

На правах рукописи

СМИРНОВ Александр Андреевич

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА БАЗЕ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦИФРОВОЙ
СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор **Тарарыкин Сергей Вячеславович**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Голубев Александр Николаевич**

доктор технических наук, доцент **Чернов Евгений Александрович**

Ведущая организация

ОАО «Ивановский завод тяжелого станкостроения» г. Иваново

Защита состоится «16» марта 2012 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.В. ТЮТИКОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие технологии металлообработки характеризуется постоянным возрастанием требований к точности и динамическим характеристикам станков. Устойчивыми тенденциями развития являются: повышение гибкости и функциональности металлообрабатывающего оборудования, одновременное увеличение производительности и качества производимых деталей, улучшение энергоэффективности станков, увеличение числа рабочих координат.

Одним из сдерживающих факторов развития станкостроения в настоящее время становится отсутствие отечественных высококачественных цифровых электроприводов подачи и главного движения.

Применение устаревших аналоговых приводов, а также современных цифровых приводов с аналоговым управлением не позволяет достичь высоких показателей качества. Поэтому они не могут служить составной частью сложных многокоординатных обрабатывающих центров, требующих высокой статической и динамической точности при воспроизведении контурно-позиционных перемещений.

Современный цифровой электропривод позволит сформировать отечественную комплектную цифровую систему управления электрооборудованием станка, конкурентоспособную по отношению к аналогичным зарубежным системам.

Целью работы является разработка электропривода для металлорежущих станков с ЧПУ на базе асинхронного двигателя с цифровой системой управления, обеспечивающего высокоточное управление движением.

Достижение поставленной цели определяет необходимость решения следующих **задач**:

1) анализ проблем управления электроприводами подачи и главного движения станков с ЧПУ и определение требований, предъявляемых к современным электроприводам для металлорежущих станков;

2) определение принципов рационального построения высокоточных электроприводов и разработке программно-аппаратных средств станочного электропривода;

3) разработка подходов к оптимальному управлению моментом асинхронного электропривода в широком скоростном диапазоне;

4) исследование влияния эффектов квантования по уровню и по времени на динамические и статические погрешности поддержания заданной траектории движения;

5) разработка опытного образца цифрового электропривода для металлорежущих станков на базе асинхронного двигателя с цифровой системой управления;

6) экспериментальное исследование динамических и нагрузочных характеристик разработанного электропривода для станков с ЧПУ.

Связь с целевыми программами. Работа выполнялась в соответствии:

- с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по направлению «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров» шифр «2010-1.1-409-007» по теме: «Комплексная разработка цифровой системы ЧПУ и асинхронного электропривода для металлорежущих станков с применением перспективных технологий обработки» (государственный контракт № 02.740.11.0521).

- с постановлением правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. №218 «О мерах государственной поддержки развития и кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» по направлению «Создание серии высокоскоростных энергоэффективных технологических комплексов с цифровой системой управления для прецизионной обработки деталей сложной конфигурации» шифр «2010-218-02-031»

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использованы методы теории автоматического управления, операционное исчисление, аппарат передаточных функций и структурных схем; спектральный анализ и преобразование Фурье, методы объектно-ориентированного программирования. Исследование синтезируемых систем выполнялось методами имитационного моделирования и натуральных экспериментов на лабораторном и производственном оборудовании.

Научная новизна определяется разработкой и реализацией новых подходов к созданию электроприводов подачи и главного движения металлорежущих станков с ЧПУ и заключается в следующем:

1) предложены принципы рационального построения цифрового электропривода для станков с ЧПУ, характеризующиеся применением реконфигурируемой структуры, принципов комбинированного управления скоростью и положением, а также цифровых способов передачи и обработки сигналов управления и обратной связи;

2) разработаны структуры наблюдателей магнитного потока ротора асинхронного двигателя и тока намагничивания с применением 2-х мерной импульсной переходной функции, обеспечивающие меньшую погрешность при определении заданного вектора в динамических режимах разгона и торможения по сравнению с известными наблюдателями;

3) предложена методика настройки наблюдателя магнитного потока ротора при заранее неизвестных параметрах ротора и нелинейности кривой намагничивания;

4) разработан алгоритм управления током намагничивания асинхронного двигателя, позволяющий обеспечить оптимальное управление моментом в широком скоростном диапазоне;

5) предложены структурные решения, позволяющие уменьшить динамическую и статическую ошибки слежения системы с регулятором положения, а также снизить негативное влияние квантования сигналов по времени и по уровню.

Практическую ценность имеют следующие результаты работы:

1) подробные и упрощенные математические модели цифровой системы управления асинхронным электроприводом;

2) опытный образец электропривода для металлорежущих станков с ЧПУ на базе асинхронного двигателя с цифровой системой управления и программные средства для его диагностики и настройки;

3) методика настройки электропривода подачи и главного движения металлорежущих станков с ЧПУ;

4) лабораторный испытательный стенд и программные средства, позволяющие осуществлять исследование динамических и статических характеристик станочного электропривода, а также его настройку.

Практическое использование результатов работы. Опытный образец разработанного электропривода IntDrive-Auto установлен в составе системы ЧПУ «IntNC» на новом горизонтально-расточном станке ИС2А637ПФ4 производства ОАО «Ивановский завод тяжелого станкостроения».

Использование в учебном процессе. Опытный образец электропривода установлен на лабораторном испытательном стенде, предназначенном для исследовательских работ студентов и аспирантов кафедры «Электроника и микропроцессорные системы» при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 220200.62 «Автоматизация и управление», и инженеров по специальности 210106.65 «Промышленная электроника» по курсу «Основы силовой электроники», а также в ходе дипломного проектирования студентов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» XV-XVI Бенардоссовские чтения (Иваново 2009, 2011), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тринадцатая Междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов». (Москва, 2007), на X Международной научно-практической конференции «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения» (Новочеркасск 2010), Третьей всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» (Москва, 2010), VI Международной (XVII Всероссийской) конференции по электроприводу «АЭП-2010» (Тула 2010), The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (Рига, 2011).

Опытный образец разработанного электропривода был представлен на международных выставках «Металлообработка – 2010» (Москва, 2010) и «Металлообработка – 2011» (Москва, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендуемых ВАК Министерства образования РФ, и одна статья в зарубежном научном журнале; получено положительное решение по заявке № 2010141347 на изобретение: «Способ векторного управления моментом асинхронного электродвигателя и устройство для его осуществления»; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617310 «Комплекс программ для реализации на ПЛИС структурных элементов цифрового электропривода».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 217 наименования, и 6 приложений. Работа изложена на 150 листах машинописного текста, содержит 111 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации, показаны ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе выполнен анализ основных тенденций развития станкостроения, принципов построения и современных требований к высокоточным электроприводам, применяемым в металлорежущих станках с ЧПУ.

Обзор существующих тенденций в области станкостроения показал, что развитие ведется по нескольким направлениям, связанным как с совершенствованием самих станков, так и технологии процесса металлообработки.

В настоящее время основными тенденциями развития высокоточных станков являются: совмещение токарных и фрезерных операций на одном станке и обработка детали за один установ; увеличение числа рабочих координат; возрастание скоростей быстрых перемещений и рабочих подач; уменьшение редукии в кинематических передачах и переход к прямому приводу от двигателя к рабочему органу. Кроме того, наиболее передовые станки оснащаются высокопроизводительными цифровыми системами числового управления с возможностью пятикоординатной обработки.

В области технологии металлообработки наиболее динамично развивается высокоскоростная обработка. Данная технология позволяет существенно повысить производительность, увеличить точность обработки, а также выполнять обработку тонкостенных деталей из алюминия и титана.

Анализ развития станочных электроприводов показал, что в настоящее время основное количество современных высокоточных приводов составляют вентильные приводы и приводы на базе синхронных двигателей с векторным управлением. Приводы на базе асинхронных двигателей, несмотря на ряд успешных серийных разработок прошлых лет, таких как Размер-2М, в современных приводах подачи широкого развития не получили. Как

правило, асинхронные электроприводы используются в приводах главного движения с возможностью управления скоростью вверх от номинального значения.

В целом развитие электроники и цифровых технологий привело к тому, что наиболее передовые станочные электроприводы представляют собой полностью цифровые системы, содержащие в своем составе выделенный высокоскоростной такт-синхронный интерфейс для управления в реальном времени.

Быстрое развитие вычислительных мощностей микроконтроллеров позволило значительно уменьшить такты квантования контуров управления, повысить сложность управляющих алгоритмов и ввести более развитые способы компенсации нелинейностей.

В условиях перехода к цифровому управлению все шире идет внедрение станочных приводов, управляемых не по скорости (частоте вращения), а по положению (углу поворота). В качестве регуляторов положения используются ПИД и ПД - регуляторы с комбинированным управлением, а в ряде случаев - полиномиальные регуляторы высокого порядка.

В большинстве случаев система управления строится с угловым фотоэлектрическим измерителем перемещения, установленным на вал двигателя. В тех случаях, когда необходимо напрямую измерять положение рабочего органа, применяются линейные измерители перемещения. При этом становится возможным обеспечить малую ошибку слежения (менее 1 мкм), а также ее постоянство с течением времени.

Анализ требований к станочным электроприводам показал, что для более полной оценки их возможностей и сравнения характеристик целесообразно использовать ряд тестовых воздействий. К их числу следует отнести: ступенчатое воздействие; серию ступенчатых перемещений в прямом и обратном направлениях; серию гармонических или параболических движений с отработкой в линейной зоне; разгон до номинальной скорости с номинальным динамическим моментом, реверс и торможение; ступенчатое приложение момента. Качество воспроизведения данных воздействий позволит получить адекватную оценку работы привода в составе системы управления электрооборудованием металлорежущего станка.

В результате сделан вывод о том, что современный станочный электропривод рационально строить на базе асинхронного двигателя, питаемого от автономного инвертора напряжения с прямым цифровым управлением. В составе системы следует применять наблюдатель магнитного потока ротора, использующий информацию об угловом положении ротора. Обработка и передача всех сигналов, в том числе и сигнала задания, должна вестись в цифровой форме. В состав системы должны входить комбинированные регуляторы положения и скорости. Необходимо обеспечить возможность управления магнитным потоком двигателя не только в приводах главного движения, но и в приводах подачи.

Вторая глава посвящена решению задач построения, оптимизации и настройки контура управления моментом цифрового станочного электропривода на базе асинхронного двигателя.

Проведен анализ широко распространенных структур контура управления моментом с измерителем положения или частоты вращения. Показано, что все они обладают общими недостатками – наличием перекрестных связей между каналами управления магнитным потоком и моментом и отсутствием средств компенсации постоянной времени ротора в канале управления магнитным потоком.

Для устранения указанных недостатков предлагается реализовать динамический наблюдатель вектора магнитного потока ротора на базе 2-х мерной свертки по временной и пространственной координатам (рис.1). Показано, что данный наблюдатель значительно ослабляет перекрестную связь между каналами управления, а также позволяет определять не только фазу, но и модуль вектора магнитного потока ротора. Это дает возможность реализовать дополнительный контур компенсации медленной постоянной времени.

В рамках предложенного подхода также был разработан динамический наблюдатель тока возбуждения двигателя I_0 (рис.2). Наблюдатель имеет один настраиваемый параметр и также позволяет организовать контур компенсации медленной постоянной времени. По результатам разработки наблюдателей получено положительное решение по заявке на изобретение № 2010141347: «Способ векторного управления моментом асинхронного электродвигателя и устройство для его осуществления».

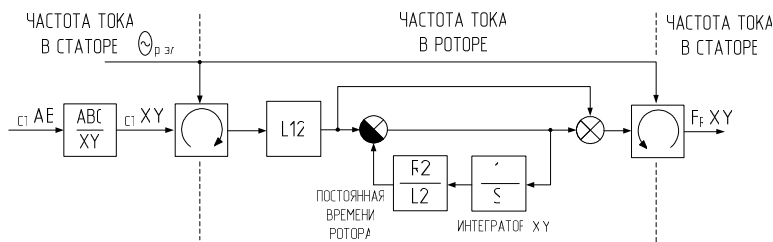


Рис.1. Структура динамического наблюдателя потока ротора: R_2, L_2 – активное сопротивление и индуктивность фазы ротора, L_{12} – взаимная индуктивность, ABC/XY – трех-двухфазное преобразование координат, $I_{СТ}(A,B)$ – ток статора в фазах А и В, $F_r(X,Y)$ – магнитный поток ротора, $\theta_{р.эл.}$ – угловое положение ротора

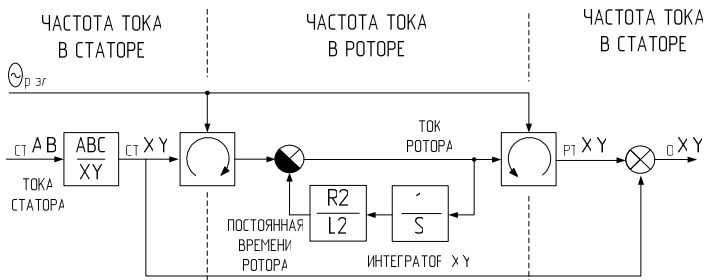


Рис.2. Структура динамического наблюдателя тока возбуждения: $I_{RT}(X, Y)$ – ток ротора, $I_0(X, Y)$ – ток возбуждения

Оценка влияния неточности настройки наблюдателя фазы потока ротора на характеристики системы показывает, что даже при значительных отклонениях настройки от оптимальной, система остается работоспособной. Однако указанное отклонение приводит к нарушению ортогональности активной и намагничивающей составляющих тока статора в системе управления. В свою очередь, это вызывает сильную перекрестную связь между каналами, которая выражается в подмагничивающем или размагничивающем действии активного тока на ток намагничивания. Описываемый эффект проявляется тем сильнее, чем больше момент на валу.

Для осуществления точной настройки наблюдателя фазы потока ротора в условиях неизвестных параметров ротора разработана методика настройки. В основу методики положено предположение о том, что для правильно настроенной системы при постоянном, предварительно созданном токе намагничивания, верно соотношение:

$$M_D = C_M (I_{MAG}) \cdot I_{MAG} \cdot I_{ACT}, \quad (1)$$

где $C_M (I_{MAG})$ – магнитная постоянная, I_{MAG} – ток намагничивания, I_{ACT} – активный ток, M_D – динамический момент двигателя.

В качестве оценки момента двигателя предлагается использовать ускорение двигателя при отсутствии нагрузки на валу, что позволяет избежать дополнительных затрат на высокоточные измерители момента.

На примере настройки опытного образца электропривода мощностью 4 кВт и последующих испытаний на нагрузочном стенде показано, что разработанная методика позволяет достичь качественной настройки наблюдателя и высокой линейности зависимости ускорения от активного тока. Приблизительное постоянное значение ускорения электропривода в процессе разгона независимо от скорости и задания на активный ток (рис.3) свидетельствует о выполнении соотношения (1).

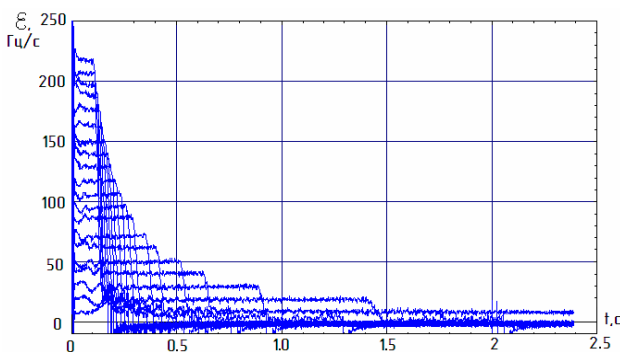


Рис.3. Зависимости ускорения от времени для разных значений активного тока

Для модели двигателя без учета насыщения магнитной цепи была получена система уравнений, описывающая границы линейной зоны работы двигателя при управлении током намагничивания:

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \frac{3}{4} \cdot pn \cdot \frac{L_{12}^2}{L_2} \cdot I_H^2 \cdot \beta \cdot \sqrt{3 \cdot n^2 - \beta^2} \\ U_S = \left(\left(R_1 - \left(\omega \cdot pn + \frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \sqrt{3 \cdot n^2 - \beta^2} \right) \cdot \left(\frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \sqrt{3 \cdot n^2 - \beta^2} \right) \cdot \frac{L_2 \cdot L_1 - L_{12}^2}{R_2} \right)^2 + \right. \\ \left. \left(\left(\frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \sqrt{3 \cdot n^2 - \beta^2} \right) \cdot \frac{L_2 \cdot R_1}{R_2} + \left(\omega \cdot pn + \frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \sqrt{3 \cdot n^2 - \beta^2} \right) \cdot L_1 \right)^2 \right)^{0.5} \cdot \beta \cdot I_H \\ \omega = \frac{1}{I_H \cdot L_1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot pn} \cdot \sqrt{3 \cdot U_H^2 - (I_H \cdot R_1)^2 \cdot \beta^2} \\ U_S \leq U_H \cdot \sqrt{3} \\ \beta \in (0; n \cdot \sqrt{3}) \\ n \in (1 \dots 3) \end{array} \right. \quad (2)$$

где n – кратность длительно допустимого тока статора, β – коэффициент пропорциональности между током намагничивания и действующим значением фазного тока статора, R_1, R_2 – активные сопротивления фазы статора и ротора, L_1, L_2 – индуктивности фазы статора и ротора, L_{12} – взаимная индуктивность, M – динамический момент двигателя, I_H – номинальный действующий ток статора, U_H – номинальное действующее напряжение статора, pn – число пар полюсов, U_S – модуль вектора напряжения статора, ω – частота вращения ротора.

Для модели двигателя 4 кВт соотношения системы уравнений (2) представлены графически в виде кривых максимального момента и скорости двигателя в зависимости от задания на ток намагничивания (рис.4). Получен-

ные соотношения позволяют оценить возможности электропривода при работе в режимах, отличных от номинального.

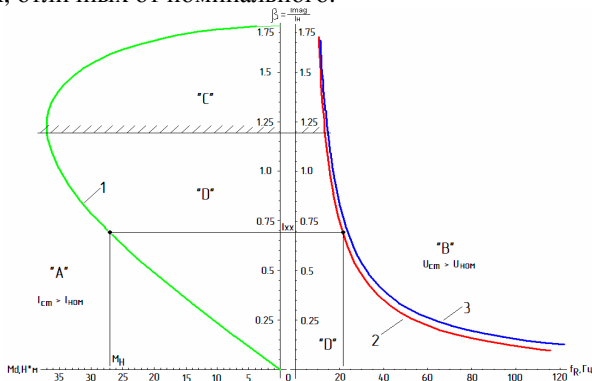


Рис.4. Границы линейной зоны по моменту и скорости в функции тока намагничивания

В работе предложены закон изменения тока намагничивания в зависимости от скорости, оптимальный по критерию максимума момента при заданном токе статора, а также закон ограничения динамического момента на валу двигателя в зависимости от значения тока намагничивания. Показано, что вследствие существенной нелинейности полученных зависимостей на практике их рационально представлять в табличном виде. Предложен алгоритм экспериментального определения границ линейной зоны.

На опытном образце электропривода было установлено, что при работе на скоростях, ниже номинальной, благодаря увеличению тока намагничивания и перехода в зону насыщения кривой намагничивания удастся добиться повышения момента на 20-25 % по отношению к номинальному (рис.5). Момент возрастает вследствие увеличения произведения проекций тока статора (1) при сохранении постоянства суммы их квадратов.

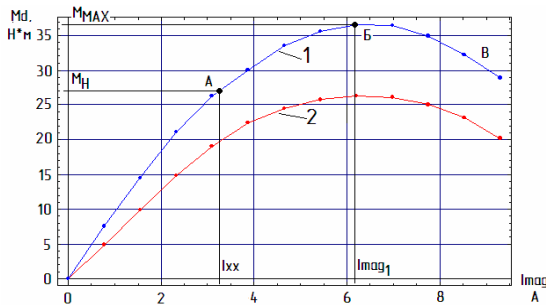


Рис.5. Зависимость момента от задания на ток намагничивания при постоянном токе статора: кривая 1 – $I_{CT} = I_H$, кривая 2 – $I_{CT} = 0.707 I_H$

Точка «А» на графике соответствует номинальному режиму работы при номинальном токе намагничивания, точка «Б» соответствует максимально допустимому моменту при условии заданного ограничения тока статора, точка «В» соответствует участку с завышенным током намагничивания.

Показано, что достижение качественной работы в зоне насыщения возможно только при условии коррекции настройки наблюдателя фазы магнитного потока ротора, которая может изменяться в широких пределах (до 70 %).

Предложен и экспериментально апробирован на опытном образце алгоритм коррекции настройки наблюдателя в зависимости от величины тока намагничивания двигателя. Алгоритм коррекции строится на соотношениях:

$$K = \frac{R_p}{L_p} = \frac{R_p}{L_{PCOБCT} + L_{12}} \approx \frac{R_p}{L_{12}} = \frac{\text{constant}}{L_{12}(I_{MAG})} \quad (3)$$

$$M_D = J \cdot \varepsilon = C_1 \cdot I_{MAG} \cdot I_{ACT} \cdot L_{12}(I_{MAG}) \quad (4),$$

где R_p – активное сопротивление фазы ротора, L_p – индуктивность фазы ротора, $L_{PCOБCT}$ – индуктивность рассеяния фазы ротора, L_{12} – взаимная индуктивность, J – момент инерции ротора, ε – угловое ускорение, C_1 – масштабирующий коэффициент, I_{MAG} – ток намагничивания, I_{ACT} – активный ток.

Использование коррекции настройки наблюдателя позволяет уменьшить потери момента, вследствие изменения индуктивности магнитной цепи в среднем 10 – 15 % (рис.6).

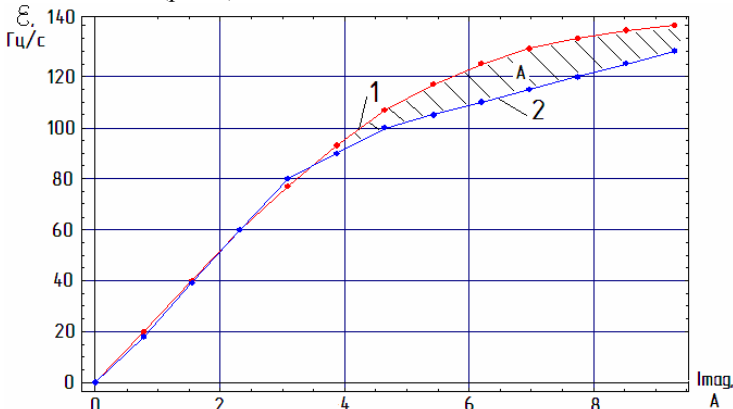


Рис.6. Зависимость ускорения от задания на ток намагничивания: кривая 1 – при использовании коррекции постоянной времени ротора, кривая 2 – при постоянной настройке наблюдателя, А – область дополнительных потерь момента вследствие изменения взаимной индуктивности

В третьей главе рассматриваются вопросы повышения точности цифрового станочного электропривода.

Анализ особенностей работы станочных электроприводов показал, что для выполнения возросших требований к точности воспроизведения контурных перемещений и производительности станков с ЧПУ необходимо перейти к современным принципам структурного построения электроприводов. Целесообразной является реализация в электроприводе цифрового контура управления положением с ПИД-регулятором, дополненным упреждающими связями по скорости, ускорению, трению (рис.7).

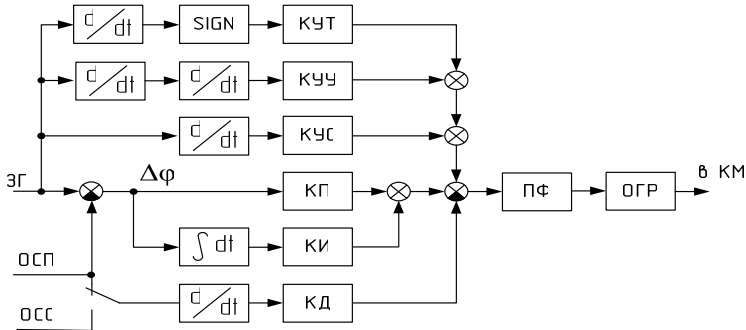


Рис.7. Структура комбинированного регулятора положения: ОГР – ограничение выходного сигнала; КМ – контур момента; КП, КД, КИ – коэффициенты пропорционального, дифференциального и интегрального усиления, КУС, КУУ, КУТ – коэффициенты упреждения по скорости, ускорению, трению; ПФ – полосовой фильтр; ОСС – обратная связь по скорости; ОСП – обратная связь по положению; ЗП – задание на положение; SIGN – операция взятие знака числа; $\Delta\phi$ – ошибка по положению

Показано, что одной из наиболее важных проблем при построении цифрового станочного электропривода является проблема уменьшения влияния дискретизации на динамическую и статическую погрешности при воспроизведении контурно-позиционного перемещения.

В результате исследований было установлено, что сигнал задания для станочного электропривода должен обладать высокой разрешающей способностью, превышающей разрешающую способность измерителя перемещения в канале обратной связи. Это позволяет снизить негативное влияние низкой дискретизации по упреждающим связям на шум в системе управления. Исследования показали, что оптимальная величина дробной части сигнала задания должна быть не менее 4-5 двоичных разрядов.

Квантование сигнала обратной связи по времени и по уровню приводит к отличиям в величине дискрет в П и Д каналах регулятора положения. Данный эффект приводит к нежелательному увеличению пульсаций активного тока двигателя в режиме удержания. Для снижения дополнительного шума квантования необходимо увеличивать разрешающую способность по каналу

обратной связи, при этом следует стремиться, чтобы отношение величины дискрет в разных каналах регулятора положения не превышало 10.

Увеличение разрешающей способности сигнала обратной связи посредством программной экстраполяции сигнала измерителя позволяет снизить влияние эффектов квантования, приближает форму ошибки слежения к гармоническому сигналу и линеаризует систему. Однако такой подход не приводит к существенному уменьшению ошибки слежения, так как дробная часть сигнала обратной связи по положению всегда предсказывается с погрешностью.

Проведенные исследования показали, что для качественной работы современного цифрового станочного электропривода необходимо ограничивать производные задающего сигнала: скорость, ускорение, рывок. В этом случае удастся добиться максимального эффекта от применения упреждающих связей для снижения динамической ошибки слежения. Выполнение поставленных требований возможно при использовании задающих сигналов в виде S-кривых, сплайнов и т.д.

Исследования, проведенные на опытном образце электропривода, показали, что использование аналогового канала управления не позволяет в полной мере реализовать возможности цифрового электропривода с усовершенствованным регулятором положения. Для управления электроприводом в настоящее время необходимо использовать высокоскоростной цифровой канал управления с возможностью синхронизации между УЧПУ и электроприводом. Основными преимуществами при этом являются: более широкая полоса пропускания канала управления, снижение шума в активном токе, отсутствие дрейфа нуля, а также возможность эффективного использования упреждающих связей.

Четвертая глава посвящена практической реализации цифрового электропривода на базе асинхронного двигателя, управляемого как по положению, так и по скорости, и экспериментальному исследованию его характеристик.

В результате анализа разработок ведущих производителей высокоточных электроприводов разработана модульная конструктивная схема электропривода, обладающая лучшей ремонтпригодностью и меньшими издержками при производстве и эксплуатации (рис.8).

Предложена аппаратная реализация системы управления электроприводом на основе сопряжения промышленного микроконтроллера на базе ядра ARM7 с программируемой логической интегральной схемой, которая позволяет обеспечить более высокое быстродействие и более сложные и качественные алгоритмы управления и обработки сигналов.

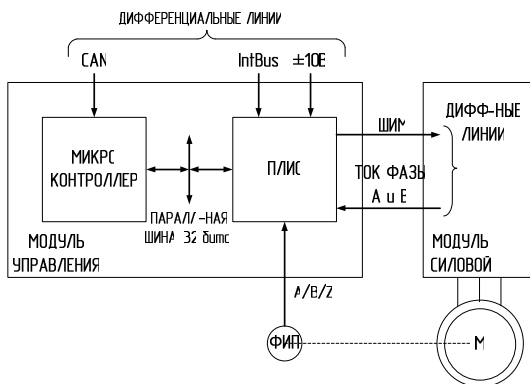


Рис.8. Схема аппаратной части электропривода

Разработаны программные средства для настройки и диагностирования системы управления электроприводом с применением интерфейса CAN.

Для исследования возможностей разработанного электропривода сконструирован лабораторный испытательный стенд (рис.9), позволяющий формировать различные законы изменения нагрузки в длительном режиме, законы управления электроприводом с ограничением производных (скорости и ускорения), исследовать работу электропривода на скоростях выше номинальной, оценить качество работы электропривода при цифровом и аналоговом управлении.

Для лабораторного стенда разработан измеритель момента торсионного типа, измеряющий момент вращения в диапазоне ± 40 Нм, с погрешностью ± 1 Нм, как в статических, так и в динамических режимах работы.

Предложена методика настройки системы управления электроприводом, включающая в себя три этапа: настройку ПИ-регуляторов тока, настройку наблюдателя потока ротора, настройку ПИД-регулятора положения с упреждающими связями.

Настройку регулятора положения предлагается осуществлять по ступенчатому сигналу задания и по сигналу изменения скорости в виде S-кривой, что позволяет упростить процесс и достичь более качественного результата.

Приведены результаты испытаний электропривода в динамических режимах и под нагрузкой, при воспроизведении контурных и позиционных перемещений (рис.10, 11). Определены полосы пропускания и предельные темпы ускорения при гладком характере задающих воздействий.

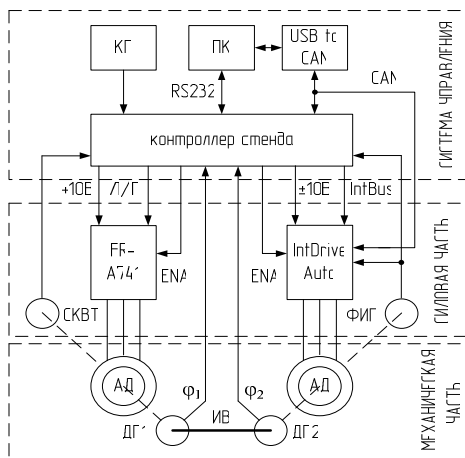


Рис.9. Структурная схема лабораторного стенда

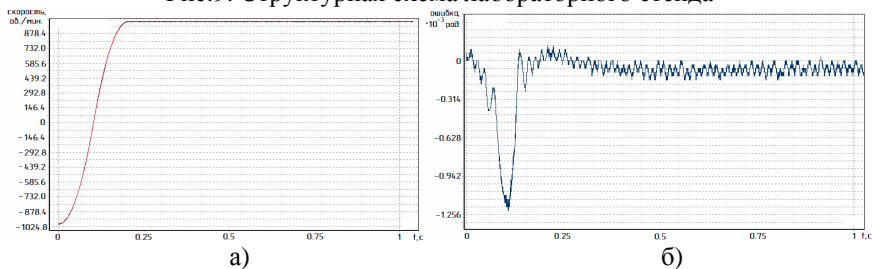


Рис.10. Зависимость скорости и ошибки слежения от времени: а) сигналы задания и обратной связи, б) ошибка слежения

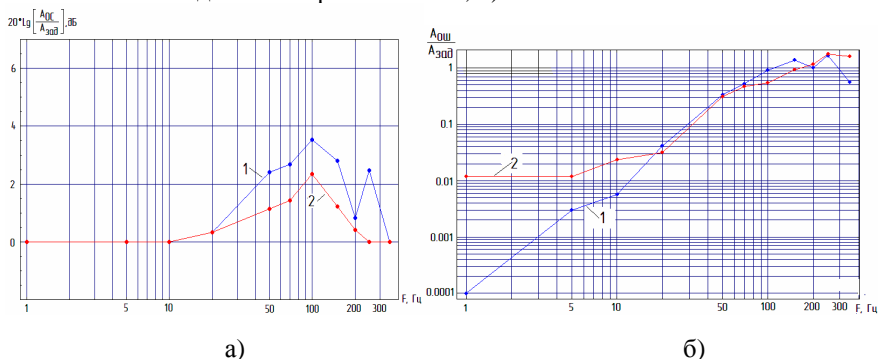


Рис.11. Результаты испытаний по определению полосы пропускания а) ЛАЧХ регуляторов; б) отношение максимальной ошибки регулирования к амплитуде задания; положение – кривая 1, скорость – кривая 2 к амплитуде сигнала задания

Максимальная динамическая ошибка при работе системы с регулятором положения в линейной зоне не превышала ± 2.5 дискреты измерителя, полоса пропускания системы с регулятором положения составила 50 Гц, с регулятором скорости – 200 Гц, максимальная скорость электропривода составила 7000 об./мин. ($n_{\max}/n_{\text{ном}} = 4.5$), максимальное ступенчатое ускорение при выходе на номинальную скорость без дополнительного момента инерции на валу 4000 рад/с².

В приложениях приведены: математическая модель асинхронного двигателя и математические модели различных систем управления моментом асинхронного двигателя, математическая модель цифровой системы управления электроприводом, акты промышленного внедрения и внедрения в учебный процесс, результаты внедрения опытного образца электропривода в составе станка ИС2А637ПФ4.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Основными тенденциями развития в области станкостроения являются: увеличение точности и производительности станков, совмещение токарных и фрезерных операций на одном станке, увеличение числа рабочих координат, повышение скоростей быстрых перемещений и рабочих подач, уменьшение редукции в кинематических передачах и переход к прямому приводу от двигателя к рабочему органу, использование высокопроизводительных цифровых систем числового управления с возможностью пятикоординатной обработки, внедрение технологии высокоскоростной обработки.
2. Для оценки конечных показателей качества работы современных станочных электроприводов в составе СУЭО МС и сравнения их характеристик целесообразно ввести ряд тестовых воздействий. К их числу следует отнести: ступенчатое воздействие; серию ступенчатых перемещений в прямом и обратном направлениях; серию гармонических или параболических движений с отработкой в линейной зоне; разгон до номинальной скорости с номинальным динамическим моментом, реверс и торможение, ступенчатое приложение момента.
3. Современный станочный электропривод рационально строить на базе асинхронного двигателя. Обработку и передачу всех сигналов, в том числе и сигнала задания, необходимо производить в цифровой форме. В составе системы следует использовать комбинированные регуляторы положения и скорости. Необходимо обеспечить возможность изменения структуры системы управления и настройки параметров, входящих в неё регуляторов. Управления магнитным потоком двигателя в зависимости от величины задания на скорость следует не только в приводах главного движения, но и в приводах подачи.
4. Для уменьшения погрешности определения вектора магнитного потока ротора в динамических режимах разгона и торможения, а также компен-

сацией постоянной времени в канале управления магнитным потоком ротора целесообразно использовать динамический наблюдатель потока ротора асинхронного двигателя, построенный с применением 2-х мерной импульсной переходной функции. Предложенная методика настройки наблюдателя магнитного потока ротора, использующая в качестве критерия оптимальности постоянство ускорения электропривода в процессе разгона на холостом ходу при постоянном задании на активный ток, позволяет осуществить оперативную настройку наблюдателя при неизвестных параметрах ротора.

5. Полученные аналитические зависимости, определяемые соотношениями (2), позволяют реализовать оптимальный закон управления током намагничивания по критерию максимума момента при заданном значении тока статора и ограничении напряжения статора.
6. Для получения большего запаса по моменту при скоростях меньше номинального значения необходима коррекция настройки наблюдателя фазы потока ротора. Использование коррекции настройки позволяет исключить потери момента вследствие изменения постоянной времени ротора. Работа с током намагничивания, превышающим номинальное значение, при условии коррекции настройки наблюдателя потока ротора, позволяет получить момент на 20-25 % больше, чем при номинальном токе намагничивания.
7. Сигнал задания для станочного электропривода должен обладать высокой разрешающей способностью, превышающей разрешающую способность измерителя перемещения в канале обратной связи. Исследования показали, что оптимальная величина дробной части сигнала управления составляет 4-5 двоичных разрядов. Для снижения влияния шума квантования на пульсации активного тока двигателя необходимо, чтобы отношение величины дискрет в различных каналах регулятора положения не превышало 10. Увеличение разрешающей способности сигнала обратной связи посредством программной экстраполяции сигнала измерителя позволяет снизить влияние эффектов квантования, приближает форму ошибки слежения к гармоническому сигналу, но не позволяет снизить динамическую ошибку слежения.
8. Для качественной работы современного цифрового станочного электропривода необходимо ограничивать производные задающего сигнала: скорость, ускорение, рывок. В этом случае удается добиться максимального эффекта от применения упреждающих связей для снижения динамической ошибки слежения.
9. Опытный образец станочного электропривода на базе асинхронного двигателя мощностью 4 кВт с цифровой системой управления, разработанный с учетом предложенных принципов и полученных результатов, позволяет достичь показателей качества на уровне зарубежных специализированных станочных электроприводов: полоса пропускания системы с

регулятором положения составляет 50 Гц, с регулятором скорости – 200 Гц, максимальная динамическая ошибка слежения при условии ограничения производных сигнала задания равна $\pm 1.571 \cdot 10^{-3}$ рад.

10. Предложенная методика поэтапной настройки системы управления электроприводом, включающая настройку векторного контура управления моментом и комбинированного регулятора положения, позволяет существенно сократить время, необходимое для достижения заданных показателей качества работы электропривода в составе системы управления электрооборудованием металлорежущего станка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- 1 Сравнительное моделирование систем векторного управления асинхронным двигателем / Бурков А.П., Смирнов А.А. // Вестник ИГЭУ – 2007. – № 3 – С. 36-38, автора – 0.5 п.л.

2. Моделирование и отладка микроконтроллерной системы управления с использованием программного комплекса Simulink. / Бурков А.П., Смирнов А.А. // Вестник ИГЭУ – 2007. – № 4 – С. 49-53, автора – 0.5 п.л.

3. Современные требования к электроприводам станков с ЧПУ / Бурков А.П., Красильникьянц Е.В., Смирнов А.А., Салахутдинов Н.В. // Вестник ИГЭУ – 2010. – № 4 – С. 59-65, автора – 0.3 п.л.

4. Исследования электропривода подачи для станков с ЧПУ / Бурков А.П., Красильникьянц Е.В., Смирнов А.А., Салахутдинов Н.В. // Вестник ИГЭУ – 2011. – № 2, С – 71 - 77, автора – 0.3 п.л.

5. Построение наблюдателя потока ротора асинхронного двигателя на основе двухмерной свертки. / Бурков А.П., Красильникьянц Е.В., Смирнов А.А. // Вестник ИГЭУ – 2011. – № 4, С – 44 - 50, автора – 0.25 п.л.

6. «The Model of Nonstationary Rotor Magnetic Field Observer in the Induction Motor». / Alexander Burkov, Evgenii Krasilnikyants, Alexander Smirnov // Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering – 2011 – 4/29, С – 137 -142, автора – 0.25 п.л.

в прочих изданиях:

7. Анализ технических требований к электроприводам станков с ЧПУ и промышленных роботов. / Тарарькин С.В., Смирнов А.А. // Третья всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» - Москва: МГТУ, 2010. – С. 13, автора – 0.5 п.л.

8. Анализ особенностей построения цифрового контурного позиционного электропривода подачи / Тарарькин С.В., Смирнов А.А. // Известия тульского государственного университета, №3 часть 3. –Тула: Изд. ТулГУ, 2010 – С. 179, автора – 0.5 п.л.

9. Моделирование наблюдателя координат состояния ротора асинхронного двигателя с учетом распределенности параметров. / Тарарыкин С.В., Бурков А.П., Смирнов А.А. // VI-я Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» - Казань: КГЭУ, 2011. – С. 75-76, автора – 0.3 п.л.

10. Моделирование работы асинхронного двигателя с намагничиванием отличным от номинального. / Бурков А.П., Смирнов А.А. // Материалы междунар. науч.-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2009 – С. 255, автора – 0.5 п.л.

11. Опыт разработки и исследование характеристик электропривода подачи на базе асинхронного двигателя. / Бурков А.П., Смирнов А.А. // Материалы междунар. науч.-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2011 – С. 207, автора – 0.5 п.л.

12. Разработка испытательного нагрузочного стенда для электроприводов / Бурков А.П., Салахутдинов Н.В., Смирнов А.А. // Материалы междунар. науч.-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2011 – С.211, автора – 0.3 п.л.

13. Построение пользовательской модели асинхронного двигателя в среде Simulink™/ Бурков А.П., Смирнов А.А. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тринадцатая Междунар. науч.-технич. конф. Студентов и аспирантов. 1-2 марта 2007 г.: Тез. докл. : В 3-х томах – М. Издательский дом МЭИ, 2007. Т.1, 1 С. 35-36, автора – 0.5 п.л.

14. Особенности структуры и настройки контура положения в векторном асинхронном электроприводе. / Бурков А.П., Смирнов А.А. // Материалы междунар. науч.-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2009 – С. 251-252, автора – 0.5 п.л.

15. Опыт разработки электропривода с прямым цифровым управлением. / Смирнов А.А., Салахутдинов Н.В. // Материалы X международной научно-практической конференции «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения» – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010 – С. 53-58, автора – 0.5 п.л.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617310 «Комплекс программ для реализации на ПЛИС структурных элементов цифрового электропривода / Салахутдинов Н.В., Бурков А.П., Комин В.Г., Ельниковский В.В., Смирнов А.А. правообладатель ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», автора – 0.2 п.л.

СМИРНОВ Александр Андреевич

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ
НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦИФРОВОЙ
СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. Печ. Л. 1,39

Тираж 100 экз. Заказ № ____.

ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в РИО ИГЭУ