

ОДЕССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КУКЕВИЧ Аркадий Борисович

УДК 62-82

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОГИДРОПРИВОДА  
С РЕЛЕЙНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы  
и системы, включая их управ-  
ление и регулирование

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1993

№ 26.911

Работа выполнена на кафедре "Электропривод и автоматизация промышленных предприятий" Донбасского горно-металлургического института

Научный руководитель

кандидат технических наук,  
доцент

ПЫХАЙ А.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор  
кандидат технических наук,  
доцент

АКИМОВ Л.В.

РАДИМОВ С.Н.

Ведущее предприятие:

Украинский научно-исследовательский институт станков и инструментов (УкрНИИСИП)

Защита диссертации состоится "22" апреля 1993 г.  
в 15 час. в ауд. 115у на заседании специализированного совета К.068.19.04 по присуждению ученых степеней кандидата технических наук Одесского политехнического института по адресу: 270044, г.Одесса, пр.Шевченко, 1, ОПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "20" марта 1993 г.

Отзыв, заверенный печатью, в одном экземпляре просим направить в наш адрес.

Ученый секретарь специализированного

совета, к.т.н., ст. научн. сотр.

В.И.КАПИНОС

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00814621 (M)

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Характерной чертой развития процесса автоматизации производства в настоящее время является интенсивное внедрение безлюдных технологий на базе робототехнических комплексов и гибких производственных систем. Решение этой задачи связано с совершенствованием систем электропривода, являющихся основным средством превращения электроэнергии в механическую работу. При этом в первую очередь имеются в виду системы регулируемого и позиционного электропривода.

В современных системах управления промышленными роботами и манипуляторами применяются электродвигатели постоянного и переменного тока, электрогидравлические приводы и другое оборудование. Необходимо отметить, что наибольшее распространение в электроприводах роботов и манипуляторов относительно небольших мощностей получили малоинерционные электродвигатели постоянного тока, позволяющие реализовать присущие этим двигателям и системам управления на их основе преимущества. Однако наряду с двигателями постоянного тока достаточно широкое распространение (особенно для систем средней и большой мощности) находят электрогидравлические приводы, что подтверждается большим количеством публикаций по этой тематике как в отечественной литературе, так и в зарубежной. Главными преимуществами, определяющими применение гидроприводов, являются высокий уровень давлений рабочей среды, создающей крутящий момент на роторе гидравлической машины, значительно меньший, чем у электрических машин, момент инерции ротора, сравнительно малый вес гидромашин на единицу полезной мощности, малое скольжение и большая жесткость нагрузочной (механической) характеристики.

Большинство следящих электрогидравлических приводов имеют классическую структуру и замкнуты только обратной связью по положению. При этом в приводе могут быть получены определенные статические и динамические характеристики, далекие от предельно допустимых и часто не удовлетворяющие требованиям к системам управления. Поэтому в настоящее время разработчики предлагают различные способы улучшения динамических характеристик различных элементов электрогидравлических систем, в том числе систем управления.

Работа электромеханических систем робототехнических комплексов - это работа в условиях действия различных координатных возмущений: изменения нагрузки на валу механизма, изменения конфигурации и взаимного расположения рабочих органов, изменения присоеди-

ненных масс, температурные изменения и старение элементов системы. Все эти факторы заставляют искать пути совершенствования систем управления, направленные на применение структур, обеспечивающих различные реакции на задающее и возмущающее воздействия. При этом применение того или иного метода совершенствования систем определяется желанием понизить чувствительность систем к конкретному проявлению нелинейности или изменению отдельного параметра силовой части объекта управления. Одним из направлений этого развития может быть создание законов разрывного (релейного) управления, ибо эти типы управлений при простой реализации являются наименее чувствительными в условиях действия на объект параметрических и координатных возмущений.

Целью работы является разработка и исследование микропроцессорных систем управления электрогидроприводом объемного регулирования и электроприводом постоянного тока со скользящими режимами, обеспечивающих заданные динамические и статические свойства.

В работе решаются следующие основные задачи:

1. Разработка метода синтеза релейных регуляторов в "критических случаях" нулевых корней характеристического уравнения объекта управления. Разработка методов синтеза регуляторов скорости и положения электрогидропривода объемного регулирования и электропривода постоянного тока. Исследование полученных законов управления на цифровых и аналоговых моделях.
2. Разработка методов синтеза цифровых линейных регуляторов положения электрогидропривода объемного регулирования с внутренним регулятором скорости, работающим в скользящем режиме.
3. Разработка методов синтеза цифровых релейных регуляторов положения следящего электрогидропривода.
4. Разработка методов улучшения энергетических показателей внедряемых систем со скользящими режимами, разработка устройств повышения помехозащищенности, разработка быстродействующих кодовых преобразователей для улучшения сервисных функций внедряемых систем управления. Экспериментальные исследования внедренных систем управления электрогидроприводом объемного регулирования и электроприводом постоянного тока механизмов перемещения астрономических приборов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался метод пространства состояний, метод аналитического конструирования регуляторов АР. Достоверность полученных решений в виде

алгоритмов управления проверялась путем математического моделирования, экспериментальных исследований на лабораторных и промышленных системах управления электрогидроприводом и электроприводом.

Научная новизна работы. Впервые разработан метод синтеза релейных регуляторов нейтральных и неустойчивых объектов, позволяющий закончить синтез регулятора в случае часто распространенного "критического случая" нулевых корней характеристического уравнения.

Разработанным методом синтезированы релейные регуляторы различных объектов управления (следящий электропривод постоянного тока, электрогидропривод объемного регулирования) в случае различных постановок задач (при синтезе астатического и статического регуляторов положения).

Проведен анализ работы астатического регулятора положения следящего электрогидропривода, сформулированы требования к системе управления в случае работы электромеханических объектов с чередованием режимов позиционирования и слежения. На основе предложенного анализа изложена методика синтеза нелинейного астатического регулятора положения электрогидропривода объемного регулирования.

Предложен метод синтеза, разработаны структурные схемы цифро-аналоговых систем управления при наличии скользящих режимов во внутреннем контуре управления. Сформулированы правила технической реализации цифро-аналоговых систем управления.

Предложены правила и основы технической реализации электромеханических систем с релейными законами управления, рассмотрены вопросы создания релейных систем в случае низкого быстродействия микропроцессорного комплекта, предложены методы компенсации временного запаздывания в этом случае.

На защиту выносятся следующие разработки и результаты, полученные автором:

1. Метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов при наличии нулевых корней характеристического уравнения, описывающего объект управления.

2. Применение метода синтеза управления в "критических случаях" для синтеза законов управления электроприводом постоянного тока и электрогидроприводом объемного регулирования, в том числе для систем с нелинейными обратными связями.

3. Методы синтеза и способы построения цифровых систем управления с линейными и релейными регуляторами положения при реализа-

ции скользящих режимов в контурах управления электромеханических систем.

4. Способы и устройства, обеспечивающие повышение энергетических показателей осаждаемых систем управления с релейными законами, способы повышения помехозащищенности цифровых систем управления, методы построения быстродействующих кодовых преобразователей для технической реализации микропроцессорных систем управления.

5. Результаты лабораторных и промышленных испытаний разработанных в работе структур цифро-аналоговых и цифровых систем управления электрогидроприводом объемного регулирования и электроприводом постоянного тока при реализации скользящих режимов в контурах управления.

Практическая ценность. Алгоритмы управления, предложенные в работе могут быть использованы при проектировании микропроцессорных систем управления электрогидроприводами и электроприводами.

Даны рекомендации технической реализуемости цифро-аналоговых систем управления с внутренними контурами скорости, с жесткими и гибкими обратными связями. Даны рекомендации по реализации микропроцессорных систем управления с релейными регуляторами положения, в том числе при ограниченном быстродействии цифрового вычислителя. Разработаны устройства электропривода и электрогидропривода с улучшенными энергетическими характеристиками, устройства, позволяющие разгрузить микропроцессор от функций сервиса с целью выполнения процессором функций и задач непосредственно управления. Даны рекомендации по компенсации временного запаздывания при технической реализации микропроцессорных систем на комплектах с малым быстродействием.

Реализация работы. Результаты работы нашли применение при разработке систем автоматизации астрономических приборов в НИО "Эталон" при разработке и внедрении систем управления астрономическими приборами. Разработанная система управления установкой для исследования атмосферы "Лазар" на основе электрогидроприводов объемного регулирования, включающая два комплекта электрогидроприводов с микропроцессорным управлением, обеспечивает позиционирование и слежение по двум координатам при управлении от ЭВМ "Электроника-60", а также от дистанционного пульта управления, с точностью до 1 угловой минуты при быстродействии, близком к оптимальному. Указанные результаты регулирования обеспечиваются

при изменении параметров объекта управления в широких пределах. Экономический эффект от внедрения составляет 431 тыс. рублей, что подтверждается актами внедрения НПО "Эталон". Электропривод постоянного тока механизма перемещения астролябии Данжона с микропроцессорным управлением обеспечивает повышение точности и качества наблюдений, значительно улучшает сервисные функции системы управления. Экономический эффект от внедрения электропривода перемещения астролябии Данжона составляет 109,0 тыс. рублей.

Агробация работы. Основные положения работы и ее результаты докладывались и обсуждались на 4 Возможной научно-технической конференции "Автоматизированный электропривод прокатных станков" (г. Свердловск, 20-23 марта 1990г.), семинарах Научного совета АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики. Вентильные преобразователи в системах автоматического управления электроприводом и АСУ ТП" (1985, 1987), научно-технических конференциях преподавательского состава и сотрудников Донбасского горно-металлургического института (1984-1992г.г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 статей, тезисы доклада на научно-технической конференции, получено 3 авторских свидетельства на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 134 листах машинописного текста, иллюстрированного 86 рисунками и 9 таблицами на 65 листах, списка использованных источников № 137 наименований на 18 листах, а также приложения.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность работы, изложены основные цели, определены основные направления исследований, выделена научная и практическая ценность.

В первой главе проанализировано состояние проблемы управления электрогидроприводами, в том числе объемного регулирования. Показано, что требования, предъявляемые к высокودинамичным приводам в условиях изменения параметров силовой части гидроприводов и действия координатных возмущений могут быть выполнены при решении задачи снижения чувствительности системы, так как традиционные системы с непрерывным управлением, обеспечивающие высокое качество работы, значительно снижают свою эффективность при изменении параметров.

Выбраны математические модели электромеханических систем (электропривода постоянного тока и электрогидропривода объемного

регулирования), позволяющие завершить синтез структур управления и обеспечивающие с достаточной степенью достоверности описание физических процессов в замкнутых системах исследуемых приводов. Объекты управления описываются системой линейных дифференциальных уравнений

$$p \cdot \bar{\eta} = A \bar{\eta} + B \bar{u} \quad (1)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  - оператор дифференцирования;  $A$  - матрица коэффициентов;  $\bar{u}$  - вектор управления;  $\bar{\eta} = y^* - y$  - вектор координат возмущенного движения;  $y^*$ ,  $y$  - заданные и действительные значения координат;  $B$  - матрица коэффициентов управления.

Приведены структурные схемы объектов исследования в координатах возмущенного и невозмущенного движения. На основании анализа требований, предъявляемых к высокодинамичным электроприводам, анализа возможных методов решения поставленных проблем, сформулированы задачи исследования.

Во второй главе предложен новый эффективный метод синтеза регуляторов с разрывным управлением в "критических случаях" структурной неустойчивости объекта управления (наличия нулевых корней характеристического уравнения). При этом показано, что при известной процедуре синтеза релейных регуляторов методом АКР после задания функционала качества

$$J = \int \bar{\eta}^T Q \bar{\eta} dt$$

при известных уравнениях движения объекта (1) оптимальное управление в общем случае имеет вид

$$U^0(\bar{\eta}) = - \text{sign} (2 B^T C \bar{\eta}).$$

Таким образом, задача синтеза релейных регуляторов методом АКР сводится к построению функции Ляпунова

$$V = \bar{\eta}^T C \bar{\eta},$$

обеспечивающей при наличии управления условия устойчивости движения объекта в начало координат, то есть к решению уравнения

$$A^T C + C A = - Q \quad (2)$$

с использованием методики Е.А.Барбашина. Причем, согласно теореме, введенной Е.А.Барбашиным, решение уравнения (2) возможно тогда, когда корни характеристического уравнения системы (1)

$$\det | A - p I | = 0$$

где  $p$ ,  $I$  - матрица корней и единичная матрица соответственно такие, что  $p_1 + p_k$  не обращается в нуль ни при каких  $i, k$ . Таким обра-

зом, данная теорема ограничивает применение методики Барбашина области устойчивых объектов. В то же время, неустойчивую динамическую систему с помощью преобразования

$$\bar{\eta}^* = \bar{\eta} w(t),$$

где  $w(t)$  - скалярная монотонно-убывающая функция редуцирования с темпом убывания больше, чем темп убывания любой из координат  $\bar{\eta}$ , можно преобразовать в устойчивую. Если в качестве  $w(t)$  выбрать

$$w(t) = \exp(-\beta t); \dot{w}(t) = -\beta \exp(-\beta t); \beta = \text{const} > 0,$$

можно получить новую редуцированную систему

$$\dot{\bar{\eta}}^* = (A - \beta I) \bar{\eta}^* + BU, \quad (3)$$

причем корни характеристического уравнения системы (3) будут отрицательны. Поэтому в данном случае может быть решено уравнение

$$A^*T C^* + C^* A^* = -Q.$$

Предложенный метод синтеза позволяет закончить нахождение алгоритма оптимального управления релейного регулятора

$$U^0(\bar{\eta}) = -\text{sign}(-2B^T C^* \bar{\eta}),$$

причем в процессе синтеза не накладываются ограничения на количество собственных нулевых решений матрицы  $A$ .

На основе предложенной методики получен алгоритм управления в функции фазовых координат следящего электропривода

$$U^0(\bar{\eta}) = -U_N \text{sign}(\alpha^* - k_1 \alpha - k_2 \omega - k_3 i - k_4 u_H) \quad (4)$$

и электрогидропривода объемного регулирования

$$U^0 = -U_N \text{sign}(\alpha^* - k_1 \alpha - k_2 \omega_H - k_3 p_0 - k_4 \gamma - k_5 \omega - k_6 i - k_7 u_H). \quad (5)$$

Проведено математическое моделирование замкнутых систем с законами управления (4), (5), что позволило сделать следующие выводы:

1. Синтез оптимального управления объекта, характеристическое уравнение которого имеет нулевые корни, целесообразно осуществлять с использованием функции редуцирования, причем параметр функции выбирается на основе анализа объекта управления и может составлять  $\beta < 0.0025 / T_\mu$ , где  $T_\mu$  - малая постоянная времени объекта.

2. Выбор параметра  $\beta > 0.0025 / T_\mu$  приводит к существенному ухудшению качества процессов управления, причина которого кроется в построении функционала качества редуцированной системы.

3. Анализ технической реализации закона управления (5) электрогидроприводом объемного регулирования показывает, что для пост-

роения регулятора необходимо обеспечить измерение всех координат объекта, в том числе перепада давления в полостях гидродвигателя  $p_0$  и угла поворота наклонных дисков  $\gamma$ . Однако создание датчиков  $p_0$  и  $\gamma$  является сложной технической задачей, решение которой может существенно увеличить стоимость разрабатываемого привода. Исходя из сказанного, осуществлено исследование ряда задач, связанных с технической реализацией закона (5):

1. Возможность исключения координат  $p_0$  и  $\gamma$  из закона управления (5) и оценка качества получаемых процессов управления.

2. Возможность реализации законов управления при выражении  $p_0$  и  $\gamma$  через производные от измеряемых координат.

Указанные задачи решены для линеаризованных уравнений движения (1) с управлением (5) с использованием корневого коэффициента чувствительности стационарной системы к изменению параметров обратных связей с последующим математическим моделированием получаемых систем, что позволяет сделать следующие выводы:

1. Исключение одной из обратных связей по координатам  $p_0$ ,  $\gamma$  возможно, так как максимально возможный коэффициент чувствительности не превышает допустимый.

2. Исключение обратных связей одновременно по двум координатам приводит к повышению чувствительности, однако анализ переходных процессов показывает, что при определенном изменении коэффициентов обратных связей по другим координатам качество системы управления может быть улучшено до такой степени, что данная система может быть использована в некоторых менее ответственных случаях.

Предложенный метод синтеза позволяет синтезировать высокоточные следящие системы, в том числе ориентированные на работу с чередованием режимов позиционирования и слежения. При таком ограничении в техническом задании на разрабатываемый электромеханический объект целесообразно осуществлять синтез при требовании изменения функции Ляпунова, как функции времени, по требуемому закону

$$dV^*/dt = -\rho \bar{\eta}^{*T} V^* \bar{\eta}^*$$

Показано, что в этом случае получается нелинейный закон управления

$$U^0(\bar{\eta}) = -\text{sign} \left( C_0 \left( 1 + \frac{2}{C_0} \sum_{i=1}^r \eta_i \right) \eta_0 + \sum_{i=1}^r C_i \eta_i \right)$$

позволяющий отрабатывать любые заданные рассогласования с отсутствием перерегулирования и высоким качеством при слежении за заданным входным сигналом.

В третьей главе проведен синтез структур электромеханических систем при реализации внутреннего контура скорости с релейным регулятором (при наличии скользящего режима в этом контуре) и цифровым контуром положения с линейным регулятором. Для создания возможности завершения синтеза осуществлена линеаризация системы с разрывным управлением с использованием доопределения А.Ф.Шилишова. Синтез линейного цифрового регулятора положения осуществлен с использованием дискретного принципа максимума, что позволило найти коэффициенты обратных связей в функции периода квантования по времени. В результате синтеза получен закон формирования управляющего воздействия, в общем случае имеющий вид

$$U(n) = C_1 \eta_1(n) + C_2 \eta_2(n) + \dots + C_n \eta_n(n) \quad (6)$$

Создание регулятора с законом (6) связано с необходимостью установки датчиков для измерения всех координат, входящих в закон управления. Однако вследствие наличия скользящих режимов в контуре скорости возможны пульсации тока с частотой скользящего режима. В связи с этим рекомендуется при технической реализации осуществить преобразование закона (6) с учетом дифференциальных уравнений к виду, когда для расчета  $U(n)$  необходимо использовать только скорость и угол поворота исполнительного двигателя. Указанное преобразование осуществляется с использованием формул дифференцирования решетчатой функции  $g(t)$  с периодом  $T_0$ .

$$\frac{d}{dt} g(t) = \frac{1}{T_0} (v g(n) + \frac{1}{2} v^2 g(n) + \dots + \frac{1}{n} v^n g(n))$$
 Экспериментальные исследования показывают, что при технической реализации систем электропривода и электрогидропривода достаточно использовать две обратные разности функции  $g(t)$ .

Применение цифро-аналоговых структур с линейным регулятором положения приводит к возникновению шумов квантования по уровню, прикладываемых ко входу замкнутой скоростной системы. Осуществлен анализ работы аналогового контура и доказано, что, несмотря на наличие помех во входном сигнале в виде белого шума, вызванного квантованием по уровню, создаваемая система образует замкнутую устойчивую систему, которая имеет такую же функцию Ляпунова, как и система в случае отсутствия помех.

Дальнейшее улучшение качества создаваемых систем с релейными законами управления связано с цифровой реализацией разрывных алгоритмов. Анализ работы системы управления электромеханическими объектами показывает, что для достижения приемлемого качества

необходимо обеспечить скользкие режимы в контуре управления с частотами  $f_0 = 100 \dots 400$  Гц, то есть время расчета управляющего воздействия не должно превышать

$$t_p = 5 \cdot 1.25 \text{ мс.}$$

Однако, не всегда цифровой вычислитель может обеспечить столь высокое быстродействие при расчете управления по закону (4) или (5). В то же время при известном времени расчета  $t$  и ограниченном быстродействии возможно создание высокоточных систем. Для этого предложено ввести в закон управления (4), (5) составляющие, компенсирующие запаздывание  $t$  по методу Бесса. Если в результате синтеза оптимального закона управления получен закон (4), (5), с плоскостью переключения

$$\psi(\bar{\eta}) = \sum_1^n C_1 \eta_1 = 0,$$

то при наличии запаздывания  $t$  может быть найдена плоскость переключения

$$\psi^*(\bar{\eta}) = 0,$$

причем между  $\psi^*$  и  $\psi$  может быть проведено соответствие

$$\psi^*(\bar{\eta}) = \psi(\bar{\eta} + \Delta \bar{\eta}).$$

Используя для нахождения плоскости  $\psi^*$  систему дифференциальных уравнений (1) с учетом квантования по времени, можно получить выражение для закона формирования управляющего воздействия с учетом запаздывания

$$U(n) = - \text{sign} ( C_1^* \eta_1(n) + C_2^* \eta_2(n) + \dots + C_n^* \eta_n(n) + C_u U(n) )$$

В четвертой главе приведены результаты разработки и экспериментальных исследований систем электропривода постоянного тока и электрогидропривода объемного регулирования астрономических приборов.

В результате анализа проблемы технической реализации выделен ряд взаимосвязанных задач создания микропроцессорной системы управления электромеханическим объектом:

выбор серийно выпускаемых или разработка специализированного микропроцессорного контроллера управления на базе одного из микропроцессорных комплектов, обеспечивающего необходимое быстродействие для решения задач управления;

разработка функциональной схемы системы управления в соответствии с решаемыми задачами управления;

разработка программного обеспечения, которое включает как задачи непосредственно управления объектом, так и задачи обеспечения

необходимого сервиса при проведении пуско-наладочных и ремонтных работ на объекте управления;

разработке необходимой аппаратуры, обеспечивающей улучшенные энергетические показатели системы управления.

В результате разработки систем электропривода создан специализированный микропроцессорный контроллер для управления электро-механическими объектами /11/, включающий блок ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов, специализированные блоки для обработки сигналов датчиков перемещения и положения, блок связи по последовательному каналу.

Улучшенные энергетические показатели системы электропривода обеспечиваются за счет создания условий для возникновения высокочастотных колебаний скользящего режима /8/ путем введения модели электромеханического объекта. Высокая помехозащищенность созданной системы обеспечена устройством для преобразования сигналов /9/, которое обеспечивает обработку сигналов датчика перемещения без искажений при работе в условиях удаленности объекта управления. Для обеспечения рационального разделения задач между аппаратной и программной частью системы разработан преобразователь двоичного кода в двоично-десятичный код угловых величин /10/, достоинством которого является малое время преобразования и небольшие аппаратные затраты, что особенно важно при создании встраиваемых систем.

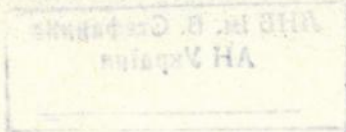
Экспериментальные исследования разработанного электрогидропривода и электропривода осуществлено на полуватурном физическом макете и реальном физическом объекте и включает:

исследование оптимальных законов управления высокоточными следящими системами;

исследование микропроцессорных реализаций синтезированных законов управления;

исследование чувствительности систем управления к изменению параметров и к координатным возмущениям.

Разработанный на базе проведенных исследований электрогидропривод объемного регулирования астрономического инструмента с регулятором положения (5) обеспечивает слежение с ошибкой 4 угловые минуты при скорости изменения входного сигнала  $\omega(t) = 0.5^\circ/\text{с}$ , 1.5 угловых минуты при  $\omega(t) = 0.05^\circ/\text{с}$ , отсутствие перерегулирования при отработке заданного рассогласования вне зависимости от величины начального рассогласования. В случае допустимости небольшого перерегулирования (до 5 %) по условиям технологического



процесса возможно путем изменения настройки регулятора (5) уменьшить динамическую ошибку при слежении за линейно-изменяющимся входным сигналом до 0.6 угловых минуты (при  $\sigma(t) = 0.05\%$ ).

Исследования микропроцессорной реализации оптимальных законов управления показали допустимость использования алгоритмов релейных регуляторов. Так, при использовании одного из наиболее сложных с точки зрения вычислений алгоритмов (5), ухудшения качества процессов практически не происходит, однако без компенсации запаздывания  $t$  существенно ухудшается энергетика электрогидропривода за счет уменьшения частоты скользящего режима ( $f \leq 60$  Гц). Компенсация временного запаздывания предложенными методами позволяет увеличить частоту колебаний до 150 Гц, а, следовательно, уменьшить потери в якорных цепях электродвигателя.

Исследования чувствительности систем с релейными законами управления показало, что системы сохраняют заданные динамические свойства при значительном изменении момента инерции, приведенного к валу гидродвигателя, изменении вязкости масла (в 1.5 раза), увеличении момента сопротивления на валу гидромотора (до 1.8..2.2 от номинального). В результате исследований поведения системы при наличии люфта на валу механизма (до 30 угловых минут) выяснено, что характер переходных процессов в целом такой же, как и в безлюфтовой передаче, однако несколько возрастает динамическая ошибка при слежении.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. В результате анализа различных методов синтеза релейных законов управления показано, что при решении матричного уравнения по методу Бернштейна возникает неопределенность при раскрытии определителей в случае нулевых корней характеристического уравнения объекта управления. Предложен метод, позволяющий исключить эту неопределенность редуцированием системы в угловой форме с использованием функции преобразования

$$w(t) = \exp(-\beta t); \quad w'(t) = -\beta \exp(-\beta t); \quad \beta = \text{const} > 0.$$

Указанное преобразование позволяет закончить синтез релейного регулятора и определить коэффициенты оптимального закона управления.

2. На основе метода синтеза релейных регуляторов в "критических случаях" нулевых корней характеристического уравнения найдены алгоритмы регуляторов положения электрогидропривода в различных фазовых пространствах, обеспечивающие скользящие режимы и заданные

динамические свойства. Показаны возможности реализации алгоритмов управления при сложности измерения внутренних координат гидропривода (угла поворота наклонных дисков гидронасоса и перепада давления в гидромоторе). Исследовано качество систем с исключением обратных связей по внутренним координатам гидропривода и при замене этих обратных связей производными от контролируемых величин.

3. Разработана методика синтеза цифрового регулятора положения при создании цифро-аналоговых систем управления с внутренним аналоговым релейным регулятором скорости. Сделана оценка влияния шумов квантования по уровню на вид алгоритма оптимального управления регулятора скорости. Разработаны принципы формирования управляющих воздействий в цифровых контурах управления при наличии скользящих режимов во внутренних контурах. Проведены исследования влияния квантования по времени на реализацию цифровых релейных регуляторов положения, показана возможность создания цифровых релейных законов управления с компенсацией запаздывания, возникающего в цифровом вычислителе, что позволяет повысить частоту скользящего режима.

4. Проведены экспериментальные исследования разработанных в работе структур релейных систем электрогидропривода со скользящими режимами, которые подтвердили теоретические выводы: возможность конструирования релейных регуляторов с использованием предложенного метода синтеза алгоритмов управления в "критических случаях", возможность получения заданных динамических свойств создаваемых систем.

5. Предложен метод повышения энергетических показателей и устройство, увеличивающее помехозащищенность, электрогидропривода с релейным управлением. Разработан преобразователь кодов из двоичной системы счисления в двоично-десятичный код угловых величин, обеспечивающий высокое быстродействие при малых аппаратных затратах на построение устройства.

6. Разработанные системы электрогидропривода объемного регулирования и электропривода постоянного тока; внедренные на приводах перемещения астрономических инструментов, подтвердили высокую эффективность полученных алгоритмов управления.

Экономический эффект от внедрения разработанных электромеханических систем за счет повышения точности и быстродействия при проведении операций составил более 590 тыс. руб. (1986-1989 г.г.).

Основное содержание диссертации

1. Цифро-аналоговый электродистанционный способ управления горных средств/ В.И.Марченко, А.Б.Жукевич; Коммунар. горно-металлург. ин-т.- Коммунарк, 1986.- 14 с.-Деп. в УкрНИИТИ 19.02.86, 647-Ук86.
2. Микропроцессорная система управления электроприводом/ А.Б.Жукевич, В.И.Марченко, А.Г.Пихай и др.; Коммунар. горно-металлург. ин-т.- Коммунарк, 1986.- 14 с.-Деп. в УкрНИИТИ 23.03.86, 906-Ук86.
3. Жукевич А.Б., Пихай А.Г. Синтез релейных регуляторов нейтральных и неустойчивых объектов// Известия ВУЗов, Электромеханика, ном.7, 1991.- С.35-39.
4. Цифро-аналоговый следящий электропривод/ А.Б.Жукевич, А.Г.Пихай; Коммунар. горно-металлург. ин-т. - Коммунарк, 1990.- 20 с.- Деп. в УкрНИИТИ 16.07.90, 1630-Ук90.
5. Синтез релейного регулятора положения следящего электрогидропривода/ А.Б.Жукевич; Коммунар. горно-металлург. ин-т.- Коммунарк, 1990.- 22 с.- Деп. в УкрНИИТИ 25.07.90, 1203-Ук90.
6. Оптимальный цифро-аналоговый позиционный электрогидропривод/ А.Б.Жукевич, А.Г.Пихай; Тезисы Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизированный электропривод прокатных станков", 20-23 марта 1990г., г.Свердловск.
7. Жукевич А.Б., Пихай А.Г. Формирование переходных процессов в электрогидроприводе// Электромашиностроение и электрооборудование, Киев, Техника, вып. 46, 1992.- С.46-51.
8. А.С. 1275724 СССР, МКМ НО2Р5/06 Электропривод постоянного тока/ А.Г.Пихай, А.В.Садовой, А.Б.Жукевич и др. (СССР) - 3815960/24-07; Заявлено 29.11.84; Опублик. 07.12.86, Бюл. 45.
9. А.С. 1358075 СССР, МКМ НОЗК5/01 Устройство для преобразования сигналов/ А.Б.Жукевич, А.Г.Пихай (СССР) - 4032847/24-21; Заявлено 04.03.86; Опублик. 07.12.87.- Бюл. 45.
10. А.С. 1476616 СССР, МКМ НОЗК7/12 Преобразователь двоичного кода в двоично-десятичный код угловых величин/ А.Б.Жукевич, А.Г.Пихай (СССР) - 42593229/24-24; Заявлено 10.06.87; Опублик. 30.04.89 - Бюл. 16.
11. Микропроцессорная система технологической автоматизации/ А.Г.Пихай, А.Б.Жукевич// Информ. листок о НТИ 89-976р - Ворошиловград, НТИИТИ, 1989.- 4 с.
12. Учебная микро-ЭВМ/ А.Б.Зеленов, Л.И.Рябенко, А.Б.Жукевич и др.// Информ. листок о НТИ 90-036 - Луганск, НТИИТИ, 1989. - 3 с.

*Жукевич*