

На правах рукописи

ЧАН ДИНЬ МИНЬ

**НЕЧЕТКИЕ АЛГОРИТМЫ НАСТРОЙКИ, ФИЛЬТРАЦИИ, АНАЛИЗА И
СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Деменков Николай Петрович**
кандидат технических наук, с.н.с., доцент
кафедры систем автоматического управления,
МГТУ им. Н.Э Баумана

Официальные оппоненты: **Митришкин Юрий Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
профессор ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова»

Внуков Андрей Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики»

Ведущая организация: Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени
М.И. Платова

Защита состоится 26 января 2021 г. в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высыпать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Муратов
Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный этап развития авиации характеризуется использованием различных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Повышение эффективности БПЛА неразрывно связано с совершенствованием систем управления и навигации. Для определения навигационных параметров БПЛА в качестве базовой системы используются инерциальные навигационные системы, в частности бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Перспективным типом БИНС являются системы, построенные на волновых твердотельных гироскопах (ВТГ), обладающих уникальным сочетанием свойств: простота конструкции, высокая потенциальная точность, практически неограниченный технический ресурс, небольшие габаритные размеры и энергопотребление. Однако ВТГ имеют специфические погрешности, которые необходимо компенсировать при решении задач высокоточной навигации БПЛА.

Перспективным направлением, в частности для Вьетнама, является создание БПЛА малого и среднего классов. Такие БПЛА позволяют улучшить инфраструктуру труднодоступных горных районов Вьетнама, решать задачи мониторинга поверхности, экологии и др. Обеспечение высокой точности навигации БПЛА достигается путем использования интегрированных БИНС, построенных на ВТГ, с алгоритмической коррекцией.

Решением задач в этой области занимаются Rozelle D.M., Meyer D., Lynch D.D., Журавлев В.Ф, Климов Д.М., Степанов О.А., Пешехонов В.Г., Лунин Б.С., Басараб М.А., Матвеев В.А., Микрин Е.А., Мочалов И.А., Неусыпин К.А. и другие.

Фундаментальной проблемой в области управления и обработки информации является проблема оценки состояния в нелинейных динамических системах. При недостаточной информации для разработки полной модели или изменении параметров со временем может произойти расхождение в процессе фильтрации. Увеличение размерности вектора состояния и связанных с ним матриц приводит к большой вычислительной нагрузке. С другой стороны, БИНС может включать неопределенности, такие как несоответствие параметров модели, стохастические дрейфы гироскопов и акселерометров, статистические ошибки начальных условий и системные шумы. В таких условиях оценки, получаемые известными методами, как правило, ненадежны.

Адаптивная фильтрация калмановского типа с помощью нечеткой логики является одной из многообещающих стратегий в борьбе с расхождением в нелинейных системах с динамическими неопределенностями. Применение нечеткой логической адаптивной системы позволит в режиме реального времени настраивать параметры фильтра при изменении динамики объекта.

Алгоритмическая коррекция БИНС на ВТГ предполагает исследование его динамики с учетом различных возмущений неопределенного характера. Действующие на БПЛА, БИНС и ВТГ неопределенные возмущения существенно ограничивают использование классических алгоритмов, поэтому при разработке алгоритмов обработки информации в последнее время получила широкое распространение теория нечетких множеств. При применении

нечётких методов имеется ряд проблем, нерешенных к настоящему времени. К ним относятся задачи определения устойчивости и качества нечётких динамических систем.

В связи с вышесказанным, разработка и исследование нечетких алгоритмов настройки, фильтрации, анализа и синтеза систем управления и навигации является актуальной задачей.

Целью работы является разработка и исследование алгоритмов обработки информации, анализа и синтеза систем навигации и управления на основе теории нечетких множеств.

Задачи исследования:

1. Построение нечетких нелинейных математических моделей ВТГ БИНС и определение их устойчивости.
2. Разработка нечеткого алгоритма компенсации погрешностей ВТГ БИНС на основе нечеткого их описания.
3. Разработка нечеткого адаптивного фильтра калмановского типа для задачи обработки информации от БИНС.
4. Создание методики анализа и синтеза алгоритмов навигации и управления БПЛА на основе нечеткого подхода.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм нечеткой адаптивной фильтрации с применением нечеткой логической адаптивной системы применительно к нелинейной задаче БИНС, позволяющий настроить компоненты матрицы субоптимального коэффициента масштабирования (СКМ) по каналам и компенсировать погрешности БИНС БПЛА.
2. Разработан нечеткий алгоритм коррекции погрешностей ВТГ БИНС для определения весовых коэффициентов существующих дефектов, что позволяет компенсировать погрешности при обработке и реализации навигационных алгоритмов на базе ВТГ.
3. Получено решение задачи устойчивости ВТГ с нечеткими начальными условиями и нечеткими параметрами методом фазовых траекторий. Полученные нечеткие «сильные/слабые» фазовые траектории для различных моделей ВТГ характеризуют свойства устойчивости при различных нечетких параметрах.
4. Методом нечеткого преобразования Лапласа, операторным методом и нечетким методом Галеркина получены и исследованы нечеткие нелинейные и линейные математические модели движения кольцевого резонатора ВТГ БИНС, подтвердившие эффективность предложенного нечеткого подхода к описанию нечетких моделей волновых процессов с учетом неопределенностей по сравнению с четкими решениями.
5. Разработано методическое и программное обеспечение, построенное по модульному принципу для настройки, анализа и синтеза нечетких алгоритмов навигации и управления, позволяющие существенно упростить и ускорить проводимые исследования.

Практическая значимость результатов исследования.

Полученные научные результаты, имеющие методическую направленность, позволяют сократить время и повысить достоверность результатов обработки информации систем управления и навигации БПЛА.

Разработанные нечеткие алгоритмы коррекции БИНС позволяют осуществить высокоточную коррекцию навигационной информации БПЛА. С помощью нечеткого алгоритма фильтрации проводится оценка погрешностей ВТГ БИНС и компенсируется большая часть нелинейных погрешностей. Разработанные нечеткие алгоритмы позволяют повысить точность навигационной информации БПЛА в условиях неопределенности без существенных материальных затрат, и легко реализуемы в бортовых вычислителях.

Достоверность и обоснованность полученных теоретических и практических результатов подтверждаются четкими математическими выводами при построении моделей и алгоритмов, результатами математического моделирования, а также согласованностью полученных результатов с известными данными в этой области, опубликованными в открытой печати.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования, а также разработанные алгоритмы коррекции, оценивания были применены в учебном процессе на кафедре «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования. При решении сформулированных задач использовались методы теории нечетких множеств, теории автоматического управления, методы математического анализа, методы математического моделирования и программный пакет MATLAB.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Алгоритм нечеткой адаптивной фильтрации с применением нечеткой логической адаптивной системы, позволяющий корректировать БИНС в условиях неопределенности с большей точностью за счет нечувствительности к выбросам параметров системы, а также с повышенной производительностью процесса фильтрации.

2. Нечеткий алгоритм обработки сигналов ВТГ для определения весовых коэффициентов всех дефектов, влияющих на погрешности ВТГ и позволяющий компенсировать нелинейные погрешности ВТГ БИНС.

3. Результаты исследования устойчивости ВТГ методом нечетких фазовых траекторий с целью получения нечетких «сильных» или «слабых» фазовых траекторий, более адекватно характеризующих свойства устойчивости нелинейных моделей ВТГ при различных нечетких начальных условиях и параметрах.

4. Результаты исследования динамики ВТГ нечетким методом Галеркина, методом нечеткого преобразования Лапласа и нечетким операторным методом, позволяющее более точно характеризовать его свойства при различных нечетких исходных данных.

5. Методика настройки, анализа и синтеза нечетких алгоритмов, позволяющая решать задачи расчета и проектирования нечетких систем управления, ВТГ, БИНС и БПЛА в условиях неопределенности, позволяющее существенно упростить процесс исследования.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (МНТК ФТИ-2017)» (Москва, 2017); международных научно-технических конференциях «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения - INTERMATIC» (Москва, 2017, 2018); XLII и XLIV академических чтениях по космонавтике (Москва, 2018, 2020); международной конференции «13th International Symposium Intelligent Systems – 2018» (Санкт Петербург, 2018); научно-технической конференции «Современные проблемы науки и образования в ракетно - космической технике и автоматизации производств (Москва, 2019); XIII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, 2019), научном семинаре кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья в журнале, индексируемом в Scopus, общим объемом 4,0 п.л./2,2 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 125 страницах, содержит 44 рисунка и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели, задачи и методы исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации, внедрению результатов, публикациях, структуре и объему диссертации.

В первой главе обоснована адекватность применения нечеткого подхода к описанию нечетких моделей волновых процессов ВТГ с учетом некоторых неопределенных свойств, исследование которых традиционными методами является достаточно сложным и не всегда адекватным. Исследованы нечеткие математические модели движения кольцевого резонатора методом нечеткого преобразования Лапласа и операторным методом как при отсутствии внутреннего трения и внешней нагрузки (модель 1), так и при наличии внутреннего трения (модель 2), а также нечетким методом Галеркина для нелинейной нечеткой двухточечной краевой задачи первого порядка (модель 3).

Соответствие предложенного нечеткого подхода с четким решением подтверждена результатами моделирования при задании одиночной функции принадлежности во всех случаях (Рис. 1).

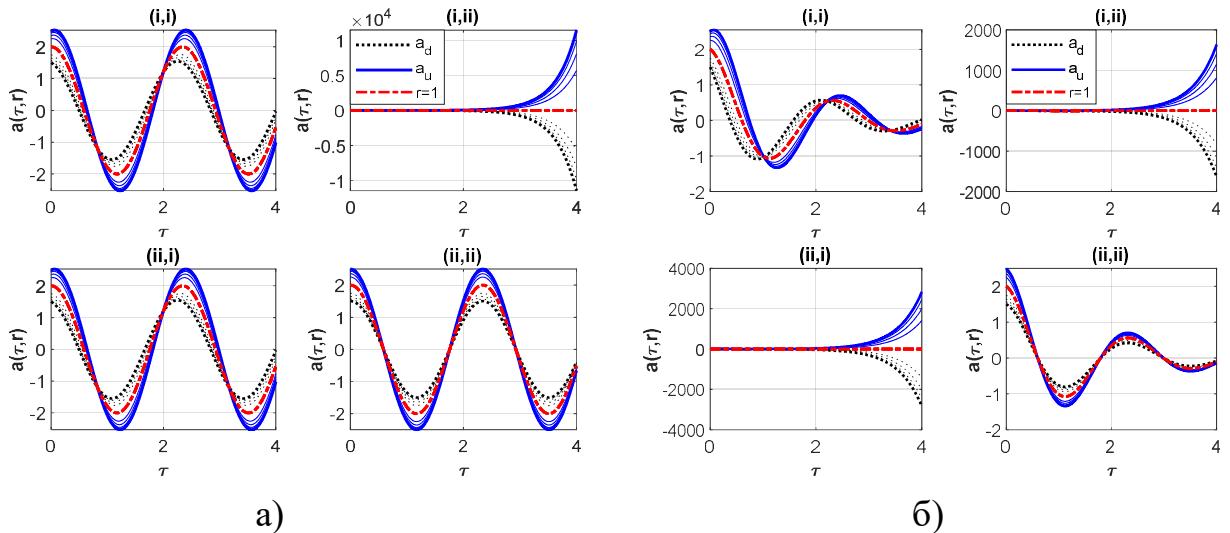


Рис. 1. Зависимости модели 1 (а) и модели 2 (б) методом нечеткого преобразования Лапласа для 4-х случаев дифференцируемости по Хукухара

Проведено исследование устойчивости ВТГ методом нечеткой фазовой траектории с различными условиями неопределенности (Таблица 1).

Таблица 1.

Динамическая система ВТГ $\dot{x}(t) = Ax(t), x(t=0) = x_0$		
	модель 1	модель 2
Случай 1: A – чёткие x_0 – нечёткие	$\ddot{a}(\tau) + ka(\tau) = 0$ $a(\tau = 0) = a_{h1}, \dot{a}(\tau = 0) = a_{h2} = 0$	$\ddot{a}(\tau) + 2\alpha\dot{a}(\tau) + ka(\tau) = 0$ $a(\tau = 0) = a_{1h}, \dot{a}(\tau = 0) = a_{2h}$
Случай 2: A – нечёткие x_0 – чёткие	$\dot{x}_h(\tau) = A_h x_h, x(\tau = 0) = x_0$ $A_h = \begin{pmatrix} 0_h & 1_h \\ -k_h & 0_h \end{pmatrix}$	$\dot{x}_h(\tau) = A_h x_h, x(\tau = 0) = x_0$ $A_h = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_h & -2\alpha_h \end{pmatrix}$
Случай 3: A, x_0 – нечёткие	$\begin{cases} \dot{\underline{m}}(r, \tau) + i\dot{\bar{m}}(r, \tau) = A_h (\underline{m}(r, \tau) + i\bar{m}(r, \tau)) \\ \underline{m}(r, \tau = 0) + i\bar{m}(r, \tau = 0) = \underline{m}_0(r) + i\bar{m}_0(r) \end{cases}$ $A_h = (\underline{a}_{ij}(r) + i\bar{a}_{ij}(r)) \in E^2, m_h(\tau) = (\underline{m}_{ij}(r) + i\bar{m}_{ij}(r)) \in E^2$ $m = (\underline{m}_0(r) + i\bar{m}_0(r)) \in E^2$	

Для четкой модели ВТГ при отсутствии внутреннего трения с нечеткими начальными условиями (случай 1 - модель 1) нечеткая фазовая траектория (НФТ) относительно начала координат имеет форму эллиптического кольца и определяет асимптотическую неустойчивость модели (Рис. 2, а). При наличии внутреннего трения (случай 1 - модель 2) нечеткая фазовая траектория имеет форму кольцевой логарифмической спирали и определяет асимптотическую устойчивость нечеткой модели (Рис. 2, б).

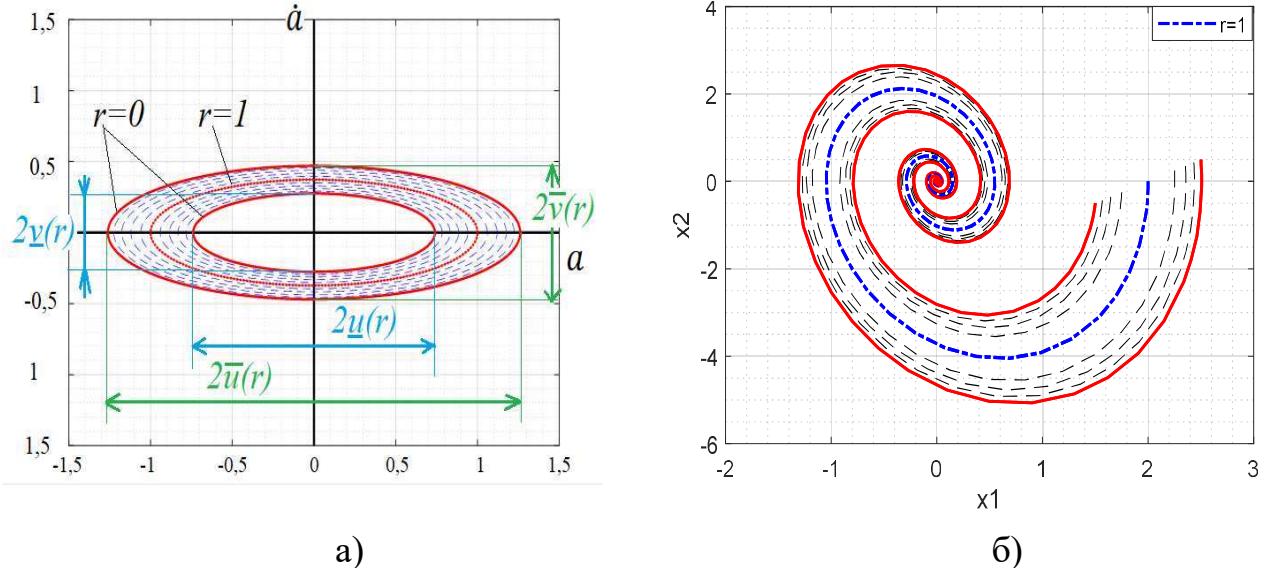


Рис. 2. НФТ для четкой модели ВТГ с нечеткими начальными условиями при отсутствии внутреннего трения (а) и при наличии внутреннего трения (б)

При нечеткой модели ВТГ с четкими начальными условиями при отсутствии внутреннего трения (случай 2 - модель 1) получена фазовая траектория, зависящая от безразмерного времени и определяющая асимптотическую неустойчивость модели. При наличии внутреннего трения (случай 2 - модель 2) фазовая траектория также зависит от времени и задает асимптотическую устойчивость нечеткой модели (Рис. 3).

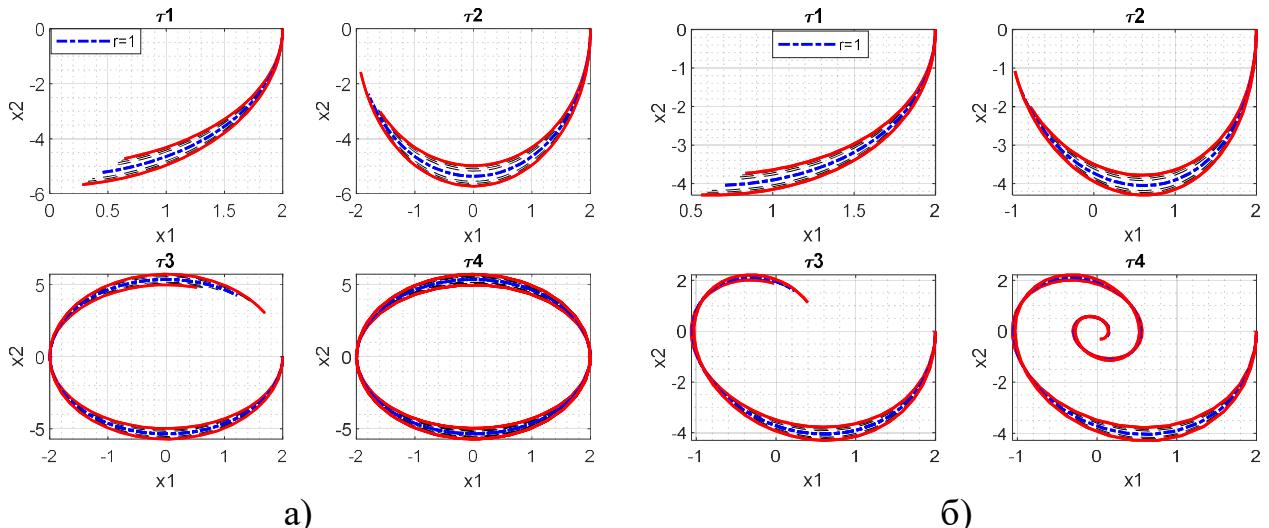


Рис. 3. НФТ для нечеткой модели ВТГ с четкими начальными условиями при отсутствии внутреннего трения (а) и при наличии внутреннего трения (б)

Для нечеткой модели ВТГ с нечеткими начальными условиями в обоих случаях отсутствия и наличия трения (случай 3) получены соответственно асимптотические неустойчивость и устойчивость моделей.

Полученные нечеткие «сильные/слабые» фазовые траектории для различных моделей ВТГ характеризуют свойства устойчивости при различных нечетких параметрах, что дает более адекватные оценки при расчете параметров резонаторов. Предложенный метод можно использовать для исследования устойчивости нечетких динамических систем, описываемых

нечёткими нелинейными дифференциальными уравнениями 2-го и более высокого порядка.

Вторая глава посвящена исследованию погрешностей волнового твердотельного гироскопа, характеризующих разнообразные источники погрешности ВТГ. Неопределенность погрешности обусловлена суммарным воздействием технологических дефектов изготовления чувствительного элемента, неоднородностью плотности его материала, параметрами системы съема и управления ВТГ и другими неконтролируемыми факторами. Жесткие ограничения на соответствующие плотности распределений, их моменты при применение детерминированного и вероятностного описания приводят к значительным ошибкам при расчете точностных параметров ВТГ.

Нечеткая модель, предложенная для описания конкретных погрешностей ВТГ с помощью их функций принадлежностей (Рис. 4), имеет вид:

$$\Delta\Omega^h = \sum_i C_i \Delta\Omega_i = C_p \Delta\Omega_p^h + C_h \Delta\Omega_h^h + C_Q \Delta\Omega_Q^h + C_R \Delta\Omega_R^h,$$

где индекс «*h*» обозначает нечеткий характер, C_i - весовые коэффициенты, $\Delta\Omega_i^h$ - составляющие погрешности.

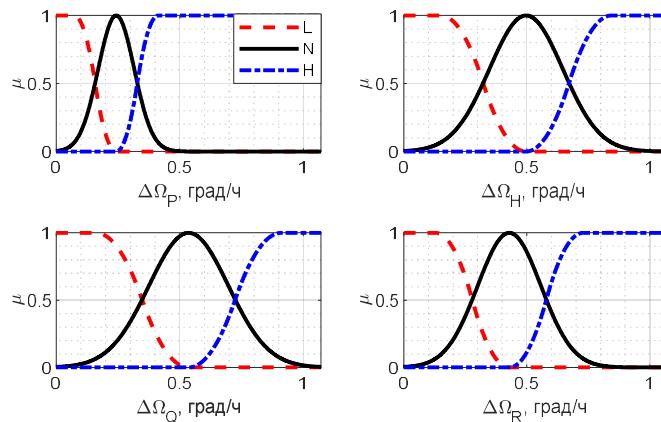


Рис. 4. Функции принадлежностей составляющей погрешности ВТГ
a) $\mu_p = f(\Delta\Omega_p)$, b) $\mu_h = f(\Delta\Omega_h)$, c) $\mu_Q = f(\Delta\Omega_Q)$, d) $\mu_R = f(\Delta\Omega_R)$

Нечеткий алгоритм обработки погрешности ВТГ состоит из двух этапов (Рис. 5). На первом этапе определяется отклонение входной погрешности $\Delta\Omega_0$ от нормы $\Delta\Omega_i^N$ для всех дефектов. На втором этапе определяются весовые коэффициенты соответствующих дефектов C_i на основе информации об отклонениях $\Delta\bar{N}_i$. С помощью 4-х нечетких блоков FIS_p ; FIS_h ; FIS_Q ; FIS_R определяются отклонения $\Delta\bar{N}_i$ при поступлении входной погрешности для всех дефектов. Выходные значения этого блока поступают на блоки FIS_C_p ; FIS_C_h ; FIS_C_Q ; FIS_C_R для вычисления весового коэффициента соответствующих дефектов.

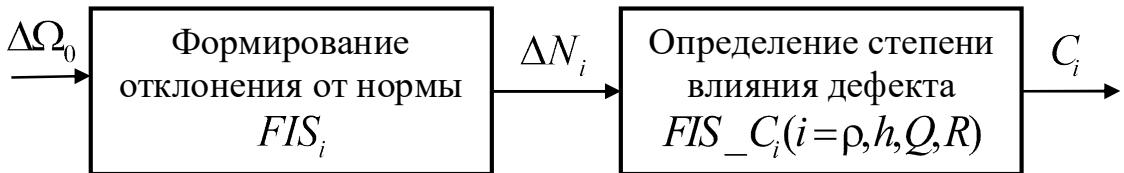


Рис. 5. Схема нечеткой обработки погрешности ВТГ

Нечеткие правила (Таблица 2) определяются на основе обучающей выборки, которая состоит из параметров наблюдений с соответствующими функциями принадлежностей к классам наблюдений и доступной априорной информации об объекте у эксперта, а также из параметрической оптимизации к дискретному изменению динамики ВТГ.

Таблица 2.

Правила определения $\Delta N_i, C_i$

№	Описание правила	
	Этап формирования отклонения от нормы	Этап вычисления весового коэффициента
1	<i>Если $\Delta\Omega_0 \in N_i$ То $\Delta N_i \in Zero_i$</i>	<i>Если $\Delta N_i \in Zero_i$ То $C_i \in Strong$</i>
2	<i>Если $\Delta\Omega_0 \in L_i$ То $\Delta N_i \in N_i$</i>	<i>Если $(\Delta N_i \in NS_i) \vee (\Delta N_i \in PS_i)$ То $C_i \in Normal$</i>
3	<i>Если $\Delta\Omega_0 \in H_i$ То $\Delta N_i \in P_i$</i>	<i>Если $(\Delta N_i \in NB_i) \vee (\Delta N_i \in PB_i)$ То $C_i \in Small$</i>

Двухэтапный нечеткий алгоритм выдает набор значений коэффициентов при поступлении информации о входной погрешности, что позволяет анализировать влияние существующих дефектов на суммарную погрешность ВТГ. Сформулированы рекомендации изготовителю приборов на совершенствование технологии для обеспечения требуемой точности, удовлетворяющей в требуемой области применения, а также могут компенсироваться погрешности при обработке и реализации навигационного алгоритма на базе ВТГ без ужесточения их исходных характеристик.

В третьей главе представлен алгоритм нечеткой адаптивной фильтрации в нелинейных динамических системах, в частности, при решении задачи БИНС на основе ВТГ. Проведен анализ различных алгоритмов фильтрации: расширенный, ансцентный, сильный следящий фильтры Калмана и их комбинации. Несовершенство модели, неопределенности характеристик шумов и начальных условий, а также изменения параметров системы приводят к тому, что ухудшается точность как ансцентного ФК, так и расширенного ФК и процесс фильтрации может даже расходиться.

Сильный следящий ансцентный ФК является более гладким нелинейным алгоритмом. Этот фильтр разработан на основе сочетания сигма-точечного подхода и адаптивных свойств матрицы субоптимального коэффициента масштабирования S_k . Однако эти подходы имеют следующие недостатки: во-первых, априорный коэффициент и коэффициент смягчения постоянны и выбираются эмпирически; во-вторых, матрица СКМ включена в течение всего процесса фильтрации, что приводит к потере точности в тех временных сегментах, в которых модель процесса известна.

Перспективным является применение нечеткой модели для настройки в режиме реального времени коэффициента смягчения, входящего в матрицу СКМ, при борьбе с расхождением в нелинейных системах с динамическими неопределенностями.

Для улучшения эффективности и производительности процесса фильтрации в моменты неопределенности модели предлагается:

- получать коэффициент смягчения в режиме реального времени с помощью нечеткой логической адаптивной системы (НЛАС) с нечеткими правилами, позволяющей в темпе с процессом настраивать коэффициент смягчения при изменении динамики объекта;

- вычислять элементы матрицы СКМ не в зависимости от априорного коэффициента, а путем настройки их по каналам;

- не включать матрицу СКМ в тех временных сегментах, в которых модель процесса известна. Для этого предлагается использовать пороговые значения инноваций для переключения режимов работы: если значение инновации какого-либо канала не превышает заданной допустимой погрешности, то соответствующий элемент матрицы СКМ сравнивается с единицей, иначе – требуется коррекция.

В результате предложенных модификаций матрица СКМ \mathbf{S}_k определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k &= \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m); \quad s_i = \max(1, c_i), i = 1, 2, \dots, m; \\ c_i &= \frac{\text{diag}(\mathbf{V}_k - \beta_i \mathbf{R}_k)}{\text{diag}\left(\sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{z}}_k^-)(\gamma_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{z}}_k^-)^T\right)}, \text{ если } \mathbf{v}_i \geq \mathbf{v}_{i,\text{доп}}; \\ c_i &= 1; \text{ если } \mathbf{v}_i < \mathbf{v}_{i,\text{доп}}; \\ \mathbf{V}_k &= \begin{cases} \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_o^T, k = 1 \\ \frac{\rho \mathbf{v}_{k-1} + \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T}{1 + \rho}, k \geq 2; \mathbf{v}_k = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_k^- \end{cases}. \end{aligned} \quad (1)$$

Алгоритм предложенного нечеткого адаптивного фильтра Калмана для нелинейной системы представлен на Рис. 6.

Для иллюстрации эффективности предложенного алгоритма, проведено применение адаптивного фильтра Калмана к задаче БИНС, модель которой описана следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (2)$$

где \mathbf{X} – вектор состояния, включающий в себя скорость, положение (широта, долгота и высота), кватернионы, погрешности акселерометров и датчиков угловой скорости; \mathbf{Z} – вектор измерения (скорость и положение от внешних источников); $\mathbf{f}(\cdot)$ – вектор нелинейной функции модели БИНС; $\mathbf{h}(\cdot)$ – нелинейные функции модели измерения; \mathbf{W} – шум процесса ($n \times 1$); \mathbf{V} – шум

измерения ($m \times 1$); \mathbf{w} и \mathbf{v} имеют нулевые математические ожидания и ковариационные матрицы \mathbf{Q}_k и \mathbf{R}_k соответственно.

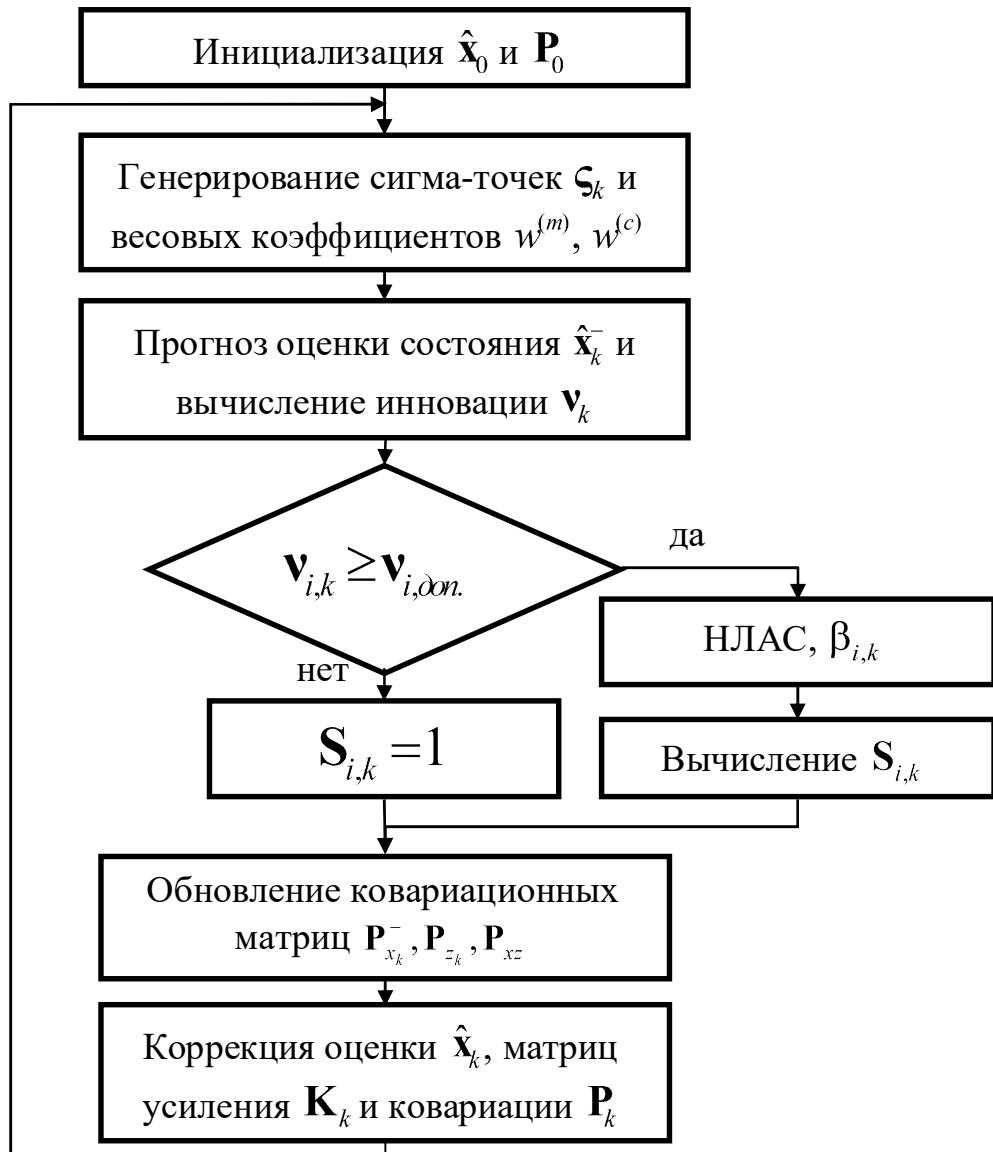


Рис. 6. Алгоритм нечеткого адаптивного фильтра Калмана.

Проведено сравнение адаптивного фильтра Калмана с фильтрами, имеющими различные фиксированные значения коэффициента смягчения. Моделирование проводилось при различных условиях неопределенности.

На Рис. 7, а приведены погрешности географических координат по трем каналам (долгота, широта, высота), а на Рис. 7, б - сферические погрешности положения при фильтрации с использованием 3-х фильтров.

При фиксированном значении коэффициента смягчения сравниваемые фильтры (фильтры SU1, SU2, SU3) не адекватно корректируют погрешности по всем каналам. Фильтр FUZ с помощью блока НЛАС и условия переключения позволяет настроить компоненты матрицы СКМ по каналам, что повышает производительность и точность оценки. Как следует из полученных расчетов, предложенный фильтр дает наименьшую погрешность по всем каналам и минимальную сферическую погрешность.

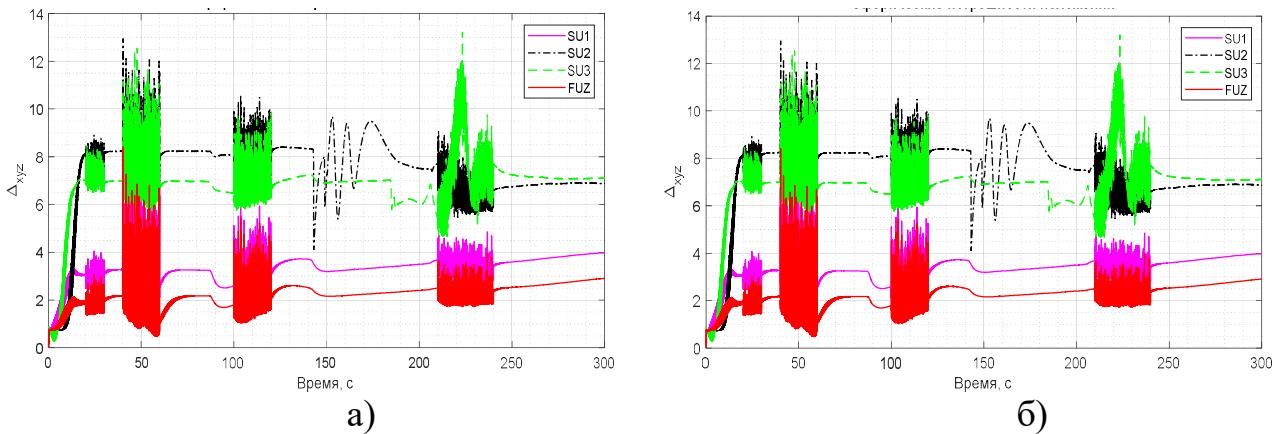


Рис. 7. Погрешности географических координат (а) и сферические погрешности положений (б)

Результаты моделирования на примере решения задачи БИНС 16-го порядка показали, что применение нечеткой логической адаптивной системы и введение порогового условия переключения для настройки коэффициента смягчения по каналам улучшают способность точного отслеживания оценки состояния, обеспечивают нечувствительность к выбросам параметров системы, а также повышают общую производительность процесса фильтрации.

Четвертая глава посвящена методическому и программному обеспечению для решения задач, рассмотренных в главах 1-3, на основе нечеткого подхода.

Методику, предложенную в первой главе, можно использовать для исследования устойчивости нечетких динамических систем, описываемых нечеткими нелинейными дифференциальными уравнениями 2-го и более высокого порядка. Это линейные и нелинейные объекты управления, датчики, исполнительные механизмы и другие компоненты систем управления. Для систем более высокого порядка строятся многолистные нечеткие фазовые траектории.

Методика решения задачи анализа и устойчивости динамической системы, описываемой нелинейными нечеткими дифференциальными уравнениями, заключается в следующем:

1) Составляется нечеткое ДУ системы в форме Коши в матричной форме с учетом различных неопределенных факторов:

$$\dot{x} = A_h x, \quad x(0) = x_{0_h}. \quad (3)$$

2) На основании значений детерминала $\delta = \det A$ и следа матрицы системы $\tau = \text{trace } A$, различаются следующие случаи:

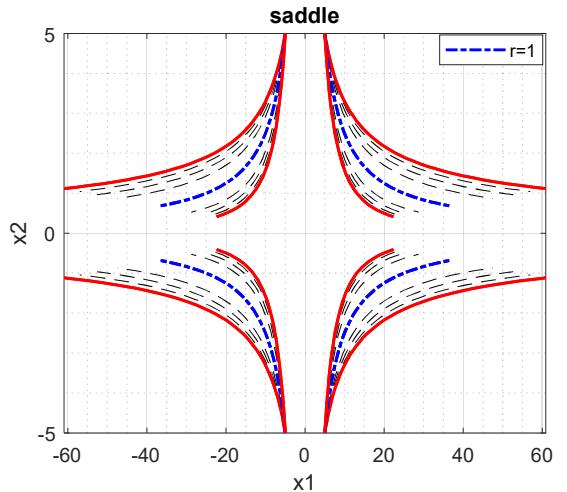
а) Если $\delta < 0$, тогда нечеткая фазовая траектория (НФТ) системы (3) имеет седловую точку в начале координат (Рис. 8, а).

б) Если $\delta > 0$ и $\tau^2 - 4\delta \geq 0$, тогда нечеткая фазовая траектория системы (3) имеет узел в начале координат; она устойчива, если $\tau < 0$ (Рис. 8, б) и неустойчива, если $\tau > 0$.

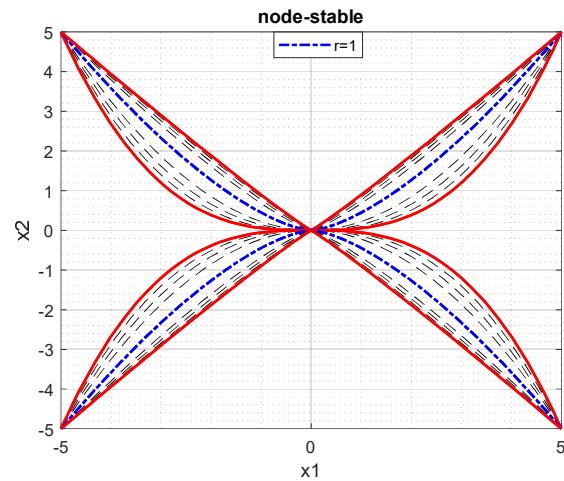
в) Если $\delta > 0$, $\tau^2 - 4\delta < 0$ и $\tau \neq 0$, тогда нечеткая фазовая траектория системы (3) имеет фокус в начале координат; она устойчива, если $\tau < 0$ (Рис. 8, в) и неустойчива, если $\tau > 0$.

г) Если $\delta > 0$ и $\tau = 0$, тогда нечеткая фазовая траектория системы (3) имеет центр в начале координат (Рис. 8, г).

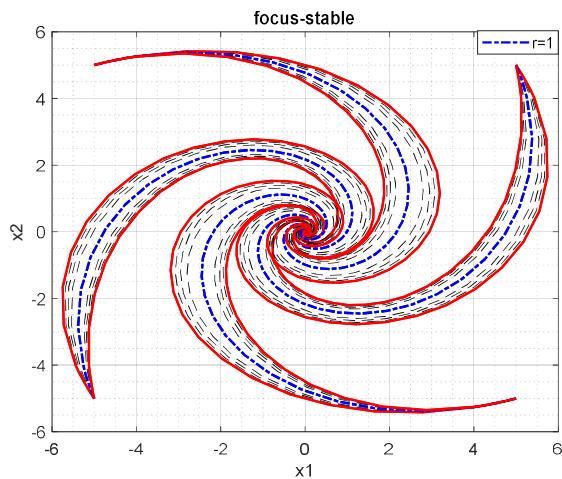
3) Анализируются полученные результаты: наличие сильных и слабых фазовых траекторий для различных моделей, их устойчивость при различных нечетких параметрах.



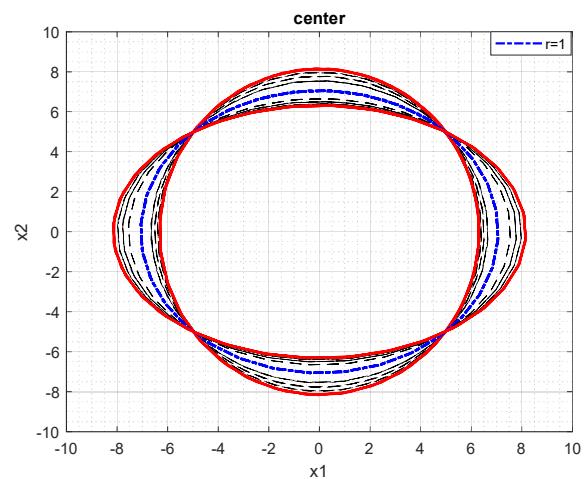
$$a) A = [a_h \ 0; 0 \ b_h]; b_h < 0 < a_h$$



$$b) A = [a_h \ 0; 0 \ b_h]; b_h \leq a_h < 0$$



$$v) A = [a_h \ -b_h; b_h \ a_h]; a_h < 0$$



$$g) A = [a_h \ -b_h; b_h \ a_h]; a_h > 0$$

Рис. 8. Нечеткие фазовые траектории

Методику решения задачи анализа погрешностей первичных датчиков и блоков обработки первичной информации, рассмотренную во второй и третьей главах, объединяет совокупность нечетких логических моделей (Рис. 9). Для решения задачи анализа погрешностей первичных датчиков и применения модифицированного Калмана фильтра выполняют следующие действия:

- 1) составляется модель в виде нечетких нелинейных дифференциальных уравнений;
- 2) применяется нечеткая модель типа Такаги–Сугено с несколькими входами и одним выходом;
- 3) задав функции принадлежностей входов (операция фазификации – fz), логические правила обработки фазифицированных переменных (нечеткие логические операции: «И», «ИЛИ», «НЕ» и правила их обработки из базы

знаний), а также выбрав процедуру дефазификации (dfz), реализуется нечеткий логический контроллер (вычислитель);

- 4) с помощью вычислителя решаются задачи анализа.

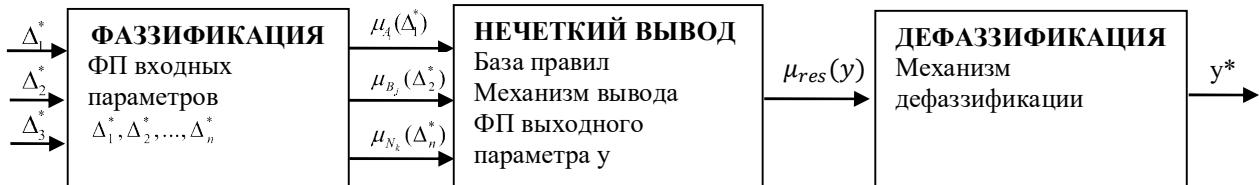


Рис. 9. Нечеткая модель с несколькими входами и одним выходом

Методика решения задачи настройки НЛАС в задаче фильтрации в нелинейных динамических системах предполагает использование инновационного процесса и состоит из следующих этапов:

- 1) формируется нечеткая модель с двумя входами (Рис. 10, а), в качестве которых используются степень расхождения процесса μ и усредненная величина инноваций ξ и одним выходом (коэффициент смягчения β).
- 2) определяются нечеткие правила формирования коэффициента смягчения β из условия обратной пропорциональности элемента матрицы субоптимального коэффициента масштабирования каждого канала системы его значению расхождения μ .

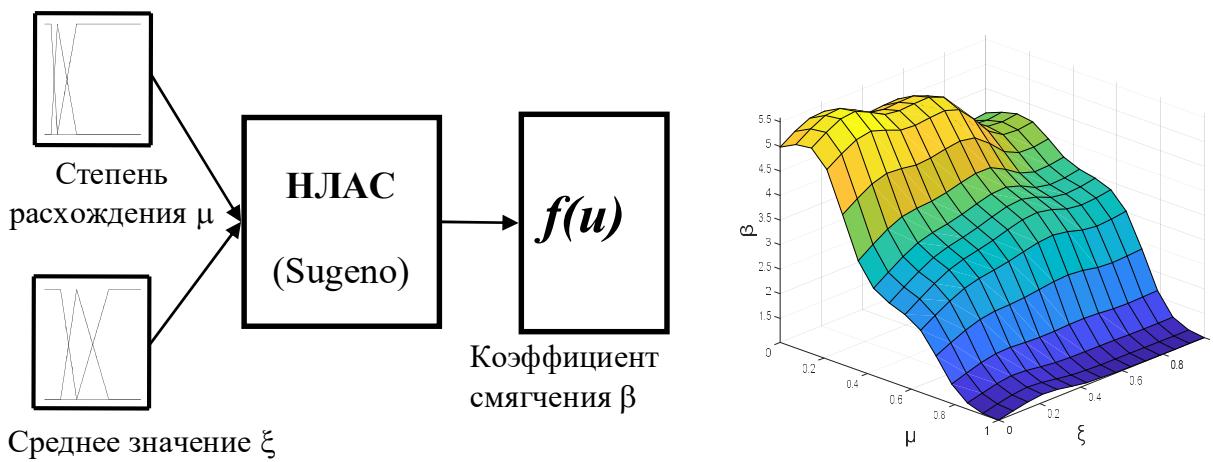


Рис. 10. Структура НЛАС и поведение коэффициентов

НЛАС, контролируя параметры μ и ξ , может оперативно настраивать коэффициент смягчения β в соответствии с нечеткими правилами (Рис. 10, б).

Программное обеспечение, реализующее предложенные методики, построено по модульному принципу, т.е. представляет собой набор модулей (блоков), решающих различные задачи навигации и управления и объединенных единой программой (Рис. 11).

Для решения задачи устойчивости из общего набора используются следующие модули: блок ДУ системы, блок задания нечетких параметров системы и начальных условий, блок классификации НФТ, блок графического представления НФТ (Рис. 12).



Рис. 11. Общая структура ПО

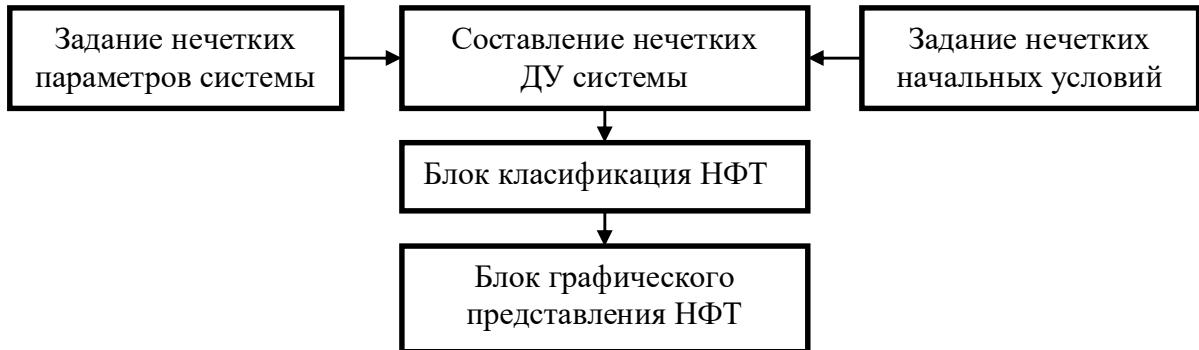


Рис. 12. Модуль для задачи исследования устойчивости

Для решения задачи исследования погрешностей из общего набора используются следующие модули: модуль фазификации входных параметров; модуль нечеткого вывода и модуль дефазификации (Рис. 13).

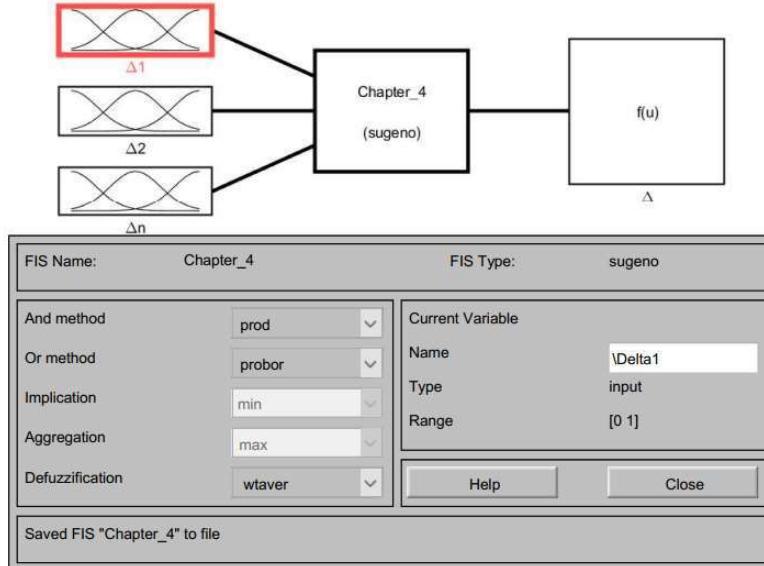


Рис. 13. Модуль исследования погрешностей первичных датчиков

Для решения задачи навигации из общего набора используются следующие модули (Рис. 14):

- 1) блок исследуемого объекта (модели процесса и модели измерения);
- 2) блок настройки условий исследования (параметры неопределенности системы, начальные значения, настройка фильтров);
- 3) блок датчиков (акселерометров и гироскопов и других датчиков);
- 4) блок исследуемых фильтров (расширенного ФК, ансцентного ФК, сильного следящего ансцентного ФК, нечеткого адаптивного ФК);
- 5) блоки анализа выходных данных и графиков.

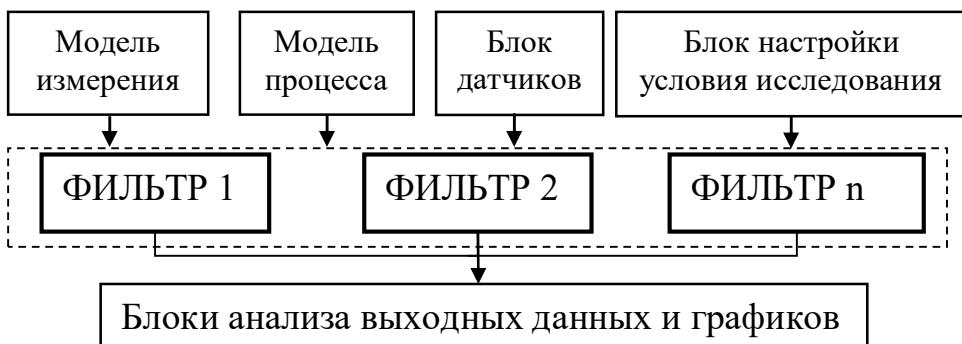


Рис. 14. Состав модулей программы для решения задачи БИНС

Отдельные блоки программы легко заменить в зависимости от описания исследуемой системы, что позволяет исследовать задачи фильтрации различных нелинейных динамических систем.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан алгоритм нечеткой адаптивной фильтрации с применением нечеткой логической адаптивной системы применительно к нелинейной задаче БИНС, позволяющий настроить компоненты матрицы СКМ по каналам, что повышает точность отслеживания оценки состояния, обеспечивает нечувствительность к выбросам параметров системы, а также повышает общую производительность процесса фильтрации. Применение разработанного алгоритма позволяет повысить точность малогабаритной БИНС в условиях отсутствия априорной стохастической информации по результатам математического моделирования в среднем на 7 - 11%.

2. Разработан нечеткий алгоритм обработки погрешностей ВТГ для определения весовых коэффициентов существующих дефектов, что позволяет компенсировать погрешности при обработке и реализации навигационных алгоритмов на базе ВТГ. Сформулированы рекомендации по обеспечению требуемой точности систем управления и навигации БПЛА.

3. Методом нечеткой фазовой траектории исследована задача устойчивости ВТГ с нечеткими начальными условиями и нечеткими параметрами. Полученные нечеткие «сильные/слабые» фазовые траектории для различных моделей ВТГ характеризуют свойства устойчивости при различных нечетких параметрах, что дает более адекватные оценки при расчете и настройке параметров резонатора. Предложенный метод можно использовать для исследования устойчивости нечетких динамических систем, описываемых нечеткими нелинейными дифференциальными уравнениями 2-го и более высокого порядка.

4. Методом нечеткого преобразования Лапласа, операторным методом и нечетким методом Галеркина исследованы нечеткие нелинейные и линейные математические модели движения кольцевого резонатора ВТГ БИНС, подтвердившие эффективность предложенного нечеткого подхода к описанию нечетких моделей волновых процессов с учетом неопределеностей по сравнению с четкими решениями.

5. Для настройки, анализа и синтеза нечетких алгоритмов навигации и управления предложено методическое и программное обеспечение, построенное по модульному принципу и позволяющее существенно упростить и ускорить проводимые исследования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Оценка эффективности сильного следящего ансцентного фильтра Калмана с применением нечеткой модели // Лесной вестник/Forestry Bulletin. № 4. 2019. Т. 23. С. 88-97. (0,6 п.л./0,3 п.л.).
2. Деменков Н.П., Чан Д.М. Применение нечеткой модели к задаче фильтрации в нелинейных динамических системах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. № 1. 2020. С. 85-100. (1 п.л./0,5 п.л.).
3. Чан Д.М. Разработка алгоритма настройки субоптимального коэффициента масштабирования в задаче фильтрации БИНС // Автоматизация. Современные технологии. № 7. 2020. Т. 74. С. 329-334. (0,4 п.л.).
4. Demenkov N.P., Tran D.M. Fuzzy Description Hemispherical Resonator Gyro Error // Procedia Computer Science. Vol. 150 (2019). P. 88–94. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
5. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Основные погрешности волнового твердотельного гироскопа // Труды международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (МНТК ФТИ-2017)». М., 2017. С. 386-389. (0,3 п.л./0,15 п.л.).
6. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Влияние технологических дефектов на погрешность волнового твердотельного гироскопа // Труды международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения - INTERMATIC». М., 2017. Часть 3. С. 626-629. (0,3 п.л./0,15 п.л.).
7. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Исследование погрешностей волнового твердотельного гироскопа на основе нечеткого подхода // Тез. докл. конференции «XLII академические чтения по космонавтике». М., 2018. С. 322. (0,1 п.л./0,05 п.л.).
8. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Применение нечеткого фильтра Калмана к навигационной задаче в БИНС с волновыми твердотельными гироскопами // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 3. С. 576-581. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
9. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Исследование калмановской фильтрации в нелинейных динамических системах // Труды XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. –М.: ИПУ РАН. 2019. с.844-848. (0,3 п.л./0,15 п.л.).
10. Деменков Н.П., Чан Динь Минь. Исследование нечеткого адаптивного фильтра в задаче БИНС// Тез. докл. конференции «XLIV академические чтения по космонавтике». М., 2020. Т. 2. С. 247-248. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).