1. Постановка задачи интерполирования

Пусть в точках $x_0, x_1, \dots, x_n$ таких, что $a \leq x_0 < \dots < x_n \leq b$, известны значения функции $y = f(x)$, т.е. на отрезке $[a, b]$ задана табличная (сеточная) функция.

Таблица 3.1

$f(x):$	x	x_0	x_1	$\dots$	x_n
	y	y_0	y_1	$\dots$	y_n

Функция $\varphi(x)$ называется интерполяционной для $f(x)$ на $[a, b]$, если ее значения $\varphi(x_0), \varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)$ в точках $x_0, x_1, \dots, x_n$ называемых узлами интерполяции, совпадают с заданными значениями функции $f(x)$, т.е. с $y_0, y_1, \dots, y_n$ соответственно. Геометрически факт интерполирования означает, что график функции $\varphi(x)$ проходит так, что, во всех заданных точках он пересекает или касается графика функции $f(x)$ (рис.3.1).

Легко представить, что таких графиков $\varphi(x)$, проходящих через заданные точки, можно изобразить сколько угодно, и они могут отличаться от графика $f(x)$ сколь угодно сильно, если не накладывать на $\varphi(x)$ и $f(x)$ определенных ограничений.

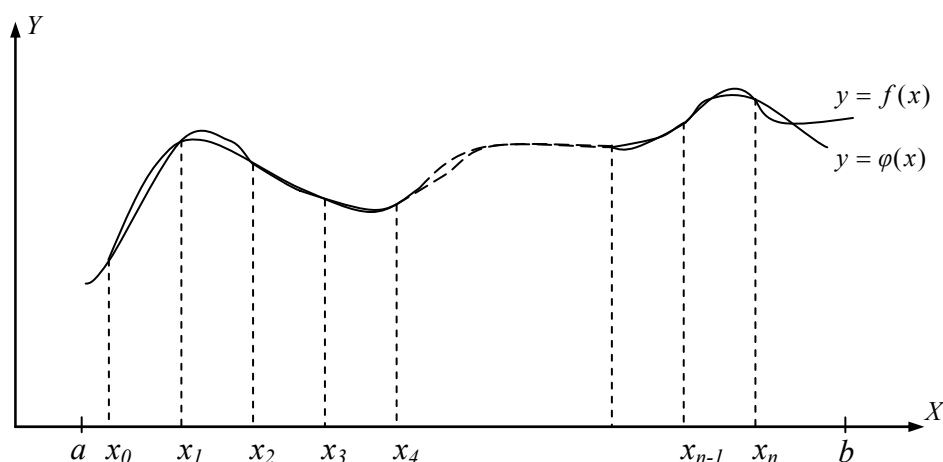


Рис. 3.1. Геометрическая интерпретация задачи интерполирования

Будем считать, что интерполяционная функция $\varphi(x)$ является полином степени n . Тогда задача полиномиальной, алгебраической или параболической интерполяции формулируется следующим образом: для функции $f(x)$, заданной таблицей (3.1), определить полином $P_n(x)$ такой, чтобы выполнялись условия интерполяции

$$P_n(x_i) = y_i \quad \forall \quad i \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (3.1)$$

Определить полином $P_n(x)$ - это значит, учитывая его каноническую форму

$$P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (3.2)$$

вычислить коэффициенты $a_0, a_1, \dots, a_n$. Таким образом, чтобы полином (3.2) был интерполяционным для функции $f(x)$, нужно, чтобы коэффициенты $a_0, a_1, \dots, a_n$, удовлетворяли системе уравнений

$$(3.3)$$

2.2. Интерполяционный полином Лагранжа

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n \frac{(x-x_0)\dots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\dots(x-x_n)}{(x_i-x_0)\dots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\dots(x_i-x_n)} y_i. \quad (3.4)$$
$$L_n(x) = \prod_{n+1}(x) \sum_{i=0}^n \frac{y_i}{(x-x_i) \prod'_{n+1}(x_i)}, \quad (3.5)$$

$x_0, x_1, \dots, x_n$	ПОЛИНОМ	$(n + 1)$ -й	степени,
------------------------	---------	--------------	----------

Иная форма записи интерполяционного полинома имеет вид

$$(3.6)$$

$$L_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}y_1 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}y_2. \quad (3.7)$$

74

слагаемому y_i , остальные обращаются в нуль за счет нулевых сомножителей в произведениях.

Работу алгоритма интерполяции полиномом Лагранжа поясняет блок-схема, приведенная на рис. 3.2.

Для вычисления полинома не требуется предварительного определения коэффициентов полинома путем решения системы уравнений. Однако для каждого значения аргумента x полином (3.5) приходится пересчитывать вновь, что является существенным недостатком данного метода интерполяции. Поэтому практическое применение полинома Лагранжа оправдано только в случае, когда интерполяционная функция вычисляется при сравнительно небольшом количестве точек x_i .

Поэтому более эффективно применить интерполяционную схему Эйткена, которая описывается выражением

$$f(x) = P_{0,1,\dots,i}(x) = \frac{1}{x_i - x_0} \begin{vmatrix} x - x_0 & P_{0,1,\dots,i-1}(x) \\ x - x_i & P_{1,2,\dots,i}(x) \end{vmatrix}, \quad (3.8)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ и, по определению, $P_0(x) = y_0$, $P_1(x) = y_1$.

Составление интерполяционного полинома рассмотрим на примере интерполяции дискретно заданной функции $y = f(x)$ тремя точками (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . Для этого введем две новые функции и запишем их через определитель следующим образом

$$\begin{aligned} P_{0,1}(x) &= \frac{1}{x - x_0} \begin{vmatrix} x - x_0 & y_0 \\ x - x_1 & y_1 \end{vmatrix} = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} y_1, \\ P_{1,2}(x) &= \frac{1}{x_2 - x_1} \begin{vmatrix} x - x_1 & y_1 \\ x - x_2 & y_2 \end{vmatrix} = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} y_2. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Представленные выражения функций $P_{0,1}(x)$ и $P_{1,2}(x)$ являются полиномами Лагранжа первой степени. На основании полученных выражений образуем новую функцию

$$P_{0,1,2}(x) = \frac{1}{x_2 - x_0} \begin{vmatrix} x - x_0 & P_{0,1}(x) \\ x - x_2 & P_{1,2}(x) \end{vmatrix}. \quad (3.10)$$

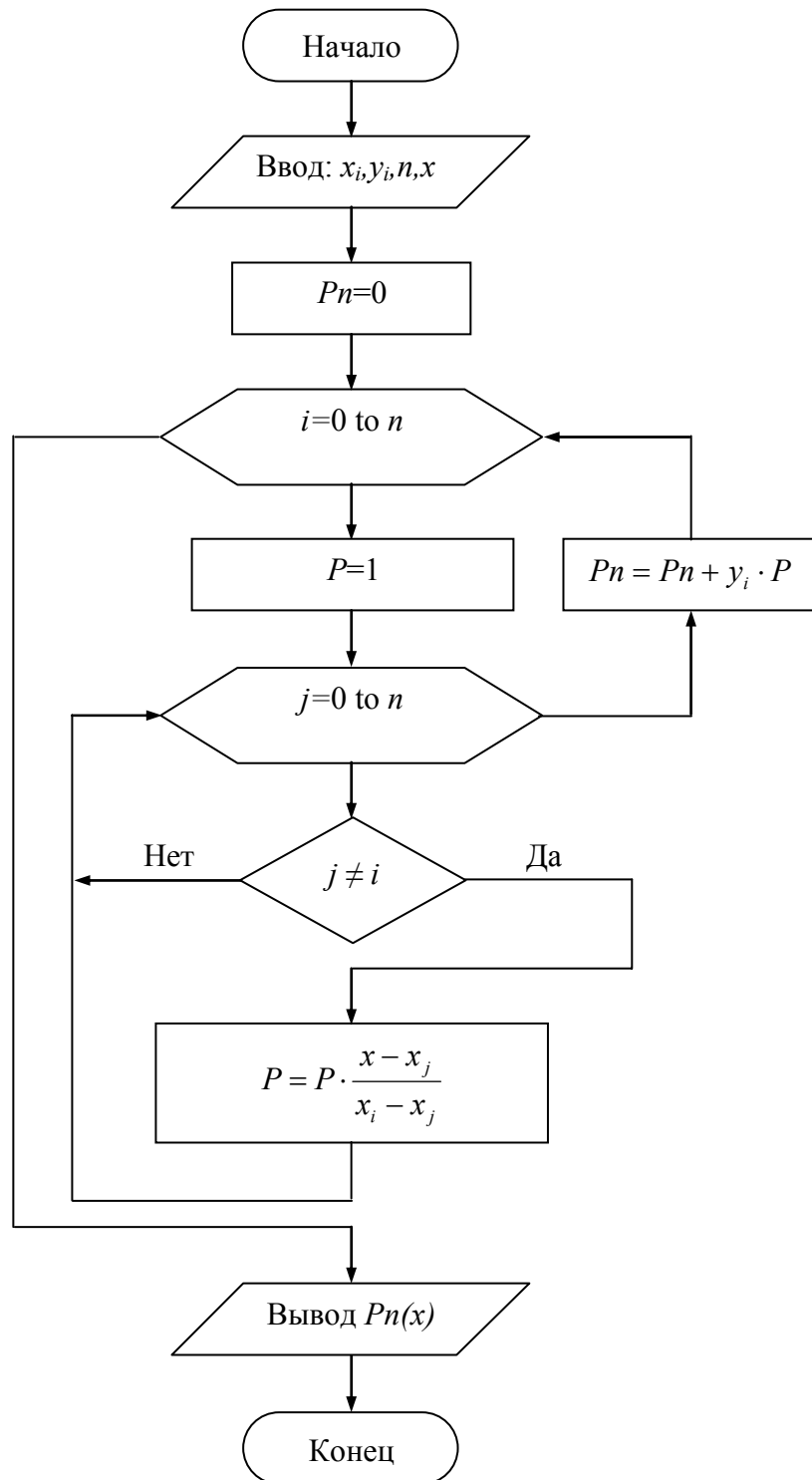


Рис.3.2. Блок-схема алгоритма интерполяции полиномом Лагранжа

Легко видеть, что эта функция есть полином второй степени, решающий задачу параболической интерполяции по трем точкам. Такой полином, как доказано, существует и, следовательно, $P_{0,1,2}(x) = L_2(x)$, где $L_2(x)$ - полином Лагранжа (3.7).

Ввиду указанных выше особенностей интерполяционного полинома Лагранжа, широкого применения в технике он не нашел. Интерполяция данным методом на ранней стадии развития вычислительной математики широко применялась при составлении различных таблиц значений функций для их пополнения промежуточными значениями.

3.3. Интерполяционный полином Ньютона

Интерполяционный полином Ньютона степени n записывается в виде

$$P_n(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) + \dots + a_n(x - x_0)(x - x_1)\dots(x - x_{n-1}). \quad (3.11)$$

Коэффициенты полинома (3.11) определяются из условий интерполяции Лагранжа (3.1).

Коэффициенты полинома определяются по формуле

$$A_k = \frac{y_{01\dots k-1} - y_{01\dots k}}{x_{k-1} - x_k}, \quad (3.12)$$

которые называются разделенными разностями.

Так, например, коэффициент A_3 полинома Ньютона рассчитывается по

формуле $A_3 = \frac{y_{012} - y_{013}}{x_2 - x_3} = y_{0123}$, где $y_{013} = \frac{y_{01} - y_{03}}{x_1 - x_3}$, $y_{03} = \frac{y_0 - y_3}{x_0 - x_3}$,

$y_{01} = \frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1} = A_1$, $y_{012} = \frac{y_{01} - y_{02}}{x_1 - x_2} = A_2$, $y_{02} = \frac{y_0 - y_2}{x_0 - x_2}$. Алгоритм нахождения

коэффициентов A_k полинома поясняет табл. 3.2.

Для построения полинома Ньютона используются только диагональные элементы приведенной таблицы, остальные элементы приведенной таблицы являются промежуточными данными. Поэтому в программе, реализующей вычисление коэффициента полинома, разделенные разности для экономии объема памяти ЭВМ размещаются в массиве, где первоначально хранились значения функции $f(x)$ в узлах. Этот массив будет частично обновляться при вычислении разделенных разностей очередного порядка.

Так, при вычислении разностей первого порядка коэффициент A_0 остается неизвестным, элемент y_1 заменяется на y_{01} (коэффициент A_1), y_2 — на элемент y_{02} и т.д. При вычислении разделенных разностей второго порядка первые два элемента массива y_i , где размещены коэффициенты A_0 и A_1 полинома, оставляем неизменными, остальные элементы заменяем разделенными разностями.

Таблица 3.2

x	$f(x)$	1	2	3	4
x_0	y_0				
x_1	y_1	$y_{01} = \frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1}$			
x_2	y_2	$y_{02} = \frac{y_0 - y_2}{x_0 - x_2}$	$y_{012} = \frac{y_{01} - y_{02}}{x_1 - x_2}$		
x_3	y_3	$y_{03} = \frac{y_0 - y_3}{x_0 - x_3}$	$y_{013} = \frac{y_{01} - y_{03}}{x_1 - x_3}$	$y_{0123} = \frac{y_{012} - y_{013}}{x_2 - x_3}$	
x_4	y_4	$y_{04} = \frac{y_0 - y_4}{x_0 - x_4}$	$y_{014} = \frac{y_{01} - y_{04}}{x_1 - x_4}$	$y_{0124} = \frac{y_{012} - y_{014}}{x_2 - x_4}$	$y_{01234} = \frac{y_{0123} - y_{0124}}{x_3 - x_4}$

Таким образом, после вычисления все коэффициенты полинома Ньютона будут размещены последовательно в массиве узловых значений функции $f(x)$.

Заметим, что добавление новых узлов в табл. 3.2 не изменит уже вычисленных коэффициентов, таблица будет дополнена новыми строками и столбцами разделенных разностей.

Предлагаемая схема вычисления коэффициентов интерполяционного полинома Ньютона, согласно табл. 3.2, обладает рядом преимуществ по сравнению с классической схемой. Во-первых, обеспечивается меньшая погрешность вычисления разделенных разностей при близко расположенных узлах за счет меньшего количества вычитаний близких чисел. Во-вторых, сокращается количество обращений к элементам массивов узлов и значений функции $f(x)$, так как в формулах для разделенных разностей уменьшаемые в числителе и знаменателе остаются неизвестными для разности каждого порядка. В-третьих, аналитические выражения для коэффициентов полинома Ньютона находятся намного проще.

После определения коэффициентов полинома Ньютона вычисление его значений при конкретных аргументах x наиболее экономично проводить по схеме Горнера, полученной путем последовательного вынесения за скобки множителей $(x - x_i)$ в формуле (3.11),

$$P_n(x) = y_0 + (x - x_0)(y_{01} + (x - x_1)(y_{012} + (x - x_2)(y_{0123} + \dots)\dots)). \quad (3.13)$$

В отличие от алгоритма вычисления полинома Лагранжа, при интерполяции полиномом Ньютона удастся разделить задачи определения коэффициентов и вычисления значений полинома при различных значениях его аргумента x . Это наглядно демонстрируют блок-схемы представленные на рис. 3.3, 3.4.

Представленный алгоритм определения коэффициентов интерполяционного полинома Ньютона не зависит от алгоритма построения самого полинома, что позволяет значительно уменьшить длительность вычислительных операций.

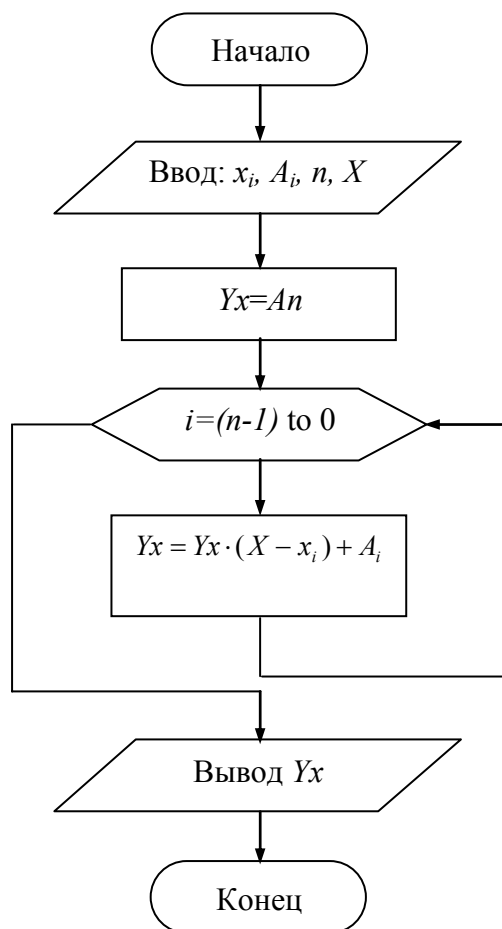


Рис.3.3. Блок-схема алгоритма построения интерполяционного полинома Ньютона по схеме Горнера

Интерполяционные полиномы Ньютона и Лагранжа не нашли широкого применения в прикладных задачах. Их применение ограничивается такими областями, как решение различных физико-математических задач, сглаживание данных эксперимента, пополнение промежуточными значениями таблично заданной функции.

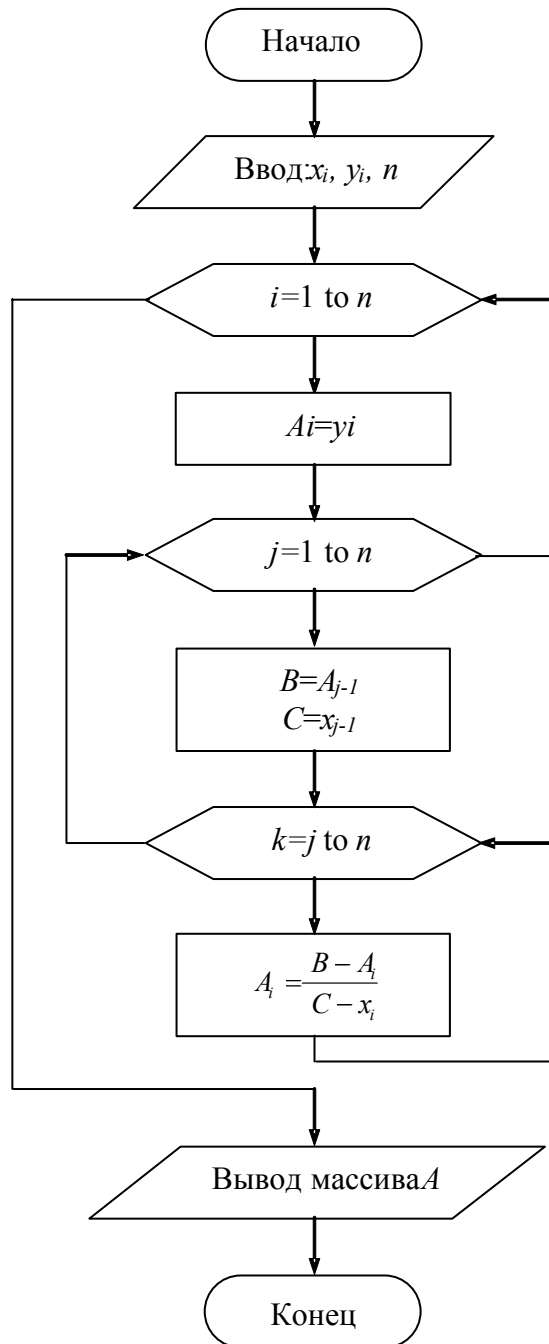


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма определения коэффициентов интерполяционного полинома Ньютона

3.4. Кусочно-полиномиальная аппроксимация

В тех случаях, когда промежуток $[a, b]$, на котором нужно заменить функцию $f(x)$ функцией $\varphi(x)$, достаточно большой и отсутствуют основания считать данную функцию $f(x)$ достаточно гладкой при $x \in [a, b]$ нецелесообразно повышать качество полиномиальной аппрок-

Так, если заданы значения y_i функции $y = f(x)$ на системе узлов x_i таких, что

и требуется аппроксимировать $f(x)$ кусочно-линейной функцией $\varphi(x)$, исходя из условий интерполяции (3.1), то, записав функцию $\varphi(x)$ в виде

для нахождения n пар ее коэффициентов a_k, b_k ($k=1, 2, \dots, n$), получим систему из $2n$ линейных уравнений

Каждая пара соседних уравнений системы (3.16), имеющих коэффициенты с одинаковыми индексами, не связана с остальными и может решаться отдельно.

Аналогично, каждое звено кусочно-квадратичной функции (при $n = 2m$ в выражении (3.14))

[illegible]

определяется тройкой коэффициентов $a_k, b_k, c_k, (k=1, 2, \dots, m)$, которые могут быть найдены последовательным решением (*при* $k=1, 2, \dots, m$) трехмерных линейных систем

$$\begin{cases} a_k x_{2k-2}^2 + b_k x_{2k-2} + c_k = y_{2k-2}, \\ a_k x_{2k-1}^2 + b_k x_{2k-1} + c_k = y_{2k-1}, \\ a_k x_{2k}^2 + b_k x_{2k} + c_k = y_{2k}. \end{cases} \quad (3.18)$$

с соответствующими интерполяционными условиями. Фактически, в рассмотренных случаях речь идет о последовательной линейной интерполяции по перемещаемым вдоль отрезка $[a, b]$ парам соседних точек разбиения (3.14) и о последовательной квадратичной интерполяции (3.17) по тройкам таких точек.

В качестве примера рассмотрим кусочно-линейное и кусочно-квадратичное интерполирование функции $y = f(x)$ заданной табл. 3.3.

Таблица 3.3

x	0	0.5	1	2	3	4	5
$f(x)$	1.5	0	0	2	2	1	2

Осуществляя линейное интерполирование данной функции на каждом из элементарных промежутков, определяемых соседними числами верхней строки таблицы, получаем, что можно считать $f(x) \approx \varphi_1(x)$, где

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} -3x + 1.5, & x \in [0, 0.5], \\ 0, & x \in [0.5, 1], \\ 2x - 2, & x \in [1, 2], \\ 2 & x \in [2, 3], \\ -x + 5, & x \in [3, 4], \\ x - 3, & x \in [4, 5]. \end{cases}$$

Квадратичное интерполирование по тройкам известных точек отрезков $[0,1]$, $[1,3]$, $[3,5]$ приводит к приближенному равенству $f(x) = \varphi_2(x)$, где

$$\varphi_2(x) = \begin{cases} 3x^2 - 4.5x + 1.5, & x \in [0, 1], \\ -x^2 + 5x - 4, & x \in [1, 3], \\ x^2 - 8x + 17, & x \in [3, 5]. \end{cases}$$

Графики функций $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ показаны на рисунках 3.5 и 3.6.

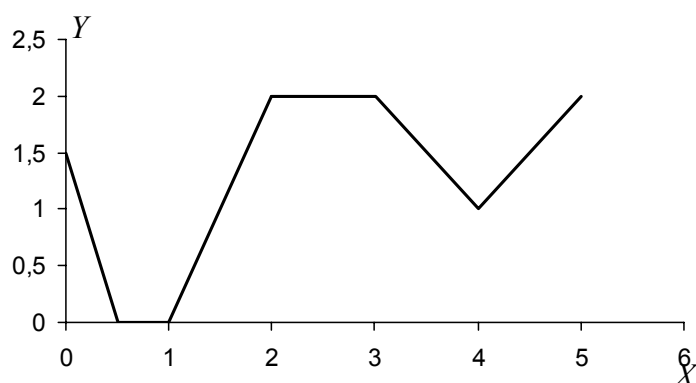


Рис.3.5. График функции $y = \varphi_1(x)$ при кусочно-линейном интерполировании

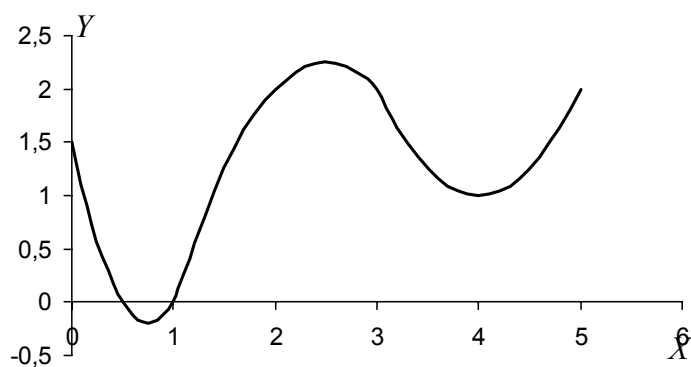


Рис.3.6. График функции $y = \varphi_2(x)$ при кусочно-квадратичном интерполировании

Как видно из рис. 3.5 и рис. 3.6, использование низких степеней полиномов составляющих интерполирующую функцию $\varphi(x)$ приводит к тому, что функция носит дискретный характер. С увеличением степени полинома функция принимает более гладкий характер, но при этом вычислительные затраты, связанные с решением системы линейных алгебраических уравнений, возрастают. Алгоритм нахождения коэффициентов и интерполирующего полинома усложняется. Алгоритм построения кусочно-полиномиальной функции $\varphi(x)$ приведен на рис. 3.7.

Кусочно-полиномиальная аппроксимация в настоящее время находит широкое применение в станках с ЧПУ, роботизированных технологических комплексах, промышленных контроллерах для управления двигателями, системах автоматизированного проектирования.

Применение такой интерполяции обусловлено малыми требованиями к быстродействию микропроцессоров и объемам памяти, а также

тем, что более 80% контуров деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, ограничены прямыми. Простота построения эквидистантных контуров к заданным контурам позволяет с меньшими вычислительными затратами строить траектории движения исполнительных механизмов.

Квадратичное интерполирование применяется в основном для сглаживаний данных эксперимента, построения линейных фильтров.

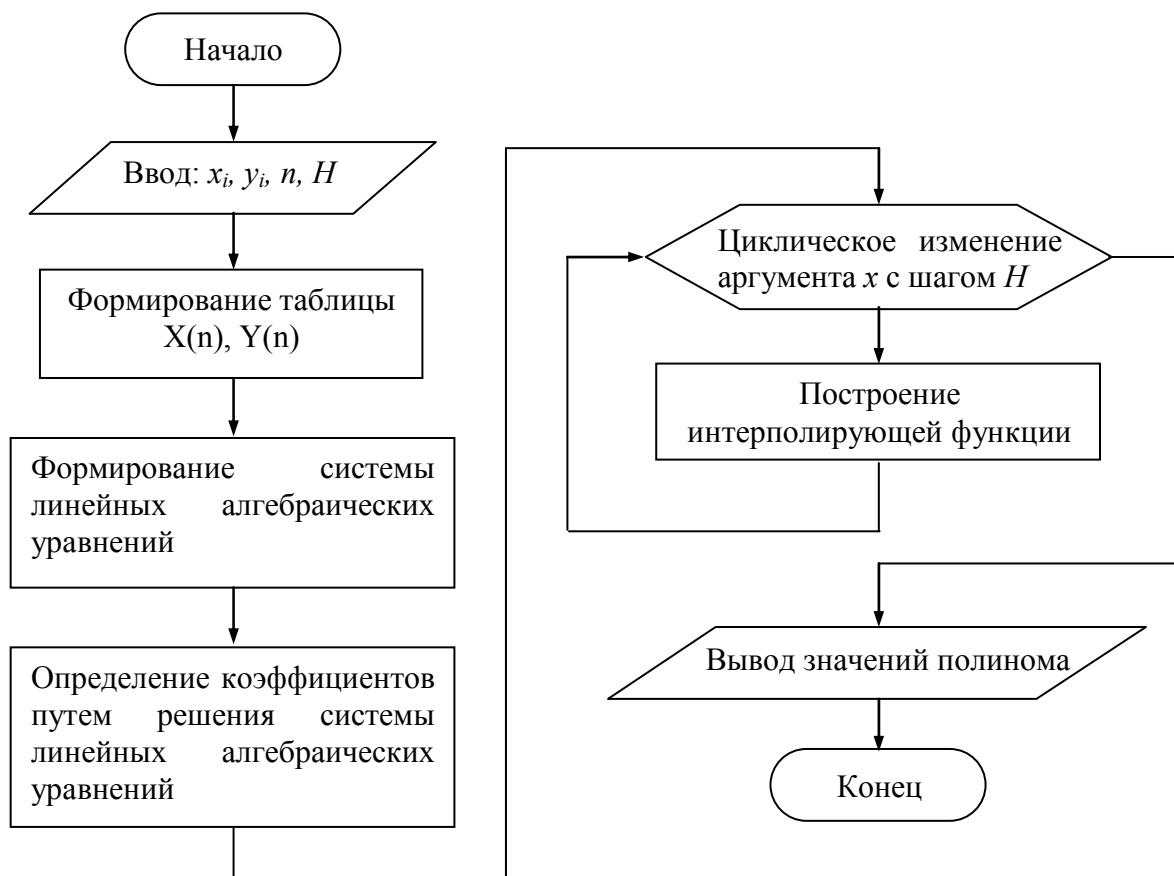


Рис.3.7. Блок-схема алгоритма кусочно-полиномиальной аппроксимации

3.5. Интерполяционный кубический сплайн дефекта 1

Сплайном $S_m(x)$ называется функция, принадлежащая классу $C^l[a, b]$ l раз непрерывно дифференцируемых функций, такая что, на каждом промежутке $[x_{k-1}, x_k]$ ($k = 1, 2, \dots, n$) – полином m -й степени. Разность $d = m - l$ между степенью сплайна m и показателем его гладкости l называется дефектом сплайна.

Если сплайн $S_m(x)$ строится по некоторой функции $f(x)$ так, чтобы выполнялись условия $S_m(x_i) = f(x_i)$, то такой сплайн называется интерполяционным сплайном для функции $f(x)$; при этом узлы сплайна x_k , могут не совпадать с узлами интерполяции x_i . Совпадение дефекта сплайна с его степенью обеспечивает непрерывность сплайна. Интерес представляет построение сплайна с большей гладкостью, т.е. с малым дефектом. Такие сплайны являют собой дальнейшее совершенствование идеи кусочно-полиномиальной аппроксимации.

Кубическим сплайном дефекта 1, интерполирующим на отрезке $[a, b]$ функцию $f(x)$, называется функция вида:

$$g(x) = \begin{cases} g_k(x) = a_k + b_k(x - x_k) + c_k(x - x_k)^2 + d_k(x - x_k)^3 \text{ при } x \in [x_{k-1}, x_k] \end{cases}_{k=1}^n, \quad (3.19)$$

удовлетворяющая совокупности условий:

- а) равенство $g(x_k) = f_k$ (условие интерполяции в узлах сплайна);
- б) $g(x) \in C^2_{[a,b]}$ (двойная непрерывная дифференцируемость);
- с) равенство $g''(a) = g''(b) = 0$ (краевые условия).

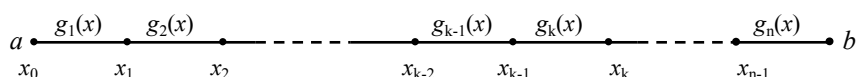


Рис.3.8. Расположение узлов и участков сплайн-функции

Определенный таким образом сплайн называют естественным или чертежным сплайном. Функция (3.19) построенная с условиями а)-в), представляет собой кубический n -звенник с гладким сопряжением звеньев.

Для построения по дискретной функции $f(x)$ интерполирующего сплайна (3.19) необходимо определить $4n$ его коэффициентов a_k, b_k, c_k, d_k ($k = 1, 2, \dots, n$). Из условий интерполяции а):

$$g_1(x_0) = f_0, \quad g_k(x_k) = f_k, \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, n; \quad (3.20)$$

из условий гладкой стыковки звеньев сплайна б):

$$\left. \begin{aligned} g_{k-1}(x_{k-1}) &= g_k(x_{k-1}) \\ g'_{k-1}(x_{k-1}) &= g'_k(x_{k-1}) \\ g''_{k-1}(x_{k-1}) &= g''_k(x_{k-1}) \end{aligned} \right\} \text{при } k = 2, 3, \dots, n; \quad (3.21)$$

из краевых условий с):

$$g''_1(x_0) = 0, \quad g''_n(x_n) = 0. \quad (3.22)$$

Как видим, условий оказалось $4n$ – ровно столько, сколько в записи сплайна (3.19) неизвестных коэффициентов. Подставляя сюда выражения функций

$$g_k(x) = a_k + b_k(x - x_k) + c_k(x - x_k)^2 + d_k(x - x_k)^3 \quad (3.23)$$

и их производных

$$\begin{aligned} g'_k(x) &= b_k + 2c_k(x - x_k) + 3d_k(x - x_k)^2 \\ g''_k(x) &= 2c_k + 6d_k(x - x_k) \end{aligned} \quad (3.24)$$

через коэффициенты a_k, b_k, c_k, d_k при указанных значениях k и при равенстве $h_k = x_k - x_{k-1}$, получаем детализированную систему связей

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 - b_1 h_1 + c_1 h_1^2 - d_1 h_1^3 = f_0, \\ a_k = f_k \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, n, \\ a_{k-1} = a_k - b_k h_k + c_k h_k^2 - d_k h_k^3, \\ b_{k-1} = b_k - 2c_k h_k + 3d_k h_k^2, \\ c_{k-1} = c_k - 3d_k h_k, \\ c_1 - 3d_1 h_1 = 0, \\ c_n = 0. \end{array} \right\} \text{при } k = 2, 3, \dots, n \quad (3.25)$$

Исключив из системы неизвестные коэффициенты a_k, b_k, d_k , ее решение относительно неизвестных c_k , записывается в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} d_k = \frac{c_k - c_{k-1}}{3h_k} \quad (k = 1, 2, \dots, n), \\ a_k = f_k, \\ b_k = f(x_{k-1}, x_k) + \frac{2}{3}h_k c_k + \frac{1}{3}h_k c_k \quad (k = 1, 2, \dots, n), \\ \text{где } f(x_{k-1}, x_k) = \frac{f_k - f_{k-1}}{h_k}. \end{array} \right. \quad (3.26)$$

В свою очередь, коэффициенты c_k определяется методом прогонки по формуле

$$c_{k-1} = \delta_{k-1} c_k + \lambda_{k-1}. \quad (3.27)$$

Значения коэффициентов определяются следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_1 = -\frac{h_2}{2h_1 + 2h_2}, \quad \lambda_1 = \frac{3f(x_1, x_2) - 3f(x_0, x_1)}{2h_1 + 2h_2} \\ \delta_{k-1} = -\frac{h_k}{2h_{k-1} + 2h_k + h_{k-1}\delta_{k-2}}, \\ \lambda_{k-1} = \frac{3f(x_{k-1}, x_k) - 3f(x_{k-2}, x_{k-1}) - h_{k-1}\lambda_{k-2}}{2h_{k-1} + 2h_k + h_{k-1}\delta_{k-2}} \end{array} \right\} \text{при } k = 3, 4, \dots, n \quad (3.28)$$

Все расчетные формулы упрощаются в частном случае, когда сплайн $g(x)$ строится по системе равностоящих узлов.

Сущность алгоритма построения сплайн-функции с помощью метода прогонки поясняет блок-схема, приведенная на рис. 3.9. Отличительной особенностью представленного алгоритма является то, что все коэффициенты сплайна определяются не одновременно, как в выше представленных методах, а несколькими этапами. Процедура вычисления может быть организована на основе метода прогонки.

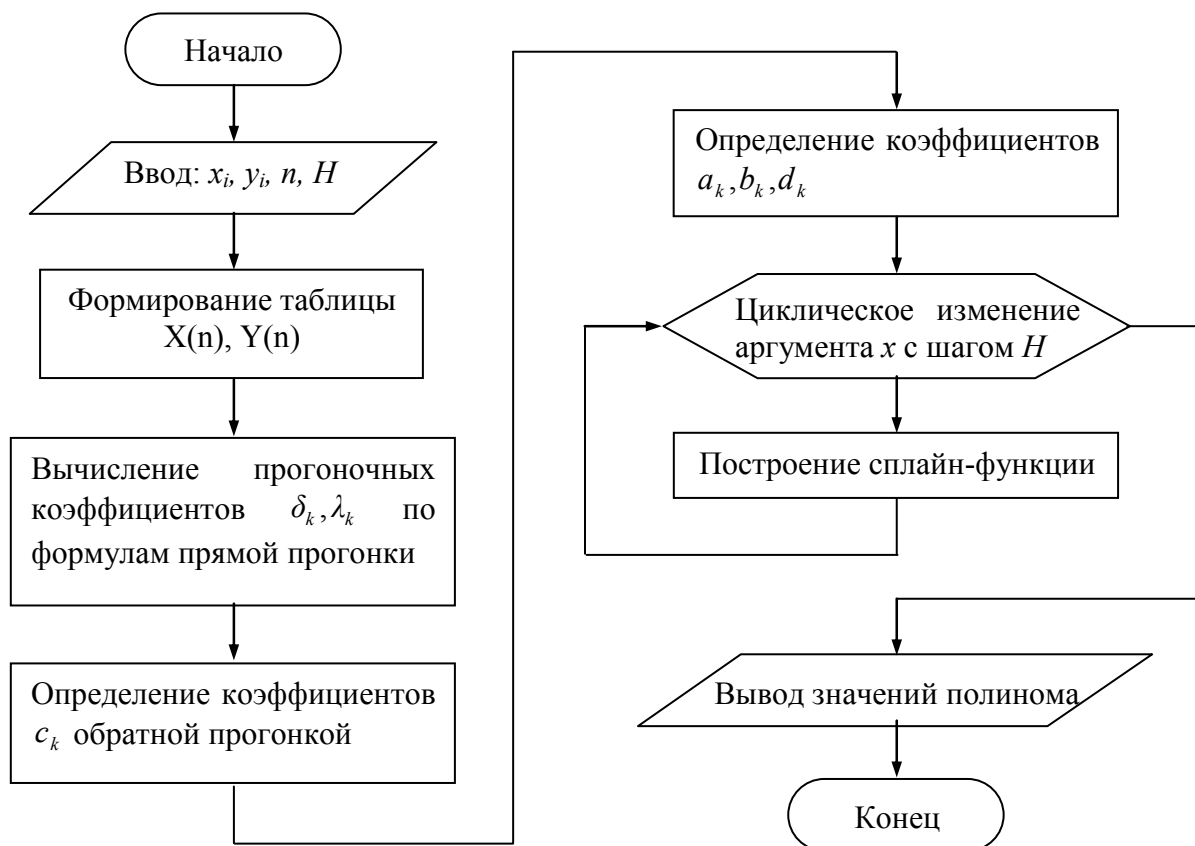


Рис.3.9. Блок-схема алгоритма интерполяции кубическим сплайном

Существенными недостатками представленного метода определения коэффициентов являются значительное время расчета вследствие наличия двух циклов прогонки – прямого и обратного, повышение требований к микропроцессорам, громоздкость алгоритма. Однако следует также отметить и достоинства метода. Во-первых, это отсутствие колебательных эффектов в области некоторой средней кривой, которую можно принять в качестве эталонной. Во-вторых, значительно уменьшаются значения первой и второй производных функции на интервалах между точками интерполяции. В-третьих, сплайн-функции обладают

хорошей сходимостью к аппроксимируемым объектам и простой реализацией алгоритмов построения сплайнов на ЭВМ.

Значительное увеличение шага дискретизации интерполируемой функции не приводит к локальному всплеску погрешности вблизи точки смены шага. Таким образом, можно использовать значительное изменение шага интерполируемой функции.

Метод прогонки позволяет получить более высокую точность интерполяции по сравнению с полиномом Лагранжа. Например, для кубического сплайна точность возрастает в 9 раз.

3.6. Математическое обоснование алгоритма интерполяции кубическим сплайном

Указанный выше недостаток метода прогонки – наличие двух циклов необходимых для определения коэффициентов сплайна устраняется в предлагаемом методе построения сплайн-функции.

Отличительной особенностью предлагаемого метода является то, что для ускорения нахождения коэффициентов исходная последовательность точек x_n разбивается на интервалы по 4 точки. Для каждого из этих интервалов определяются непосредственные значения коэффициентов. Так для первого интервала содержащего 4 точки получим следующую систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} g_1(x) &= a_1 + b_1(x - x_1) + c_1(x - x_1)^2 + d_1(x - x_1)^3 \\ g_2(x) &= a_2 + b_2(x - x_2) + c_2(x - x_2)^2 + d_2(x - x_2)^3 \\ g_3(x) &= a_3 + b_3(x - x_3) + c_3(x - x_3)^2 + d_3(x - x_3)^3 \end{aligned} \right\}. \quad (3.29)$$

Из условия интерполяции а) определим коэффициенты: $a_1 = f_1, a_2 = f_2, a_3 = f_3$.

Из краевых условий с) запишем уравнения

$$\left. \begin{aligned} g_1''(x_0) &= 2c_1 + 6d_1(x_0 - x_1) = 0 \\ g_3''(x_3) &= 2c_3 + 6d_3(x_3 - x_3) = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.30)$$

Данные уравнения позволяют определить коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= -3d_1(x_0 - x_1) \\ c_3 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.31)$$

Из условий гладкой стыковки звеньев б)

$$\left. \begin{aligned} g_1''(x_1) &= g_2''(x_1) \\ g_2''(x_2) &= g_3''(x_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

вычисляются коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} c_2 &= c_1 - 3d_2(x_1 - x_2) \\ c_3 &= c_2 - 3d_3(x_2 - x_3) \end{aligned} \right\}. \quad (3.33)$$

С учетом равенства $d_3 = \frac{-d_1(x_0 - x_1) - d_2(x_1 - x_2)}{x_2 - x_3}$ и уравнений (3.31) и (3.32) получим систему уравнений, содержащую 5 неизвестных:

$$\left. \begin{aligned} g_1(x) &= a_1 + b_1(x - x_1) + d_1[-3(x_0 - x_1)(x - x_1)^2 + (x - x_1)^3] \\ g_2(x) &= a_2 + b_2(x - x_2) - 3d_1(x_0 - x_1)(x - x_2)^2 + d_2[-3(x_1 - x_2)(x - x_2)^2 + d_2(x - x_2)^3] \\ g_3(x) &= a_3 + b_3(x - x_3) + \left[\frac{-d_1(x_0 - x_1) - d_2(x_1 - x_2)}{x_2 - x_3} \right] (x - x_3)^3 \end{aligned} \right\}. \quad (3.34)$$

Применяя условия гладкой стыковки участков сплайн-функции на основании полученной системы (3.34) определяем коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} b_2 &= b_1 + 6d_1(x_0 - x_1)(x_1 - x_2) + 3d_2(x_1 - x_2)^2 \\ b_3 &= b_1 + 6d_1(x_0 - x_1)(x_1 - x_2) + 3d_2(x_1 - x_2)^2 + \left[\frac{3d_1(x_0 - x_1) + 3d_2(x_1 - x_2)}{x_2 - x_3} \right] (x_2 - x_3)^2 \end{aligned} \right\}. \quad (3.35)$$

Обозначая $L_1 = x_0 - x_1, L_2 = x_1 - x_2, L_3 = x_2 - x_3$, система (3.34) решается относительно краевых условий с учетом (3.32) и (3.34). В результате записываются коэффициенты сплайн-функции:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \frac{f_0 - a_1}{L_1} + 2d_1L_1^2, \\ d_1 &= \frac{f_2 - a_2 - \frac{(f_0 - a_1)L_3}{L_1} - \left[\frac{f_1 - a_2}{L_2^3} - \frac{f_0 - a_1}{L_2^2L_1} \right] L_2L_3(3L_2 + 2L_3)}{2L_1^2L_3 + L_1L_3(6L_2 + 2L_3) - \left[\frac{3L_1}{L_2} + \frac{2L_1^2}{L_2^2} \right] L_2L_3(3L_2 + 2L_3)} \\ d_2 &= \frac{f_1 - a_2}{L_2^3} - \frac{b_1}{L_2^3} - \frac{3d_1L_1}{L_2}, \\ b_2 &= b_1 + 6d_1L_1L_2 + 3d_2L_2^2, \\ d_3 &= \frac{-d_1L_1 - d_2L_2}{L_3}, \\ c_2 &= 3d_3L_3, c_1 = -3d_1L_1, c_3 = 0, \\ b_3 &= b_1 - 2C_2L_2 - 3d_2L_2^2 - 3d_3L_3^2 \end{aligned} \right\}. \quad (3.36)$$

Аналогичным образом определяются коэффициенты для последующих 4-х точечных участков сплайн-функции. Как видим, параллельно с нахождением коэффициентов сплайн-функции можно построить непосредственно сплайн-функцию.

Приведенная на рисунке 3.10 блок-схема поясняет работу предложенного метода построения сплайн-функции.

Возможность определения коэффициентов и построение самой сплайн функции в одном цикле устраняет недостатки стандартного метода прогонки – наличие двух циклов необходимых для определения коэффициентов сплайна и отдельного цикла для построения сплайн-функции. Также отсутствует необходимость выделения дополнительной памяти для хранения всех коэффициентов сплайн-функции.

С момента разработки теории сплайнов прошло уже несколько десятков лет. За это время они нашли большое применение в машиностроении, космической технике, робототехнике и других областях науки и техники. Особенно широкое применение получили сплайны в математическом моделировании поверхностей деталей и агрегатов сложной формы, таких как аэродинамические обводы летательных аппаратов, корпуса судов и легковых автомобилей, лопасти гидротурбин. Такие математические модели стали необходимы при создании систем автоматизированного проектирования изделий на основе ЭВМ, технологической подготовки их производства.

В частности, благодаря использованию кубических сплайнов в текстильной промышленности для построения оптимальной траектории движения резца при раскрое материалов удалось значительно повысить производительность комплекса. В системе числового программного управления технологическим оборудованием NC-2000, являющейся одной из самых современных систем в своей области, также применен механизм сплайн-интерполяции для решения траекторных задач.

На основе сплайн-интерполяции разрабатывается программное обеспечение для работы многооперационных автоматов лазерного упрочнения поверхности деталей, позволяющее строить модели поверхностей различных объектов.

Кроме станков с ЧПУ, сплайн-интерполяция находит большое применение в компьютерных приложениях предназначенных для работы с 3D графикой, в большинстве современных графических ускорителей.

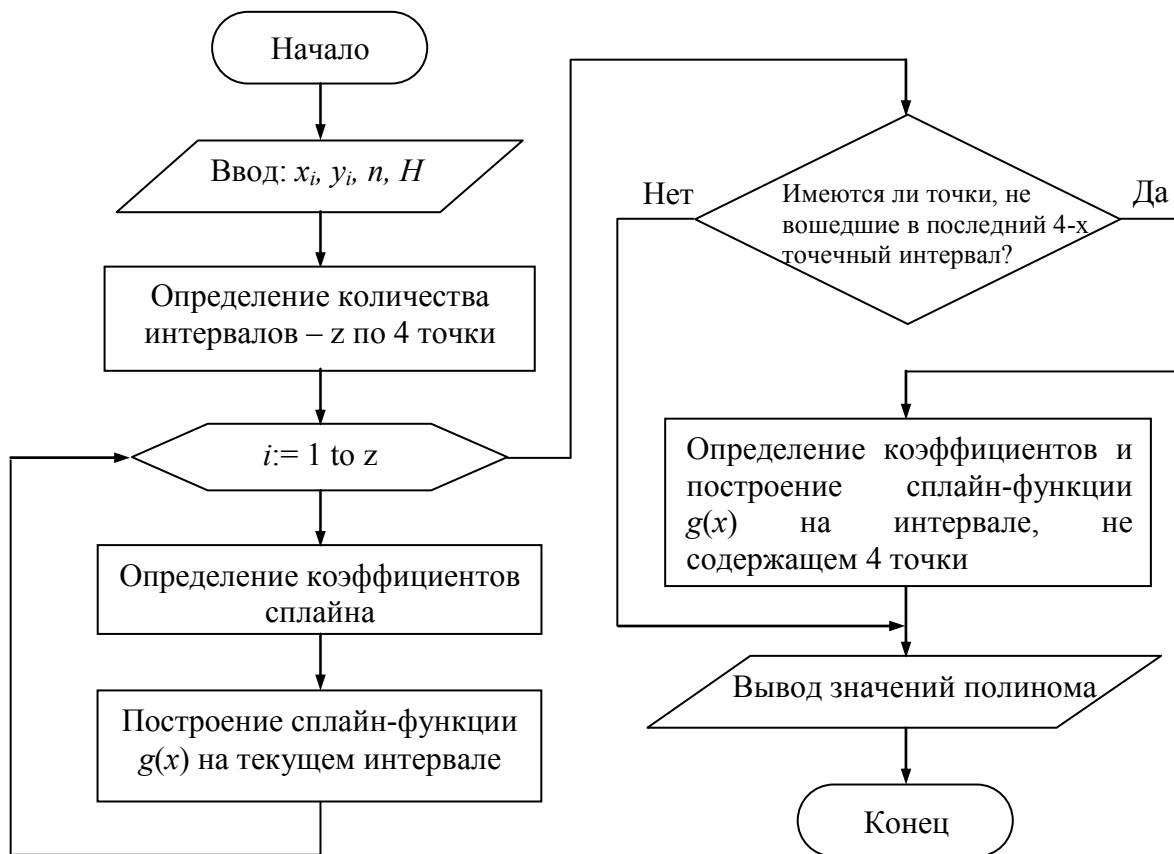


Рис. 3.10. Блок-схема предлагаемого алгоритма интерполяции кубическим сплайном

В настоящее время на практике сплайн-интерполяция находит все большее применение. Это обусловлено не только указанными выше преимуществами методов сглаживания дискретных данных, но и интенсивным развитием микропроцессорной техники.

3.6.1. Результаты тестирования алгоритма

Для изучения возможностей разработанного алгоритма и сравнения его со стандартным методом прогонки была разработана программа на языке программирования Delphi-6.

Разработка независимой программы позволяет достичь максимально возможной производительности исследуемого алгоритма, чего не удастся достичь средствами стандартных математических программных комплексов, например, таких как MatLab или MathCad. Кроме того, динамическую библиотеку DLL (Dynamic-Link Libraries), в которой реализуется блок построения сплайн-функции, можно использовать в

других объектных языках программирования. Интерфейс программы и панель параметров представлены на рисунках 3.12, 3.13.

Наибольший интерес для практических целей представляет применение сплайн-интерполяции в реальном времени. Поэтому рассмотрим зависимость длительности расчетов от количества точек и формы заданной дискретной функции. Результаты расчетов сравним с результатами, полученными при интерполировании по методу прогонки (табл. 3.4). Тестирование проводилось под управлением операционной системы Microsoft Windows XP с установленным высоким уровнем приоритета исполняемой программы.

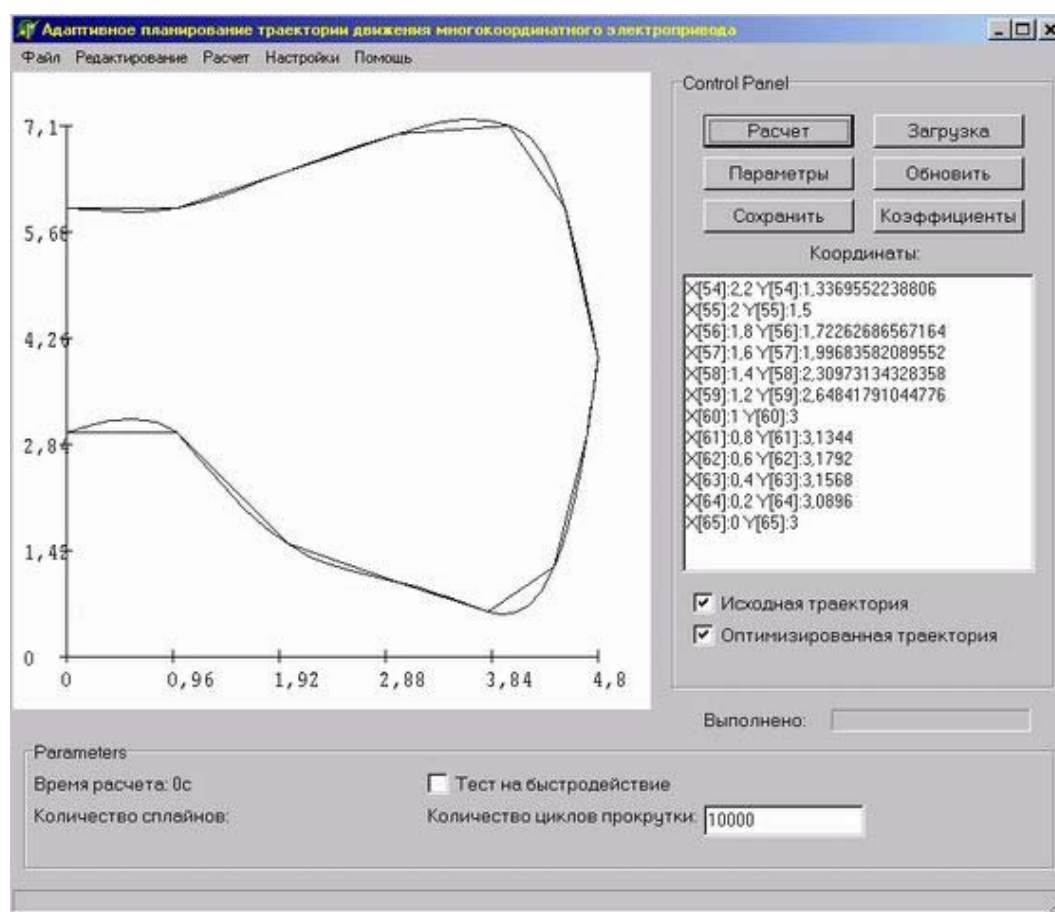


Рис. 3.12. Внешний вид интерфейса разработанной программы

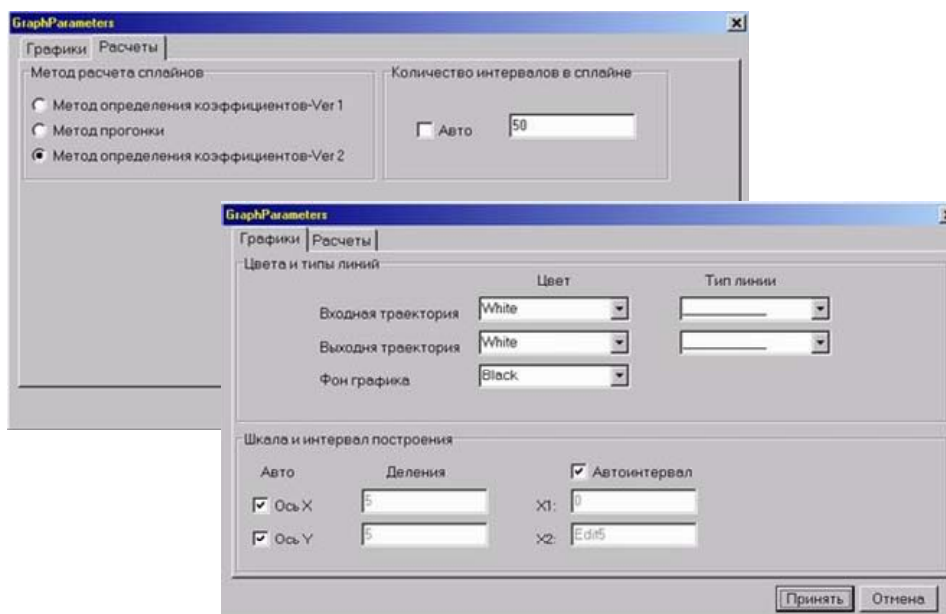


Рис. 3.13. Внешний вид панели параметров.

Таблица 3.4

Функция	Количество точек	Прирост быстродействия – Δ , %
Рунге, $f(x) = 1/(1 + 25x^2)$	6	63,2%
	12	80,7%
Синусоида, $f(x) = \sin(x)$	10	62,2%
	13	74,2%
Парабола, $f(x) = x^2$	10	82%
	60	93,1%
Экспонента, $f(x) = e^x$	6	77%
	12	82%

В данном случае под приростом быстродействия Δ понимается относительное уменьшение длительности расчетов разработанного алгоритма по сравнению с длительностью расчетов методом прогонки.

Сравнительная оценка рассматриваемого алгоритма построения сплайн-функции и стандартного метода прогонки отражает уменьшение длительности расчетов в среднем на 77%. С ростом количества точек исходной траектории наблюдается все больший прирост быстродействия разработанного алгоритма по отношению к методу прогонки, что подтверждает указанные выше преимущества алгоритма.

Увеличение производительности алгоритма, в свою очередь, позволяет снизить требования к быстродействию микроконтроллера сис-

темы управления, делает возможным применение алгоритма для обработки больших массивов данных.

На рисунке 3.11 приведена сравнительная оценка кубической сплайн-интерполяции функции Рунге $Y(x) = 1/(1 + 25x^2)$, заданной дискретно на интервале $x \in [0, 1]$. В одном случае (рис.3.11-а), исходная функция была задана таблично по 4-м точкам на неравномерной сетке, в другом - (рис.3.11-б) функция была задана по 8-ми точкам. Анализ интерполированных кривых показал отсутствие колебательных эффектов в области некоторой средней кривой, которую можно принять в качестве эталонной. Незначительное увеличение точек задания функции позволяет максимально приблизить интерполирующую функцию к эталонной $Y(x) = 1/(1 + 25x^2)$. Наличие заданных точек в начале и конце рассматриваемого интервала интерполяции сводит ошибку интерполирования практически к нулю. Поэтому задание граничных точек также является важным условием при сплайн-интерполяции.

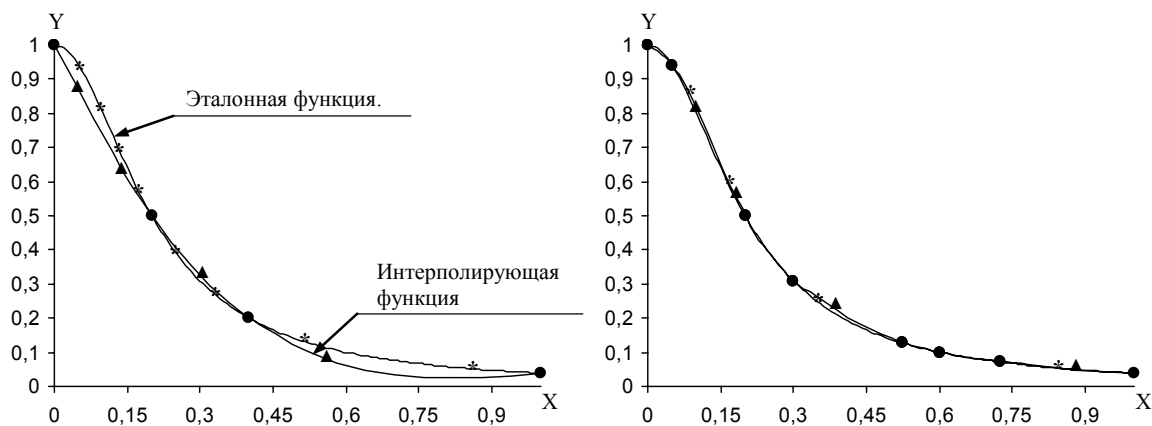


Рис.3.11. Графики исходной (*) и сплайн-функции (▲) (а – функция задана по 4-м точкам, б – функция задана по 8-ми точкам)

Кроме указанных достоинств алгоритма следует также отметить возможность интерполирования дуг окружностей. Это позволит заменить обычный алгоритм круговой интерполяции предлагаемым алгоритмом. Интерполирование дуги окружности и график изменения ошибки интерполяции вдоль оси X приведены на рисунках 3.12 и 3.13. Дуга задана дискретно 11-ю точками. Число интервалов интерполяции равно 500.

Приведенные рисунки показывают, что круг или дуга окружности могут быть с большой степенью точности интерполированы кубическим сплайном. Значение числа интервалов интерполяции оказывают незначительное влияние на точность интерполяции. Так разница в погрешности интерполирования дуги при 50 и 500 интервалах интерполяции со-

ставляет менее 1%. При анализе влияния числа точек дискретно задающих дугу окружности установлено, что при неверном их расположении наблюдаются эффекты локального всплеска сплайна (рис. 3.14), что приводит к значительному увеличению погрешности.

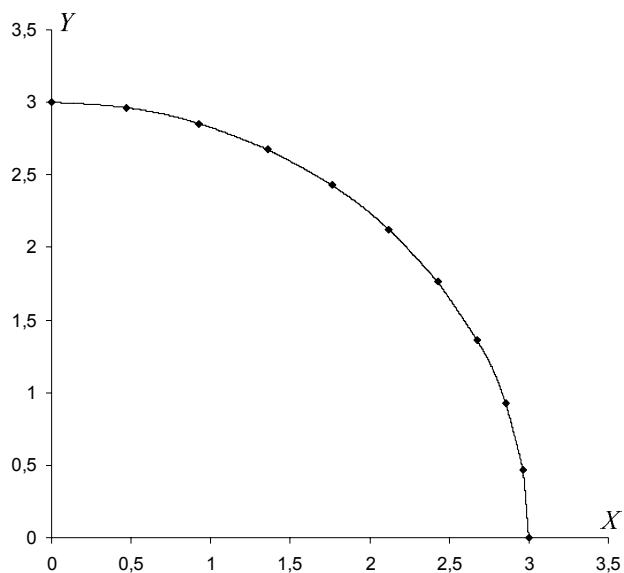


Рис. 3.12. Интерполирование дуги окружности

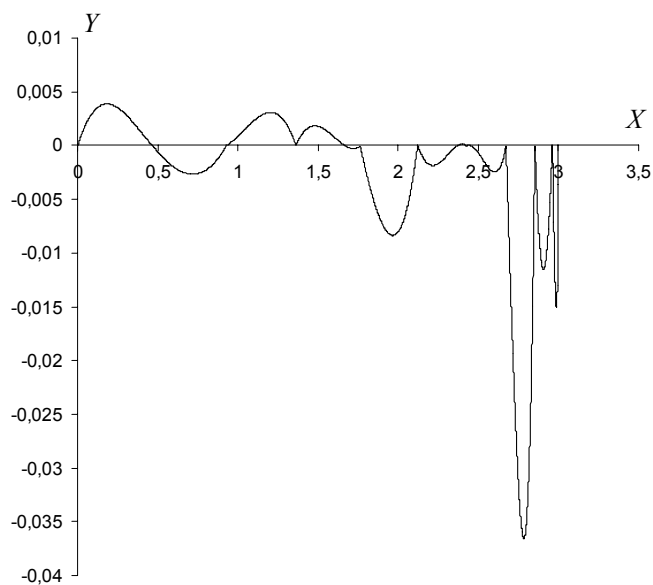


Рис. 3.13. Изменение ошибки интерполяции вдоль оси X

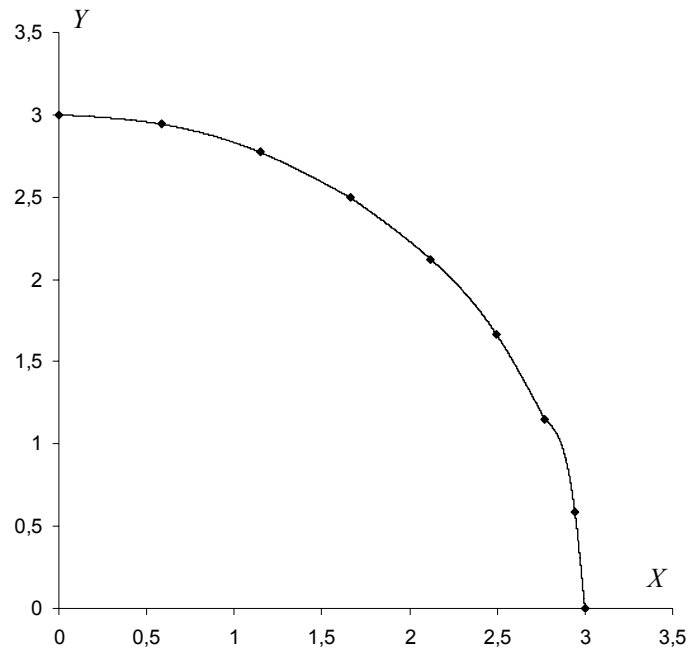


Рис. 3.14. Интерполирование дуги окружности в случае неверно заданных исходных точек

Экспериментально установлено, что при равномерном разбиении угла между начальной и конечной точкой дуги на 10 участков (или кратное 10) и определении соответствующих точек принадлежащих этим интервалам максимальная погрешность не превышает нескольких процентов. Однако если угол достаточно мал и, следовательно, мала длина дуги окружности, то данное количество участков может быть избыточным. Но это в свою очередь не приводит к росту погрешности.

Примеры интерполирования различных дискретно заданных функций на плоскости и в пространстве приведены на рис. 3.15–3.19.

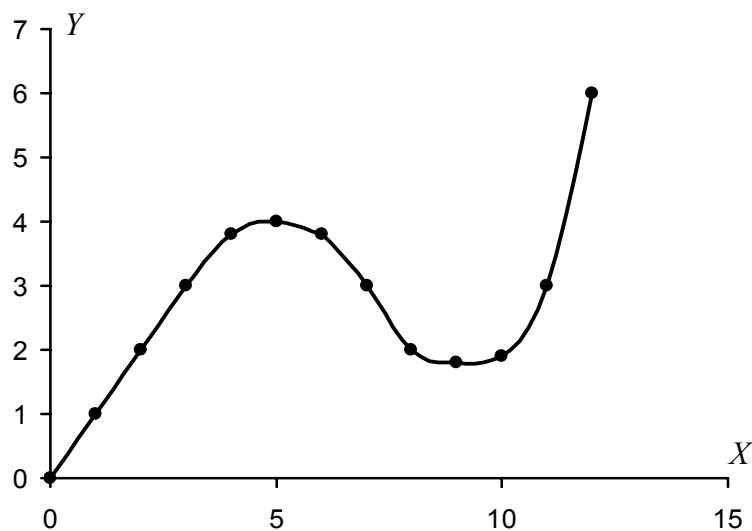


Рис. 3.15. Интерполирование сложной дискретно заданной функции

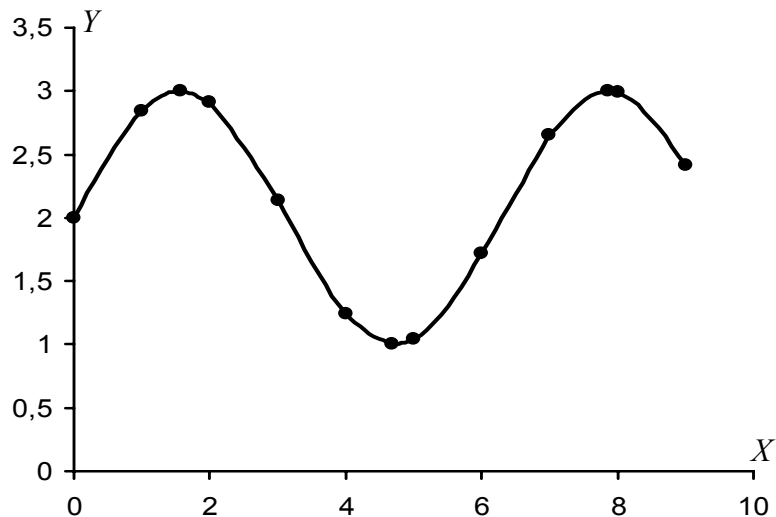


Рис. 3.16. Восстановление синусоидального сигнала заданного дискретно

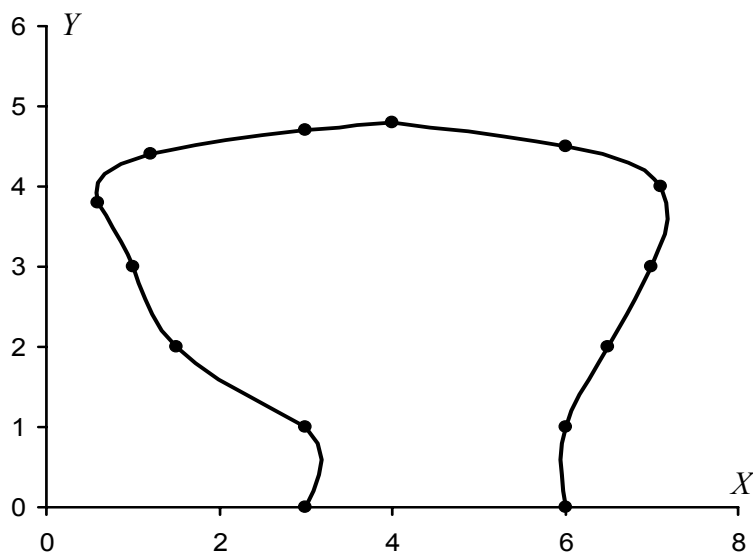


Рис. 3.17. Интерполирование дискретно заданной траектории движения сварочного автомата

Тестирование разработанного алгоритма более чем на ста различных траекториях показало, что алгоритм достаточно точно интерполирует заданную дискретно траекторию движения. При этом обеспечиваются условия нулевой ошибки в узлах интерполяции и двойная непрерывная дифференцируемость сплайн-функции.

Обзор приведенных выше методов интерполяции показал, что наиболее актуальным на сегодняшний день является применение метода кубической сплайн-интерполяции для решения траекторных задач в электромеханических системах. Это обусловлено такими важными преимуществами, как хорошая сходимость, простота реализации алгоритмов построения сплайнов на ЭВМ,

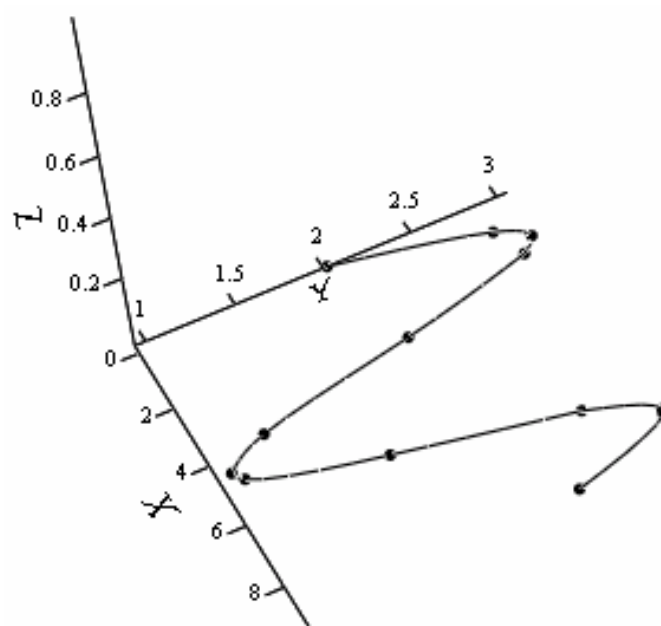


Рис. 3.18. Интерполирование в пространстве

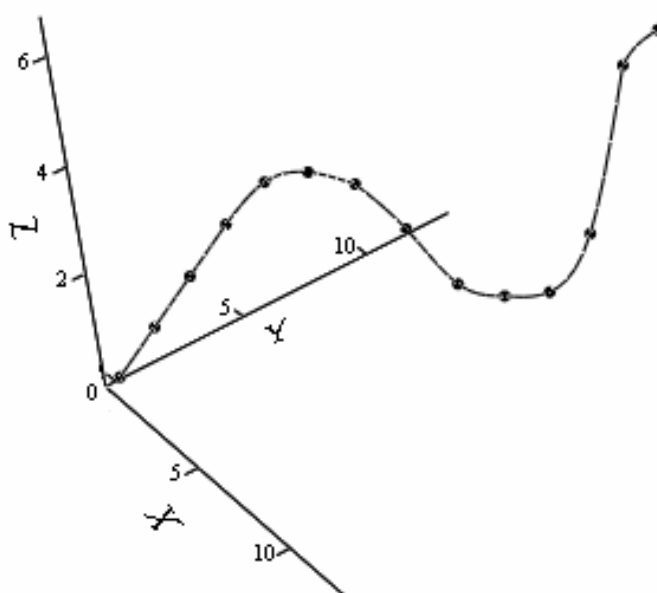


Рис. 3.19. Интерполирование дискретно заданной траектории движения в пространстве

незначительное влияние шага дискретизации на точность интерполируемой функции. Опыт применения сплайн-функций как аппарата приближения функций показал, что во всех известных случаях удалось добиться ощутимых результатов по сравнению с классическим аппаратом полиномиальной аппроксимации. В одних задачах переход к сплайнам

приводит к повышению точности результатов, в других – к значительному сокращению вычислительных затрат, в третьих – достигаются оба эффекта одновременно.

Применение полиномов Ньютона и Лагранжа для решения задач интерполирования в электромеханических системах является неоправданным, поскольку эти методы обладают большими вычислительными затратами и, как следствие, большим временем интерполирования при меньшей точности, нежели чем метод сплайн-интерполяции. Области применения данных методов ограничиваются решением различных физико-математических задач, сглаживанием данных эксперимента.

В отличие от упомянутых выше методов приближения функций, метод кусочно-полиномиальной аппроксимации находит наиболее широкое применение, что обусловлено простотой реализации данных методов, малыми требованиями к быстродействию микропроцессоров и объемам памяти. В настоящий момент большинство современных промышленных контроллеров управления двигателями станков с ЧПУ и промышленных роботов оснащены данным видом интерполяции.

4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ РСНС СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

4.1. Обзор современных сервоконтроллеров

Современные сервоконтроллеры предназначены для решения задач контурного управления многокоординатными электроприводами и электроавтоматики.

При обзоре наиболее распространенных сервоконтроллеров для установки в системы типа РСНС выделим в качестве базовых параметров определяющих стоимостные и качественные показатели:

- типы интерполяции;
- количество регулируемых осей;
- интерфейс связи с ПК;
- разрядность каналов ЦАП;
- поддерживаемый тип сигнала обратной связи от энкодеров;
- количество дискретных входов/выходов;
- тип процессора;
- стоимость.

Перечень наиболее распространенных сервоконтроллеров показан в табл. 3.1. Обзор показывает, что наиболее перспективные сервоконтроллеры оснащены 64 битными микроконтроллерами с поддержкой

арифметики с плавающей запятой, широким спектром различных видов интерполяции, а также большим числом дискретных входов/выходов (рис. 4.1). Одним из наиболее важных преимуществ таких модулей является отсутствие необходимости в доукомплектовании системы управления дополнительными модулями ввода/вывода. Однако стоимость таких сервоконтроллеров в некоторых случаях (в зависимости от оснащения) достигает 2000 – 3000 \$. Ввиду этого при построении простых систем управления сервосистемами наиболее предпочтительным является использование дешевых сервоконтроллеров с малым набором функций в сочетании с недорогими модулями ввода/вывода, например линейка UNIOxx фирмы Fastwel.



Рис. 4.1. Внешний вид сервоконтроллера APCI-8001 фирмы ADDI-DATA

Одним из распространенных и недорогих сервоконтроллеров является 3-х осевой сервоконтроллер SERVO-300 фирмы ICP DAS устанавливаемый в ISA-шину компьютера (рис. 4.2). Этот контроллер оснащен двумя видами интерполяции – линейная и круговая, а также 8 дискретными входами и 10 выходами. Единственным недостатком такого сервоконтроллера является использование ISA-шины. Ввиду того, что на современных недорогих персональных компьютерах не установлена такая шина, то при создании системы управления оснащенной данным сервоконтроллером возникает необходимость в покупке специализированного промышленного компьютера с ISA-шиной. Стоимость серво-

контроллера не превышает 500 \$, что позволяет строить в целом недорогие системы управления перемещением.

Тенденции в развитии периферии сервоконтроллеров заключаются в следующем:

- на рынке отражается переход от простых 2-х, 3-х осевых сервоконтроллеров к многоосевым обладающими такими видами интерполяции: линейная, круговая, сплайн-интерполяция, NURBS, синусоидальная, параболическая, спиральная;
- преимущественно наибольшее применение находят сервоконтроллеры оснащенные PCI-интерфейсом;
- тип выходного сигнала датчика обратной связи – TTL/SSI;
- разрядность ЦАП современных сервоконтроллеров составляет – 16 бит;
- увеличение количества дискретных входов/выходов, что позволяет отказаться от дополнительной покупки специализированных модулей ввода/вывода;
- применение 64-битных RISC-процессоров с арифметикой поддерживающей плавающую запятую либо специализированных сигнальных микроконтроллеров предназначенных для использования в системах «Motion Control».



Рис. 4.2. Сервоконтроллер SERVO-300 фирмы ICP DAS

Кроме аппаратной составляющей сервоконтроллера следует также отметить особенности программного обеспечения. В общем случае базовое программное обеспечение сервоконтроллера содержит необходимый набор драйверов под наиболее распространенные операционные системы Windows NT/XP, Linux, QNX, DOS. После установки драйве-

ров для конфигурирования параметров сервоконтроллера пользователь может использовать фирменное программное обеспечение либо, используя описание набора функций, создать прикладные программы для конфигурирования сервоконтроллера, и интегрировать его в систему управления технологического процесса. Так, например доступ к сервоконтроллеру в среде Windows NT/XP осуществляется с помощью специализированных DLL библиотек.

Так, например одной из распространенных систем со специальным программным обеспечением является система WinPCNC. Данная система базируется на специализированном контроллере перемещений SERVO-300 и модуле дискретного ввода/вывода.

Таблица 4.1

Модель	Интерполяция	Кол-во осей	Интерфейс связи с ПК	ЦАП	Тип сигнала ОС ДП	Дискретные входы/выходы	CPU	Стоимость
ADVANTECH, PCI-1241	Линейная, круговая	4	PCI	16 bit	TTL	13 / 5	---	1440 \$
ADDI-DATA, APCI-8001	Линейная, круговая, сплайн, CAD-интерполяция	3	PCI	16 bit	TTL/SSI	16 / 8	64-bit RISC processor 150 MHz, Floating point	2166 EUR
PMC (Precision MicroControl), MultiFlex PCI 1440	Линейная, круговая, сплайн-интерполяция	4, 8	PCI	16 bit	TTL	16 / 16 (+8 АЦП 14bit)	64-bit RISC processor, Floating point	---
ICP DAS, SERVO300	Линейная, круговая	3	ISA	12 bit	TTL	8 / 10	---	430 \$
ICP DAS, PCI-8134	Линейная, круговая, спиральная	4	PCI	---	TTL	24 / 6	---	740 \$
PARKER ACR1505	Линейная, круговая, синусоидальная, кубические сплайны, NURBS, 3D дуги окружности, параболическая	4	PCI	16 bit	TTL/SSI	16 / 16	32-bit floating point DSP, Texas TMS320VC33	1500 \$
Nova Electronics POSYS 1900	Линейная, круговая	4	PCI	16 bit	TTL/SSI	8 / 4	MCX314As	---
Elesy PCI-SERVO-4	Линейная, круговая	4	PCI	12 bit	TTL	8 / 12	TMS 320F2812	---

4.2. Программные средства систем управления многокоординатными ЭП

Обзор вариантов архитектурных решений систем числового программного управления (СЧПУ) показал, что в настоящее время наиболее актуальными являются варианты систем, в основе которых лежит концепция PCNC. Тенденции последних лет отражают тот факт, что в борьбе за рынок разработчики все больше отдают предпочтение однокомпьютерному варианту - PCNC-4. Это, прежде всего, обусловлено следующими факторами: гибкостью в адаптации системы управления к конкретному технологическому процессу, возможностью конечному пользователю программно реализовывать свои алгоритмы управления, отсутствием значительных капиталовложений. Кроме этого, стоимость оборудования, необходимого для реализации однокомпьютерного варианта, значительно ниже стоимости вариантов, реализованных на базе двух вычислительных устройств.

Отличительной особенностью данного архитектурного решения PCNC-4 является программная реализация приложений пользователя, ядра ЧПУ, интерпретатора и интерполятора. Как правило, программно реализованные алгоритмы управления многокоординатными электроприводами функционируют под управлением операционных систем реального времени.

Под операционной системой понимается комплекс программ, обеспечивающих управление ресурсами программно-аппаратного комплекса (вычислительной системы) и процессами, использующими эти ресурсы при вычислениях.

По одному определению (Дональд Гиллиес) системой реального времени является такая система, функционирование которой определяется не только корректностью выполнения вычислений, но и временем получения требуемого результата. Другое определение системы реального времени – аппаратно-программный комплекс, который должен своевременно и предсказуемо реагировать на поступающие извне раздражители. К таким операционным системам относятся VxWorks, OS-9, PSOS, QNX, LynxOS. Эти системы обладают быстрым временем реакции на события и прерывания, компактностью кода, хорошей встраиваемостью и другими преимуществами, характерными для операционных систем с микроядерной архитектурой. Общими требованиями для всех операционных систем реального времени являются следующие:

- ✓ максимальное время отклика на событие;
- ✓ предсказуемость;
- ✓ возможность безотказной работы в течение длительного времени;
- ✓ наличие системы приоритетов;
- ✓ возможность параллельного выполнения нескольких задач.

Из вышеперечисленных требований следует, что системы реального времени должны предсказуемо, в пределах максимально допустимого времени, реагировать на различные типы внутренних и внешних событий. Исходные требования к времени реакции системы и другим временным параметрам формируются техническим заданием на систему либо логикой ее функционирования.

ния. Исследования различных операционных систем показывают, что для достижения реакции системы в пределах 100мкс используются вышеописанные операционные системы реального времени. В интервале от 100мкс до 1мс могут быть использованы многозадачные операционные системы с расширениями реального времени UNIX, Linux, Windows NT, CE. В диапазоне до 1мс могут быть использованы классические многозадачные операционные системы, такие как Windows NT/XP, Linux. Достижения максимальной производительности в этом случае зависит от сложности вычислений, производимых в функционирующем программном обеспечении. Однако получить в этом случае гарантированное время реакции невозможно. Поэтому использование таких операционных систем без какой-либо дополнительной доработки ограничивается областями, где опоздание реакции системы не приведет к тяжелым последствиям или эта система используется для моделирования и отработки тех или иных алгоритмов управления технологическим оборудованием.

Опыт применения Windows NT в различных областях автоматизации показывает, что в большинстве случаев операционная система без каких либо изменений используется в системах «мягкого реального времени». В большинстве случаев это интеллектуальные терминалы, верхний уровень SCADA-систем. В общей массе производимых устройств с числовым программным управлением операционные системы с интегрированным ядром реального времени (RTX, Falcon, Hyperkernel, IA-SPOX и др.) на сегодняшний день используются редко. Прежде всего, это обусловлено отсутствием аппаратной поддержки большинства современных контроллеров, а также невозможностью построения компактной системы (требования к flash-памяти не менее 10Мбайт). Под функционированием в режиме «мягкого реального времени» понимается работа операционной системы, иногда допускающей получение данных с некоторым опозданием.

Обзор ОС применяемых в системах с архитектурой типа PCNC приведен в табл. 4.2. Анализ систем с открытой архитектурой типа PCNC показал, что наиболее часто в качестве операционной системы используется система Microsoft Windows NT с интегрированным ядром реального времени типа RTX (фирма VentureCom). Интегрированные ядра являются сторонними разработками. Многие фирмы, разрабатывающие системы типа PCNC, используют их без дополнительной доработки. Наряду с готовыми решениями также существуют и собственные разработки, например, ядро NCT (Numerical Control Kernel) фирмы Siemens. Помимо операционной системы Windows NT используются специализированные системы, применяемые во встраиваемых системах – Windows CE, RTDOS (Fanuc, Siemens). Их основными достоинствами являются малые требования к памяти и дисковому пространству промышленных ПК, меньшее время реакции системы на внешние события. В отечественных разработках наибольшее применение находят системы PCNC на базе ОС Windows с RTX, а также ставшей уже классической MS DOS.

Таблица 4.2

Производитель	Система PCNC	Интерполяция	Операционная система
СТАНКИН (г.Москва)	WinPCNC	Линейная, круговая	Windows NT+RTX4.1
Siemens (Германия)	802D	Линейная, круговая	RealTime DOS
	840D	Линейная, круговая, кубический сплайн, B-сплайн	Windows NT+NCK / RTUNIX
	840Di	Линейная, круговая, полиномиальная	Windows XP+NCK
НПП «Модель» (г. Нижний Новгород)	NC-2000	Линейная, круговая	Windows NT
	NC-3.5	Линейная, круговая	RTOS
Балт-Систем (г. Санкт-Петербург)	NC 110	Линейная, круговая	MS DOS
	NC 200	Линейная, круговая	MS DOS
	NC 210	Линейная, круговая	MS DOS
Fanuc (Япония)	Series 300is	Информация не известна	Windows CE 4.2
	Series 300i	Информация не известна	Windows XP
	Series 160i	Информация не известна	Windows 2000
МОДМАШ (г. Нижний Новгород)	FMS-3000	Линейная, круговая	MS DOS
	FMS-3100	Линейная, круговая	MS DOS
CandCNC (США)	MP-1000-THC	Линейная, круговая	Windows 2000
МШАК (Армения)	MSH-TURBO-M/U	Линейная, круговая, сплайнами	Windows NT+RTX
	MSH-PC104	Линейная, круговая, сплайнами	Windows NT+RTX

С точки зрения использования алгоритмов интерполяции в отечественных разработках наблюдается значительное отставание от зарубежных аналогов. Большинство отечественных разработок до сих пор комплектуется только линейной и круговой интерполяцией, в то время как разработки фирм Heidenhain, Siemens и др. опционально оснащены многокоординатной кубической сплайн-

интерполяцией и средствами цифровой коррекции, позволяющими минимизировать динамическую ошибку следящей системы. В тех случаях, когда отечественные разработчики применяют сплайн-интерполяцию, используются уже готовые решения зарубежных производителей в виде модулей управления сервоприводами, устанавливаемых в PCI/ISA-слота промышленного или персонального компьютера.

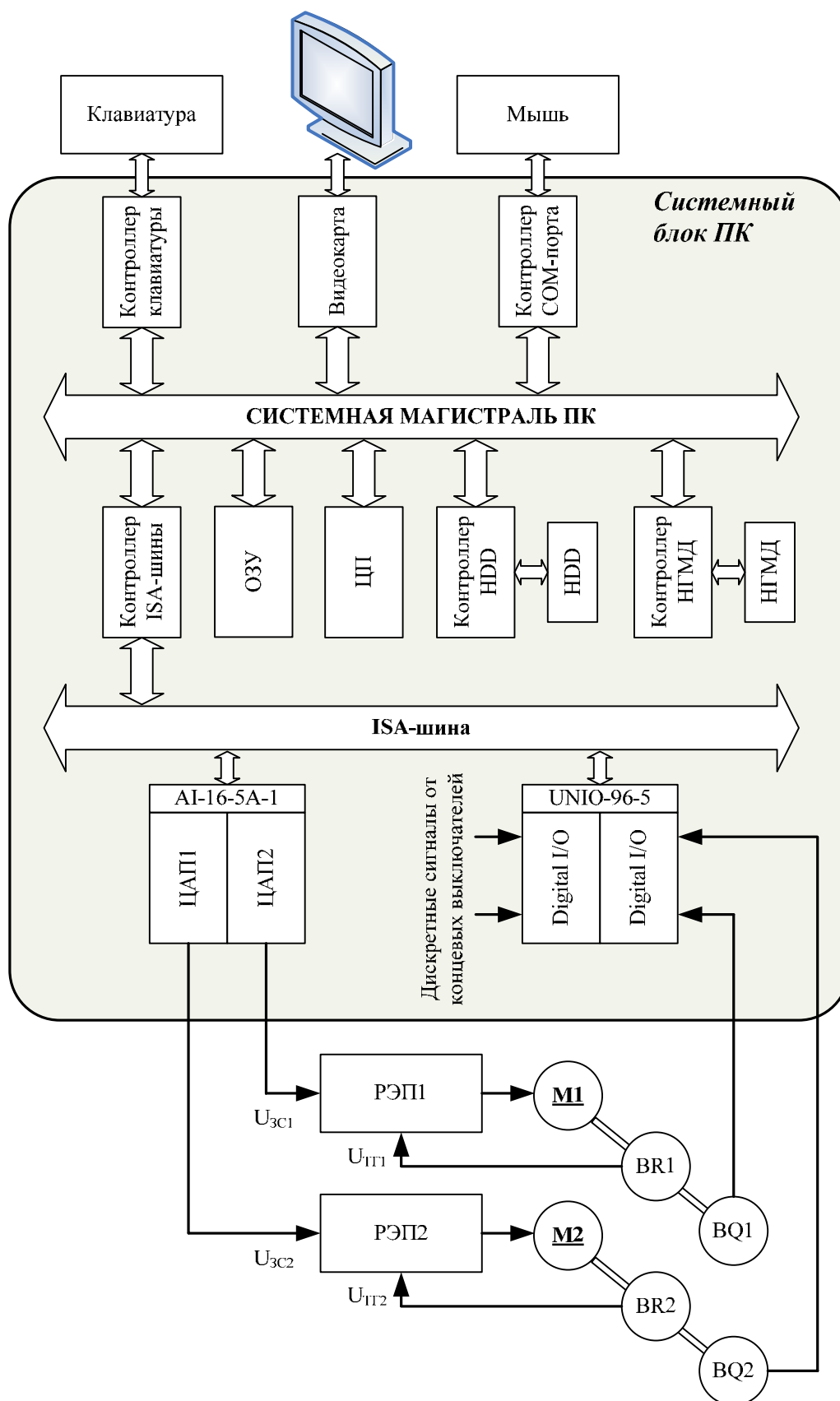
С учетом описанных выше особенностей операционных систем и архитектурных решений систем управления на базе PCNC можно сформулировать основные требования к программному обеспечению:

- ✓ надежность и предсказуемость (отсутствие нештатных ситуаций связанных с повисанием компьютеров);
- ✓ функционирование в режиме реального времени «Real-Time»;
- ✓ компактность;
- ✓ возможность гибкого изменения алгоритмов функционирования в соответствии с требованиями заказчика;
- ✓ поддержка различных интерфейсов связи с технологическим оборудованием.

Одним из наиболее существенных достоинств систем класса PCNC на сегодняшний день является открытость не только архитектуры, но и программного обеспечения. Практическое большинство программных пакетов, поставляемых вместе с такими системами, обычно позволяют производить перенастройку алгоритмов функционирования электроавтоматики и интерфейса оператора. Однако программное обеспечение и алгоритмы функционирования, отвечающие за управления движением, как правило, не раскрываются. Такое обстоятельство, в первую очередь, определено большой конкуренцией между разработчиками систем с числовым программным управлением следящими электромеханическими объектами.

4.3. Вариант системы с программным сервоконтроллером в среде Delphi 7

В качестве примера реализации системы управления следящим электроприводом с программным сервоконтроллером рассмотрим вариант построения системы на базе персонального компьютера с установленными модулями цифрового и аналогового ввода/вывода предназначенной для управления экспериментальной установкой. Экспериментальная установка представляет собой двухкоординатный цифроаналоговый следящий электропривод (рис. 4.3, рис. 4.4), основными элементами которого являются:



1.
Рис. 4.3. Функциональная схема экспериментальной установки: ЦП – центральный процессор; HDD – жесткий диск; РЭП1, РЭП2 – регулируемые электроприводы; М1, М2 – электродвигатели; BR1, BR2 – тахогенераторы; BQ1, BQ2 – дискретные датчики положения; U_{3C1} , U_{3C2} – управляющие сигналы на РЭП; U_{1T1} , U_{1T2} – сигналы обратной связи с тахогенераторов

1. регулируемый электропривод «КЕМЕК», предназначенный для реверсивных быстродействующих широкорегулируемых приводов с однозонным регулированием скорости механизмов подач станков, промышленных роботов и других механизмов. Электропривод выполнен по двухконтурной структуре подчиненного регулирования с реверсивным шестиимпульсным тиристорным преобразователем с раздельным управлением группами клапанов типа 2РЕВ16. Диапазон регулирования скорости не менее 2000;
2. устройство числового программного управления, реализованное на базе персонального компьютера и двух модулей (в формате MicroPC) ввода-вывода дискретной (UNIO-96-5) и аналоговой информации (AI-16-5A-1) фирмы Fastwel;
3. дискретные датчики углового перемещения (ЛИР-128А) фирмы СКБ ИС (г. Санкт-Петербург) с разрешающей способностью 2500 импульсов на оборот. С учетом коэффициента передачи механизма, перемещению по каждой оси на 1 мкм соответствует 5 импульсов датчика положения;
4. механическая часть системы представлена двухкоординатной платформой. Коэффициент передачи редуктора по осям X, Y равен $i_p = 12$.

Реализованная таким образом система с числовым программным управлением относится к классу PCNC-4, поскольку интерфейс оператора, ядро ЧПУ, контроллер электроавтоматики реализованы программно на одном персональном компьютере.



Рис. 4.4. Рабочее место оператора с интегрированной программно-аппаратной системой с ЧПУ

Особенностью системы управления является программная реализация терминальной задачи (интерфейс оператора), интерполятора, цифрового контура положения двух координат и блока обработки электроавтоматики на базе одного вычислительного устройства.

Выбор программируемого модуля UNIO96-5 (рис. 4.6) определен необходимостью обработки дискретных сигналов от концевых выключателей и двух датчиков положения. Кроме этого применение этого модуля для обработки датчиков положения позволяет снизить нагрузку на центральный процессор персонального компьютера, так как благодаря технологии перепрограммируемых матриц (FPGA) отсутствует необходимость постоянно подсчитывать импульсы, поступающие в систему и определять направление вращения вала двигателя. Изменение варианта загружаемой схемы в перепрограммируемую матрицу, а следовательно, и способа обработки сигналов осуществляется перепрограммированием EEPROM непосредственно в рабочей системе. Данный вариант загрузки матриц стал возможным благодаря использованию технологии ISP (In System Programmable).

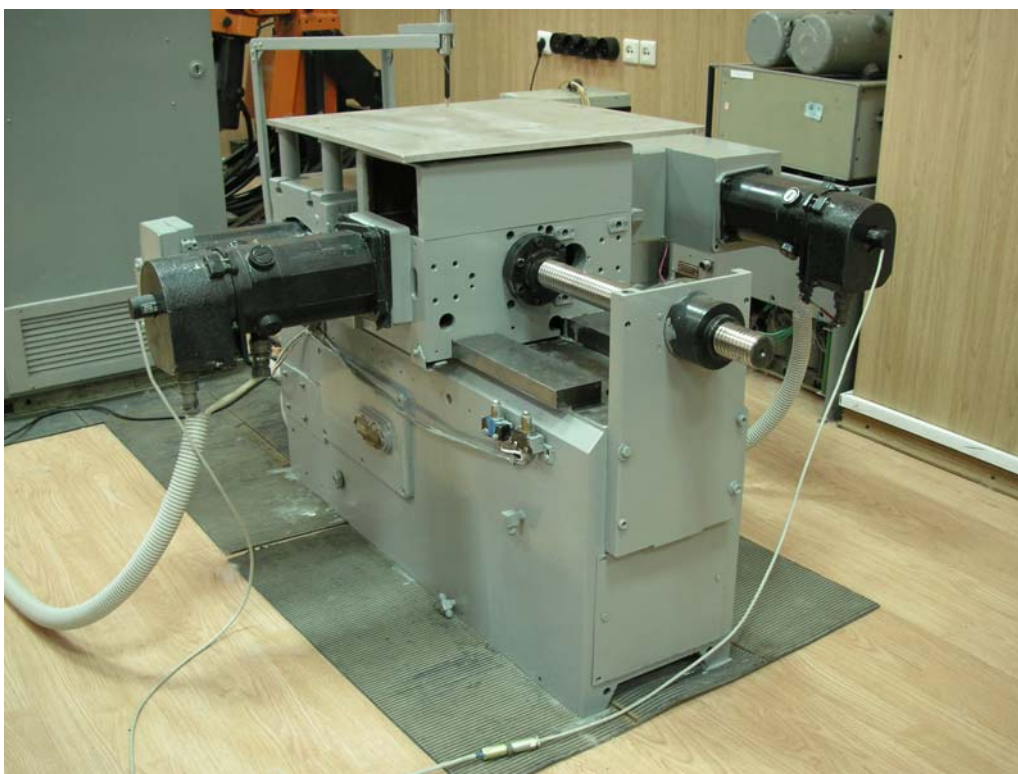


Рис. 4.5. Изображение экспериментальной установки

Микросхемы FPGA обладают повышенной нагрузочной способностью, что позволяет подключать к UNIO96-5 светодиодные индикаторы и любые опто-модули Grayhill, Opto-22. Модули серии UNIOxx-5 имеют 5 разделяемых линий прерываний (возможно использование одной линии несколькими моду-

лями), разделяемый канал прямого доступа к памяти (DMA), формирователь сигнала IOCHRDY и светодиод обращения к плате.

Основные области применения модуля:

- управление опто-модулями Grayhill, Opto-22;
- прием и выдача дискретных сигналов;
- измерение частоты (длительности), фаз сигналов;
- счетно-таймерные операции;
- выдача частотных и ШИМ-сигналов;
- формирование временных диаграмм без использования ресурсов системы;
- преобразование кодов;
- ускорение логических или арифметических операций.



Рис. 4.6. Внешний вид модуля дискретного ввода-вывода UNIO96-5

Задачу обработки информации поступающей от датчиков положения выполняет стандартная прошивка «X32» представляющая собой два 32-разрядных счетчика импульсов энкодера. Функциональная схема (рис. 4.7) прошивки «X32» состоит из функциональных блоков:

- интерфейс шины ISA (CB);
- выходной регистр (RG);
- 32-разрядные счетчики импульсов (CT0, CT1);
- формирование прерываний при переполнении счетчиков CT0, CT1;
- входной буфер (BUF)

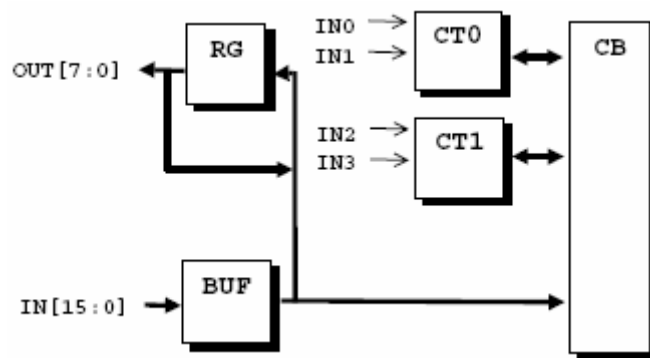


Рис. 4.7. Блок-схема прошивки X32

Управление и конфигурация осуществляется с помощью соответствующих контрольных регистров доступных по чтению и записи. Режим записи необходим для обнуления содержания 32- разрядных счетчиков импульсов.

Модуль аналогового ввода-вывода AI16-5A-1 (рис. 4.8) выполнен в стандарте MicroPC и предназначен для преобразования 16-ти аналоговых сигналов напряжения или 8-ми сигналов тока в 14-ти разрядный цифровой код. В данном случае периферийный модуль AI-16-5A-1 предназначен для аналого-цифрового преобразования сигналов, а также для формирования аналоговых сигналов задания на регулируемые электропривода.

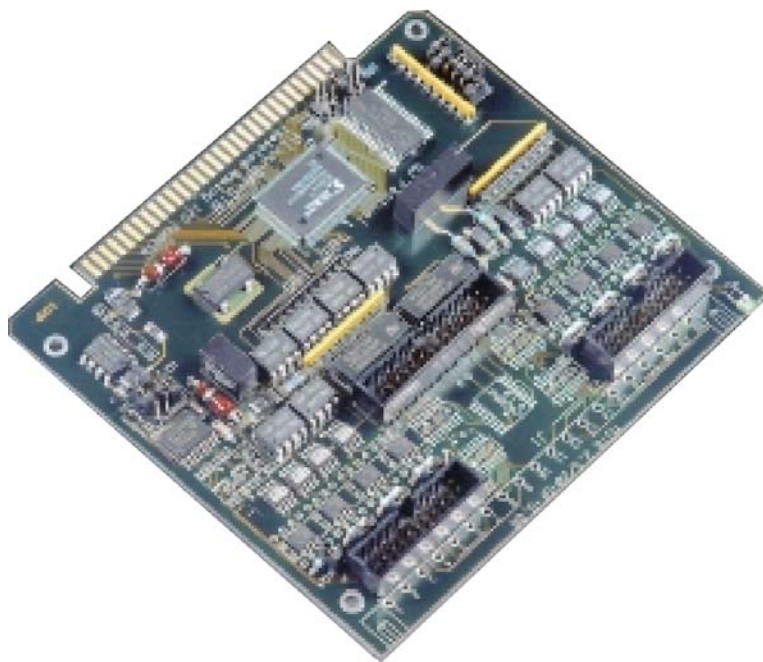


Рис. 4.8. Внешний вид платы аналогового ввода-вывода

Все входы-выходы платы гальванически изолированы от системы (групповая изоляция), а аналоговые входы имеют защиту от перенапряжения. Наиболее полно структуру модуля поясняет блок-схема, приведенная на рис. 4.9.

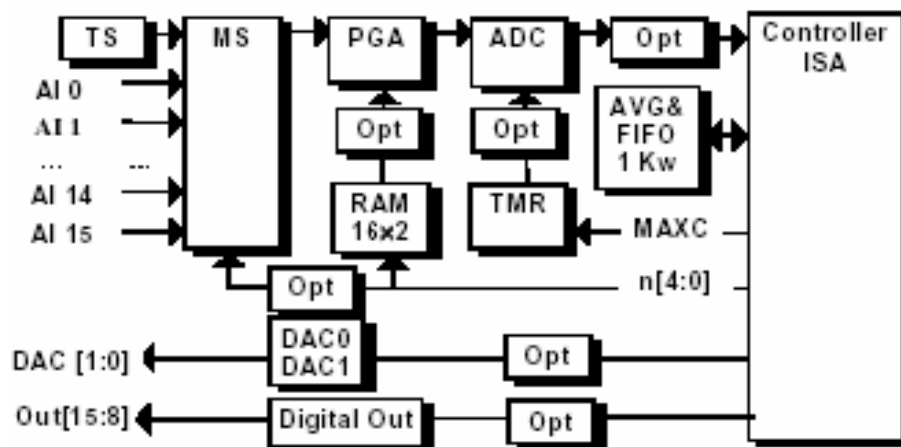


Рис. 4.9. Блок-схема модуля AI16-5A-1

На рис. 4.9 приняты следующие обозначения:

- Controller ISA – контролер шины ISA;
- MS – мультиплексор входных сигналов;
- PGA – программируемый усилитель;
- RAM 16x2 – ОЗУ коэффициентов усиления для всех входов;
- AVG / FIFO – Блок усреднения и FIFO выборок;
- ADC – аналого-цифровой преобразователь;
- DAC0, DAC1 – цифро-аналоговые преобразователи;
- Opt – блоки оптической развязки;
- TMR – таймер;
- TS – источник тестовых сигналов;
- Digital Out – порт цифровых выходов.

Аналоговые входы:

- 16 однопроводных или 8 дифференциальных входов (программируемый тип подключения входов);
- 14-разрядный АЦП (AD7894-10);
- программируемый коэффициент усиления по любому входу (хранится в регистре): 1, 2, 4, 8;
- диапазоны входных напряжений/ токов (с учетом усиления):
- $\pm 10\text{В}$; $\pm 5\text{В}$; $\pm 2.5\text{В}$; $\pm 1.25\text{В}$;
- $\pm 80\text{мА}$; $\pm 40\text{мА}$; $\pm 20\text{мА}$; $\pm 10\text{мА}$.
- защита от перенапряжения: $-35/+50\text{В}$;
- пропускная способность (по DMA или при работе с FIFO): 100000 выборок в сек. (для диапазонов 1); 40000 / 33000 / 7500 / 800 выборок в сек. (для диапазона 2);
- входное сопротивление: $>10\text{ МОм}$ (напряжение); 125 Ом (ток);
- аппаратное усреднение 2,4, 8,16 выборок;
- случайная погрешность измерения без усреднения: $\pm 2\text{МЗР}$;

- случайная погрешность измерения с усреднением: $\pm 0.5\text{МЗР}$;
- FIFO (CY7C429): 1Кслов (программируемая верхняя граница);
- авто-сканирование входов;
- 2 однопроводных выхода (AD7249 + AD6941), 12-разрядная точность;
- Диапазон (установка переключками): 0-5В; $\pm 5\text{В}$; 0-10В; 0-20мА; 4-20мА;

Дополнительно:

- таймер: 16-бит ($1\mu\text{с}$ или $10\mu\text{с}$);
- цифровые выходы: 8 (время установки $1.6\mu\text{с}$);
- разделяемые линии прерываний (5) и каналы DMA (2);
- напряжение изоляции: 1000В (все входы-выходы от системы).

Режимы работы:

- старт АЦП: программный; аппаратный (от таймера);
- считывание из АЦП: опрос (ADC ready, FIFO/SRAM full);
- по прерыванию (ADC ready, FIFO/SRAM full); по каналу DMA (ADC ready).

В системе управления следящими электроприводами данный модуль ввода/вывода предназначен для управления двумя регулируемыми электроприводами «КЕМЕК» с помощью установленных на нем цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Основные параметры ЦАП приведены в табл. 4.3. Работа с ЦАП осуществляется с помощью регистров управления выделенных в адресном пространстве шины ISA, которые жестко установлены относительно базового адреса модуля. Рабочий диапазон значений ЦАП лежит в пределах от 0 до 4096. Значению 0 соответствует величина выходного напряжения равная -5В. Значению 4096 соответствует величина выходного напряжения равная +5В. Характеристики ЦАП поясняет рис. 4.10, из которого следует, что для выдачи сигнала управления на РЭП необходимо учесть смещение на величину 2048.

Таблица 4.3

Параметры экспериментальной установки

Параметр	Значение
Разрядность ЦАП	$N = 12$
Коэффициент передачи ЦАП	$K_{DAC} = 409,6\text{В/диск}$
Коэффициент передачи датчика положения	$K_C = 0,2\text{мкм/диск}$
Коэффициент усиления регулятора положения	$K_{PI} = 0,029\text{В/мкм}$
Коэффициент передачи механизма	$79,57\text{мкм/рад}$
Шаг винта	$t_B = 6\text{мм}$
Передаточное число редуктора	$i_P = 12$

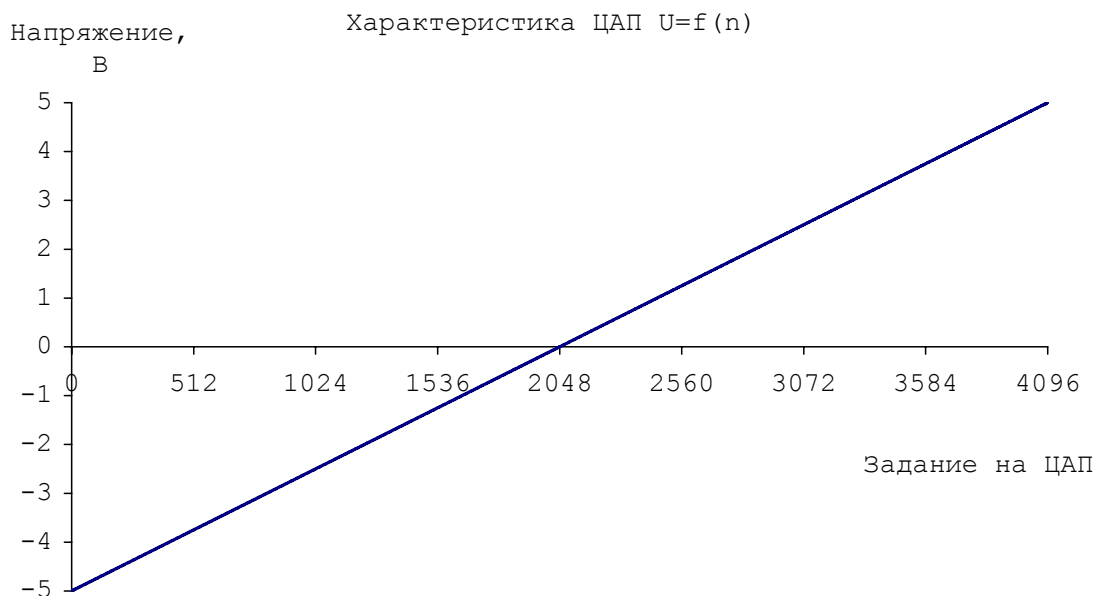


Рис. 4.10. Характеристика ЦАП

Особенности разработки программного обеспечения (ПО) для управления следящими электроприводами во многом зависят от задач, возлагаемых на СЭП, аппаратной реализации системы управления, а также от используемой операционной системы.

Как известно, кроме систем управления многокоординатными следящими электроприводами, реализованными по принципу CNC, большое распространение получают системы, построенные по принципу PCNC. Наиболее развитыми архитектурными вариантами таких систем являются варианты, основанные на двухпроцессорной архитектуре, где вычислительное устройство на верхнем уровне (персональный компьютер) является терминалом, а вычислительное устройство на нижнем уровне является специализированным контроллером (отдельная плата, вставляемая в ПК) либо промышленный компьютер, работающий под управлением операционной системы (ОС) реального времени.

Помимо двухпроцессорного варианта в последнее время все большее распространение получает архитектурный вариант, реализованный на базе одного персонального компьютера. Отличительная особенность такого архитектурного решения заключается в том, что все задачи управления (геометрическая, логическая, терминальная) решаются программным путем без какой-либо дополнительной аппаратной поддержки. В качестве операционной системы используется ОС Windows NT с интегрированным программным ядром реального времени. Среда Windows NT представляет возможности для реализации интерфейса оператора, контроллера электроавтоматики. Ядро реального времени синхронизирует работу задач управления следящими электроприводами, электроавтоматикой, обеспечивает работу интерполятора в реальном времени. Наиболее продвинутые представители таких систем (Power Automation, Германия) позволяют

реализовывать управление 8 следящими электроприводами. Количество управляемых электроприводов ограничивается лишь вычислительными ресурсами ПК и количеством линий ввода-вывода в используемых модулях связи с цифровыми приводами.

Особенности разработки программного обеспечения во многом предопределяет аппаратная реализация системы управления. В данном случае система управления экспериментальной установкой реализована на базе персонального компьютера, модулей аналогового (AI-16-5A-1) и дискретного ввода-вывода (UNIO-96-5) фирмы Fastwel. В качестве операционной системы используется Windows NT. Применение модуля AI-16-5A-1 обусловлено наличием быстродействующего двухканального ЦАП необходимого для управления двумя регулируемыми электроприводами. Модуль UNIO-96-5 используется для обработки сигналов электроавтоматики и двух дискретных датчиков положения (ЛИР-128А) фирмы СКБ ИС. Применение модуля UNIO-96-5 определяет особенности обработки информации, поступающей от датчиков положения. Это отсутствие необходимости в отслеживании направления движения и суммирования импульсов для определения текущего положения. Модуль вне зависимости от работы центрального процессора ПК производит все необходимые расчеты и выдает в два 16-разрядных регистра информацию о положении в виде (определенного движением вала двигателя) количества обработанных импульсов.

Разработчику программного обеспечения достаточно лишь использовать полученную информацию либо обнулить содержимое соответствующих регистров. Такая реализация значительно упрощает алгоритмы работы программного обеспечения и снижает нагрузку на процессор ПК.

Ввиду описанных выше особенностей аппаратной реализации системы управления и синтезированных алгоритмов в главе 3 предлагается разрабатывать программное обеспечение в среде Windows NT. Одной из важных задач разрабатываемого обеспечения под управлением Windows NT является своевременное формирование задания на РЭП.

Для обеспечения этого требования разработан алгоритм функционирования главного цикла программы (рис. 4.11). В первую очередь (блок 1), необходимо повысить приоритет запущенной программы до уровня «Real-Time». Выполнение данной процедуры средствами Delphi показано в табл. 4.4. Оператор в первой строке позволяет получить доступ к запущенному программой процессу. Оператор во второй строке, в свою очередь, устанавливает указанному процессу приоритет реального времени. Однако нужно помнить, что установка приоритета реального времени в среде Windows NT не гарантирует своевременного расчета сигнала задания. Поэтому предлагается программно перерас-

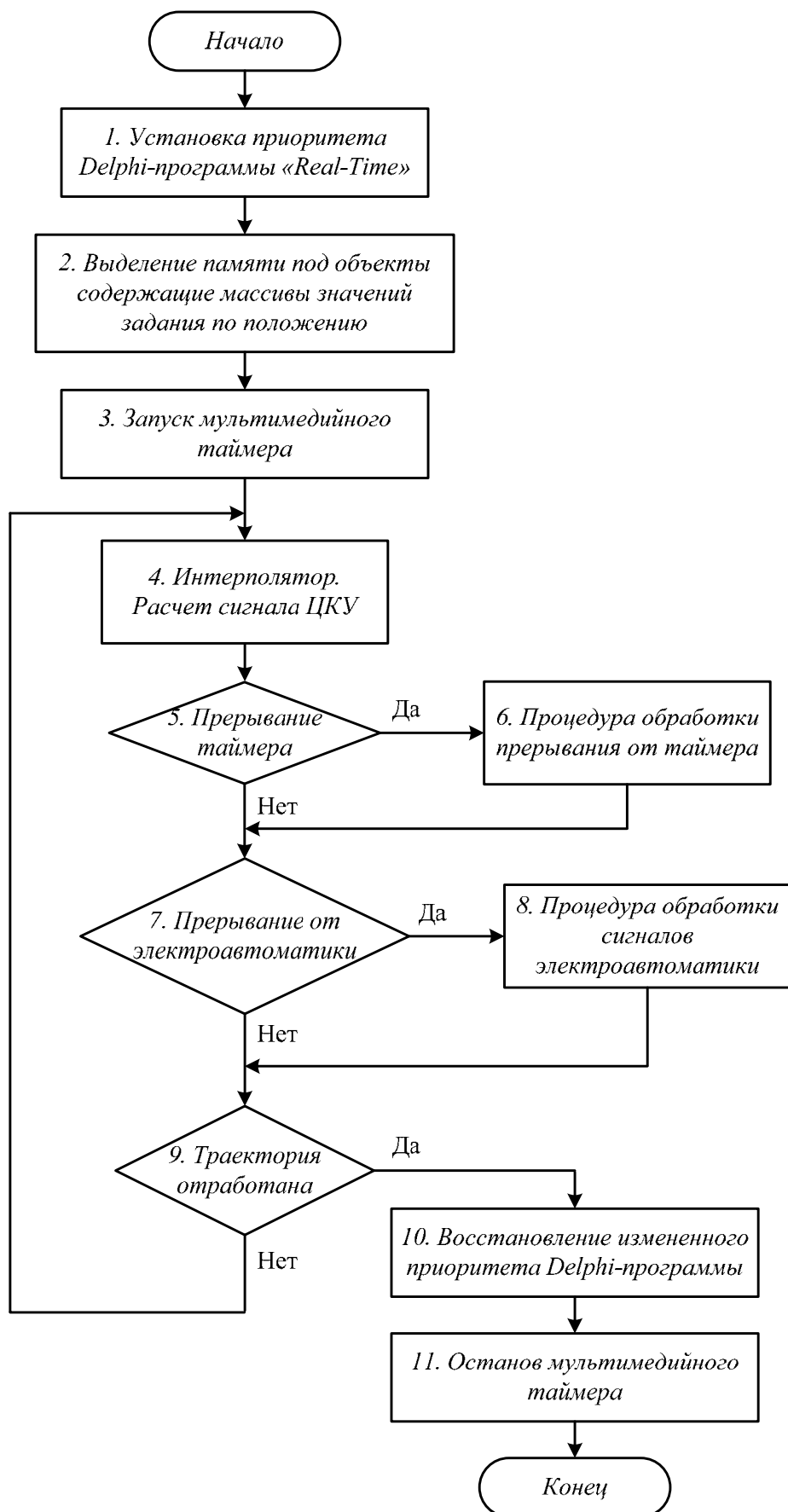


Рис. 4.11. Алгоритм функционирования главного цикла программы

пределить вычислительные ресурсы между процессом расчета интерполятора, значения сигнала ЦКУ и процессом расчета и выдачи уровня сигнала задания на РЭП.

Таблица 4.4

```
hProcess:=GetCurrentProcess;  
SetPriorityClass(hProcess, REALTIME_PRIORITY_CLASS);  
MMTimer1:=timeSetEvent(Delay,Res,@TimerCall,100,TIME_PERIODIC);  
timeKillEvent(MMTimer1);
```

Расчет интерполятора (блок 4) предлагается поместить в тело основного цикла, а результаты его расчетов помещать в поля объекта, которому предварительно (блок 2) была выделена область памяти. Под объектом в Delphi понимаются специальные типы, которые содержат поля, методы и свойства. Методы и свойства – это набор приемов и параметров, с помощью которых программист может осуществлять работу с объектами. Работа основного цикла может быть остановлена прерываниями от таймера (блок 6) для формирования сигналов задания на РЭП либо прерываниями, поступившими от сигналов электроавтоматики (блок 8). В задачи блока 6 входят: опрос датчиков положения, выполнение алгоритма расчета регуляторов положения и выдача сигналов на ЦАП по соответствующим координатам. Программное взаимодействие процессов расчета интерполятора и формирования сигналов задания на РЭП показано на рис. 4.12. Предложенная организация взаимодействия циклов расчета и формирования задания позволяет уменьшить вероятность несвоевременного расчета значений интерполятора ввиду загруженности процессора ПК. Результаты расчета интерполятора поступают в свободные ячейки памяти объекта (массивы значений интерполяционного полинома для каждого такта). Размещение результатов расчета интерполятора выполняется циклически по мере освобождения ячеек памяти. Освобождение новых ячеек памяти происходит в темпе считывания информации из ячеек алгоритмом формирования задания на РЭП по такту таймера, реализованного в процедуре обработки его сигналов (рис. 4.11, блок 6). Таким образом, алгоритм формирования сигнала задания использует уже предварительно рассчитанные интерполятором данные. В случае заполнения всех ячеек выделенной памяти интерполятор не производит расчетов до тех пор, пока одна из ячеек не будет освобождена. Предложенная структура алгоритма (рис. 4.12) позволяет интерполятору производить расчеты с некоторым опережением, которое, в первую очередь, определяется производительностью процессора персонального компьютера. Помимо этого такая реализация делает возможным применение программного обеспечения на персональных компьютерах с малым объемом оперативной памяти.

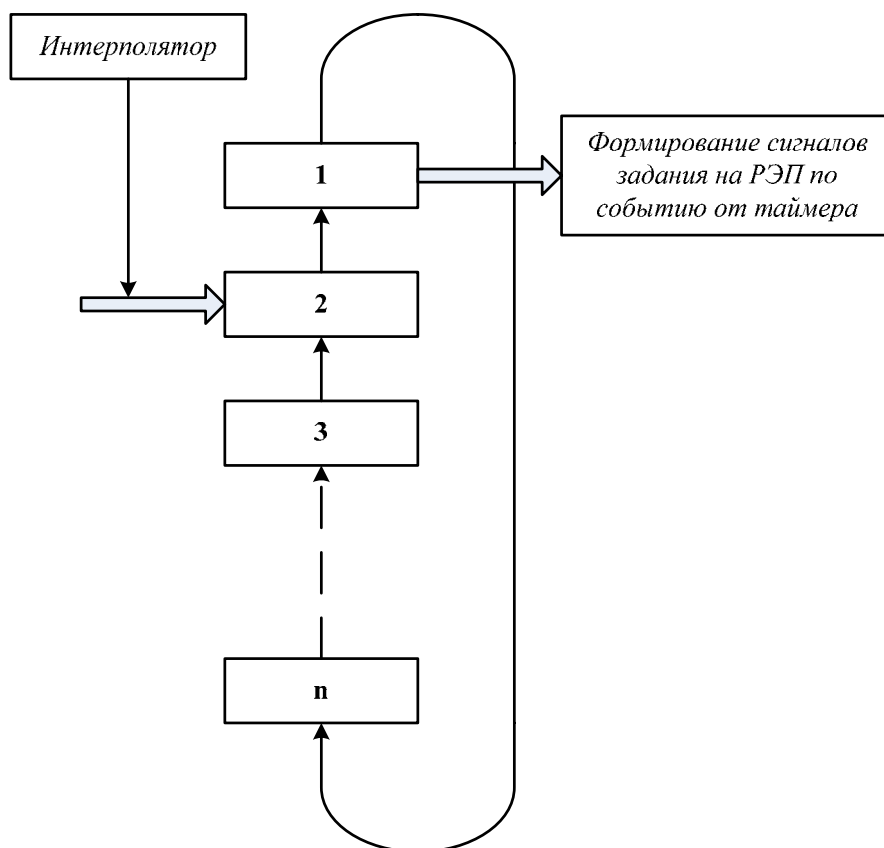


Рис. 4.12. Программное взаимодействие процессов расчета интерполятора и формирования сигналов задания на РЭП

В общем виде выражения, по которым производится расчет сигнала задания на РЭП для координат X, Y , имеют вид

$$\begin{cases} X = (X_i - X_{OC}) \cdot K_{ПИХ} + Z_X; \\ Y = (Y_i - Y_{OC}) \cdot K_{ПИУ} + Z_Y, \end{cases} \quad (4.1)$$

где X, Y – величина задания по положению с учетом сигнала ЦКУ; X_i, Y_i – задание по положению на i -м такте (сигнал с выхода интерполятора); $K_{ПИХ}, K_{ПИУ}$ – коэффициенты усиления регуляторов положения для координат X и Y соответственно; Z_X, Z_Y – суммарный сигнал цифровой коррекции:

$$\begin{cases} Z_X = \alpha_1^X \cdot (X_i - X_{i-1}) + \alpha_2^X \cdot (X_i - 2 \cdot X_{i-1} + X_{i-2}) + \alpha_3^X \cdot (X_i - 3 \cdot X_{i-1} + 3 \cdot X_{i-2} - X_{i-3}); \\ Z_Y = \alpha_1^Y \cdot (Y_i - Y_{i-1}) + \alpha_2^Y \cdot (Y_i - 2 \cdot Y_{i-1} + Y_{i-2}) + \alpha_3^Y \cdot (Y_i - 3 \cdot Y_{i-1} + 3 \cdot Y_{i-2} - Y_{i-3}), \end{cases} \quad (4.2)$$

где $\alpha_1^X, \alpha_2^X, \alpha_3^X$ – коэффициенты ЦКУ для координаты X ; $\alpha_1^Y, \alpha_2^Y, \alpha_3^Y$ – коэффициенты ЦКУ для координаты Y .

Другой особенностью программной реализации системы управления является непосредственное использование мультимедийного таймера и отказ от использования стандартного программного таймера (*TTimer*) Delphi. Такой подход предложен разработчиками фирмы Microsoft. Вызов функции инициализации мультимедийного таймера приведен на третьей строке табл. 4.4. Ос-

новными параметрами являются: «*Delay*» – период срабатывания таймера в мс, «*Res*» – разрешающая способность таймера в мс, «*TIME_PERIODIC*» – параметр, указывающий, что срабатывание таймера будут происходить периодически с периодом «*Delay*» до тех пор, пока таймер не будет остановлен. Остановка мультимедийного таймера не означает (строка 4 в табл. 4.4), что таймер ПК будет остановлен на аппаратном уровне. В данном случае разработанная программа не будет улавливать его прерывания.

Сравнительная оценка работы мультимедийного таймера со стандартным таймером Delphi при различных приоритетах программы показана в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Приоритет программы	Период таймера, мс	Интервал измерения, мс	Количество срабатываний таймера	
			Программный таймер	Мультимедийный таймер
«Normal»	100	1000	9	9
	50		15	19
	10		60	100
	5		61	199
	100	10000	92	100
	50		157	199
	10		628	1000
	5		632	2000
«Real-Time»	100	1000	9	10
	50		15	20
	10		62	99
	5		63	199
	100	10000	91	100
	50		160	200
	10		632	1000
	5		635	2000

Установлено, что уровень приоритета программы оказывает незначительное влияние на количество срабатываний программного таймера за отведенный промежуток времени. Причем с ростом интервала измерения это влияние увеличивается, что обуславливает накопление суммарной ошибки. С уменьшением периода программного таймера ошибка значительно увеличивается, что говорит о невозможности его применения для работы на частотах, близких к 100 Гц, и более. В свою очередь, влияние установленного уровня приоритета программы и изменения периода на точность мультимедийного таймера минимально. Максимальная ошибка периода квантования составила 1 импульс аппаратного

генератора импульсов. Это обстоятельство дает возможность применения мультимедийного таймера в системах управления, критичных к точности периода квантования по времени, т.е. в системах, работающих в режиме, близком к реальному времени. Также установлено, что программный таймер в значительной степени зависит от запуска пользователем других приложений. Тестирование проводилось под управлением операционной системы Microsoft Windows XP.

Интерфейс разработанного программного обеспечения показан на рис. 4.13. Основными элементами управления экспериментальной установки является ручной пульт управления (показан стрелками), кнопки запуска и остановки.

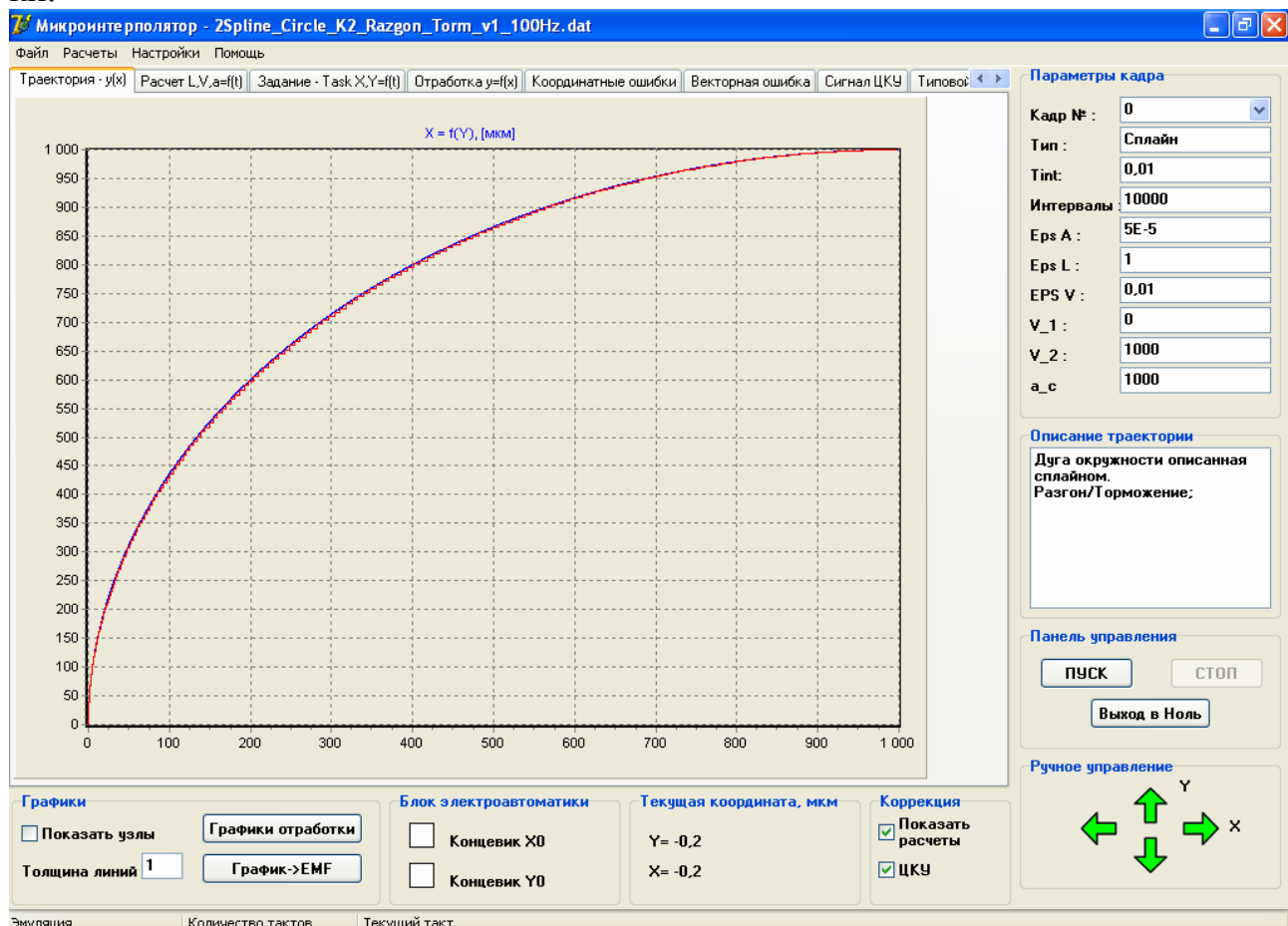


Рис. 4.13. Интерфейсное окно программы управления установкой

отработки заданной траектории движения. Кроме этого, пользователь может конфигурировать все программно изменяемые параметры, такие, как частота квантования по времени, коэффициент регулятора положения, коэффициенты ЦКУ, адреса модулей ввода-вывода. Программное ядро интерполятора поддерживает два вида интерполяции – линейную и кубическую сплайн-интерполяцию. Алгоритм работы линейной интерполяции построен по принципу цифрового дифференциального анализатора. При загрузке заданной траектории движения визуально отображаются основные заданные параметры – до-

пустимая контурная скорость и ускорение, точки начала и конца участка движения. До отработки траектории программа может проанализировать заданную траекторию и отобразить процесс движения по обеим осям во времени, построить изменение скорости и ускорения при движении на каждом участке

В случае задания траектории движения с помощью отрезка достаточно лишь ввести период квантования по времени, скорость в начале и конце отрезка, геометрические параметры траектории, допустимое ускорение при разгоне/торможении, и тип изменения ускорения во времени – ступенчатое либо в виде сложной функции. При задании сплайна помимо геометрических параметров траектории, периода квантования, скорости в начале и конце траектории, типа изменения ускорения и значения допустимого ускорения задаются число интервалов интерполяции сплайна, допустимые погрешности расчета контурного пути, скорости и ускорения. Задаваемые участки траектории движения отделяются символами «LINE» либо «SPLINE», соответственно, при задании участка движения по отрезку или сплайну. Формат задания траектории приведен в табл. 4.5.

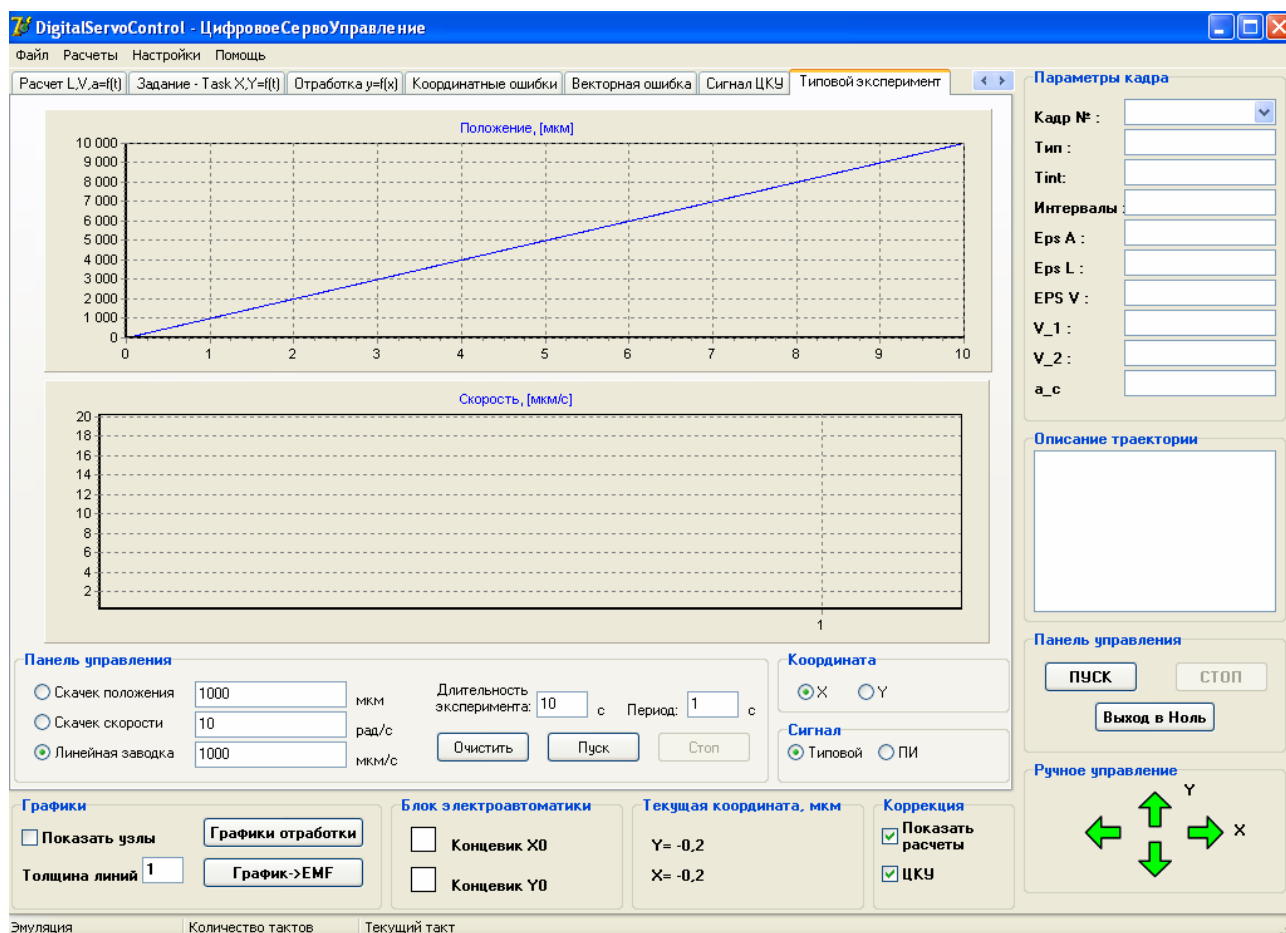


Рис. 4.14. Интерфейсное окно программы установкой в режиме типовых экспериментов

При запуске отработки траектории движения в реальном времени отображается текущее положение исполнительного механизма по каждой координате. Отображается состояние «нулевых» концевых выключателей. После окончания эксперимента все результаты (заданная и отработанная траектория движения, координатные ошибки, сигнал ЦКУ на всем участке движения) могут быть сохранены в текстовый файл. Помимо этого полученные массивы заданий по положению могут быть переданы в среду MatLab для сохранения их в соответствующем формате.

4.4. Вариант системы с аппаратным сервоконтроллером

Система управления следящими электроприводами базирующаяся на аппаратном сервоконтроллере выполняется с помощью специализированного модуля выполняющего функции подготовки и формирования управляющих и задающих воздействий на регулируемые электропривода. Исходными данными при формировании управляющих воздействий являются геометрия траектории движения, заданные контурные скорости и ускорения, параметры механической части системы по регулируемым осям.

В общем случае структура системы управления оснащенная сервоконтроллером представлена на рис. 4.15. Здесь мы видим, что сигналы задания и сигналы обратной связи от датчиков положения замыкаются только на сервоконтроллер. Персональный компьютер лишь формирует задающий кадр в дискретные моменты времени по мере отработки заданного участка траектории.

Возложенные частично функции контроллера электроавтоматики на сервоконтроллер обеспечивают контроль выхода из рабочей зоны, аварийный останов привода, а также формирование 8-ми дискретных сигналов управления. Эти сигналы могут быть использованы для различных целей, например управление контакторами в цепи сервопривода. Заложенная логика управления дискретными входами/выходами позволяет вводить инверсию состояний каждого канала индивидуально. Помимо этого присутствует возможность устанавливать на каждый канал дискретного выхода программируемое время антидребезга с целью устранения ложного срабатывания того или иного канала.

Рассмотрим функциональные возможности сервоконтроллера PCI-SERVO-4. Сервоконтроллер предназначен для управления 4-мя сервоприводами и устанавливается в системах класса PCNC. Ядро сервоконтроллера базируется на микроконтроллере TMS320F2812 фирмы Texas. Широкая функциональность микроконтроллера TMS320F2812 позволила реализовать на нем все основные функции необходимые для расчета и формирования управляющих воздействий, обмена информацией с системой верхнего уровня и обработки сигналов обратной связи.

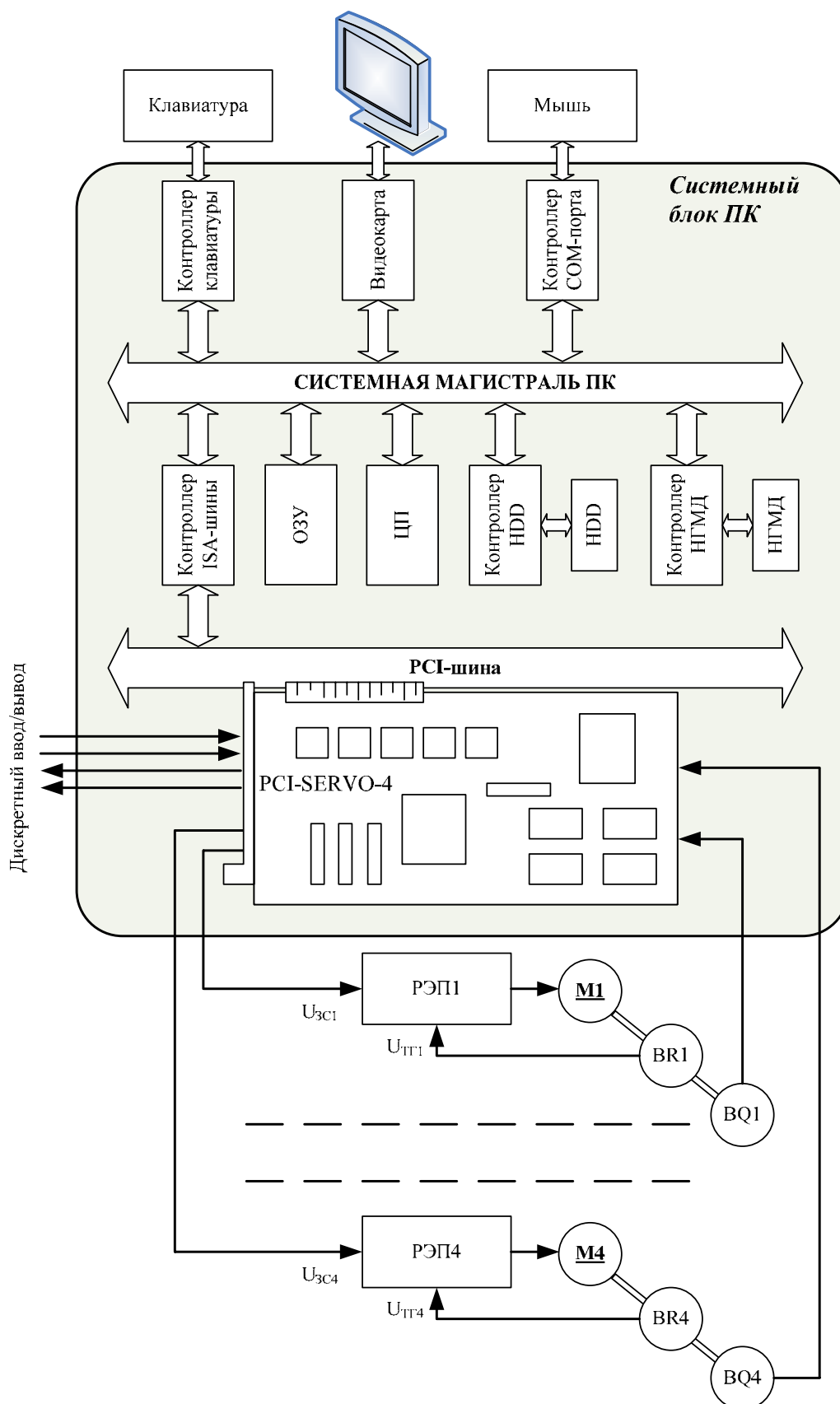


Рис. 4.15. Функциональная схема экспериментальной установки: ЦП – центральный процессор; HDD – жесткий диск; РЭП1, РЭП4 – регулируемые электроприводы; М1, М4 – электродвигатели; BR1, BR4 – тахогенераторы; BQ1, BQ4 – дискретные датчики положения; $U_{ЗС1}$, $U_{ЗС4}$ – управляющие сигналы на РЭП; $U_{ТГ1}$, $U_{ТГ4}$ – сигналы обратной связи с тахогенераторов



Рис. 4.16. Сервоконтроллер PCI-SERVO-4 фирмы ЭЛЕСИ

Обмен с системой верхнего уровня, в данном случае персональным компьютером осуществляется с помощью согласованной работы контроллера шины PLX PCI9052. Обмен между микроконтроллером TMS320F2812 и PLX PCI9052 реализован с помощью FIFO 0 (от PLX к TMS) и FIFO 1 (от TMS к PLX). Обмен информацией микроконтроллера TMS320F2812 с FIFO выполнен по параллельному интерфейсу XINTF. Этот же интерфейс используется при работе с каналами дискретного ввода/вывода и дополнительной область памяти RAM размером 256К. Программное обеспечение сервоконтроллера размещено во встроенную в микроконтроллер FLASH-память размером 128К.

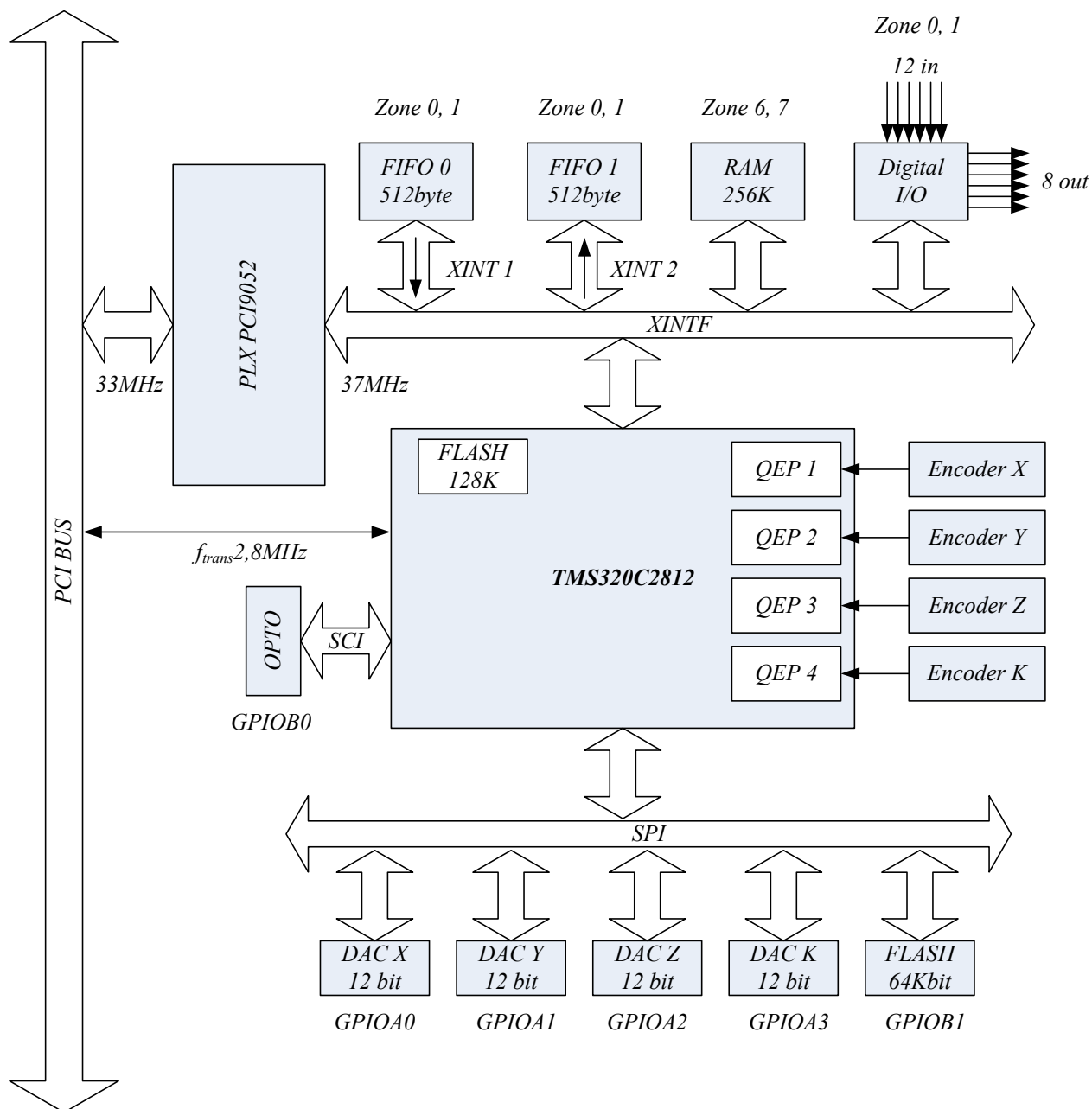


Рис. 4.17. Структура сервоконтроллера PCI-SERVO-4

Управление сервоприводами осуществляется с помощью 4-х 12 битных микросхем ЦАП. Обмен с микросхемами реализован по последовательному интерфейсу SPI. Кроме микросхем ЦАП по этому же интерфейсу установлена связь с дополнительной FLASH-памятью размером 64К. Помимо классического управления сервоприводами опционально устанавливается оптический канал обмена по интерфейсу SCI.

Таблица 4.6

Параметр	Описание
POSITION CONTOUR	Заголовок файла
Description= Линейная интерполяция;	Описание траектории
LINE	Признак начала задания отрезка
T_int=0,01	Период квантования по времени, с
V_1=0	Скорость в начальной точке движения по отрезку, мкм/с
V_2=5000	Скорость в конечной точке движения по отрезку, мкм/с
a_c=1000	Допустимое контурное ускорение
a_type=step	Функция изменения ускорения при разгоне (в нашем случае скачек ускорения)
0,0 0,0	Координата начальной точки отрезка
50000,0 50000,0	Координата конечной точки отрезка
END	Признак окончания файла

Обработка 4-х датчиков положения реализуется с помощью 2-х аппаратных каналов QEP встроенных в микроконтроллер TMS320F2812 и 2-х каналов QEP реализуемых на микросхемах ПЛИС выходные каналы, которых подключены к счетным входам таймеров общего назначения.

Основные программно-аппаратные характеристики сервоконтроллера приведены ниже.

Аппаратные характеристики

- ✓ ЦАП 12 бит $\pm 10\text{В}$;
- ✓ Количество осей: 4;
- ✓ Частота квантования 500Гц;
- ✓ Выходной оптический канал управления (опционное);
- ✓ Дискретные входы: 12 (5..36В);
- ✓ Дискретные выходы: 8 (5..36В);

Датчик положения

- ✓ Максимальная частота входного сигнала 2 МГц;
- ✓ Максимальная частота входного сигнала (по фронтам) 4МГц;
- ✓ Тип входного сигнала: 5В (TTL);

Интерполятор

- ✓ Линейная 1D, 2D, 3D;
- ✓ Круговая 2D, 2D согласованная с линейной интерполяцией (винтовая);
- ✓ Цифровая коррекция сигналов интерполятора;
- ✓ Диапазон заданий по положению: -2 147 483 648 .. +2 147 483 648 мкм;
- ✓ Диапазон заданий по скорости: -2 147 483 648 .. +2 147 483 648 мкм/с;
- ✓ Диапазон заданий по ускорению: -2 147 483 648 .. +2 147 483 648 мкм/с²;

- ✓ Максимальное количество тактов на текущем участке траектории: 4 294 967 296;

Диаграммы разгона/торможения

- ✓ Скачек скорости
- ✓ Трапециидальная

Режимы управления

- ✓ Контурное управление с обратной связью от датчиков положения;
- ✓ Контурное управление в разомкнутом режиме;
- ✓ Контурное управление регулируемым приводом/сервоприводом (контур положения в сервоприводе);
- ✓ Останов привода по одной или нескольким осям без прекращения работы интерполятора (Control);
- ✓ Прямое управление каналами ЦАП по осям X , Y , Z , K ;
- ✓ Прямое управление дискретными входами/выходами;
- ✓ Режим симуляции (для отладки управляющих программ и тестирования сервомодуля) – траектория с интерполятора на каждом такте поступает из сервомодуля в ПК;

Работа с кадрами

- ✓ Управляющие кадры поступают в статусную структуру. Первый кадр уходит на исполнение, остальные кадры сдвигаются и освобождают место для еще одного кадра. Таким образом, мы фактически можем задать на исполнение 2 кадра. Первый исполняется, два остальных ждут его исполнения. Снятие кадра из очереди со сдвигом последующего на место текущего.
- ✓ Скоординированное движение по осям при круговой интерполяции. Заданный кадр с круговой интерполяцией ожидает поступления следующего кадра с линейной интерполяцией по соответствующей оси. Движение начнется одновременно по заданным осям при поступлении обоих кадров. Опция предназначена для выполнения винтовой интерполяции в пространстве.

Работа с концевыми выключателями и дискретными входами/выходами

- ✓ При наезде на концевой выключатель сервоконтроллер снимает задание с ЦАП данной оси и передает сообщение об аварийной ситуации на ПК. Дальнейшие действия зависят от команд оператора и ПО на верхнем уровне.
- ✓ Индивидуальное программирование времени антидребезга каналов дискретного ввода;
- ✓ Программирование инверсии индивидуально на каждый канал ввода/вывода;

Режимы останова привода по осям

- ✓ Аварийный останов всех осей и интерполятора;

- ✓ Останов привода по одной или нескольким осям без прекращения работы интерполятора;

Режимы работы с координатами

- ✓ Команда на принятие текущей координаты за ноль;
- ✓ Команда «идти в ноль по конечным выключателям»;
- ✓ Команда «идти в программный ноль»;
- ✓ Два варианта позиционирования: 1 – (*ГРУБО*) останов при наезде на большой скорости, 2 – (*ТОЧНО*) наезд на концевой выключатель на большой скорости съезд на малой;
- ✓ Задание программного рабочего поля по каждой оси;

Тестирование сервоконтроллера.

- ✓ Тестирование интерполятора (режим симуляции): на вход задается эталонная траектория для линейной и круговой интерполяции. Значения на каждом такте интерполятора поступают из сервоконтроллера в ПК. Полученная квантованная по уровню и величине траектория сопоставляется с заданной и анализируется ошибка интерполятора.
- ✓ Тестирование обработки датчиков положения: на вход каждой оси поступают тестовые сигналы от внешнего источника эмулирующие датчик положения. Анализируется точность отработки заданного угла поворота вала датчика и наличие заданной скорости.
- ✓ Тестирование ЦАП в режиме прямого управления: выдача заданий $\pm 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ В.
- ✓ Тестирование ЦАП + интерполятор: в разомкнутом режиме выполняется отработка эталонной траектории (величина обратной связи от датчика положения на каждом такте эмулируется программно в сервоконтроллере OpenLoopControl).
- ✓ Тестирование FLASH: чтение и запись параметров.
- ✓ Тестирование дискретных входов/выходов: информация передается на ПК для отображения текущего состояния.
- ✓ Тестирование логики (отработка аварийных ситуаций).

Перечень команд для управления сервоконтроллером.

В качестве примера демонстрирующего особенности работы с сервоконтроллером рассмотрим базовый перечень команд приведенный в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Функция (Формат Delphi)	Описание
SetHardwareData(HWData : THWdata):	установить базовые параметры сервомодуля
GetHardwareData(HWData : THWdata);	считать базовые параметры сервомодуля
GetCurrentPosition(Position : TPosition);	получить текущее положение по

	осям
MoveLine(Line : TLine);	движение по отрезку
MoveCircle(Circle : TCircle);	движение по дуге окружности
MoveTo(MoveData:TMove);	движение из текущей точки, определяемой по датчику положения в точку с заданными координатами
SetZeroPosition(ZeroPos : Byte);	принять текущее положение по указанным осям за ноль: bit 1 – ось X; bit 5 – резерв; bit 2 – ось Y; bit 6 – резерв; bit 3 – ось Z; bit 7 – резерв; bit 4 – ось K; bit 8 – резерв; Значение = 1 – выставить
SetTypeDAC_Interp(ChDataMask byte);	: выставить регистр управления каналами ЦАП (прямой доступ/интерполятор, запрет и разрешение на работу координаты): bit 1 – разрешение на работу оси X; bit 2 – разрешение на работу оси Y; bit 3 – разрешение на работу оси Z; bit 4 – разрешение на работу оси K; bit 5 – интерполятор (0) / ЦАП (1) по оси X; bit 6 – интерполятор (0) / ЦАП (1) по оси Y; bit 7 – интерполятор (0) / ЦАП (1) по оси Z; bit 8 – интерполятор (0) / ЦАП (1) по оси K; Значение = 1 – выставить, 0 – снять
SetOffsetDAC(Channel:Byte; Value:Integer);	Выставить смещение ЦАП: ± 10000 ($\pm 10B$)
SetMax_Vc_ac(MaxVc, Max_ac : Integer);	выставить максимально допустимые контурные скорости и ускорения
SetErroLen(ErrorLen : Integer);	выставить максимально допустимую координатную ошибку
SetPosGain(Krp_X, KrpY, KrpZ, KrpK : Real);	выставить коэффициенты регуляторов положения
SetGainFeedback(KencX, KencY, KencZ, KencK : Real);	выставить коэффициенты обратных связей
SetGainDCU(KdcX,KdcY,KdcZ,KdcZ :	выставить коэффициенты ЦКУ

Real);	
SetDirect-DACValue(DacX,DacY,DacZ,DacK : Integer);	выставить напряжение на ЦАП (дискретности ЦАП: $\pm 10000 = \pm 10\text{В}$)
SetWorkField(Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, Zmin, Zmax, Kmin, Kmax : Integer);	выставить программное рабочее поле по осям, мкм
GetCadrInfo(CadrInfo: TCadrinfo);	получить текущее состояние кадров
SetDigitalOutput(DO : byte);	выставить состояние дискретных выходов: bit 1 – канал 1; bit 2 – канал 2; bit 3 – канал 3; bit 4 – канал 4; bit 5 – канал 5; bit 6 – канал 6; bit 7 – канал 7; bit 8 – канал 8; Значение = 1 – выставить, 0 – снять
GetDigitalInput(DI : Word);	получить состояние дискретных выходов: bit 1 – канал 1; bit 9 – канал 9; bit 2 – канал 2; bit 10 – канал 10; bit 3 – канал 3; bit 11 – канал 11; bit 4 – канал 4; bit 12 – канал 12; bit 5 – канал 5; bit 13 – резерв; bit 6 – канал 6; bit 14 – резерв; bit 7 – канал 7; bit 15 – резерв; bit 8 – канал 8; bit 16 – резерв; Значение = 1 – выставить, 0 – снять
ConfigMaskDigitalInput(DI_Mask:Word);	Выставить маску на дискретные входы: bit 1 – канал 1; bit 9 – канал 9; bit 2 – канал 2; bit 10 – канал 10; bit 3 – канал 3; bit 11 – канал 11; bit 4 – канал 4; bit 12 – канал 12; bit 5 – канал 5; bit 13 – резерв; bit 6 – канал 6; bit 14 – резерв; bit 7 – канал 7; bit 15 – резерв; bit 8 – канал 8; bit 16 – резерв; Выставляются значения = 1 – при высоком уровне на входе, 0 – при

	высоком уровне на входе (инверсия)
SetWaitTimeDigitalInput(Tick:Integer; Ch:Integer);	Конфигурирование задержки при определении состояния дискретные входов. 1 Tick = 1/500Гц = 0,002с; По умолчанию: Tick = 10 (Время задержки = 0,02с). Ch – номер канала
GetErrorLogs(ErrorLog : TErrorLog);	Получить состояние регистров аварийных ситуаций;
GoHardareHome(HWHome : byte; Vx,Vy,Vz,Vk : Integer);	идти в ноль по конечным выключателям: bit 1 – ось X; bit 5 – резерв; bit 2 – ось Y; bit 6 – резерв; bit 3 – ось Z; bit 7 – резерв; bit 4 – ось K; bit 8 – резерв; bit = 1 – выполнить команду; bit = 0 – остановить выполнение команды либо не выполнять позиционирование в ноль; $Vx, Vy, Vz, Vk \leq 100$ – скорость движения по регулируемой оси, выраженная в процентах от максимально достижимой при 10В;
GoSoftwareHome(SWHome : byte);	идти в ноль по программному рабочему полю: bit 1 – ось X; bit 5 – резерв; bit 2 – ось Y; bit 6 – резерв; bit 3 – ось Z; bit 7 – резерв; bit 4 – ось K; bit 8 – резерв; bit = 1 – выполнить команду; bit = 0 – остановить выполнение команды либо не выполнять позиционирование в ноль; $Vx, Vy, Vz, Vk \leq 100$ – скорость движения по регулируемой оси, выраженная в процентах от максимально достижимой при 10В;
GetStatusInfo(Status : TServoStatus);	Получить состояние статусных регистров
ResetDSP(Rest : Byte)	Прекращение всех операций, сброс

	всех настроек контроллера и выставление их по умолчанию: Reset = 1 – выполнить команду;
GetVerisonHW(Data : Word);	Получить версию релиза аппаратной части
GetVerisonSW(Data : Word);	Получить версию релиза программной части
RemoveCadr(Data:byte);	Очистить данные исполняемого кадра №X.X. В случае отсутствия ожидающего очереди кадра №2 выдать на ЦАПы регулируемых осей 0В. При наличии кадра №2 ожидающего своей очереди, кадр №2 смещается на место №1 для исполнения с учетом логики установленной в контрольном регистре кадра №2.X. bit 1 – кадр №1.1; bit 5 – резерв; bit 2 – кадр №1.2; bit 6 – резерв; bit 3 – кадр №2.1; bit 7 – резерв; bit 4 – канал №2.2; bit 8 – резерв; Значение = 1 – очистить очередь, 0 – нет.
GetCadrList(Data:Byte);	Состояние кадров: bit 1 – кадр №1.1; bit 5 – резерв; bit 2 – кадр №1.2; bit 6 – резерв; bit 3 – кадр №2.1; bit 7 – резерв; bit 4 – канал №2.2; bit 8 – резерв; Значение = 1 – наличие кадра, 0 – отсутствие кадра.

Программное обеспечение верхнего уровня для конфигурирования сервоконтроллера.

На сегодняшний день большинство подобных сервоконтроллеров имеет программное обеспечение, позволяющее конфигурирование всех параметров сервоконтроллера, а также опций для проведения тестирования его работоспособности. Далее рассмотрим пример программного обеспечения сервоконтроллера PCI-SERVO-4 компании ЭЛЕСИ.

Интерфейсное окно программы (рис. 4.18) формирует основные программно-аппаратные характеристики:

- ✓ Тип сервоконтроллера;
- ✓ Частота квантования в контуре положения;
- ✓ Версия программного обеспечения ядра сервоконтроллера;

- ✓ Версия драйвера;
- ✓ Номер PCI-слота;
- ✓ Device ID;
- ✓ Vendor.

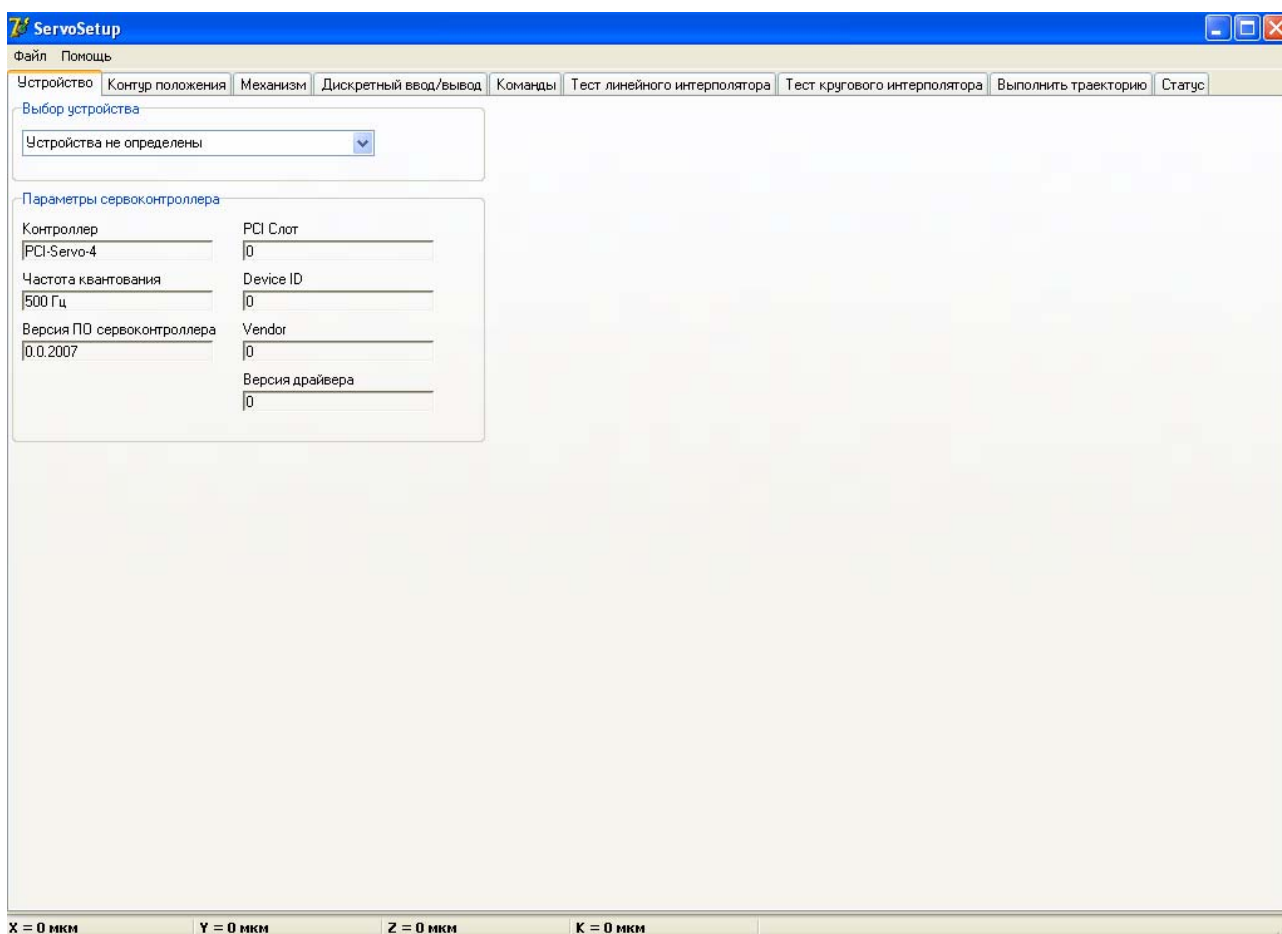


Рис. 4.18. Интерфейсное окно программы в режиме выбора управляемого устройства

Первые четыре параметра отражают аппаратные характеристики данной модели сервоконтроллера, а также версию программной части. Остальные описывают характеристики интерфейса связи по PCI-шине.

Интерфейсное окно программы в режиме выбора параметров контура положения (рис. 4.19) предполагает выбор и отображение следующей информации:

- ✓ Задание параметров коэффициентов (Крп_X, Крп_Y, Крп_Z, Крп_K) регуляторов положения по осям X, Y, Z, K.
- ✓ Задание параметров коэффициентов обратных связей (Кос_X, Кос_Y, Кос_Z, Кос_K) по регулируемым осям.
- ✓ Выбор режима управления каналами ЦАП либо интерполятора. Режим «ЦАП» предполагает работу сервоконтроллера по регулируемой оси как обычного модуля аналогового вывода, т.е. непосредственное формирование задания на ЦАП, без работы интерполятора. «Режим интерполятора»

предполагает работу сервоконтроллера в штатном режиме, т.е. формирование задания происходит в соответствии с заданным законом регулирования.

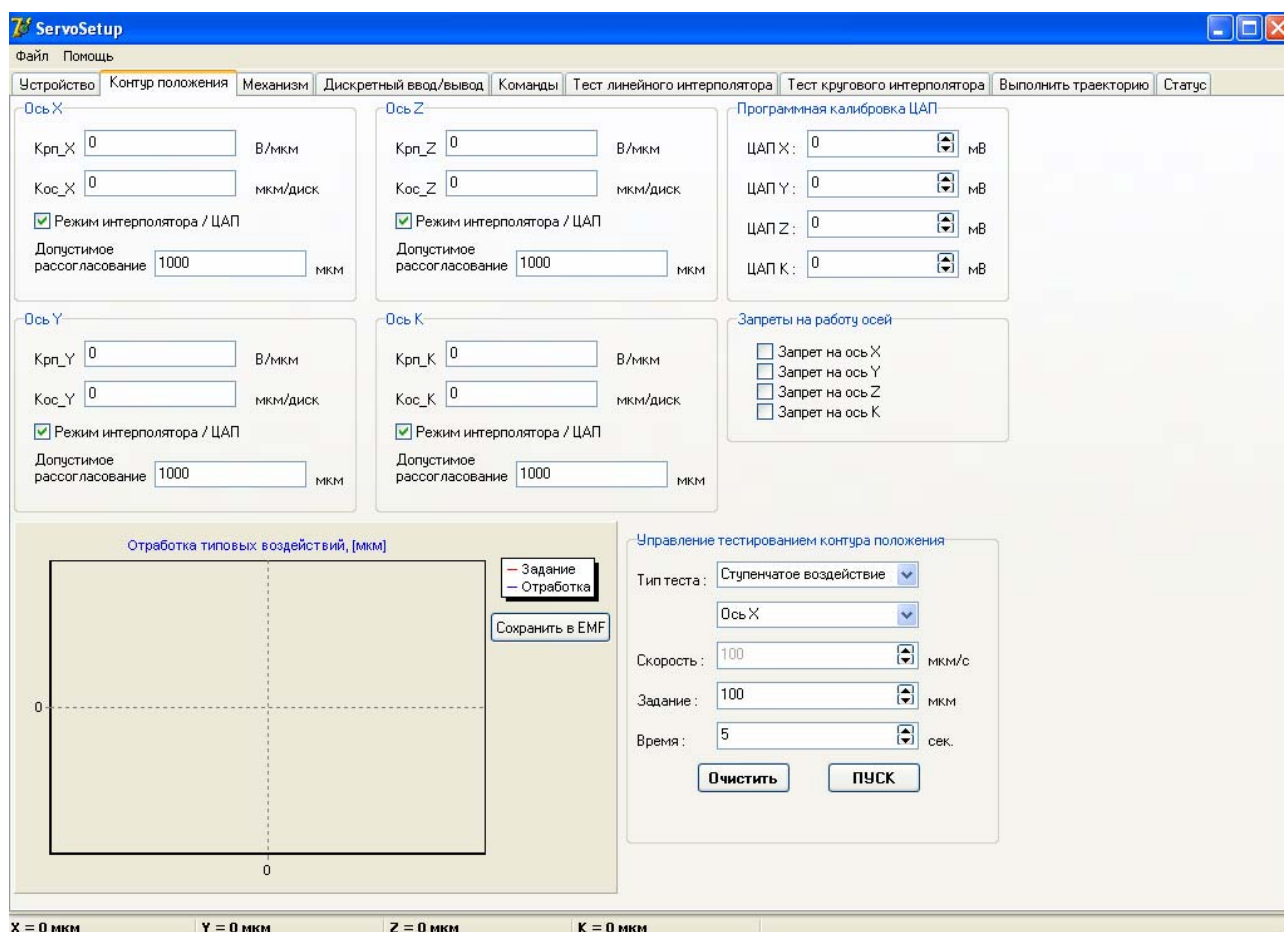


Рис. 4.19. Интерфейсное окно программы в режиме выбора параметров контура положения

- ✓ Допустимое рассогласование – определяет максимальную координатную ошибку, при достижении которой сервоконтроллер останавливает работу регулируемой оси и выдает сообщение об аварийной ситуации.
- ✓ Программная калибровка предполагает программную установку нуля каналов ЦАП.
- ✓ Запрет на работу осей – устанавливает состояние каналов ЦАП в 0 в не зависимости от поступившей команды до тех пор, пока он не будет снят.
- ✓ Управление тестированием контура положения дает возможность пользователю осуществить предварительную настройку и проверку параметров контура положения, оценить реакцию электропривода на типовые входные воздействия – «Ступенчатое воздействие» и «Линейная заводка». Полученные характеристики отображаются в соответствующем графическом окне «Отработка типовых воздействий».

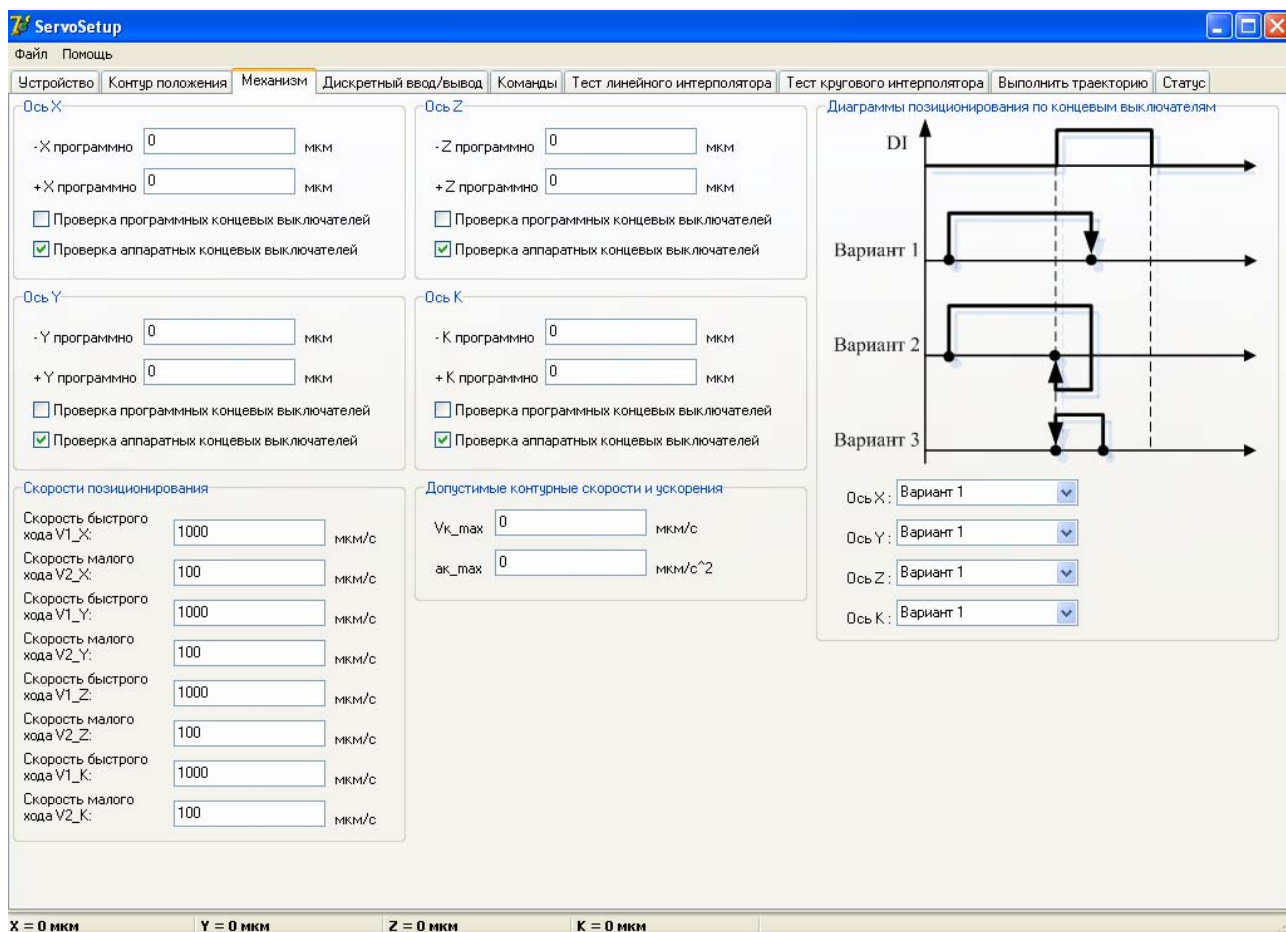


Рис. 4.20. Интерфейсное окно программы в режиме конфигурирования параметров механизма

Интерфейсное окно программы в режиме конфигурирования параметров механизма (рис. 4.20) предполагает настройку следующих параметров:

- ✓ Задание допустимого рабочего поля по регулируемым осям.
- ✓ Выбор проверки программных концевых выключателей (в зоне программного рабочего поля).
- ✓ Выбор проверки аппаратных концевых выключателей.
- ✓ Выбор варианта позиционирования. Вариант 1 – позиционирование в грубом режиме. Логика выхода в ноль при этом следующая: движение на концевой выключатель на быстром ходу (скорость быстрого хода $V1_X$), до наезда. При наезде останов привода и ожидание следующей команды. Вариант 2 – подразумевает позиционирование в точном режиме. При этом привод выходит в ноль на быстром ходу. Далее, при наезде на концевой выключатель, выполняется съезд и останов на малом ходу (скорость малого хода $V2_X$).
- ✓ Установка величин скоростей быстрого $V1_X$ и малого $V2_X$ хода по регулируемым осям.

- ✓ Установка допустимых контурных скоростей V_{k_max} , a_{k_max} . При превышении граничных величин скорости либо ускорения сервоконтроллер выдаст сообщение об ошибке.

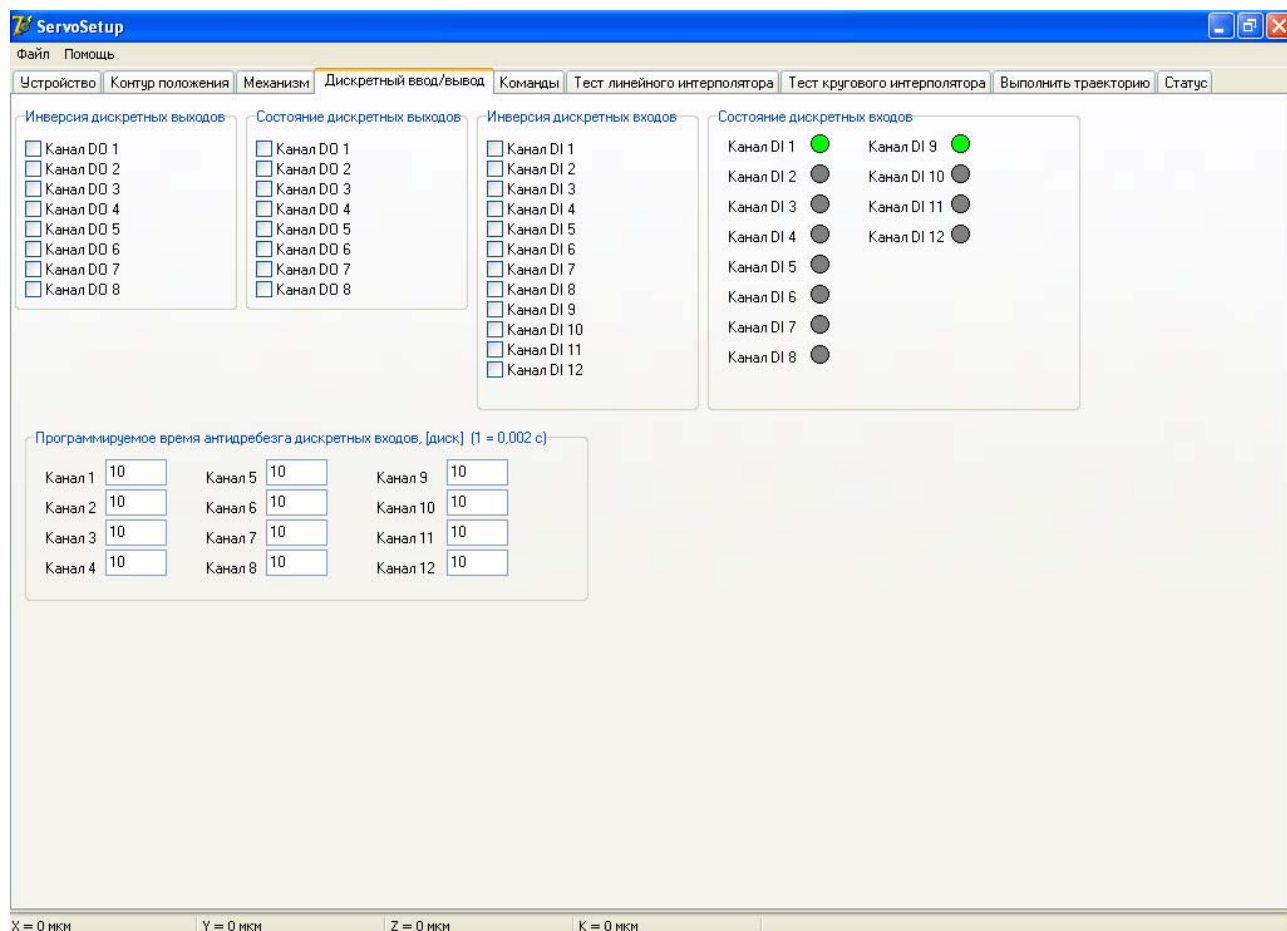


Рис. 4.21. Интерфейсное окно программы в режиме дискретного ввода/вывода

Интерфейсное окно программы в режиме дискретного ввода/вывода (рис. 4.21) позволяет выполнить конфигурирование логики работы дискретного ввода/вывода, а также отображает текущее состояние входов/выходов. Рассмотрим следующие группы параметров:

- ✓ Конфигурирование инверсии дискретных выходов. Данная опция позволяет определить состояние дискретного выхода «1» при снятии инверсии и «0» при установке.
- ✓ Состояние дискретных выходов – предполагает установку состояния «1» (выставлена галочка) и «0» (галочка снята).
- ✓ Конфигурирование инверсии дискретных входов предполагает выбор определения состояние дискретного выхода «1» при снятии инверсии и «0» при установке.

- ✓ Подгруппа «Состояние дискретных входов» предназначена для отображения состояния дискретных входов с учетом предустановленной инверсии дискретных выходов.
- ✓ Программируемое время антидребезга предназначено для установки времени интегрирования в течении которого анализируется состояние дискретных входов с целью исключения ложных срабатываний.

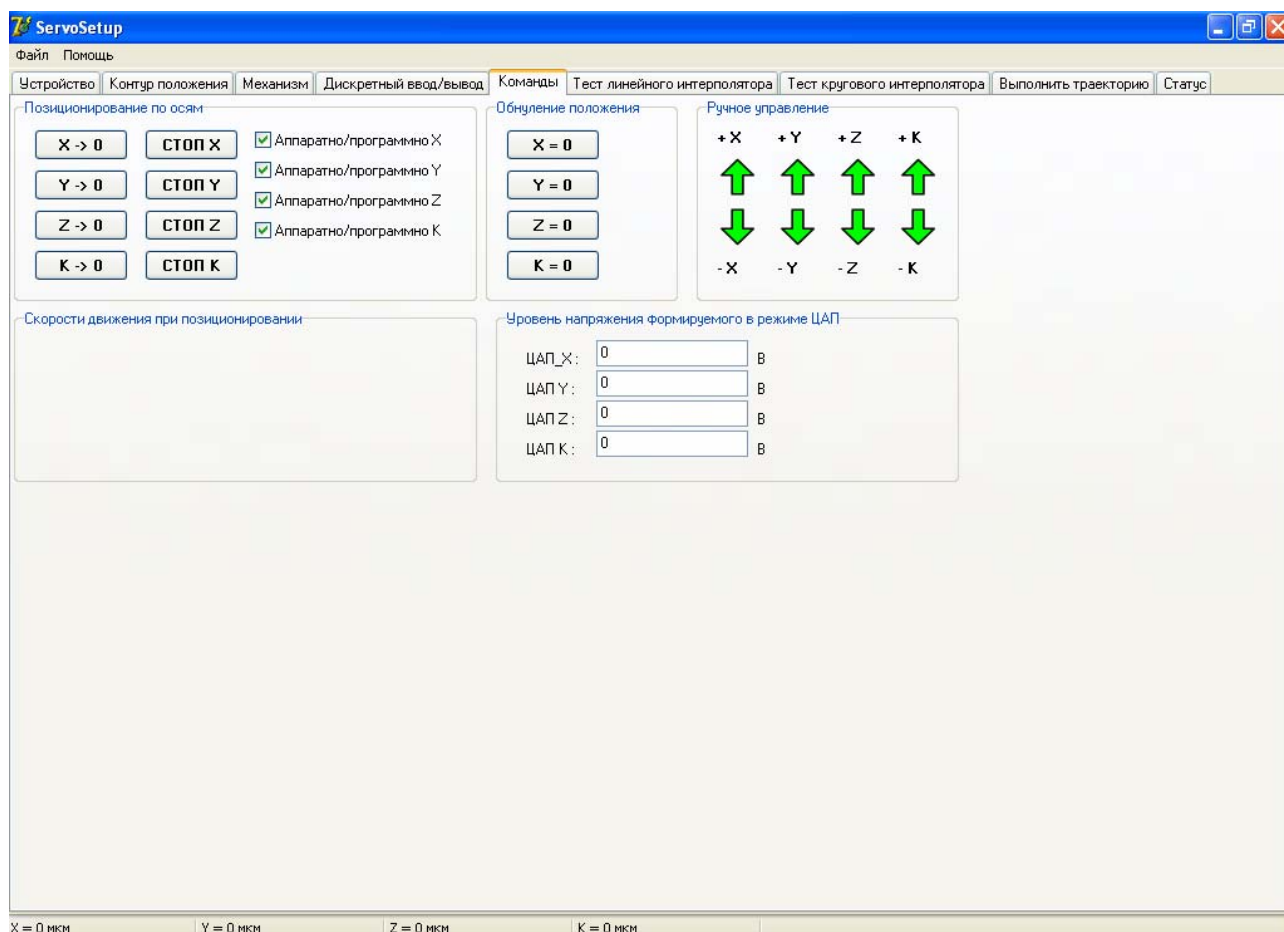


Рис. 4.22. Интерфейсное окно программы в режиме Команды

Основными функциями интерфейсного окна программы в режиме Команды (рис. 4.22) являются:

- ✓ Меню позиционирования по осям предполагает выбор типа позиционирования – программно либо аппаратно. Программно – выход в программный ноль. Аппаратно – выход в ноль по конечным выключателям.
- ✓ Выдача команды на позиционирование и останов по регулируемой оси.
- ✓ Обнуление состояние счетчика текущего положения.
- ✓ Ручное управление предполагает возможность движения по регулируемым осям с помощью ручного пульта изображенного на форме.
- ✓ Задание уровня напряжения формируемого на аналоговые выходы в режиме «ЦАП».

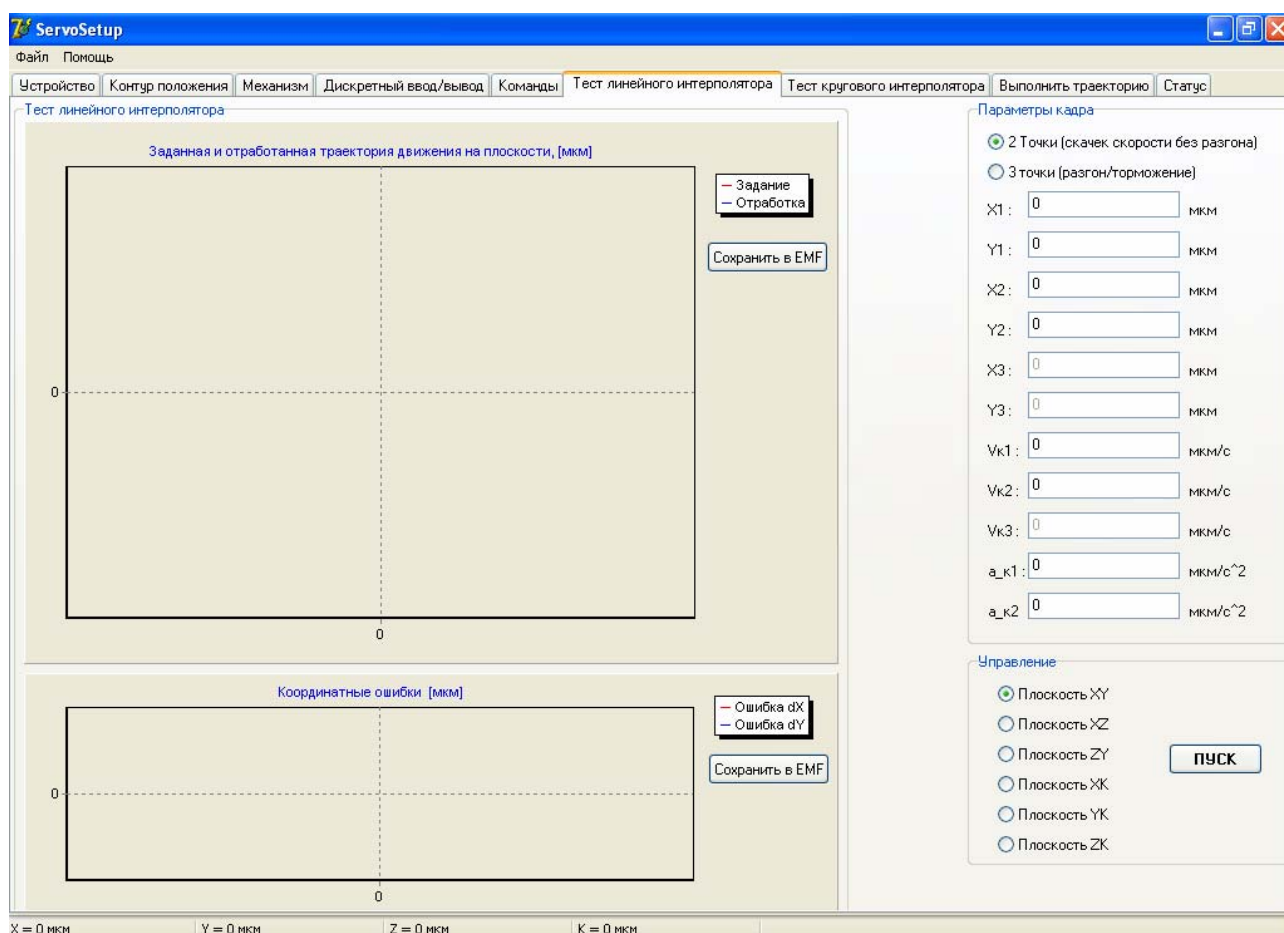


Рис. 4.23. Интерфейсное окно программы в режиме теста линейного интерполятора

Интерфейсное окно программы в режиме теста линейного интерполятора (рис. 4.23) предназначено для проверки работоспособности сервоконтроллера в режиме отработки траектории движения описанной с помощью линейной интерполяции. Основными элементами управления являются:

- ✓ Выбор варианта описания простейшей траектории движения: «2 точки» – траектория задана двумя точками, диаграмма изменения скорости во времени носит прямоугольный характер. В этом случае нарастание скорости носит скачкообразный характер. «3 точки» - траектория описана тремя точками, диаграмма изменения скорости носит трапециидальный характер. Такое изменение скорости во времени исключает скачкообразные изменения скоростей и соответственно удары в механической части системы.
- ✓ Задание геометрии траектории с помощью опорных точек, а также установка заданных контурных скоростей и ускорений.
- ✓ Выбор плоскости отработки заданной траектории движения.
- ✓ Отображение заданной и отработанной траектории движения.

- ✓ Отображение координатных ошибок возникающих при движении по заданному контуру.

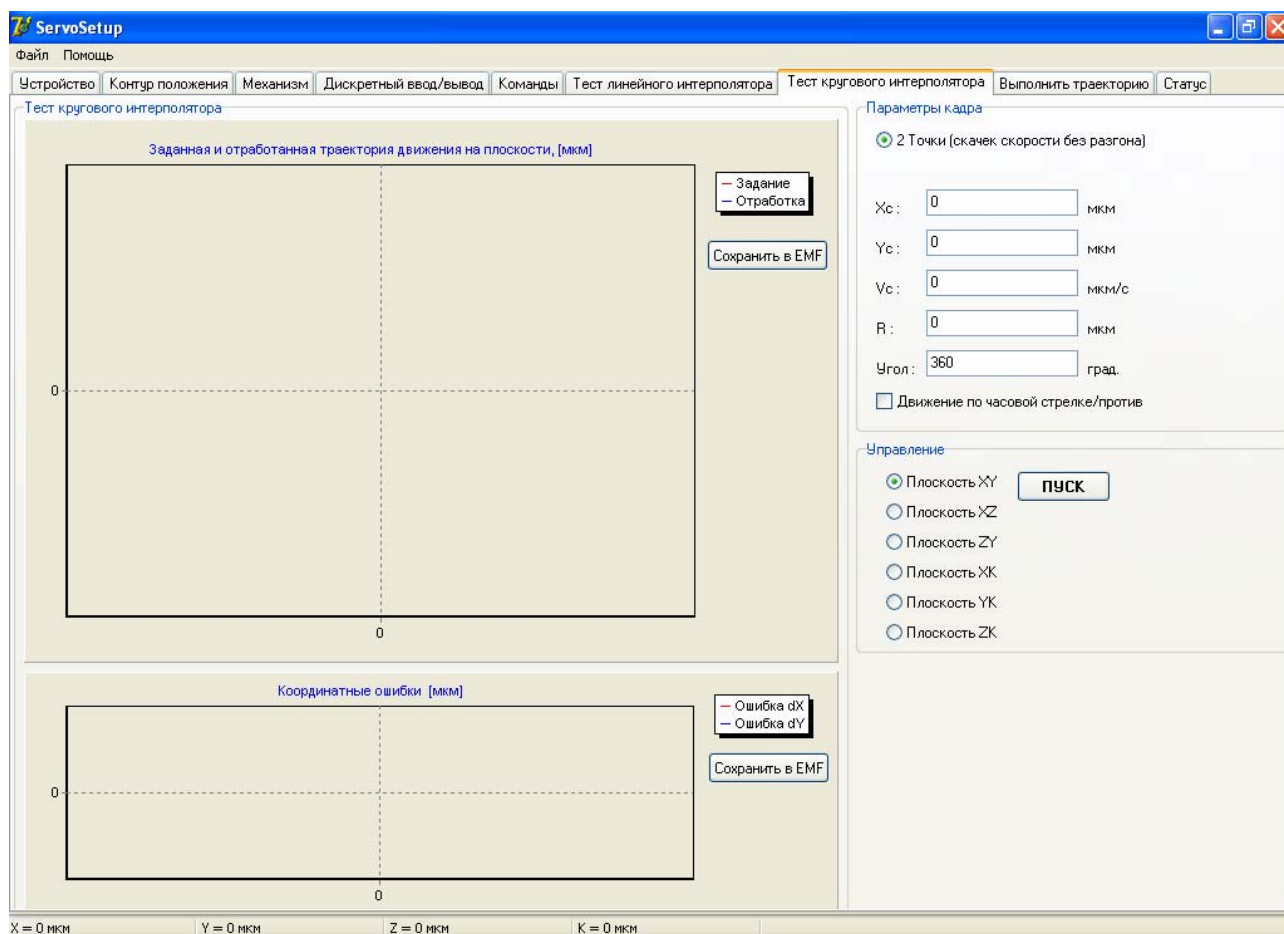


Рис. 4.24. Интерфейсное окно программы в режиме теста кругового интерполятора

Интерфейсное окно программы в режиме теста кругового интерполятора (рис. 4.24) предназначено для проверки работоспособности сервоконтроллера в режиме отработки траектории движения описанной с помощью круговой интерполяции. Основными элементами управления являются:

- ✓ Задание геометрии траектории с помощью указания центра окружности, контурной скорости, радиуса, а также начального и конечного угла дуги окружности.
- ✓ Выбор плоскости отработки заданной траектории движения.
- ✓ Отображение заданной и отработанной траектории движения.
- ✓ Отображение координатных ошибок возникающих при движении по заданному контуру.

Текущее положение по всем регулируемым осям постоянно отображается внизу интерфейсных окон.

4.5. Алгоритмы формирования задающих воздействий при линейной и круговой интерполяции

При рассмотрении алгоритмов формирования задающих воздействий базирующихся на обработке геометрии траектории движения и интерполяции в реальном времени остановимся на варианте предлагаемом в аппаратном РСІ сервоконтроллере описанном в параграфе 4.4. Поскольку алгоритмы управления, реализуемые в таких системах, жестко привязаны к аппаратной платформе, то наиболее целесообразно представить не только математическое описание алгоритмов, но и частично программный код.

Базовые алгоритмы линейной и круговой интерполяции, а также структуры, приведенные ниже, взяты из библиотеки «*Interpolation.c*». Данные алгоритмы предназначены для решения траекторных задач возникающих при управлении многокоординатными следящими электроприводами. Как уже было сказано ранее, к траекторным задачам относятся: интерполяция и расчет заданной величины контурной скорости с учетом разгона и торможения на каждом вычислительном такте.

Работа с линейной интерполяцией осуществляется вызовом процедуры

LineInterp_Make(*Line*, *HWData*);

на каждом такте интерполяции (см. рис. 4.25). Здесь *Line* – структура с параметрами кадра линейной интерполяции, *HWData* – структура с параметрами сервомодуля.

Параметры кадра, поступающие из персонального компьютера в сервоконтроллер, задаются в следующих полях структуры *Line*:

```
Line.X1=0;           // Координата начальной точки по оси X, мкм
Line.X2=1000;        // Координата конечной точки по оси X, мкм
Line.Y1=0;           // Координата начальной точки по оси Y, мкм
Line.Y2=1000;        // Координата конечной точки по оси Y, мкм
Line.V1=0;           // Начальная контурная скорость, мкм/с
Line.V2=1000;        // Конечная контурная скорость, мкм/с
Line.a_c=1000;       // Контурное ускорение, мкм/с2
Line.Plane=2;        // Плоскость интерполирования XY
```

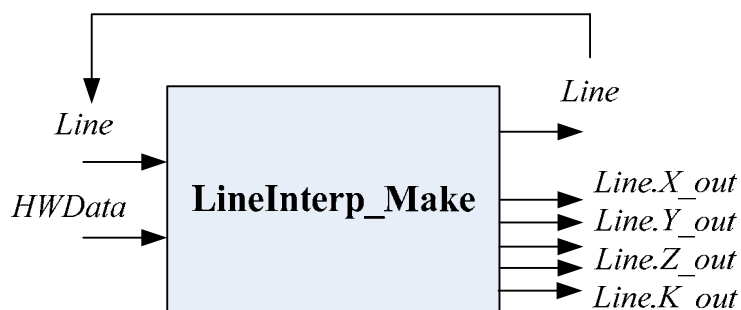


Рис. 4.25. Линейная интерполяция (*Line.X_out*, *Line.Y_out*, *Line.Z_out*, *Line.K_out* – сигнал задания на ЦАП либо на контур положения в зависимости от настроек сервомодуля)

Количество тактов интерполяции в общем случае определяется геометрией траектории движения, заданными контурными скоростями и ускорениями, а также частотой квантования в контуре положения.

Частота вызова функции определяется периодом квантования в контуре положения. При первом вызове функции производится расчет базовых параметров интерполятора и выполняется расчет задания по положению для указанных в структуре *Line* осей. При дальнейшем вызове функции интерполятора выполняется расчет лишь задания по положению. Базовые параметры хранятся в структуре *Line*.

К базовым параметрам интерполятора относятся промежуточные данные, которые определяются один раз и используются в интерполяторе для формирования задания по положению до тех пор, пока заданный участок траектории не будет отработан полностью.

Помимо базовых параметров на каждом такте интерполяции используются величины заданий полученные на предыдущем такте интерполяции. Переменные, хранящиеся в структуре *Line*, описаны ниже.

Структура кадра линейной интерполяции «Line»

typedef struct

```
{      int X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2,K1,K2; // Координаты начальной и конечной точки
отрезка
      int V1,V2,a_c;                // Скорость начальная и конечная, ускорение
      char a_type;                  // Тип ускорения 0 – скачек, 1 – функция f(t)
      char Plane;                   // Плоскость интерполирования: 0 – XYZ, 1 – XY,
                                   // 2 – XZ, 3 – YZ, 4 – X, 5 – Y, 6 – Z, 7 – K;
      float X_out,Y_out,Z_out,K_out; // Величины задания по положению на
текущем
                                   // такте интерполяции;
      char MovingType;              // Тип движения по траектории:
                                   // 0 – не определено, 1 – движение с  $V_{const}$ 
                                   // 2 – разгон и движение  $V_{const}$ , 3 – движение с
                                   //  $V_{const}$  и торможение;
      char CurrentMove;             // Тип движения по траектории в данный
момент:
                                   // 0 – не определено, 1 – первый участок,
                                   // 2 – второй участок;
      char Done;                   // Траектория выполнена: 0 – нет; 1 – да.
                                   // Выставляется после расчета последнего так-
                                   та;
      unsigned int TickRun;         // Число тактов разгона/торможения;
      unsigned int TickNow;         // Текущее число тактов интерполятора;
      unsigned int TickVc;          // Текущее число тактов с  $V_c=const$ ;
```

```

float dV;           // Приращение скорости на каждом такте разго-
на/торможения;
float Vc;           // Текущая скорость;
float dX,dY,dZ,dK; // Разности первого порядка по осям X, Y, Z, K;
float L;            // Контурный путь на заданном участке траек-
тории;
}Line;
Структура с базовыми параметрами сервомодуля «THWData»
typedef struct
{
    float Krp_X, Krp_Y, Krp_Z, Krp_K; // Коэффициенты усиления регулято-
ров
                                // положения;
    float Kenc_X, Kenc_Y, Kenc_Z, Kenc_K; // Коэффициенты обратных
связей
                                // по осям X,Y,Z,K;
    double long X,Y,Z,K;           // Текущее положение по осям
X,Y,Z,K;
    int Sign_X, Sign_Y, Sign_Z, Sign_K; // Знак величины по положению;
    int PR_X, PR_Y, PR_Z, PR_K; // Количество периодов счетчиков TxPR
                                // (x=1,2,3,4) таймеров, для QEP1,2; QEP2,3;
                                QEP4,5; QEP6,7;
    int ErrorLen; // Допустимое максимальное рассогласова-
ние по координате.
                                // Его превышение означает неправильную работу
                                // электропривода по регулируемой оси;
    float Kdc_X, Kdc_Y, Kdc_Z, Kdc_K; // Коэффициенты цифрового коррек-
тирующего
                                // устройства (ЦКУ);
    float MaxDc_X, MaxDc_Y, MaxDc_Z, MaxDc_K; // Максимальная величина
                                // выходного сигнала ЦКУ
X,Y,Z,K;
    float T; // Период дискретизации по времени в кон-
туре положения;
    char DacX, DacY, DacZ, DacK; // Сигнал задания на ЦАП;
    int Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, Zmin, Zmax, Kmin, Kmax; // Рабочее поле по каж-
дой оси;
    int MaxVc; // Максимально допустимая контурная скорость;
    int Maxa_c; // Максимально допустимое контурное ускорение;
    short DigitalIO; // Состояние дискретных входов/выходов (1 - ON, 0 -
OFF);
// Bit1..12 – входы, Bit13,14 – выходы; bit1..4 – отвечают за

```

// нулевые концевые выключатели, bit5..12 – аварийные
// выключатели;

char ControlReg1;

/ Разрешение на работу координаты:*

(0 – Нет, 1 – Да);

bit1 – X;

bit2 – Y;

bit3 – Z;

bit4 – K;

Режим интерполятора (0) / ЦАП (1):

bit5 – X;

bit6 – Y;

bit7 – Z;

bit8 – K;

**/*

char ControlReg2;

/ Режим управления: (1 – Да, 0 – Нет);*

bit1 – Режим симуляции;

bit2 – Разомкнутый режим управления (ОС от датчика положения эмулируется);

bit3 – Режим тестирования интерполятора;

bit4 – Выход в ноль по оси X выполнен (При движении бит сбрасывается);

bit5 – Выход в ноль по оси Y выполнен;

bit6 – Выход в ноль по оси Z выполнен;

bit7 – Выход в ноль по оси K выполнен;

bit8 – Контур положения сервомодуля – 0, Внешний контур положения –

1;

**/*

Расчет задания по положению на участке $V_c = const$:

Величины заданий по положению для осей X,Y,Z,K в общем виде представляются выражениями:

$$\begin{aligned} X_{out} &= X_{out} + \frac{V_c \cdot T \cdot dX}{L}, \\ Y_{out} &= Y_{out} + \frac{V_c \cdot T \cdot dY}{L}, \\ Z_{out} &= Z_{out} + \frac{V_c \cdot T \cdot dZ}{L}, \\ K_{out} &= K_{out} + \frac{V_c \cdot T \cdot dK}{L}, \end{aligned} \tag{4.3}$$

где V_c – заданная контурная скорость; T – период дискретизации по времени в контуре положения; $L = \sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2}$ – контурный путь; dX, dY, dZ, dK – разности первого порядка определяемые по выражениям ниже:

$$\begin{aligned} dX &= X_2 - X_1, \\ dY &= Y_2 - Y_1, \\ dZ &= Z_2 - Z_1, \\ dK &= K_2 - K_1, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2, K_1, K_2$ – координаты начальной и конечной точки траектории движения.

Расчет задания по положению на участке разгона/торможения (трапециидальная диаграмма скорости):

Величины заданий по положению для осей X, Y, Z, K определяются по выражениям (4.3) с разницей лишь в том, что величина контурной скорости V_c на каждом такте интерполяции не остается константой, а определяется по выражению:

$$V_c = V_c + dV \cdot \text{sign}(V_{c2} - V_{c2}), \quad (4.5)$$

где $dV = a_c \cdot T$; a_c – величина контурного ускорения при разгоне/торможении.

В общем виде, при формировании трапециидального закона изменения скорости, функции $X, Y = f(t)$ имеют следующий вид (рис. 4.26)

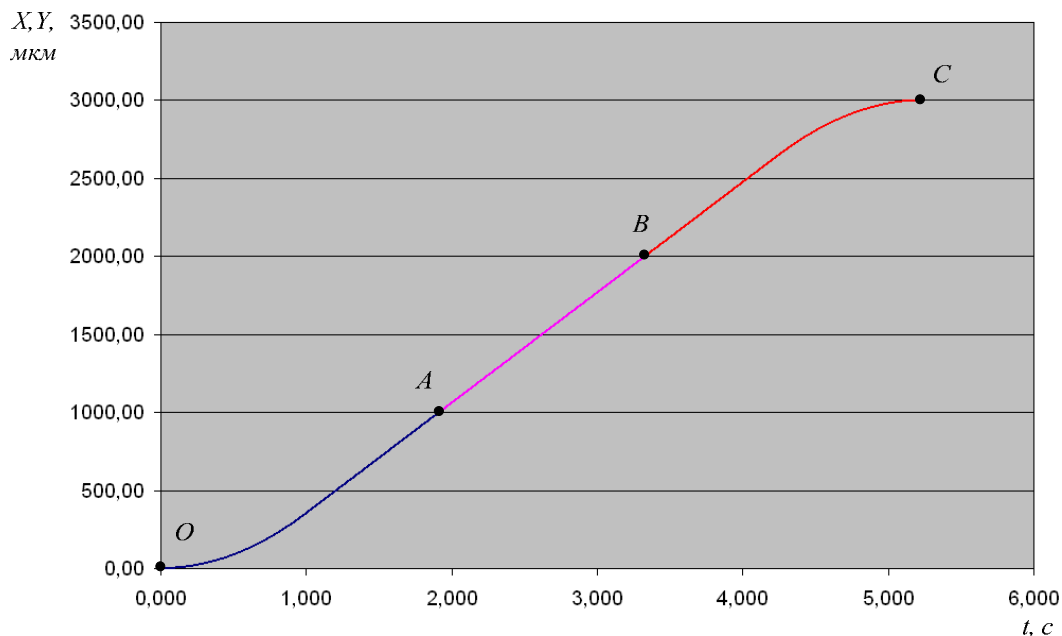


Рис. 4.26. Изменение координаты X, Y при разгоне, движении с $V_c = \text{const}$ и торможении: OA – участок разгона, AB – участок движения с постоянной контурной скоростью, BC – участок торможения

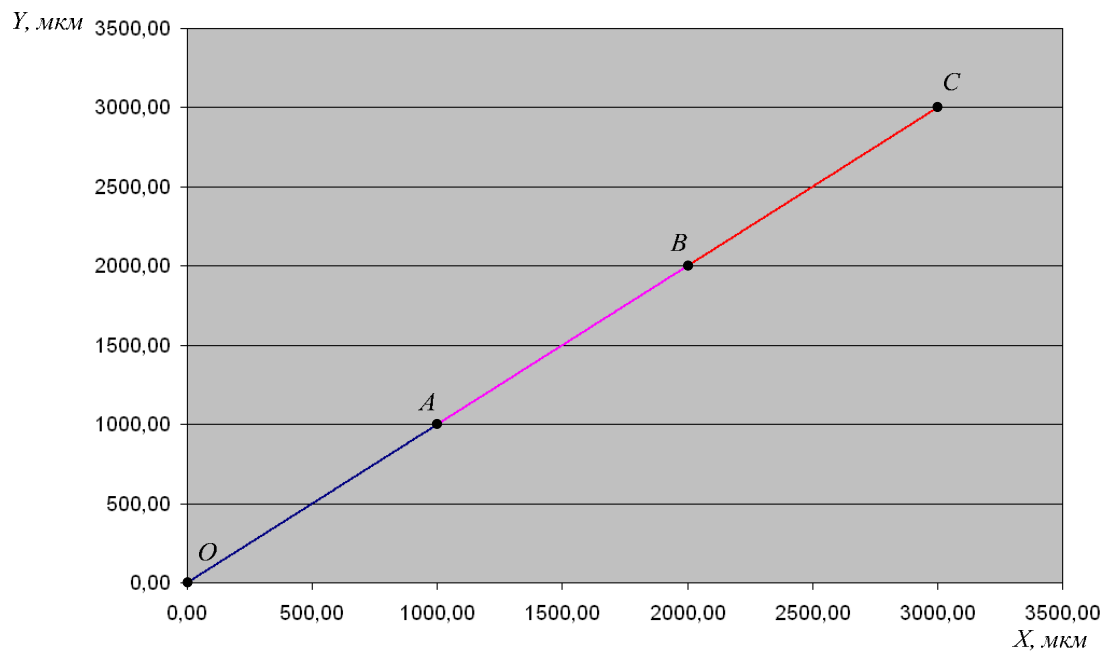


Рис. 4.27. Траектория движения на плоскости X, Y при разгоне, движении с $V_c = const$ и торможении: OA – участок разгона, AB – участок движения с постоянной контурной скоростью, BC – участок торможения

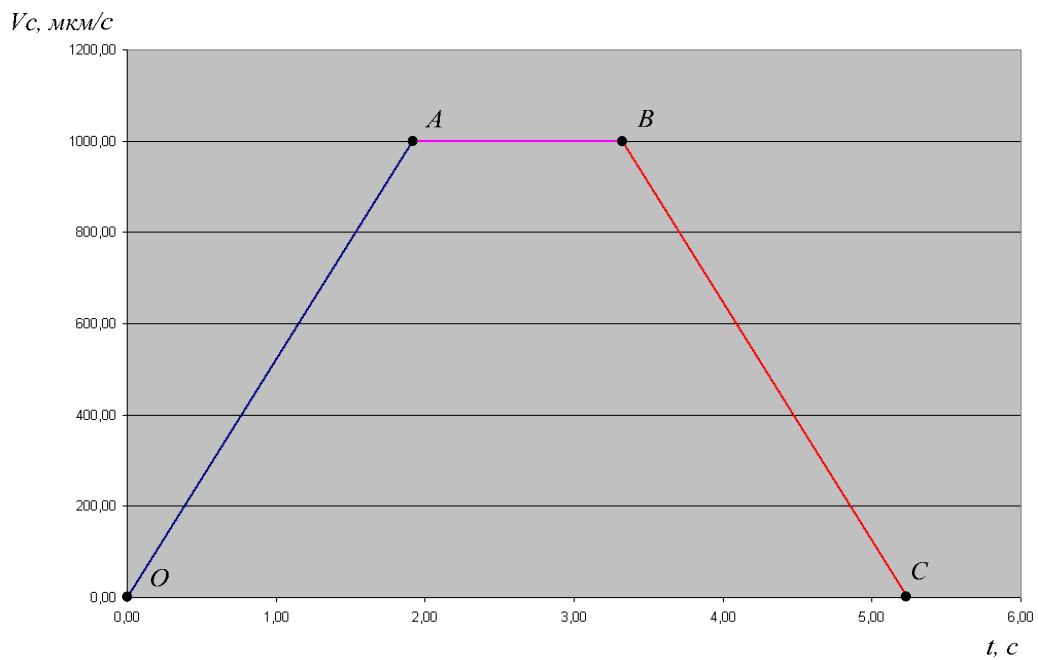


Рис. 4.28. Диаграмма контурной скорости, полученная при движении по траектории: OA – участок разгона, AB – участок движения с постоянной контурной скоростью, BC – участок торможения

Особенности функционирования линейного интерполятора.

Вызванная процедура `LineInterp_Make(Line, HWDData)`; осуществляет расчет базовых параметров интерполятора и записывает полученные значения в соответствующие поля структуры `Line`:

MovingType – тип движения по траектории: 1 – движение с *Vconst*, 2 – разгон и движение с *Vconst*, 3 – движение с *Vconst* и торможение;

TickRun – число тактов разгона/торможения, при условии, что присутствуют участки разгона/торможения;

TickNow – текущее число тактов интерполятора;

TickVc – текущее число тактов с *Vconst*;

dV – приращение скорости на каждом такте разгона/торможения;

dX, dY, dZ, dK – разности первого порядка по осям *X, Y, Z, K*;

L – контурный путь на заданном участке траектории.

При первом вызове процедуры производится анализ типа движения и запись результатов в «*MovingType*». При наличии участка разгона или торможения рассчитывается необходимое количество тактов соответствующее движению на участках разгона/торможения «*TickRun*» и *Vconst* «*TickVc*». Повторный вызов процедуры не предусматривает расчет базовых параметров, что значительно снижает загрузку процессора. На последующих вызовах производится лишь расчет задания по формулам (4.3-4.5).

При задании участка траектории (*OA* или *BC*) как например, на рис.4.20, алгоритм анализирует, достаточно ли контурного пути для выполнения разгона/торможения на заданном участке? В случае недостаточного контурного пути код ошибки передается на верхний уровень. Однако, если длина заданного участка разгона/торможения избыточна, алгоритм анализирует и добавляет участок движения с постоянной контурной скоростью для того, чтобы, пройдя данный участок, электропривод вышел на требуемый уровень скорости в заданной точке.

При поступлении следующего кадра и последующем вызове процедуры расчета интерполятора алгоритм автоматически стыкует последний участок предыдущего кадра с текущим кадром.

В случае неверно заданной геометрии траектории движения (не согласованы точки предыдущего и последующего отрезка) либо не верно заданными контурными скоростями и ускорениями в задании на привод могут возникнуть эффекты скачкообразно нарастающего задания по положению, что отразится в виде удара в механической части системы.

Работа с круговой интерполяцией осуществляется вызовом процедуры

CircleInterp_Make(Circle, HWData);

на каждом такте интерполяции (См. рис. 4.27.). Здесь *Circle* – структура с параметрами кадра круговой интерполяции, *HWData* – структура с параметрами сервомодуля.

Параметры кадра, поступающие из ПК в сервоконтроллер, задаются в следующих полях структуры *Circle*:

Circle.Xc=0; // Координата центра окружности по оси *X*, мкм

Circle.Yc=0; // Координата центра окружности по оси *Y*, мкм

```

    Circle.X1=0;           // Координата первой точки окружности по оси
X, мкм
    Circle.Y1=0;           // Координата первой точки окружности по оси
Y, мкм
    Circle.X2=0;           // Координата второй точки окружности по оси
X, мкм
    Circle.Y2=0;           // Координата первой точки окружности по оси
Y, мкм
    Circle.Plane=1; // Плоскость интерполирования XY
    Circle.a_c=1000; // Контурное ускорение, мкм/с2
    Circle.V1=1000; // Начальная контурная скорость, мкм/с
    Circle.V2=0;       // Начальная контурная скорость, мкм/с
    Circle.Direction=0; // Направление движения по часовой стрелке

```

Как и в случае с линейной интерполяцией количество тактов в общем случае определяется геометрией траектории движения, заданными контурными скоростями и ускорениями, а также частотой квантования в контуре положения.

Частота вызова функции определяется периодом квантования в контуре положения. При первом вызове функции производится расчет базовых параметров интерполятора и выполняется расчет задания по положению для указанных в структуре *Circle* осей. При дальнейшем вызове функции интерполятора выполняется расчет лишь задания по положению. Базовые параметры хранятся в структуре *Circle*.

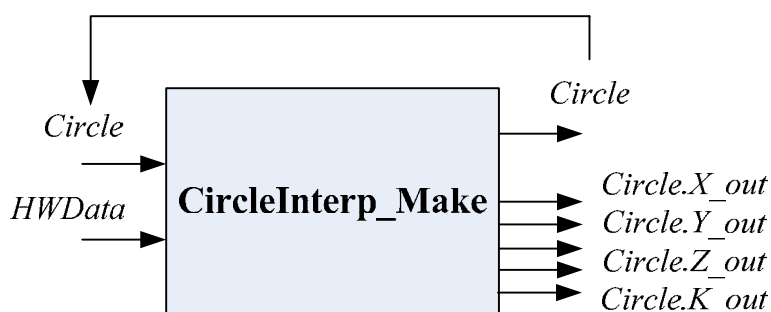


Рис. 4.29. Круговая интерполяция (*Line.X_out*, *Line.Y_out*, *Line.Z_out*, *Line.K_out* – сигнал задания на ЦАП либо на контур положения в зависимости от настроек сервомодуля)

Помимо базовых параметров на каждом такте интерполяции используются величины заданий полученные на предыдущем такте интерполяции. Переменные, хранящиеся в структуре *Circle*, описаны ниже.

Структура кадра круговой интерполяции «Circle».

```

typedef struct
{
    float Xc,Yc,Zc;           //Координаты центра окружности;

```

```

    int X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2;           //Координаты начальной и конечной точки
окружности;
    int V1,V2,a_c;                   //Скорость начальная, конечная и ускоре-
ние;
    short int a_type;                 //Тип ускорения: 0 – скачек, 1 – функция f(t);
    short int Direction;              //Направление: 0 – по часовой стрелке , 1 –
против;
    float Angle,Angle1,Angle2;        //Угол текущий, начальный, конечный;
    char Plane;                       //Плоскость интерполирования: 0 – XYZ
(Reserved),
                                     //1 – XY, 2 – XZ, 3 – YZ;
    int R;                           //Радиус окружности;
    char MovingType;                  //Тип движения по траектории: 0 – не определе-
но,
                                     //1 – движение с  $V_{const}$ , 2 – разгон и движение
                                      $V_{const}$ ,
                                     //3 – движение с  $V_{const}$  и торможение;
    char CurrentMove;                 //Тип движение по траектории в данный
момент:
                                     //0 – не определено, 1 – первый участок,
                                     //2 – второй участок;
    char Done;                        //Траектория выполнена: 0 – нет; 1 – да.
                                     //Выставляется после расчета последнего такта;
    unsigned int TickRun;              //Число тактов разгона/торможения;
    unsigned int TickNow;              //Текущее число тактов разгона/торможения;
    unsigned int TickVc;               //Текущее число тактов с  $V_{const}$ ;
    float dV;                         //Приращение скорости на каждом такте
//ускорения/торможения;
    float Vc;                         //Текущая контурная скорость;
    float dX,dY,dZ;                   //Разности первого порядка по осям X, Y, Z;
    float L;                          //Контурный путь на заданном участке траек-
тории;
    float X_out,Y_out,Z_out,K_out;     //Выходная величина на текущем
такте
                                     //интерполяции;
}CircleInterp;

```

Величины заданий по положению для осей X,Y в общем виде представляются выражениями:

$$\begin{aligned}
 X_{out} &= X_{out} + R \cdot \cos(\alpha); \\
 Y_{out} &= Y_{out} + R \cdot \sin(\alpha),
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

где X_{out}, Y_{out} – сигналы задания по положению; R – радиус окружности; α – текущий угол поворота по дуге окружности определяемый по выражению:

$$\alpha = \alpha + \Delta\alpha, \quad (4.7)$$

$$\Delta\alpha = Dir \cdot \frac{Vc \cdot T}{R}, \quad (4.8)$$

где коэффициент Dir – определяет направление движение по дуге окружности (по часовой стрелке (-1) или против (1)); T – период дискретизации по времени; Vc – контурная скорость:

$Vc = V_2$ – участок движения с постоянной контурной скоростью;

$Vc = Vc + dV \cdot Sign(V_2 - V_1)$ – участок разгона/торможения.

В соответствии с вышеописанными выражениями квантованная по времени и уровню траектория движения на плоскости XY будет иметь вид, показанный на рис. 4.30.

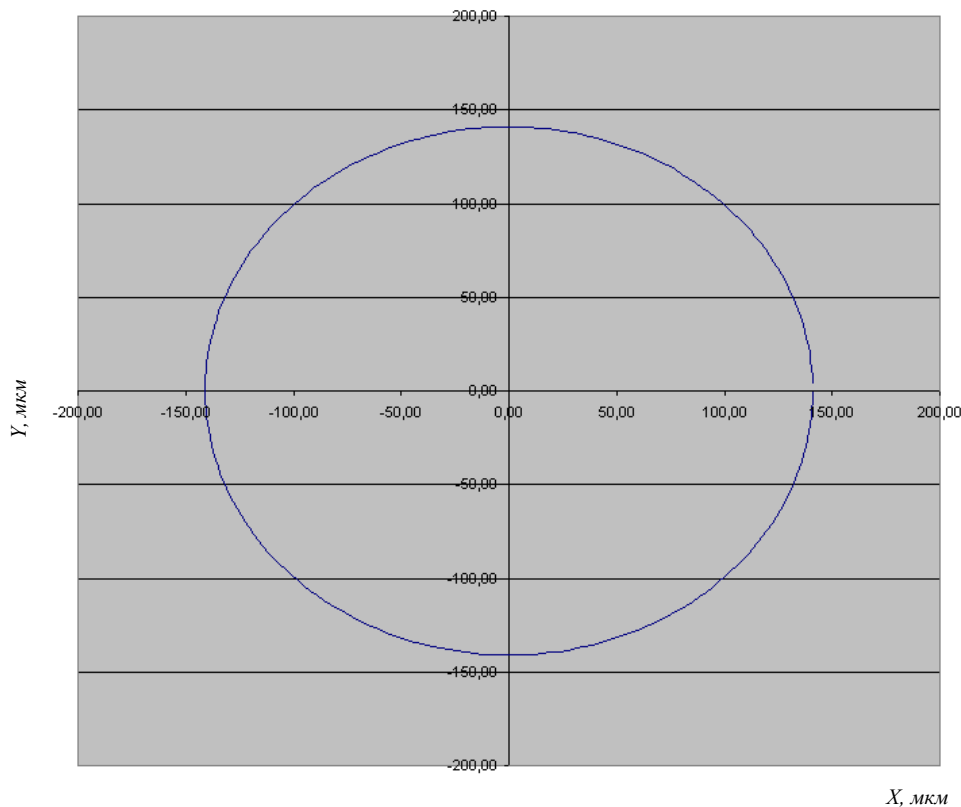


Рис. 4.30. Траектория движения на плоскости XY описанная круговой интерполяцией

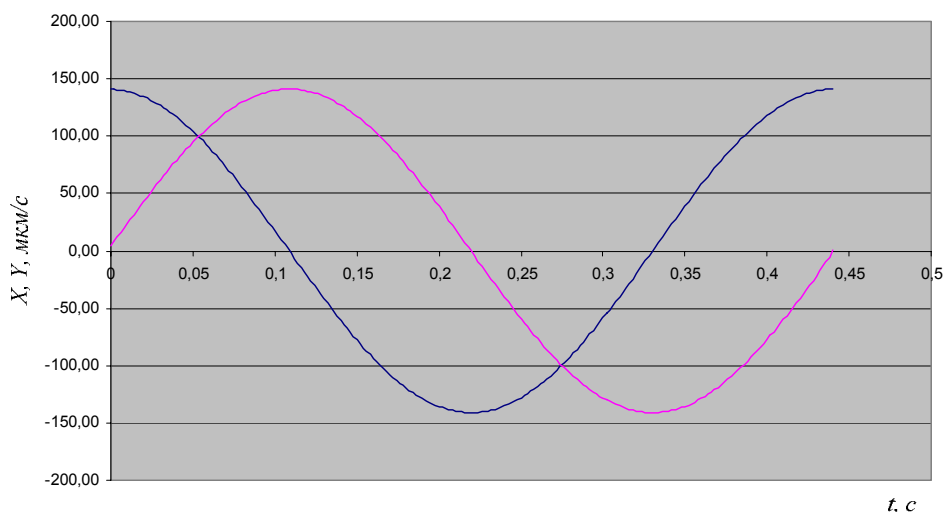


Рис. 4.31. Изменение во времени координат X и Y при круговой интерполяции (контурная скорость $V_c = \text{const}$)

Оценка погрешности вносимой библиотекой «IQMath» при круговой интерполяции.

С целью снижения загрузки процессора оснащенного только модулем с целочисленной арифметикой целесообразно ввести тригонометрические функции $\sin$ и $\cos$ из библиотеки «IQMath» вместо стандартных функций реализующих вычисления в типе *Float*. Такой подход позволяет снизить загрузку процессора на 5,5%. Однако при этом возникает погрешность, вносимая используемым форматом при расчетах. В качестве примера рассмотрим интерполирование окружности, приведенной на рис. 4.30.

Приведенные на рис. 4.32 графики изменения координатных ошибок вдоль контура траектории показывают, что при диаметре окружности $D=140$ мкм вносимая погрешность не превышает 0,0001 мкм.

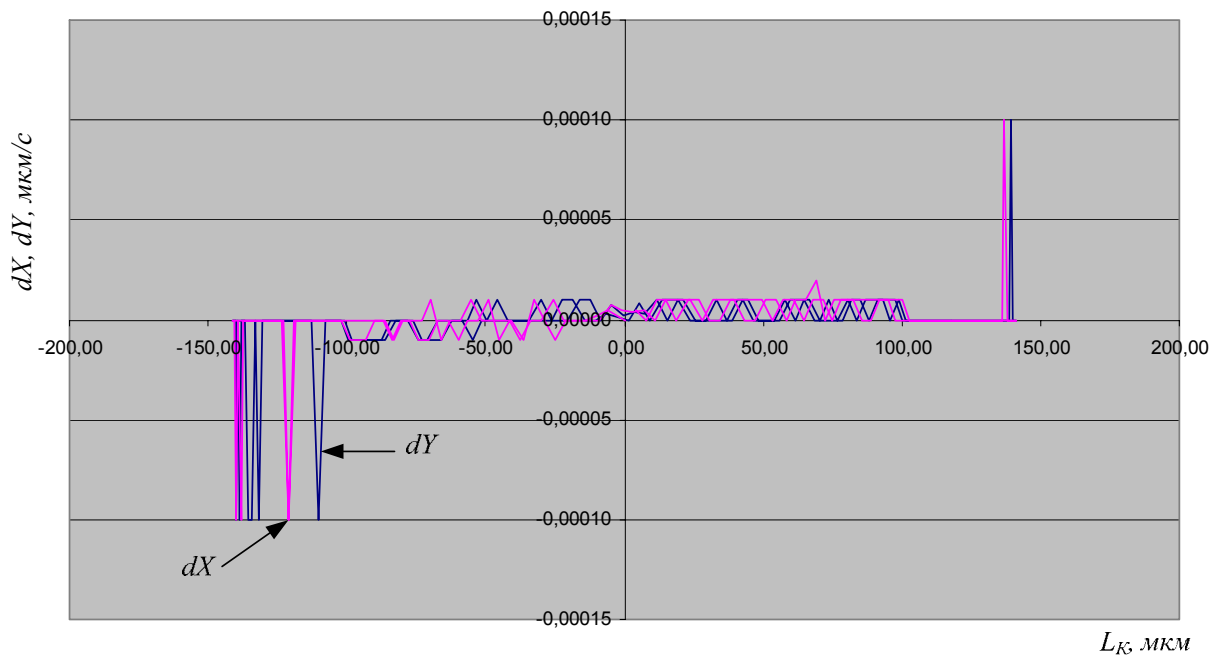


Рис. 4.32. Ошибки интерполирования окружности, возникшие при использовании библиотеки «IQMath.h»: dX – координатная ошибка по оси X , dY – координатная ошибка по оси Y

4.6. Координатные и контурные ошибки при воспроизведении траекторий движения

Ошибка воспроизведения заданной траектории движения оценивается с помощью векторной и контурной ошибок. На рис. 4.33 пунктирной линией показана заданная траектория движения, сплошной линией отработанная.

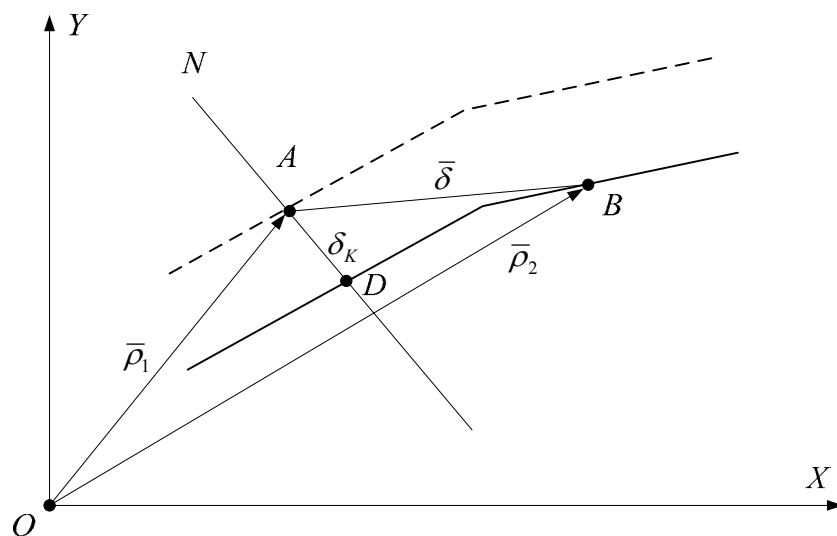


Рис. 4.33. Заданная и отработанная траектории движения

Принимая точку B (характеризующуюся вектором $\bar{\rho}_2$) за текущее положение механизма на обрабатываемой траектории движения, а точку A (характер-

ризующуюся вектором $\bar{\rho}_1$) за заданное положение механизма в этот момент времени, то векторную ошибку можно будет определить по выражению

$$\bar{\delta} = \bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2. \quad (4.9)$$

Векторная ошибка на плоскости ХУ может быть также определена через координатные ошибки

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}, \quad (4.10)$$

где $\delta_x = X_3 - X_0, \delta_y = Y_3 - Y_0$ – координатные ошибки по осям Х, У определяются как разность между заданной координатой и отработанной.

Координатные ошибки в свою очередь разделяются на статические (при останове привода) и динамические (при движении привода).

Основными составляющими суммарной статической ошибки являются:

1. ошибка датчика положения и измерительной схемы;
2. ошибка кинематической схемы;
3. моментная ошибка;
4. ошибка от дрейфа нуля усилительного канала;
5. ошибка от наличия нелинейностей;
6. ошибка от упругости рабочих органов.

Ошибка датчика положения и измерительной схемы определяется дискретностью датчика положения, т.е. его разрешающей способностью и наличием помех в канале измерения положения.

Ошибка кинематической схемы определяется наличием зазоров в кинематической цепи механизма, упругостью механической части системы.

Моментная ошибка в общем случае определяется выражением

$$\delta_M = \frac{\Delta V_C}{V} \cdot \delta_V, \quad (4.11)$$

где V – линейная скорость; $\Delta V_C = \Delta \omega_C \cdot K_M$ – изменение линейной скорости под действием момента нагрузки M_C ; δ_V – скоростная ошибка; $\Delta \omega_C$ – изменение угловой скорости под действием момента нагрузки M_C , K_M – коэффициент передачи механизма.

Выражение (4.11) показывает, что при работе привода на высоких скоростях моментная ошибка значительно меньше скоростной. Поэтому ее учет нужно вести при низких скоростях и в зоне позиционирования.

Ошибка от дрейфа нуля усилительного канала обусловлена наличием температурной нестабильности аналоговых элементов регулируемого привода, а также наличием нестабильностей в канале ЦАП.

Ошибка от наличия нелинейностей в основном обусловлена нелинейностью в механической части системы (зазор).

Ошибка от упругости рабочих органов обусловлена эффектом скручивания вала в механической части системы под действием момента сопротивления.

Практическое значение представляет контурная ошибка, которая определяется как отклонение по нормали между заданной и отработанной траекто-

рями движения. На нормали NI (рис. 4.33) отрезок $AD = \delta_k$ характеризует значение контурной ошибки в текущий момент времени. Однозначной связи между контурной и координатной ошибками не существует, и контурная ошибка может быть вычислена только при определенных входных воздействиях. Однако при этом справедливо следующее: чем меньше координатные ошибки, тем меньше и векторная, и контурная ошибки. Поэтому необходимо стремиться к достижению минимума координатных ошибок.

Пример расчета контурной ошибки при воспроизведении типовой (линейной) траектории движения описан ниже. На рис. 4.34 пунктиром показана заданная прямая, сплошной линией показана фактическая (отработанная). В установившемся режиме обе траектории параллельны, так как привод имеет астатизм первого порядка.

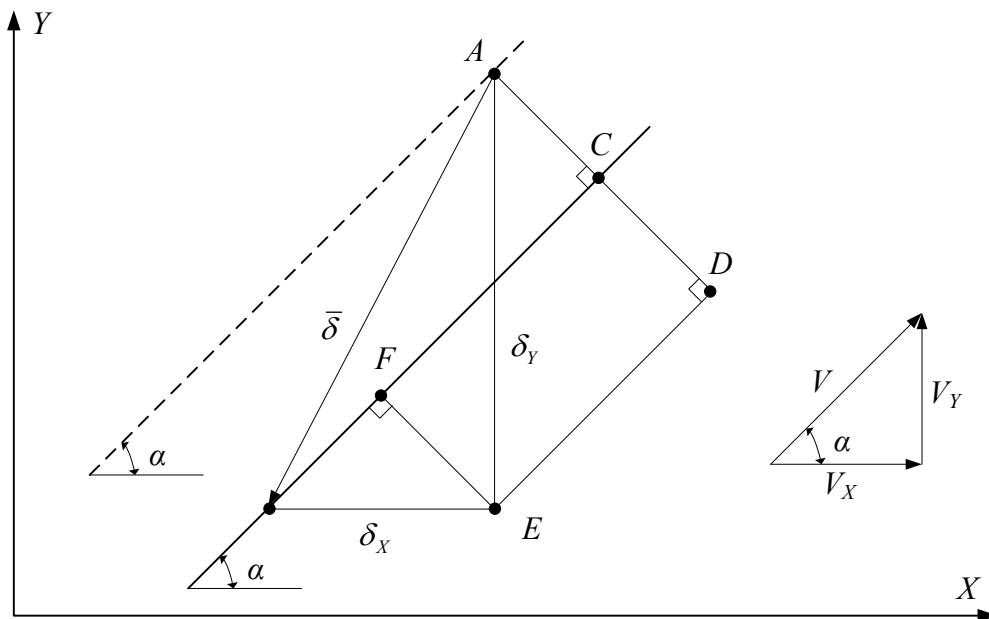


Рис. 4.34. Воспроизведение прямолинейного участка

Контурная ошибка определяется выражением

$$\delta_k = AC = AD - CD. \quad (4.12)$$

Рассматривая треугольники $\triangle ADE$ и $\triangle BEF$ получим:

$$\left. \begin{aligned} AD &= \delta_y \cdot \cos \alpha; \\ CD &= \delta_x \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

В режиме движения с постоянной скоростью каждый координатный привод имеет только скоростную ошибку:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \frac{V_x}{K_x}; \\ \delta_y &= \frac{V_y}{K_y}. \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

где K_x, K_y соответственно добротность по скорости приводов координат X и Y .

С учетом выражений (4.12) – (4.14) и, используя соотношение $\sin 2\alpha = 2\sin \alpha \cdot \cos \alpha$, окончательно получим

$$\delta_K = \frac{K_X - K_Y}{2K_X \cdot K_Y} \cdot V \cdot \sin 2\alpha. \quad (4.15)$$

Данное выражение показывает, что контурная ошибка при воспроизведении прямолинейного участка траектории будет только при различных параметрах приводов, когда $K_X \neq K_Y$. Поэтому всегда следует стремиться обеспечить идентичность приводов по координатам.

4.7. Обзор структур инвариантных автоматических систем управления

Рост требований, предъявляемых к качеству выпускаемой продукции в различных отраслях промышленности, определяет соответствующие требования по точности и быстродействию воспроизведения заданных траекторий движения к системам управления следящими электроприводами. Из теории автоматического управления известно, что задача выполнения требуемых динамических показателей качества может решаться путем введения в систему управления дополнительных устройств, называемых корректирующими. Применение корректирующих устройств в системах управления позволяет обеспечить инвариантность привода по управляющему и возмущающему воздействию, а также поднять порядок астатизма. Система автоматического регулирования является инвариантной по отношению к задающему или возмущающему воздействию, если после завершения переходного процесса, определяемого начальными условиями, ошибка системы не зависит от этого воздействия.

Впервые идеи инвариантности были высказаны в 40-х годах прошлого века советским ученым Щипановым В.Г. Дальнейшим развитием и исследованием теории комбинированных цифровых систем управления занимались Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г., Перельмутер В.М., Коцегуб П.Х. и др.

Совокупность систем с корректирующими устройствами вида, показанного на рис. 4.28–4.30, называется системами с комбинированным управлением. Под комбинированным управлением или регулированием понимается такой метод построения замкнутой системы, который предполагает организацию контура регулирования по отклонению или ошибке и контура регулирования по задающему или возмущающему воздействию. В общем виде структурные схемы систем автоматического регулирования с комбинированным управлением представляются блок-схемами (рис. 4.35–4.37).

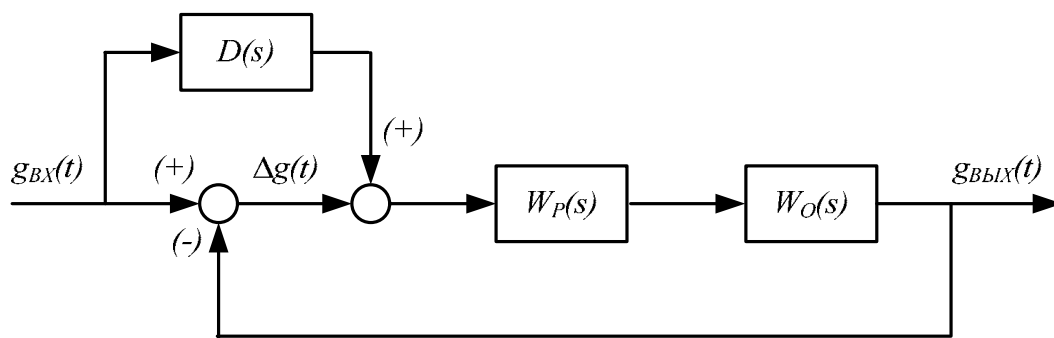


Рис. 4.35. Комбинированное управление с компенсацией ошибки по управлению: введение корректирующего устройства перед регулятором

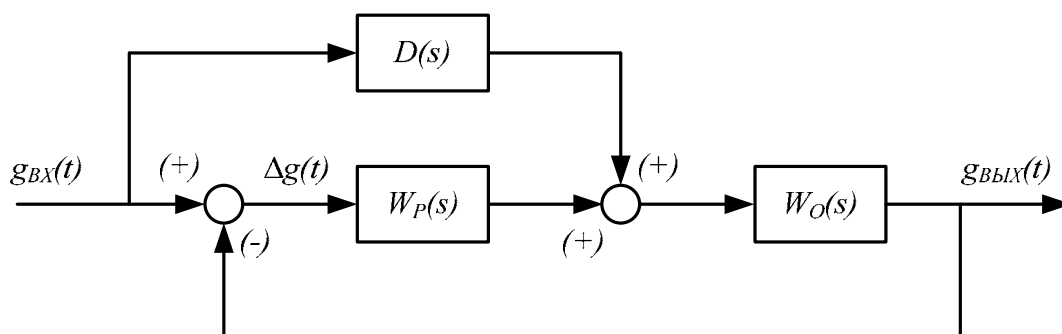


Рис. 4.36. Комбинированное управление с компенсацией ошибки по управлению: введение корректирующего устройства после регулятора

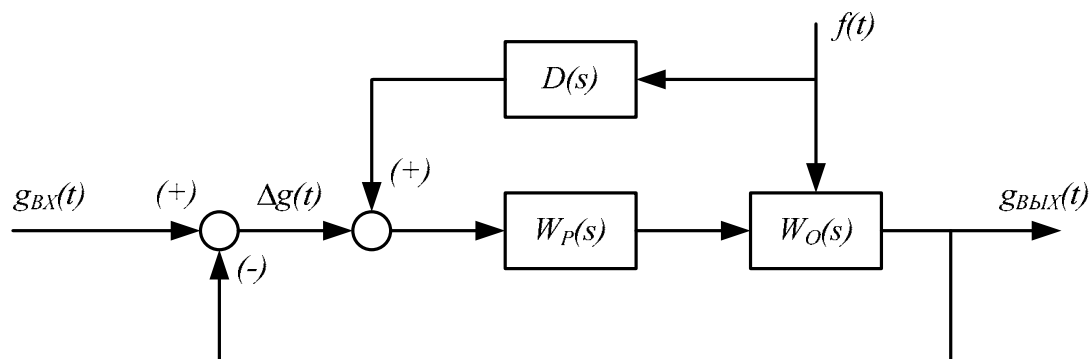


Рис. 4.37. Комбинированное управление с компенсацией ошибки по возмущению: введение корректирующего устройства перед регулятором

На рис. 4.35–4.37 приняты следующие обозначения: $g_{BX}(t)$, $g_{BbIX}(t)$ – входной и выходной сигналы САР соответственно; $f(t)$ – возмущающее воздействие; $D(s)$ – корректирующее устройство; $W_P(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_O(s)$ – передаточная функция объекта регулирования.

Первая и вторая структуры (рис. 4.35 и 4.37) компенсируют действие управляющего сигнала с разницей лишь в том, что в первом случае сигнал коррекции поступает на вход регулятора, а во втором – на его выход. С точки зре-

ния практической реализации передаточной функции корректирующего устройства $D(s)$, различие между этими структурами заключается в выводе эквивалентной передаточной функции объекта и нахождении желаемой передаточной функции $D(s)$ из условия полной инвариантности (условие полной компенсации ошибки системы по управлению). Так, например, для структуры (рис. 4.35) условие полной инвариантности системы по управлению будет иметь вид

$$D(s) = \frac{1}{W_o(s)}. \quad (4.16)$$

При практической реализации корректирующих устройств с передаточной функцией вида $D(s)$, удовлетворяющей условию (4.16), часто возникают значительные трудности, что приводит к невозможности полной компенсации ошибки системы. Поэтому на практике достаточно часто рассматривают варианты частичной компенсации ошибки системы.

Блок-схема (рис. 4.37) представляет собой структуру с комбинированным управлением, используемую для снижения ошибки от возмущающего воздействия. Условие полной инвариантности в этом случае будет иметь вид

$$D(s) = \frac{W_B(s)}{W_{оэ}(s)}, \quad (4.17)$$

где $W_B(s)$ – передаточная функция по данному возмущению в разомкнутой системе; $W_{оэ}(s)$ – эквивалентная передаточная функция объекта регулирования.

Недостатком систем регулирования при наличии описанных выше корректирующих устройств является:

- ✓ наличие требований к точной настройке передаточной функции корректирующего устройства;
- ✓ зависимость передаточной функции корректирующего устройства от параметров объекта регулирования. Их изменение в процессе работы САР приводит к ошибкам регулирования;
- ✓ сложность практической реализации цифровых корректирующих устройств высоких порядков.

Возможности коррекции для цифровых автоматических систем управления электроприводами значительно шире, чем для непрерывных систем. Это обусловлено тем, что для коррекции цифровых систем можно использовать не только цифровые методы, но и все известные методы коррекции непрерывных систем. Помимо этого, современный уровень вычислительных устройств позволяет реализовывать цифровые корректирующие устройства (ЦКУ) методом программирования на микроконтроллерах или ЭВМ практически без ограничений по условию реализуемости. В качестве примера структуры цифровой комбинированной системы управления следящим электроприводом рассмотрим блок-схемы, приведенные на рис. 4.38, 4.39.

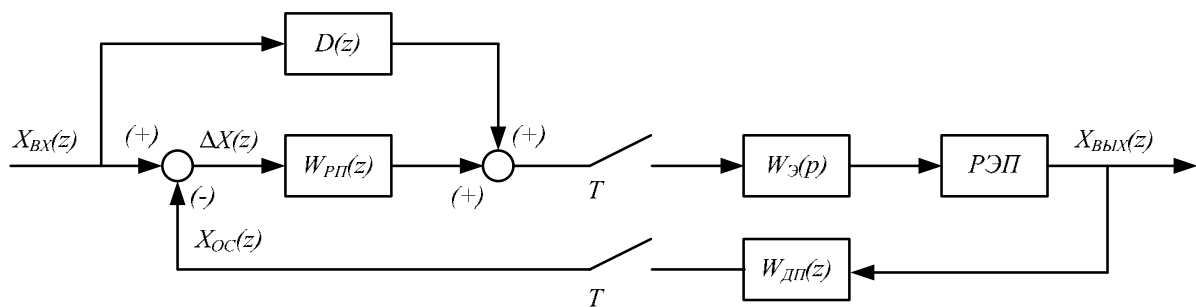


Рис. 4.38. Цифровая реализация комбинированной системы управления СЭП: $D(z)$ – ЦКУ; $W_{РП}(z)$ – цифровой регулятор положения; $W_Э(p)$ – экстраполятор нулевого порядка; $W_{ДП}(z)$ – дискретный датчик положения; $PЭП$ – регулируемый электропривод; T – период дискретизации по времени

Первая структура, наиболее просто реализуемая на практике, содержит: программно-реализованный контур положения и ЦКУ $D(z)$, контур регулирования скорости, представленный аналоговым РЭП (рис. 4.39). Достоинством такой структуры является простота ее реализации и расчета параметров передаточной функции ЦКУ. В зависимости от наличия ненулевых производных от входного сигнала $X_{BX}(z)$ передаточная функция $D(z)$ может принимать несколько значений. До недавнего времени ввиду малой производительности вычислительных устройств передаточная функция ЦКУ имела вид

$$D(z) = D_1(z) + D_2(z) = \alpha_1 \cdot (1 - z^{-1}) + \alpha_2 \cdot (1 - z^{-1})^2, \quad (4.19)$$

где $D_1(z), D_2(z)$ – разности первого и второго порядка; α_1, α_2 – коэффициенты ЦКУ. Однако в настоящий момент с ростом производительности микроконтроллеров такая проблема устранена.

С точки зрения достижения наивысшего быстродействия в передаче сигнала управления на исполнительный элемент электропривода наиболее целесообразно вводить сигналы цифровой коррекции (рис. 4.39).

Приведенная структура позволяет получить наибольшее быстродействие и точность при обработке заданного входного воздействия. Однако с практической точки зрения введение сигналов коррекции затруднено, поскольку такая структура реализуема только на полностью цифровом приводе.

Показанные выше варианты реализации структур с комбинированным управлением позволяют обеспечить условие полной инвариантности системы относительно управляющего воздействия. Это условие выполнимо только в том случае, если модель объекта регулирования достаточно подробно описана и соответствует реальному объекту при отсутствии параметрической неустойчивости. Для практической реализации наиболее прост вариант структуры, показанный на рис. 4.39, поскольку данная структура подразумевает наличие вычислительного устройства только в цифровом контуре положения. Контур тока и скорости являются аналоговыми и реализуются в виде регулируемого электропривода.

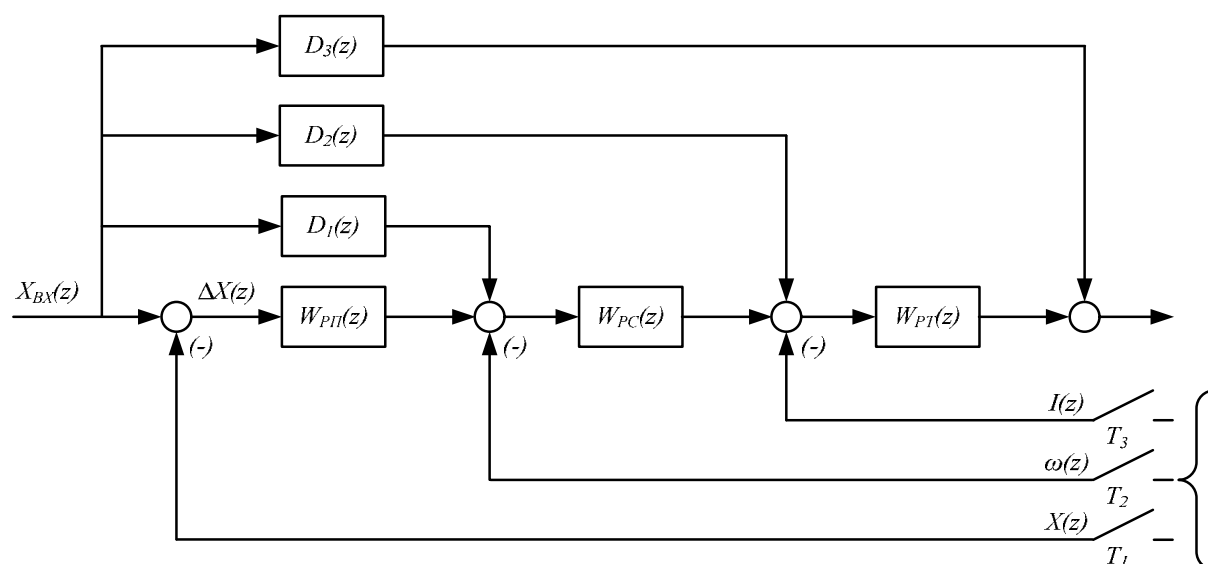


Рис. 4.39. Цифровая реализация комбинированной системы управления СЭП:
 $D_1(z), D_2(z), D_3(z)$ – цифровые корректирующие устройства; $W_{PP}(z)$ – цифровой регулятор положения; $W_{PC}(z)$ – цифровой регулятор скорости; $W_{PT}(z)$ – цифровой регулятор тока;
 T_1, T_2, T_3 – периоды дискретизации по времени в соответствующих контурах

4.8. Минимизация координатных ошибок на основе комбинированного управления следящими электроприводами

Теория комбинированных непрерывных автоматических систем управления показывает, что введение в систему сигнала, пропорционального первой, второй, третьей и т.д. производным управляющего воздействия, позволяет значительно снизить динамическую ошибку системы. Подобным же образом задача комбинированного управления решается в цифровых автоматических системах управления. Так, следящий электропривод, с цифровым управлением, приведенный на рис. 4.40, является комбинированной следящей системой, обеспечивающей инвариантность относительно задающих воздействий. Впервые принцип инвариантности был выдвинут Г.В. Щипановым и в дальнейшем развит в трудах В.С. Кулебакина, А. И. Кухтенко, Б. Н. Петрова, В. Ю. Рутковского.

Приведенная структура обеспечивает точное воспроизведение заданной траектории, движение при отсутствии помех и возмущений в обратной связи СЭП. При наличии трех ненулевых производных в сигнале задания по положению обусловленных порядком интерполятора свойство инвариантности относительно задающего воздействия обеспечивается выбором соответствующих

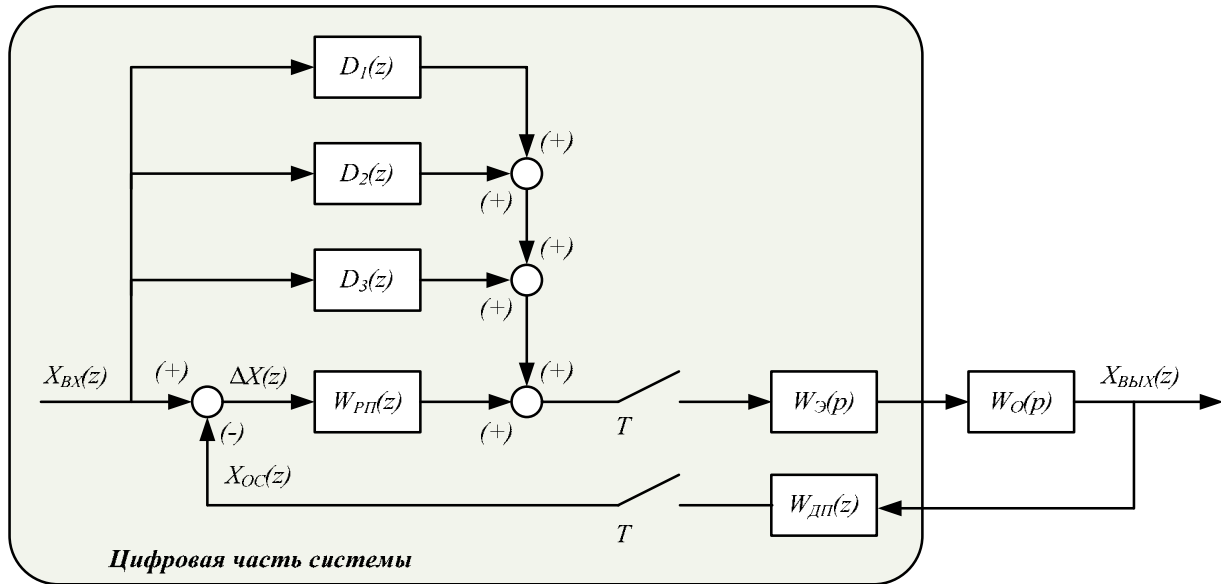


Рис. 4.40. Структурная схема следящего электропривода с цифровым комбинированным управлением

коэффициентов настроек алгоритма комбинированного управления – $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Условие абсолютной инвариантности следящего электропривода относительно задающего воздействия будет иметь вид

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = 0, \quad (4.20)$$

где C_0, C_1, C_2, C_3 – коэффициенты установившейся ошибки по положению, скорости, ускорению и рывку в дискретные моменты времени записываются в виде

$$\begin{cases} C_0 = W_{\Theta}(z) \Big|_{z=1}; \\ C_1 = T \cdot z \cdot \frac{dW_{\Theta}(z)}{dz} \Big|_{z=1}; \\ C_2 = T^2 \cdot z \cdot \left[\frac{d^2 W_{\Theta}(z)}{dz^2} \cdot z + \frac{dW_{\Theta}(z)}{dz} \right] \Big|_{z=1}; \\ C_3 = T^3 \cdot z \cdot \left[z^3 \cdot \frac{d^3 W_{\Theta}(z)}{dz^3} + 3 \cdot z \cdot \frac{d^2 W_{\Theta}(z)}{dz^2} + \frac{dW_{\Theta}(z)}{dz} \right] \Big|_{z=1}, \end{cases} \quad (4.21)$$

где T – период квантования по времени.

В замкнутом состоянии при наличии оптимизирующего фильтра на входе электропривода вида

$$W_{\Phi}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} \quad (4.22)$$

передаточная функция по управлению регулируемого электропривода с безинерционным регулятором тока и механическим редуктором может быть записана

$$W_{PЭП}(p) = \frac{K_H}{(T_0^2 p^2 + T_{PC} p + 1) \cdot p}, \quad (4.23)$$

где $T_0 = \sqrt{T_{PC} \cdot T_1}$; p – оператор Лапласа; T_{PC} – постоянная времени регулятора скорости; T_1 – постоянная времени входного фильтра, оптимизирующего реакцию системы на входное воздействие; $K_H = K_M / K_C$ – коэффициент передачи непрерывной части системы; K_M – коэффициент передачи механизма; K_C – коэффициент обратной связи по скорости.

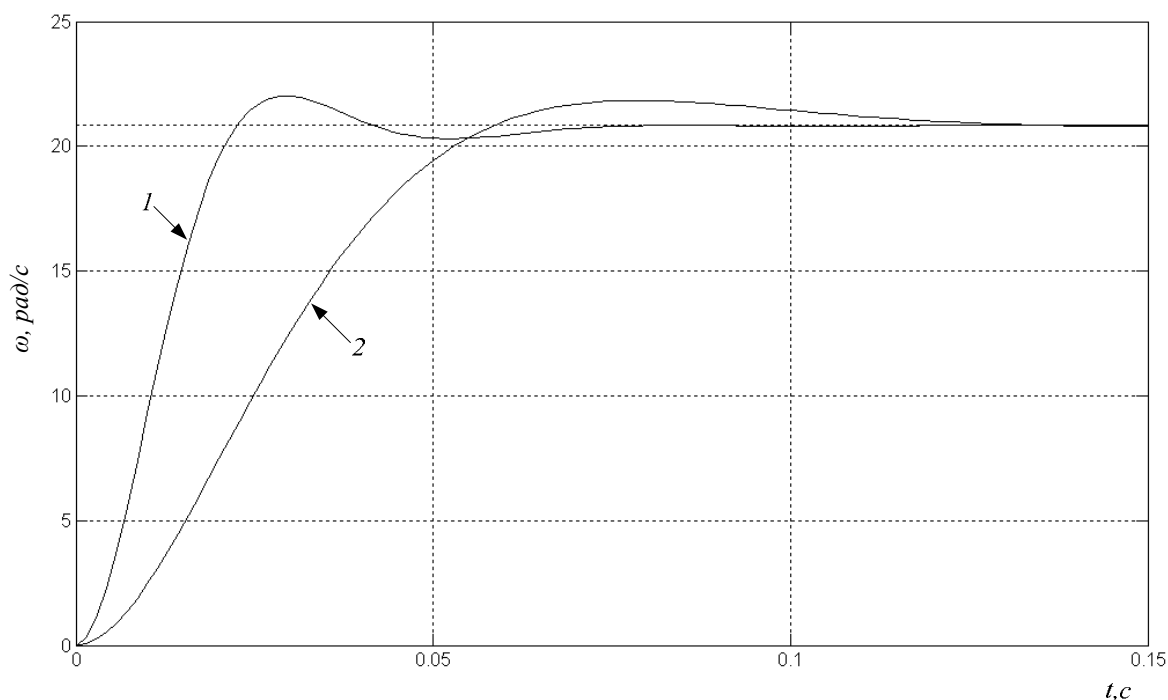


Рис. 4.41. Переходные процессы в контуре скорости при единичном входном воздействии: 1 – исходная линейная модель РЭП; 2 – упрощенная линейная модель РЭП, описанная выражением 4.23 (без редуктора)

Таблица 4.8

Показатели качества	Исходная модель	Упрощенная
Перерегулирование, %	5,72	4,82
Длительность переходного процесса, с	0,06	0,11

Сравнительная оценка основных показателей качества переходных процессов исходной линейной модели и упрощенной на рис. 4.41 показывает, что замена передаточной функции регулируемого электропривода на более простую функцию приводит к уменьшению перерегулирования на 1% и незначительному росту времени регулирования. В связи с этим можно заключить, что упрощение линейной модели РЭП не окажет существенного влияния на расчет коэффициентов настроек алгоритма комбинированного управления.

Для определения коэффициентов ошибок C_0, C_1, C_2, C_3 запишем Z -изображение непрерывной части системы совместно с экстраполятором нулевого порядка $W_o(p) = \frac{1-e^{-Tp}}{p}$ следующим образом:

$$W_o(p) = \frac{z-1}{z} \cdot \left[\frac{K_H}{(T_0^2 p^2 + T_{PC} p + 1) \cdot p^2} \right]. \quad (4.24)$$

Для получения Z -изображения функции $W_o(p)$ используем метод неопределенных коэффициентов. В этом случае функция $W_o(p)$ примет вид

$$W_o(p) = \frac{z-1}{z} \cdot \left[\frac{A1}{p} + \frac{B1}{p^2} + \frac{C1}{p-p_1} + \frac{D1}{p-p_2} \right], \quad (4.25)$$

где $p_1 = -a + jb, p_2 = -a - jb$ – комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения. Коэффициенты $A1, B1, C1, D1$, соответственно, определяются по выражениям

$$\begin{cases} B1 = K_H; \\ C1 = \frac{K_H}{p_1^2 \cdot (p_1 - p_2) \cdot T_0^2}; \\ D1 = \frac{K_H}{p_2^2 \cdot (p_2 - p_1) \cdot T_0^2}; \\ A1 = \frac{\frac{K_H}{T_0^2} - B1 \cdot (1-p_1) \cdot (1-p_2) - C1 \cdot (1-p_2) \cdot (1-p_1)}{(1-p_1) \cdot (1-p_2)}. \end{cases} \quad (4.26)$$

С учетом выражения (4.25) соответствующее Z -преобразование функции $W_o(p)$ будет иметь вид

$$W_o(z) = A1 + \frac{B1 \cdot T}{z-1} + \frac{C1 \cdot (z-1)}{z-e^{p_1 T}} + \frac{D1 \cdot (z-1)}{z-e^{p_2 T}}. \quad (4.27)$$

Подставляя значения коэффициентов $C1$ и $D1$ в выражение $W_o(z)$ и используя формулу Эйлера, получим выражение

$$W_o(z) = A1 + \frac{B1 \cdot T}{z-1} + \frac{K_H \cdot (z-1)}{T_0^2} \cdot \left[\frac{8 \cdot a \cdot b^2 \cdot z + M1}{F(z) \cdot N1} \right], \quad (4.28)$$

где $M1 = e^{-aT} \cdot [-8a \cdot b^2 \cdot \cos(b \cdot T) + \sin(b \cdot T) \cdot (4a^2 \cdot b - 4b^3)]$;

$$N1 = 4a^4 \cdot b^2 + 8a^2 \cdot b^4 + 4b^6;$$

$$F(z) = z^2 - 2z \cdot e^{-aT} \cdot \cos(b \cdot T) + e^{-2aT}.$$

Упрощая выражение (4.26), получим

$$W_o(z) = \frac{[A1 \cdot (z-1) + B1 \cdot T] \cdot F(z) \cdot T_0^2 \cdot N1 + K_H \cdot (z-1)^2 \cdot (8a \cdot b^2 \cdot z + M1)}{(z-1) \cdot T_0^2 \cdot F(z) \cdot N1}. \quad (4.29)$$

В общем виде структурная схема следящего электропривода с цифровым управлением, приведенная на рис. 4.33, может быть приведена к следующему виду.

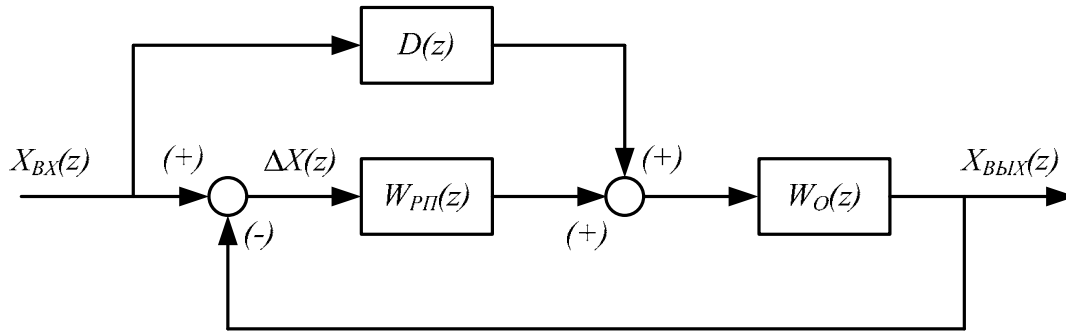


Рис. 4.42. Структурная схема следящего электропривода с комбинированным управлением

В соответствии со структурой (рис. 4.42) передаточная функция системы по ошибке будет иметь вид

$$W_{\Theta}(z) = \frac{1 - W_O(z) \cdot D(z)}{1 + W_O(z) \cdot W_{PI}(z)} = \frac{(z-1) \cdot [z^3 \cdot F(z) \cdot N1 \cdot T_0^2 - S(z) \cdot K(z)]}{z^3 \cdot [(z-1) \cdot F(z) \cdot T_0^2 \cdot N1 + S(z) \cdot K_{PI}]}, \quad (4.30)$$

где $D(z) = D_1(z) + D_2(z) + D_3(z) = \alpha_1 \cdot (1 - z^{-1}) + \alpha_2 \cdot (1 - z^{-1})^2 + \alpha_3 \cdot (1 - z^{-1})^3$ – передаточная функция цифрового корректирующего устройства, содержащая расчет сигналов, пропорциональных первой, второй и третьей разностям от входного сигнала;

$$S(z) = [A1 \cdot (z-1) + B1 \cdot T] \cdot F(z) \cdot T_0^2 \cdot N1 + K_H \cdot (z-1)^2 \cdot (8a \cdot b^2 \cdot z + M1);$$

$$K(z) = \alpha_1 \cdot z^2 + \alpha_2 \cdot (z-1) \cdot z + \alpha_3 \cdot (z-1)^2;$$

$W_{PI}(z) = K_{PI}$ – передаточная функция цифрового регулятора положения.

В соответствии с выражениями (4.27) и (4.19) при наличии цифрового корректирующего устройства коэффициенты установившихся ошибок в дискретные моменты времени будут иметь вид

$$\begin{cases} C_0 = 0; \\ C_1 = \frac{1 - B1 \cdot T \cdot \alpha_1}{B1 \cdot K_{PI}}; \\ C_2 = 2 \cdot T \cdot \frac{1 - A1 \cdot \alpha_1 - B1 \cdot T \cdot \alpha_2}{B1 \cdot K_{PI}}; \\ C_3 = 6T^3 \cdot \left[\frac{N1 \cdot T_0^2 \cdot (1 - 2e^{-aT} \cdot \cos(b \cdot T) + e^{-2aT}) \cdot (1 - A1 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) - B1 \cdot T \cdot \alpha_3)}{-K_H \cdot (8a \cdot b^2 + M1)} \right]. \end{cases} \quad (4.31)$$

В результате решения системы (4.31) с учетом условия абсолютной инвариантности (4.20) получим значения коэффициентов настроек алгоритма комбинированного управления

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{K_H \cdot T}; \\ \alpha_2 = \frac{1 - A1 \cdot \alpha_1}{K_H \cdot T}; \\ \alpha_3 = \frac{1 - A1 \cdot [\alpha_1 + \alpha_2]}{B1 \cdot T} - \frac{2K_H \cdot (8a \cdot b^2 + M1) \cdot \alpha_1}{2B1 \cdot T \cdot N1 \cdot T_0^2 \cdot (1 - 2e^{-a \cdot T} \cdot \cos(B1 \cdot T) + e^{-2a \cdot T})}. \end{cases} \quad (4.32)$$

Как следует из (4.32), полученные коэффициенты зависят не только от параметров регулируемого электропривода и механической части системы, но и от частоты квантования сигнала задания по времени. Поэтому коэффициенты настроек алгоритма комбинированного управления необходимо пересчитывать для конкретных частот. Ввиду того, что выражения имеют достаточно простой вид, расчет коэффициентов не требует больших вычислительных затрат.

Аналогичным образом коэффициенты могут быть рассчитаны для различных видов передаточных функций корректирующих устройств.

При отсутствии цифрового корректирующего устройства $D(z)=0$ коэффициенты установившихся ошибок в дискретные моменты принимают вид

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{B1 \cdot K_{PI}}; \\ C_2 = \frac{B1 \cdot T \cdot K_{PI} - 2 \cdot (1 + A1 \cdot K_{PI})}{B1^2 \cdot K_{PI}^2}; \\ C_3 = \frac{-3B1 \cdot T \cdot K_{PI}^2 \cdot \frac{F1 \cdot E1}{T_0^2 \cdot N1} + 6F1^2 + 12F1^2 \cdot A1 \cdot K_{PI} + 6 \cdot (F1 \cdot A1 \cdot K_{PI})^2}{B1^3 \cdot K_{PI}^3 \cdot F1^2} + \\ + \frac{-6 \cdot B1 \cdot T \cdot K_{PI} \cdot F1^2 - 6B1 \cdot T \cdot K_{PI}^2 \cdot A1 \cdot F1^2 + (B1 \cdot T \cdot K_{PI} \cdot F1)^2}{B1^3 \cdot K_{PI}^3 \cdot F1^2}, \end{cases} \quad (4.33)$$

где $F1 = 1 - 2e^{-a \cdot T} \cdot \cos(B1 \cdot T) + e^{-2a \cdot T}$.

Результаты расчета ошибок и коэффициентов (4.39) – (4.40) показывают, что введение параллельных цифровых корректирующих устройств позволяет повысить порядок астатизма системы и уменьшить ошибку системы управления. Так, в нашем случае, при наличии функции вида $D(z) = \alpha_1 \cdot (1 - z^{-1}) + \alpha_2 \cdot (1 - z^{-1})^2 + \alpha_3 \cdot (1 - z^{-1})^3$ система обладает астатизмом четвертого порядка. Адекватность приведенных выше выражений демонстрируют результаты моделирования в среде MatLab-7. В качестве тестовой траектории взята траектория, показанная на рис. 4.20. Переходные процессы в контурах положения и скорости при отсутствии и наличии сигнала цифровой коррекции приведены на рис. 4.43. Изменение контурной ошибки во времени на участках разгона/торможения свидетельствует о том, что разработанная комбинированная система управления следящим электроприводом позволяет значительно снизить ошибку слежения. Так, на этапах разгона/торможения максимальная координатная ошибка снижена на порядок. На участке движения с постоянной ко-

ординатной скоростью ошибка снижена до уровня одного значения дискретности датчика положения. Кроме того, из графика изменения скорости вала двигателя можно заключить, что введение цифровой коррекции позволяет снизить скоростную ошибку на участках разгона/торможения. График изменения скорости двигателя при отсутствии ЦКУ (1) проходит несколько ниже графика, полученного при наличии ЦКУ (2). Снижение скоростной и координатной ошибки в данном случае определено наличием сигналов ЦКУ.

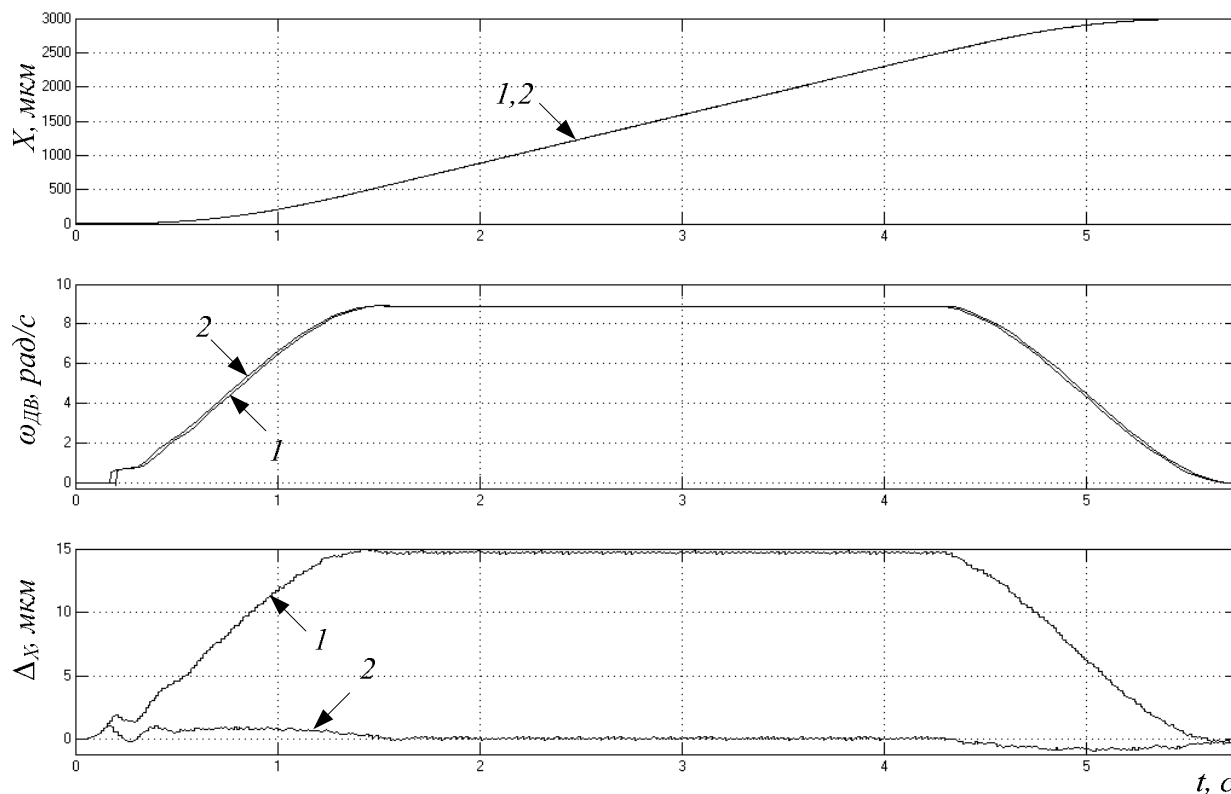


Рис. 4.43. Переходные процессы в контурах положения и скорости при отсутствии 1 и наличии 2 цифровой коррекции

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИФРОАНАЛОГОВОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

5.1. Концепция распределенного построения модели в средах MATLAB 7 – Delphi 7

Концепцию распределения модели в средах MATLAB 7 – Delphi 7 рассмотрим на примере построения модели следящего электропривода в среде MATLAB 7 и реализацию системы управления следящим электроприводом в среде Delphi 7. Модель в среде MATLAB 7 реализуется в подсистеме Simulink. Система управления в среде Delphi 7 в свою очередь представляет собой про-

граммный сервоконтроллер. Достоинства и недостатки такой взаимосвязи двух сред рассмотрены ниже.

Система MATLAB (Matrix Laboratory – матричная лаборатория) была разработана в конце 70-х годов прошлого века. В начале 80-х годов прошлого века Джон Литл (John Little) из фирмы MathWorks, Inc. разработал версии системы PC MATLAB для компьютеров класса IBM PC, VAX и Macintosh. В дальнейшем были созданы версии для рабочих станций Sun, компьютеров с операционной системой UNIX и многих других типов больших и малых ЭВМ. В настоящее время свыше десятка популярных компьютерных платформ поддерживают работу с MATLAB [56, 12]. В процессе исторического развития к расширению системы были привлечены крупнейшие научные школы мира в области математики, программирования и естествознания. Очередным шагом в развитии этой системы стало появление в 2004 году новой версии MATLAB 7.

Главными достоинствами MATLAB являются ее открытость и расширяемость. Большинство команд и функций системы реализованы в виде текстовых m-файлов и файлов на языке Си. Все поставляемые разработчиками файлы доступны для модификации, что дает пользователю возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач.

В новой версии MATLAB прослеживается тенденция к интеграции с такими популярными математическими системами, как Mathcad, Maple и Mathematica. Помимо этого осуществляется поддержка текстового процессора Microsoft Word и экспорта графики в слайды презентационной программы Microsoft PowerPoint. Это значительно упрощает создание презентаций и различных отчетов.

На сегодняшний день среда моделирования MATLAB 7 является языком высокого уровня для научно-технических расчетов, включающим в себя набор средств, необходимых для анализа данных, разработки алгоритмов и приложений.

Основными областями применения являются:

- математические расчеты;
- разработка алгоритмов;
- моделирование;
- анализ данных и визуализация;
- научная и инженерная графика;
- разработка приложений с интерфейсом пользователя.

Разработчики выделяют пять основных частей, из которых состоит MATLAB:

1. Язык MATLAB – это язык массивов и матриц высокого уровня с управлением функциями, структурами данных, вводом-выводом, а также с особенностями, присущими объектно-ориентированному языку программирования.

2. Среда MATLAB – набор инструментов и приспособлений, с помощью которых пользователь осуществляет разработку моделей, контроль и отладку.

3. Управляемая графика – графическая система MATLAB, которая позволяет осуществлять обработку изображений, различных графиков с помощью команд высокого уровня для визуализации двух- и трехмерных данных. Поддерживает разработку пользовательского интерфейса в среде MATLAB.

4. Библиотека математических функций – набор вычислительных алгоритмов разной степени сложности (расчет функций синуса, косинуса, преобразование Фурье и др.).

6. Программный интерфейс – библиотека, которая позволяет использовать языки программирования: Си, Фортран. Имеет средства для вызова программ из MATLAB.

При моделировании сложных систем особое место занимает интегрированная в MATLAB программная система Simulink. Она создана для моделирования, имитации и анализа нелинейных динамических систем и устройств, заданных в виде системы блоков. Simulink обеспечивает прямой доступ к широкому спектру инструментов анализа и проектирования, расположенных в библиотеке блоков (Blocksets) для специализированных приложений. Помимо стандартных блоков пользователь может создавать свои специализированные библиотеки, а также генерировать Си код из любого блока.

К недостаткам среды MATLAB следует отнести невозможность реализации управления аппаратными средствами персонального компьютера в реальном времени. Например, управление модулями дискретного и аналогового ввода-вывода при реализации цифро-аналоговых следящих систем, построенных на базе персонального компьютера. В связи с этим наиболее универсальным с точки зрения моделирования и управления электроприводами технологического оборудования является вариант взаимодействия программно-аппаратных средств, приведенный на рис. 5.1. Управляющая программа формирует массив заданий по положению для каждой координаты, после чего данные поступают в MATLAB через Workspace – область, содержащую все переменные эталонной модели электромеханического объекта или системы. Система управления, реализованная по такому принципу, позволяет значительно сократить время, необходимое для разработки и отладки алгоритмов управления электроприводами.

Таким образом, экспериментальному этапу предшествует апробация разработанных алгоритмов на модели, управляемой при помощи программного обеспечения, которое используется не только для моделирования, но и для управления электроприводом в реальном времени. Устраняя все неисправности в управляющей программе на этапе моделирования, исключается необходимость в отладке алгоритмов в реальных условиях.



Цифровая часть системы

Центральный процессор

Шина ISA

Модуль ЦАП

Модуль дискретного ввода/вывода

РЭП

$U_{\Delta c}$

$\omega_{\Delta B}$

m

L_B

V

Дискретные сигналы от конечных выключателей

168

Управляющая программа разработана с помощью среды разработки Borland Delphi 7, которая представляет собой программную среду визуального программирования и создания как приложений «клиент/сервер», так и общих приложений для Microsoft Windows. Появлению этой версии предшествовал этап эволюции, прошедший несколько ступеней в своем развитии, начиная от языка разработки программного обеспечения Borland Pascal, работавшего под управлением операционной системы MS-DOS, и первой версии Delphi, появившейся в 1995 году, до последней версии Delphi 7, вышедшей в 2002 году.

Среда разработчика представляет собой полнофункциональный инструмент, объединяющий все средства, необходимые для создания приложений: редактор исходных текстов, менеджер проектов, палитра компонентов, инспектор объектов и ряд дополнительных утилит (встроенный отладчик, браузер объектов, дизайнер меню и т.п.). Более того, она обеспечивает возможность подключения к среде внешних утилит.

Основой Delphi является язык Object Pascal, разработанный фирмой Borland. Его основными достоинствами являются простота реализации различных алгоритмов, поддержка принципов объектно-ориентированного программирования (ООП), а также в отличие от Си однозначность в реализации циклов и условий. Реализованные алгоритмы могут быть конвертированы в динамическую библиотеку DLL (Dynamic-Link Libraries). Это значительно упрощает процесс написания и коррекции программ в дальнейшем, а также позволяет подключать разработанные алгоритмы к программам, написанным на других языках высокого уровня.

Кроме этого, следует отметить простоту при работе со специфическим оборудованием, таким, как модули дискретного или аналогового ввода-вывода. Единственным недостатком при этом является отсутствие жестко установленного минимального гарантированного времени срабатывания. Прежде всего, это обусловлено тем, что в качестве операционной системы используется среда Microsoft Windows, работающая в режиме «мягкого» реального времени. Однако с точки зрения реализации разработанного программного обеспечения в режиме, близком к «жесткому» реальному времени, оказывается достаточным применения персонального компьютера с тактовой частотой процессора 266 МГц.

5.2. Пример кинематической цепи механизма

В качестве механизма для исследуемого электропривода будем использовать передачу винт-гайка качения (рис. 5.3.). В настоящее время такая передача является наиболее распространенным видом тягового устройства для станков с числовым управлением и другого оборудования. Механизм винт-гайка качения используется в приводе подач столов, суппортов, траверс почти всех станков

малых и средних размеров, а также тяжёлых станков при перемещениях. Основными преимуществами таких механизмов являются:

- возможность передачи больших усилий;
- низкие потери на трение;
- возможность полного устранения зазоров в механизме и создание натяга, обеспечивающего высокую жесткость;
- малая изнашиваемость, высокая точность, равномерность движения, чувствительность к микроперемещениям.

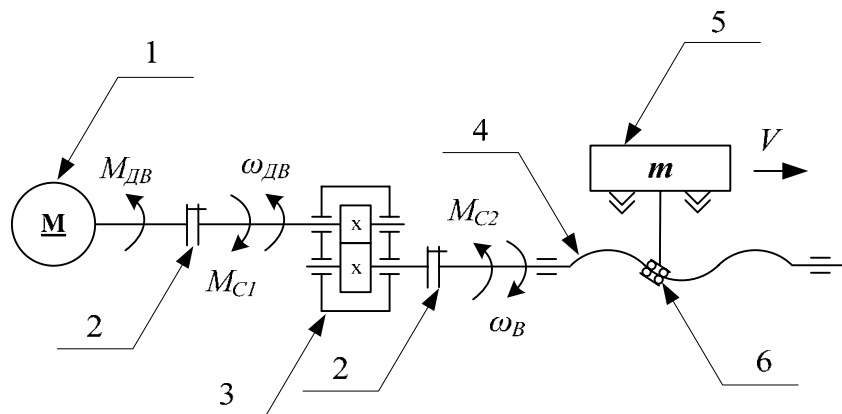


Рис. 5.3. Кинематическая схема механизма

Принятые обозначения: 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – ходовой винт; 5 – перемещаемая масса; 6 – гайка качения.

Расчет параметров кинематической цепи механизма проведен на основании двухмассовой схемы замещения механизма, приведенной на рис. 5.4.

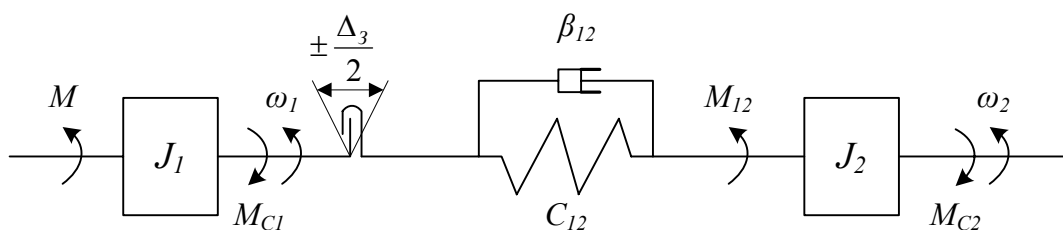


Рис. 5.4. Расчетная схема замещения механизма

Структурная схема механической системы, соответствующая расчетной схеме замещения приведена, на рис. 5.5.

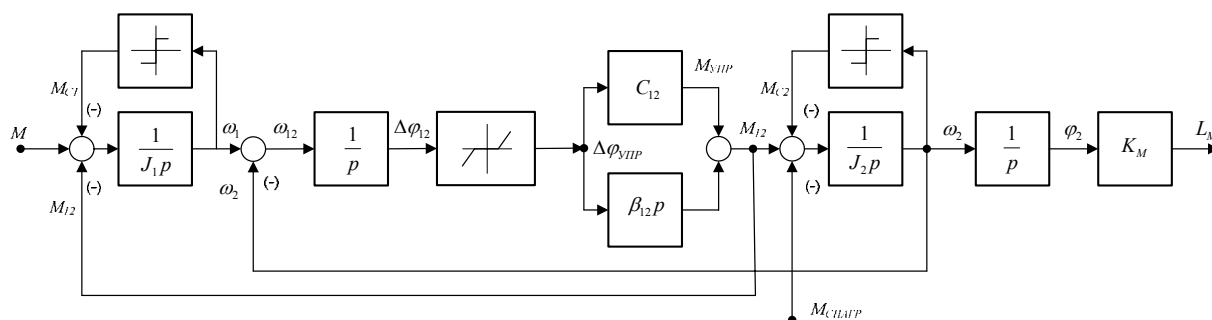


Рис. 5.5. Структурная схема механической системы

В основе построения структурной схемы (рис. 5.5) используется система уравнений, описывающая двухмассовую упругую механическую систему:

$$\begin{cases} M - M_C - M_{12} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_C = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \end{cases}, \quad (5.1)$$

где M – электромагнитный момент двигателя; M_{12} – приведенный момент силы упругого взаимодействия между первой и второй массой; M_C – момент сопротивления на валу двигателя; C_{12} – эквивалентная угловая жесткость механизма; J_1, J_2 – моменты инерции первой и второй масс; φ_1, φ_2 – угловое положение вала двигателя и выходного вала механизма.

Исходные данные к расчету параметров модели механической части системы приведены в табл. П.1.

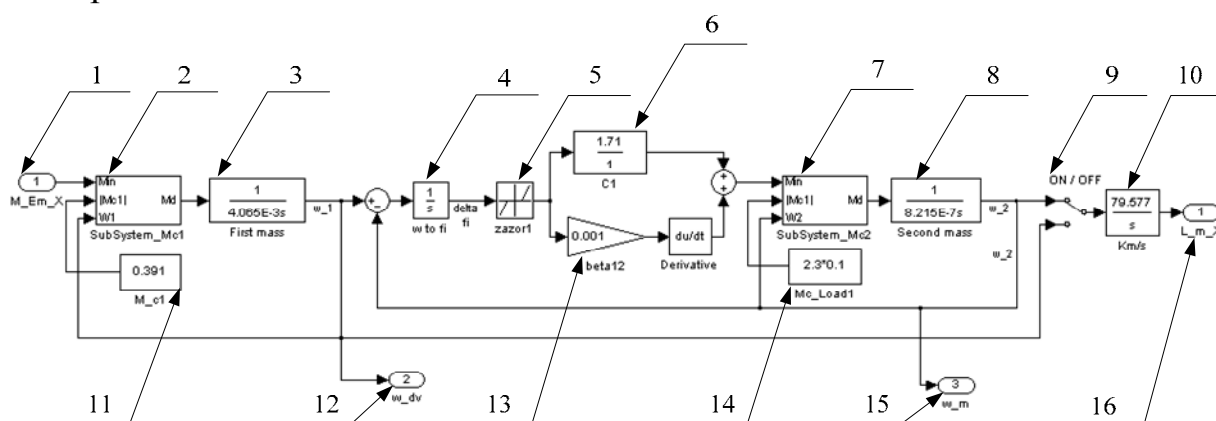


Рис. 5.6. Модель механической части системы в среде MATLAB Simulink

Основными элементами механической части системы в среде MATLAB Simulink являются:

- 1 – входной сигнал в механическую подсистему, представляющий собой электромагнитный момент двигателя;
- 2 – подсистема, учитывающая релейную характеристику момента сопротивления на валу первой массы;
- 3 – звено, учитывающее момент инерции первой массы;
- 4 – звено интегратора;
- 5 – звено, учитывающее зазор, приведенный к валу двигателя;
- 6 – эквивалентная угловая жесткость механизма C_{12} ;

7 – подсистема, учитывающая характеристику релейную характеристику момента сопротивления на валу первой массы (подсистема аналогична блоку 2);

8 – звено, учитывающее момент инерции второй массы;

9 – переключатель, переводящий двухмассовую механическую систему (ДМС) «состояние ON» к одномассовой «состояние OFF» и обратно;

10 – звено, учитывающее коэффициент передачи механизма с интегратором, на выходе которого имеем перемещение механизма вдоль оси X ;

11 – момент сопротивления типа сухого трения на валу первой массы;

12 – выход механической подсистемы в виде скорости двигателя;

13 – внутреннее вязкое трение β_{12} ;

14 – момент, равный сумме момента сопротивления на валу второй массы и момента нагрузки;

15 – выход механической подсистемы в виде скорости второй массы;

16 – выход механической подсистемы в виде перемещение механизма вдоль оси X .

Наличие двух дополнительных выходов в модели механической подсистемы (блоки 12 и 15) обусловлено тем, что выходные сигналы скорости первой и второй массы подключены к цифровому осциллографу, находящемуся в контуре положения.

Под подсистемой в среде Simulink понимается часть модели, построенная в виде блоков и объединенная в один общий блок со своими, присущими только этому блоку параметрами, входами и выходами.

Подсистема, представленная блоком 2 (рис. 5.6), показана на рис. 5.7,а. Ее функциональное назначение в данной системе поясняет блок-схема на рис. 5.7,б. Из блок-схемы видно, что подсистема формирует релейную характеристику момента сопротивления типа сухого трения на валу первой массы M_{c1} и рассчитывает значение выходного сигнала подсистемы в виде разности:

$$M = M - M_{c1} - M_{12}. \quad (5.2)$$

Функциональное назначение основных блоков подсистемы (см. рис. 5.7,а) следующее. Блоки 1, 7, 8 представляют собой входы подсистемы: 1 – электромагнитный момент двигателя; 7 – величина момента сопротивления типа сухого трения на валу первой массы; 8 – скорость двигателя. Блок 6 является выходом рассматриваемой подсистемы. Блок 5 – переключатель, позволяющий переводить подсистему в два состояния. В первом случае «состояние ON» подсистема учитывает влияние момента сопротивления на валу первой массы. Во втором случае «состояние OFF» подсистема не учитывает влияние момента сопротивления. Блоки 14, 15 учитывают величину и знак момента сопротивления в зависимости от направления вращения вала двигателя. Группа блоков 2, 3, 4, 10-13 реализует три зоны при изменении момента сопротивления по его релейной характеристике. Первая зона – момент сопротивления равен $-M_{c1}$, вторая зона – $M_{c1} = 0$, третья зона – момент сопротивления равен M_{c1} .

Необходимость разработки приведенной подсистемы (рис. 5.7) вызвана тем, что в среде Simulink отсутствует стандартная библиотека, реализующая

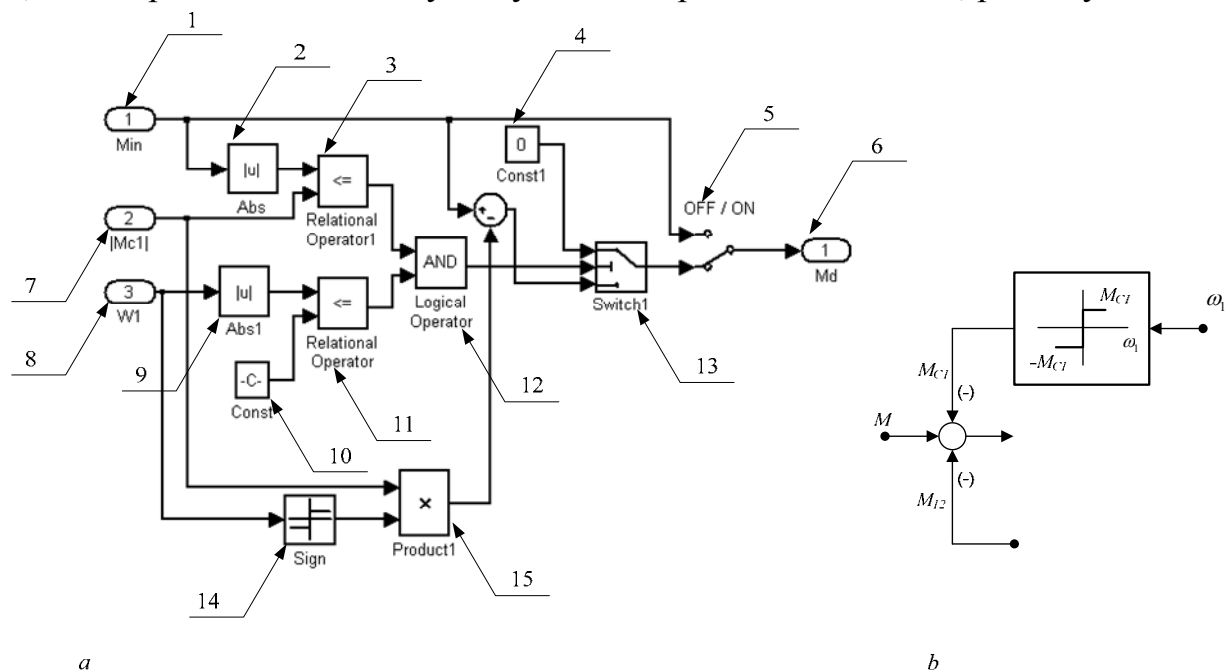


Рис. 5.7. Механическая подсистема: *a* – модель в среде Simulink; *b* – блок-схема механической подсистемы)

релейную характеристику момента сопротивления (рис. 5.7,*b*). Кроме того, момент сопротивления на валу первой массы имеет реактивный характер. Следовательно, в зависимости от направления вращения вала двигателя величина M_{cl} должна изменять знак.

5.3. Модель цифро-аналогового следящего электропривода постоянного тока

Большинство современных следящих электроприводов представляет сложную многоконтурную систему с обратной связью по положению. В состав таких систем входят цифро-аналоговый или цифровой регулируемый электропривод, цифровая система управления, механическая система, цифровой датчик положения. Цифровая система управления реализуется на базе персонального компьютера с установленными модулями цифрового и аналогового ввода-вывода.

В настоящее время существует несколько методик синтеза структуры следящего электропривода, построенных по системе подчиненного регулирования. Наибольшее распространение получили методики, предложенные известными учеными Кесслером и Поздеевым А. Д.

Методика Кесслера определяет желаемые частотные характеристики разомкнутой системы и характеристики корректирующих цепей по заданным показателям качества. При проектировании электроприводов, имеющих многоконтурную структуру с последовательной коррекцией, наибольшее распростра-

нение получили настройки на модульный и симметричный оптимумы. Сложность в реализации этой методики заключается в решении уравнений высоких порядков.

В нашем случае для расчета и построения модели целесообразно использовать методику Поздеева А. Д. Это определяется тем, что в отношении системы, приведенной на рис. 5.2, существует ряд рекомендаций по выбору той или иной структуры РЭП (исходя из параметров структуры СЭП). Предложено несколько точек настройки при синтезе линеаризованной САУ СЭП. Под точкой настройки понимается группа безразмерных коэффициентов $A_*, B_*, C_*, A_{*0}, k_{\omega}$, определяющих параметры настройки регуляторов тока, скорости и положения, а также характер переходных процессов в соответствующих контурах. Так, для структуры СЭП с пропорциональным регулятором положения (П-РП) рекомендуется 6 точек настройки. Ввиду того, что во многих регулируемых электроприводах контуры тока и скорости реализованы на основе ПИ-регуляторов, то в соответствии с рекомендациями в качестве точек настройки следует выбирать точки 3 и 5.

Экспериментально на имитационной модели СЭП установлено, что наиболее предпочтительным является выбор 5-й точки настройки, поскольку в этом случае характер переходного процесса по скорости и положению наиболее близок к соответствующим переходным процессам, полученным в реальных условиях эксплуатации.

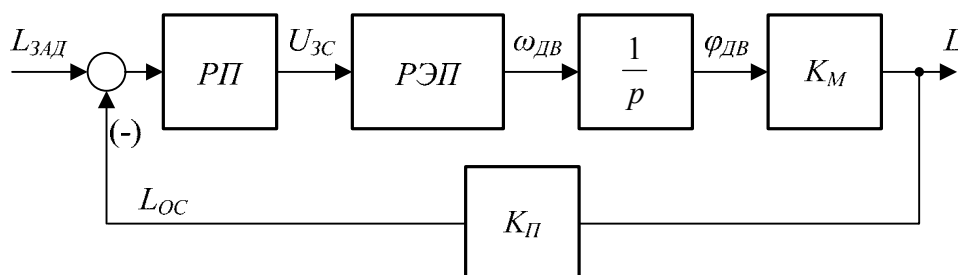


Рис. 5.8. Структурная схема линеаризованной САУ СЭП

В основе модели цифроаналогового следящего электропривода (ЦАСЭП) лежит модель линеаризованного СЭП. Основным допущением при синтезе линеаризованной структуры СЭП является наличие идеальной кинематической цепи механизма (идеально жесткая связь с отсутствием зазоров в передачах), а также функционирование элементов на линейных участках. Структура линеаризованной САУ СЭП приведена на рис. 5.8, где приняты следующие обозначения:

$L_{ЗД}$ – заданное перемещение; $РП$ – регулятор положения; $РЭП$ – регулируемый электропривод; K_M – коэффициент передачи механизма; $K_{П}$ – коэффициент обратной связи по положению; $\omega_{ДВ}, \varphi_{ДВ}$ – соответственно, скорость и положение вала двигателя.

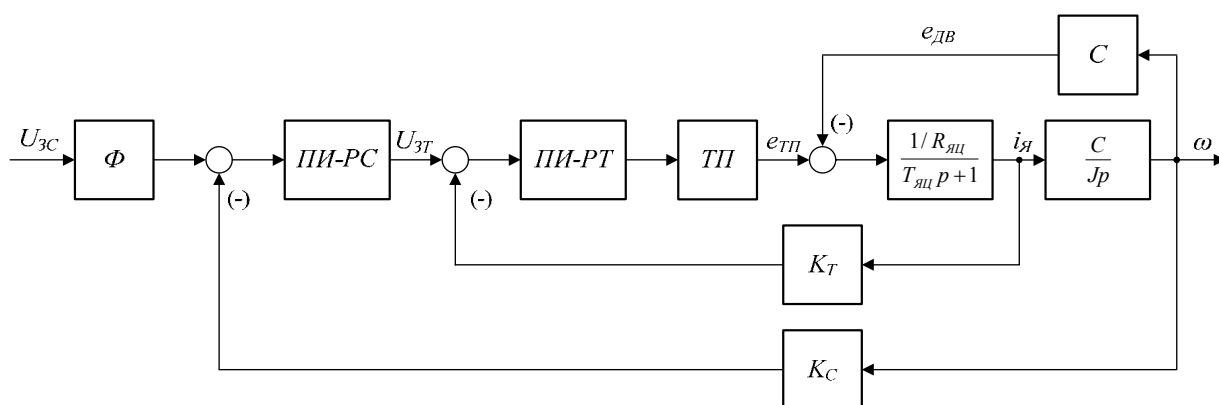


Рис. 5.9. Двухконтурная структурная схема РЭП подчиненного регулирования

В соответствии с рекомендациями двухконтурная структура подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами тока и скорости представляется схемой, приведенной на рис. 5.9. Структура системы электропривода является двукратно-интегрирующей и обеспечивает высокие динамические показатели РЭП.

Основные обозначения:

Φ – входной фильтр, оптимизирующий реакцию РЭП на ступенчатое управляющее воздействие;

$ПИ-РС$ – ПИ-регулятор скорости; $ПИ-РТ$ – ПИ-регулятор тока; $ТП$ – тиристорный преобразователь; K_T – коэффициент обратной связи по току; K_C – коэффициент обратной связи по скорости.

Безразмерные коэффициенты оптимизации САУ СЭП для пятой точки настройки представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Точка настройки	Коэффициенты				
	A_*	B_*	C_*	A_{*0}	k_ω
5	0,88	0,21	0,74	0,486	0,286

В соответствии с методикой Поздеева А.Д. параметры регуляторов тока, скорости и положения определяются по выражениям (5.3) – (5.8).

Коэффициент усиления регулятора скорости:

$$K_{PC} = \frac{A_* \cdot (J_1 + J_2) \cdot K_T \cdot \omega_p}{c \cdot K_C \cdot C_*}, \quad (5.3)$$

где c – конструктивный коэффициент двигателя; J_1, J_2 – моменты инерции первой и второй масс; ω_p – резонансная частота.

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{PC} = \frac{A_*}{B_*} \cdot \frac{C_*}{\omega_p} \quad (5.4)$$

Постоянные времени входного фильтра, оптимизирующего реакцию системы на входное воздействие:

$$T_1 = \frac{1}{B_*} \cdot \frac{C_*}{\omega_p} \cdot A_{*0}; T_2 = T_{PC}. \quad (5.5)$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$K_{PT} = \frac{T_{яц} \cdot R_{яц}}{K_{ТП} \cdot K_T} \cdot \frac{\omega_p}{C_*}, \quad (5.6)$$

где $T_{яц}$ – постоянная времени якорной цепи; $R_{яц}$ – сопротивление якорной цепи двигателя; $K_{ТП}$ – коэффициент передачи тиристорного преобразователя;

Постоянная времени регулятора тока

$$T_{PT} = T_{яц}. \quad (5.7)$$

Коэффициент усиления регулятора положения

$$K_{PP} = \frac{K_\omega \cdot K_C \cdot \omega_p}{K_{П} \cdot K_M \cdot C_*}, \quad (5.8)$$

где K_M – коэффициент передачи механизма.

Достоверность расчетов параметров линейной модели, построенной в соответствие с приведенной структурой (рис. 5.8) подтверждает оценка ожидаемых (в соответствии с методикой расчета параметров модели) и полученных результатов моделирования. Основные показатели качества переходных процессов показаны в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Тип регулятора	Точка настройки	Ожидаемые показатели переходных процессов			Полученные показатели переходных процессов		
		$\sigma, \%$	$t_{PV}^{(1)}, c$	$t_{PV}^{(2)}, c$	$\sigma, \%$	$t_{PV}^{(1)}, c$	$t_{PV}^{(2)}, c$
П-РП	5	4,5	0,0346	0,0346	4,92	0,0348	0,0348

В табл. 5.2 приняты следующие обозначения: σ – перерегулирование; $t_{PV}^{(1)}$ – время первого согласования (первого вхождения в 5%-ную зону) при отработке ступенчатого изменения пути; $t_{PV}^{(2)}$ – время переходного процесса (окончательного вхождения в 5%-ную зону) при отработке ступенчатого изменения пути.

Анализ полученных и ожидаемых показателей качества переходных процессов позволяет заключить, что система настроена достаточно точно (рис. 5.10). Время регулирования и время согласования практически совпадают. Расхождение по времени регулирования составляет не более 0,6%. Полученное значение перерегулирования незначительно превышает ожидаемое (на 0,42%). Такое расхождение в значительной степени обусловлено тем, что передаточная функция тиристорного преобразователя представлена пропорциональным звеном.

На основании полученной линейной модели СЭП разработана модель цифроаналогового следящего электропривода, учитывающая ряд нелинейностей не только в цифровой части системы, но и в контуре РЭП. Основные допущения, принятые при моделировании РЭП нелинейной моделью:

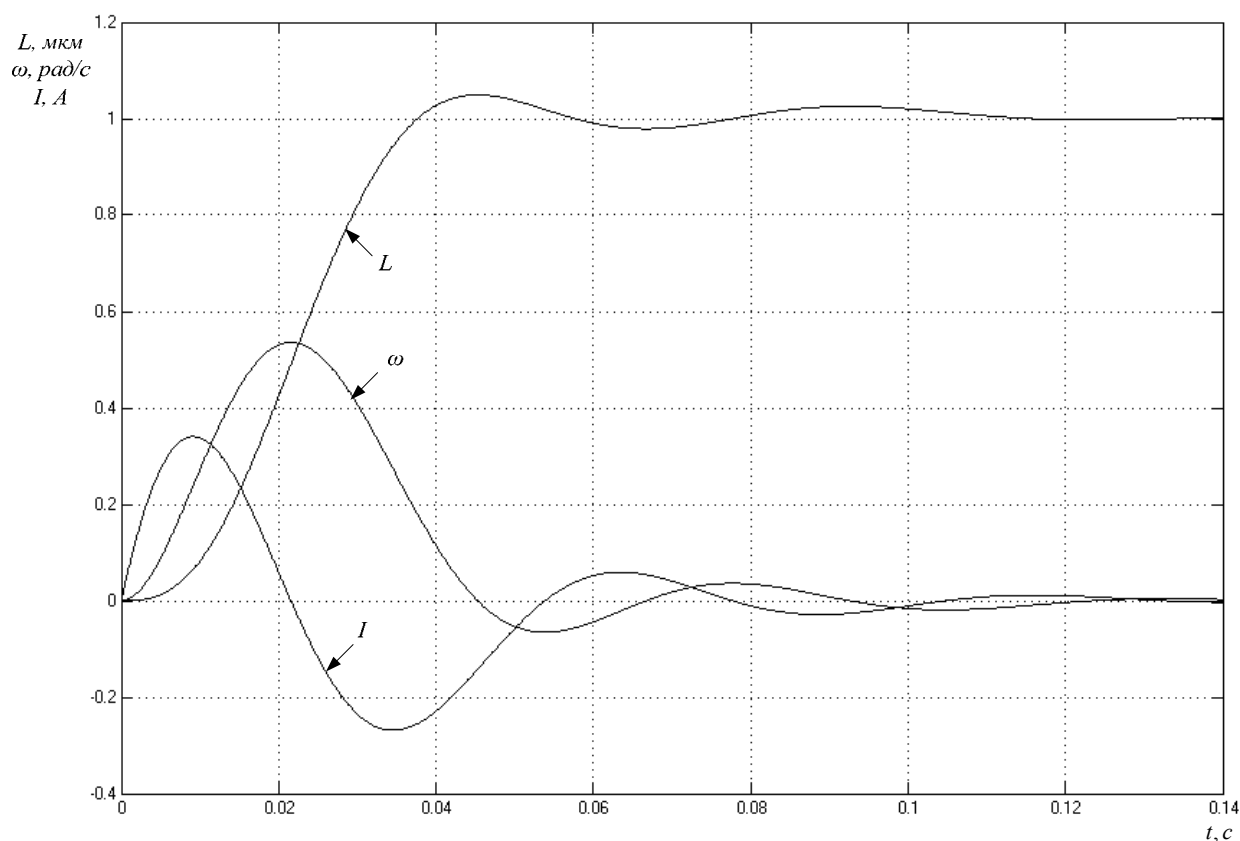


Рис. 5.10. Переходные процессы в контурах тока, скорости и положения при отработке единичного ступенчатого воздействия и отсутствии нагрузки:

L – положение механизма; ω – скорость вала двигателя; I – ток якоря двигателя

- тиристорный преобразователь принят пропорциональным звеном;
- не учитывается блок нелинейного токоограничения, предназначенный для ограничения максимально допустимого тока якоря в функции частоты вращения;
- не учитываются свойства адаптивного регулятора, предназначенного для изменения коэффициента усиления и постоянной времени интегрирования регулятора скорости в функции частоты вращения;
- введены ограничения регуляторов тока, скорости, положения на уровне $\pm 10V$ и ограничение выходного сигнала тиристорного преобразователя;
- механическая часть электропривода представлена двухмассовой моделью. Модель механической части системы в среде MATLAB Simulink описана в параграфе 5.2.

На основании данных допущений разработана нелинейная модель аналогового следящего электропривода, структурная схема которого приведена на рис. 5.11.

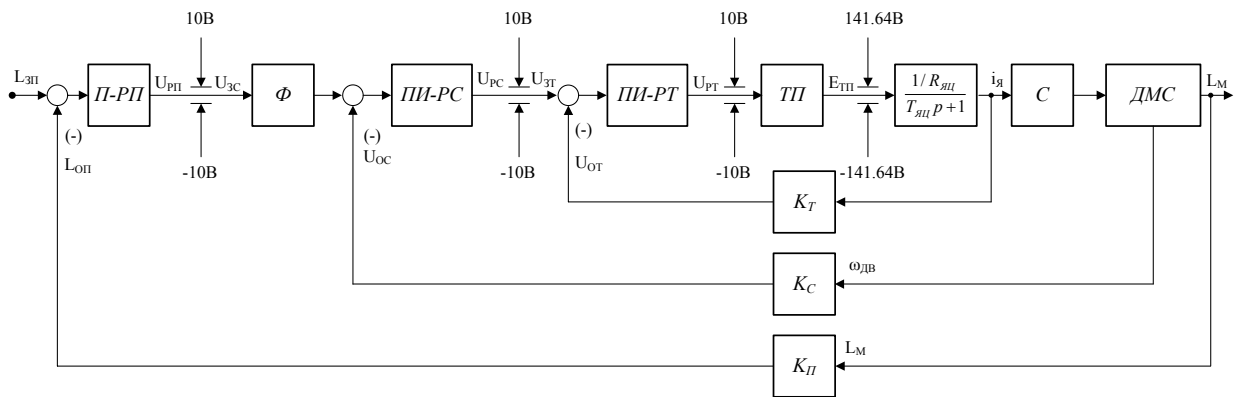


Рис. 5.11. Структурная схема нелинейного аналогового СЭП: $П-РП$ – пропорциональный регулятор положения; Φ – входной фильтр РЭП; $ПН-РС$ – ПИ-регулятор скорости; $ПН-РТ$ – ПИ-регулятор тока; $ДМС$ – двухмассовая механическая система; K_T – коэффициент обратной связи по току; K_C – коэффициент обратной связи по скорости; K_L – коэффициент обратной связи по положению

5.4. Модель цифро-аналогового СЭП с комбинированным управлением

Используя принципы сигнальной адаптации, структуру ЦАСЭП представим с учетом комбинированного управления (рис. 5.12).

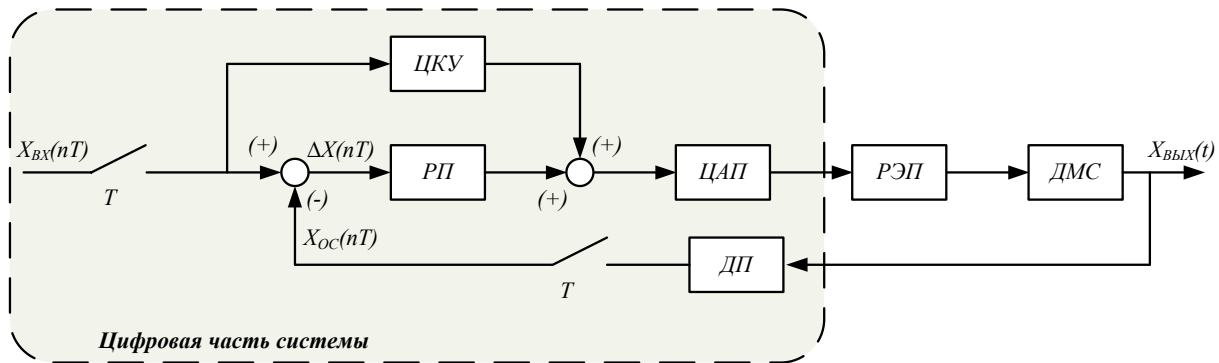


Рис. 5.12. Структурная схема ЦАСЭП с комбинированным управлением

Основными элементами цифровой части системы являются цифровой регулятор положения ($РП$), цифровое корректирующее устройство ($ЦКУ$), цифроаналоговый преобразователь ($ЦАП$), дискретный датчик углового перемещения. Цифровое корректирующее устройство является элементом сигнальной адаптации и обеспечивает инвариантность относительно возмущений, возникающих в управляющем сигнале. Методика построения $ЦКУ$, а также расчет коэффициентов комбинированного управления для следящей системы представлены в главе 4.

Формирование сигнала задания по положению $X_{вх}(nT)$, расчет сигнала коррекции и регулятора положения, обработка датчика положения осуществляется одним вычислительным устройством, построенным на базе персонального компьютера. Поэтому интервалы квантования по времени всех сигналов в

цифровой части системы равны или кратны длительности T - периоду сигнала центрального процессора.

В общем виде дискретный датчик положения представляется в виде нелинейной цепи элементов, осуществляющих преобразование аналоговой входной величины X_{BX} в дискретный сигнал $X_{ВЫХ}(nT)$ с квантованием по времени и уровню. Цифровой датчик положения содержит идеальный импульсный элемент ИЭ (ключ) с периодом дискретности T , элемент запаздывания $e^{-\tau}$, нелинейный элемент НЭ (характеризующий квантование по уровню АЦП) и фиксирующий элемент ФЭ. Структурная схема датчика положения приведена на рисунке 5.13,а.

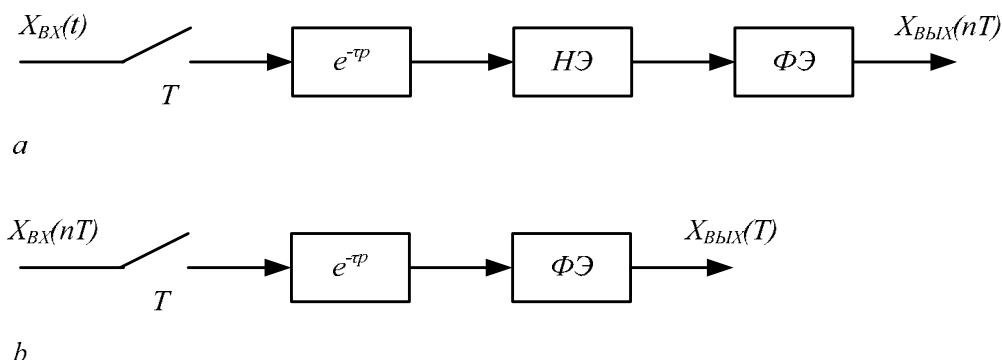


Рис. 5.13. Структурные схемы дискретного датчика положения *a* и ЦАП *b*

Цифро-аналоговый преобразователь представляется в виде схемы (рис. 5.13,б, содержащей идеальный импульсный элемент, элемент запаздывания $e^{-\tau}$, фиксирующий элемент ФЭ (экстраполятор нулевого порядка).

Передаточная функция экстраполятора нулевого порядка описывается выражением

$$W_{\text{Э}}(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}, \quad (5.9)$$

где T – период дискретности импульсного элемента.

Элементы запаздывания $e^{-\tau}$ учитывают время, затраченное цифровым устройством на обработку входной информации. Величины времени запаздывания τ во всех элементах принимаем равным одному значению.

Нелинейные элементы НЭ являются квантователями по уровню и имеют ступенчатую характеристику вида, представленного на рис. 5.14. Единица младшего разряда Δ квантователя определяется выражением

$$\Delta = \frac{M}{2^m - 1}, \quad (5.10)$$

где M – значение квантуемой величины, соответствующее максимальному значению m -разрядного двоичного кода. Ввиду специфических свойств квантования сигналов по уровню, обусловленных нелинейностью характеристик квантователей, пренебрежение ими не допустимо, так как это может оказать суще-

ственное влияние на результаты расчетов качественных показателей цифроаналоговой системы управления.

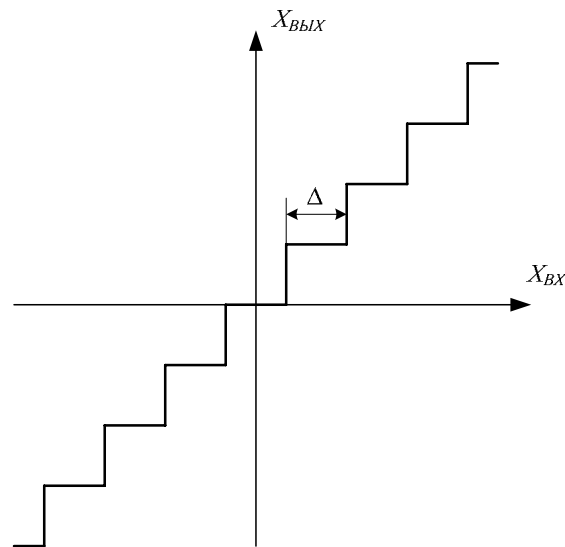


Рис. 5.14. Статическая характеристика элемента квантования по уровню

На рис. 5.15 приведена модель ЦАСЭП с комбинированным управлением в среде Simulink.

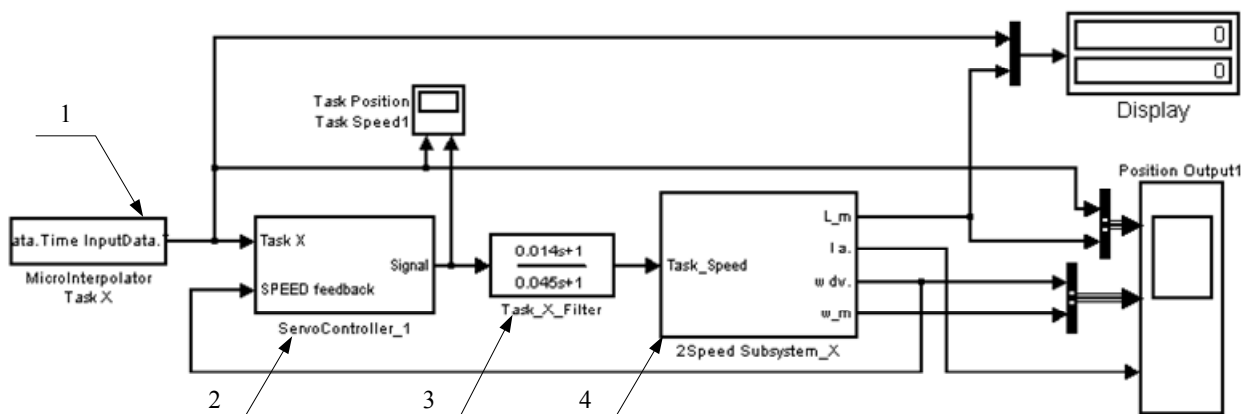


Рис. 5.15. Модель ЦАСЭП с комбинированным управлением в среде Simulink

Модель ЦАСЭП в среде Simulink состоит из следующих подсистем. Подсистема 1 – производит считывания задания из среды Workspace, которое было сформировано Delphi-программой. Сформированное задание представляет собой структуру, содержащую 3 поля. Первое поле – это массив значений моментов времени, в которое происходит выдача задания на регулятор положения, два остальных поля содержат массивы значений задания по положению для оси X и Y . Подсистема, обозначенная номером 2, представляет собой цифровой контур положения. Блок 3 – фильтр на входе РЭП. Подсистема 4 – содержит модель РЭП с подсистемой механической части электропривода.

Основными отличиями данной модели от нелинейной аналоговой является наличие элементов квантования по времени и уровню (ЦАП), элементов сигнальной коррекции (ЦКУ). Помимо этого в отличие от нелинейной аналоговой модели информация о положении поступает от модели датчика положения, установленного на валу двигателя, что соответствует реальной экспериментальной установке.

Показанная на рис. 5.16 подсистема производит опрос дискретного датчика положения, расчет регулятора положения и сигнала ЦКУ. После выполнения всех математических операций сигнал задания поступает в модель РЭП. Функциональное назначение блоков подсистемы цифрового контура положения следующее. Блок 1 представляет собой тактирующий генератор. Подсистема, обозначенная номером 2, содержит цифровое корректирующее устройство. Блок 3 – задание по положению, поступившее из среды WorkSpace. Блок 4 учитывает диапазон выходного напряжения ЦАП. Блок 5 учитывает дискретность ЦАП. Блоки 6 и 10 выполняют функцию экстраполятора нулевого порядка. Блок 7 – выход подсистемы (задание на скорость РЭП). Блок 8 – регулятор положения. Блок 9 – учитывает минимально необходимое время для опроса датчика положения, расчета задания интерполятором, расчета регулятора положения и сигнала ЦКУ. Группа блоков 11–14 реализуют дискретный датчик положения, установленный на валу двигателя. Блок 15 – скорость вала двигателя.

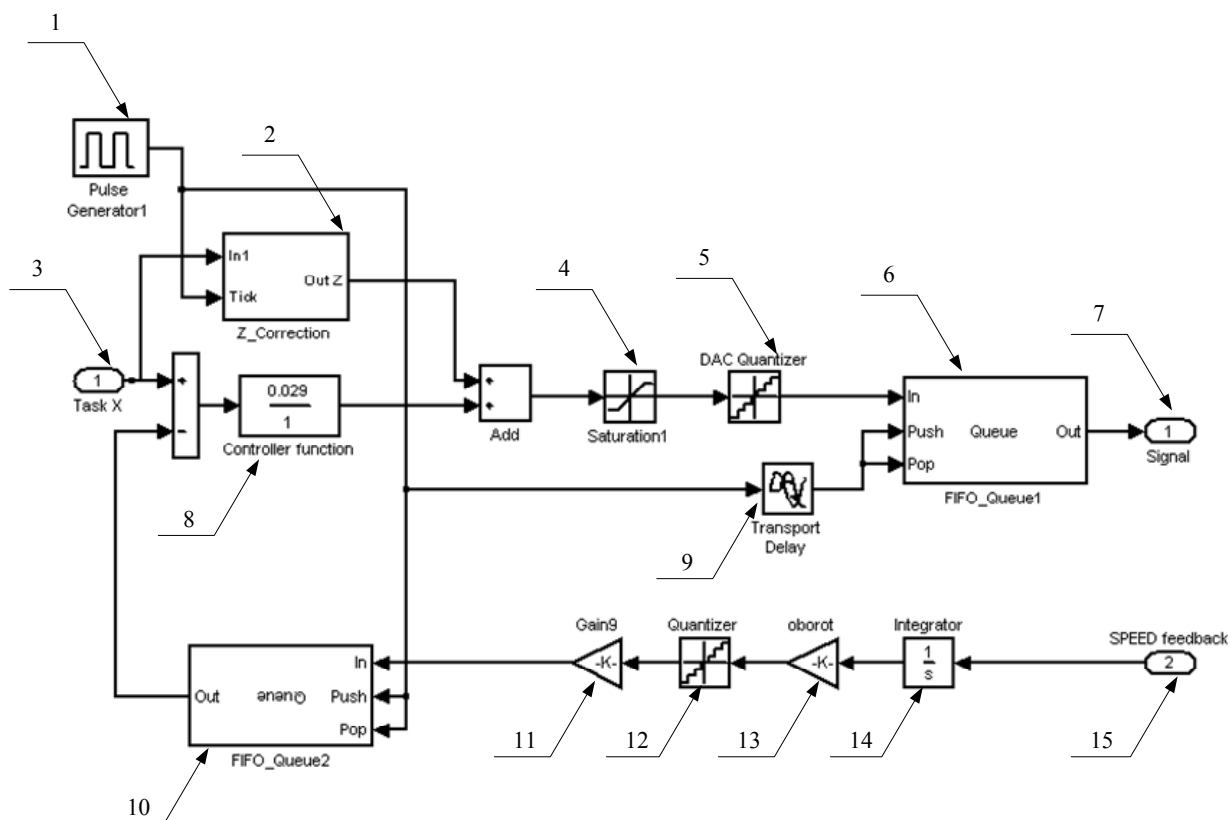


Рис. 5.16. Подсистема цифрового контура положения

Подсистема ЦКУ, приведенная на рис. 5.17, производит расчет разностей первого, второго и третьего порядков с помощью блоков 2 и 3. Полученная разность для каждого порядка умножается на соответствующий коэффициент (блоки 4, 7,8). Расчет разностей синхронизирован с частотой тактирующего генератора (блок 6), установленного в подсистеме цифрового контура положения. Выходной сигнал в виде суммы (блок 5) поступает на выход регулятора положения. Структурная схема ЦКУ и методика расчета коэффициентов настроек комбинированного управления изложена в главе 4.

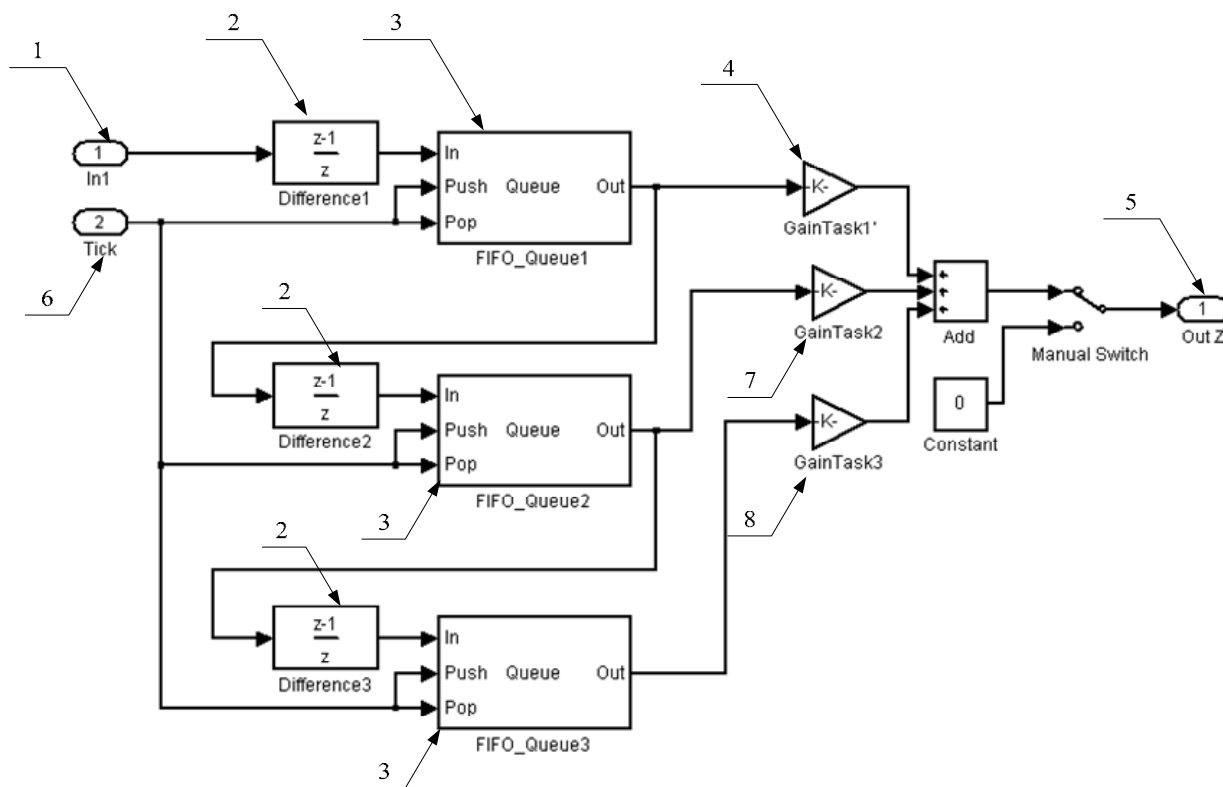


Рис. 5.17. Подсистема ЦКУ

В качестве примера, демонстрирующего работу подсистемы ЦКУ, рассмотрим диаграммы изменения во времени составляющих сигнала цифровой коррекции для прямолинейной траектории движения с плавным и линейным законом разгона/торможения (рис. 5.18, рис. 5.19).

Из рис. 5.18 (ступенчатый закон изменения ускорения при разгоне/торможении) можно заключить, что подсистема цифровой коррекции рассчитывает суммарный сигнал, состоящий из 3 составляющих: $\dot{X}$, $\ddot{X}$, $\dddot{X}$ – разности первого, второго, третьего порядка соответственно. На этапе разгона разность первого порядка представляет линейно возрастающий сигнал до величины, соответствующей интервалу движения с постоянной скоростью. По окончании этого интервала на участке торможения разность первого порядка представляет линейно убывающий сигнал. Разность второго порядка $\ddot{X}$ описывает закон изменения ускорения, она в целом равна нулю, кроме моментов времени,

при которых происходит изменение скорости. В эти моменты происходят незначительные скачкообразные изменения третьей разности, обусловленные ошибкой стыковки участков движения с различной скоростью. При параболическом законе изменения ускорения в моментах стыковки такие выбросы отсутствуют, так как алгоритм генерации задания траекторий, представленных сплайном, устраняет эти нежелательные явления. Однако с выходом на заданный уровень скорости составляющая третьего порядка мгновенно падает до нуля. Ввиду того, что степень вклада третьей составляющей достаточно мала, это скачкообразное изменение не оказывает особого влияния на координатную ошибку. В целом внешний вид и уровень сигналов соответствует результатам, полученным в главе 4, что говорит о достоверности разработанной модели ЦКУ.

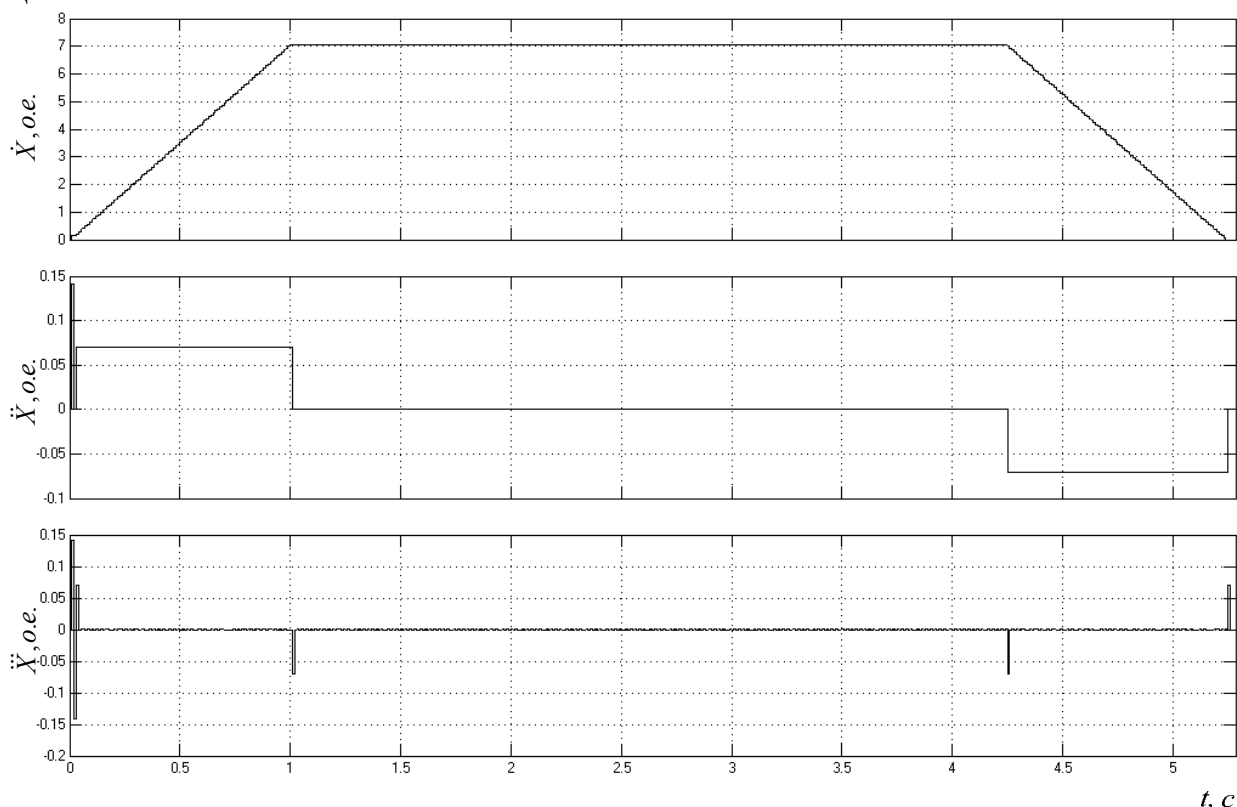


Рис. 5.18. Изменение составляющих сигнала ЦКУ при ступенчатом законе изменения ускорения: $\dot{x}$, $\ddot{x}$, $\dddot{x}$ – разности первого, второго, третьего порядка соответственно

Подсистема контура скорости показана на рис. 5.20,а. Ее основными элементами являются регулятор скорости (блок 2), подсистема контура тока (блок 3), механическая подсистема (блок 6). На вход контура скорости (блок 1) поступает сигнал задания с выхода подсистемы цифрового контура положения. Выходными сигналами подсистемы контура скорости являются ток якоря двигателя (блок 11), положение исполнительного механизма (блок 7), угловая скорость второй массы, а также скорость вала двигателя (блок 9).

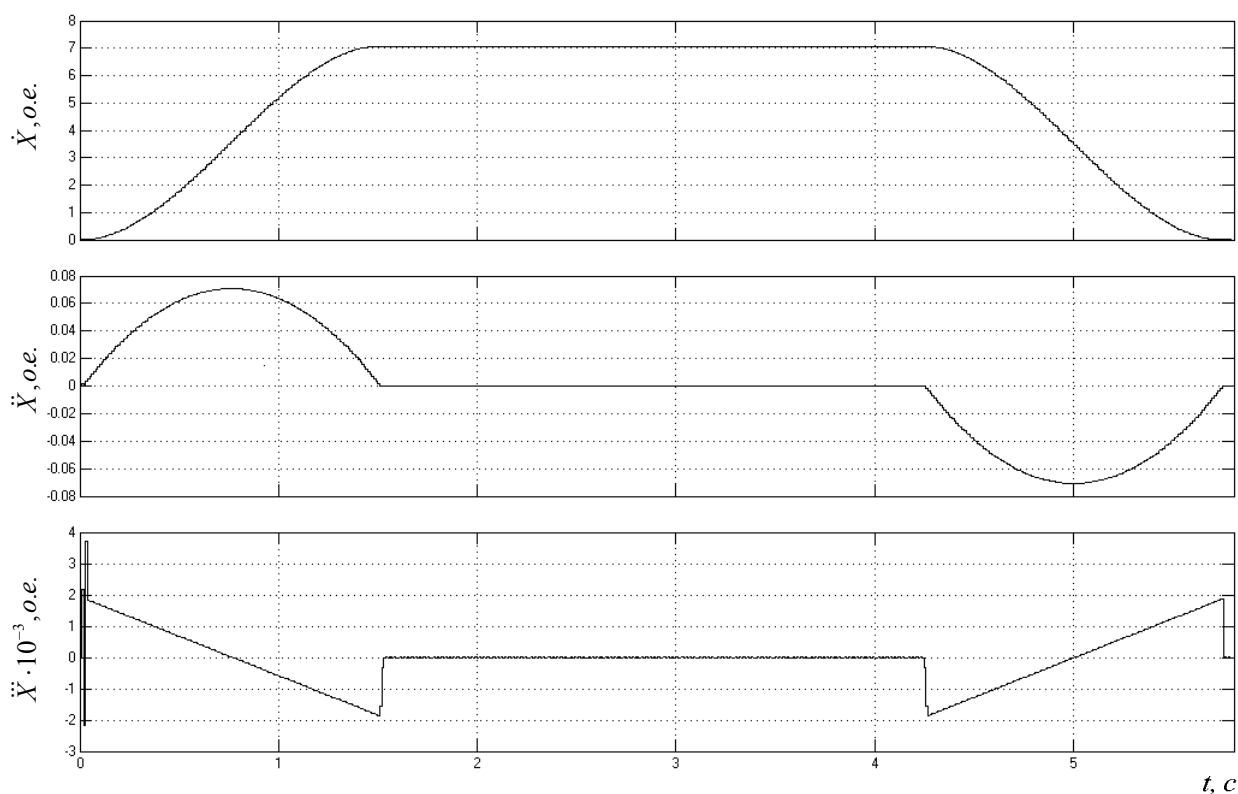


Рис. 5.19. Изменение составляющих сигнала ЦКУ при параболическом законе изменения ускорения: $\dot{X}$, $\ddot{X}$, $\ddot{X}$ – разности первого, второго, третьего порядка соответственно

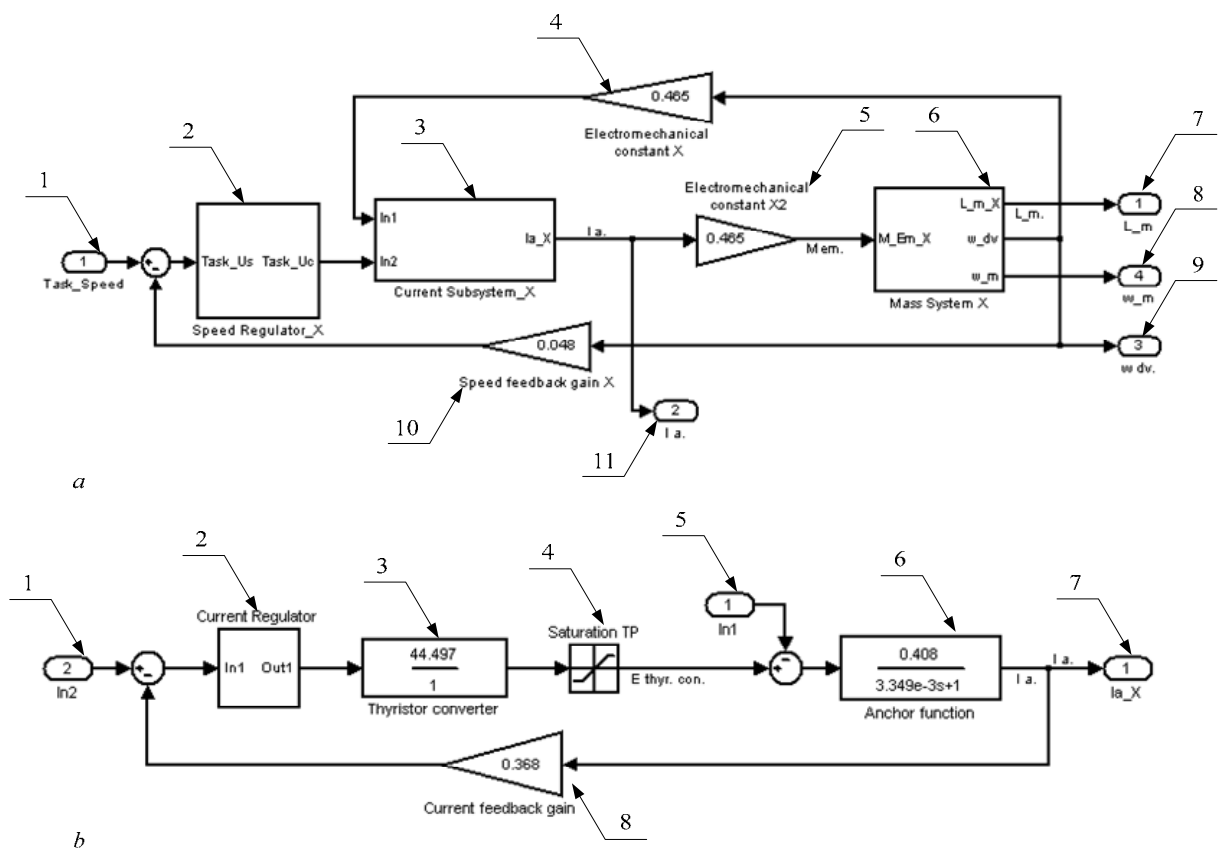


Рис. 5.20. Подсистемы контура скорости *a* и тока *b*

Блоки 4, 5 учитывают электромеханическую постоянную двигателя, блок 10 представляет собой коэффициент обратной связи по скорости.

Подсистема контура тока представлена на рис. 5.20,*b*. Ее основными элементами являются: регулятор тока (блок 2), коэффициент передачи тиристорного преобразователя (блок 3), передаточная функция якорной цепи двигателя (блок 6). Блок 4 – учитывает ограничение выходного напряжения тиристорного преобразователя. Блок 8 является коэффициентом обратной связи по току. Выходным сигналом подсистемы контура тока является ток якоря двигателя (блок 7).

Ввиду того, что в библиотеке стандартных функций среды Simulink нет передаточных функций нелинейного ПИ-регулятора, была разработана модель регулятора (рис. 5.21,*a*), особенностью которой является раздельное ограничение пропорциональной и интегральной составляющей. Вследствие такого приема можно получить реакцию регулятора на входное воздействие в виде двуполярного прямоугольного сигнала (рис. 5.21,*b*).

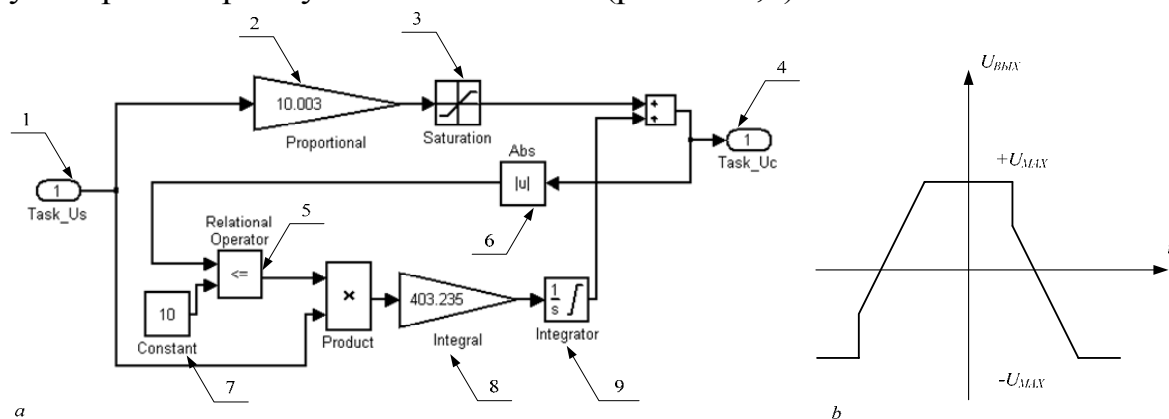


Рис. 5.21. Модель нелинейного ПИ-регулятора в Simulink *a* и его реакция *b* на двуполярное входное воздействие прямоугольной формы

Основными элементами модели регулятора являются следующие блоки: 1, 2 – входной и выходной сигнал соответственно; 2 – коэффициент пропорциональной составляющей регулятора; 3 – ограничение выходного сигнала по каналу пропорциональной составляющей; 8 – коэффициент интегральной составляющей; 9 – звено интегратора. Блоки 5-7 реализуют логику, отвечающую за ограничения нарастания выходного сигнала от интегральной составляющей. При подаче входного сигнала происходит скачкообразное изменение значения пропорциональной составляющей выходного сигнала. После этого интегральная составляющая, в свою очередь, продолжает расти до наступления насыщения регулятора или заданного выходного значения. Интегратор (блок 9) в этом случае отключается до момента времени выхода регулятора из насыщения. Приведенный на рис. 5.21,*b* вид переходного процесса соответствует идеальному нелинейному регулятору.

Переходные процессы в контуре тока, скорости и положения при обработке ступенчатых сигналов различной амплитуды, полученные на цифро-аналоговой модели СЭП (в сравнении с результатами, полученными на нелинейной аналоговой модели) при частоте квантования по времени $f = 100 \text{ Гц}$, приведены на рис. 5.22-5.24.

Приведенные выше переходные процессы, полученные на цифро-аналоговой и нелинейной аналоговой моделях, носят общий характер, соответствующий классическим представлениям о системах подчиненного регулирования. Однако имеются незначительные расхождения. На рис. 5.24 особо видно отличие, проявляющееся в виде перерегулирования по положению и скорости. Такое расхождение определяют два фактора: во-первых, это наличие элементов запаздывания и квантования по уровню (ЦАП); во-вторых, обратная связь по положению цифро-аналоговой модели в отличие от нелинейной аналоговой модели поступает с датчика положения, установленного на валу двигателя. Величина перерегулирования в наибольшей степени зависит от частоты квантования по времени, увеличением которой расхождение в результатах моделирования значительно сокращается. Моменты смены знака скорости (рис. 5.22) в обоих случаях сопровождаются наличием зоны нечувствительности, определяемой значением люфта. С ростом величины задания по положению эти зоны

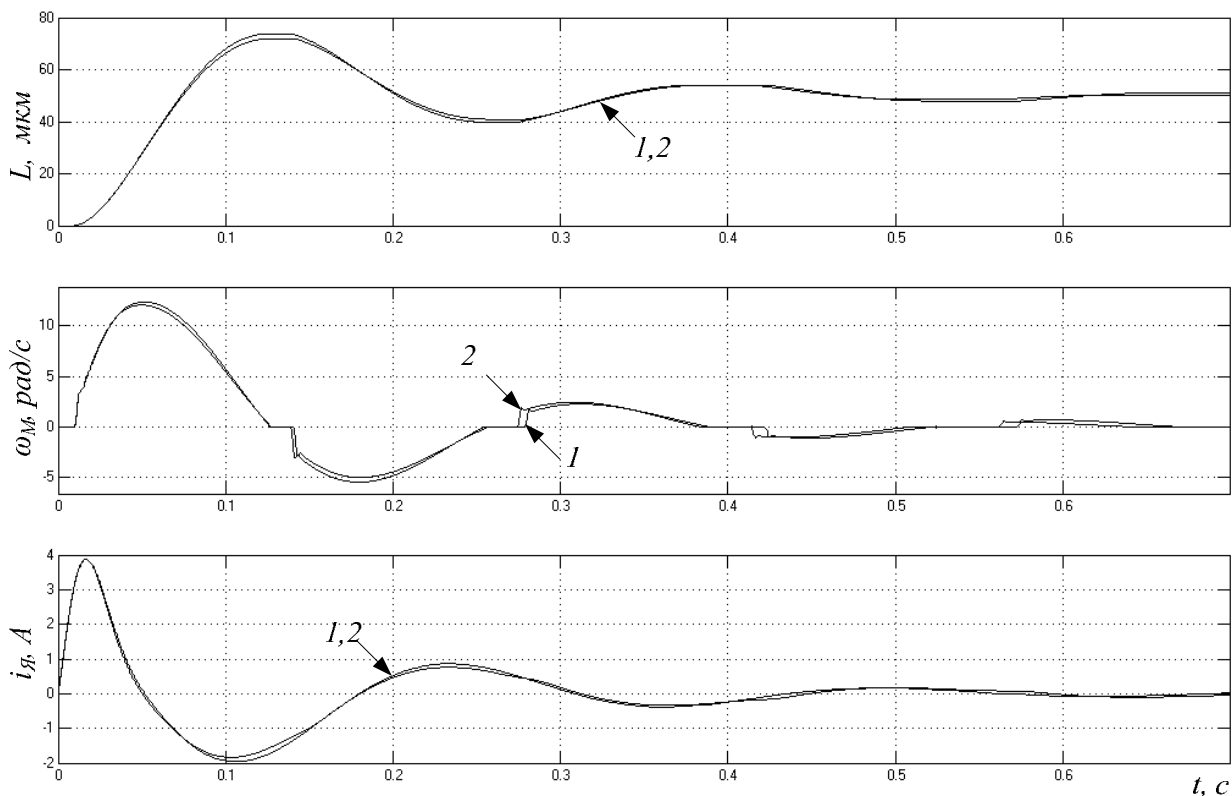


Рис. 5.22. Переходные процессы в контурах тока, скорости и положения при отработке скачка управляющего воздействия $L_{зад} = 50 \text{ мм}$ на нелинейной аналоговой (1) и цифро-аналоговой (2) моделях

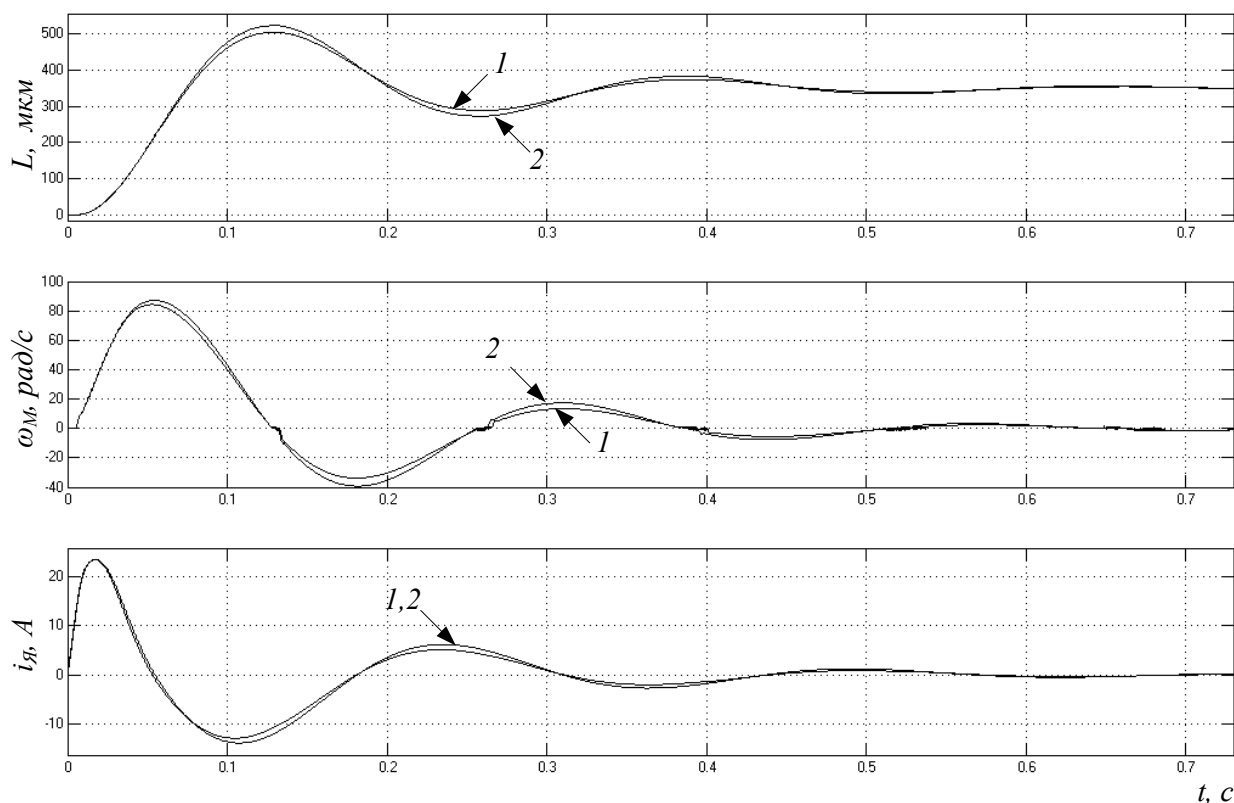


Рис. 5.23. Переходные процессы в контурах тока, скорости и положения при отработке скачка управляющего воздействия $L_{зад}=350\text{мкм}$ на нелинейной аналоговой (1) и цифро-аналоговой (2) моделях

становятся практически не заметными, так как скорость достигает больших значений, и выборка люфта происходит почти мгновенно. Переходные процессы в контуре тока (рис. 5.24) в отличие от предыдущих случаев имеют несколько иной характер в диапазоне регулирования до 0,1с. Ввиду наличия насыщения регулятора положения на интервале времени от 0,05с до 0,1с скорость двигателя растет практически линейно, что, соответственно, приводит к падению тока в цепи якоря двигателя.

Полученные результаты позволяют заключить следующее:

1. Предложенная концепция взаимодействия программного обеспечения для управления экспериментальной установкой и модели следящего электропривода в среде моделирования MatLab-7 позволяет производить отладку и оценку адекватности разработанных алгоритмов управления следящими электроприводами в реальном времени.
2. Разработанные модели регулируемого электропривода и цифровой системы управления двухкоординатного стола в среде MatLab-7 учитывают особенности исполнения механической части и основные нелинейности электропривода.
3. Установлена достоверность составления модели регулируемого электропривода путем оценки показателей качества процессов регулирования по методике Поздеева А.Д.

4. Разработанная модель цифрового корректирующего устройства в рамках структур инвариантных систем позволяет организовать сигнальную адаптацию задающего сигнала следящего электропривода.

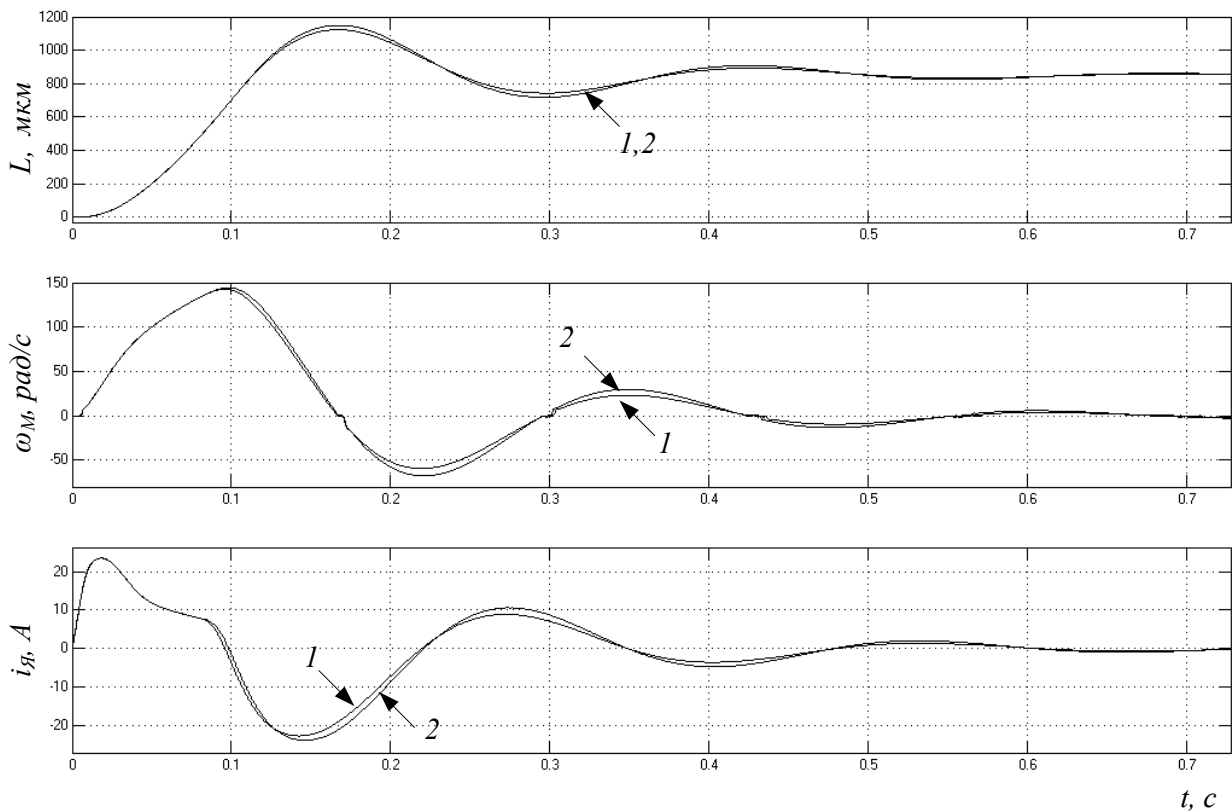


Рис. 5.24. Переходные процессы в контурах тока, скорости и положения при отработке скачка управляющего воздействия $L_{зАд}=850\text{мкм}$ на нелинейной аналоговой (1) и цифро-аналоговой (2) моделях

5.5. Экспериментальные исследования электромеханической системы

Для оценки адекватности синтезированной модели регулируемого электропривода с механическим редуктором, входящего в состав следящей системы, были получены переходные процессы по скорости на экспериментальной установке (рис. 5.25). Графики переходных процессов в контуре скорости регулируемого привода получены с помощью аналого-цифрового преобразования сигнала обратной связи от тахогенератора на частоте $f = 400\text{Гц}$. Сравнительная оценка экспериментальных данных с результатами моделирования приведена в табл. 5.3.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что регулируемый привод отрабатывает заданное значение скорости с определенной точностью. Время регулирования t_p переходного процесса скорости модели РЭП практически идентично времени регулирования реального привода. Сравнение перерегулирования σ показывает, что наиболее близкое значение данного показателя ка-

чества лежит в пределах задания, равного 2 В. С ростом величины сигнала задания на РЭП перерегулирование на реальном приводе снижается практически до 0. Так, для сигнала задания, равного 5 В, перерегулирование составляет 0,5%. В свою очередь, результаты моделирования также показывают снижение величины перерегулирования, что определяется влиянием нелинейностей в модели РЭП. Однако при величине задания 5 В перерегулирование составляет

Таблица 5.3

Задание по скорости, В	Моделирование		Эксперимент	
	σ , %	t_p , с	σ , %	t_p , с
5	4,6	0,055	0,3	0,06
4	5,8	0,052	0,95	0,056
3	7,6	0,047	0	0,052
2	12,5	0,042	9,9	0,045
1	31	0,04	4,1	0,05

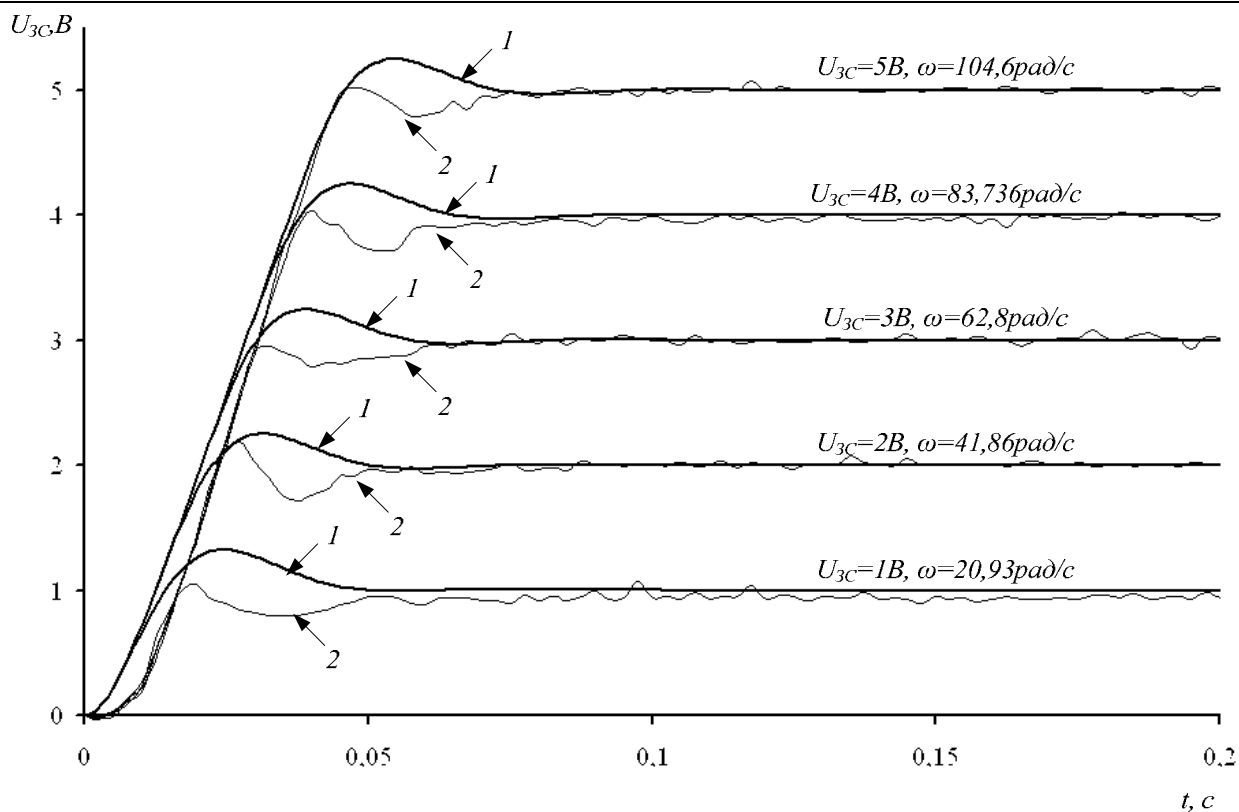


Рис. 5.25. Переходные процессы в контуре скорости, полученные при моделировании 1 и эксперименте на установке 2

4,6%. Расхождение по величине перерегулирования объясняется тем, что не учтены некоторые конструктивные особенности реального привода. В частности, не учитывается влияние блока нелинейного токоограничения, выполняющего функцию ограничения максимально допустимого тока якоря в зависимости от частоты вращения. Не учитывается также адаптивный регулятор, предназна-

ченный для изменения коэффициента усиления и постоянной времени интегрирования регулятора скорости в функции частоты вращения.

С целью анализа адекватности модели следящего электропривода и экспериментальной установки был проведен ряд экспериментов, в частности, отработка ступенчатого воздействия для различных значений входного сигнала.

Примеры, демонстрирующие отработку скачкообразного задания по положению на модели и экспериментальной установке, приведены на рис. 5.26–5.29. Показатели качества переходных процессов показаны в табл. 5.4.

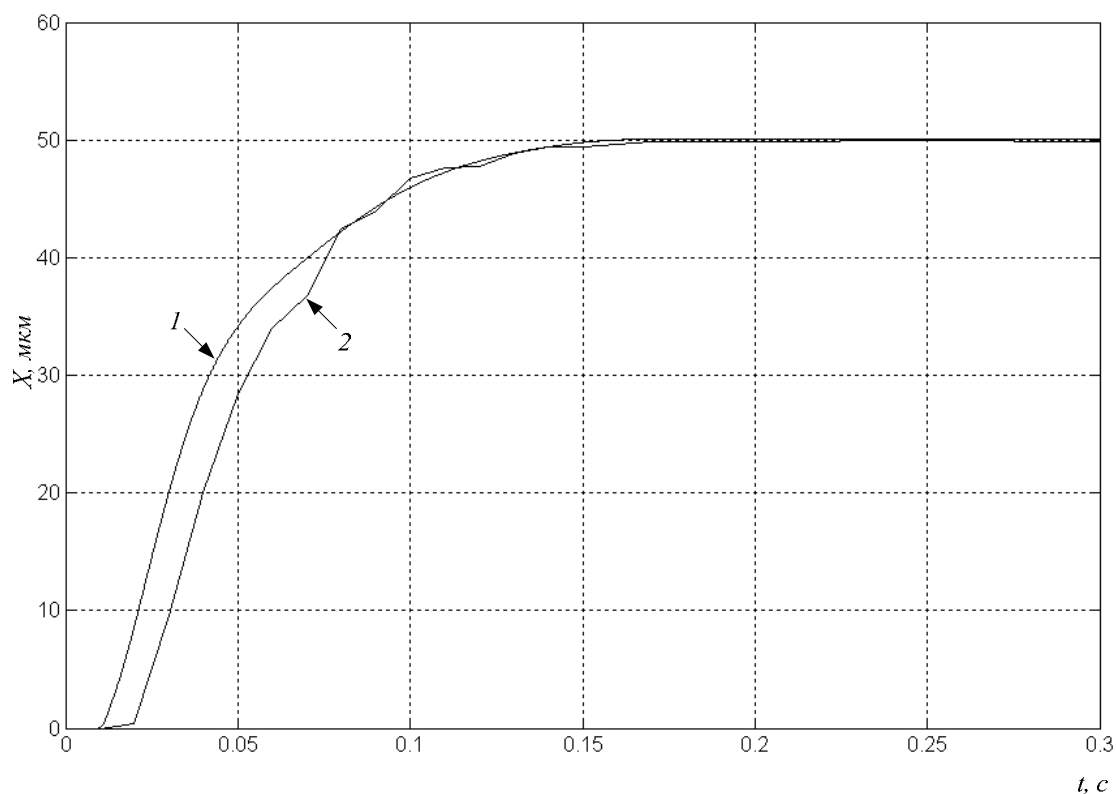


Рис. 5.26. Переходный процесс по положению при задании 50мкм:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

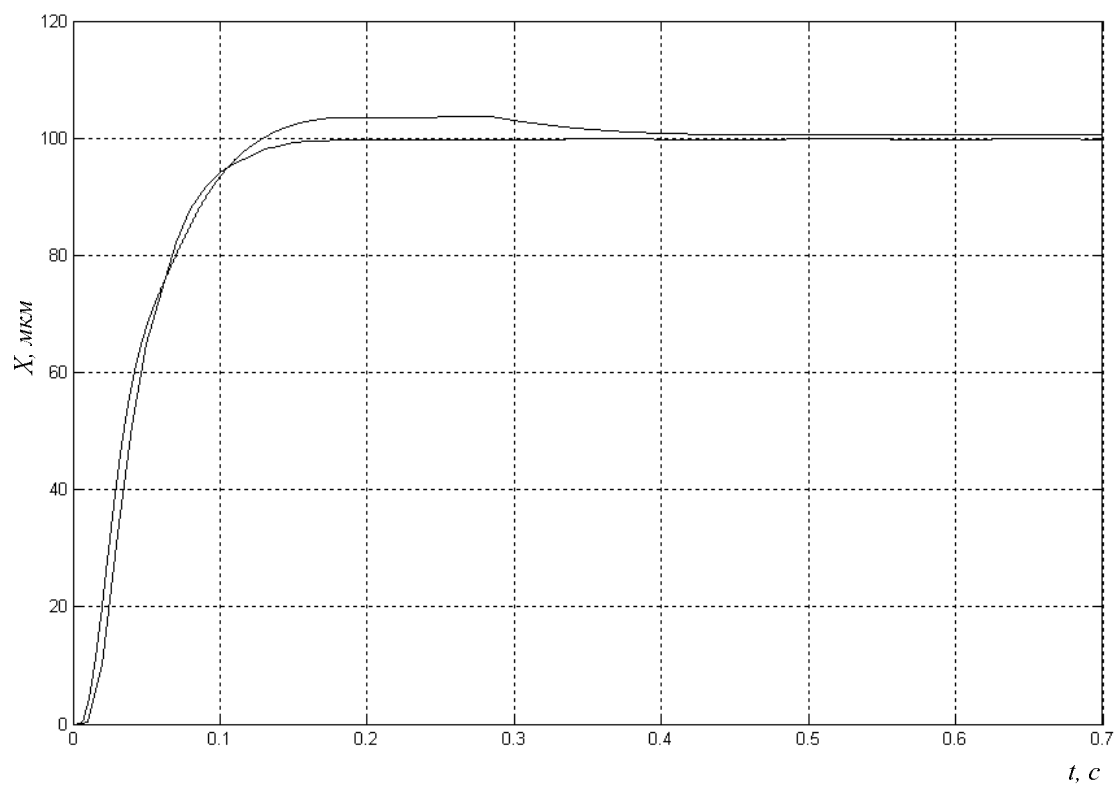


Рис. 5.27. Переходный процесс по положению при задании 100мм:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

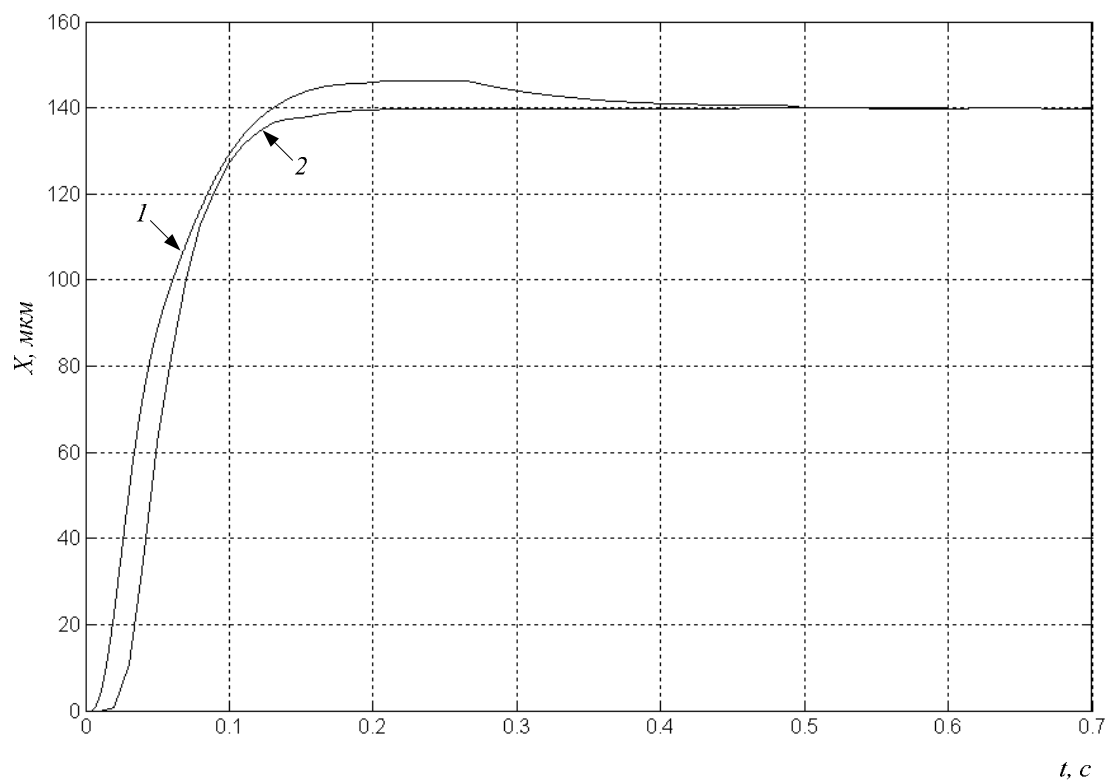


Рис. 5.28. Переходный процесс по положению при задании 140мм:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

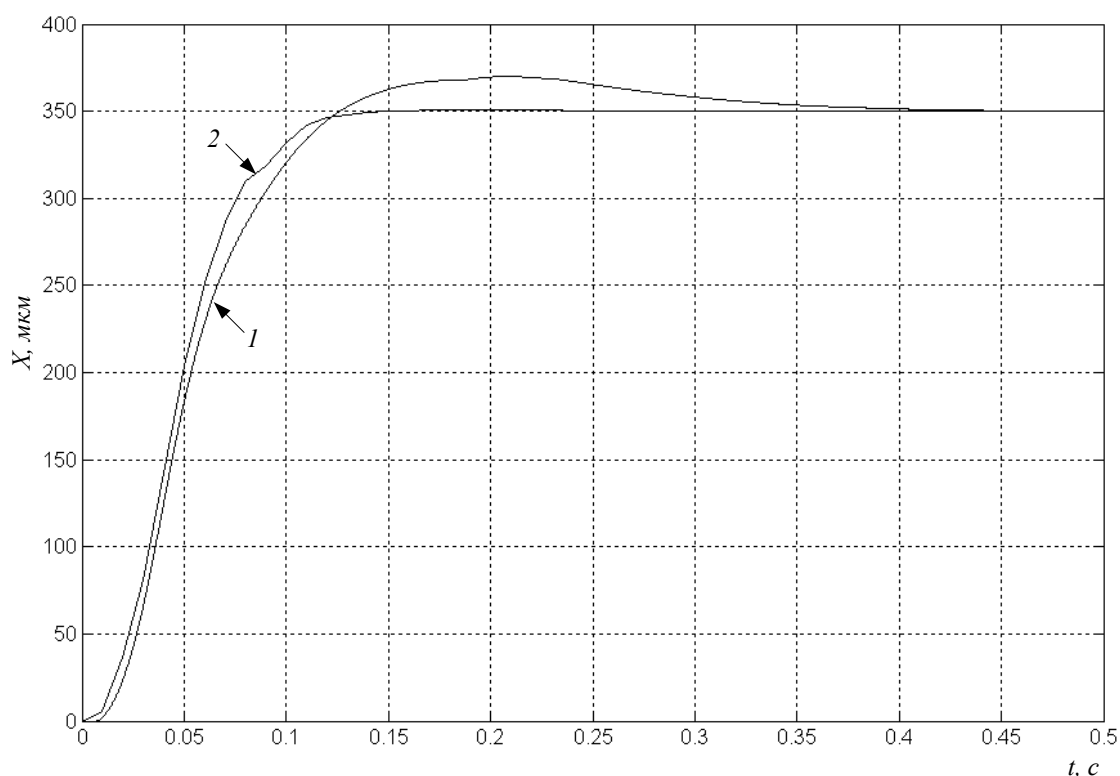


Рис. 5.29. Переходный процесс по положению при задании 350мм:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

Таблица 5.4

Задание по положению, мм	Моделирование		Эксперимент	
	σ , %	t_p , с	σ , %	t_p , с
50	0,2	0,1	0	0,1
100	3,5	0,105	0	0,11
140	4,4	0,11	0	0,115
350	19	0,23	0,17	0,118

Из табл. 5.4 видно, что показатели качества переходных процессов при отработке скачка управляющего воздействия по положению, равного 50мм совпадают. Далее, с ростом величины задания (100 мм и 140 мм) в результатах моделирования наблюдается рост величины перерегулирования. Данные эксперимента, в свою очередь, отражают лишь незначительный рост времени регулирования. Величина перерегулирования в эксперименте не достигает 1%. Результаты моделирования достигают значительного расхождения при сигнале задания свыше 350 мм. Это объясняется тем, что в модели контур тока насыщается, в то время как контур скорости работает на линейных участках характеристик. Реальный РЭП, в свою очередь находится под действием блока нелинейного токоограничения и адаптивного регулятора скорости.

Далее рассмотрено поведение модели в режиме слежения и выполнена оценка ее адекватности реальному СЭП. В режиме слежения задание на положение изменяется во времени по линейному, гармоническому или произвольному закону. Для прямолинейного или кругового движения исполнительного органа с постоянной скоростью (режим равномерного нарастания) на вход следящего электропривода подается линейно-нарастающий сигнал задания. Главным показателем качества работы системы является ошибка слежения (координатная ошибка), т.е. разница между заданным положением исполнительного органа и реальным. Главным образом, ошибка слежения определяется из скоростной ошибки, зависящей от скорости вращения двигателя, и нагрузочной, обусловленной наличием момента нагрузки. Ввиду того, что момент нагрузки во всех экспериментах является постоянной величиной, то наибольший интерес представляет составляющая скоростной ошибки.

Пример отработки режима слежения на модели и эксперименте показан на рисунках 5.31 – 5.32. Результаты исследования адекватности модели приведены в сводной табл. 5.5. Результаты моделирования и эксперимента свидетельствуют о том, что с ростом заданной скорости наблюдается линейный рост координатной ошибки, как в результатах моделирования, так и на эксперименте (см. табл. 5.5). Однако темп изменения ошибки на модели несколько выше, чем на реальной экспериментальной установке. Зависимость координатной ошибки от заданной скорости движения показана на рис. 5.30.

Таблица 5.5

Задание, мм/с	Моделирование			Эксперимент		
	$\Delta L_{\text{МАКС}},$ мм	$\Delta L_{\text{УСТ}},$ мм	$\Delta V, \%$	$\Delta L_{\text{МАКС}},$ мм	$\Delta L_{\text{УСТ}},$ мм	$\Delta V, \%$
50	2,6	1,6	0	2,05	1,39	6,6
100	3,9	2,64	1	4	2,4	0
120	4,45	3,1	0,7	3,4	2,9	4,1
350	10	7,9	0,04	8,4	8	0,95
1000	25,9	21,5	0	22,6	21	1,25
2000	51	42,15	0	44	42,5	1,25
4000	102	83,5	0	82	80	1,12
8000	224	166,5	0	162,5	154,5	1,28
10000	305	207,6	0	200	191,5	0,8

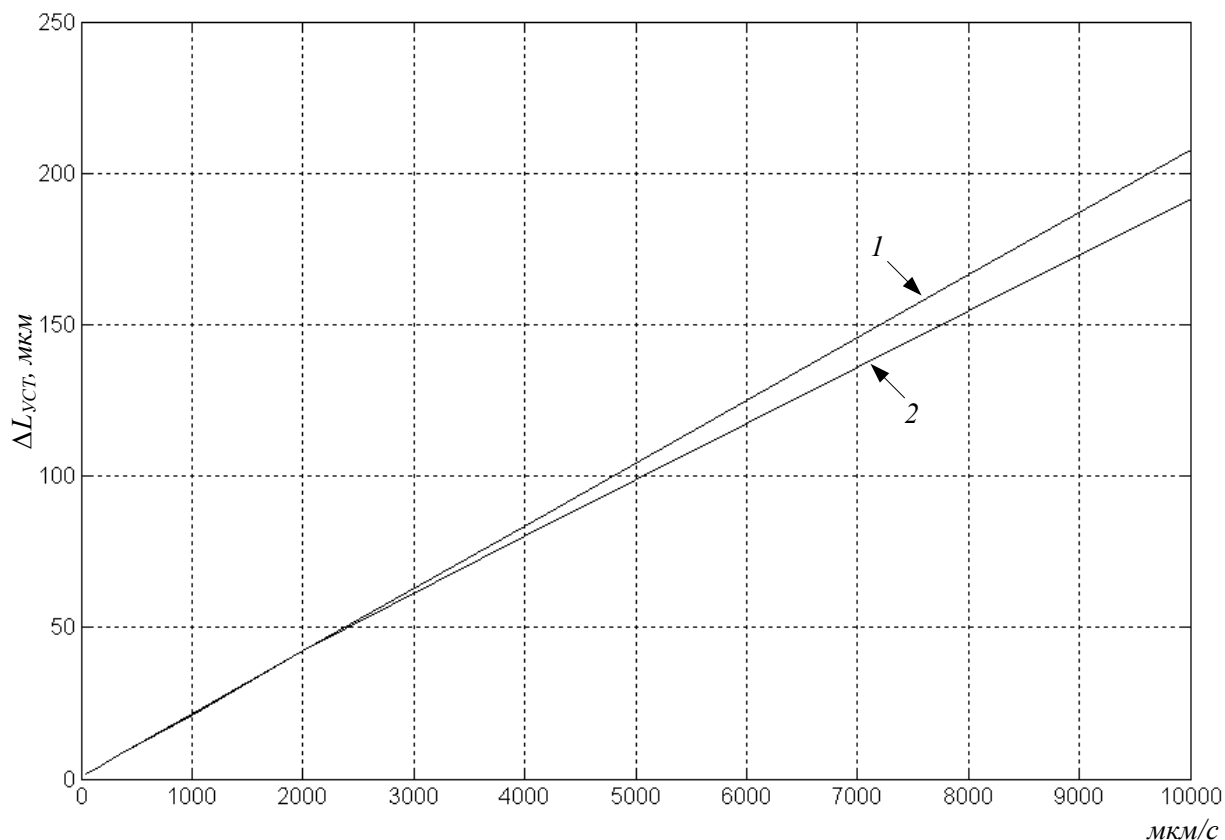


Рис. 5.30. Зависимость установившейся координатной ошибки от заданной скорости: 1 – моделирование; 2 – эксперимент

Так, изменения установившейся координатной ошибки, полученной в модели и на эксперименте, достаточно близки на скоростях движения до 2500 мкм/с. Расхождение результатов составляет менее 1%. Однако с ростом заданной скорости темп нарастания координатной ошибки в модели увеличивается. При координатной скорости, равной 10000 мкм/с, расхождение результатов моделирования и эксперимента достигает 8,5%. Скоростная ошибка, полученная по результатам моделирования во всех экспериментах, не превышает 1% (табл. 5.5). В свою очередь, по результатам экспериментальных исследований установлено, что на малых скоростях скоростная ошибка достигает 4–6%. Далее, с ростом заданной скорости (до 10000 мкм/с) скоростная ошибка стабилизируется на уровне 1,25%.

Резкое изменение скоростной ошибки на малых скоростях обусловлено влиянием пульсаций тока, вызванных работой тиристорного преобразователя в зоне прерывистых токов. Это влияние видно на рис. 5.31, где координатная ошибка носит пульсирующий характер. Ввиду того, что преобразователь в модели представлен пропорциональным звеном с ограничением выходного сигнала на допустимом уровне, пульсации в результатах моделирования отсутствуют. Расхождение в результатах моделирования и эксперимента не превышает 15%.

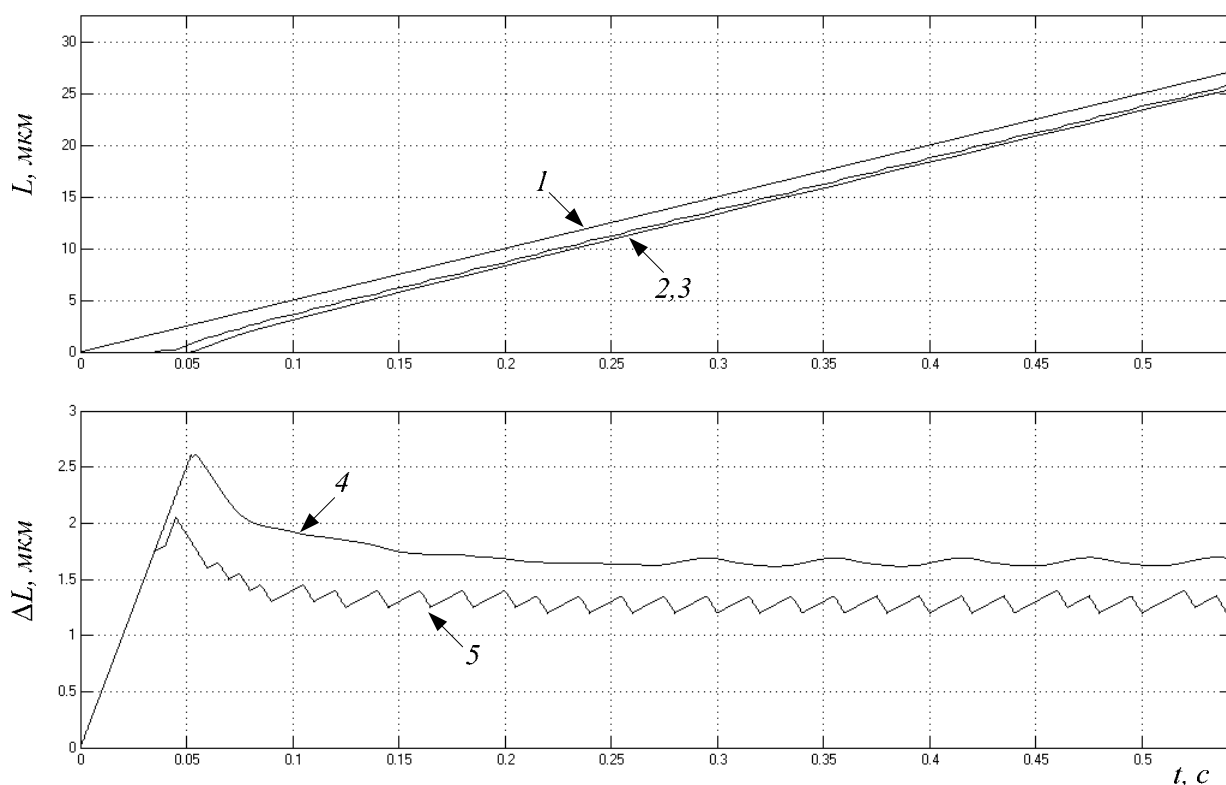


Рис. 5.31. Отработка режима линейного нарастания по координате X на скорости 50 мм/с: 1 – задание; 2, 4 – моделирование; 3, 5 – эксперимент

На больших скоростях влияние нелинейностей, связанных с работой тиристорного преобразователя, отсутствует (рис. 5.32). Расхождение установившейся ошибки в результатах моделирования и эксперимента не превышает 4,35%. Максимальная координатная ошибка, обусловленная перерегулированием по положению, составила 24,3%. Этот факт в основном определяется тем, что при моделировании был принят ряд допущений, описанных выше, а также допущениями при выборе исходных данных для расчета параметров модели.

Экспериментально установлено, что результаты моделирования ступенчатого входного воздействия адекватны результатам эксперимента в диапазоне задания по положению до 140 мм. В этом случае расхождение времени регулирования и величины перерегулирования не составляет более 5%. Сравнительная оценка результатов моделирования и экспериментальных исследований в режиме слежения показывает, что при отработке траектории движения на скорости до 8000 мм/с модель СЭП адекватна экспериментальной установке. С превышением этого значения наблюдается значительное расхождение результатов моделирования и эксперимента.

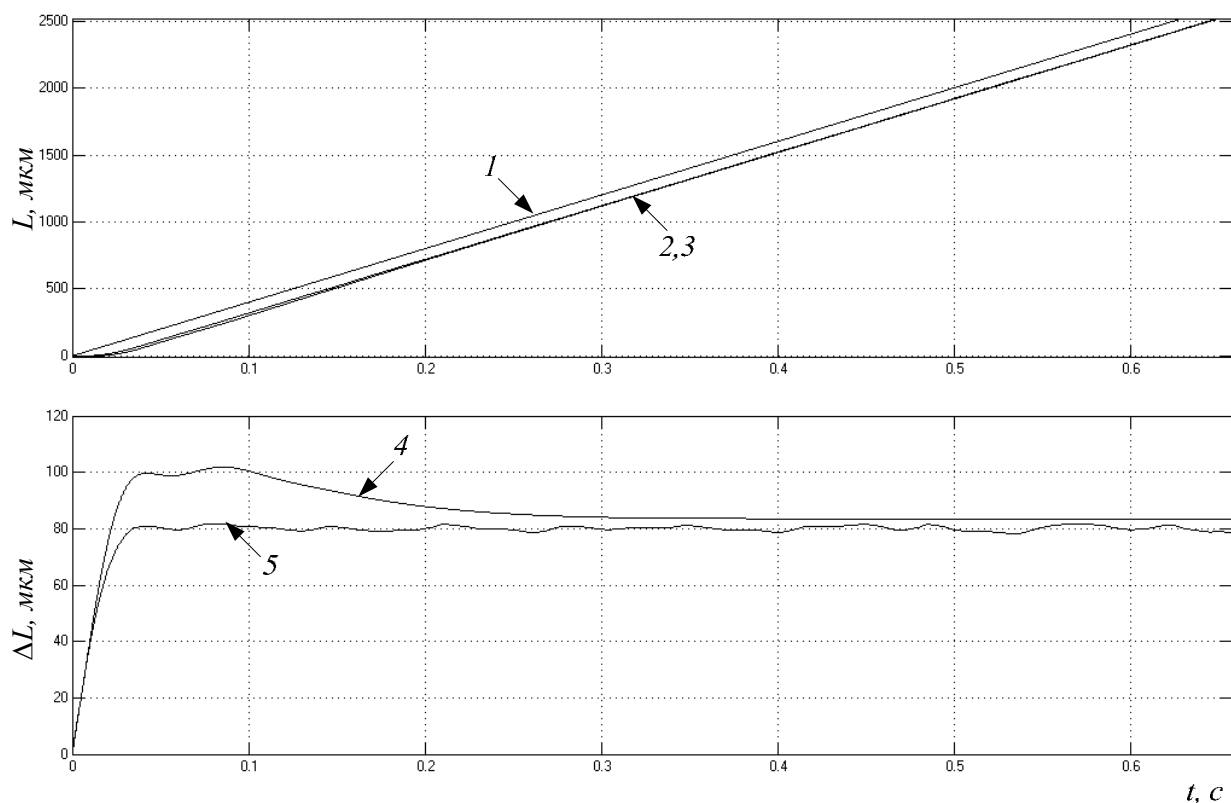


Рис. 5.32. Отработка режима линейного нарастания по координате X на скорости 4000 мкм/с: 1 – задание; 2,4 – моделирование; 3,5 – эксперимент

5.6. Экспериментальные исследования цифровой системы управления

Экспериментальные исследования цифровой системы управления следящим электроприводом проводились с целью подтверждения теоретических результатов, полученных в главе 3. Экспериментально была подтверждена работоспособность алгоритма интерполяции кубическим сплайном, алгоритма генерации задания для двух следящих электроприводов в реальном времени с различными законами разгона/торможения. Приведены примеры отработки траекторий движения, заданных сплайном на экспериментальной установке. Исследовано влияние ЦКУ третьего порядка на динамическую точность системы управления.

В качестве примера, демонстрирующего работоспособность алгоритма кубической сплайн-интерполяции и алгоритма генерации задания в реальном времени, рассматривается сложная траектория движения (рис. 5.33). Тестовая траектория была сформирована тремя локальными сплайнами. На начальном участке OA траектории производится разгон по параболическому закону изменения ускорения во времени. По окончании разгона оставшийся участок OA траектории проходится с постоянной заданной контурной скоростью. Следующий участок траектории – AB также проходится с заданной постоянной контурной скоростью. На участке BC происходит торможение до заданной контур-

ной скорости. Поэтому система управления не затрачивает вычислительных ресурсов на расчет траектории торможения, а всего лишь рассчитывает задание в реальном времени в соответствии с законом разгона/торможения. При разгоне предварительно прогнозируется момент выхода на заданный уровень скорости.

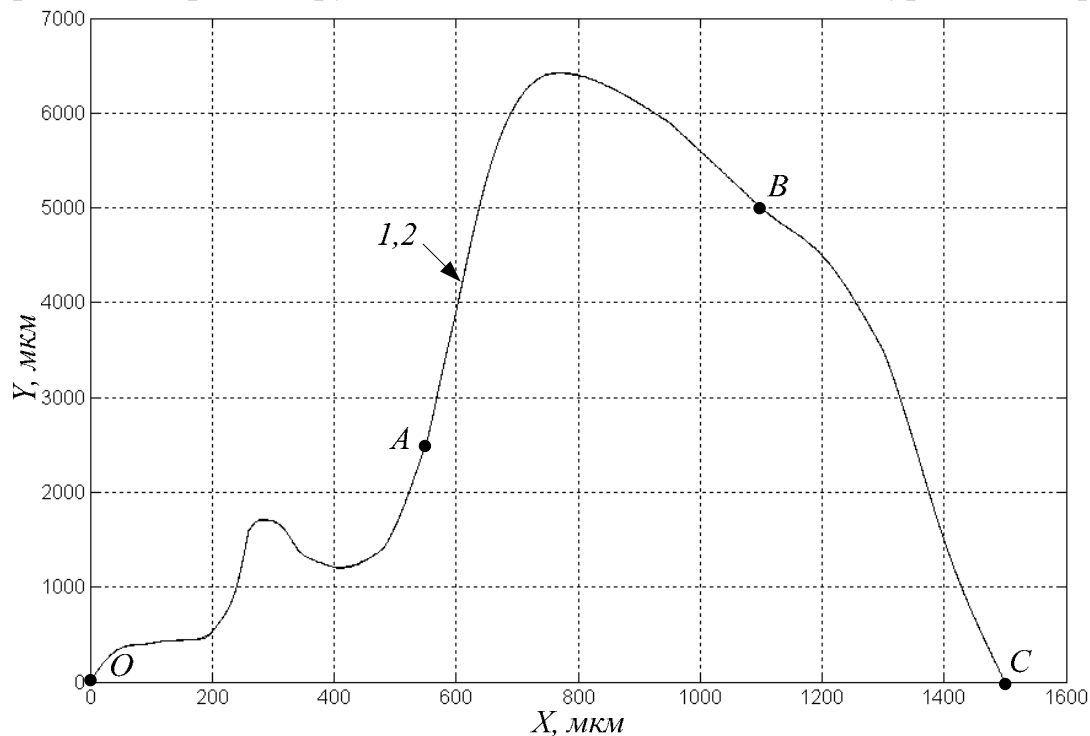


Рис. 5.33. Заданная 1 и отработанная 2 траектории на плоскости XU

График отработанной траектории движения на плоскости XU построен по информации, полученной от дискретных датчиков положения. Частота дискретизации данных положения вала двигателя по времени равна $f = 100 \text{ Гц}$. Изменение контурной скорости во времени (рис. 5.34) показывает работоспособность алгоритма управления скоростью на участках разгона/торможения, поскольку форма изменения контурной скорости на участках разгона/торможения идентична заданной — $V_K = 1000 \text{ мм/с}$. Расчет контурной скорости произведен по общепринятой формуле

$$V_K = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2}, \quad (5.11)$$

где V_X, V_Y — координатная скорость по оси X и Y .

Кривая изменения координатной скорости по обеим осям определяется не только участками разгона или торможения, но и геометрией заданной траектории движения. Рассмотрим, например, участок движение по оси Y на интервале времени от 2 до 4с. На начальном этапе движение по данной оси происходит с постоянной заданной координатной скоростью и положение по оси Y изменяется по линейной зависимости. Далее геометрия траектории изменяется таким образом, что координата по оси Y уменьшается. Соответственно, электропривод по этой оси совершает реверс, что вызывает ступенчатое изменение координат-

ной ошибки из положительной области ($\Delta_x = 100 \text{ мкм}$) в отрицательную область ($\Delta_x = -100 \text{ мкм}$). Форма кривой, описывающей изменение векторной ошибки во времени, подобна форме кривой контурной скорости, что обусловлено наличием координатной ошибки следящей системы (рис. 5.34).

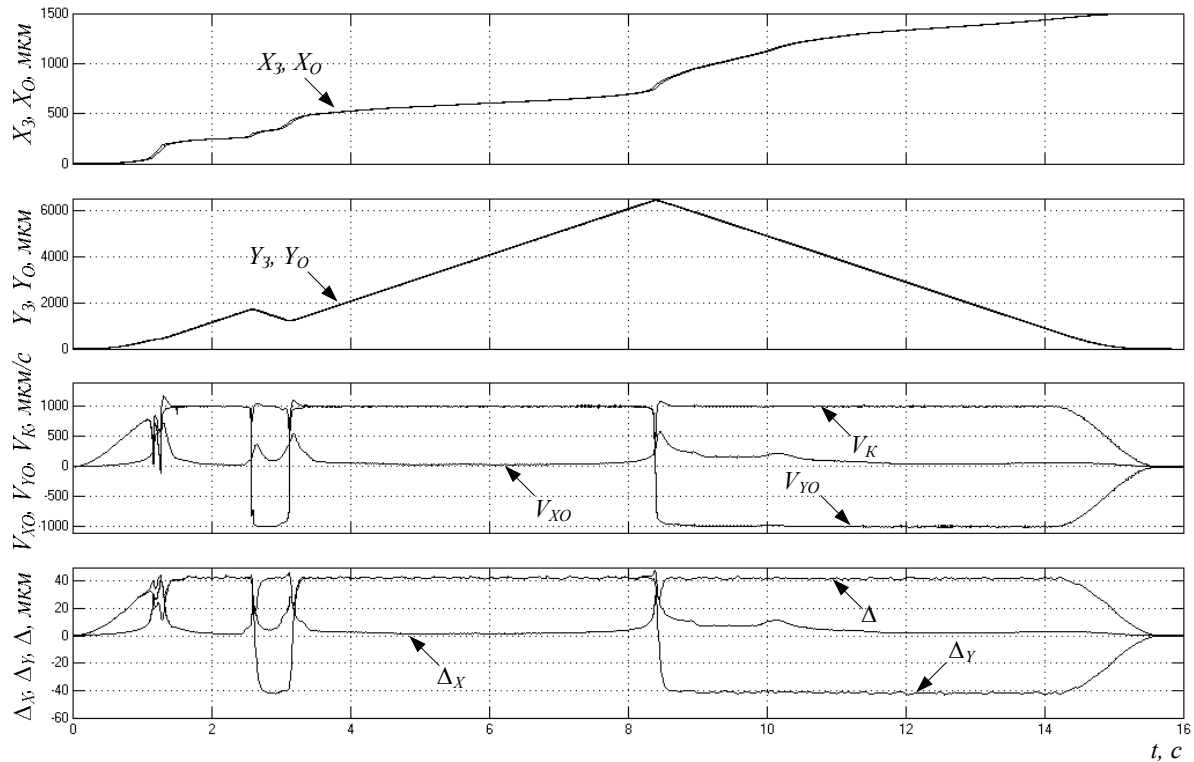


Рис. 5.34. Изменение во времени положения, координатной скорости и ошибки по осям X, Y при плавном законе изменения ускорения при разгоне/торможении: X_3, X_0, Y_3, Y_0 – заданное и отработанное положение по осям X и Y; V_{x0}, V_{y0} – координатная скорость по соответствующим осям; V_K – контурная скорость; Δ_x, Δ_y – координатные ошибки; Δ – векторная ошибка

Векторная ошибка определяется выражением

$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}, \quad (5.12)$$

где Δ_x, Δ_y – координатные ошибки по осям X, Y.

В целом, эксперимент подтверждает, что требуемая плавность изменения контурной скорости в режимах разгона/торможения может быть достигнута применением предложенных алгоритмов. В случае введения ступенчатого закона изменения ускорения на этапе разгона/торможения при отработке заданной траектории движения (рис. 5.33) переходные процессы по скорости и положению принимают вид, показанный на рис. 5.35.

На рис. 5.35 видно, что изменение скорости на участках разгона/торможения носит линейный характер. Время отработки заданной траектории движения уменьшилось с 15,62 с до 15,14 с за счет того, что темп нарастания скорости несколько выше (при одинаковом допустимом контурном ускорении). Следовательно, введение закона плавного разгона/торможения вызывает

некоторое затягивание соответствующих переходных процессов в отличие от линейного закона. Анализ переходного процесса по скорости движения (рис. 5.36) показывает, что при одинаковой геометрии заданной траектории движения и скачкообразном изменении ускорения при разгоне наблюдается рост перерегулирования по скорости на 115 мкм/с (в сравнении с кривой 2). Так при плавном разгоне перерегулирование составляет 17%. В случае скачкообразного изменения ускорения при разгоне перерегулирование составляет 28,5%. Это, в свою очередь, приводит к росту векторной ошибки по положению.

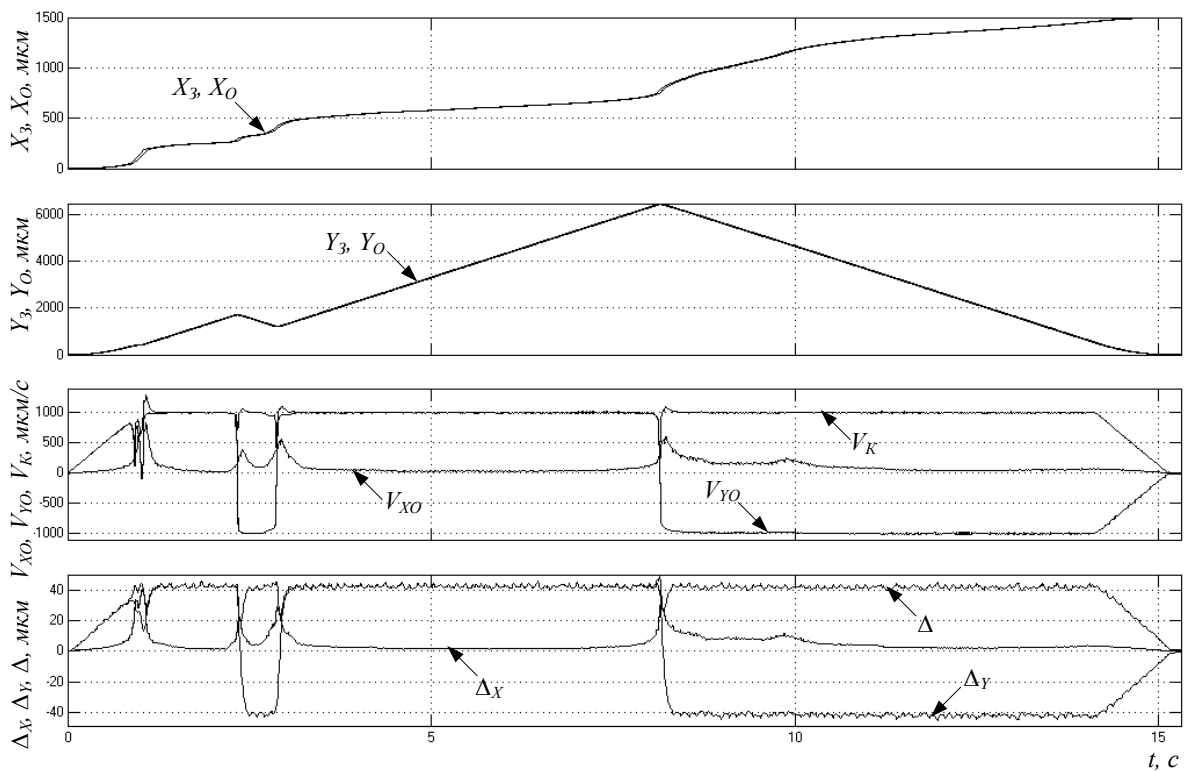


Рис. 5.35. Изменение во времени положения, координатной скорости и ошибки по осям X, Y при ступенчатом законе изменения ускорения при разгоне/торможении

Описанное явление в виде опережения приводами своей реальной координаты в моменты сброса ускорения объясняется их инерционностью, а также энергией, запасенной в механической части системы. Экспериментальные исследования на различных траекториях движения показали, что та или иная степень перерегулирования по скорости и величина векторной ошибки в динамике определяется геометрией траектории и параметрами движения (заданной скоростью и ускорением).

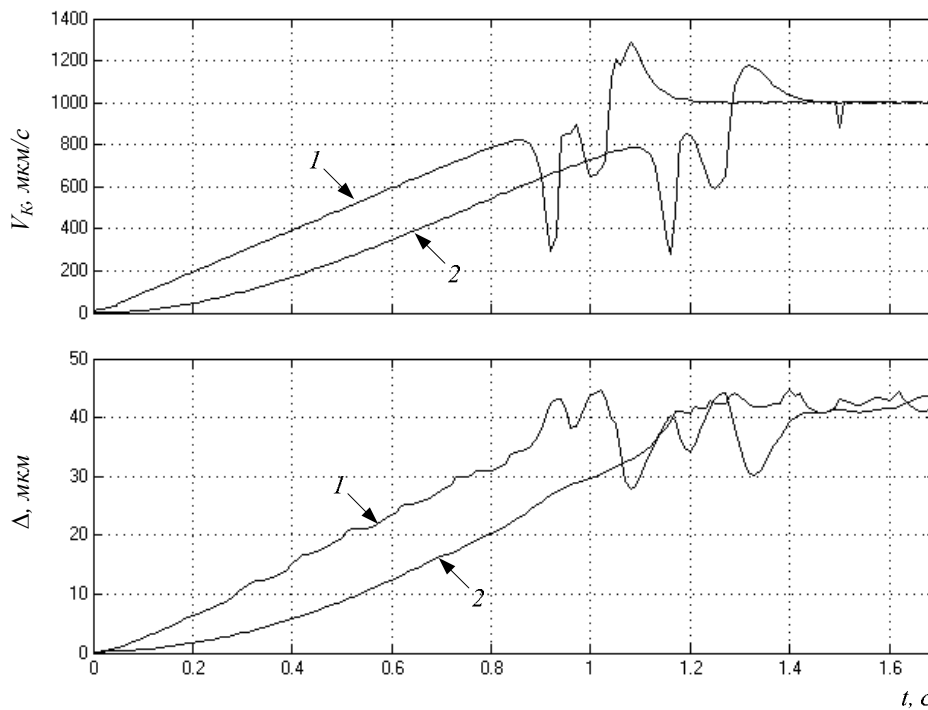


Рис. 5.36. Изменение контурной скорости и ошибки во времени: 1 – линейный закон разгона; 2 – плавный закон разгона

Кроме нелинейных траекторий движения алгоритм интерполяции кубическим сплайном позволяет сформировать траекторию движения, описывающую дугу окружности. Это обстоятельство дает возможность при необходимости не прибегать к описанию участка траектории с помощью круговой интерполяции, например, если интервал траектории, описываемый сплайном, содержит участок дуги окружности. Пример, демонстрирующий воспроизведение траектории в виде дуги окружности на экспериментальной установке, показан на рис. 5.37. Частота дискретизации по времени равна $f = 100 \text{ Гц}$, заданная контурная скорость $V_K = 5000 \text{ мкм/с}$, допустимое контурное ускорение $a_K = 1000 \text{ мкм/с}^2$.

Траектория была задана двумя сплайнами. Первый участок траектории, обозначенный точками OA , содержит два интервала – разгон и движение с постоянной контурной скоростью. Это видно из графиков переходных процессов, приведенных на рис. 5.38. Второй участок – AB содержит также два интервала: интервал движения с постоянной контурной скоростью и интервал торможения по параболическому закону изменения ускорения во времени.

Как видно из графика изменения контурной скорости (см. рис. 5.38), система обрабатывает траекторию движения с векторной ошибкой, достигающей своего максимума на участке движения с постоянной скоростью, равной 200 мкм.

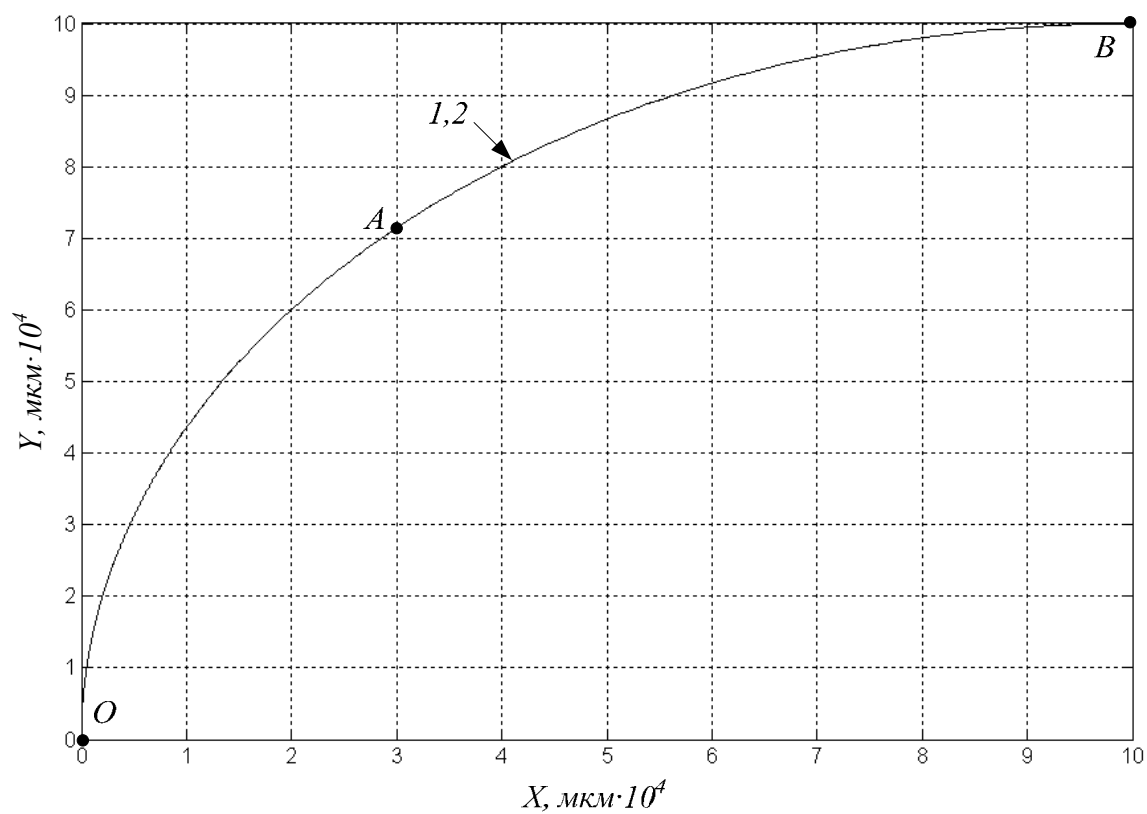


Рис. 5.37. Дуга окружности, описанная сплайном на плоскости XY : 1 – заданная траектория; 2 – отработанная траектория

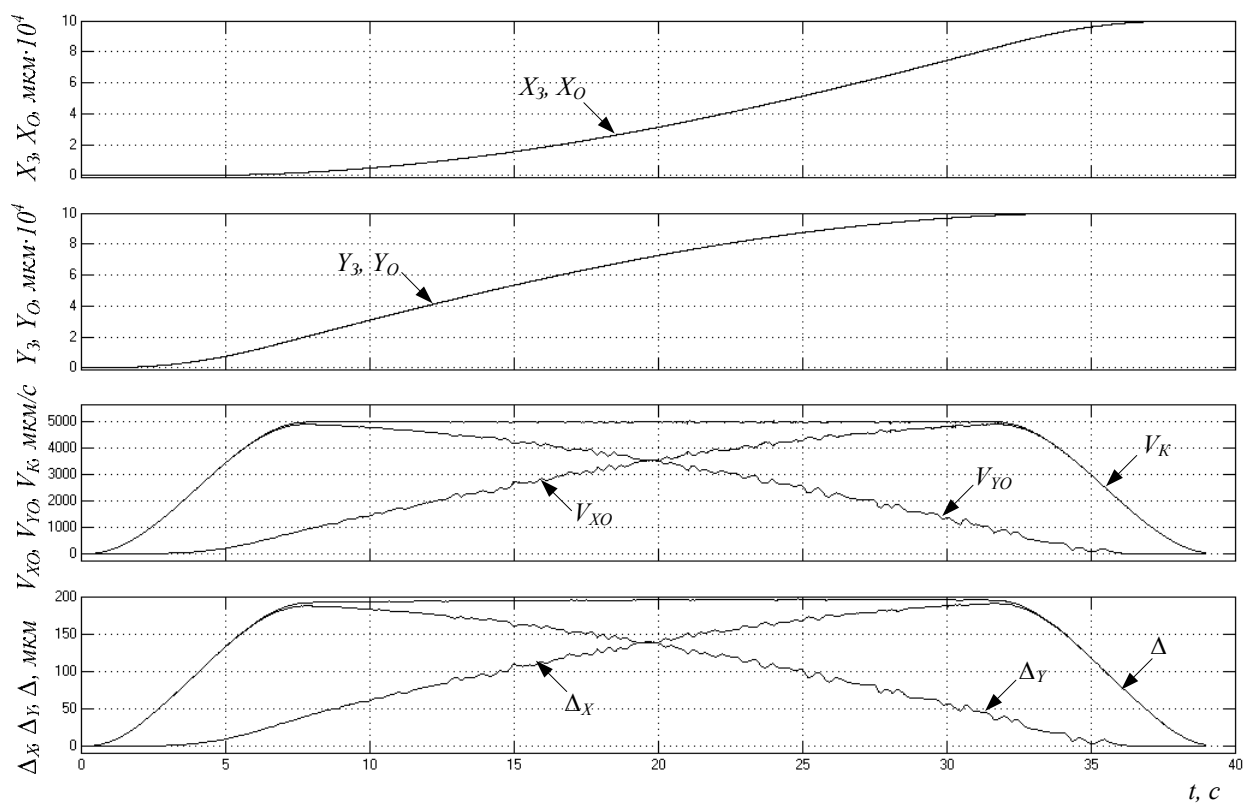


Рис. 5.38. Изменение во времени положения, координатной скорости и ошибки по осям X, Y

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с ростом заданной скорости вследствие инерционности приводов, а также отсутствием полной информации о траектории в сигнале задания происходит рост координатных и векторных ошибок. Недостаток классической системы подчиненного регулирования – наличие неполной информации о траектории в сигнале задания устраняет предложенное цифровое корректирующее устройство третьего порядка. Критериями при оценке эффективности ЦКУ принято следующее: минимизация векторной ошибки следящей системы и ошибки поддержания скорости на заданном уровне. В качестве тестовой траектории (рис. 5.39) принята прямолинейная траектория движения, описанная тремя сплайнами третьего порядка. Выбор такой траектории объясняется тем, что наиболее просто проконтролировать изменение координатной ошибки и сигнала цифровой коррекции, оценить влияние каждой из трех составляющих сигнала ЦКУ, так как разложение каждой составляющей на оси X, Y дает одинаковую картину изменения во времени. Поэтому, далее при анализе переходных процессов будут рассмотрены соответствующие характеристики, полученные для одной оси X . Частота дискретизации по времени равна $f = 100 \text{ Гц}$, заданная контурная скорость $V_k = 1000 \text{ мкм/с}$, допустимое контурное ускорение $a_k = 1000 \text{ мкм/с}^2$. Траектория была задана тремя сплайнами, обозначенными участками OA, AB, BC .

Коэффициенты комбинированного (табл. 5.6) управления для каждой координаты были получены, исходя из параметров модели экспериментальной установки и выражений, записанных в главе 3.

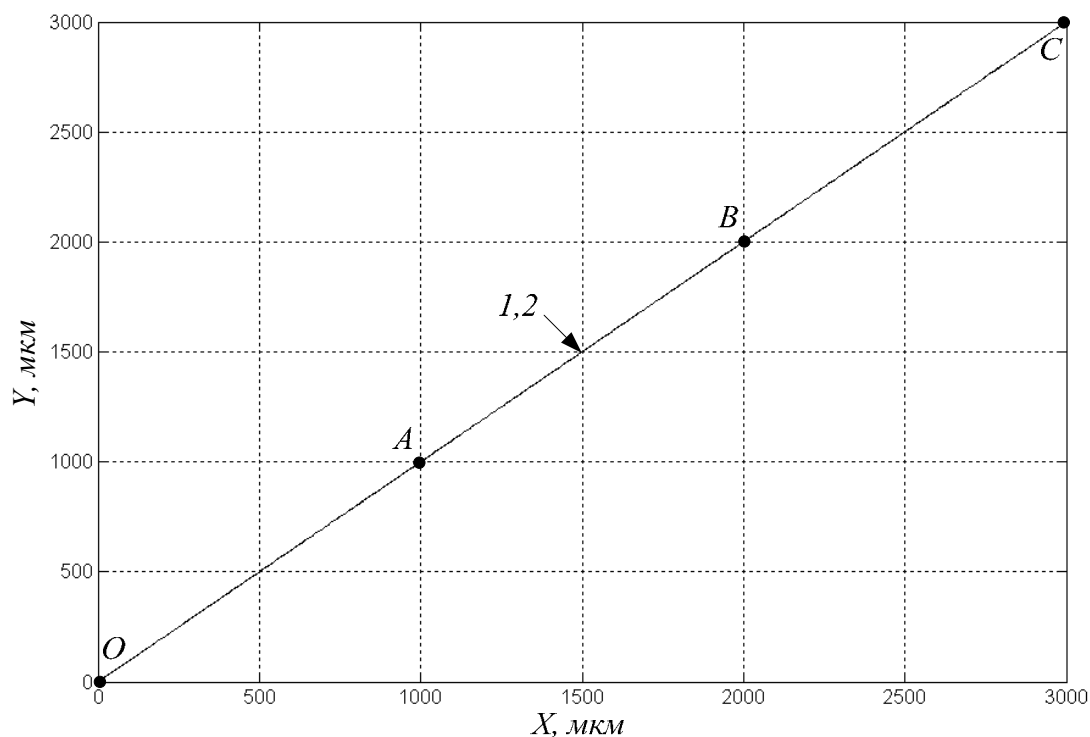


Рис. 5.39. Заданная сплайном 1 и отработанная 2 траектория движения на плоскости XY при отсутствии цифровой коррекции

Таблица 5.6

Ось	Коэффициент ЦКУ	Значение
X	α_1^X	$0,06B / \text{мкм}$
	α_2^X	$0,211B / \text{мкм}$
	α_3^X	$0,566B / \text{мкм}$
Y	α_1^Y	$0,06B / \text{мкм}$
	α_2^Y	$0,211B / \text{мкм}$
	α_3^Y	$0,566B / \text{мкм}$

Равенство соответствующих коэффициентов ЦКУ для осей X и Y определяется одинаковыми коэффициентами регуляторов положения и постоянными времени входного фильтра РЭП. Идентичность коэффициентов регуляторов положения и постоянных времени фильтров обусловлена одинаковыми параметрами механической части системы для каждой оси, а также наличием 5-й точки настройки в обоих случаях.

Полученные переходные процессы (рис. 5.40) при отработке линейной траектории движения показывают наличие координатной ошибки по оси X ,

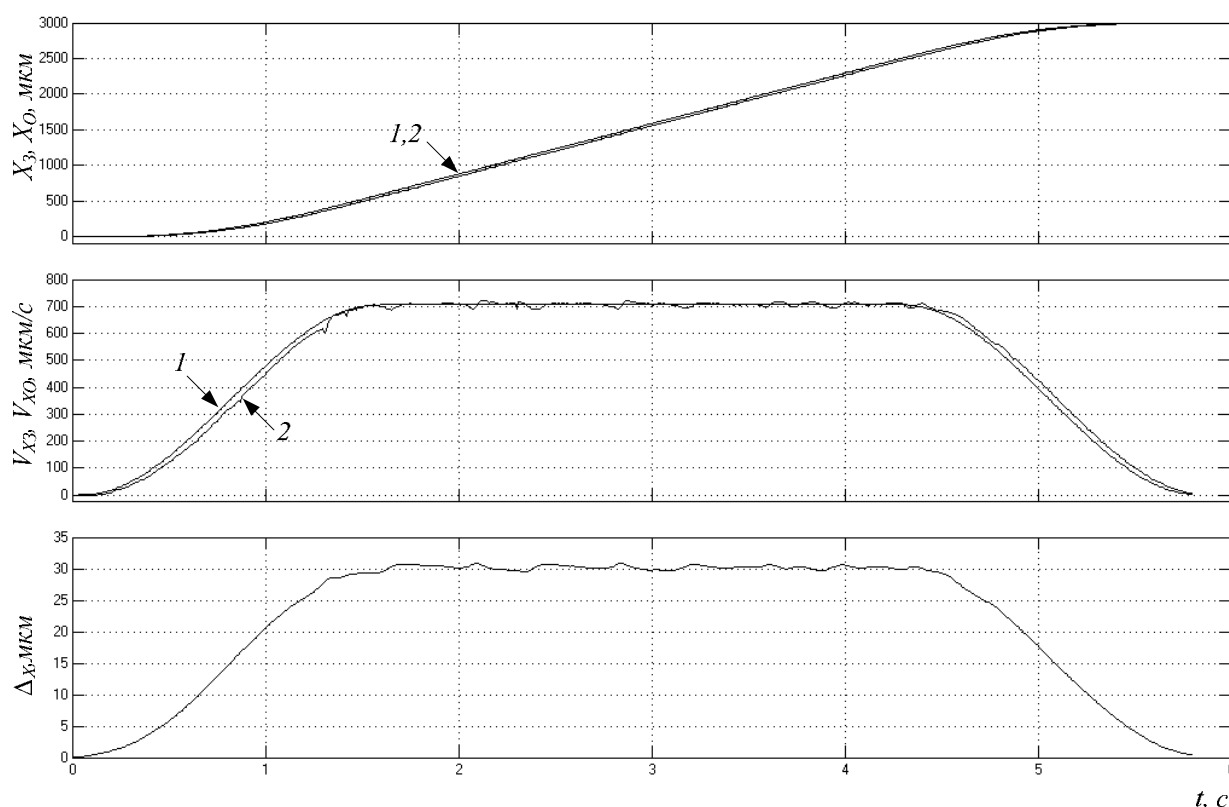


Рис. 5.40. Движение по координате X при отсутствии цифровой коррекции:
1 – заданная траектория; 2 – отработанная траектория

достигающей своего максимума 30мкм на участке движения с постоянной скоростью, равной $V_x = 707,1\text{мкм/с}$. В то же время график изменения координатной скорости показывает наличие ошибки поддержания заданной координатной скорости на этапах разгона/торможения. Максимум скоростной ошибки достигает на участке, соответствующем изменению знака производной от функции ускорения. На этапе разгона скоростная ошибка достигает своего максимума, равного 42мкм/с . В свою очередь, на тапе торможения максимальная скоростная ошибка равна -41мкм/с . Изменение знака скоростной ошибки при торможении говорит о том, что перемещение привода из-за своей инерционности опережает сигнал задания.

На рис. 5.41 приведены зависимости, отражающие движение СЭП при наличии цифровой коррекции. При введении ЦКУ происходит значительное уменьшение скоростных и координатных ошибок СЭП.

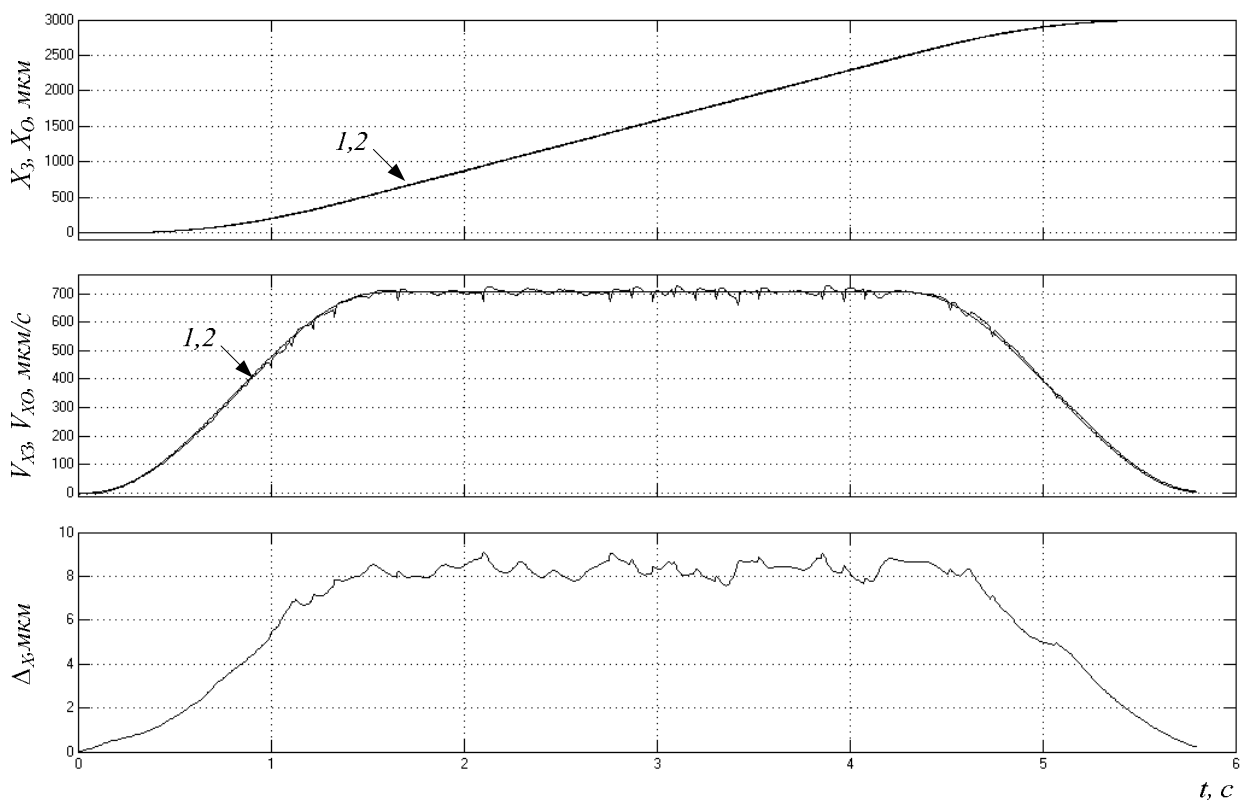


Рис. 5.41. Движение по координате X при наличии цифровой коррекции:
1 – заданная траектория; 2 – отработанная траектория

Принимая максимальные ошибки по скорости и положению за 100%, оцениваем, как изменяются соответствующие максимальные ошибки с введением первой, второй и третьей составляющих ЦКУ (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Порядок ЦКУ	Максимальная скоростная ошибка по оси X		Максимальная координатная ошибка
	Разгон	Торможение	
—	42 мкм/с, (100%)	– 41 мкм/с, (100%)	30 мкм, (100%)
1	19 мкм/с, (45,2%)	– 21 мкм/с, (51,2%)	9,8 мкм, (32,6%)
2	16 мкм/с, (38%)	– 19 мкм/с, (46,3%)	9,5 мкм, (31,6%)
3	15 мкм/с, (35,7%)	– 16 мкм/с, (39%)	9,3 мкм, (31%)

Установлено, что наибольший вклад в суммарный сигнал ЦКУ дает сигнал, пропорциональный первой разности от входного сигнала. Это позволяет уменьшить координатную ошибку на 67,4% и скоростную ошибку на этапе разгона – на 54,8%. Введение в суммарный сигнал ЦКУ первой и второй разностей уменьшает координатную ошибку на 68,4%, а скоростную – на 62%. В свою очередь, введение трех разностей снижает координатную ошибку на 69%, а скоростную – на 61,3%. Наименьший вклад в минимизацию координатной ошибки составляет сигнал, пропорциональный третьей разности от входного сигнала – около 1%. Полученные экспериментальные данные подтверждают диаграммы изменения каждой составляющей сигнала ЦКУ во времени (рис. 5.42), из которых можно заключить, что наибольший вклад на всех

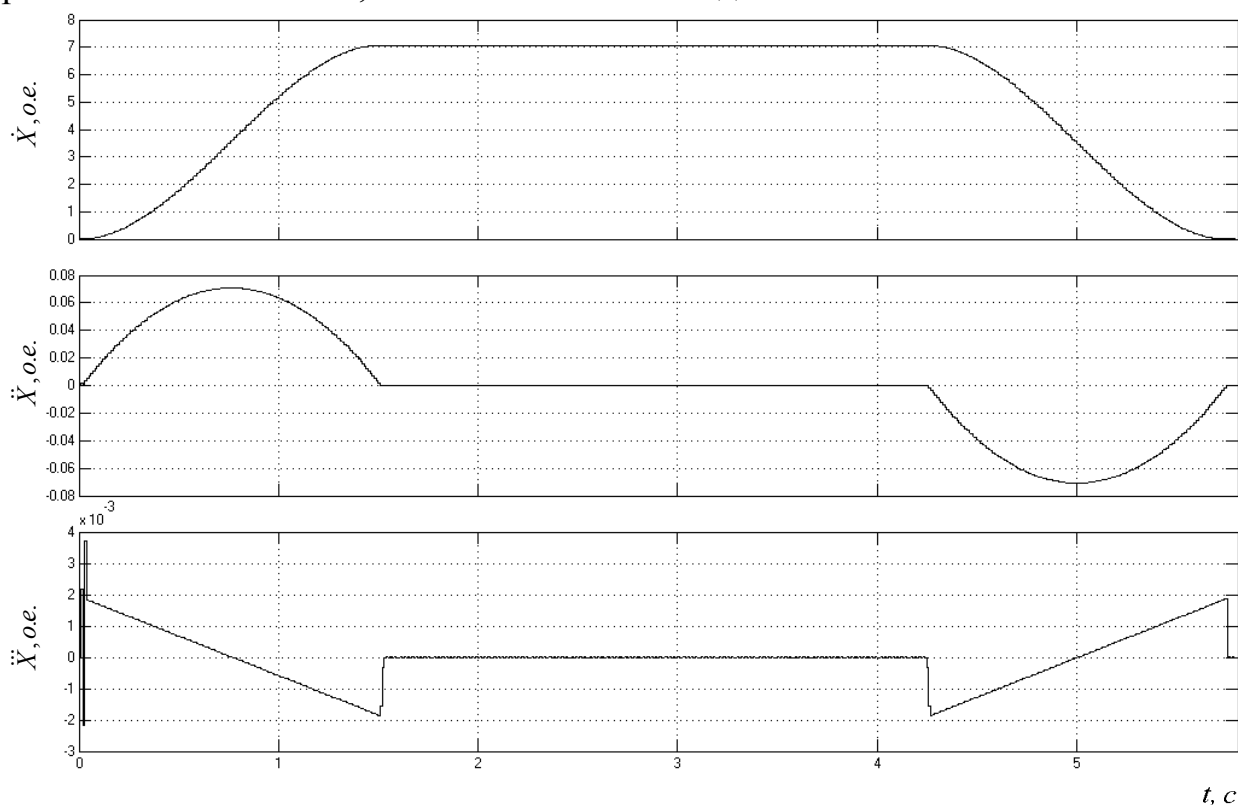


Рис. 5.42. Изменение составляющих сигнала ЦКУ: $\dot{X}$ – разность первого порядка; $\ddot{X}$ – разность второго порядка; $\dddot{X}$ – разность третьего порядка

интервалах движения вносит сигнал, пропорциональный первой разности. Сигналы, пропорциональные второй и третьей разности, вносят свой вклад только на этапах разгона/торможения.

В общем случае степень вклада каждой составляющей определяется заданной контурной скоростью и ускорением, а также геометрией траектории движения. Так, если задать ступенчатый закон изменения ускорения (линейное нарастание скорости), то вклад третьей разности будет отсутствовать, поскольку производная будет равна нулю. Влияние геометрии траектории на расчет ЦКУ проявляется в виде изменения знака сигнала ЦКУ или быстром изменении его величины. Это можно увидеть из диаграмм (рис. 5.36), где при постоянстве контурной скорости наблюдается скачкообразное изменение координатной скорости. Во избежание скачкообразного нарастания сигнала ЦКУ, что может привести к резким изменениям скорости и росту координатной и, как следствие, векторной ошибки, необходимо анализировать поступающую информацию от интерполятора на несколько тактов вперед. При необходимости следует ограничивать сигнал ЦКУ на допустимом уровне.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1

Параметры механической части системы (ось X)

Обозначение	Название	Значение
t_B	Шаг резьбы винта на оборот	6мм
l_B	Длина ходового винта	0,8м
d_B	Средний диаметр резьбы	34мм
$i_{ред}$	Передаточное число редуктора	12
J_1	Момент инерции ходового винта	$4,06 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
m	Масса перемещаемого груза (крышки стола)	129,73кг
j_Σ	Эквивалентная осевая жесткость механизма	270Н/мкм
$k_{тр}$	Коэффициент трения в направляющих	0,1
$J_{ш1}$	Момент инерции первой шестерни	$6,27 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
$J_{ш2}$	Момент инерции второй шестерни	$7,52 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Таблица П2

Параметры механической части системы (ось Y)

Обозначение	Название	Значение
t_B	Шаг резьбы винта на оборот	6мм
l_B	Длина ходового винта	0,8м
d_B	Средний диаметр резьбы	34мм
$i_{ред}$	Передаточное число редуктора	12
J_1	Момент инерции ходового винта	$4,06 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
m	Масса перемещаемого груза	167,29кг
j_Σ	Эквивалентная осевая жесткость механизма	270Н/мкм
$k_{тр}$	Коэффициент трения в направляющих	0,1
$J_{ш1}$	Момент инерции первой шестерни	$6,27 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
$J_{ш2}$	Момент инерции второй шестерни	$7,52 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

ЛИТЕРАТУРА

1. Алберг Д., Нильсон Э., Уолт Д. Теория сплайнов и ее применения. – М.: Мир, 1972. – 475с.
2. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2 ч. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1986. – 367с.
3. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2 ч. Ч.2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1986. – 504с.
4. Батоврин А.А., Дашевский П.Г., Лебедев В.Д., Марков Б.А. Цифровые системы управления электроприводами. – Л.: Энергия, 1977. – 256с.
5. Бобровский С. И. Delphi 7: Учебный курс . –СПб.: Питер, 2003. – 736с.
6. Босинзон М.А. Автоматизированные мехатронные модули линейных и вращательных перемещений металлообрабатывающих станков // Приводная техника. – 2002. №1. – С. 10-19.
7. Букреев В.Г., Гусев Н.В. Алгоритм планирования траектории движения следящего многокоординатного электропривода // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2003. №3. – С. 16-20.
8. Герман-Галкин С.Г. и др. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. –Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 248с.
9. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. –М.: КОРОНА, 2001. – 351с.
10. Гусев Н.В. Алгоритмическое обеспечение систем управления следящими электроприводами // Научно-технический и учебно-образовательный журнал: Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2006. №3. – С. 57-60.
11. Демидов С.В., Авдушев С.А., Дубников А.М. и др. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками. – Л.: Машиностроение, 1986. – 236с.
12. Деч, Густав. Руководство к практическому применению Лапласа и Z-преобразования: Пер. с нем. / Г. Деч. – М.: Наука, 1971. – 288с.
13. Дробышев В.И., Дымников В.П., Ривин Г.С. Задачи по вычислительной математике. – М.: Наука, 1980. – 440с.

14. Емельянова Е.А. Концепция построения гибкого пользовательского интерфейса систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. №2. – С. 38-41.
15. Жданов А. NT - реально ли реальное время? // Открытые системы. – 1998. №1. – С. 25-29.
16. Жуков А. Изучаем Delphi. –СПб.: Питер, 2002. – 352с.
17. Иванов В.А., Ющенко А.С. Теория дискретных систем автоматического управления: учебное пособие. – М.: Наука, 1983. – 335с.
18. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование: Теория и элементы систем: Учеб. пособие. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 736с.
19. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512с.
20. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Об естественных интерполяционных сплайнах // Математическое моделирование. – 1994. №4. – С. 75-110.
21. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1986. – 440с.
22. Киселев В.М. Фазовые системы числового программного управления станками. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 349с.
23. Коровин Б.Г., Прокофьев Г.И., Рассудов Л.Н. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 352с.
24. Коринец И.Ф., Цзи Чжень Чун. Математическая модель технологической адаптации робота по зазору при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2002. №9. – С. 9-11.
25. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704с.
26. Крутько П.Д. Управление исполнительными системами роботов. – М.: Наука, 1991. – 332с.
27. Кудряшов В.С. Синтез цифровой связанной системы управления двумерным объектом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. №12. – С. 22-27.
28. Кузнецов С.А. Интеграция – главное направление на пути создания высокоэффективных машиностроительных САПР // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. №2. – С. 4-8.
29. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448с.
30. Макарьев К. Разрешите представить: RTWin // СТА. – 1998. №3. – С. 48-53.
31. Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: проблема реального времени // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2000. №3. – С. 37-40.

- 32.Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: реализация геометрической задачи // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2001. №1. – С. 9-15.
- 33.Поздеев А.Д. Комплектные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков. –М.: Энергия, 1980. – 288с.
- 34.Понамарев В. А. Delphi 7 Studio: Самоучитель. –СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 502 с.
- 35.Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л. Мартинов Г.М. Построение персональных систем ЧПУ (PCNC) по принципу открытых систем // Открытые системы. – 1997. №3. – С. 68-74.
- 36.Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: анализ современного мирового уровня архитектурных решений в области ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. №7. – С. 11-17.
- 37.Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: методологические аспекты построения открытых систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. №2. – С. 2-11.
- 38.Ту Ю. Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления: Пер. с англ. / Под ред. В. В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1964. – 703 с.
- 39.Удуд Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока. – Томск: изд. ТПИ, 1991. – 104с.
- 40.Хухлаев Е. Операционные системы реального времени и Windows NT // Открытые системы. – 1997. №5. – С. 48-51.
- 41.Чернов Е. А., Кузьмин В. П. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: Справочное пособие. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1989. – 320 с.
- 42.<http://community.borland.com>
- 43.http://www.computerinform.ru/inform15_97/f1.htm
- 44.http://www.fizmat.vspu.ru/citforum/operating_systems/rtx/index.html
- 45.<http://ncsystems.ru>
- 46.<http://matlab.exponenta.ru>
- 47.<http://msdn.microsoft.com/library/default.asp?url=/library/en-us/wceddk5/html/wce50lrftimesetevent.asp>
- 48.<http://www.sew-eurodrive.ru/>
- 49.<http://ncsystems.ru/>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ (СЭП)	4
1.1. Системы типа CNC и PCNC-1	6
1.2. Системы типа PCNC-2	8
1.3. Системы типа PCNC-3	10
1.4. Системы типа PCNC-4	12
1.5. Тенденции развития современных систем с цифровым программным управлением	15
1.6. Обзор устройств высокоточного перемещения специальных промышленных механизмов	19
1.7. Программные средства систем управления многокоординатными СЭП ..	23
2. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	27
2.1. Тенденции в развитии сервоприводов	27
2.2. Техническое развитие сервоприводов	29
2.3. Области применения сервоприводов	31
2.4. Обзор наиболее распространенных сервоприводов	33
2.5. Характеристики некоторых типов серводвигателей	39
2.6. Датчики обратной связи в системах управления СЭП	40
2.6.1. Резольвер	42
2.6.2. Инкрементный датчик угловых перемещений	47
2.6.3. Оптический датчик линейных перемещений	50
2.7. Обзор состояния рынка современных сервоприводов	52
2.7.1. Синхронные сервоприводы фирмы Panasonic	52
2.7.2. Синхронные сервоприводы фирмы Metronix	56
2.7.3. Синхронные сервоприводы фирмы Mitsubishi Electric	63
2.7.4. Синхронные сервоприводы фирмы OMRON	68
3. ОБЗОР МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СЭП	71
3.1. Постановка задачи интерполирования	72
3.2. Интерполяционный полином Лагранжа	74
3.3. Интерполяционный полином Ньютона	77
3.4. Кусочно-полиномиальная аппроксимация	80
3.5. Интерполяционный кубический сплайн дефекта 1	84
3.6. Математическое обоснование алгоритма интерполяции кубическим сплайном	88
3.6.1. Результаты тестирования алгоритма	91
4. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ PCNC СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ	99

4.1. Обзор современных сервоконтроллеров	99
4.2. Программные средства систем управления многокоординатными ЭП..	104
4.3. Вариант системы с программным сервоконтроллером в среде Delphi 7	107
4.4. Вариант системы с аппаратным сервоконтроллером	123
4.5. Алгоритмы формирования задающих воздействий при линейной и круговой интерполяции.....	141
4.6. Координатные и контурные ошибки при воспроизведении траекторий движения	152
4.7. Обзор структур инвариантных автоматических систем управления	155
4.8. Минимизация координатных ошибок на основе комбинированного управления следящими электроприводами.....	159
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИФРОАНАЛОГОВОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	165
5.1. Концепция распределенного построения модели в средах MATLAB 7 – Delphi 7.....	165
5.2. Пример кинематической цепи механизма.....	169
5.3. Модель цифро-аналогового следящего электропривода постоянного тока	173
5.4. Модель цифро-аналогового СЭП с комбинированным управлением.....	178
5.5. Экспериментальные исследования электромеханической системы	188
5.6. Экспериментальные исследования цифровой системы управления	196
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	207
ЛИТЕРАТУРА	208

Николай Владимирович Гусев
Виктор Григорьевич Букреев

СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКООРДИНАТНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Учебное пособие

Редактор

О.М. Васильева

Подписано к печати . Формат 60x84/16. Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. Уч.-изд.л. .

Заказ . Тираж экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирова-
на



NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.