

INTEGRATION OF SPLINE FUNCTION METHODS AND FUZZY LOGIC FOR SOLVING COMPLEX NAVIGATION PROBLEMS

I. V. Yuyukin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This paper explores the possibility of integrating fuzzy set theory with modified piecewise approximations into a unified framework for developing advanced navigation models. The optimal combination of fuzzy logic and spline functions makes it possible to account for uncertainty and inaccuracy in navigation measurements through the application of point interpolation principles. The theoretical basis of the study relies on the fuzzy approximation theorem, which states that any system can be synthesized using fuzzy logic. A practical example is provided, demonstrating the use of fuzzy sets in spline-based trajectory modeling to ensure timely avoidance of restricted navigation areas and to determine optimal trajectory parameters under routing uncertainty. An experiment was conducted to synthesize a complex spline trajectory of a vessel using linguistic variables within fuzzy logic theory. The feasibility of combining spline function methods and fuzzy set compositions was empirically confirmed through the approximation of a smooth trajectory, which increased the speed of soft computing by 15 %. The proposed hybrid approach can serve as a mathematical foundation for adaptive fuzzy models designed to predict the trajectories of mobile objects, contributing to the development of unmanned navigation concepts. A paradigm shift is anticipated—from traditional requirements for measurement accuracy based on probabilistic and statistical methods to the fuzzy domain of information granulation. The paper also examines the alternative applicability of fuzzy logic versus probability theory when using membership functions to address non-standard navigation problems. Furthermore, the study investigates the modeling of a watch officer's decision-making process based on fuzzy logic principles, emphasizing the influence of the human factor on navigational safety in intelligent hybrid systems. Managing uncertainty in cognitive navigation tasks is viewed as a key aspect of preventing emergencies through the application of fuzzy logic algebra.

Keywords: fuzzy set theory, point interpolation, fuzzy approximation theorem, linguistic variable, soft computing, adaptive fuzzy models, granulation of information, membership function, intelligent hybrid system, fuzzy logic algebra.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Integration of spline function methods and fuzzy logic for solving complex navigation problems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 653–671. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-653-671.

УДК 656.61.052

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ СУДОВОЖДЕНИЯ

И. В. Ююкин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование возможности комплексирования теории нечетких множеств с модификациями кусочных аппроксимаций в одной универсальной парадигме для создания перспективных моделей навигации. При оптимальной комбинаторике нечеткой логики со сплайн-функцией допустимо учитывать неопределенность и неточность данных навигационных измерений на основе реализации принципа точечного интерполирования. Все предположения базируются на доказательстве теоремы нечеткой аппроксимации, согласно которой любая математическая система может быть синтезирована на основе нечеткой логики. Рассматривается практический аспект применения нечетких множеств в проблеме моделирования сплайнами конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания с целью выбора оптимальных параметров линии пути в условиях неопределенности маршрутизации. Выполнен

эксперимент синтезирования сложной линии сплайн-пути судна с применением лингвистических переменных теории нечеткой логики. Эмпирически подтверждена возможность комплексирования методов сплайн-функций и композиций нечетких множеств на примере приближения гладкой траектории с увеличением быстродействия «мягких вычислений» на 15 %. Апробированный гибридный подход предлагается использовать как математическое обеспечение адаптивных нечетких моделей для успешного прогнозирования траектории движения мобильного объекта с целью формирования концепции безэкипажного судоходства в масштабе реального времени. Прогнозируется смещение акцента от традиционных требований точности измерений в области вероятностно-статистических методов в нечеткую область «грануляции информации». Проанализирован вопрос альтернативной применимости нечеткой логики взамен теории вероятностей при использовании функции принадлежности для решения нестандартных задач. Выдвигается гипотеза необходимости анализа локальных свойств измерительной информации и методов ее обработки на основе принципов теории нечетких множеств. Исследован вопрос имитации принятия решения судоводителем на основе нечеткой логики для учета влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания при поддержке интеллектуальной гибридной системы. Предполагается, что управление неопределенностью при решении когнитивных проблем судовождения является важным вопросом предотвращения аварийных ситуаций вследствие применения алгебры нечеткой логики.

Ключевые слова: теория нечетких множеств, точечное интерполирование, теорема нечеткой аппроксимации, лингвистическая переменная, «мягкие вычисления», адаптивные нечеткие модели, грануляция информации, функция принадлежности, интеллектуальная гибридная система, алгебра нечеткой логики.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Комплексирование методов сплайн-функций и нечеткой логики для решения сложных задач судовождения / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 653–671. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-653-671. — EDN EGJBTH.

Введение (Introduction)

Возможностью для реализации перспективного подхода к нивелированию влияния «человеческого фактора» на аварийность флота представляется развитие современной системы поддержки принятия решений (СППР), формируемое с использованием формально-логических схем нечеткой логики, что обеспечивает практическую адекватность имитации мыслительных процессов судоводителя [1]. В аспекте вариативности феномена учета «человеческого фактора» частным примером является применение в судовождении нетрадиционной концепции «владения ситуацией», интерпретируемой как осведомленность судоводителя о том, что означает текущая навигационная информация и его способность прогнозировать развитие ситуации в некотором интервале времени и пространства [2]. В современном аспекте ситуационная осведомленность рассматривается как комбинация мер формализованной оценки риска в виде комплекса стратегий обеспечения безопасности в противодействие злоумышленным угрозам по перехвату управления судном [3]. Следовательно, в условиях неопределенности с полным основанием можно сделать вывод о наличии субъективного «человеческого фактора» и необходимости его оценки неформальными методами в программируемых задачах СППР.

Нечеткая логика фактически понимается не в полном смысле таковой. Многозначную логику можно рассматривать как приближенное к реальности описание возможности человека рассуждать и принимать рациональные решения на основе неопределенной, неполной и противоречивой информации при отсутствии точных измерений и вычислений¹. Нечеткую логику необходимо воспринимать как точную логику, позволяющую оперировать приблизительными человеческими рассуждениями с возможностью условно определять то, что, по сути, является неточным. Математически логический и теоретико-множественный аспекты признаются основными компонентами нечеткой логики, а ее отличительными чертами являются градуированные значения истинности, выраженные в лингвистических терминах. Таким образом, нечеткую логику можно интерпретировать как точную логику неточных и приблизительных рассуждений [4]. В условиях неопределенности принятия решения оказывается эффективным применение в формальной математике теории

¹ Ягер Р. Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. — 406 с.

нечетких множеств на основе использования принципов нечеткой логики. Неполнота и неточность информации могут заключаться в принципиальной невозможности полного сбора и учета рассеянной информации об анализируемом объекте или процессе, в также возможности проявления неожиданных свойств исследуемой модели, существование которых изначально не предполагалось.

Тенденция использования одного источника информации или одного метода обработки навигационной информации признается ненадежной для обеспечения безопасности судовождения². Комплексирование концепции нечетких множеств и модификации сплайн-функций в рамках одной универсальной парадигмы открывает перспективные возможности для моделирования сложных навигационных систем с наличием как неопределенности, так и необходимости гладкой интерполяции данных при возможности автоматической адаптации результатов измерений. Например, практическое применение нечеткой логики для синтезирования сплайнами плавности конфигурации траектории в целях своевременного уклонения от запретных районов плавания может позволить решить проблему выбора оптимальных параметров линии пути в условиях неопределенности маршрутизации.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Определить фактор успешности конвергенции теории нечетких множеств с методами кусочной аппроксимации.
2. Оценить возможность комплексирования методов сплайн-функций и нечеткой логики на примере решения задачи маршрутизации с моделированием плавной траектории.
3. Исследовать вопрос применимости теории вероятности и возможностей нечеткой логики для решения нестандартных задач.
4. Выявить преимущества решения задачи автономного плавания на основе использования принципов нечеткой логики при синтезировании сплайнами плавности конфигурации траектории.
5. Рассмотреть применимость реализации системы поддержки принятия решений на основе теории нечетких множеств.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Профессор Калифорнийского университета Л. А. Заде сформулировал тезис о том, что логика человеческого рассуждения основывается не на классической двузначной логике, а на логике с нечеткими значениями истинности, с нечеткими ассоциациями и нечеткими правилами. При традиционном подходе к учету «человеческого фактора» в поисках точности аналитики пытались подогнать реальный мир под математические модели, которые не оставляют места нечеткости. При этом математики стремились выявить законы, управляющие поведением как отдельных людей, так и их групп с помощью формализованных выражений, подобных используемым при анализе механистических систем. С точки зрения Л. А. Заде это являлось нерациональным усилием. Русский и советский академик и инженер-кораблестроитель А. Н. Крылов в «Лекциях о приближенных вычислениях» (М.: Гос. издание технико-теоретической литературы, 1954. — С. 7) отмечал необоснованность стремления к строгой точности решения прагматических задач следующим образом: *«В современных руководствах математического анализа преимущественное внимание обращается на вполне строгое установление основных понятий и на строгое доказательство всех полученных из них выводов. Ввиду этого зачастую весьма обстоятельно доказывается существование решения какого-либо вопроса и устанавливается теоретическая возможность получения его с любой степенью точности, и гораздо меньшее внимание уделяется практической части дела, т. е. действительному получению решения с данным, обыкновенно грубым, приближением, которое только и требуется в приложениях, но которое надо получить с возможно меньшою затратою труда и времени».*

Вклад нечеткой логики заключается в высокой способности точно определять то, что является неточным. В 1973 г. Л. А. Заде ввел в научный оборот понятие *лингвистической переменной*,

² Логиновский В. А. Комплексная обработка навигационных измерений: учеб. пособие. М: В/О Мортехинфомреклама, 1988. 37 с.

которая формализует слова и фразы естественного языка³. Под лингвистической переменной понимается такая переменная, значениями которой являются слова и словосочетания на естественном или искусственном языке. Фактически ученым были разработаны новые оригинальные приемы интерактивной лингвистики, позволяющие работать с нечеткими переменными подобно тому, как программисты работают с обычными логическими условиями. Теория вычислений со словами позволяет математически извлекать из фраз их смысл и оперировать с восприятиями посредством нечетких правил. Использование нечеткой логики в качестве языка моделирования, когда объекты исследования определены нечетко, признается естественным подходом. При этом парадоксальным является то, что во многих практических приложениях нечеткая логика применяется в качестве языка программирования для систем, которые точно определены. Объяснение заключается в том, что, как правило, точность сопряжена с затратами. В тех случаях, когда допускается неточность, снижение затрат может быть достигнуто за счет уменьшения точности, например, за счет сжатия данных, компрессии информации и обобщения. Результатом неточности является моделирование, которое точно не определено. На данном этапе реализуется язык нечеткого моделирования. Так можно обосновать ключевую идею, лежащую в основе гамбита нечеткой логики [4].

Традиционные методы, основанные на использовании исчисления предиката в смысле однозначной функции, определенной на некотором множестве, не подходят для имитации принятия решения, основанного на здравом смысле, поскольку строгое классическое суждение не предусматривает неопределенности. В логике классической теории множества пропозиция как тип содержания единицы языка в виде мысленного образа сущности языковой ситуации является истинной или ложной, и никакие градации истинности при этом не допускаются. Применение нечеткого множества является альтернативой формализации лингвистической информации для построения устойчивых математических моделей. В основе этого понятия находится представление о том, что составляющие нечеткое множество элементы могут обладать общим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к этому множеству с различной степенью точности. Нечеткое множество как неевклидов подход к теории множеств представляет собой совокупность нечетких элементов, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать, принадлежит этот элемент рассматриваемому множеству или нет. По сути, нечеткая структура обеспечивает естественный способ решения проблем, в которых источником неточности является отсутствие четко определенных критериев принадлежности к множественному классу, а не хаотичное воздействие случайных величин, традиционно формирующих закон распределения в качестве оценки вероятности проявления случайности.

Конвергенцию теории нечетких множеств и методов сплайн-функций можно объяснить на конкретном примере синтезирования плавности линии традиционной окружности. В расплывчатых условиях нечеткой логики окружность классической математики трансформируется в контур чернильного пятна с нечеткими границами. Применимость методов сплайн-функций эффективно реализуется даже в случае моделирования сложного контура, так как для синтезирования кривой любой степени сложности первоначально необходим грамотно подобранный набор контрольных узловых точек. Как известно, плоская кривая может быть представлена совокупностью точек при условии их достаточно близкого расположения друг к другу. В первом приближении определение кривой по известному расположению ряда точек представляет традиционное решение задачи интерполяции. Например, с помощью полиномиальной интерполяции можно обеспечить прохождение кривой через известные точечные координаты. Для этого требуется только определение коэффициентов полинома определенной степени. В целом реалистичность формы кривой линии, зафиксированной между заданными точками, зависит от порядка полинома и выбранных граничных условий.

С математической точки зрения можно использовать в общем случае задачу *аппроксимации*, когда значения контрольных точек заданы с условной точностью и необходимо определить оптимальную кривую, наилучшим образом описывающую изогеометрическую тенденцию неточного

³ Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Лори, 2021. 150 с.

представления данных. В вариативном контексте кривая может проходить только через некоторые из заданных точек, но может и не проходить ни через одну из них. Задача аппроксимирования эмпирических данных возникает, когда необходимо определить плавность линии на основании результатов приблизительных измерений с проведением моделируемой линии в некоторой окрестности узловых точек. Интерполирующая кривая формализует оценочные значения числовых данных в рассматриваемом диапазоне аргументации функции как для стандартной окружности, так и для контура чернильного пятна. Практическая задача построения по дискретным данным кривой сложной формы с сохранением выделенных геометрических характеристик исходных измерительных данных понимается как известная математическая проблема точечной интерполяции⁴. Без сомнения, точечное интерполирование имитирует способность синтезировать граничную форму чернильного пятна самым реалистичным образом.

Заметим, что вычисление значений функции в точках, лежащих за пределами промежутка, образованного узлами, организуется *экстраполированием* при сохранении в узком смысле наименования *интерполирование* в случае, когда точка математического интереса находится между сеточными узлами. Если по условию постановки задачи отсутствует заданное значение переменной в промежуточной точке, то для вычисления соответствующего значения функции приходится выполнять процедуру *интерполирования* исходя из предпосылки, что замена оригинальной функции построенным на основе использования принципа искусственного приближения интерполяционным полиномом влечет за собой ничтожную погрешность. В простейшем случае линейной интерполяции реализуется практическое правило «пропорциональных частей», которому математики механически следуют тогда, когда необходимо решить задачу интерполяции в простом варианте.

Прикладным значением с использованием возможностей сплайн-функций является решение задачи генерализации изображения подводного рельефа как сложной задачи судовождения [5]. В аспекте рассматриваемого вопроса особое значение приобретает проблема *синтезирования безопасной изобаты*, которая, по математической сути, имеет геометрическую схожесть с контуром чернильного пятна в соответствии с постулатами теории нечеткого множества. При этом необходимо учитывать, что ни при каких обстоятельствах безопасная изобата не должна допускать любых графических конфликтов, таких, например, как геометрическая петля или невероятный феномен пересечения изобат. Цель процесса генерализации фактически заключается в проверке согласованности геометрического решения путем выявления каскадных конфликтов из-за возможных математических ошибок. Спрямление безопасной изобаты акцентируется на локальной допустимой деформации при сохранении стратегических описательных характеристик эмпирической кривой с обеспечением процедуры сглаживания на глубокой стороне линии равных значений глубин.

Геометрические противоречия устраняются во время операции картографического обобщения. Обобщение контурных линий морской тематики реализуется на интуитивной основе опытного картографа в соответствии с масштабом и особенностями подводного рельефа при замене индивидуальных понятий собирательными, отвлечении от частностей и условных деталей для отчетливой визуализации главных черт воспроизведения изобат. В условиях современности автоматизированная обработка гидрографической информации формально доступна к практической реализации, но проверка батиметрических данных остается ручным процессом в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа, что определяет необходимость интерактивного исправления нечетких данных при непосредственном использовании «человеческого фактора». Разрешение любых картографических неопределенностей авторитетно осуществляется опытным гидрографом. Интуитивное *картографическое обобщение* соответствует общему принципу безопасного судоходства для обеспечения тенденции смещения обобщенного контура глубины в глубоководные районы.

При картографическом обобщении изобат автоматизированная система не всегда может правильно идентифицировать, какая из сторон безопасной изобаты глубже. Обработка гидрографических данных в ручном режиме сокращается в результате акцентирования внимания только на те

⁴ Гончаров В. В. Теория интерполирования и приближения функций. М-Л.: ОНТИ-ГТТИ, 1934. 316 с.

области, в которых определена значительная неопределенность промеров для выявления аномальных морфологических особенностей морского дна. При любых обстоятельствах навигационная карта должна соответствовать правилу смещения безопасной изобаты в сторону увеличения глубины для реализации гарантии того, что судно никогда не сядет на мель из-за искаженного предоставления гидрографической информации [6].

Неопределенность наличия навигационных опасностей приводит к неопределенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа. Визуальные деформации безопасной изобаты могут быть устранены путем локального смещения изолинии в сторону более глубокой воды за счет реализации математической операции сглаживания. Для улучшения эстетических характеристик процедура сглаживания выполняется путем устранения колебаний синтезированной линии при сохранении информации о форме и ориентации алгебраической кривой с помощью устранения несущественных деталей. Сглаживание выполняется путем сохранения базисных точек сплайновой кривой всегда на глубокой стороне исходной линии, чтобы финальный результат соответствовал безопасности представления гидрографической информации. Оперативное управление формой моделируемой изобаты осуществляется за счет плавности, гладкости и задания оптимального количества маркерных точек узлов аппроксимации для повышения сплайновой адаптивности и гибкости геометрической модели за счет своей вычислительной эффективности при сегментировании контурных линий высокой сложности.

Адекватное электронное представление навигационной нагрузки должно создаваться как удобочитаемая карта, максимально приближенная к морфологической реальности. В ситуациях использования опыта гидрографа логично применять нечеткую логику с целью достижения реалистичности отражения морфологического генезиса. Апробация сплайн-аппроксимации изобаты позволяет аналогичным образом формализовать расплывчатый контур чернильного пятна при создании предпосылки применения теории нечетких множеств для решения сложных задач судовождения. В аспекте использовании нечеткой логики для решения прикладных задач алгоритмы дополнительно основываются на корректировке функции принадлежности, сформированной на основе экспертного заключения, выполненного на базе анализа агрегированных мнений.

Результаты (Results)

В процессе решения классических задач судовождения используется многофакторная информация о навигационной обстановке. В условиях высокого уровня автоматизации навигационных комплексов помимо показаний многочисленных приборов, штурман интуитивно дополнительно использует обзорно-сравнительные методы навигации на основе обобщения коллективного судоводительского опыта. Представляется перспективным учитывать так называемые *лоцманские методы*, по формальным принципам реализуемые на практике при плавании в сложных условиях для обеспечения высокой помехозащищенности навигационных измерений. При этом конкретная ситуация может не соответствовать прогнозируемой теоретической точности запланированной обсервации. В результате комбинирования разнородной информации у опытного судоводителя создается полная картина ретроспективной обстановки. Несмотря на то, что компьютеризированная навигационная аппаратура является надежной, персональную ответственность за принятие адаптированного решения по управлению судном несет судоводитель. При этом вахтенный помощник обязан контролировать достоверность автоматизированной информации всеми возможными способами на основе критических субъективных оценок. Возможность математической формализации навыков опытного вахтенного помощника появляется при условии применения теории нечетких множеств (THM).

Наиболее перспективным направлением комплексной обработки навигационной информации представляется композиционное объединение возможностей арсенала *теории сплайн-функций с элементами нечеткой логики*. Для реализации данной идеи существуют конкретные теоретические предпосылки неформальной математики. Объединение концепций нечетких множеств и сплайн-функций

ций в судовождении может быть объективным для комплексного решения задач, связанных с неточностью исходных данных, а также с неопределенностью правил безопасного управления судном.

Основу ТНМ составляет так называемая *функция принадлежности*, которая хорошо описывает условно обозначенные границы нечетких множеств. Графическое понятие *треугольной функции* принадлежности μ отображено на рис. 1 [7]. Как показано на рисунке, универсум U является континуумом для каждого i значения некоторого нечеткого множества A для учета неточности в определении меры принадлежности. По сути, функция принадлежности определяет фактор *информационной грануляции*. Высокая степень гранулированности информации приводит к сокращению объемов обрабатываемой информации и к однозначному повышению быстродействия алгоритмов в задачах моделирования, управления, оптимизации и диагностики⁵.

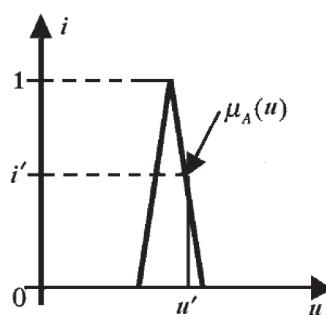


Рис. 1. Треугольная функция
меры принадлежности

Функции принадлежности могут выражать лингвистическую неопределенность, связанную с различными семантическими оттенками лингвистических переменных. В практике общения многие слова имеют неточные смысловые значения, которые даже в случае одного контекста могут иметь двусмысленную интерпретацию. Посредством нечетких множеств можно отражать величины рисков, имеющих место в процессе принятия решений судоводителем в критических навигационных операциях, для решения задачи многокритериальной оптимизации при наличии нечеткой информации.

Большинство человеческих знаний и связей с внешним миром включает такие построения, которые нельзя считать множествами в классическом смысле. Их следует считать нечеткими множествами с учетом степени принадлежности, т. е. *классами с нечеткими границами*, когда переход от функции принадлежности μ некоторого элемента x к определенному нечеткому множеству A (см. рис. 1) происходит не резко, а постепенно. Традиционные правила основаны на утверждении истинности или ложности, однако в процессах принятия решений используются менее строгие нечеткие правила, когда нельзя однозначно оценить истинность или ложность события или факта. При этом характеристическая функция μ в виде меры принадлежности принимает значение «1» для каждого из элементов нечеткого множества, а значение «0» для всех остальных элементов, не входящих в нечеткие границы рассматриваемой совокупности элементов (см. рис. 1).

Границами нечеткого множества являются элементы так называемого «универсума», для которых значения функции принадлежности отличны от «0» и «1». В случае «конфликтной ситуации», при которой объект нечеткого множества придерживается противоположных стратегий при наличии множества вариантов принятия решений, формируется нечеткая модель неопределенного уровня. В классической теории множеств принадлежность элементов множеству оценивается в бинарных терминах в соответствии с однозначным условием: элемент либо принадлежит, либо не принадлежит данному множеству. ТНМ оперирует постулатом градуированной оценки отношения принадлежности элементов неопределенному множеству с описанием факта отношения при помощи функции принадлежности μ .

⁵ Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М: Лаборатория знаний, 2024. — 801 с.

Нечеткие множества — это оправданное расширение классической теории множеств, поскольку мера принадлежности может действовать так же, как индикаторная функция, отображая все элементы либо в «1», либо в «0», как в классическом варианте теории множеств.

Абсолютная ассоциативность с треугольной функцией принадлежности наблюдается у сплайна первой степени, который геометрически представляет собой ломаную линию, проходящую через i сеточные узлы точечного интерполяирования по оси абсцисс x на основе комплексирования «шапочных функций» $B_i(x_i)$, как показано на рис. 2 [8].

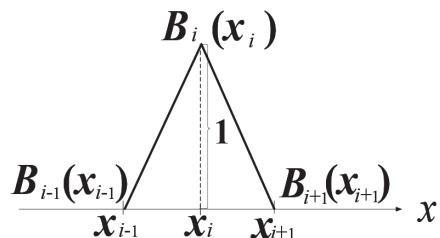


Рис. 2. Базис единичного линейного сплайна

Так как компоненты $B_{i-1}(x_{i-1})$, $B_i(x_i)$, $B_{i+1}(x_{i+1})$ финитны, то только в узле x_i отличен от нуля активный элемент B -сплайна с номером i при равенстве его функционального значения «1» (см. рис. 2). Реальная математическая кривая синтезируется путем умножения последовательности «шапочных» функций $B_i(x)$ на расчетные скалярные коэффициенты как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала. Таким образом, базисная финитная функция является вторичной по отношению к оригинальной навигационной функциональной зависимости [9]. B -сплайн является оригинальным математическим инструментарием для приближения навигационной функции и может выступить в процедуре рокировки треугольной функции принадлежности (см. рис. 1).

Геометрическая схожесть рис. 1 и 2 позволяет выдвинуть гипотезу представления сплайнов в виде нечетких множеств с утилизированием точных значений параметров сплайна. Взамен использования треугольных функций принадлежности как постулата ТНМ представляется гипотетическая возможность применения линейных B -сплайнов. При оптимальной комбинаторике нечеткой логики со сплайн-функциями становится допустимым учитывать неопределенность и неточность данных навигационных измерений на основе реализации принципа *точечного интерполяирования*.

Отдельно необходимо отметить преимущество использования подхода алгоритмизации СППР, позволяющего сформировать методики формализации сложных решений для нестандартных морских ситуаций на основе неформальной логики. Так как классические методы учета влияния на аварийность «человеческого фактора» характеризуются определенной долей субъективизма, для разработки конструктивного метода лучший эффект обеспечивает применение аппарата ТНМ с базовым атрибутом степени принадлежности μ как альтернативы плотности распределения вероятности по аксиоматике Колмогорова [10]. Теория вероятностей ориентирована на неопределенность, связанную со случайностью, а теория нечетких множеств — на неопределенность, вызванную расплывчатостью в смысле нечеткости. В теории вероятностей используются случайные величины, а в теории нечетких множеств — нечеткие множества и функция принадлежности [11]. Отсюда следует понимание различия между случайностью и нечеткостью процесса в том, что со случайностью связана *вероятностная мера*, а с нечеткостью — *мера возможности*. Адекватное понятие нечеткого события можно интерпретировать как точный смысл в контексте нечетких множеств с базовой идеей, состоящей в том, что основа для анализа информации имеет, скорее, *возможностный*, чем *вероятностный характер* [12].

Таким образом, условно можно считать, что функция принадлежности является нечетким аналогом плотности распределения вероятностей, но при этом нельзя считать меру принадлежности некоторой особенной абстракцией [13]. Плотность вероятности, характеризующая условную плот-

ность распределения случайной величины в данной точке, так же, как и функция распределения, является одной из форм закона распределения, но в отличие от функции распределения, плотность распределения вероятностей существует только для непрерывных случайных величин.

Теорию вероятностей можно рассматривать как формализацию восприятия возможности, в то время как теория вероятностей изначально основана на законе больших чисел для анализа элементарных событий. Именно массовость случайных явлений обеспечивает выполнение закономерности, при ограниченном числе случайных событий начинают сказываться так называемые *флуктуации* как неожиданное отклонение от закономерности⁶. Проявляющиеся в массе случайных событий закономерности оказываются практически независимыми от индивидуальных особенностей отдельных случайных явлений. Отдельные особенности в массе случайных событий нивелируются и фактически оказываются уже неслучайными явлениями. Методы теории вероятностей по своей природе приспособлены только для исследования массовых случайных явлений, но они не дают возможности предсказать конкретный исход отдельного элементарного события.

В значительной степени теория нечетких множеств в аспекте возможностей и теория вероятностей, скорее, дополняют друг друга, чем конкурируют [4]. Теория вероятностей имеет непосредственное отношение к семантике естественных языков, анализу решений и вычислениям с неточными вероятностями, поскольку большинство вероятностей в реальном мире инкорпорируют восприятие вероятности. При этом по своей конструкции нечеткая логика, имея более гибкую концептуальную структуру по функционалу обобщенности, позволяет с большей уверенностью анализировать явление с учетом присущих ему элементов случайности.

С точки зрения теории вероятности максимум гистограммы случайного распределения результатов измерений в традиционном варианте должен соответствовать среднему арифметическому, а зависимость высоты столбика гистограммы от числа измерений должна монотонно падать с ростом дисперсии, так как большие флуктуации маловероятны. Но на самом деле в практических экспериментах число наблюдающихся флуктуаций в зависимости от величины дисперсии может не монотонно увеличиваться или уменьшаться, и вообще, на фоне монотонного изменения может наблюдаться четкая периодическая картина распределения фокальных повторяющихся событий [14]. Классические термины «вероятность» и «случайность» не всегда предопределяют ответ на вопрос, как будут распределены измерительные флуктуации [15]. Поэтому в нестандартных ситуациях единственным вариантом практического решения задачи с расплывчатыми условиями остается применение ТНМ на основе оптимально выбранной функции принадлежности для дисперсионного анализа с точки зрения повторяемости случайных нечетких показателей [16].

В ситуации игнорирования использования нечеткой логики утрачивается возможность прогнозирования наблюдаемых явлений эксперимента. В «разбросе результатов» следует в этом случае искать нечеткие закономерности, так как традиционные методы статистической обработки результатов, основанные на центральных предельных теоремах, не приспособлены к анализу тонкой структуры распределения результатов сложного эксперимента. При этом не ставится под сомнение существование случайности в характере эксклюзивных процессов и подчинении их вероятностным методам. Но критерий согласия гипотез условности законов распределения нечувствительны в математической статистике к расплывчатой структуре распределений. По-видимому, странный разброс результатов связан не только со случайностью, но и с нечеткостью процесса. Поэтому популярный в теории вероятности критерий правдоподобия Пирсона не способен точно согласовать наблюдаемое статистическое несоответствие.

При оригинальной постановке вопроса решения задачи автономного плавания на основе использования принципов адаптивной нечеткой системы при условии синтезирования сплайнами плавности конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания может быть выявлен ряд стратегических преимуществ [17]. Во-первых, реалистичность оптимизированных виртуальных маршрутов: сплайны позволяют создавать более плавные переходы между различными перекладками руля, что приводит к более устойчивому управлению судном,

⁶ Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М: Наука, 1969. 576 с.

так как резкие изменения угла поворота руля могут привести к нестабильности управления судном. Во-вторых, возможность тонкой настройки: сплайны позволяют более точно настроить форму функции принадлежности, чтобы отразить особенности кинематики судна. В-третьих, адекватный учет нелинейностей: сплайны хорошо аппроксимируют нелинейные зависимости, которые могут присутствовать в динамике судна (например, зависимость эффективности перекладки руля от скорости судна).

На скриншоте, представленном как рис. 3 в локальной системе координат, имитирована сложная линия сплайн-пути судна, отличающаяся гибкостью моделирования за счет применения в паскаль-программе лингвистических переменных аппарата нечеткой логики с заменой треугольной функции μ (см. рис. 1) линейным базовым сплайном (см. рис. 2) в качестве меры принадлежности.

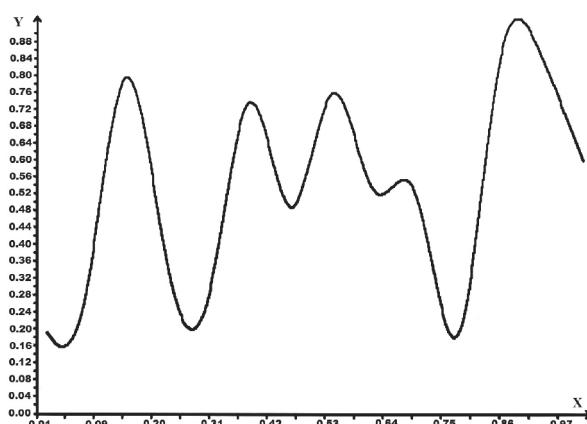


Рис. 3. Геометрическая интерпретация комплексного синтезирования траектории кубическим базисным сплайном с использованием нечеткой логики

Демонстрируемый на рис. 3 скриншот является одним из вариантов многочисленных аппликаций синтеза плавных траекторий судна по апробированным формулам B -сплайновой интерполяции навигационных изолиний [9]. Анализ данного рисунка позволяет понять, что процедура оптимизации моделирования траектории стратегически ориентирована на характеристические точки, которые определяют аппроксимирующий ее сплайн. Модернизированный сплайн-путь оперативным образом перестраивается с использованием лингвистических переменных теории нечетких множеств без формального увеличения количества сеточных точек сплайна во избежание столкновений с навигационными препятствиями. Предварительный сплайн может быть дополнительно улучшен на локальном уровне при задании в расчетной программе дополнительных лингвистических переменных для обеспечения возможности варьирования контура траектории (см. рис. 3).

В рамках комбинированного алгоритма аппроксимации разработана процедура применения логических условий на основе лингвистических переменных с синхронной реализацией в виде дополнительной подпрограммы прикладного программного обеспечения. Согласно проведенному вычислительному эксперименту скорость вычислений увеличивается на 15 % по сравнению с применением апробированной B -сплайновой аппроксимации конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания [17]. При реализации гибридного подхода время работы подпрограммы замерялось в тысячных долях секунды с зацикливанием на 100 000 при синтезировании одинаковых траекторий, одна из которых вариативно показана на рис. 3. Результаты быстродействия в цифровой реализации выводились на дисплей компьютера в паскалевской оперативной среде. При оценке успешности эксперимента уместно привести замечание основателя нечеткой логики Л. А. Заде о том, что почти всегда можно сделать такой же продукт без нечеткой логики, но с использованием нечеткой, однозначно, это будет быстрее [18]. Нечеткая логика позволяет сократить объем производимых вычислений, что, в свою очередь, приводит к увеличению

быстродействия функционирования нечетких систем⁷. На основе изучения скриншота можно сделать вывод о том, что является практически реализуемой алгоритмическая возможность аппроксимации сложной траектории при условии комплексного применения сплайн-функций и нечеткой логики. Аксиоматика теории нечетких множеств может быть успешно дополнена методами сплайн-функций с целью максимального использования преимуществ прогрессивной математики для решения сложных задач судовождения в реальном времени на основе расширения принципов операций моделирования нечеткими понятиями.

Ввиду сложности оперированияискаженными траекториями нестандартные изолинии традиционно исключались из процесса обработки информации, и задача маршрутизации судна решалась исключительно по тривиальным навигационным канонам без перспективной геометрической оценочной интерпретации. Предлагается пересмотреть стереотипное абстрагирование отискаженной траектории, поскольку методы сплайн-функций в комбинации с ТНМ позволяют оперировать такими сложными алгебраическими объектами, как разрывные вматематическом смысле линии пути. Эффективное маневрирование автономным транспортным средством воперативный обход навигационных препятствий имеет решающее значение для возможности обеспечения безопасности судовождения.

Компьютерная визуализация программированного движения судна на основе применения перспективных возможностей нечеткой логики обеспечивает возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии принятия правильного решения при любых обстоятельствах плавания за счет обеспечения ситуационной осведомленности [3]. Прогнозирование движения судна всегда имеет особую специфику неопределенности, что требует нечеткой формализации верbalного понятия *опасности ситуации* как оценки метрики, описывающей степень опасности движения [19], [20]. Предлагаемый алгоритм нечеткой логики может служить гармонизированной поддержкой для судоводительского состава при организации виртуального маршрута судна в сложных навигационных обстоятельствах. Апробированный подход может быть также использован как математическое обеспечение адаптивных нечетких моделей для прогнозирования траектории движения подвижного объекта с целью формирования концепции безэкипажного судоходства.

Для обеспечения безопасности мореплавания наряду с исследованиями в области вероятностно-статистических методов необходим анализ локальных свойств измерительной информации и методов ее обработки с целью нивелирования «измерительных неудач» на основе интуитивных принципов теории нечетких множеств [21]. Комплексирование методов сплайн-функций и нечеткой логики могут позволить успешно решать сложные задачи судовождения при условии мотивированного применения интеллектуальной гибридной системы. Нечетко-алгоритмический гибридный подход обуславливает необходимость применения новых моделей сложных морских автономных систем безэкипажного управления.

Целью проведенного исследования является практическая возможность ускоренной визуализации авторских синтезированных траекторий отдельным слоем векторной электронной карты для обеспечения понимания вахтенными помощниками глобальной стратегии маршрутизации судна в масштабе реального времени. При фактической реализуемости тактического обеспечения контроля движения судна по заданному маршруту не ставится под сомнение квалификация судоводителя. Тем не менее следует признать, что к явным преимуществам автоматизированных комплексов навигации необходимо отнести возможность круглосуточного стабильного функционирования с учетом фактора отсутствия субъективности принятия решения. В критической стрессовой обстановке плавания в сложных условиях штурману при возникновении нештатных ситуаций может не хватить когнитивного потенциала в вопросах правильного задания программной траектории, оперативного управления и регулирования безопасного движения судна при традиционной организации вахтенной службы.

⁷ Хижняков Ю. Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.

Обсуждение (Discussion)

Данными специальных исследований зафиксировано, что около 80 % аварийных случаев в мореплавании происходят, в значительной мере, по причине человеческой ошибки ввиду высокой когнитивной нагрузки вахтенного помощника [2]. Аварийность на морском транспорте в большей степени является результатом проявления «человеческого фактора», объединяющего объективные и субъективные моменты. Проблема оптимальной алгоритмизации СППР заключается в недостаточности знаний о естественных законах поведения индивидуума в экстремальной ситуации, в сложности количественной формализации его психологических составляющих и учета его влияния на безопасность судовождения [22]. Таким образом, переход от бивалентной логики к уникальным особенностям нечеткой логики является положительным шагом в решении задачи учета влияния «человеческого фактора» на развитие морских аварийных ситуаций. В условиях применения нечеткой логики с целью алгоритмизации принятия решения вахтенным помощником помимо количественных показателей появилась возможность учета также качественных переменных, т. е. с мировоззренческой точки зрения существует возможность подвергать количественному анализу те явления, которые раньше могли быть учтены только на качественном уровне. Снизить процент аварийности может позволить практическое применение композиции сплайн-функций и нечеткой логики при комплексном решении задач судовождения.

Профессор электротехники университета Южной Калифорнии Б. Коско в 1993 г. доказал так называемую *теорему нечеткой аппроксимации*, согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой с нечеткой логикой при абстрагировании от сложных дифференциальных и интегральных исчислений [23]. Следовательно, с помощью естественно-языковых высказываний с последующей их формализацией средствами теории нечетких множеств можно достаточно точно отразить произвольную взаимосвязь событий без использования сложного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемого в управлении и идентификации. Однако требование минимальности системы правил не позволяет судить о нечеткой аппроксимации как об инструменте, сколь угодно детально описывающем реальные процессы. В самом простом варианте нечеткая производственная система обеспечивает кусочно-линейную аппроксимацию зависимостей, которая при возрастании количества узлов аппроксимации монотонно приближается к аппроксимируемой нелинейной зависимости. При этом существующее ограничение количества точек аппроксимации в контексте количества лингвистических терминов лишает формальную систему такой возможности. Фактически задачу построения нечеткого аппроксиматора при ограничении количества узлов для приближения оригинальной функции можно сформулировать как задачу *оптимизации параметров аппроксимации* (выбор положения сеточных узлов, форм функций принадлежности параметра нечетким лингвистическим терминам, поиск конкретной реализации нечеткой логики) с точки зрения минимизации ошибки аппроксимации для заданной предметной области. Причем интегральным критерием качества построенного аппроксиматора может выступать также классический критерий наименьших квадратов отклонений в узлах обучающей выборки.

Нечеткие множества обобщают понятие *обычного множества*, лежащее в основе классической математики. Благодаря перспективному нововведению появилась возможность строгого изучения и применения на практике неопределенности, свойственной человеку при принятии различных решений. Л. А. Заде детально проанализировал возможности системы нечеткого вывода с точки зрения обеспечения приближенных рассуждений с учетом принципов логического следования семантической эквивалентности [24]. При наблюдаемом абстрагировании от всего нечеткого и нестрогого весьма ожидаемым явилось появление цифровых компьютеров, которые оказались весьма эффективными при работе не с гуманистическими, а с механистическими системами. Главной мыслью Л. А. Заде является то, что рассуждения и принятие решений основаны не только на измерениях, но и на генерации лингвистических оценок. Благодаря технологиям нечеткой логики в вычислительный процесс удается вовлечь как количественные, так и качественные характеристики на основе лингвистических переменных.

Благодаря операндам нечеткой логики удается формализовать всевозможные экспертные модели, импликативно отражающие причинно-следственные связи между лингвистическими характеристиками. В результате наряду с количественными данными появилась возможность вовлечь в вычислительный процесс качественные категории. Принятие решений в нечеткой среде по принципу Беллмана – Заде является многокритериальным выбором наилучшей альтернативы, которая одновременно удовлетворяет нечетким целям как качественным критериям и нечетким ограничениям. Л. Заде и Р. Беллман отмечали, что источником неточности является не только случайность, но и нечеткость. Неопределенность организует саму природу принятия решений. Именно для учета неточности, связанной с нечеткостью, используются постулаты ТНМ [25]. Использование методов нечеткой логики позволяет приблизить построение когнитивной модели к человеческому восприятию.

В системах искусственного интеллекта (ИИ) нашла отражение новая точка зрения, в которой нечеткость принимается как универсальная реальность мышления судоводителя. Имитацию принятия решений в расплывчатых условиях предлагается формализовать в виде математического и программного обеспечения с применением методов нечеткой логики. Более конкретно нечеткую логику можно рассматривать как попытку реалистичной формализации различных человеческих способностей [4]: во-первых, способности общаться, рассуждать и принимать рациональные решения в условиях неточности, неопределенности, неполноты информации, противоречивой информации, частичной достоверности и частичной вероятности в условиях неполной информации; во-вторых, способности выполнять широкий спектр умственных задач без определенных измерений и вычислений. Рис. 4 отражает условное отсутствие различия между целью и ограничением в процедуре принятия решения в условиях рассеянной информации [7].

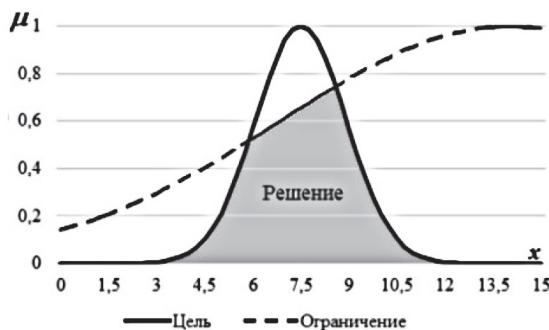


Рис. 4. Интерпретация принятия решения по нечеткому принципу Беллмана – Заде

Под принятием решений в нечеткой среде понимается процесс, в котором цели и ограничения являются нечеткими по своей природе. Процедура принятия решений с использованием современных технологий управления сопряжена с постоянно усложняющимися условиями, где одним из главных факторов неопределенности является экспоненциальный рост сложности информационной ситуации как фактор ограничения принятия решения. На рис. 4 в декартовой прямоугольной системе координат по оси абсцисс отложены абстрактные значения случайного элемента x , на оси ординат фигурирует функция принадлежности μ в ожидаемом диапазоне от 0 до 1. В связи с тем, что окружающий мир состоит не из одних нулей и единиц, нужна более гибкая логика для того, чтобы представлять его реальные взаимосвязи.

Отягощающими факторами нечеткого принципа Беллмана – Заде является возрастание сложности самой системы управления, характеризуемой распределенным характером нормального закона (см. рис. 4), и наличие многочисленных связей, включая нестационарные. Особенности математического аппарата ТНМ предполагают оптимистическую формализацию «человеческого фактора». В качестве ключевой парадигмы дальнейшего развития теории нечетких множеств следует выделить суждение Л. А. Заде о том, что парадоксальное утверждение становится возможным

для использования на практике благодаря методике внедрения нечеткости в любую систему управления, когда основной интерес состоит, скорее, в описании смысла информации, чем в определении ее меры [26].

Логические операции, реализуемые в системах ИИ, становятся более реалистичными, если они ориентируются на многозначную нечеткую логику в отличие от двузначной логики традиционной цифровой технологии, основанной на вероятностных методах аристотелевской логики. Л. А. Заде свою основополагающую работу по теории нечетких множеств опубликовал в 1965 г., а в работе по ИИ в 1973 г. предложил теорию нечеткой логики, позднее в 1994 г. — теорию так называемых «мягких вычислений» в целях ее применения в гибридных нейро-нечетких системах моделирования. Термин «мягкие вычисления» объединил нечеткую логику с технологией создания систем ИИ, основанных на приближенных методах решения когнитивных задач [27]. Осуществив заметный сдвиг научных парадигм во многих областях, эти научные работы ТНМ оказали существенное влияние на развитие как классической математики, так и способствовали развитию методов нечеткой функциональности: искусственных нейронных сетей, вероятностных рассуждений и эволюционных алгоритмов. С целью реалистичного учета влияния «человеческого фактора» гениальный математик при помощи аппарата нечеткой логики подошел достаточно близко к построению моделей приближенных рассуждений человека и использованию их в компьютерных системах на основе принципиально новой концепции: от классических вычислений с числами к «мягким вычислениям» со словами, выраженным на естественном языке или имеющими форму ментального восприятия.

Вычисления в традиционном смысле включают манипуляции с числами и символами, напротив, персоналии в основном пользуются словами при счете и рассуждениях, приходя к словесным заключениям из посылок, выраженных средствами естественного (обычного) языка или выступающих в форме сенсорно-перцептивных образов [28]. Принципиальной особенностью задач поддержки принятия решений в условиях неопределенности является необходимость учета того факта, что измерения данных выполняются на уровне «мягких измерений». Использование понятия «лингвистическая переменная» позволяет адекватно отразить приблизительное словесное описание параметров и состояний объекта или процесса в тех случаях, когда точное описание либо отсутствует, либо является слишком сложным.

Постулаты теории нечетких множеств позволяют имитировать человеческое поведение в организационных системах на основе аналитической поддержки принятия решений⁸. Теория нечетких множеств и составляющая ее базу нечеткая логика являются, фактически, шагом на пути к сближению точности классической математики и всеобщей неточности реального мира, порожденных стремлением к лучшему пониманию процессов мышления и познания. Важнейший тезис Л. А. Заде состоит в том, что в гуманистических системах, учитывающих участие человека в виде рассуждений, принятие решений основано не столько на измерениях, сколько на лингвистических переменных и перцептивных оценках. Действительно, человеческий мозг способен думать и делать заключения в неколичественных и нечетких терминах. Поэтому люди могут расшифровывать неразборчивый почерк, понимать искаженную речь, понять частично восстановленный текст, концентрировать внимание лишь на той информации, которая приводит к правильному решению. Отсутствие данной способности у цифровых вычислительных машин со стандартным программным обеспечением делает их непригодными для прямых контактов с человеком и заставляет прибегнуть к специальным, искусственно созданным языкам общения. Благодаря арсеналу средств нечеткой логики удается формализовать экспертные вербальные модели, имплицитивно отражающие причинно-следственные связи между лингвистическими характеристиками. В результате наряду с количественными данными появилась возможность вовлечь в вычислительный процесс качественные слабо структурированные категории.

⁸ Рзаев Р. Р. Аналитическая поддержка принятия решений в организационных системах. Saarbruchen: Palmerium Academic Publishing, 2016. 306 с.

Процесс принятия решений представляется как непрерывная цепь многокритериальных выборов, вырабатываемых и реализуемых в условиях воздействия многочисленных факторов различной природы. Нечеткая логика формализуется как средство эффективной поддержки процесса принятия решений путем интеграции методов обработки экспериментальной информации и аппарата нечетких множеств в качестве прогностической модели нейро-нечеткой многослойной сети. Вследствие развития данного подхода появляется оптимистическая точка зрения соответствия возможностям человека интеллектуальных программных технологий. При практической реализации гибридного подхода появляются перспективные адаптивные экспертные системы в виде производственных структур нейронных сетей с нечеткими системами логического вывода, которые объединяют в себе достоинство нейронных сетей в сфере обучаемости и нечетких систем с условной интерпретируемостью. Нечеткие нейронные сети осуществляют выводы на основе аппарата нечеткой логики, однако параметры функций принадлежности настраиваются с использованием алгоритмов обучения традиционной нейронной сети.

Представляется перспективным метод нечетких множеств, который объединяет нечеткую логику с глубоким обучением моделей ИИ. Нечеткая логика известна своей способностью управлять неопределенностью и формировать приблизительные рассуждения, обеспечивая четкую структуру, которая увеличивает возможности моделей глубокого обучения для принятия решений. Интегрируя системы, основанные на нечетких правилах, можно повысить интерпретируемость моделей глубокого обучения, сохраняя при этом их прогнозирующую эффективность. Предлагаемая стратегия объединяет логику, понятную человеку, со сложными вычислениями нейронных сетей. Эффективность комбинированного подхода подтверждается с помощью тематических исследований и экспериментов, демонстрирующих повышенную прозрачность и надежность моделей [29]. Сочетание нечеткой логики с глубоким обучением расширяет область применения ИИ в автономных системах, где безусловная объяснимость имеет решающее значение.

Управление неопределенностью в когнитивных проблемах судовождения является важным вопросом, так как судоводители в значительной степени полагаются на естественные языки для выражения мыслей и выбора сложных решений, при этом данные, на которые им приходится ориентироваться, часто являются неточными несмотря на то, что имеется доступ к большим базам данных. Для разработки новых методов анализа влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания необходимо критически пересмотреть традиционный образ мышления. Смещение акцента от традиционных требований точности измерений, которая была необходима при математическом анализе четко определенных систем и процессов, и применение ТНМ совместно с методами алгебры нечеткой логики обеспечивают решение проблемы принятия решений в условиях неопределенности.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Ассоциативность треугольной функции принадлежности с базисом линейного сплайна позволяет сформировать единый подход в рамках конвергенции ТНМ с эффективными методами кусочной интерполяции.
2. Эмпирически подтверждена возможность комплексирования методов сплайн-функций и нечеткой логики на примере синтезирования плавной траектории с увеличением быстродействия «мягких вычислений» на 15 %.
3. Проанализирован вопрос применимости нечеткой логики как альтернативы теории вероятностей при использовании условия аналогии функции принадлежности с плотностью распределения вероятности для решения нестандартных статистических задач.
4. Выявлены преимущества решения задачи программируемого плавания на основе использования принципов нечеткой логики при синтезировании сплайнами плавности конфигурации траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания.

5. Имитация поддержки принятия решения судоводителем на основе теории нечетких множеств создает лучшие возможности учета влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищенко А. А. Методы поддержки принятия решений при поиске и сопровождении подвижных объектов на море: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Грищенко. — Новороссийск, 2021. — EDN STGGSY.
2. Жмур А. А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследовании случаев посадки судов на мель / А. А. Жмур, В. А. Логиновский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210. — EDN PPCSNL.
3. Ююкин И. В. Кибернетическая безопасность альтернативной автономной навигации с позиций сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364. — EDN DBSOFA.
4. Zadeh L. A. Is there a need for fuzzy logic? / L. A. Zadeh // Information Sciences. — 2008. — Vol. 178. — Is. 13. — Pp. 2751–2779. DOI: 10.1016/j.ins.2008.02.012.
5. Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934. — EDN QQIVCXH.
6. Guilbert E. Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model / E. Guilbert, H. Lin // Marine Geodesy. — 2007. — Vol. 30. — Is. 1–2. — Pp. 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
7. Марданов М. Дж. Нечеткая логика Л. А. Заде как ключ к описанию гуманистических систем / М. Дж. Марданов, Р. Р. Раев // Problems of information society. — 2021. — Т. 12. — № 2. — С. 26–37. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02. — EDN TFTHVA.
8. Ююкин И. В. Конфигурирование комплекса сплайн-градиентов при аппроксимации навигационной изолинии линейными кусочными функционалами / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 365–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-365-383. — EDN GSETID.
9. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036. — EDN PSJYOY.
10. Алиев М. И. Теория вероятностей и теория нечетких множеств Л. Заде: различия и сходство / М. И. Алиев, Э. А. Исаева, И. М. Алиев // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2012. — № 3. — С. 19–25. — EDN PYSAWP.
11. Zadeh L. A. What Is the Relationship Between Probability Theory and Fuzzy Set Theory? / L. A. Zadeh // International Encyclopedia of Statistical Science — Springer Berlin Heidelberg, 2025. — С. 2893–2896. DOI: 10.1007/978-3-662-69359-9_749.
12. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / L. A. Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. — 1978. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 3–28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5.
13. Исаева Э. А. Сравнение теории вероятностей и теории нечетких множеств Л. Заде / Э. А. Исаева // Azerbaijan Journal of Physics Fizika C. — 2024. — С. 67–71. DOI: 10.70784/azip.3.2024C67.
14. Aliyev M. I. Random and fuzzy magnitudes as some kind of measuring devices / M. I. Aliyev, E. A. Isayeva, I. M. Aliyev // 2010 9th International conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing (ICAFS) 2010. — Prague, 2010 — С. 275–277.
15. Isayeva E. A. The role of fluctuations in artificial intelligence from Zadeh's fuzzy sets point of view / E. A. Isayeva // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51. — Is. 30. — Pp. 812–815. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.189.
16. Chen L.-H. Approaches for measurement system analysis considering randomness and fuzziness / L.-H. Chen, C.-J. Chang // International Journal of Fuzzy System Applications. — 2020. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 98–131. DOI: 10.4018/ijfsa.2020040105.

17. Ююкин И. В. Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.
18. Zadeh L. A. Fuzzy languages and their relation to human intelligence / L. A. Zadeh // Proceedings of the International Conference Man and Computer. — France, Bordeaux, 1972. — Pp. 130–165.
19. Гриняк В. М. Нечеткая система предупреждения об опасном сближении морских судов / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2016. — № 2. — С. 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078. — EDN VPTMJN.
20. Гриняк В. М. Оценка опасности схемы движения на акватории мерой нагрузки на судоводителей / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, А. В. Шуленина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2019. — № 12. — С. 35–40. DOI: 10.36535/0236-1914-2019-12-5. — EDN UWVMDL.
21. Логиновский В. А. Применение преобразований подобия для анализа и обработки навигационной информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Логиновский. — СПб, 1991. — 47 с.
22. Клименко В. Д. Разработка методов количественного учета влияния человеческого фактора на безопасность судна: дис. ... канд. техн. наук / В. Д. Клименко. — СПб., 2003. — 161 с.
23. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators / B. Kosko // IEEE Transactions on Computers. — 1994. — Vol. 43. — Is. 11. — Pp. 1329–1333. DOI: 10.1109/12.324566.
24. Zadeh L. A. A Theory of Approximate Reasoning (Machine Intelligence) / L. A. Zadeh. — New York: Halstead Press, 1979. — Pp. 149–194.
25. Bellman R. E. Decision-Making in a Fuzzy Environment / R. E. Bellman, L. A. Zadeh // Management Science. — 1970. — Vol. 17. — Is. 4. — Pp. B-141-B-164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141.
26. Zadeh L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes / L. A. Zadeh // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1973. — Vol. SMC-3. — Is. 1. — Pp. 28–44. DOI: 10.1109/TSMC.1973.5408575.
27. Zadeh L. A. The roles of fuzzy logic and soft computing in the conception, design and deployment of intelligent systems / L. A. Zadeh // Software Agents and Soft Computing Towards Enhancing Machine Intelligence: Concepts and Applications — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. — С. 181–190. DOI: 10.1007/3-540-62560-7_45.
28. Zadeh L. A. Computing with words: Principal concepts and ideas (Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 277) / L. A. Zadeh. — Berlin: Springer, 2012. — 156 p. DOI: 10.1007/978-3-642-27473-2.
29. Imamguluyev R. Integrating Fuzzy Logic with Deep Learning: A New Approach to Explainable Artificial Intelligence / R. Imamguluyev // 2025 6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI) — 2025. — С. 1701–1706. DOI: 10.1109/ICMCSI64620.2025.10883618.

REFERENCES

1. Grischenko, A. A. Metody podderzhki prinyatiya resheniy pri poiske i soprovozhdennii podvizhnykh ob'ektorov na more. PhD diss. Novorossiysk, 2021.
2. Zhmur, A. A. and V. A. Loginovskiy. "Using a situation awareness theory in a study of grounding incident investigations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.
3. Yuyukin, I. V. "Cybernetic security of alternative offline navigation from the standpoint of spline technology." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
4. Zadeh, L. A. "Is there a need for fuzzy logic?" *Information Sciences* 178.13 (2008): 2751–2779. DOI: 10.1016/j.ins.2008.02.012.
5. Yuyukin, I. V. "Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.
6. Guilbert, E. and H. Lin. "Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model." *Marine Geodesy* 30.1–2 (2007): 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
7. Mardanov M. J. and R. R. Rzayev. "L. A. Zadeh's 'Fuzzy logic' as a key to the description of humanistic systems." *Problems of information society* 12.2 (2021): 26–37. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02.

8. Yuyukin, I. V. "Configuring a complex of splines when approximating the navigational isoline with linear piecewise functionals." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 365–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-365-383.
9. Yuyukin, I. V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
10. Aliev, M. I., E. A. Isaeva and I. M. Aliev. "Probability theory and fuzzy sets theory of l. zadeh: the difference and the similarity." *Artificial Intelligence And Decision Making* 3 (2012): 19–25.
11. Zadeh, L. A. "What Is the Relationship Between Probability Theory and Fuzzy Set Theory?" International Encyclopedia of Statistical Science Springer Berlin Heidelberg, 2025: 2893–2896. DOI: 10.1007/978-3-662-6935-9-9_749.
12. Zadeh, L. A. "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility." *Fuzzy Sets and Systems* 1.1 (1978): 3–28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5.
13. Isayeva, E. A. "Comparison of theories of probability and L. Zadeh's fuzzy sets devices." *Azerbaijan Journal of Physics Fizika C*. (2024): 67–71. DOI: 10.70784/azip.3.2024C67.
14. Aliyev, M. I., E. A. Isayeva and I. M. Aliyev. "Random and fuzzy magnitudes as some kind of measuring devices." *Proceeding of ICAFS-2010 (Ninth International conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing)*. Prague, 2010: 275–277.
15. Isayeva, E. A. "The role of fluctuations in artificial intelligence from Zadeh's fuzzy sets point of view." *IFAC-PapersOnLine* 51.30 (2018): 812–815. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.189.
16. Chen, L.-H. and C.-J. Chang. "Approaches for measurement system analysis considering randomness and fuzziness." *International Journal of Fuzzy System Applications* 9.2 (2020): 98–131. DOI: 10.4018/ijfsa.2020040105.
17. Yuyukin, Igor V. "Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of no-go areas in due time." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.
18. Zadeh, L. A. "Fuzzy languages and their relation to human intelligence." *Proceedings of the International Conference Man and Computer*. France, Bordeaux, 1972.
19. Grinyak, V. M. and A. S. Devyatil'nyy. "Fuzzy collision avoidance system for ships ." *Journal Of Computer and Systems Sciences International* 2 (2016): 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078.
20. Grinyak, V. M., A. S. Devyatil'nyy and A. V. Shulenina. "Assessment of marine traffic safety in aquatories as a metric of impact on navigators." *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection* 12 (2019): 35–40. DOI: 10.36535/0236-1914-2019-12-5.
21. Loginovsky, Vladimir A. Primenenie preobrazovaniy podobiya dlya analiza i obrabotki navigatsionnoy informatsii. Abstract of Grand PhD Diss. SPb, 1991.
22. Klimenko V. D. Razrabotka metodov kolishestvennogo usheta vliyanija shelovesheskogo faktora na bezopasnost' sudna. PhD diss. SPb, 2003.
23. Kosko, B. "Fuzzy systems as universal approximators." *IEEE Transactions on Computers* 43.11 (1994): 1329–1333. DOI: 10.1109/12.324566.
24. Zadeh, Lotfi A. *A Theory of Approximate Reasoning (Machine Intelligence)*. New York: Halstead Press, 1979.
25. Bellman, R. E. and L. A. Zadeh. "Decision-Making in a Fuzzy Environment." *Management Science* 17.4 (1970): B-141-B-164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141.
26. Zadeh, L. A. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-3.1* (1973): 28–44. DOI: 10.1109/TSMC.1973.5408575.
27. Zadeh, L. A. "The roles of fuzzy logic and soft computing in the conception, design and deployment of intelligent systems." *Software Agents and Soft Computing Towards Enhancing Machine Intelligence: Concepts and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997: 181–190. DOI: 10.1007/3-540-62560-7_45.
28. Zadeh, L. A. *Computing with words: Principal concepts and ideas (Studies in Fuzziness and Soft Computing)*, Vol. 277). Berlin: Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-27473-2.
29. Imamgulyev, R. "Integrating Fuzzy Logic with Deep Learning: A New Approach to Explainable Artificial Intelligence." *2025 6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI) — 2025*: 1701–1706. DOI: 10.1109/ICMCSI64620.2025.10883618.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 августа 2025 г.

Received: Aug. 18, 2025.