

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 62-522.7 и 62-529



На правах рукописи

Хазиев Эмиль Люцеревич

**НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ ПОДСИСТЕМАМИ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА
ПРИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ**

Специальность:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Набережные Челны – 2017 г.

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и управление» в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель	доктор техн. наук, профессор кафедры информационных систем Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Дмитриев Сергей Васильевич
Официальные оппоненты:	доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики Казанского национального исследовательского технического университета им.А.Н. Туполева-КАИ Роднищев Николай Егорович; кандидат техн. наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическая подготовка машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» Мкртчян Артем Фурманович
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (г. Йошкар-Ола)

Защита диссертации состоится «26» мая 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.081.31 в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, УЛК-5, ауд.309

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, диссертационный совет Д 212.081.31

Автореферат разослан «__» ____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.31
кандидат технических наук, доцент



Мавлеев Ильдус Рифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из распространенных задач, возникающих при автоматизации производства, является позиционирование механизмов и рабочих органов станков, обрабатывающих центров, аддитивных установок, роботов, манипуляторов и следящих подсистем с заданной точностью и быстродействием, с конечной целью обеспечения заданных показателей качества технологического процесса.

Широкое применение для обеспечения погрузочно-разгрузочных операций получили дискретные пневмоприводы, выполненные обычно с системой управления по схеме путевой автоматики. Они имеют относительно простую конструкцию, защитные устройства, пожарную безопасность, взрывобезопасность, низкую стоимость и высокую надежность при работе в тяжелых условиях при практически неограниченной рабочей нагрузке и приемлемое, но нерегулируемое быстродействие. Использование их в механообрабатывающем производстве, кузнечно-штамповочном производстве, литейном, сварочном и сборочном производствах позволяет повысить производительность труда, улучшить качество выпускаемой продукции, снизить ее себестоимость, повысить коэффициент сменности оборудования, освободить рабочих от выполнения ручного, малоквалифицированного и монотонного труда, особенно в тяжелых, вредных и опасных для человека условиях.

Недостаток пневматических приводов, управляемых по схеме путевой автоматики, в том, что применяемые в них устройства управления - пропорциональные пневмораспределители регулируют работу двигателей в конечных положениях с приемлемыми показателями качества для обеспечения техпроцесса, тогда как в промежуточных положениях работы приводов - не удовлетворяют требованиям по точности позиционирования и быстродействию, поэтому существует необходимость гибкого управления позиционированием пневмоприводов в диапазонах их возможных перемещений.

Решение этой задачи заключается в создании рациональных конструкций пневматических механизмов, с параллельным совершенствованием способов программного управления ими, или с учетом информации о среде, или управлению функционально законченными действиями, или с применением самообучаемых моделей функционирования на основе искусственного интеллекта.

Актуальность темы обусловлена необходимостью решения задачи программного управления позиционированием рабочих органов пневматических подсистем металлообрабатывающих станков, с целью обеспечения заданных показателей качества технологического процесса при погрузочно-разгрузочных операциях.

Объект исследования – система управления пневматическим приводом основанная на нечеткой логике с применением крановых пневматических распределителей (КПР), приводимых электрическими шаговыми двигателями.

Предмет исследования - процесс управления пневматическим приводом с применением крановых пневматических распределителей.

Целью диссертационной работы является разработка системы автоматизированного управления пневматическим приводом, для обеспечения технологических требований по точности позиционирования и быстродействия.

Для достижения поставленной цели в работе рассмотрены следующие **вопросы**:

1. Исследование математической модели пневматического привода, как программно управляемого динамического объекта;
2. Разработка системы управления рабочими органами привода с использованием методов нечеткой логики с целью настройки пневматической подсистемы на различные параметры технологического процесса производства;

3. Разработка управляемого дросселирующего кранового пневмораспределителя, обеспечивающего заданную точность позиционирования и быстродействие пневматических двигателей;
4. Разработка методики расчета рабочих параметров крановых пневмораспределителей пневматического привода на основе математической модели.

Положения, выносимые на защиту:

- методика математического моделирования и алгоритмизация системы автоматизированного управления пневмосистемой с функциональными задачами точного и быстрого позиционирования исполнительных органов;
- модель и структурные решения подсистемы управления пневматического привода с использованием методов нечеткой логики, обеспечивающие точность процесса управления позиционированием рабочих органов;
- методика расчета параметров устройства управления пневматического привода на основе его математической модели, позволяющая обеспечить заданные параметры качества управления.

Положения, обладающие научной новизной:

- методика определения значений параметров устройств управления пневмопривода, обеспечивающих заданные отклонения от требуемых значений показателей качества;
- принцип управления пневмоприводом по разностному способу включения крановых регулирующих устройств за счет программного управления их приводами, – электрическими шаговыми двигателями, с использованием методов нечеткой логики;
- обоснована возможность повышения точности процесса управления пневматическим приводом за счет управляемого регулирования этапов замедления и ускорения при достижении промежуточных положений приводов его исполнительных механизмов с погрешностью не более 0,1%.

Практическая полезность результатов работы заключается в следующем:

- в разработке и апробации экспериментальной установки и методики экспериментальных исследований динамических характеристик пневматического привода с крановыми пневмораспределителями с приводом шаговым электрическим двигателем с применением модели управления на основе нечеткой логики;
- в получении результатов экспериментального исследования позиционирования рабочего органа в возможном на практике диапазоне изменений условий работы пневматического привода;
- в экспериментальной проверке быстродействия и точности позиционирования привода при работе в диапазоне возможных положений его рабочих органов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, нечеткой логики, теории автоматического управления, программирования, имитационного моделирования на ЭВМ, а также экспериментальных исследований динамических характеристик и точности позиционирования исполнительных механизмов с пневматическими двигателями.

Апробация работы. Основные результаты и отдельные разделы диссертации докладывались и обсуждались на международной конференции, посвящённой 10-летию образования Международного информационно – экологического парламента «Глобальные проблемы экологизации в Европейском сообществе» (г. Казань, 2006 г.); на межрегиональной научно – практической конференции «Студенческая наука в России на современном этапе» (г. Набережные Челны, 2008 г.); на кафедре ПИУ Камской инженерно – экономической академии (г. Набережные Челны, 2009-2011г.); на кафедре АиИТ Камской инженерно – экономической академии (г. Набережные Челны, 2011г.); на международной

научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2013» (г. Казань, 2013г.); на кафедре ИС Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета (г. Набережные Челны, 2013г.); на кафедре АУ Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета (г. Набережные Челны, 2014г.); на международной научно-практической конференции «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров (ИТАП - 2014)» (г. Набережные Челны, 2014г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 12 работ, из них 6 статьи опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа выполнена на 129 страницах печатного текста и состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 104 наименований, и 7 приложений, содержащих результаты расчетов, испытаний и схемы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность задачи повышения эффективности управления позиционированием положения пневматических приводов путем комплексного аппаратно-программного синтеза системы автоматизированного управления для обеспечения параметров качества заданного технологического процесса при погрузочно-разгрузочных операциях.

В первой главе приведен обзор и анализ современных технических устройств и систем управления пневматическими приводами использующихся для обеспечения погрузочно-разгрузочных операций в машиностроении.

Пневматические приводы являются относительно дешевой альтернативой электромеханическим, но требуют обеспечения точности, быстродействия и плавности работы при изменении расчетных нагрузок рабочего органа в широком диапазоне.

Уровни структуры управления представлены на рисунке 1. Первый уровень – локальное аппаратное управление приводами; второй – элементарные программные операции; третий – операции с учетом информации о среде с элементами методов искусственного интеллекта.

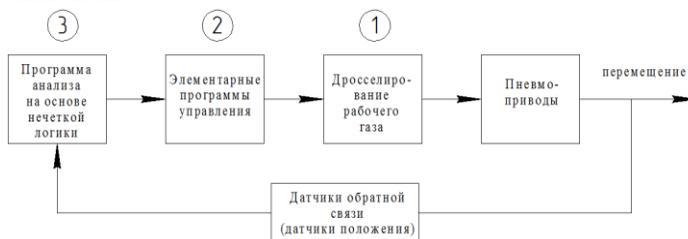


Рис. 1 - Уровни управления приводами пневмосистемы.

Система управления с использованием дросселирующих КТР с шаговыми электродвигателями и с использованием моделей управления на основе нечеткой логики, позволяет оперативно менять режимы работы пневматической системы.

Во второй главе сформулированы принципы реализации предложенной системы управления, описаны система управления пневматическим приводом и конструкция кранового пневматического распределителя с приводом от электрического шагового двигателя. Также дано математическое описание составляющих элементов предлагаемой системы управления.

Принципы реализации управления для пневматического привода можно проследить на основе исследуемых зависимостей от времени перемещения $y(t)$ и скорости перемещения $V(t)$ рабочего органа (рисунки 2, 3).

Позиционный цикл состоит из этапов: участок А-В – форсированный разгон исполнительного механизма, где вся энергия источника питания с минимальными потерями преобразуется в механическую энергию движения; В-С – управляемое замедление, предотвращающее возникновение высоких ускорений; С-Д – фиксация исполнительного механизма с заданной точностью; D-D' – останов; D'-Е – обратный ход для рисунка 2; D'-Е – прямой ход для рисунка 3; Е-Е' – останов; Е'-F – обратный ход для рисунка 3.

Для повышения эффективности каждого этапа позиционного цикла предлагается использовать КПП с приводом от электрического шагового двигателя. Такое техническое решение обеспечивает снижение статической ошибки по положению, а также быстрдействие привода. Управление шаговыми двигателями выполняется программно.

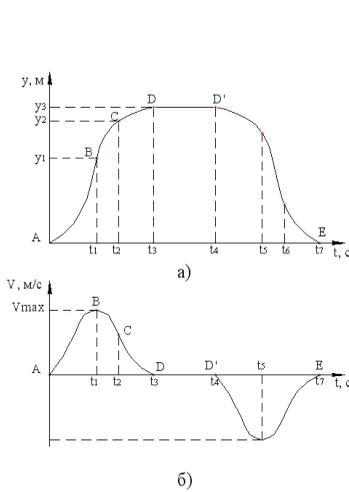


Рис. 2 - Графики зависимостей $y(t)$ – (а) и $V(t)$ – (б) элементов пневматического привода с фиксацией в промежуточном положении и обратным ходом.

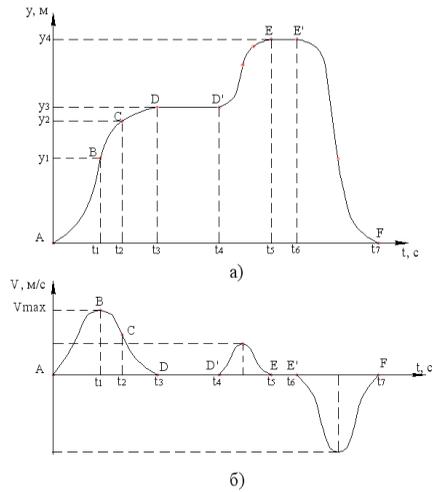


Рис. 3 - Графики зависимостей $y(t)$ – (а) и $V(t)$ – (б) элементов пневматического привода с фиксацией в промежуточном положении и продолжении прямого хода с последующим обратным ходом.

Возможные ошибки по положению в работе пневмоприводов ($\Delta_{роб.}$) вызваны ошибками регулирования ($\Delta_{рег.}$), ошибками от упругих и температурных деформаций ($\Delta_{деф.}$), ошибками от зазоров и люфтов ($\Delta_{заз.}$):

$$\Delta_{роб.} = \Delta_{рег.} + \Delta_{деф.} + \Delta_{заз.}; \quad (1)$$

На практике эти ошибки компенсируются возможностью точного задания положения элементов привода, изменением скорости, изменением технологии изготовления механизмов, применением новых материалов и конструкций.

Разработанная система управления пневматическим приводом с использованием КПП на основе нечеткой логики показана на рисунке 4. Работа системы основана на адаптивном программном управлении, с использованием нечеткой логики на основе отслеживаемых данных от обратной связи.

Для обеспечения приемлемых расходов газа и высоких динамических характеристик пневмоприводов используются КПП с приводом от электрических шаговых двигателей,

конвертирующих прямоугольные импульсы электрического напряжения в механическое вращение. За рабочие положения каждого пневмопривода отвечает пара КПП, за исключением пневмопривода механизма захвата, в нем используется один КПП. В качестве регулятора давления также применен КПП с управлением от электрического шагового двигателя, обратная связь в нем осуществляется при помощи датчика давления пьезоэлектрического типа.

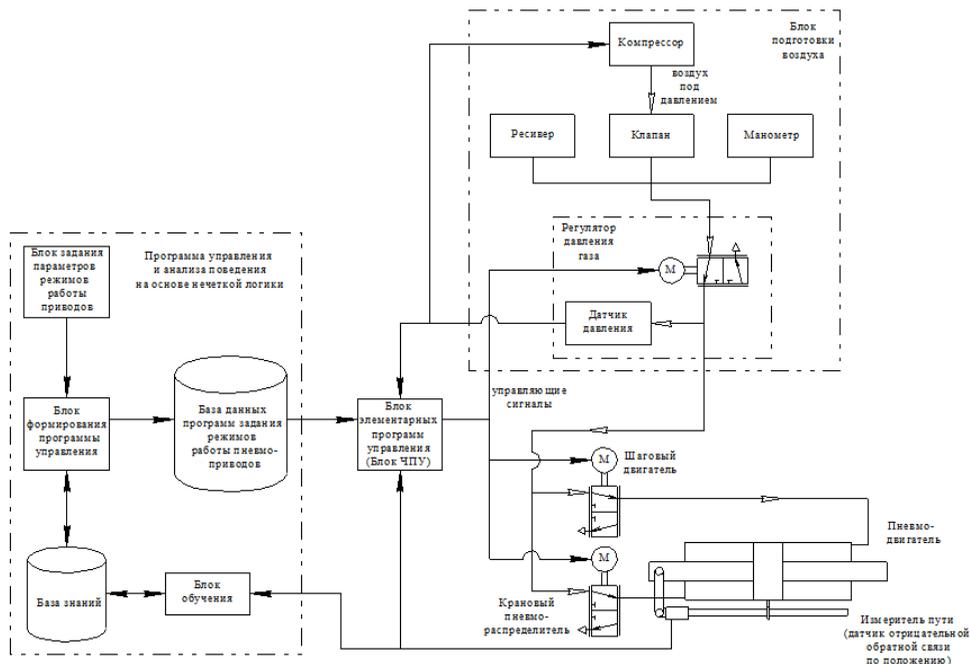


Рис. 4 - Структурная схема системы управления пневматического привода.

Разработано устройство управления – крановый пневмораспределитель (Патент RU 158927 U1. 2016 бюл.№2) (Рис.5). Устройство управления содержит: 1 – электрический шаговый двигатель; 2 – поворотный золотник – кран; 3 – рабочее окно, необходимого профиля сечения; 4 – корпус; 5 – магнитожидкостное уплотнение.

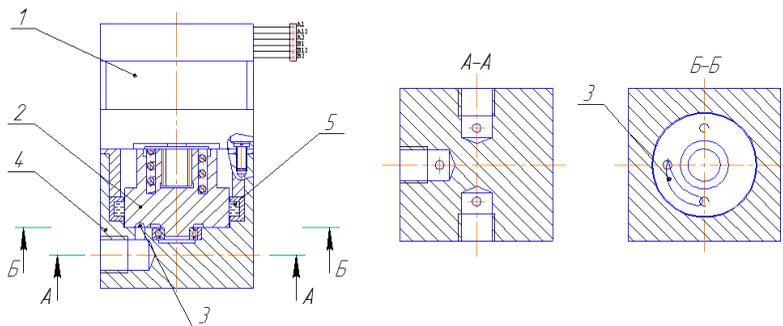


Рис.5 - Крановый пневмораспределитель.

При подаче управляющего воздействия шаговый двигатель 1 вращает соединенный на его вал кран 2. В кране имеется коммутационное рабочее окно 3, соединяющее в зависимости от положения крана напорный, рабочий и сливной каналы в корпусе 4. Форма рабочего окна и угол поворота шагового двигателя позволяют дросселировать поток газа. При соединении напорного и рабочего каналов происходит движение соответствующего пневмодвигателя. Для исключения утечек применено магнитожидкостное уплотнение.

Шаговый двигатель как объект управления описывается дифференциальным уравнением:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + D \frac{d\varphi}{dt} + i_A^2 nL \sin 2n\varphi + i_B^2 nL \sin 2n(\varphi - \lambda) + 2i_A i_B nM \sin 2n\left(\varphi - \frac{\lambda}{2}\right) = 0, \quad (2)$$

где J – момент инерции ротора; D – коэффициент вязкого трения, который учитывает наличие воздуха и трения; L – индуктивность ротора; M – взаимная индуктивность; n – число пар полюсов шагового двигателя; i_A – ток в обмотке А; i_B – ток в обмотке В; λ – угол между обмотками статора; φ – угловое положение ротора; U – напряжение источника питания;

После линеаризации, задания начальных условий $\delta\varphi = \varphi_i$ и $d(\delta\varphi)/dt = 0$ и преобразований Лапласа $d/dt = s$ и $d^2/dt^2 = s^2$ получим решение уравнения (1) – угол поворота ротора:

$$\varphi(s) = \frac{\left[s^2 + \left(\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right) s + \frac{r}{L_v} \cdot \frac{D}{J} + k_n \cdot \omega^2 \right] \cdot \varphi_i}{s^3 + \left(\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right) s^2 + \left(\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} + \omega^2 (1 + k_v) \right) s + \left(\frac{r}{L_v} \right) \omega^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } k_n = \frac{n \cdot \Phi_M \sin^2\left(\frac{n\lambda}{2}\right)}{(L - M) \cdot I_0 \cdot \cos\left(\frac{n\lambda}{2}\right)}; \quad r - \text{сопротивление цепи обмотки статора; } I_0 -$$

амплитудное значение тока питания обмоток статора; Φ_M – значение потокосцепления; $L_v = L_0 + L \cos n\lambda - M + M_0$ – общая индуктивность двигателя;

$$k_v = \frac{2L^2 \sin^2 n\lambda}{L_v (M + L \cos n\lambda)}; \quad L_0 - \text{индуктивность обмоток статора; } M_0 - \text{взаимная индуктивность}$$

обмоток статора.

Уравнение движения штока пневмодвигателя

$$m_{np} \frac{d^2V}{dt^2} = p_1 \cdot S_1 - p_2 \cdot S_2 - F_{вн.н} - \Lambda \cdot \beta \cdot V - F_{mp} \cdot \text{sign}(V), \quad (4)$$

где S_1, S_2 – соответственно эффективная площадь штоковой левой и штоковой правой полостей пневмоцилиндра; p_1, p_2 – давление воздуха соответственно в правой штоковой и левой штоковой полости пневмоцилиндра; V – скорость движения перемещаемой массы газа; Λ – коэффициент вязкостного трения; β – коэффициент сжимаемости воздуха; F_{mp} – суммарная сила трения в подвижных соединениях; $F_{вн.н}$ – внешняя нагрузка; m_{np} – приведенная масса подвижных частей привода.

Согласно математической модели, была разработана методика расчета основных параметров кранового пневмораспределителя с приводом от шагового электрического двигателя. Алгоритм расчета представлен на рисунке 6 в виде блок-схемы основных этапов расчета технологических параметров.

Входными данными (блок 1) для расчета являются:

а. Для расчета параметров необходимого электрического шагового двигателя: L_A - собственная индуктивность фазы А; L_B - собственная индуктивность фазы В; L - индуктивность ротора; I_0 - ток питания обмоток статора; M - взаимная индуктивность; n - число пар полюсов шагового двигателя; i_A - ток в обмотке А; i_B - ток в обмотке В; J - момент инерции ротора; λ - угол между обмотками статора; φ - угловое положение ротора; U - напряжение источника питания; D - коэффициент вязкого трения;

б. Для расчета пневмораспределителя: P - давление газа; μ - коэффициент расхода через пневмораспределитель; ψ - функция, зависящая от режима течения газа; f - площадь открытия окна со стороны впускного канала; T - температура газа; m - масса подвижных частей пневмораспределителя.

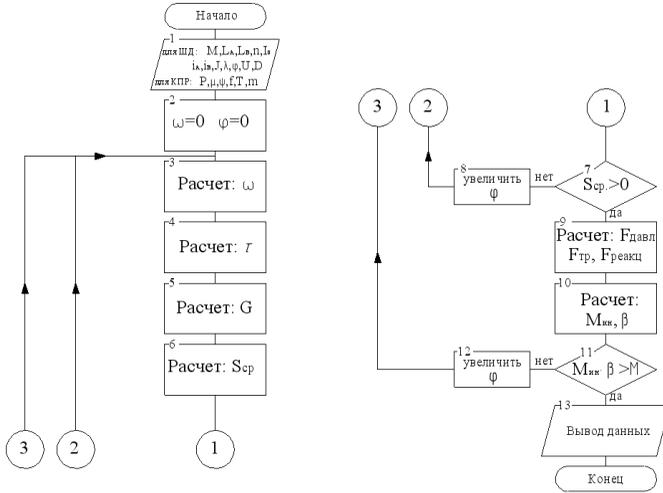


Рис. 6 - Алгоритм расчета параметров кранового пневмораспределителя с приводом от шагового электрического двигателя.

В процессе расчета вычисляются: электромагнитный момент электрического шагового двигателя (блок 3), угловое перемещение ротора шагового двигателя (блок 4), массовый расход газа через КПР (блок 5), параметр «время-сечение» (блок 6), а также объективные физические силы, влияющие на движение КПР (блоки 9,11).

Третья глава посвящена разработке и исследованию системы управления с применением программного слежения за положением пневмоприводов на основе нечеткой логики. Разработка системы управления на основе нечеткой логики включает несколько этапов.

В начале экспертным путем задаются режимы работы – типовые операции работы пневмопривода на основе элементарных программ управления и формируются изменения параметров во времени.

Следующий этап включает получение множества экспериментальных данных параметров (L , α_1 , α_2) работы привода в соответствии с технологическим процессом по перемещению деталей массой 0,1 кг (табл.1).

На четвертом этапе проводится фазсификация, то есть преобразование четких экспериментальных значений входных переменных в нечеткие с использованием лингвистического описания параметров (L , α_1 , α_2).

Построение систем нечеткого вывода основано на понятии лингвистической переменной:

$$\langle X, U, FL(x), Stx(x), Sem(x) \rangle, \quad (5)$$

где X – название конкретного параметра (L, α_1, α_2); U – базовое множество диапазона значений параметров L, α_1, α_2 ; $FL(x)$ – нечеткие метки; $Stx(x)$ – синтаксические правила формирования команд управления; $Sem(x)$ – семантические множества, показывающие отношения лингвистических переменных друг на друга. Лингвистические переменные: L – линейная длина измерительного элемента, - волновода, датчика измерителя пути. Разбиваем показания L на нечеткие метки – 21 точку (0; 0,01; 0,02; 0,03; ...; 0,2 м), α_1, α_2 – углы поворота шаговых двигателей КПП рассматриваемого привода.

Таблица 1. Таблица параметров L, α_1, α_2 .

$L, м$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2
$\alpha_1, град$	12,5	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5
$\alpha_2, град$	0	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5

Связь между базовым множеством параметров и нечеткими метками осуществляется при помощи функций принадлежности. Совместное рассмотрение лингвистических переменных L, α_1, α_2 лучше всего описывается треугольными (для L) и гауссовыми (для α_1, α_2) функциями принадлежности.

Далее, на основе лингвистических переменных формируем нечеткие фреймы управления: ЕСЛИ L ТО α_1 И α_2 .

На основе полученных фреймов формируется база знаний:

ЕСЛИ $L_{\text{низ}}$ ТО $\alpha_{1\text{выс}}$ И $\alpha_{2\text{низ}}$.

ЕСЛИ $L_{\text{ниже сред}}$ ТО $\alpha_{1\text{выше сред}}$ И $\alpha_{2\text{ниже сред}}$.

ЕСЛИ $L_{\text{сред}}$ ТО $\alpha_{1\text{сред}}$ И $\alpha_{2\text{сред}}$.

ЕСЛИ $L_{\text{выше сред}}$ ТО $\alpha_{1\text{ниже сред}}$ И $\alpha_{2\text{выше сред}}$.

ЕСЛИ $L_{\text{выс}}$ ТО $\alpha_{1\text{низ}}$ И $\alpha_{2\text{высок}}$.

С их помощью получаем приближенный нечеткий результат. На рис.7 приведено окно визуализации нечеткого логического вывода.

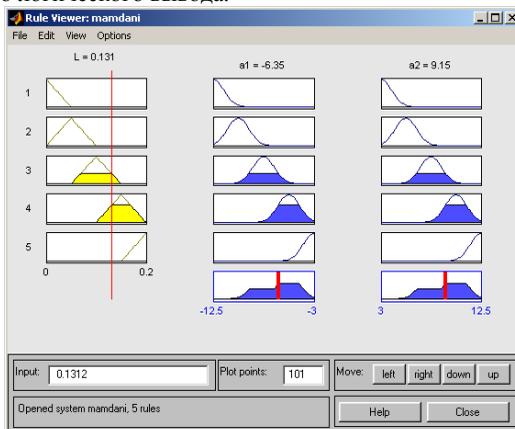


Рис. 7 – Визуализация нечеткого логического вывода в среде Matlab.

Заключительный этап – дефаззификация, то есть приведение нечетких фреймов управления к реальному управляющим командам, которые записываются и хранятся в БД. Проведем дефаззификацию по методу Мамдани.

Выходная переменная относительно одной лингвистической переменной определяется:

$$y_{x_i} = \sum a_i \cdot \mu_{x_i}(a_i), \quad (8)$$

где x - четкое значение переменной A ; y_{x_i} - выходная переменная y относительно лингвистической переменной A ; a_{x_i} - нечеткие метки, принадлежащие лингвистической переменной A ; $\mu_x(a_{x_i})$ - принадлежность переменной x к соответствующей нечеткой метке.

Тогда выходные данные для α_1, α_2 , запишем

$$\begin{cases} y_{\alpha 1} = \sum a_{\alpha 1} \cdot \mu_{\alpha 1}(a_{\alpha 1}) \\ y_{\alpha 2} = \sum a_{\alpha 2} \cdot \mu_{\alpha 2}(a_{\alpha 2}) \end{cases}, \quad (9)$$

или:

$$\begin{cases} y_{\alpha 1} = a_{\alpha 1 \text{ выс.}} \cdot \mu_{\alpha 1 \text{ выс.}} + a_{\alpha 1 \text{ выше сред.}} \cdot \mu_{\alpha 1 \text{ выше сред.}} + a_{\alpha 1 \text{ сред.}} \cdot \mu_{\alpha 1 \text{ сред.}} + \\ + a_{\alpha 1 \text{ ниже сред.}} \cdot \mu_{\alpha 1 \text{ ниже сред.}} + a_{\alpha 1 \text{ низ.}} \cdot \mu_{\alpha 1 \text{ низ.}} \\ y_{\alpha 2} = a_{\alpha 2 \text{ выс.}} \cdot \mu_{\alpha 2 \text{ выс.}} + a_{\alpha 2 \text{ выше сред.}} \cdot \mu_{\alpha 2 \text{ выше сред.}} + a_{\alpha 2 \text{ сред.}} \cdot \mu_{\alpha 2 \text{ сред.}} + \\ + a_{\alpha 2 \text{ ниже сред.}} \cdot \mu_{\alpha 2 \text{ ниже сред.}} + a_{\alpha 2 \text{ низ.}} \cdot \mu_{\alpha 2 \text{ низ.}} \end{cases}. \quad (10)$$

Таким образом, четкий вывод будет рассчитываться как сумма произведений переменных с добавлением дополнительной метки направления:

$$y = \sum_{i=1}^n y_{x_i} \cdot \text{sign}(y), \quad (11)$$

где y – четкое выходное значение; y_{x_i} – выходная переменная относительно соответствующей лингвистической переменной; n – количество лингвистических переменных; $\text{sign}(y)$ – метка сигнатуры направления движения, определяется по приращению относительно двух точек пройденных пневмодвигателем.

Метка сигнатуры направления необходима для преодоления точки равновесия α_1 и α_2 , а также она применяется для записи сопутствующих физических данных.

В дальнейшем значение y учитывается в командах управления.

Четвертая глава посвящена имитационным и экспериментальным исследованиям системы управления пневмоприводом на основе нечеткой логики с применением крановых пневматических распределителей с приводом от электрических шаговых двигателей, исследованиям процесса позиционирования, параметров быстродействия и точности позиционирования и проверки адекватности теоретических исследований.

Имитационная модель пневматического привода, имеющего крановый пневмораспределитель с приводом от электрического шагового двигателя, представлена на рисунке 8.

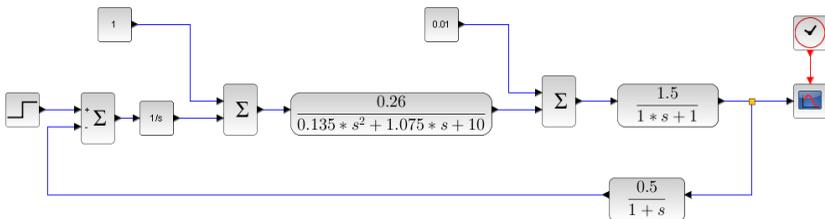


Рис. 8 - Структурная схема имитационной модели работы пневмопривода.

Блоки функций содержат коэффициенты полиномов передаточных функций, составленных согласно дифференциальному уравнению, описывающему режимы работы составных элементов пневматического привода.

Управляющее воздействие задает закон изменения положения электрического шагового двигателя, который в свою очередь регулирует степень открытия рабочих окон КПП. Кроме того, можно выделить влияние давления воздуха на работу системы, и влияние закона изменения нагрузки на элементы привода.

После задания параметров интегрирования и проведения расчета, получили переходную характеристику работы привода пневматического привода по перемещению груза на расстояние 0,2м (рис. 9).

Показатели качества САУ определяются по переходным характеристикам ее подсистем.

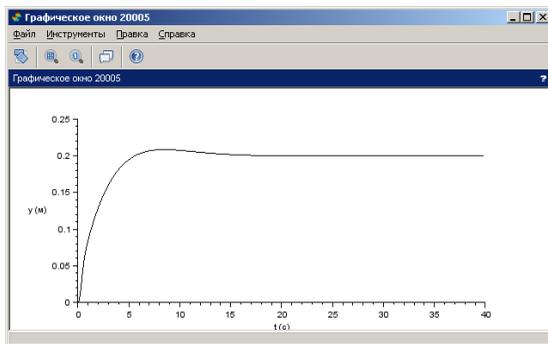


Рис. 9 - График переходного процесса выдвигания пневмодвигателя, полученный по программе расчета имитационной модели.

Состоятельность системы управления проверена в ходе практических экспериментов. В качестве основы для экспериментальной установки был взят пневматический промышленный робот МП-9С.

Эксперимент по определению точности заключался в тесте повторяемости точки – многократное повторение операции по передвижению разновесных деталей и заготовок (каждые массой 0,1кг), при различном выдвигании пневмоцилиндров: одна треть от максимального хода выдвигания, половина и максимальная длина выдвигания пневмоцилиндров. Эти показатели выдвигания пневмоцилиндров достигались за счет программного регулирования электрических шаговых двигателей крановых пневмораспределителей. Результаты измерения анализируются как диапазон отклонения от среднего значения положений точки.

Процесс управления шаговым двигателем КПП позволяет регулировать открытие окон КПП, а значит и работу пневмодвигателей. Поэтому, по полученным данным о характере работы ПЦ возможно графически показать диапазон открытия окон КПП. На рисунках 10 и 11 показаны характеристики открытия КПП, где $y(m)$ – перемещение выходного звена робота (пневмоцилиндра руки), $t(c)$ – время переходного процесса.

Характеристики на рисунке 10 показывают переходные процессы работы управляющего кранового пневмораспределителя пневмоцилиндра выдвигания-втягивания руки робота, при рабочем давлении 4атм., 1 – имитационная расчетная характеристика, полученная имитационным моделированием; 2 – характеристика при среднем открытии окна пневмораспределителя; 3 – характеристика при минимальном открытии окна пневмораспределителя; 4 – экспериментальная характеристика, при максимальном

открытии и совмещении окон пневмораспределителя; 5 – экспериментальная характеристика работы золотникового пневмораспределителя (ЗПР).

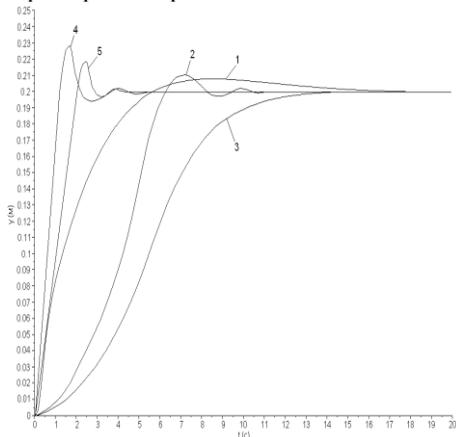


Рис. 10 - Переходные характеристики, полученные по результатам расчетных (1) и экспериментальных исследований (2-5) работы пневмоцилиндра выдвигения-втягивания руки экспериментальной установки (робота) при номинальном рабочем давлении 4атм..

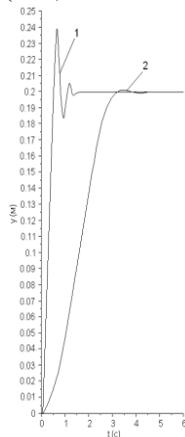


Рис. 11 - График изменения экспериментально полученных переходных характеристик с нагрузкой 0,1кг при максимально допустимом давлении 10 атм.: 1 - максимальное открытие окон распределителя; 2 - минимальное открытие окон распределителя.

Характеристика 4, в отличие от характеристики 1, показывает нелинейные динамические составляющие, которые сложно учесть в математической модели. Такое совмещение характеристик дает представление о точности моделирования. Для проверки адекватности полученных данных применили сравнение осредненной экспериментальной переходной характеристики с характеристикой, полученной в результате имитации, с погрешностью не более 12,3%.

Аналогом предлагаемой системы регулирования и распределения является золотниковый пневмораспределитель. Золотниковое распределение нашло широкое применение в технике в качестве регулирующей аппаратуры для гидравлических и пневматических систем. Однако в отличие от предлагаемой системы, золотниковые распределители имеют два положения работы: закрытое или открытое. Такой режим работы обусловлен тем, что в качестве рабочего привода в них применяются электромагниты с механическими пружинами. При подаче тока на электромагнит, золотник меняет положение, то есть открывается. Соответственно рабочая среда направляется в нужные полости пневмодвигателя. При отключении подачи электрического тока на электромагнит золотник возвращается в первоначальное закрытое положение с помощью механической пружины.

Применение КПП с управлением от шагового электрического двигателя позволяет осуществить управляемое дросселирование потока. Тем самым возможно регулирование режимов работы приводов. А также возможно плавное торможение привода в промежуточных положениях рабочего органа.

Оценка работы пневмоприводов проводилась сравнением быстродействия КПП и ЗПР (характеристики 4 и 5 на рисунке 10). При сравнении видно, что КПП срабатывает быстрее, чем ЗПР, разница составляет 16,7%.

Быстродействие пневматических приводов зависит от нескольких факторов: угла поворота распределителя, от которого зависит параметр «время-сечение» (S), а соответственно приемлемый массовый расход газа (G), рабочего давления (p) в системе, массы приводов ($m_{пр.}$) и переносимой полезной нагрузки ($m_{нагр.}$).

В таблице 2, в качестве примера, представлены рабочие параметры крановых пневмораспределителей, управляющих механизмом выдвигания-втягивания руки привода. переносимой полезной нагрузкой 0,1кг.

Табл. 2. Параметры КПП, управляющих механизмом выдвигания-втягивания руки привода.

p , атм	1	2	3	4	5	6	7	8	10
G , кг/с	0,025	0,05	0,075	0,101	0,125	0,151	0,175	0,2	0,23
t , с	1,57	1,53	1,52	1,5	1,49	1,48	1,47	1,45	1
$S_s \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	2,446	2,22	1,996	1,771	1,48	1,245	1,021	0,885	0,86
$m_{пр.}$, кг	3								

Считается, что пневматический привод является грубым по точности работы и обычно к его работе не предъявляется требование по плавности торможения. Повысить точность и плавность работы такого привода позволяет управляемое дросселирование потока воздуха и использование дополнительных технических средств: контроллеров и датчиков положения, работающих по принципу магнитострикции.

Оценка точности позиционирования проводилась для КПП при многократном повторении движения нагруженного привода. В эксперименте за контрольную точку была взята половина диапазона движения пневмопривода руки экспериментального робота (координата у рабочего пространства робота). В показаниях датчика середина диапазона перемещения руки привода соответствует 124,05мм, начальный показатель датчика 48,8мм и конечный показатель максимального выдвигания составляет 199,3мм. В ходе каждой серии эксперимента проведено 100 повторений движения нагруженного привода руки робота.

По экспериментальным данным видно, что точность позиционирования рабочего органа пневматическим приводом удовлетворительна и соответствует среднеквадратической погрешности 0,138 мм. Аппроксимирующая прямая на рисунке 12, указывает на определенную тенденцию в динамике работы выходного звена. Тренд вызван объективным физическим фактором – температурным расширением звеньев кинематической цепи робота. Компенсировать это явление можно, введя в программу работы поправку, изменяющую число шагов поворота управляющего шагового двигателя КПП. Но если данная вносимая поправка будет сильно влиять на быстродействие, то возможно небольшое повышение рабочего давления воздуха в системе.

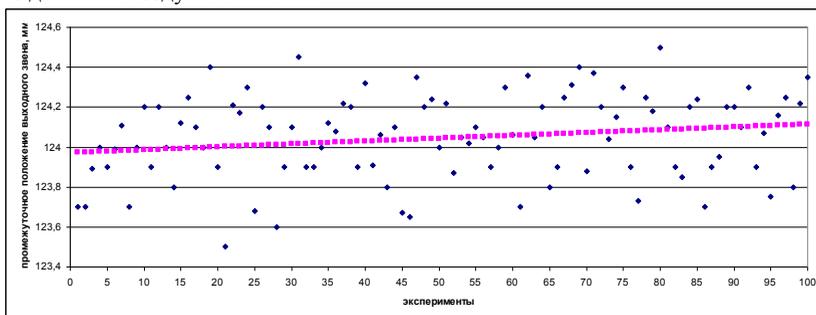


Рис. 12 - Диаграмма рассеяния значений, полученных в результате эксперимента по оценке точности позиционирования пневматического привода при программном значении позиции на отметке 124,05мм.

Точность можно повысить путем создания противодействия в оппозитной полости пневмодвигателя, но в этом случае скорость движения рабочего органа привода снижается, и достижение нужной точки позиционирования в промежуточном положении занимает на 12-15% больше времени.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана система управления пневматическим приводом, включающая устройство управления – крановый пневмораспределитель, имеющий в качестве привода электрический шаговый двигатель, и программу управления им на основе нечеткой логики;

2. Разработана методика расчета параметров устройства управления - кранового пневматического распределителя и проведены расчетные исследования характеристик кранового пневмораспределителя с приводом от электрического шагового двигателя;

3. Создана и испытана натурная модель кранового пневмораспределителя с приводом от электрического шагового двигателя (Патент RU 158927 U1. 2016 бюл.№2). Испытания подтвердили работоспособность модели; создан регулятор давления рабочего газа кранового типа с приводом от электрического шагового двигателя и обратной связью через датчик давления пьезоэлектрического типа;

4. Разработана экспериментальная установка на базе пневматического робота МП-9С с применением предлагаемой системы управления, и проведены экспериментальные исследования ее динамических характеристик; среднеквадратическая погрешность позиционирования рабочего органа при рабочей нагрузке 0,1кг составила не более 0,1%;

5. Проведен сопоставительный анализ данных имитационных и экспериментальных исследований, максимальное отклонение полученных характеристик составило 12,3%;

6. Проведено сравнительное исследование с существующим аналогом, показавшее, что, при использовании предлагаемой системы управления и в зависимости от заданной программы работы, повышается быстродействие при достижении конечных положений пневмодвигателей, возможна регулировка скорости, а также позиционирование рабочего органа привода в промежуточных положениях за счет программного управления шаговым двигателем; установлено, что быстродействие предложенной системы управления выше на 16,7% по сравнению с системой с использованием ЗПР.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Хазиев Э.Л., Дмитриев С.В. «Золотниковый газораспределительный механизм двигателя внутреннего сгорания с приводом от шагового двигателя». "Сборка в машиностроении, приборостроении". Изд-во Машиностроение. Москва №2 – 2009г. 18-21стр.

2. Хазиев Э. Л. Математическое моделирование системы управления пневматического манипулятора промышленного робота/ Хазиев Э.Л.// «Научно-технический вестник Поволжья» -2011. Вып. №3. – с.173-177.

3. Хазиев Э. Л. Система управления пневматическим промышленным роботом/ Хазиев Э.Л.// «Научно-технический вестник Поволжья» -2012. Вып. №4. – с.216-222.

4. Хазиев Э. Л. Расчет основных параметров кранового пневмораспределителя промышленного робота/ Хазиев Э.Л.// «Научно-технический вестник Поволжья» -2012. Вып. №4. – с.223-226.

5. Хазиев Э.Л., Хазиев М.Л. Система управления пневматическим роботом на основе нечеткой логики // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3 (часть 1) – С. 74-78;; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35695>

6. Хазиев Э.Л., Хазиев М.Л. Нечеткое управление пневмоприводом подачи фрезерно-расточного станка с применением спецификации XML // "Современные наукоемкие

Научные статьи и материалы докладов:

7. Хазиев Э. Л., Дмитриев С.В. «Влияние охлаждения золотникового газораспределительного механизма на экологические показатели двигателя внутреннего сгорания». // «Глобальные проблемы экологизации в европейском сообществе: Сб. научных трудов Международной конференции, Международного информационно-экологического парламента» – Казань, (28-29 сентября 2006.)

8. Хазиев Э. Л., Дмитриев С.В. «Золотниковый газораспределительный механизм двигателя внутреннего сгорания с принудительным охлаждением» // «Проектирование и исследование технических систем. Межвузовский научный сборник». Выпуск 11. – Набережные Челны: ИНЭКА - 2007г.

9. Хазиев Э. Л., Дмитриев С.В. «Золотниковый газораспределительный механизм двигателя внутреннего сгорания с приводом от шагового двигателя» // «Проектирование и исследование технических систем. Межвузовский научный сборник». Выпуск 11. – Набережные Челны: ИНЭКА - 2007г.

10. Хазиев Э. Л. «Параметры состояния рабочего тела в процессе газообмена двигателя внутреннего сгорания с использованием золотникового газораспределительного механизма» // «Проектирование и исследование технических систем. Межвузовский научный сборник». Выпуск 12. – Набережные Челны: Изд-во ИНЭКА 2008 г.

11. Хазиев Э.Л. «Система управления пневматическим роботом» // Материалы Международной научно-технической конференции "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2013"(МНТК "ИМТОМ-2013") и Форума "Повышение конкурентоспособности и энергоэффективности машиностроительных предприятий в условиях ВТО". Ч.2. - Казань, Изд-во "Фолиант" 2013. - 108-111стр.

12. Хазиев Э.Л. «Имитационное моделирование работы пневматического промышленного робота» // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров (ИТАП - 2014)» - сборник трудов / ред.кол. Симонова Л.А. [и др.]; под. ред. Симоновой Л.А., Савицкого С.К. – Набережные Челны: Изд-во Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 2014. - 230 – 238стр.