

сш 455060

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

УДК 62-83-52

ЛЕОНОВ Анатолий Петрович

ПОЗИЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ СТАНКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Специальность: 05.02.03 - Системы приводов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва, 1986

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР, г.Серпухов Московской области.

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Медведев В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Алексеев К.Б., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Самвелян К.В.

Ведущая организация: Московское научно-производственное объединение "Темп".

Защита состоится "15" Декабря 1986 г. в _____ часов на заседании Специализированного совета К053.15.06 в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

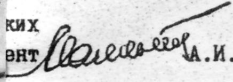
Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана.

22 1986 г.

КИХ

ВНТ

 А.И.Максимов

ем I п.л. Зак. 1235-р.100

ИИ 455060

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДО
НЕ ВЫДАЕТ

Актуальность проблемы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на перспективу до 2000 года особое внимание уделяется развитию станков с программным управлением, созданию автоматизированных участков и цехов, организации серийного производства промышленных роботов.

В настоящее время в связи с широким внедрением средств автоматизации в народное хозяйство актуальной стала проблема увеличения производительности автоматизируемого оборудования и улучшения его технико-экономических показателей за счет оптимизации управления. Одним из перспективных направлений повышения производительности и точности сверления отверстий в печатных платах на станках с программным управлением (ПУ) являются разработка и внедрение оптимальных (квазиоптимальных) по быстродействию прецизионных позиционных приводов с микропроцессорным управлением. Такой подход обусловлен необходимостью производства плат с различной топологией печатных проводников, большим количеством отверстий на каждой плате (тысячи штук) и высокой точностью их расположения (десятки мкм).

При построении оптимальных (квазиоптимальных) по быстродействию прецизионных позиционных приводов с микропроцессорным управлением возникают проблемы, связанные: с необходимостью выполнения противоречивых требований по быстродействию и точности, со сложностью математической модели привода, с квантованием по уровню и времени измерительных и управляющих сигналов, с реализацией в реальном масштабе времени синтезированных алгоритмов управления.

Для преодоления указанных трудностей должен быть разработан набор алгоритмов, позволяющих в результате выполнения взаимосвязанных аналитических и вычислительных процедур осуществить оптимизацию управления по критериям быстродействия и точности позиционирования с учетом условий физической реализуемости и неполной информации о состоянии объекта.

Кроме того, должны быть решены специфические проблемы, обусловленные особенностями технологического процесса обработки платы на станке с ПУ и связанные: с учетом разворота и смещения платы при установке, возможной усадкой фотоматериала негатива, с загрузкой большого объема информации в память устройства управления приводами для каждой из обрабатываемых плат, с обеспе-

чением диалога "оператор - станок".

В связи с изложенным особое значение приобретают проблемы разработки пригодных для практического применения методов синтеза алгоритмов квазиоптимального по быстродействию цифрового управления прецизионными позиционными приводами и исследования особенностей микропроцессорного управления ими при производстве печатных плат.

Цель работы. Автор ставит перед собой следующие цели:

- исследовать особенности квазиоптимальных по быстродействию цифровых позиционных прецизионных электроприводов и выработать рекомендации по их проектированию;
- создать методику построения реализуемых в реальном масштабе времени алгоритмов квазиоптимального по быстродействию управления приводами, при котором обеспечивается точность позиционирования ± 1 отсчет цифрового датчика (ЦД) положения без перерегулирования;
- создать электронную аппаратуру и программное обеспечение, позволяющие реализовать синтезированные алгоритмы управления и осуществить обработку платы на станке с ЧПУ;
- создать микропроцессорную систему управления приводами станка для обработки печатных плат и внедрить ее в производство.

Методика проведения исследований. Решение поставленных задач проведено с использованием алгоритмического синтеза и квазиоптимального управления на основании положений теории автоматизированного электропривода. Применены методы фазовой плоскости, численного решения уравнений на ЭВМ, наименьших квадратов. Результаты и основные теоретические выводы подтверждены путем экспериментальных исследований созданной на основании положений диссертационной работы микропроцессорной системы управления станком модели ОФ-72Б с квазиоптимальными по быстродействию прецизионными позиционными приводами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Исследованы особенности квазиоптимальных по быстродействию позиционных электроприводов с исполнительными двигателями постоянного тока и микропроцессорным управлением.

2. Предложена и обоснована методика синтеза реализуемого в реальном масштабе времени алгоритма квазиоптимального по быстродействию цифрового управления прецизионными позиционными электроприводами.

3. Разработан алгоритм управления прецизионным приводом в режиме точного позиционирования с чередованием контроля и регулирования.

4. Предложен способ и разработан алгоритм автоматической привязки координат центров отверстий к отсчетной системе станка.

5. Исследованы особенности применения микро-ЭВМ в системе управления приводами сверильного станка для обработки печатных плат в условиях мелкосерийного производства.

Практическая ценность работы состоит в том, что созданы:

- методика синтеза реализуемого в реальном масштабе времени алгоритма квазиоптимального по быстродействию цифрового управления позиционным приводом;

- электронная аппаратура и программное обеспечение, позволяющие реализовать синтезированные алгоритмы на базе микро-ЭВМ "Электроника-60" и осуществить обработку платы на станке;

- методика и стенд для исследования позиционных электроприводов, определения технических характеристик станка.

Результаты диссертационной работы внедрены в производство в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) при создании автоматизированного участка для обработки печатных плат на базе станков модели ОФ-72Б с квазиоптимальными по быстродействию прецизионными позиционными приводами. Акт о внедрении приводится в приложении к диссертации.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на третьем всесоюзном симпозиуме по проблемам модульных информационно-вычислительных систем (Москва, 1982), на научных семинарах Отделения электроники и автоматизации Института физики высоких энергий. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 научных статей и получено авторское свидетельство.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа выполнена на 181 странице, из них 125 страниц основного машинописного текста, 45 страниц иллюстраций, 8 страниц списка литературы, состоящего из 80 наименований и 3 страницы приложений.

Во введении показана актуальность задачи создания квазиоптимальных по быстродействию позиционных прецизионных электроприводов с микропроцессорным управлением станков для обработки печатных плат. Определена цель диссертационной работы, приведено краткое содержание ее глав, выделены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе на основании анализа технологического процесса сверления отверстий в печатных платах на станках с ЧПУ, приводов современных отечественных и зарубежных станков моделей КИ75-II, СИ28М.00.00.000, В-479М, ОФ-72Б, СФ-4, ОФ-101Ф2, СМ-600, ЛРКФ39-А, ЕВ-200, Trudril 100, 105, 95/8. Advanced Controls, ABL-24 и АКФ-25 SW Schmoll, Mark-IV Excellon Automation показано, что производительность и точность сверления в значительной мере зависят от быстродействия и точности позиционных приводов, при проектировании которых следует учитывать следующие особенности.

1. Позиционные приводы обеспечивают отработку широкого диапазона рассогласований с наибольшим быстродействием при получении заданной точности (± 1 отсчет ЦД положения). Причем наиболее характерными являются случаи отработки малых рассогласований, когда в процессе позиционирования скорость не достигает установившегося значения, и исполнительные двигатели (ИД) работают в режиме "разгон-торможение". Для получения наибольшего быстродействия они должны обеспечивать движение платформ станка с максимальными допустимыми ускорениями.

2. Микро-ЭВМ (микропроцессор) включена в замкнутый контур регулирования, где она выполняет функции задающего, сравнивающего, управляющего (корректирующего) звеньев, обеспечивает квазиоптимальное по быстродействию управление прецизионными позиционными приводами.

3. Механические части приводов выполнены с жесткостью узлов, соответствующей нормам на металлорежущие станки повышенной точности.

4. В каждом приводе использован один ЦД типа "угол-импульс" для получения информации о величине и скорости перемещения объекта управления, где величина скорости определяется числом импульсов, поступивших с выхода ЦД за фиксированный интервал времени.

5. Используется система автоматической привязки координат центров отверстий к отсчетной системе станка для учета разворота и смещения платы при установке, возможной усадки фотоматериала негатива.

6. Осуществляется загрузка информации из памяти ЭВМ участка автоматизированного проектирования плат в память устройства управления приводами, исключая процедуру перфоввода.

На основании анализа работ Болтянского В.Г., Батоврина А.А., Атанса М., Вавилова А.А., Видаль П., Горелова В.Н., Гольц М.Е., Колесникова А.А., Клева А.С., Смольникова Л.П., Цыпкина Я.З. сделан вывод о том, что проблема синтеза квазиоптимальных по быстродействию прецизионных позиционных приводов исследована недостаточно полно. Выделены объективные трудности и предложен способ решения этой проблемы на основании алгоритмического синтеза и квазиоптимального управления. Предложено:

- для алгоритмического синтеза позиционных электроприводов создать совокупность алгоритмов, позволяющих в результате выполнения ряда взаимосвязанных аналитических и вычислительных процедур осуществить оптимизацию законов управления объектом по критериям быстродействия и точности позиционирования;

- квазиоптимальность ввести в исходную постановку задачи, т.е. искать решение с учетом условий физической реализуемости и неполной информации о состоянии объекта.

На основании приведенных исследований сформулирована задача диссертационной работы, заключающаяся в создании методики синтеза реализуемых в реальном масштабе времени алгоритмов квазиоптимального по быстродействию цифрового управления прецизионными позиционными электроприводами с малоинерционными ИД и в создании микропроцессорной системы управления приводами сверлильного станка для обработки печатных плат в условиях мелкосерийного производства. Определены этапы решения поставленной задачи, в соответствии с которыми строится дальнейшее изложение материалов диссертационной работы.

Вторая глава диссертации посвящена:

1. Определению желаемых фазовых траекторий движения платформы нелинейного позиционного привода, электромеханическая часть которого описывается дифференциальными уравнениями 2-го порядка.

2. Разработке методики выбора малоинерционного ИД, обеспечивающего требуемые динамические свойства привода.

3. Построению адекватной математической модели электромеха-

нической части привода с учетом основных факторов, влияющих на качество позиционирования.

Показано, что с учетом эффектов квантования по уровню и времени величин перемещения и скорости движения платформы при цифровом управлении квазиоптимальное по быстродействию позиционирование состоит из 3-х режимов: разгона и торможения, точного позиционирования (ТП). Определено, проверяемое программным путем с наименьшим возможным периодом T_s , условие переключения на торможение

$$|NS_{\tau_{i_{max}}} + NS_{T_s}| \geq |NS_{уст} - NS_i|, \quad (1)$$

где единицей перемещения является отсчет ЦД, $NS_{\tau_{i_{max}}}$ — наибольшая ожидаемая величина перемещения при торможении, соответствующая текущему дискретному значению скорости NV_i , NS_{T_s} — наибольшая ожидаемая величина пути, проходимого объектом управления (ОУ) за время программной проверки условия (1), $NS_{уст}$ — заданная координата точки позиционирования (уставка), NS_i — координата платформы в момент проверки условия (1).

Показано, что если мгновенная скорость в момент переключения меньше наибольшей ожидаемой для данного NV_i , то фазовая траектория отличается от желаемой. Поэтому предложено при торможении проверять с периодом T_{st} выполнение условия

$$|NS_{\tau_{i_{max}}} + NS_{T_{st}}| \geq |NS_{уст} - NS_i|, \quad (2)$$

где $NS_{\tau_{i_{max}}}$ — наибольшая ожидаемая величина тормозного пути, соответствующая текущему дискретному значению скорости, $NS_{T_{st}}$ — наибольшая ожидаемая величина перемещения за время T_{st} .

Если условие (2) не соблюдается, то осуществляется торможение с меньшим замедлением (при напряжении питания на якоре двигателя, равном нулю).

Переключение на ТП осуществляется при возможно меньших дискретных значениях рассогласования и скорости, при которых обеспечивается сохранение направления перемещения.

Показана необходимость энергетической оценки процессов в проектируемых приводах, и предложена методика выбора малоинерционного ИД, обеспечивающего требуемые динамические параметры привода, в которой выделены 3 основных этапа:

1. Величина максимальной требуемой мощности определяется при торможении с наибольшим замедлением для момента, когда значение скорости равно установившемуся.

2. Проверяется, является ли допустимым для выбираемого двигателя ток в якоре, протекающий в течение времени торможения с наибольшим замедлением и превышающий номинальный в N раз.

3. Из условия, что среднеквадратическая мощность двигателя не превышает номинальную, рассчитывается зависимость наименьшей допустимой величины паузы между двумя последовательными позиционированиями от времени позиционирования.

При построении адекватной математической модели электромеханической части привода учтены основные факторы, влияющие на качество позиционирования, и построена нелинейная математическая модель электромеханической части привода с усилителем мощности, выполненным по схеме мостового транзисторного каскада (рис. 1). Для возможных режимов работы привода построены схемы замещения и определены решения дифференциальных уравнений с ненулевыми начальными условиями для вычисления на ЭМВ величин токов, перемещений, скоростей, ускорений, моментов сопротивления.

Построенная математическая модель является основой для алгоритмического синтеза проектируемых позиционных приводов.

Третья глава посвящена алгоритмическому синтезу квазиоптимального по быстродействию позиционного привода с цифровым управлением. Разработан набор взаимосвязанных аналитических и вычислительных процедур, обеспечивающих расчет фазовых траекторий в режимах разгона и торможения с наибольшим замедлением (алгоритмы "РАЗГОН" и "ТОРМОЗ"); расчет величин шагов квантования скорости при движении с переменным ускорением (алгоритм $KVQNT$); вычисление наибольших ожидаемых величин тормозного пути для каждого дискретного значения скорости при разгоне и торможении (процедуры $OPTIM1$ и $OPTIM2$).

Проведено исследование привода в режиме ТП. По разработанным в работе алгоритмам $FINQL$, $LIMIT1$, $LIMIT2$ рассчитаны наименьшая допустимая величина рассогласования в момент переключения на ТП и предельные фазовые траектории движения платформы в этом режиме при предложенном в диссертации управлении с чередованием контроля и регулирования.

В интервале контроля косвенным путем измеряется скорость как интервал времени перемещения платформы на фиксированное расстояние, например, равное единице отсчета датчика $\delta_{дат}$. По результатам измерения в интервале регулирования формируется управляющее воздействие $F_{упр}$, удовлетворяющее двум условиям:

– величина перемещения при наличии $F_{упр}$ не более $0,75 \delta_{дат}$,

Структурная схема позиционного электропривода

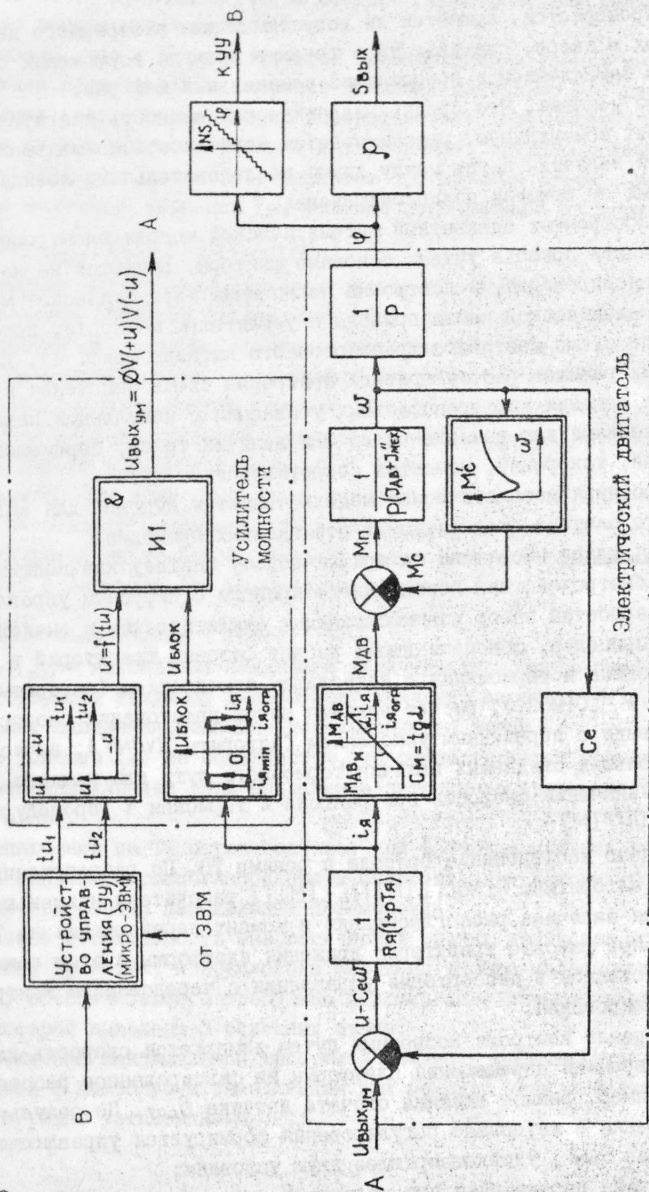


Рис. 1

что обеспечивает измерение в интервале контроля, близкого к мгновенному среднего значения скорости;

— к концу интервала регулирования мгновенная скорость находится в диапазоне

$$0,5\omega_{\text{пред}5} \leq \omega \leq \omega_{\text{пред}5}, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{пред}5}$ — скорость движения по предельной фазовой траектории, соответствующая текущему значению ошибки.

Разработана вычислительная процедура POZIC для расчета величин управляющих воздействий в интервалах регулирования и желаемых фазовых траекторий в режиме ТП, для которых в конце интервалов регулирования выполняется условие (3).

На основании результатов алгоритмического синтеза предложен и разработан реализуемый в реальном масштабе времени алгоритм управления двумя приводами, состоящий из фоновой и приоритетной программ. В фоновой программе выполняется управление приводом в режимах разгона с проверкой условия (1), торможения с проверкой условия (2), осуществляется синхронизация контроля и регулирования при ТП. В момент перехода к интервалу регулирования фоновая программа прерывается приоритетной, обеспечивающей формирование $F_{\text{упр}}$ на основании ранее проведенных расчетов по программе POZIC.

С учетом условий физической реализуемости предложена и разработана процедура KVQZI для расчета фазовых траекторий привода при отработке различных рассогласований. Приведены результаты расчетов по этой программе.

Четвертая глава посвящена реализации и экспериментальному исследованию микропроцессорной системы управления станком с квазиоптимальными по быстродействию позиционными приводами.

Предложен специализированный алгоритм автоматической привязки координат центров отверстий к отсчетной системе станка, позволяющий учесть разворот и смещение платы при установке, возможную усадку фотоматериала негатива. Реализован этот алгоритм на базе позиционных приводов с микропроцессорным управлением. Дополнительно вводится сканатор (рис. 2), состоящий из фото- и светодиода, которые работают в инфракрасной области спектра (фольга не пропускает инфракрасные лучи), на технологических полях платы наносятся 3 реперных креста. Кресты сканируются 17 раз при фиксированных Y , определяются координаты границ плечей креста. Методом наименьших квадратов определяются уравнения прямых, проходящих посередине плечей, рассчитываются координаты центра репера. Та-

кая процедура проделывается с каждым из 3-х реперов. По реальным и заданным при проектировании координатам центров реперов определяются коэффициенты CI-C6 шестипараметрического преобразования. Координаты центров отверстий (X_{cti} , Y_{cti}) в отсчетной системе станка вычисляются из выражений

$$\begin{aligned} X_{cti} &= C1 \cdot X_{nli} + C2 \cdot Y_{nli} + C3 \\ Y_{cti} &= C4 \cdot X_{nli} + C5 \cdot Y_{nli} + C6, \end{aligned} \quad (4)$$

где X_{nli} , Y_{nli} - координаты центра отверстия в отсчетной системе платы.

Предложена методика определения числа сканирований, при котором центры реперов определяются с заданной точностью с вероятностью не хуже 0,95.

Разработаны электронная аппаратура и программное обеспечение, позволяющие реализовать синтезированные алгоритмы управления приводами, автоматическую привязку координат центров отверстий к отсчетной системе станка, управление технологическим процессом обработки платы на станке (рис. 2). Приведены схемы разработанных для микро-ЭВМ интерфейсных электронных модулей и блок-схемы программ управления, написанных на языке PL-11. Объем программного обеспечения - около 2000 16-разрядных слов.

Разработан стенд для исследования позиционных приводов и определения технических характеристик станка, включающий аппаратуру стандарта SAMAC, микро-ЭВМ "Электроника-60", пакет программ машинной графики АТОМ 84.

Предложена методика и приведены результаты экспериментальных исследований точности позиционирования и сверления, точности 6-параметрического преобразования, быстродействия позиционных приводов и производительности станка. В результате определено, что разработанная в диссертационной работе микропроцессорная система управления приводами станка модели ОФ-72Б обеспечивает:

- точность позиционирования платформ координат X и Y - не хуже ± 1 отсчет ЦД или ± 10 мкм (без перерегулирования);
- время позиционирования платформ станка при перемещении на расстояние 2,5 мм и ограничении ускорения - не более 120 мс;
- производительность станка при ходе сверла 5 мм и перемещении платформ на 2,5 мм - 140 отв./мин.;
- время сканирования реперных меток и определения коэффициентов CI-C6 при автоматической привязке координат центров отверстий к отсчетной системе станка - не более 2 мин.;

- погрешность расположения центров отверстий на плате по обоим координатам - менее 6 отсчетов (0,06 мм);
- скорость загрузки данных в память микро-ЭВМ из удаленной центральной ЭВМ - 9600 бод (исключается процедура перфоввода);
- увеличение производительности труда в 7-8 раз по сравнению с ручным сверлением.

В приложении содержится акт о внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Предложен способ квазиоптимального по быстродействию цифрового управления позиционным электроприводом.
2. Выработаны рекомендации по выбору исполнительного электродвигателя позиционного привода, обеспечивающего обработку широкого диапазона рассогласований.
3. Построена математическая модель привода с учетом основных факторов, влияющих на качество позиционирования.
4. Предложена методика определения моментов переключения на торможение при цифровом управлении.
5. Создан набор вычислительных и аналитических процедур для алгоритмического синтеза на ЭВМ квазиоптимального по быстродействию цифрового управления, при котором обеспечивается заданная точность позиционирования без перерегулирования.
6. Исследованы и реализованы на микро-ЭВМ синтезированные алгоритмы управления.
7. Определены функции микро-ЭВМ в системе управления станком, обеспечивающие наиболее эффективное ее использование.
8. Разработана и реализована система автоматического базирования платы, обеспечивающая привязку координат центров отверстий к отсчетной системе станка.
9. Разработана и создана система управления электроприводами и станком, а именно: создана электронная аппаратура, разработано и отлажено программное обеспечение, осуществлена комплексная наладка станка с предлагаемой системой управления.
10. Экспериментально исследованы позиционные электроприводы станка и вся система управления им. Создан стенд для исследования позиционных электроприводов, позволяющий не только производить необходимые измерения, но и осуществлять построение кривых пере-

ходных процессов, фазовых траекторий.

Достоверность результатов исследований подтверждается данными проведенных экспериментов.

На основании теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, можно сделать следующие выводы.

1. Квазиоптимальное по быстродействию цифровое управление позиционным электроприводом, при котором обеспечивается позиционирование ОУ без перерегулирования с точностью ± 1 отсчет цифрового датчика положения, осуществляется в три этапа: разгон и торможение с ускорением, не превышающим заданного, точное позиционирование.

2. Переключение на торможение осуществляется при несоблюдении условия (1).

3. В режиме торможения с ограничением замедления осуществляется слежение за траекторией движения ОУ. Если условие (2) не соблюдается, то осуществляется торможение при напряжении питания на якоре двигателя, равном нулю. В противном случае обеспечивается движение ОУ с наибольшим допустимым замедлением.

4. В режиме точного позиционирования используется управление с чередованием контроля и регулирования, при котором в интервале контроля определяется средняя за интервал величина скорости, а в интервале регулирования формируется управляющее воздействие, являющееся функцией рассогласования и скорости перемещения ОУ.

5. Разработанная в диссертационной работе микропроцессорная система управления приводами станка модели ОФ-72Б обеспечивает характеристики, приведенные на стр. 10, 12.

6. Современные микропроцессорные средства позволяют реализовать качественное управление различными объектами. Гибкость микропроцессорных систем делает их особенно эффективными при оптимальном (квазиоптимальном управлении).

Полученные в диссертации результаты внедрены в производство в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) Государственного Комитета по использованию атомной энергии, где создан автоматизированный участок сверления печатных плат на базе станков модели ОФ-72Б. Внедрение результатов диссертации обеспечило повышение производительности труда в 7-8 раз по сравнению с ручным сверлением.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Дунайцев А.Ф. и др. Применение микро-ЭВМ "Электроника-60" в системах автоматического управления сверлильными станками с ЧПУ/А.Ф.Дунайцев, А.П.Леонов, Г.М.Максимов и др. // Сборник трудов третьего всесоюзного симпозиума по проблемам модульных информационно-вычислительных систем.- М.: Институт ядерных исследований АН СССР, 1983.- С.170-173.

2. Голобородько С.Г., Леонов А.П., Устинов Е.А. Математическое моделирование квазиоптимальных по быстродействию цифровых позиционных автоматических систем с исполнительными двигателями малой мощности.- Серпухов, 1986.- 18 с. (Препринт/Институт физики высоких энергий: ИФВЭ 86-15).

3. Леонов А.П., Попов В.В., Устинов Е.А. Реверсивный транзисторный преобразователь для управления двигателем постоянного тока // Приборы и техника эксперимента.- 1978.- № 5.- С.180-182.

4. А.с. 1072072 СССР, МКИ⁴ G 06 K 11/00. Устройство для считывания информации с печатных плат/Е.А.Устинов, А.Ф.Дунайцев, А.П.Леонов, Н.Н.Чернявский, Г.В.Радыгин (СССР).- № 3468978/18-24; Заяв. 09.07.82; Опубл. 07.02.84, Бюл. № 5 // Открытия. Изобретения.- 1984.- № 5.- С.173-174.

5. Голобородько С.Г. и др. Организация и основные характеристики систем управления сверлильными автоматами для изготовления печатных плат/С.Г.Голобородько, А.А.Денисенко, А.Ф.Дунайцев и др.- Серпухов, 1982.- 15 с. (Препринт/Институт физики высоких энергий: ИФВЭ 82-177).

6. Голобородько С.Г. и др. Интерфейс обработки импульсных сигналов в режиме прямого доступа к памяти ЭВМ "Электроника-60"/С.Г.Голобородько, В.И.Инышаков, А.П.Леонов и др. // Приборы и техника эксперимента.- 1982.- № 4.- С.66-72.

7. Голобородько С.Г. и др. Интерфейс управления исполнительными элементами систем автоматического управления от ЭВМ "Электроника-60"/С.Г.Голобородько, В.И.Инышаков, А.П.Леонов и др.- Серпухов, 1980.- 12 с. (Препринт/Институт физики высоких энергий: ИФВЭ 80-113).

