



На правах рукописи

Лунева Марина Юрьевна

**Метод, алгоритм и устройство нечеткой фильтрации для управления
позиционированием звеньев робота-манипулятора**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и
систем управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск-2020

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре вычислительной техники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бобырь Максим Владимирович

Официальные оппоненты: **Мещеряков Роман Валерьевич**
доктор технических наук, профессор РАН,
Институт проблем управления им. В. А.
Трапезникова Российской академии наук,
главный научный сотрудник (г. Москва)

Захаров Алексей Александрович
кандидат технических наук, доцент,
Муромский институт (филиал)
Владимирского государственного
университета имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых, кафедра систем
автоматизированного проектирования,
ведущий научный сотрудник (г. Муром)

Ведущая организация: **Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород**

Защита диссертации состоится «4» марта 2021 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.02, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, по адресу: 305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/fbb/Dissertatsiya-Luneva-Marina-YUrevna.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь

диссертационного совета



Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Актуальным научным и практическим направлением развития средств вычислительной техники и систем управления является разработка методов, алгоритмов и специализированных устройств, обеспечивающих точность позиционирования механизмов роботов-манипуляторов. К одному из таких устройств относится цифровой фильтр, который представляет собой вычислительное устройство, реализованное на программном или аппаратном уровне и предназначенное для обработки выходного сигнала по определенному алгоритму с целью компенсации шумов, возникающих в процессе работы устройства.

В настоящее время широко применяются роботы-манипуляторы, использующиеся, например, для систем управления процессом движения, охлаждения изделий, выполнения нейрохирургических операций и т.д., управление которыми осуществляет оператор-специалист, в своей области знаний. Одним из основных элементов, через который происходит взаимодействие человека с роботом, являются переменные резисторы. В процессе работы переменных резисторов вследствие динамического взаимодействия двух контактирующих поверхностей – резистивного элемента и подвижного контакта возникают шумы скольжения, которые вызывают хаотическое изменение выходного сигнала. Шум скольжения обусловлен термоэлектрическим эффектом, который возникает в точках соприкосновения двух разных металлов. Это приводит к тому, что в процессе работы робота-манипулятора наблюдается прерывистое движение его механизмов.

Базовым алгоритмом, позволяющим устранить шумы скольжения переменных резисторов, является алгоритм фильтрации Калмана. Данный алгоритм состоит из двух этапов. Этап экстраполяции, на котором осуществляется предсказание состояния системы на следующем шаге ее работы и этап корректировки системы, на котором определенные по специализированному алгоритму коэффициенты регулирования изменяют состояние системы на выходе фильтра Калмана. Для работы в условиях неопределенности и неточности исходных данных применяются нечеткие фильтры Калмана. Оптимальная работа этих двух фильтров требует точный подбор коэффициентов регулирования. Однако настройка коэффициентов фильтра Калмана и его нечеткого аналога вызывает сложность, поскольку необходимо провести ряд экспериментов, связанных с предсказаниями состояния системы на определенном шаге, и определить статистические переменные, которые используются для его работы, что требует дополнительного времени на его настройку.

Степень разработанности проблемы. Исследованием фильтров Калмана занимались как российские, так и зарубежные ученые: Елисеев А.В., Шахтарин Б. И., Yongjin K., Gangqi D., Akos O., исследованием нечетких фильтров Калмана занимались такие ученые, как Пучков А.Ю. Дли М.И., Matía F., Kuang S.-R.. Работы, представленных ученых не рассматривают работу таких механизмов, как - использование фильтрации в системе управления роботов-манипуляторов для стабилизации перемещения его звеньев, а так же не освещают методику по расчету суппорта выходной переменной, методику нахождения коэффициентов регулирования устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, методику расчета выходного напряжения и преобразования его в угол поворота

сервопривода, для перемещения звеньев робота-манипулятора, что в совокупности не позволяет стабилизировать их работу.

Одним из вариантов сокращения времени при выполнении вычислительных операций является разработка устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения. Под устройством нечеткой фильтрации шумов скольжения подразумевается устройство, реализующее сглаживание выходного сигнала на основе нечеткой модели, позволяющее сократить количество вычислительных операций, за счет чего увеличивается быстродействие процесса сглаживания выходного сигнала при обеспечении заданной точности. Нечеткая логика позволяет осуществить автоматическую настройку параметров выходной функции принадлежности, за счет чего сокращается время на обработку информации.

Изложенное выше указывает на актуальность поставленной научно-технической задачи разработки метода, алгоритма и устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения для управления позиционированием механизмов робота-манипулятора.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках грантов Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МД-707.2017.8 (Исследование, разработка и моделирование методов мягкого управления робототехническими комплексами на основе адаптивных нейро-нечетких обучающих систем) и № МД-2983.2015.8 (Разработка и исследование теоретических основ, методов адаптивного нейро-нечеткого управления сложными техническими системами на основе мягких вычислений), а также Госзадания № 0851-2020-0032 (Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем).

Цель диссертационной работы – повышение точности и сокращение времени работы устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов в системе управления позиционированием механизмов робота-манипулятора.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **основные задачи**:

1. Анализ современных цифровых фильтров с целью обоснования выбранного направления исследования.
2. Разработка обобщенной математической модели нечеткой фильтрации шумов скольжения для управления позиционированием звеньев робота-манипулятора.
3. Создание метода и алгоритма работы устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, для управления позиционированием звеньев робота-манипулятора.
4. Реализация структурно-функциональной схемы устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов.

Объект исследования: устройство нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов.

Предмет исследования: вычислительные процессы преобразования информации в структуре устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теория нечеткой логики и множеств, методы математического моделирования, вычислительной математики и статистики, основы теории построения алгоритмов,

регрессионный анализ, а также теория проектирования вычислительных устройств и ЭВМ.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная математическая модель нечеткой фильтрации, включающая математическую модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной и математическую модель расчета выходного напряжения, отличающаяся тем, что для обеспечения условия полноты базы правил, выходная функция принадлежности строится в автоматическом режиме, позволяет повысить точность устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов.

2. Метод нечеткой фильтрации шумов скольжения, отличающийся тем, что коэффициенты регулирования устройства нечеткой фильтрации вычисляются на основе быстродействующего дефазификатора, позволяет увеличить скорость обработки операций в нечетком фильтре за счет сокращения числа вычислительных процедур.

3. Алгоритм нечеткой фильтрации шумов скольжения в задаче управления механизмами работа-манипулятора, отличающийся тем, что для вычисления коэффициентов регулирования нечеткого фильтра используется композиция минимаксной импликации и метода отношения площадей, позволяет минимизировать корень из среднеквадратической ошибки нечеткого фильтра.

4. Структурно-функциональная схема устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов, отличающаяся совокупностью последовательности выполнения вычислительных операций метода нечеткой фильтрации, позволяет сгладить шумы скольжения переменных резисторов и обеспечить аддитивность нечеткой модели принятия решений.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработан способ обработки нечеткой информации (Пат. РФ №2709125), позволяющий сократить время этапа дефазификации в структуре нечеткого вывода в 2 раза.

2. Создана программа для ЭВМ «Программа для синтеза нечеткого контроллера на базе ПЛИС и ЦАП и выводом результата на LCD дисплей» № 2019611202, позволяющая сократить время нечеткой фильтрации в 2 раза.

3. Разработана программа для ЭВМ «Программа для управления роботом-манипулятором» № 2017661425, позволяющая повысить точность позиционирования механизмов работа-манипулятора на 30%.

Реализация результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО НПО «Кабельные сети» в условиях опытно-промышленных испытаний устройства нечеткой фильтрации для работа-манипулятора.

Предложенные алгоритм, метод и устройство нечеткой фильтрации шумов скольжения используются в образовательном процессе кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета в рамках дисциплин «Интеллектуальные системы» и «Теория нечеткой логики и множеств», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Соответствие паспорту специальности.

Согласно паспорту специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1 и 2 паспорта специальности. 1. Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и

устройств вычислительной техники и систем управления, а именно разработано устройство нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов в системе управления роботом-манипулятором, позволяющее устранять шумы скольжения переменных резисторов и улучшить точность позиционирования звеньев робота-манипулятора. 2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях, с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик, а именно: разработаны метод и алгоритм работы устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения; проведен анализ и экспериментальное исследование вычислительного процесса преобразования информации в структуре нечеткого фильтра, доказывающие эффективность его использования.

Апробация результатов исследования. Диссертационная работа отражает результаты научных исследований, проводимых с 2016 по 2020 годы.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 21 международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Молодежь и новые информационные технологии» (г. Череповец, 2016), «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание» (г. Курск, 2017, 2018, 2019), «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, 2017), «Инноватика» (г. Томск, 2017), «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (г. Москва, 2017, 2019), «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2018), «Будущее науки» (г. Курск, 2017), «Мехатроника, автоматика и робототехника» (г. Новокузнецк, 2017), «Новые информационные технологии и системы» (г. Пенза, 2016, 2019), «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (г. Севастополь, 2017), «Интеллектуальные и информационные системы» (г. Тула, 2017), «Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы» (г. Курск, 2018), «МКПУ-2019» (г. Геленджик, 2019), «Интеллектуальные информационные технологии и интеллектуальный бизнес» (г. Вологда, 2020), «Современные информационные технологии. Теория и практика» (г. Череповец, 2020), «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (г. Брянск, 2020), а также на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета (г. Курск, 2016-2020 гг.).

Личный вклад автора. Выносимые на защиту научные положения разработаны соискателем лично. В научных работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: разработка устройства нечеткой фильтрации [2, 4, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 17], разработка алгоритма работы устройства нечеткой фильтрации [1, 6, 7, 9, 12, 20], разработка быстродействующего дефазификатора на основе метода отношения площадей, использующегося в нечетком устройстве сглаживания шумов скольжения переменных резисторов [3, 5, 18, 19].

Публикации. По теме диссертации опубликованы 21 научная работа, в том числе 5 статей в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 3 работы, входящие в международную базу данных Scopus, 1 глава в монографии,

получен 1 патент РФ на изобретение и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и приложений. Диссертационное исследование изложено на 134 страницах машинописного текста и содержит 46 рисунков, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются область исследования, цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы. Также выделяются основные положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации и общей структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих цифровых фильтров, рассмотрены факторы, влияющие на точность позиционирования звеньев роботоманипулятора и методы повышения точности, представлена классификация систем управления роботами-манипуляторами, проведен анализ существующих роботоманипуляторов (рисунок 1). В большинстве случаев точность позиционирования зависит от шумов, возникающих в процессе работы переменных резисторов. Решением данной проблемы является использование устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения. В существующих цифровых фильтрах, таких как фильтр Калмана, нечеткий фильтр Калмана, для их оптимальной работы требуется дополнительное время на настройку их коэффициентов регулирования, за счет сбора статистических данных.



Рисунок 1 – Применение цифровых фильтров в системах управления

Разработка устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения переменных резисторов за счет применения нечеткой логики позволит определить коэффициенты регулирования фильтра.

Во второй главе разработана обобщенная математическая модель нечеткой фильтрации ($M_{НФ}$), метод нечеткой фильтрации шумов скольжения и алгоритм нечеткой фильтрации в задаче управления позиционированием звеньев роботоманипулятора.

$M_{НФ}$ в теоретико-множественном описании задается в виде кортежа по формуле (1):

$$M_{\text{НФ}} = \langle M_{\text{СНВП}}; M_{\text{РВН}} \rangle, \quad (1)$$

где $M_{\text{СНВП}}$ – математическая модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной, $M_{\text{РВН}}$ – математическая модель расчета выходного напряжения.

Математическая модель $M_{\text{СНВП}}$ (формула 2) позволяет находить минимальное $\alpha_{\text{мин}}$ и максимальное $\alpha_{\text{макс}}$ значения суппорта выходной нечеткой переменной α и включает следующие переменные:

$$M_{\text{СНВП}} = \langle \alpha_{\text{мин}}; \alpha_{\text{макс}}; \Delta\alpha_{\text{ср}}; \alpha_i \rangle, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{мин}}$, $\alpha_{\text{макс}}$ – минимальное и максимальное значения коэффициентов устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ – среднее значение суппорта нечеткой выходной переменной, α_i – метки выходной функции принадлежности.

Математическая модель $M_{\text{СНВП}}$ состоит из выполнения следующих операций:

1. Расчет коэффициента заполнения D по формуле (3):

$$D = \frac{T}{P}, \quad (3)$$

где T – длительность импульса; P – период следования импульса.

2. Расчет минимального и максимального коэффициента точности устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения $N_{\text{мин}}$ и $N_{\text{макс}}$ по формуле (4):

$$N_{\text{мин}} = 2.99 + \ln(U_{\text{вых}}); N_{\text{макс}} = 13.12 + \ln(U_{\text{вых}}), \quad (4)$$

где $U_{\text{вых}}$ – максимальный выходной сигнал на выходе микроконтроллера. Значения 2.99 и 13.12 получены экспериментально.

3. Расчет диапазона значений коэффициента устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения α формулам (5) и (6):

$$\alpha_{\text{мин}} = N_{\text{мин}} \cdot D; \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{макс}} = N_{\text{макс}} \cdot D. \quad (6)$$

На рисунке 2 представлен график функции принадлежности для нечеткой выходной переменной.

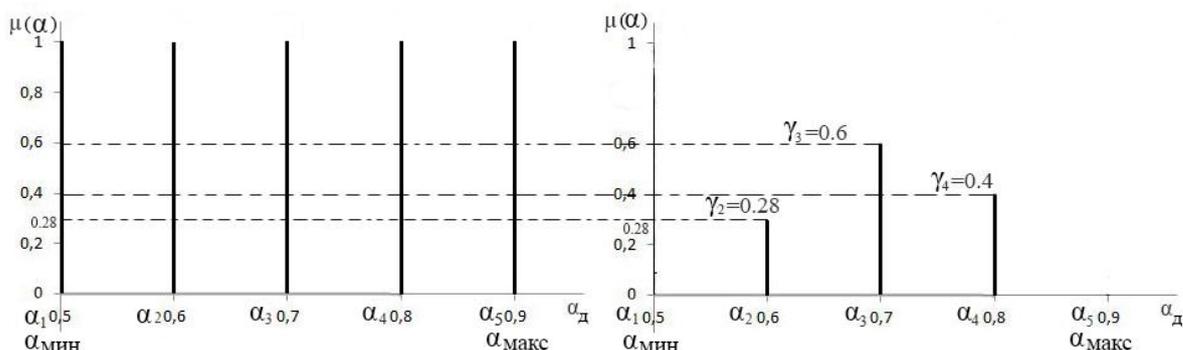


Рисунок 2 – График выходной функции принадлежности

4. Нахождение среднего значения суппорта нечеткой выходной переменной $\Delta\alpha_{\text{ср}}$ по формуле (7):

$$\Delta\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_{\text{макс}} - \alpha_{\text{мин}}}{4}. \quad (7)$$

5. Расчет меток выходной функции принадлежности по формуле (8) (рис. 2):

$$\alpha_i = n \cdot \Delta\alpha_{\text{ср}} + \alpha_{\text{мин}}; \quad (8)$$

где n – номер терма, $\alpha_i \in [0; 1]$.

С учетом формулы 8 расчет значений суппорта нечеткой выходной переменной для каждой из функций принадлежности примет вид:

$$\alpha_1 = \alpha_{\min}; \alpha_2 = \Delta\alpha + \alpha_{\min}; \alpha_3 = \Delta\alpha \cdot 2 + \alpha_{\min}; \alpha_4 = \Delta\alpha \cdot 3 + \alpha_{\min}; \alpha_5 = \alpha_{\max}.$$

Формулы 3-8 формируют математическую модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной $M_{\text{СНВП}}$. Новизна математической модели $M_{\text{СНВП}}$ заключается в том, что вычисляемый диапазон выходного значения напряжения пересчитывается в диапазон нечеткой переменной, что позволяет автоматически строить суппорт выходной функции принадлежности.

Математическая модель расчета выходного напряжения $M_{\text{РВН}}$ включает переменные, определенные по формуле (9):

$$M_{\text{РВН}} = \langle \Delta U_i; t_i; \alpha_d; \beta; U_\phi \rangle, \quad (9)$$

где ΔU_i - разница между текущим и предыдущим значениями напряжения, t_i - время поворота звеньев робота-манипулятора из минимального положения в максимальное, α_d , β - коэффициенты регулирования устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, U_ϕ - выходное напряжение, передаваемое на сервоприводы.

Математическая модель $M_{\text{РВН}}$:

1. Формирование степеней истинности входных переменных. Первая входная переменная ΔU_p - разница между текущим и предыдущим значениями напряжения, полученного от переменного резистора ΔU определяется по формуле (10):

$$\Delta U_p = U_t - U_n. \quad (10)$$

Первая входная переменная состоит из трех термов $\Delta U_p = (\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3)$, которые определяются по формуле (11) (рисунок 3, а).

$$\Delta U_1 = \begin{cases} \frac{b_u - \Delta U_p}{b_u - a_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U_p \leq b_u, \\ 0, & \text{если } \Delta U_p < a_u \text{ или } \Delta U_p > b_u. \end{cases} \quad \Delta U_2 = \begin{cases} \frac{\Delta U_p - a_u}{b_u - a_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U_p \leq b_u; \\ \frac{c_u - \Delta U_p}{c_u - b_u}, & \text{если } b_u < \Delta U_p \leq c_u, \\ 0, & \text{если } \Delta U_p < a_u \text{ или } \Delta U_p > c_u. \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta U_3 = \begin{cases} \frac{\Delta U_p - b_u}{c_u - b_u}, & \text{если } b_u \leq \Delta U_p \leq c_u. \\ 0, & \text{если } \Delta U_p < b_u \text{ или } \Delta U_p > c_u. \end{cases}$$

Вторая входная переменная - время поворота звеньев робота-манипулятора из минимального положения в максимальное t . Вторая входная переменная состоит из трех термов $t = (t_1, t_2, t_3)$, определяющихся по формуле (12) (рисунок 3, б).

$$t_1 = \begin{cases} \frac{b_t - t}{b_t - a_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t, \\ 0, & \text{если } t < a_t \text{ или } t > b_t. \end{cases} \quad t_2 = \begin{cases} \frac{t - a_t}{b_t - a_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ \frac{c_t - t}{c_t - b_t}, & \text{если } b_t < t \leq c_t, \\ 0, & \text{если } t < a_t \text{ или } t > c_t. \end{cases} \quad t_3 = \begin{cases} \frac{t - b_t}{c_t - b_t}, & \text{если } b_t \leq t \leq c_t. \\ 0, & \text{если } t < b_t \text{ или } t > c_t. \end{cases} \quad (12)$$

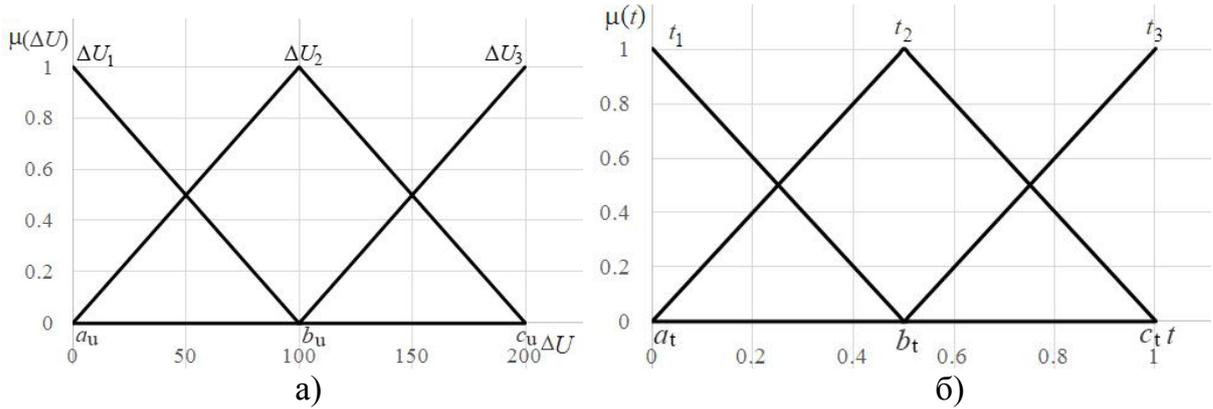


Рисунок 3 – График функций принадлежности для а) - первой входной переменной, б) – второй входной переменной

2. Определение базы правил для управления устройством нечеткой фильтрации шумов скольжения. Для соблюдения условий полноты базы правил число правил определяется по формуле n^m , где n – количество термов, m – число входных переменных ($3^2=9$).

R1: Если « $\Delta U_p = \Delta U_1$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_5$ »;

R2: Если « $\Delta U_p = \Delta U_1$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_4$ »;

R3: Если « $\Delta U_p = \Delta U_1$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;

R4: Если « $\Delta U_p = \Delta U_2$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_4$ »;

R5: Если « $\Delta U_p = \Delta U_2$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;

R6: Если « $\Delta U_p = \Delta U_2$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_2$ »;

R7: Если « $\Delta U_p = \Delta U_3$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;

R8: Если « $\Delta U_p = \Delta U_3$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_2$ »;

R9: Если « $\Delta U_p = \Delta U_3$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_1$ ».

3. Расчет степеней истинности предпосылок нечетких правил по формулам (13):

$$\begin{aligned} R1 &= \min(\Delta U_1; t_1), R2 = \min(\Delta U_1; t_2), R3 = \min(\Delta U_1; t_3), R4 = \min(\Delta U_2; t_1), \\ R5 &= \min(\Delta U_2; t_2), R6 = \min(\Delta U_2; t_3), R7 = \min(\Delta U_3; t_1), R8 = \min(\Delta U_3; t_2), \\ R9 &= \min(\Delta U_3; t_3). \end{aligned} \quad (13)$$

В нечеткой модели входные переменные могут задаваться разного рода, поскольку значения входных переменных нормализуются в один диапазон $[0;1]$. Для этого рассчитываются степени истинности по формулам (11-12). После нормализации единицы измерения входных переменных ($\Delta U=B, t=мс$) опускаются и значения степеней истинности для термов входных переменных ($\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3, t_1, t_2, t_3$) становятся безразмерными. Минимальные и максимальные значения так же берутся из диапазона $[0;1]$.

4. Нахождение степеней истинности заключений нечетких правил.

Чтобы нечеткая система отвечала условию полноты базы данных, число термов выходной переменной должно быть не менее 5.

Степени истинности определяются с помощью операции нахождения максимумов по формулам (14):

$$\begin{aligned} \gamma_5 &= R9, \gamma_4 = \max(R8; R6), \gamma_3 = \max(R7; R5; R3), \\ \gamma_2 &= \max(R4; R2), \gamma_1 = R1. \end{aligned} \quad (14)$$

5. Дефазификация, при которой осуществляется расчет четкого значения коэффициента устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения α по формулам

(15.1, 15.2), с помощью метода центра тяжести и быстродействующего метода отношения площадей:

Метод центра
тяжести

$$\alpha_d = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} \gamma_i \cdot \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n=5} \gamma_i} = \frac{\gamma_1 \cdot \alpha_1 + \gamma_2 \cdot \alpha_2 + \dots + \gamma_n \cdot \alpha_n}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n}, \quad (15.1)$$

Быстродействующий
метод отношения
площадей

$$\alpha_d = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{n\omega_i} \cdot (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \right] + \alpha_{\min}, \quad (15.2)$$

где n – количество термов выходной нечеткой переменной; i – номер термина ($i=1 \dots n$), ω_i – весовой коэффициент, γ_i – нижняя высота усеченного термина, полученная по формуле (14).

6. Нахождение коэффициента регулирования β по формуле (16):

$$\beta = 1 - \alpha_d \quad (16)$$

7. Расчет выходного напряжения, передаваемого на сервоприводы, по формуле (17):

$$U_\phi = \alpha_d \cdot U_n + \beta \cdot U_T, \quad (17)$$

где U_n , U_T – предыдущие и текущие значения напряжения, полученные от переменного резистора.

8. Преобразование полученного напряжения с помощью устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения в угол поворота сервопривода, передаваемого от микроконтроллера на сервоприводы, по общей формуле (18):

$$\varphi = \varphi_{\min} + \frac{(U_\phi - St_{\min}) \cdot (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}{(St_{\max} - St_{\min})}, \quad (18)$$

где St_{\min} , St_{\max} – минимальное и максимальное значения сигнала, пропорционального выходному напряжению (0-1024), зависит от разрядности аналого-цифрового преобразователя (10 разрядный АЦП), φ_{\max} и φ_{\min} – максимальное и минимальное значения угла поворота звеньев работа-манипулятора.

Формула преобразования напряжения в угол поворота сервопривода для захвата работа-манипулятора будет иметь вид:

$$\varphi_3 = \varphi_{\min} + \frac{U_{\phi 4} \cdot (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}{St_{\max}}, \quad \varphi_3 = 105 + U_{\phi 4} \cdot 0.034. \quad (19)$$

Для левого и правого плеч работа-манипулятора формула преобразования записывается:

$$\varphi_{\text{лп}} = \frac{U_{\phi 2} \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}}, \quad \varphi_{\text{пп}} = \frac{U_{\phi 3} \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}}, \quad (20)$$

$$\varphi_{\text{лп}} = U_{\phi 2} \cdot 0.137, \quad \varphi_{\text{пп}} = U_{\phi 3} \cdot 0.137.$$

Для платформы основания работа-манипулятора формула преобразования рассчитывается по формуле:

$$\varphi_o = \frac{U_{\phi 1} \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}}, \quad \varphi_o = U_{\phi 1} \cdot 0.176. \quad (21)$$

Новизна математической модели $M_{РВН}$ (формулы 10-21) определяется, во-первых, выполнением условия полноты состава базы правил что обеспечивает учет всесторонних воздействий входных переменных и термов, во-вторых, применением минимаксной композиции нечеткого коэффициента регулирования напряжения и, одновременным расчетом углов поворота звеньев робота-манипулятора, что обеспечивает сглаживание шумов выходного сигнала, в-третьих, использованием стандартного и оригинального методов дефазификации для расчета коэффициентов регулирования напряжения, позволяющих уменьшить разброс величины шумов скольжения переменных резисторов.

Таким образом, обобщенную математическую модель нечеткой фильтрации $M_{НФ}$ формируют две математические модели: математическая модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной $M_{СНВП}$, определяемая формулами 1-8, и математическая модель расчета выходного напряжения $M_{РВН}$, определяемая формулами 9-21.

На основе обобщенной математической модели нечеткой фильтрации шумов скольжения был сформирован метод нечеткой фильтрации шумов скольжения, состоящий из 10 шагов:

1. Определение α_{\min} и α_{\max} для формирования суппорта нечеткой выходной переменной (формулы 5 и 6).
2. Определение степеней истинности для входных переменных (формулы 11, 12).
3. Формирование нечеткой базы правил (этап 2).
4. Расчет предпосылок нечетких правил (формула 13).
5. Нахождение заключений нечетких правил (формула 14).
6. Дефазификация, нахождение первого коэффициента регулирования устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения (формулы 15.1-15.2).
7. Нахождение второго коэффициента устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения – β (формула 16).
8. Определение выходного напряжения U_{ϕ} (формула 17).
9. Преобразование полученного значения напряжение U_{ϕ} в угол поворота сервопривода ϕ (формула 18).
10. Передача параметра ϕ на сервоприводы.

Новизна метода заключается в системообразующем объединении шагов, направленных на повышение точности и сокращение времени работы устройства за счет управляемого выбора суппорта нечеткой переменной и перевода нечетких значений в четкие значения напряжения и угла поворота сервопривода робота-манипулятора на основе полноразмерной базы правил и быстродействующего метода дефазификации.

Согласно предложенному методу нечеткой фильтрации шумов скольжения разработан алгоритм нечеткой фильтрации в задаче управления позиционированием звеньев робота-манипулятора, представленный на рисунке 4.

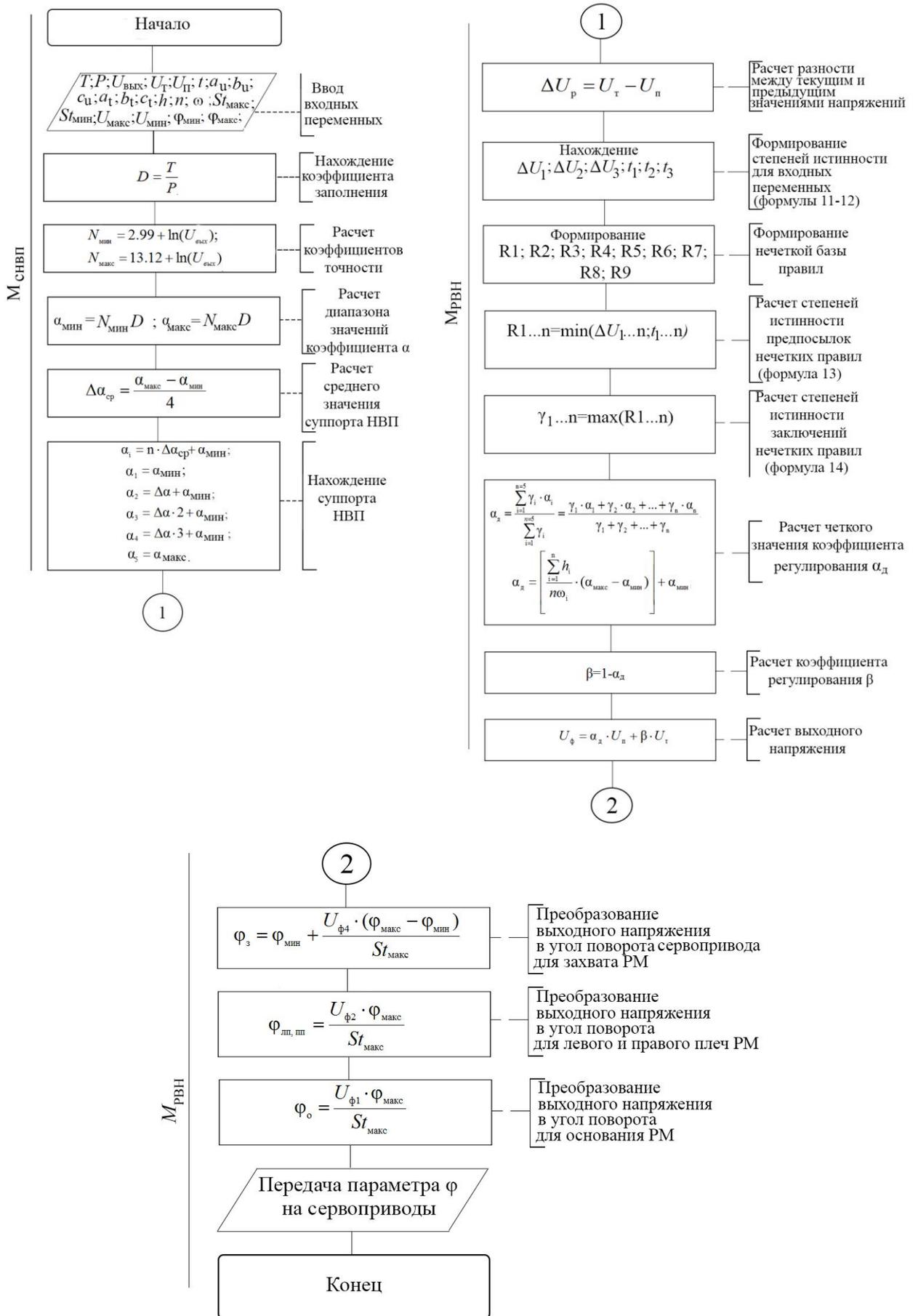


Рисунок 4 – Алгоритм нечеткой фильтрации в задаче управления позиционированием звеньев работа-манипулятора

Новизна алгоритма нечеткой фильтрации заключается в том, что он позволяет минимизировать корень из среднеквадратической ошибки нечеткого фильтра.

Представленные во второй главе диссертационного исследования обобщенная математическая модель нечеткой фильтрации, метод нечеткой фильтрации шумов скольжения и алгоритм нечеткой фильтрации в задаче управления позиционированием звеньев робота-манипулятора позволяют разработать устройство нечеткой фильтрации, которое рассмотрено в третьей главе.

В третьей главе рассматривается структурно-функциональная схема устройства нечеткой фильтрации и принцип его работы на основе разработанных метода нечеткой фильтрации шумов скольжения и алгоритма нечеткой фильтрации в задаче управления позиционированием звеньев робота-манипулятора. На рисунке 5 представлена структурно-функциональная схема устройства нечеткой фильтрации. Новизна данного устройства состоит в том, что для нечеткой фильтрации разработаны структурные и схемотехнические решения для композиции нечеткой импликации и быстродействующего дефазификатора, основанного на методе отношения площадей, что позволяет сгладить шумы скольжения переменных резисторов и обеспечить эффективность процесса управления.

В блоке расчета разности напряжений формируется первая входная переменная ΔU_p , которая передается на вход блока нечеткого вывода. В устройстве ввода информации задаются вторая входная переменная t , метки входных переменных (a_u, b_u, c_u) , (a_t, b_t, c_t) , и рассчитывается суппорт нечеткой выходной переменной $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$.

В шестислойном анализаторе в каждом из слоев рассчитываются степени истинности для входных переменных согласно формулам 11-12. Полученные значения передаются на входы блоков минимума MIN 18.1÷18.9 для расчета предпосылок нечетких правил (формула 13). В блоках МАХ 19.1÷19.3 рассчитываются степени истинности заключений нечетких правил (формула 14). В блоках SUM 21.1÷21.2 и DIV 13.9 рассчитывается четкое значение коэффициента регулирования α_d (формула 15). В блоке SUB 11.7 находится коэффициент регулирования β (формула 16). Далее по формуле 17 определяется выходное значение напряжения, которое преобразуется в угол поворота сервопривода по формуле 19, который затем передается на сервоприводы.

На рисунке 6 представлена модель устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, разработанная в программе имитационного моделирования.

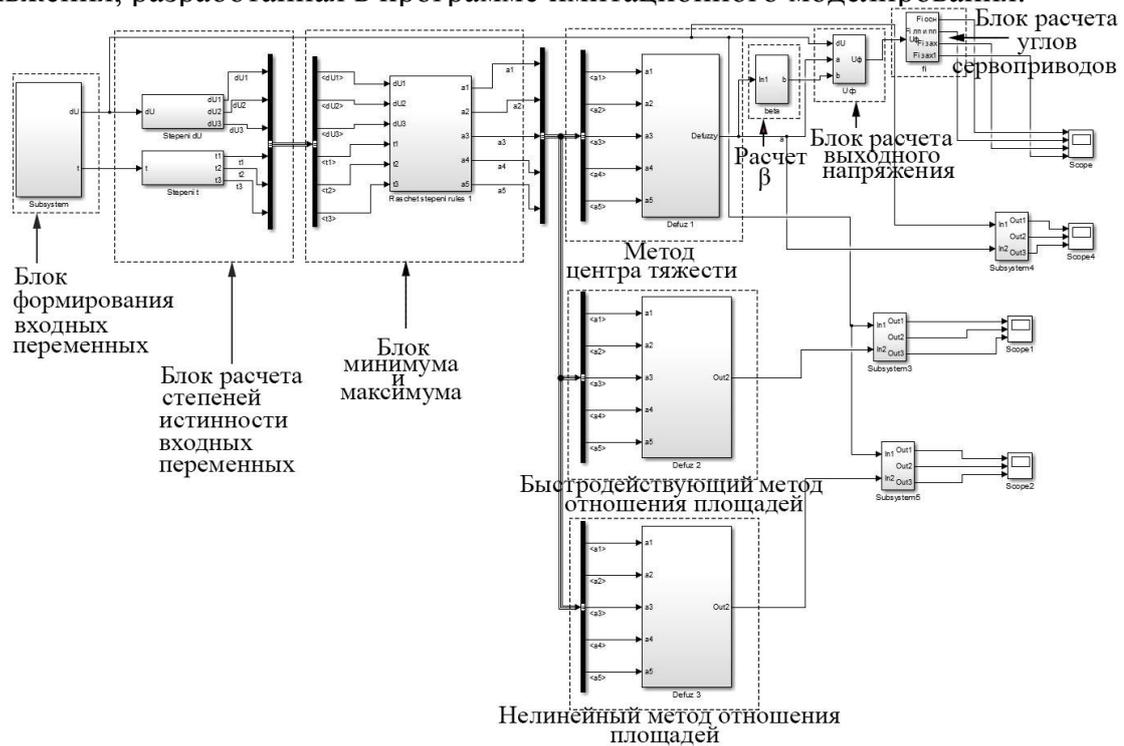


Рисунок 6 – Модель устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения

Сформированное устройство нечеткой фильтрации в третьей главе диссертационного исследования позволило осуществить его экспериментальную оценку, представленную в четвертой главе.

В четвертой главе разработана экспериментальная модель нечеткой фильтрации в системе управления позиционированием звеньев робота-манипулятора (рисунок 7).

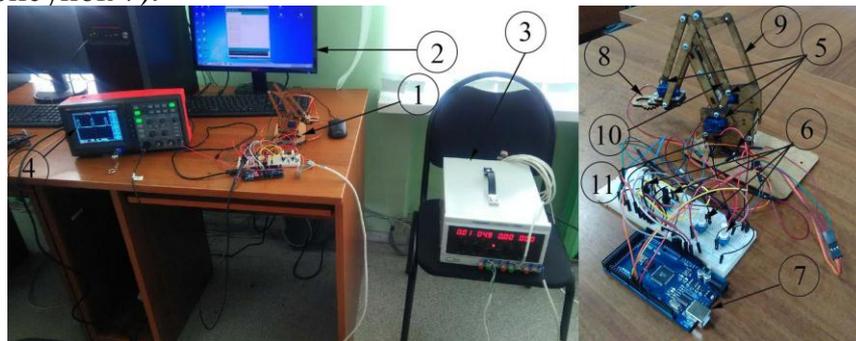


Рисунок 7 – Экспериментальная модель устройства нечеткой фильтрации в системе управления позиционированием звеньев робота-манипулятора:

В состав экспериментальной модели входят: 1 – устройство робота-манипулятора; 2 – компьютер; 3 – блок питания; 4 – осциллограф; 5 – четыре сервопривода SG-90; 6 – четыре переменных резистора 10 кОм; 7 – управляющая плата Arduino Mega 2560; 8 – захват робота-манипулятора; 9 – правое плечо; 10 – левое плечо; 11 – основание робота-манипулятора

В качестве первого эксперимента проводились измерения выходного напряжения с применением устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения и без его использования (рисунок 8).

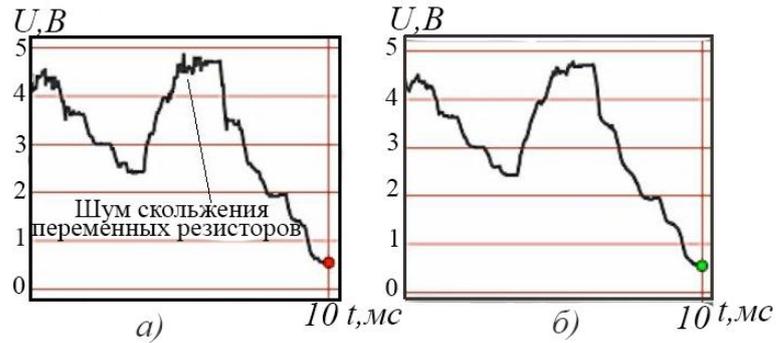


Рисунок 8 – Графики переходного процесса а) без устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения б) график переходного процесса с использованием устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения

На основании полученных графиков (рисунок 8) сделан вывод о том, что устройство нечеткой фильтрации устраняет шумы скольжения переменных резисторов, возникающие в процессе управления механизмами работа-манипулятора.

В качестве второго эксперимента проводилось измерение времени при повороте основания работа-манипулятора на 90° без устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения и с применением устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения. В таблице 1 представлены результаты трех измерений.

Таблица 1.

Результаты измерений времени поворота звена работа-манипулятора.

Без применения устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения	С применением устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения
63 мс	53 мс
59 мс	55 мс
60 мс	46 мс

Время поворота основания работа-манипулятора с использованием устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения сократилось на 20%, что свидетельствует о том, что число вычислительных операций сократилось в разработанном в диссертационном исследовании методе нечеткой фильтрации шумов скольжения за счет сочетания минимаксной композиции и метода отношения площадей.

В течение третьего эксперимента проводилось моделирование метода центра тяжести и быстродействующего метода отношения площадей в программе имитационного моделирования. Основной задачей данного эксперимента является анализ аддитивности системы, то есть обеспечение на выходе нечеткой модели значения заданного диапазона переменных для четырех углов поворота звеньев работа-манипулятора.

Платформа основания должна поворачиваться вокруг своей оси от 0° до 180° , левое и правое плечи должны поворачиваться от 0° до 140° , захват работа-манипулятора раскрывается от 105° до 140° . Результаты моделирования представлены на рисунке 9.

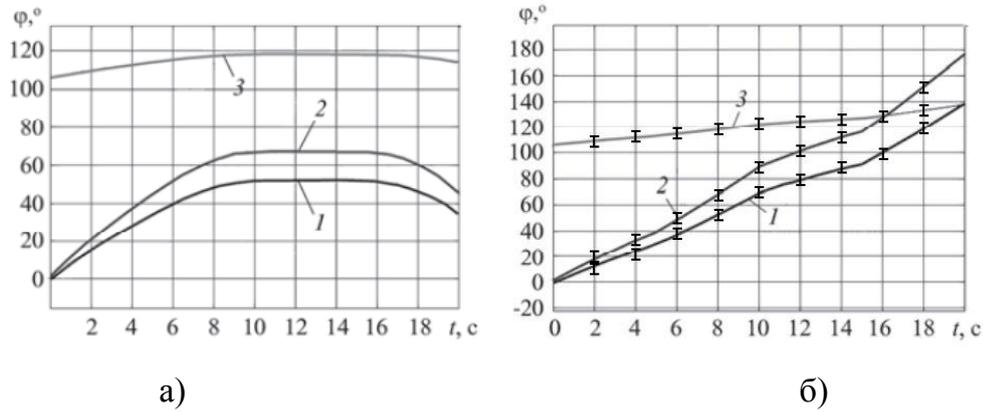


Рисунок 9 – Дефаззификаторы: 1 - левое и правое плечи РМ, 2 – основание РМ, 3 – захват РМ а) - на основе метода центра тяжести, б) – на основе линейного метода отношения площадей

Анализ графиков зависимостей углов поворота звеньев робота-манипулятора от времени показал то, что при использовании быстродействующего метода отношения площадей обеспечивается поворот на заданный угол во всем диапазоне заданных значений углов поворота звеньев робота-манипулятора. А при использовании метода центра тяжести не обеспечивается свойство аддитивности, о чем свидетельствует рисунок 9, а. Например, основание должно вращаться от 0° до 180° , а на рисунке 9, а видно, что оно может вращаться только от 0° до 71° .

В качестве четвертого эксперимента проводилась оценка точности работы устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, которая осуществлялась с помощью параметра *RMSE* (Root Mean Square Error) – корень из среднеквадратической ошибки по формуле (22).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=m}^1 (\bar{y}_i - y_i)^2}, \quad (22)$$

где m ($m=10944$) – количество измерений в выборке, \bar{y}_i – значение идеального входного значения на данной итерации, y_i – выходное значение системы на данной итерации.

Расчет *RMSE* проводился для разработанного в диссертационном исследовании устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения, фильтра Калмана и нечеткого фильтра Калмана. Данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2
Сравнение значений параметра *RMSE*

Фильтры	<i>RMSE</i>	
	Постоянный сигнал	Синусоидальный сигнал
Фильтр Калмана	0,0261	0.0218
Нечеткий фильтр Калмана	0,0222	0,0192
Устройство нечеткой фильтрации	0,0133	0.0167

На рисунке 10 представлены результаты моделирования нечеткого фильтра и фильтра Калмана с входным сигналом в виде синусоиды.

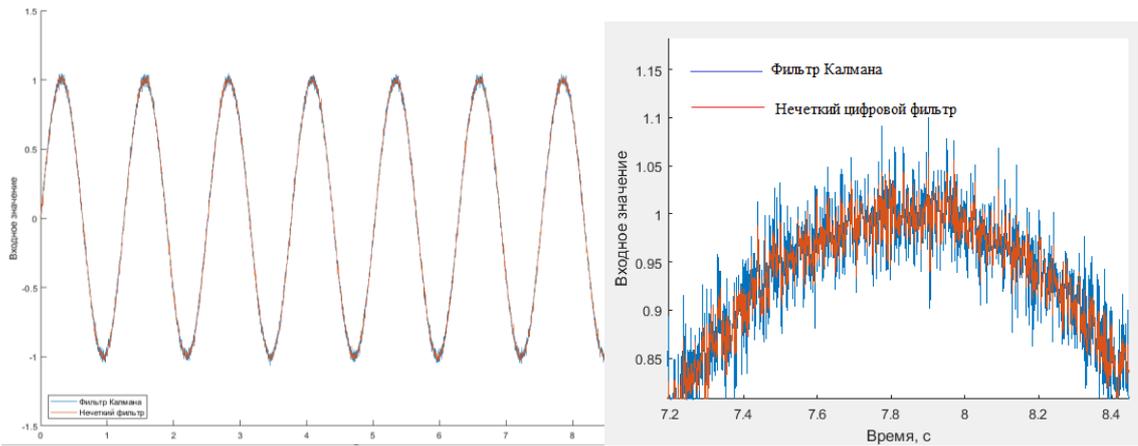


Рисунок 10 – Результат моделирования фильтра Калмана и нечеткого фильтра с входным сигналом в виде синусоиды

Ошибка $RMSE$ для устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения на 45% меньше, чем у фильтра Калмана и на 15% меньше, чем у нечеткого фильтра Калмана при постоянном сигнале. При синусоидальном сигнале ошибка $RMSE$ у устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения на 25% меньше, чем у фильтра Калмана и на 15% меньше, чем у нечеткого фильтра Калмана.

В качестве пятого эксперимента проводился расчет $RMSE$ для устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения с использованием метода центра тяжести, устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения и фильтра Калмана. Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3
Сравнение значений параметра $RMSE$

Фильтры	$RMSE$
Устройство нечеткой фильтрации шумов скольжения	0.0048 ($\omega = 4.5$)
Фильтр Калмана	0.0261
Центр тяжести	0.0133
Нечеткий фильтр Калмана	0.0182

На основании полученных результатов делается вывод о том, что корень из среднеквадратической ошибки $RMSE$ минимален при дефазификации на основе разработанного в диссертационном исследовании метода нечеткой фильтрации шумов скольжения. Таким образом, $RMSE$ дефазификации с устройством нечеткой фильтрации шумов скольжения в 5.43 раза меньше чем $RMSE$ фильтра Калмана, в 2.77 раза меньше традиционного метода центра тяжести и в 3.81 раза меньше, чем у нечеткого фильтра Калмана.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно-технической задачи разработки метода, алгоритма и устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения для управления позиционированием звеньев робота-манипулятора получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ современных цифровых фильтров и алгоритмов, используемых в их работе, в результате, которого обосновано использование устройства нечеткой фильтрации шумов скольжения для управления позиционированием звеньев робота-манипулятора.

2. Разработана обобщенная математическая модель нечеткой фильтрации шумов скольжения, позволяющая увеличить скорость обработки операций в нечетком фильтре за счет сокращения числа вычислительных процедур по отношению к фильтру Калмана, в 5.43 раза, к традиционному методу центра тяжести в 2.77 раза, по отношению к нечеткому фильтру Калмана в 3.81 раза.

3. Созданы метод нечеткой фильтрации шумов скольжения, позволяющий увеличить скорость обработки операций в нечетком фильтре и алгоритм нечеткой фильтрации в задаче управления механизмами робота-манипулятора, позволяющий минимизировать корень из среднеквадратической ошибки нечеткого фильтра по отношению к фильтру Калмана на 45% и на 15% по отношению к нечеткому фильтру Калмана при постоянном сигнале. При сунусоидальном сигнале ошибка *RMSE* минимизируется на 25% по отношению к фильтру Калмана и на 15% по отношению к нечеткому фильтру Калмана.

4. Реализована структурно-функциональная схема устройства нечеткой фильтрации, позволяющая сократить время работы устройства нечеткой фильтрации на 20%, сгладить шумы скольжения переменных резисторов и обеспечить аддитивность нечеткой модели принятия решений.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для сглаживания шумов переменных резисторов, используемых для систем управления процессом движения, охлаждения изделий или для проведения нейрохирургических операций.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Использование мягких дефаззификаторов и реализация устройства на ПЛИС с целью распараллеливания вычислительных процедур и повышения быстродействия системы.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Лулева М.Ю. Алгоритм стабилизации перемещения робота-манипулятора [Текст] / Бобырь М.В., Ноливос К.А. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2018. – №7. – С. 34-40.

2. Лулева М.Ю. Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором ARMinо [Текст] / Бобырь М.В., Ноливос К.А. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – №4. – С. 244-250.

3. Лулева М.Ю. Анализ быстродействующих дефаззификаторов в задаче управления роботом-манипулятором [Текст] / Бобырь М.В., Милостная Н.А., Архипов А.Е. // Вестник компьютерных и информационных технологий – 2020. – №4. – С. 18-28.

4. Лулева М.Ю. Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора [Текст] / Бобырь М.В., Милостная Н.А., Булатников В.А. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – Т.24. – №1. – С.115-129.

5. **Лунева М.Ю.** Фильтрация сигнала в нечетком цифровом фильтре на основе метода отношения площадей [Текст] / Бобырь М.В. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – №3. – С.183-195

Публикации в журналах, индексируемых в базе данных Scopus:

6. **Luneva M.Yu.** An algorithm for controlling of cutting speed based on soft calculations / Bobyr M.V., Yakushev A.S. // International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment, Icmtmte 2017. – 2017. – Pp. – 1-5. DOI: 10.1051/mateconf/201712901064

7. **Luneva M.Yu.** Fuzzy digital filter algorithm / Bobyr M.V., Nolivos K.A. S. // International russian automation conference, Rusautocon 2018. – 2018. – Pp. – 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501641

8. **Luneva M.Yu.** Calculating device for digital fuzzy filter in robot arm / Bobyr M.V., Berezin N.M., Kruzhilina T.V. // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2019. – 2019. – Pp. 1-5.

Патенты

9. Пат. №2709125 Российская Федерация, МПК В23Q 11/10, В23Q 15/18. Способ и устройство для управления охлаждением режущего инструмента при обработке изделий на оборудовании с ЧПУ / **Лунева М.Ю.**, Дородных А.А., Якушев А.С., Бобырь М.В., Архипов А.Е. заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). – №2018117316; заявл. 10.05.2018; опубл. 16.12.2019; Бюл. №32.

Научные статьи, опубликованные в других изданиях РИНЦ:

10. Обучение нейро-нечетких систем: [Текст] монография / М.В. Бобырь.– М.: ИНФРА-М, 2017 – С. 240, раздел: 2.3.1. – «Модель Мамдани» – С. 65-69.

11. **Лунева М.Ю.** Нечеткая модель цифрового фильтра для управления роботом-манипулятором [Текст] // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Курск, 2018. – С.132-134.

12. **Лунева М.Ю.** Алгоритм расчета коэффициентов нечеткого цифрового фильтра [Текст] / Бобырь М.В. // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание: сборник материалов XIV международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2018. – С. 157-159.

13. **Лунева М.Ю.** Устройство блока расчета степеней истинности нечеткого фильтра для управления роботом-манипулятором [Текст] // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы докладов VI всероссийской очной научно-практической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2018. – С.101-102.

14. **Лунева М.Ю.** Способ расчета напряжения в нечетком цифровом фильтре для робота-манипулятора [Текст] / Бобырь М.В., Архипов А.Е. // Новые информационные технологии и системы: сборник научных статей XVI Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2019. – С. 137-140.

15. **Лунева М.Ю.** Устройство блока расчета разности напряжений в нечетком цифровом фильтре робота-манипулятора [Текст] / Бобырь М.В. // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание: сборник

материалов XV международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2019. – С. 49-51.

16. **Лулева М.Ю.** Моделирование нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора в среде Simulink [Текст] / Бобырь М.В. // МКПУ-2019: Материалы XII мультиконференции по проблемам управления. – Геленджик, 2019. – С. 39- 41.

17. **Лулева М.Ю.** Моделирование блока расчета степеней истинности нечеткого цифрового фильтра в среде Simulink [Текст] / Бобырь М.В. // Интеллектуальные информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2019): материалы XII мультиконференции. – Вологда, 2019. – С. 39-41.

18. **Лулева М.Ю.** Математическая модель дефаззификатора на основе линейного метода отношения площадей // Современные информационные технологии. Теория и практика: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – Череповец, 2020. – С. 22-25.

19. **Лулева М.Ю.** Быстродействующий дефаззификатор на основе линейного метода отношения площадей / Бобырь М.В // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники: материалы Международной научно-технической конференции. – Брянск, 2020. – С. 346-350.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

20. Ноливос К.С.А., **Лулева М.Ю.** Программа для управления роботом-манипулятором / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661425, заявл. 14.08.2017, опубли. 12.10.2017.

21. Кулабухов С.А., Бобырь М.В., Архипов А.Е., **Лулева М.Ю.** Программа для синтеза нечеткого контроллера на базе ПЛИС с функциями АЦП и ЦАП и выводом результата на LCD дисплей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019611202, заявл. 29.12.2018, опубли. 23.01.2019.

Подписано в печать __. __. 2020 г. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № __

Юго-Западный государственный университет,
305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94 Отпечатано в ЮЗГУ