

М 498235

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

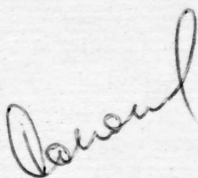
СОКОЛОВ ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ

РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРОВ МАЛЫХ РАСХОДОВ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ПРИВОДОВ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

05.02.03 - Системы приводов

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

Москва - 1991



Работа выполнена на кафедре "Гидроприводы и гидропневмоавтоматика" Луганского машиностроительного института.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Славотинский М.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Попов Д.Н.

кандидат технических наук,
в.н.с. Потепалов Ю.Н.

Ведущая организация - институт машиноведения
А.А.Благоданова АН СССР

Защита состоится "14" 10 1991 г. в " " часов
на заседании специализированного совета К 053.15.06 "Автоматические приводы и системы управления" в МЭТУ имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская, 5.

в библиотеке МЭТУ имени

09 1991 г.

М 498235

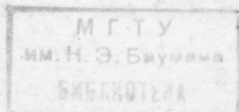
Максимов А.И.

Актуальность темы. Определяющим этапом производства подложек, служащих базой для изготовления полупроводниковых приборов и изделий электронной техники, является резка монокристаллических слитков большого диаметра 100+200 мм на тонкие пластины толщиной $0,7 + 1,5$ мм, которая производится на специальном технологическом оборудовании с автоматизированным гидравлическим приводом. Для достижения высокого качества обрабатываемой поверхности, что является решающим фактором для производства БИС и СБИС, необходимо создание регулируемых подач от 0,5 до 100 мм/мин с программным управлением от микро-ЭВМ. Это требует разработки регуляторов расходов от 0,01 до 5 л/мин, обеспечивающих высокую точность стабилизации устанавливаемых расходов независимо как от изменения нагрузки, так и свойств рабочей жидкости.

Создание высокоэффективных гидравлических аппаратов связано с проведением расчетов расходно-перепадных характеристик дроссельных устройств, решением задач оптимизации форм и конструктивных параметров. Необходимость регулирования малых расходов жидкости требует рассмотрения дополнительных вопросов, связанных с существенным влиянием на гидравлические характеристики режима течения, возможностью облитерации проходных сечений, наличием утечек, которые могут быть соизмеримы с регулируемыми расходами. Поэтому возникает потребность разработки методики численного подхода к расчету гидромеханических параметров дросселируемого потока.

Цель работы является разработка регуляторов малых расходов повышенной точности для гидроприводов с программным управлением и создание методики численного расчета гидравлических характеристик дросселирующих элементов с существенным изменением проходного сечения.

Научная новизна. Разработана методика численного расчета гидравлических характеристик дросселирующих элементов с существенным изменением проходного сечения и алгоритм проведения вычислительной процедуры; исследованы особенности реализации методики при характерных режимах течения, получены рекомендации в постановке граничных условий и определении размеров расчетной области; разработана математическая модель для расчета



гидравлических характеристик дросселирующей щели с треугольным профилем; установлен оптимальный диапазон углов профиля и получены зависимости для оценки допусков на погрешность выполнения формы проходного сечения; разработана и реализована на ЭВМ программа определения коэффициентов ПАДЕ-аппроксимирующего полинома многофакторной зависимости методом дискретной оптимизации.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработаны регуляторы малых расходов повышенной точности с импульсным управлением и пропорциональной характеристикой; получены зависимости для расчета параметров регулятора в гидроприводе с программным управлением; предложена конструкция плоского дросселя с линейным регулированием площади проходного сечения и стабильными гидравлическими характеристиками; разработан автоматизированный стенд экспериментальных исследований гидравлических характеристик элементов и устройств объемного гидропривода при малых расходах жидкости.

Внедрение результатов работы было проведено на ПО "ДОНЕЦ" (г. Луганск) при создании цифровых гидроприводов специального технологического оборудования для механической обработки монокристаллических слитков. Программа дискретной оптимизации ПАДЕ-аппроксиманты многофакторной зависимости зарегистрирована в Государственном фонде алгоритмов и программ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на:

научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Луганского машиностроительного института (г. Луганск) в 1986-1990 г.г.;

IУ Всесоюзном совещании по робототехническим системам (г. Киев) в 1987 г.;

конференции "Проектирование и эксплуатация гидропневматических систем и гидропривода машин, автоматов и промышленных роботов в машиностроении" (г. Севастополь) в 1988 г.;

Всесоюзном совещании по пневмогидроавтоматике и пневмоприводу (г.Суздаль) в 1990 г.;

научно-техническом семинаре кафедры гидравлики и гидропневмоавтоматики МТУ им. Н.Э.Баумана в 1991 г..

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, получено 1 авторское свидетельство на изобретение.

Объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, изложенных на 191 стр. машинописного текста, 64 рисунках и 3 таблицах, перечня литературы из 91 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана важность темы, представлена краткая характеристика решаемой задачи, обоснованы цель и направление выполненных исследований.

В первой главе приводится обзор основных параметров отечественных (МП55-22, МП55-32, ДД6) и зарубежных (2FR M5 -30/0,6; 2FR M5-30/0,2 - Германия; РД6/2ГХ0 - Болгария) регуляторов расхода, который показал, что для приводов специального технологического оборудования по требованиям к значениям устанавливаемых расходов, точности их стабилизации, возможности простого сопряжения с программируемыми управляющими системами необходима разработка специальных регуляторов расхода.

Отмечаются основные трудности при дроссельном регулировании малых расходов такие, как существенное влияние на расходно-перепадные характеристики режима течения, возможность облитерации проходных сечений, наличие утечек, которые могут быть соизмеримы с регулируемым расходом. Рассматриваются конструкции регулируемых дросселей для малых расходов, среди которых дроссели зарубежных фирм "Rexroth", "Vickers". Особенностью конструкций является использование треугольного профиля проходного сечения. Практический опыт позволяет использовать данную форму проходного сечения при создании регулирующих элементов для малых расходов, определив оптимальные геометрические параметры и установив зависимости для гидравлического расчета. При этом, необходимо учитывать то обстоятельство, что реальные размеры дросселирующей щели могут быть соизмеримы с погрешностью выполнения профиля, которая может оказать существенное влияние на стабильность расходно-перепадных характеристик. Поэтому важно иметь методы, позволяющие качественно исследовать и количественно оценивать гидромеханические параметры дросселируемого потока.

Приводится обзор аналитических, полуэмпирических и численных методов расчета, разработанных в трудах советских (Н.Е.Жу -

ковский, О.Е. Гоман, И.Е. Идельчик, А.Д. Альтшуль, А.В. Шипилин и др.) и зарубежных (Вюст, *L. Gross, J. Zick, H. Weule* и др.) ученых, который позволил считать перспективными для решения задач оптимизации, качественного и количественного исследования течений методы численного моделирования. Вместе с тем, известные численные подходы не являются универсальными и требуют больших затрат машинного времени, что ограничивает их применение в инженерных расчетах.

На основании анализа особенностей дроссельного регулирования малых расходов жидкости и методов математического моделирования гидравлических характеристик дросселирующих элементов определены основные направления и задачи данной работы: разработать методику численного расчета гидравлических характеристик дросселирующих элементов, имеющих значительное изменение проходного сечения, и алгоритм проведения вычислительной процедуры; исследовать особенности реализации методики при характерных режимах течения; разработать математическую модель для расчета гидравлических характеристик дросселирующей щели с треугольным профилем и экспериментально подтвердить ее адекватность; провести на математической модели исследования по влиянию на стабильность коэффициента расхода геометрических параметров и установить оптимальную форму проходного сечения; разработать автоматизированный стенд для проведения экспериментальных исследований гидравлических характеристик элементов и устройств объемного гидропривода при малых расходах жидкости; разработать конструкцию дросселя с линейной регулировочной характеристикой и стабильными гидравлическими характеристиками; разработать конструкцию регуляторов малых расходов повышенной точности; оценить быстродействие и установить зависимости для расчета параметров регулятора расхода в гидроприводе с программируемым законом изменения скорости подачи.

Во второй главе разработана методика численного расчета гидравлических характеристик дросселирующих элементов со значительным изменением проходного сечения.

Расчетная зависимость для коэффициента расхода M , положенная в основу методики, получена следующим образом. С одной стороны расход через дросселирующие элементы принято определять соотношением

$$Q = \mu S_{min} \sqrt{2P_0/\rho} ,$$

где $P_0 = P_{вх} - P_{вых}$ - перепад давлений на входе и выходе;
 S_{min} - площадь наименьшего сечения; ρ - плотность жидкости.
 С другой стороны, согласно рис. I

$$Q = \iint_{(S_{min})} V_n ds ,$$

где V_n - нормальная к проходному сечению проекция скорости;
 ds - элементарная площадь сечения.

Поэтому

$$\mu = \iint_{(S_{min})} \frac{V_n}{\sqrt{2P_0/\rho}} \frac{ds}{S_{min}} = \iint_{(\bar{S})} u_n d\bar{s} , \quad (I)$$

где $d\bar{s} = ds/S_{min}$; $u_n = V_n/V_0$ - безразмерная нормальная проекция скорости с масштабом $V_0 = \sqrt{2P_0/\rho}$.

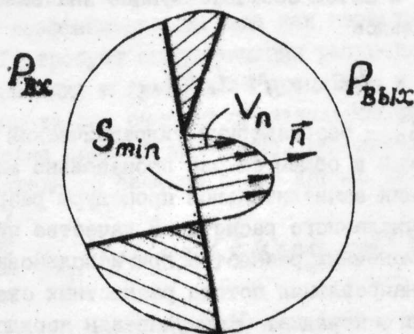


Рис. I. Схема течения

Распределение безразмерной нормальной к проходному сечению скорости определяется путем численного интегрирования уравнений движения несжимаемой жидкости. В общем случае рассматривается система уравнений Рейнольдса, записанная в безразмерном виде. Уравнение неразрывности видоизменено с введением производной от давления по времени, что позволяет избавиться от

проведения трудоемких итерационных процедур расчета поля давлений на каждом временном слое и получить стационарное течение путем выхода на установившееся из начального с тривиально заданным полем переменных. Безразмерное давление определено, как

$$p = (P - P_{\text{вых}}) / P_0.$$

Приняты граничные условия на входной границе потока

$$p = 1 ; u_{nr} = 0 ; u_{sr} = 0$$

или

$$p + u_{nr}^2 = 1 ; u_{sr} = 0 ,$$

на выходе

$$\frac{\partial u_{nr}^2}{\partial n_r} = - \frac{\partial p}{\partial n_r} ; p = 0 ; u_{sr} = 0 ,$$

где n_r - нормаль к границе; u_{nr} , u_{sr} - безразмерные нормальная к границе и касательная составляющие скорости.

Уравнения движения содержат безразмерный параметр - модельное число Рейнольдса Re_m . Задав в расчет его значение, можно определить μ и затем соответствующее значение действительного числа Рейнольдса

$$Re = \mu \bar{d}_r Re_m ,$$

где $\bar{d}_r = d_r / L_0$ - безразмерный гидравлический диаметр;

L_0 - выбираемый в общем случае произвольно масштаб длины.

Для проведения вычислительной процедуры разработана блок-схема алгоритма численного расчета. В качестве численного метода выбран метод конечных разностей при использовании ориентированных с учетом направления потока разностных схем для частных производных первого порядка. Сформулирован порядок получения зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса.

По установленной зависимости $\mu(Re)$ известным образом определяются расходно-перепадные характеристики дросселирующего элемента.

Особенности реализации численной методики при характерных режимах течения были исследованы на ряде примеров, для которых накоплен экспериментальный материал или известны аналитические решения (трехмерная задача о перетекании через прямоугольное и квадратное отверстие в тонкой стенке, плоское перетекание через отверстие, течение через сопротивление, образованное прямым и

обратным уступами). Были получены удовлетворительные результаты для $Re < 100$ при интегрировании уравнений Навье-Стокса и для предельного случая $Re \rightarrow \infty$, где рассматривались уравнения Эйлера. На основании проведенных расчетов сделаны рекомендации в постановке граничных условий и определении размеров расчетной области течения.

В диапазоне средних чисел Рейнольдса ($10^2 + 10^4$) использование уравнений Навье-Стокса не позволило получить результатов не только количественно совпадающих с опытными, но и качественно отражающих характерное для этой области возрастание, а затем уменьшение значения коэффициента расхода. Учитывая результаты ряда работ по оценке критических чисел Рейнольдса, принято считать режим течения в данном диапазоне турбулентным. С использованием модели вихревой вязкости установлены выражения для дополнительных турбулентных напряжений. При этом сделан ряд допущений, одним из которых является постоянство соотношения вихревой и кинематической вязкости. Такой подход позволил не только качественно согласовать расчетные величины с экспериментальными, но и добиться приемлемой точности.

Вычисление коэффициента расхода как поверхностного интеграла согласно (I) требует аппроксимации распределения скорости у кромок, что приводит к громоздкой процедуре и вызывает существенные трудности для сечений произвольной формы. Поэтому было получено более простое выражение, имеющее при нормальном расположении проходного сечения к оси абсцисс вид

$$M = \sum_{j=1}^N \alpha_{xj} / (N + \alpha [\bar{S} / \Delta z \Delta y - N]) ,$$

где N - число внутренних узлов в наименьшем сечении;
 $\bar{S}, \Delta z, \Delta y$ - безразмерная площадь и приращения координат;
 α - постоянный коэффициент ($0 < \alpha < 1$).

В третьей главе рассмотрены вопросы экспериментальных исследований.

Для оценки точности разработанной методики были сопоставлены расчетные распределения нормальной проекции скорости с экспериментальными для случая $Re \rightarrow \infty$, где погрешность конечно-разностной аппроксимации оказывает наибольшее влияние на результат численного решения. С этой целью при помощи шарового

зонда был произведен замер нормальных скоростей для рассмотренных во второй главе примеров. Показано, что у кромок отверстий и у стенки обратного уступа расчетные значения ниже опытных. Это вполне объяснимо появлением при численном решении "искусственной" вязкости, вносимой разностными выражениями для конвективных членов уравнений движения. Однако рассогласование является приемлемым, что подтверждено проверкой на адекватность по критерию Фишера.

С целью значительного уменьшения затрат времени и достижения высокой точности был разработан автоматизированный стенд экспериментальных исследований (АСЭИ) гидравлических характеристик дроселирующих элементов гидроаппаратов. АСЭИ выполнен на базе вычислительного комплекса с микро-ЭВМ "Электроника-60М". Для измерения расхода через объект исследования применяется косвенный метод, основанный на определении объема жидкости, в качестве которого используется безштоковая полость гидроцилиндра, и времени заполнения этого объема. АСЭИ позволяет производить автоматизированный съем показаний с блока измерения перемещений, включающего измеритель линейных перемещений ДДПН 22-250 и блок индикации БИН-ИИ 05х1-1-2, датчиков давления типа "Сапфир", установленных на входе и выходе объекта исследования, а также термпары. Обработка данных выполняется микро-ЭВМ с использованием специально разработанного программного обеспечения и выводом результатов на дисплей или АЦДУ.

На АСЭИ были проведены исследования гидравлических характеристик дроселирующей щели с формой проходного сечения, которую имеют регулируемые дросели для малых расходов жидкости. Установлены характерные зоны поведения зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса. Первая зона - диапазон чисел Рейнольдса от 0 до 40. Здесь наблюдается явная линейная зависимость μ от Re

$$\mu = 0,091 \sqrt{Re} ,$$

что согласуется с выводом, получаемым на основании ПИ-теоремы. Вторая зона - диапазон чисел Рейнольдса от 40 до 100. Здесь не наблюдается однозначной зависимости. Область разброса опытных значений коэффициента расхода является значительной и достигает 20%. Для первой и второй зон характерно существенное влия-

ние температуры рабочей жидкости на расходно-перепадные характеристики. Третья зона - $Re > 100$. Значение коэффициента расхода практически однозначно определяется числом Рейнольдса

$$M = 0,663 + 1,276/\sqrt{Re} - 11,667/Re$$

и изменяется приблизительно в 4,5% области.

По полученным данным была оценена точка перехода ламинарного течения в турбулентное на основании приближенной методики, согласно которой критическое число Рейнольдса $Re_* = M_\infty^2 / \tan^2 \varphi$, где $M_\infty = M$ при $Re \rightarrow \infty$, φ - угол наклона линейного участка зависимости $M(Re)$. Оценка дала результат $Re_* \approx 53$.

Было установлено выражение для оценки минимального перепада давлений, который при заданном расходе Q обеспечивает минимальное значение числа Рейнольдса Re_{min} , соответствующее началу зоны относительной стабильности коэффициента расхода

$$\Delta p_{min} \approx \frac{\rho v^4 Re_{min}^4 (1 + \sin^2 \alpha/2)^4}{8 M^2 Q^2 \sin^2 \alpha},$$

где α - угол профиля.

Конкретные расчеты показали, что для стабилизации расходов менее $1 \text{ см}^3/\text{с}$ необходимо поддерживать значительно больший перепад давлений на дросселирующей щели, чем принятый: 0,15-0,2 МПа в промышленных регуляторах расхода.

На АСЭИ проведены исследования по возникновению облитерации, которые показали ее отсутствие во времени свыше 2 часов для проходных сечений с площадью до $0,004 \text{ мм}^2$ при использовании рабочей жидкости, очищенной с номинальной толщиной фильтрации не более 10 мкм.

Четвертая глава посвящена разработке регуляторов малых расходов повышенной точности.

Спираясь на предложенную численную методику, была выполнена оптимизация проходного сечения дросселирующей щели, которую имеют регулируемые дроссели на малые расходы. Согласно полученных рекомендаций была выделена в декартовой системе координат расчетная область течения и поставлены соответствующие граничные условия. Математическая модель для исследования влияния геометрических параметров профиля на стабильность коэффи-

циента расхода реализована на ЭВМ ЕС-1035 по установленной блок-схеме алгоритма численного расчета. Вычисления проводились на сетке с общим числом узлов около 4000 (в наименьшем сечении 81).

Адекватность математической модели подтверждена сопоставлением расчетной зависимости для коэффициента расхода при $Re \geq 100$ с экспериментальной и проверена по критерию Фишера. Диапазон чисел Рейнольдса < 100 не рассматривался, так как включает ламинарный режим течения и зону перехода к турбулентному и не должен иметь место при регулировании ввиду существенной неустойчивости коэффициента расхода.

Угол профиля задавался строгим соотношением между приращениями координат, определяющих плоскость проходного сечения. Кроме того, расчетная сетка позволяла рассматривать отклонение от треугольной формы путем перехода к трапецевидной. Это дало возможность производить оценку влияния на стабильность коэффициента расхода погрешности выполнения двухгранного угла, задаваемой безразмерным параметром

$$\chi = \delta\varphi / \sqrt{S},$$

где $\delta\varphi$ - размер вносимого отклонения; S - площадь идеально выполненного проходного сечения.

В качестве целевой функции рассматривалась максимальная погрешность регулирования ε , представленная в виде суммы составляющих ε_φ , учитывающей изменение площади через параметр χ , и ε_M , отражающей неустойчивость коэффициента расхода

$$\varepsilon_M = \frac{M_{\max} - M_\infty}{M_\infty} \cdot 100\%,$$

где $M_{\max}$ - максимальное значение коэффициента расхода. С использованием математической модели по результатам двухфакторного эксперимента для ε_M получен ПАДЕ-аппроксимирующий полином второго порядка

$$\varepsilon_M = 13,3 - 0,364\alpha + 6,61\chi + 0,353 \cdot 10^{-2} \alpha^2 - 8,14\chi^2 - 0,2 \cdot 10^{-2} \alpha\chi, \%$$

коэффициенты которого найдены методом дискретной оптимизации. По аналитическим выражениям установлена связь оптимального угла профиля с погрешностью выполнения формы проходного сечения,

наличие которой является однозначно отрицательным фактором. Как показывает распределение максимальной погрешности в плоскости параметров α, χ (рис.2) выбор оптимального угла профиля может быть расширен до диапазона $45^\circ \div 60^\circ$, так как в этих пределах не происходит ее существенного изменения. На основании полученных данных оптимальным принято считать проходное сечение, образованное идеально выполненным двугранным углом размера $45^\circ \div 60^\circ$, которое обеспечивает при $Re > 100$ нестабильность коэффициента расхода порядка 4% от предельного значения. Учитывая, что технологически нельзя избежать погрешности исполнения профиля, допуски на изготовление возможно приближенно оценивать по параметру $\delta\varphi$, исходя из точности регулирования и используя установленные выражения.

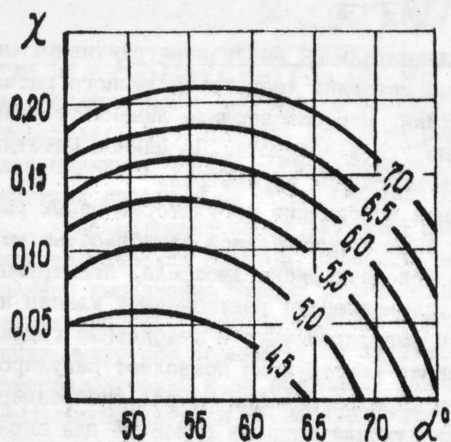


Рис.2. Распределение максимальной погрешности регулирования (%)

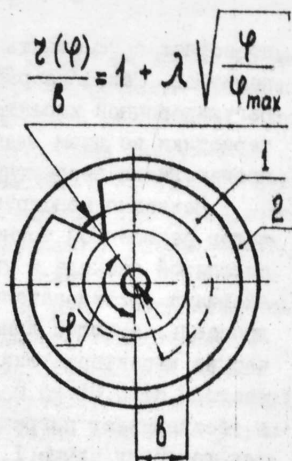


Рис.3. Плоский дроссель с линейной регулировочной характеристикой

Опираясь на полученные рекомендации, была разработана конструкция плоского дросселя с линейной регулировочной характеристикой. Предпочтение плоскому варианту исполнения отдано, как обеспечивающему минимальные перетечки. Дроссель (рис. 3) состоит из диска I с угловым вырезом, опирающегося на втулку 2 с отверстием, форма которого описывается зависимостью

$$\frac{1}{b} r(\varphi) = 1 + \lambda \sqrt{\varphi/\varphi_{\max}},$$

где $r(\varphi)$ — расстояние от оси диска до кромки отверстия во втулке; b — расстояние от оси диска до вершины углового выреза; φ , $\varphi_{\max}$ — угол поворота диска и его максимальное значение; λ — постоянный безразмерный коэффициент.

Приближенное выражение для расчета площади проходного сечения

$$S \approx \lambda^2 b^2 \tan \frac{\lambda}{2} \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}.$$

позволяет осуществить предварительный выбор конструктивных параметров. Также разработана методика точного численного расчета регулировочной характеристики, что подтвердило линейность характеристики во всем диапазоне углов поворота. По данной методике производится корректировка выбранных параметров.

Показано конструктивное исполнение регуляторов малых расходов повышенной точности с пропорциональной зависимостью между величиной расхода и углом поворота диска дросселя. Конструкция включает последовательно установленные редукционный клапан и дроссель, имеющий линейную регулировочную и стабильные гидравлические характеристики. Данная конструкция позволяет регулировать расходы от 0,01 до 5 л/мин (при реализации на ряд типоразмеров) и обеспечивает погрешность стабилизации не более 5% для перепадов давления свыше 1,2 МПа в диапазоне температур рабочей жидкости от 15° до 80°C. Приведены примеры статических характеристик регуляторов, полученных на АСЭИ.

Путем комбинации регулятора с шаговым электродвигателем достигнута возможность импульсного регулирования расхода. Представлены конструкция и натурный образец регулятора расхода с импульсным управлением, в который дополнительно введен редуктор, позволяющий уменьшить как дискретность регулирования, так и момент, воспринимаемый валом двигателя. Такая конструкция регуляторов позволяет включать их в состав свободнопрограммируемых

гидроприводов с цифровым программным управлением скорости подачи исполнительного механизма.

В пятой главе показана реализация свободнопрограммируемого цифрового гидропривода специального технологического оборудования с использованием регулятора малых расходов разработанной конструкции.

Для расчета параметров регулирования разработана математическая модель регулятора с импульсным управлением, по которой численными методами исследованы реакции на управляющие и внешние возмущения. Оценка длительности переходных процессов позволяет при регулировании с периодом следования импульсов более 0,0025 с исключить из рассмотрения динамические процессы и установить для определения безразмерного расхода выражение

$$\bar{Q} = \alpha \bar{F}_g(\gamma) ,$$

где $\alpha = \mu_g S_{g*} \sqrt{2R_0 / (S_n \rho)} / Q_*$; S_{g*} , Q_* - масштабы площади регулируемого дросселя и расхода; μ_g - коэффициент расхода дросселя; S_n - площадь плунжера редукционного клапана; R_0 - усилие пружины; $\bar{F}_g(\gamma)$ - безразмерная функциональная зависимость площади дросселя от угла поворота вала шагового электродвигателя.

Рассматривается структурная схема гидропривода резки монокристаллических слитков. Приводом обеспечивается автоматизированное выполнение этапов рабочего цикла: зажим слитка, подача слитка на шаг, вращение слитка и подача на рез. Программирующая цикл микро-ЭВМ формирует сигналы на включение (выключение) распределителей и по заданному закону скорости подачи выдает импульсные сигналы на шаговый электродвигатель, обеспечивающий перенастройку регулятора. При этом происходит изменение расхода, поступающего к гидроцилиндру, а следовательно, и скорости поршня, осуществляющего перемещение слитка относительно дисковой пилы. Привод позволяет реализовать подачи от 0,5 до 100 мм/мин и достигнуть однородного качества обрабатываемой поверхности. Получены выражения для расчета скорости подачи и перемещения поршня гидроцилиндра, позволяющие по заданному закону составлять управляющую программу. Расчетные значения перемещения и скорости сопоставлены с экспериментальными. Адекватность расчетных зависимостей подтверждена по критерию Фишера.

В заключении формулируются основные результаты и выводы

диссертационной работы:

1. Разработана методика численного расчета гидравлических характеристик дросселирующих элементов с существенным изменением проходного сечения и алгоритм проведения вычислительной процедуры. Исследованы особенности реализации численной методики при характерных режимах течения, получены рекомендации в постановке граничных условий и определении размеров расчетной области.

2. Установлено, что в области средних чисел Рейнольдса ($10^2 + 10^4$) использование уравнений Навье-Стокса в общем случае дает результаты, расходящиеся с экспериментальными не только количественно, но и качественно. Предложены соотношения для дополнительных турбулентных напряжений, позволяющие согласовать расчетные и опытные гидравлические характеристики.

3. Разработан автоматизированный стенд экспериментальных исследований гидравлических характеристик элементов и устройств объемного гидропривода при расходах до 0,1 л/с и методика обработки опытных данных.

4. Показано, что для стабилизации расходов менее 1 см³/с необходимо поддерживать на дросселе значительно больший перепад давлений, чем принятый 0,15 + 0,2 МПа в промышленных регуляторах расхода.

5. Разработана математическая модель для расчета гидравлических характеристик дросселирующей щели с треугольным профилем и экспериментально подтверждена ее адекватность.

6. На математической модели проведены исследования по влиянию геометрических параметров на стабильность коэффициента расхода и по результатам факторного эксперимента установлен оптимальный диапазон углов профиля 45° + 60°. Предложены зависимости для оценки допусков на прогрешность выполнения формы проходного сечения.

7. Разработана и реализована на ЭВМ программа определения коэффициентов ПАДЕ-аппроксимирующего полинома многофакторной зависимости методом дискретной оптимизации, позволяющая использовать в качестве минимизируемого функционала как сумму квадратичных отклонений, так и критерий минимакса.

8. Разработана конструкция плоского дросселя с линейной регулировочной характеристикой для площади проходного сечения и формой дросселирующей щели, обеспечивающей изменение коэффи-

циента расхода при $Re > 100$ не более 4% от предельного значения.

9. Разработаны регуляторы расходов от 0,01 до 5 л/мин с импульсным управлением и пропорциональным регулированием, имеющие погрешность стабилизации не более 5% в диапазоне температур рабочей жидкости от 15° до 80°С при перепадах давления свыше 1,2 МПа. Установлены зависимости для расчета параметров регулятора в гидроприводе с программным управлением.

10. Применение разработанных регуляторов малых расходов в гидроприводе специального технологического оборудования резки монокристаллических слитков позволяет реализовать программируемые законы изменения скорости подачи на рез от 0,5 до 100 мм/мин с обеспечением точности в пределах $\pm 5\%$.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. А.с. 1534430 СССР, МКИ³ G 05D 7/00. Дроссель /В.П. Колесников, М.В. Славотинский, В.И. Соколов (СССР). - № 4376438/24-24; Заявлено 08.02.88; Опубл. 07.01.90; Бюл. №1//Открытия. Изобретения. - 1990. - № 1. - С. 187.

2. Соколов В.И., Павлюченко В.А., Марголин В.Ю. Дискретная оптимизация ПАДЕ-аппроксиманты многофакторной зависимости// Алгоритмы и программы. - 1989. - № II - С. 5.

3. Славотинский М.В., Соколов В.И. Определение коэффициента сопротивления отверстия путем численного решения уравнений движения жидкости/ Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1987. - II с.: ил. - Библиогр.: 2 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 18.03.87, № 970.

4. Славотинский М.В., Соколов В.И. К вопросу о численном моделировании трехмерных течений в ρ, μ - координатах/ Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1987. - 7 с.: ил. - Библиогр.: 4 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 25.05.87, № 1513.

5. Славотинский М.В., Соколов В.И. О возможности повышения линейности характеристики регулятора потока с плоским дросселем/ Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1987. - 8 с.: ил. - Библиогр.: 2 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 29.07.87, № 2239.

6. Славотинский М.В., Соколов В.И. Численный расчет коэффициентов расхода гидравлических сопротивлений со значительным изменением площади/ Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1988. - 34 с.: ил. - Библиогр.: 14 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 06.05.88, № 1085.

7. Колесников В.П., Славотинский М.В., Соколов В.И. Разработка математической модели цифрового гидропривода малых подач / Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1988. - 15 с.: ил. - Библиогр.: 4 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 10.08.88, № 1858.

8. Соколов В.И. Численный метод прогнозирования границ квазистационарности коэффициентов расхода дросселирующих элементов / Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1989. - 10 с.: ил. - Библиогр.: 7 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 04.08.89, № 1870.

9. Славотинский М.В., Соколов В.И., Колесников В.П. Исследование динамики выходного звена прецизионного гидропривода / Луганский машиностр. ин-т. - Луганск, 1990. - 15 с.: ил. - Библиогр.: 6 назв. - Деп. в УкрНИИТИ 14.06.90, № 1079.

10. Колесников В.П., Соколов В.И. Цифровой гидропривод с термостабилизацией для ГАП // IV Всесоюзное совещание по робототехническим системам: Тез. докл. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1987. - Ч. I. - С. 219-220.

11. Колесников В.П., Славотинский М.В., Соколов В.И. Пропорциональный регулятор малых расходов с импульсным управлением // Пневмогидроавтоматика и пневмопривод. Всесоюзное совещание: Тез. докл. - М.: ИНФОРМПРИБОР, 1990. - Ч. I. - С. 96-97.

12. Колесников В.П., Славотинский М.В., Соколов В.И. О влиянии диссипации энергии потока жидкости через дроссель на изменение ее температуры // Гидравлические машины: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Харьков: Вып. школа, 1989. - Вып. 23. - С. 117-120.

13. Колесников В.П., Соколов В.И. Цифровой гидропривод малых подач // Системы и узлы перспективных тепловозов: Сб. науч. тр. - Киев: УМК ВО, 1990. - С. 196-200.

14. Соколов В.И., Колесников В.П. Математическая модель регулятора малых потоков с дискретным управлением // Гидравлические машины: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Харьков: Основа, 1990. - Вып. 24. - С. 104-107.

15. Славотинский М.В., Соколов В.И. К вопросу о регулировании малых расходов жидкости // Гидравлические машины: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Харьков: Основа, 1990. - Вып. 24. - С. 101-104.

Подписано к печати 17.07.91г. Формат 60х90 1/16. Объем 1 печ. лист.
Заказ №350. Тираж 100 экз.

Ротапринт ЛМСИ, 348034, г. Луганск кв. Молодёжный, д.20-а.