

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.5

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78

Оригинальная статья / Original Paper

Проблемы построения логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами

И.А. Магомедов, М.М. Мирзабеков, Т.Г. Айгунов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является решение задач построения логико-лингвистических (нечётких) моделей управления траекторным движением сложных динамических объектов. **Метод.** Для построения логико-лингвистических (нечётких) моделей управления использована теории нечётких множеств и алгоритмов Л.Заде. **Результат.** Приведён процесс построения логико-лингвистических (нечётких) моделей управления траекторным движением сложных динамических объектов с использованием теории нечётких множеств и нечётких алгоритмов. В качестве объекта управления в работе использован морской подвижный объект (МПО), функционирующий в неопределённой среде. Показано, что логико-лингвистические (нечёткие) модели управления МПО могут быть построены с учётом богатого практического опыта судоводителя, не имеющего специальных знаний, выраженного ими в качественной форме для построения нечётких моделей управления. **Вывод.** Логико-лингвистические модели управления позволяют обеспечивать движение морского подвижного объекта по заданной траектории с достаточным для практических целей качеством управляемого процесса в условиях различных внешних возмущений и дрейфа параметров управляемого объекта. Применение нечётких алгоритмов управления позволяет существенно сократить затраты машинного времени по сравнению с оптимальным поисковым алгоритмом при допустимом ухудшении качества процесса и обеспечить реализацию процесса управления в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: логико-лингвистические модели, нечёткие алгоритмы, теория нечётких множеств, заданная траектория, динамические объекты, неопределённая среда, адаптивные системы, динамические объекты, морской геофизический комплекс (МГК)

Для цитирования: И.А. Магомедов, М.М. Мирзабеков, Т.Г. Айгунов. Проблемы построения логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 59-78. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78

Problems of constructing logical-linguistic models of complex management dynamic objects

I.A. Magomedov, M.M. Mirzabekov, T.G. Aygunov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to solve the problems of constructing logical-linguistic (fuzzy) models for controlling the trajectory movement of complex dynamic objects. **Method.** To build logical-linguistic (fuzzy) control models, theories of fuzzy sets and algorithms of L. Zadeh were used. **Result.** The process of constructing logical-linguistic (fuzzy) models for controlling the trajectory movement of complex dynamic objects using the theory of fuzzy sets and fuzzy algorithms is given. A marine mobile object (MMO) operating in an uncertain environment was used as a control object in the work. It is shown that logical-linguistic (fuzzy) MPO control models can be built

taking into account the rich practical experience of a navigator who does not have special knowledge, expressed by them in a qualitative form for building fuzzy control models. **Conclusion.** Logical-linguistic control models make it possible to ensure the movement of a marine moving object along a given trajectory with a quality of the controlled process sufficient for practical purposes under conditions of various external disturbances and drift of the parameters of the controlled object. The use of fuzzy control algorithms can significantly reduce the cost of computer time compared to the optimal search algorithm with an acceptable deterioration in the quality of the process and ensure the implementation of the control process in real time.

Keywords: logical-linguistic models, fuzzy algorithms, fuzzy set theory, given trajectory, dynamic objects, uncertain environment, adaptive systems, dynamic objects, marine geophysical complex (MGC)

For citation: I.A. Magomedov, M.M. Mirzabekov, T.G. Aygumov. Problems of constructing logical-linguistic models of complex management dynamic objects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 59-78. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78

Введение. Способность человека - оператора технологического процесса принимать правильные решения в обстановке отсутствия полной информации об управляемом процессе вызывает удивление и приводит к размышлению о методах и средствах построения систем, которые опираются на опыте и знаниях специалистов по управлению. Поэтому, работы, посвящённые вопросам построения специализированных компьютерных систем управления неопределёнными и/или сложными процессами на основе приближенных (нечётких) рассуждений представляет, сегодня одну из важнейших проблем науки.

Решение проблемы управления сложными динамическими объектами многие исследователи связывают с новым логико-лингвистическим подходом к анализу сложных систем. Опираясь на теорию нечетких множеств (НМ) и алгоритмов (НА), данный подход дает приближенные, но, в то же время, эффективные способы описания поведения систем, настолько сложных и/или плохо определенных, что они практически не поддаются точному математическому анализу [1-4].

В результате использования теории нечетких множеств, обычная задача управления оказывается погруженной в нечеткую среду, а для ее моделирования необходимо привлекать теорию нечетких множеств Л.А.Заде, позволяющую формализовать выраженный в нечеткой словесной форме опыт экспертов путем преобразования соответствующих описаний в нечеткие алгоритмы [5-7].

Способность человека принимать адекватные, сложившиеся в соответствии с обстановкой решения, при неполной и нечеткой информации является предметом изучения интеллектуальных способностей человека, как системы управления сложными технологическими процессами. Поэтому, проблема построения моделей принятия решений в системах управления, опираясь на приближенные рассуждения человека - оператора процесса и их использование в современных цифровых системах управления, представляет сегодня одну из важнейших проблем науки.

Применение нечеткого подхода к задачам управление сложными и/или плохо определёнными процессами в настоящее время является одной из самых результативных областей применения теории нечетких множеств и нечетких алгоритмов.

Такой подход оказывается полезным и в тех случаях, когда технологические процессы являются слишком сложными для анализа с помощью классических (количественных) методов управления, что приводит к сложным вычислительным процедурам, которые практически не поддаются анализу в реальном масштабе времени. В работах многих авторов [7-12, 15-17] показано, что использование нечетких систем управления даёт результаты не хуже чем результаты, получаемые при классических алгоритмах управления с меньшими вычислительными затратами.

Смещение центра исследований нечетких систем в сторону практических приложений привело к постановке целого ряда проблем, таких как: разработка нечетких микроконтроллеров и специализированных процессоров обработки нечеткой информации, а также элементная база их построения; аппаратно-программные средства разработки и отладки; инженерные методы разработки и настройки нечетких систем управления (НСУ); методы и средства проектирования и самообучения и многое другое.

Укажем на некоторые из причин, обусловивших необходимость перехода от классических моделей теории управления сложными динамическими объектами к логико-лингвистическим моделям управления:

1. Между параметрами, оказывающими влияние на процесс управления, не удается установить точных количественных зависимостей.

2. Процесс управления является многошаговым, и содержание каждого шага не может быть априори однозначно определено.

3. Существующие способы описания объектов и протекающих в них процессов приводят к столь громоздким конструкциям, что их практическое использование встречает значительные вычислительные трудности.

4. Объект эволюционирует во времени, меняется его структура и функции, что приводит к эволюции самого процесса управления.

5. Не все цели управления объектом могут быть выражены в виде количественных соотношений.

Как видно из работ [15-17], морские геофизические комплексы (разновидность МПО) можно отнести к сложным объектам, функционирующим в неопределенной среде. Кроме рассмотренных выше причин перехода от классических моделей управления к логико-лингвистическим моделям можно указать на трудности реализации сложных моделей на бортовых ЭВМ, т.е. ограничения на ресурсы моделирования (временные, стоимостные), которые не позволяют получить решение в реальном масштабе времени. Это, пожалуй, основная причина, которая в данном случае заставила авторов воспользоваться опытом экспертов, который выражается ими в нечеткой словесной форме.

Первая попытка анализа, нечетких систем управления была сделана в [9], где авторы вводят понятие «оператора наблюдения», благодаря которому знание состояния управляемого процесса становится более точным, и определяют понятие «цели управления» G , как нечеткое множество в пространстве состояния X .

Описание процесса заключается в отображении следующего состояния $f: X \times U \rightarrow U$, операторе наблюдения O , таком, что $y = x \circ O$ (« \circ » - знак операции композиции) и отображении управления $g: Y \rightarrow U$. Однако авторы не решили задачу управления для данной системы и цели, а ограничились определениями вида «... цель G достижима, когда имеется отображение управления g , такое, что $y(t) \in G$ для некоторого времени t », или «точная цель может быть достигнута с помощью довольно грубого регулирования и наблюдения при условии, что по мере приближения к цели наблюдения становятся точными; в противном случае невозможно установить, достижима цель или нет».

В [10] устанавливаются математические рамки, в которых можно анализировать нечеткие системы. В ней определяется отображение следующего состояния $f: F(X) \times F(U) \rightarrow F(X)$ и отображение выхода $g: F(X) \rightarrow F(Y)$, где $F(X)$, $F(U)$ и $F(Y)$ являются множествами всех нечетких подмножеств пространства состояния X , пространства входных величин U и пространства выходных величин Y . Здесь также рассматриваются определение достижимости, наблюдаемости, устойчивости и делается вывод: «система является достижимой, если f представляет собой отображение «*на*» наблюдаемой, если g относится к взаимно-однозначным отображениям и устойчивой, если траектория состояния может удерживаться в пределах данной области путем ограничения начального состояния внутри другой области».

Этот теоретический подход анализа нечетких систем управления открывает большие возможности, хотя в работе не приводятся результаты практического применения.

В работе [12] рассмотрен новый подход, основанный на использовании нечетких дискретных соотношений и идей конечных автоматов для анализа нечетких систем, который заключается в следующем. Простое сравнение текущего и желаемого состояний управляемого процесса в данный момент времени заменяется на более общую функцию ошибки, отображающую две нечеткие переменные в переменную нечеткой ошибки.

Формально это выглядит следующим образом: $e: X \times U \rightarrow U$, где X, U - пространства состояния и управления. Сам процесс описывается $p: X \times U \rightarrow X$ и совместно с функцией $e(\cdot)$ дает полное описание процесса.

Тогда, если пространства управления и состояния сделать дискретными и конечными, то функции $e(\cdot)$ и $p(\cdot)$ могут рассматриваться как **maxmin** композиции [1, 2] конечных дискретных нечетких соотношений R_e и R_p . Используя эти отношения, можно определить такие понятия, как состояния равновесия, стабильности и управляемости.

Несмотря на то, что имеются неполные ответы на некоторые вопросы, ясно, что для более полного использования концепции нечеткости, необходима теория нечетких систем управления. Тем не менее, отсутствие такой теории не является препятствием к успешным применением теории нечетких множеств к решению практических задач управления.

Первые сообщения о применении теории нечетких множеств к управлению динамическими процессами были сделаны в работах [9, 10]. Эти статьи являются очень значительными работами, за которыми последовали публикации исследований, осуществленных на практике другими авторами. Авторы указанных работ занимались управлением небольшого лабораторного парового двигателя. Трудности, связанные с процессом, заключались в том, что он нелинейный, с шумами, сильно связанный и довольно плохо поддается ручному управлению. Тем не менее, было обнаружено, что их алгоритм работал лучше, чем алгоритм хорошо настроенного регулятора с прямым цифровым отсчетом, и, по-видимому, был менее чувствителен к изменениям в условиях работы.

Независимо от этих работ в [10, 11] исследовали работу нечеткого алгоритма управления для экспериментальной станции по нагреву воды. Задача состояла в том, чтобы регулировать температуру воды, выходящей из бака при постоянном расходе, путем изменения расхода горячей воды в теплообменнике, содержащемся в баке. Второй задачей управления являлось обеспечение быстрого регулирования на ступенчатые изменения в заданном значении температуры вытекающей воды.

Основные трудности заключались в том, что процесс является нелинейным и с шумами, а также имеет асимметричные характеристики и чистое временное запаздывание. Работа нечеткого алгоритма, разработанного авторами, сравнивалась с работой оптимального ПИ-регулятора и показала более быстрое реагирование на скачки, устанавливающиеся, примерно, через 0,3 мин. (по сравнению с 0,7 мин. для ПИ-регулятора при изменении заданного значения на 10с).

Улучшенный вариант алгоритма также имел столь же устойчивые рабочие характеристики, что и у ПИ - регулятора. Успех этих работ привёл авторов [11] к попытке осуществить регулирование температуры в экспериментальном химическом реакторе периодического действия. Основными трудностями в управлении являются нелинейный изменяющийся во времени коэффициент усиления и чистое временное запаздывание.

Были достигнуты хорошие результаты (рис. 1), а последующая работа Kickert W.J.M. [12] показала, что нечеткий регулятор работает не хуже оператора - человека. Сложный современный ПИ-регулятора, с которым он сравнивался, работал лучше, но был более чувствителен к изменениям в процессе.

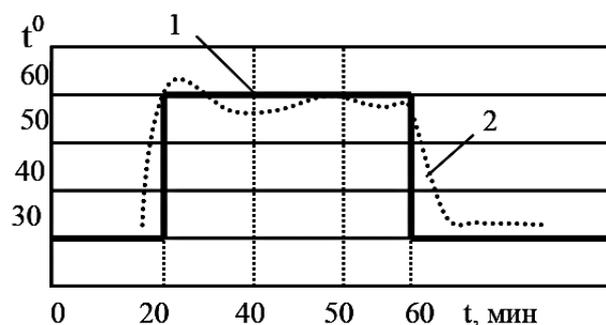


Рис. 1. Результаты моделирования, полученные в [10]:
1 – заданное значение; 2 – текущее значение
Fig. 1. Simulation results obtained in [10]:
1 - set value; 2 - current value

В [8] нечеткий алгоритм используется для управления проницаемостью сырой смеси на конвейере агломашины в промышленном исполнении. Это процесс с одним входом и одним выходом, в котором регулирующей величиной является расход воды, подводимой к установке. Здесь принципиальными трудностями являются нелинейный изменяющийся во времени коэффициент усиления и чистое временное запаздывание, а также наличие шумов.

Результаты показывают (рис. 2), что нечеткий алгоритм работает лучше, чем оператор процесса - человек, уменьшая стандартное отклонение проницаемости более чем на 40, и так же хорошо, как обычный ПИ-регулятор, но менее чувствителен к изменениям параметров процесса.

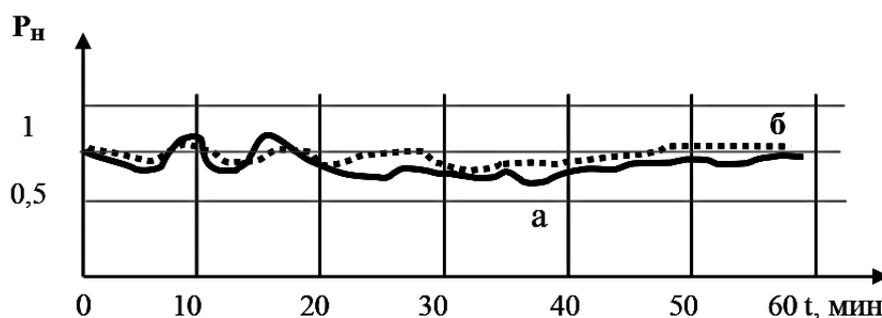


Рис. 2. Результаты, полученные в [8]:
а) - ручное управление, б) - нечёткое управление
Fig. 2. Results obtained in [8]:
а) - manual control, б) - fuzzy control

В работах [15-17, 21] рассматриваются вопросы построения нечетких систем автоматического управления траекторным движением морских геофизических комплексов (МГК). Проведенный в указанных работах анализ современных геолого-геофизических методов и технических средств изучения и освоения океана показывает, что морским геофизическим комплексам присущ ряд особенностей: наличие буксируемых устройств, в том числе большой протяженности, которые существенно влияют на динамические характеристики управляемого процесса; относительно малые скорости буксировки, что снижает эффективность действия руля и увеличивает относительный уровень внешних возмущений; существенные ограничения на переменные состояния и управления, обусловленные технологией проведения морских разведочных работ; необходимость точного управления движением судна-буксира по заданной траектории с целью обеспечения минимального отклонения буксируемых устройств от заданной линии профиля.

Известные системы управления подобными объектами, реализующие стационарные законы управления, не позволяют учитывать изменение динамических характеристик управляемого объекта, что приводит к ухудшению качества управления в меняющихся условиях плава-

ния, а построение адаптивных систем управления сложными процессами, к которым можно отнести и процесс управления движением морскими геофизическими комплексами (МГК), приводит к сложным вычислительным процедурам, реализация которых в реальном масштабе времени встречает значительные затруднения.

Например, адаптивные системы [6,7,18,19], наиболее полно учитывающие особенности морских геофизических комплексов (МГК) и требования к качеству управления, состоят из подсистем координатного оценивания и оперативной идентификации, а также подсистемы поиска оптимальных управляющих воздействий, в основу которой положен метод динамического программирования. Реализация подобных систем возможна только на базе мощных современных вычислительных машин, установка которых на борту требует их специального исполнения, экономически не оправдана и резко снижает надежность систем управления. Эти ограничения обуславливают недостаточное качество управления движением морскими геофизическими комплексами (МГК), что приводит к большим отклонениям буксируемой геофизической аппаратуры от заданной линии профиля и, как следствие, к снижению качества получаемой информации.

Указанные обстоятельства и привели авторов к идее использования логико-лингвистического (нечеткого) подхода к анализу сложных систем.

Большой интерес специалистов по управлению к таким моделям объясняется, в основном, следующими факторами: возможность использования богатого практического опыта специалистов, не имеющих специальных знаний, выраженного ими в качественной форме; простота реализации; функциональная устойчивость, как к внешним возмущениям, так и к изменениям параметров управляемого процесса в достаточно широких пределах изменения, что доказывается в работе [17] посредством математического моделирования управляемого процесса.

На рис. 3 приведены результаты математического моделирования [17, 21] процессов оптимального (рис. 3,а) и нечеткого (рис. 3,б) управлений движением МГК в режиме выхода на заданную траекторию при одинаковых внешних условиях.

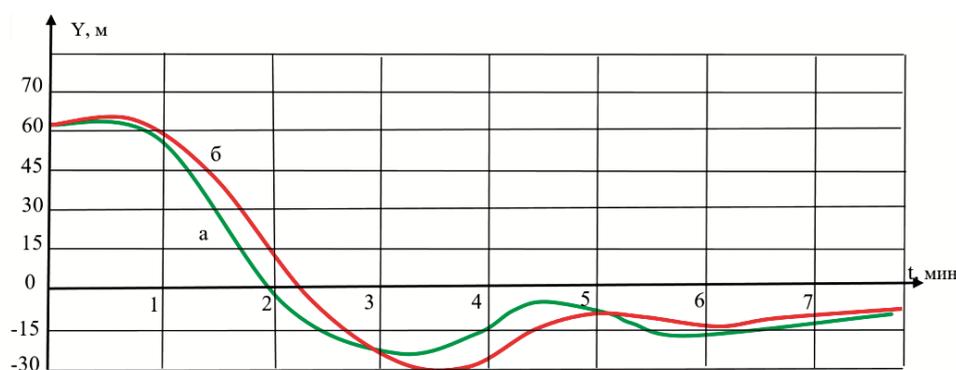


Рис. 3. Результаты моделирования процесса выхода МГК на траекторию:
а) при оптимальном и б) нечетком управлении
Fig. 3. Results of simulation of the process of reaching the trajectory:
a) under optimal and b) fuzzy controls

Результаты моделирования показывают, что нечеткие алгоритмы позволяют обеспечить движение морскими геофизическими комплексами (МГК) по заданной траектории с достаточным для практических целей качеством управляемого процесса в условиях внешних возмущений и дрейфа параметров управляемого объекта с меньшими на два порядка временными затратами.

Как показывает приведённый анализ, все выше приведённые исследования имеют несколько общих черт, из которых наиболее характерным является то, что они не опираются на точную модель управляемого процесса и при этом получены достаточно хорошие результаты.

Второй общей чертой является то, что почти во всех алгоритмах, начальные множества

имеют наименования типа «положительное большое» или «отрицательное маленькое». Это естественный выбор, отражающий обычный путь, которому следуют при определении количественных характеристик, т.е. в зависимости от знака и величины.

Постановка задачи. В настоящее время, несмотря на то, что исследования в этой области в некотором смысле соответствуют друг другу, существуют различия как в структуре управляющего устройства, так и в его внедрении. Наиболее важным является вопрос «как обрабатывать наблюдаемые измеренные четкие величины?».

Во всех известных работах исследователи соглашались в том, что точно измеренные величины могут быть представлены как нечеткие множества с функцией принадлежности, равной нулю везде, кроме измеренного значения, где она равна единице. Однако, мнения расходятся в том, как выбрать отдельную управляющую величину из нечеткого множества выходных величин. В [9, 15] авторы считают, что для рассматриваемых систем эффективно такое воздействие, которое имеет наибольший уровень принадлежности. Это самый простой способ, но при достижении более одного пика или же при достижении пика с плоской вершиной он является спорным. Одним из очевидных методов в таких случаях может быть выбор по максимальному значению функции принадлежности с последующим усреднением. Другим очевидным способом является формирование среднего значения, основанного на форме, например, метод центра площади [9]. Нет явной причины для выбора того или иного метода, хотя в [9] автор продемонстрировал, что при использовании метода среднего значения максимумов работа алгоритма аналогична работе многоуровневого реле, в то время как метод центра площади дает результаты, аналогичные с обычным ПИ-регулятором.

Другим структурным отличием является то, что в [10, 12] использован алгоритм с правилами вида: «Если {ошибка заданного значения}, то если {изменение в ошибке заданного значения}, то {изменение в управляющем воздействии}». В [12] правила имеют вид: «Если ошибка заданного значения}, то если {сумма ошибки заданного значения}, то изменение в управлении}», Kickert W.J.M. [12], Tong R.M. [9], хотя и используют ошибку заданного значения и изменения в ошибке как входные величины, работают двойко. Если ошибки «большие», то алгоритм дает абсолютные значения управляющего воздействия, в то время как при «небольших» он дает значения приращения. В работе [17] автор полагает, что типичным правилом для управления траекторным движением морскими геофизическими комплексами (МГК) по заданной траектории, может быть правилом вида: «Если **отклонение** от заданной траектории положительно большое и **скорость изменения отклонения** отрицательно маленькая, то **угол перекладки руля** отрицательно большой», где «среднее» и «маленькое» нечеткие значения отклонения и скорости изменения отклонения, а «большое» - нечеткое значение угла перекладки руля, т.е. управляющего воздействия. Набор таких правил, связывающих наблюдаемые переменные с управляющим воздействием, образует нечеткий алгоритм управления и является логико-лингвистической (нечеткой) моделью управляемого процесса.

Следует отметить, что во всех работах число уровней дискретизации и число правил в алгоритме менялось в довольно большом диапазоне: от 10 правил до 64 правил, уровни - от 5 до 18.

Приведенный обзор теоретических исследований и практического применения теории нечетких множеств показывает, что в этом направлении достигнуты определенные успехи и уже известны системы управления, которые частично решают указанные задачи. Однако эти системы не позволяют учитывать изменение динамических характеристик управляемого объекта, что приводит к ухудшению качества управления в меняющихся условиях плавания, а построение адаптивных систем управления сложными процессами, к которым можно отнести и процесс управления МПО, приводит к сложным вычислительным процедурам, реализация которых в реальном и/или ускоренном масштабе времени встречает значительные затруднения, а в некоторых случаях вообще не возможно реализовать за приемлемое время. Именно эти обстоятельства побудили специалистов в области управления начать работы по изучению нечетких (логико-лингвистических) моделей управления, которые возникли, когда в сферу авто-

матизации оказались вовлечёнными объекты столь сложной природы, что традиционные методы теории управления оказались для них либо малоэффективными, либо просто непригодными.

Кроме того, *теория нечетких множеств и систем - единственная теория, которая математически оперируется со смысловым содержанием слов человека.* Это особенно важно в будущем, где обработка информации ориентирована на компьютеры, а языки программирования стремятся к естественному языку.

Методы исследования. Построение нечетких логико-лингвистических моделей управления различными процессами проходит три фазы.

Первая предусматривает квантование пространств нечетких входных и управляющих переменных, определение первичных нечетких подмножеств, составление нечетких правил управления. Эта фаза в общем случае опирается на существенный объем априорной информации и носит явно субъективный характер.

Вторая фаза заключается в оценке правил принятия решений, составляющих нечеткий алгоритм управления.

Третья фаза построения модели заключается в оценке качества модели и коррекции параметров нечетких правил. Если задан класс, к которому принадлежит идентифицируемая модель, то можно выделить три подхода к составлению самих правил управления:

1. Использование качественного понимания управляемого процесса для непосредственной записи правил;
2. Интерпретацию в нечеткой форме математических уравнений, о которых известно, что они описывают динамику управляемого процесса;
3. Использование входных - выходных данных процесса, полученных путем математического моделирования.

Отметим, что в то время как подходы, рассмотренные в пп. 1) и 2) связаны с «инженерным» чутьем, подход п. 3) может быть автоматизирован с использованием моделей оптимального управления.

Исходя из сказанного, нечеткую модель M можно представить в виде пятикомпонентного кортежа

$$M = \langle A, Q, U, T, P \rangle, \quad (1)$$

где A - нечеткий алгоритм; Q - конечное дискретное пространство входных переменных; U - конечное дискретное пространство управления; T - множество всех первичных нечетких подмножеств, определенных на пространствах Q и U ; P - процедура принятия решения.

Будем говорить, что нечеткая логико-лингвистическая модель управления построена, если определены все компоненты кортежа M .

Определение первичных нечетких подмножеств. Основываясь на определении нечетких множеств [1-4], можно выделить две особенности процесса определения нечетких подмножеств:

- для каждого нечеткого понятия языка T_j необходимо определить конечное множество числовых данных $\{x_i\}$ из области его рассуждения
 - $X = \{x_i, i=1, \dots, I\}$;
- необходимо задать оценки из интервала $[0, 1]$ для установления степени принадлежности числовых данных к нечетким понятиям.

Таким образом, будем считать, что нечеткие подмножества являются определенными, если задана совокупность пар вида $(x_i, \mu_{T_j}(x_i))$, где $x_i \in X$, а $\mu_{T_j}(x_i)$ - функция $X \rightarrow [0, 1]$, называемая функцией принадлежности элемента x_i к нечеткому подмножеству T_j .

Поэтому вопрос построения функций принадлежности нечетких множеств по результатам опроса экспертов или путем анализа априорной информации о процессе управления является очень важным.

Первым шагом при определении функции принадлежности является определение количественного состава экспертов. Для каждой задачи этот вопрос решается, как правило, отдель-

но. В общем случае из-за сложности оцениваемых систем и трудности получения информации для решения задачи оценивания привлекаются люди, обладающие специальными знаниями и опытом работы с данной системой.

Число экспертов должно быть достаточно большим для того, чтобы они в совокупности могли учесть существенные свойства задачи и чтобы решение, найденное при их помощи, было достаточно обоснованным.

В 1970 году А.Н. Борисовым [22] была предложена следующая схема определения значений функции принадлежности $\mu_{T_j}(x_i)$ элементов $x_i \in X$ к нечеткому множеству T_j : имеется коллектив экспертов, часть экспертов которого на вопрос о принадлежности элемента x_i к подмножеству T_j отвечает положительно (обозначим их через K_1), а другая часть - отрицательно (K_2). Тогда считаем, что

$$\mu_{T_j}(x_i) = K_1 / (K_1 + K_2) \quad (2)$$

Из (2) можно заключить, что данная схема соответствует вероятностной интерпретации функции принадлежности.

Другая схема была предложена Д.А. Поспеловым, И.В. Ежковой в 1977 году [23]. Выделяется фиксированный набор термов лингвистической переменной ЧАСТОТА. Затем каждый эксперт разбивает её условную область рассуждения $X = [0, 100]$ на интервалы, соответствующие каждому из термов. Пусть число экспертов, отнёсших элемент $x_i \in X$ к терму T_j , равно

$$K_{T_j}(x_i), \text{ а } K_{T_j}^{\max} = \max_{x_i} K_{T_j}(x_i).$$

Тогда $\mu_{T_j}(x_i) = K_{T_j}(x_i) / K_{T_j}^{\max}(x_i)$, откуда можно сделать вывод, аналогичный, сформулированному выше при анализе (2).

В данной работе для определения функции принадлежности была принята следующая процедура:

1. Определялись границы областей рассуждения для всех переменных.
2. Производилось квантование этих областей на число точек, соответствующее значениям элементов данной области.
3. Определялись наименования $T_j \in T$ и количество J нечетких подмножеств.
4. Эксперты независимо друг от друга заполняли таблицу 1, где $\mu_{T_j}^1(x_i)$ - функция принадлежности $x_i \in X$ к нечеткому множеству T_j , данная 1-ым экспертом.

На основании таких таблиц (табл. 1) определяется результирующая функция принадлежности x_i - ого элемента к нечеткому подмножеству T_j , данная всеми экспертами

$$\mu_{T_j}(x_i) = \sum_{l=1}^L \mu_{T_j}^l(x_i) / L, \text{ где } L - \text{ число экспертов.}$$

Полученные значения функции принадлежности должны удовлетворять определенным требованиям.

Пусть $T = \{T_j\}$ базовое множество лингвистической переменной $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$; $\langle T_j, X, C_j \rangle$ нечеткая переменная, соответствующая терму $T_j \in T$; $C_j = \bigcup_{k \in X} \mu_{T_j}^k / X$; S_j - носитель C_j ; $T^0 = T$ - любое другое терм-множество лингвистической переменной β .

Будем считать, что $X \subseteq R'$. Обозначим $|T|$ через J , $\inf x$ - через x_1 , а $\sup x$ - через x_2 .

Таблица 1. Экспертная таблица
 Table 1. Expert table

$X=\{x_i\}$ $T=\{T_j\}$	x_1	x_2	\dots	x_i	\dots	x_I
T_1	$\mu_{T_1}^1(x_1)$	$\mu_{T_1}^1(x_2)$	\dots	$\mu_{T_1}^1(x_i)$	\dots	$\mu_{T_1}^1(x_I)$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
T_j	$\mu_{T_j}^1(x_1)$	$\mu_{T_j}^1(x_2)$	\dots	$\mu_{T_j}^1(x_i)$	\dots	$\mu_{T_j}^1(x_I)$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
T_J	$\mu_{T_J}^1(x_1)$	$\mu_{T_J}^1(x_2)$	\dots	$\mu_{T_J}^1(x_i)$	\dots	$\mu_{T_J}^1(x_I)$

Упорядочим множество A в соответствии с выражением $(\forall T_j \in T)(\forall T_i \in T) j > i \Leftrightarrow [(\exists x \in S_j)(\forall y \in S_i)(x > y)]$, означающим, что терм, который имеет носитель, расположенный левее, получает меньший номер. Тогда любая лингвистическая переменная должна удовлетворять следующим условиям [22]:

$$\mu_{x_1}^1 = 1; \quad x_2^J = 1; \tag{3}$$

$$(\forall T_j \in T) \setminus \{T_j\} (0 < \max \mu_{c_j \cap c_{j+1}} < 1); \tag{4}$$

$$(\forall T_j \in T) (\exists x \in X) (\mu_X^j = 1); \tag{5}$$

$$(\forall \beta) (|x| < \infty) \vee (\exists x_1 \in R') (\exists x_2 \in R') (\forall x \in X) (x_1 < x < x_2) \tag{6}$$

$$(\forall T_j \in T) (\exists T_i \in T^0) (\exists x \in X) (\mu_X^j \neq \mu_X^i). \tag{7}$$

Используя (рис. 4), прокомментируем приведенные выражения. Условия (рис. 11) запрещают функциям принадлежности крайних термов иметь вид колоколообразных кривых, что обусловлено расположением этих термов в упорядоченном множестве T .

Условия (4) запрещают существование в базовом множестве T пар термов типа T_1, T_2 и T_3, T_4 поскольку в первом случае отсутствует естественная разграниченность понятий, аппроксимируемых термами, а во втором случае участку области определения не соответствует никакое понятие.

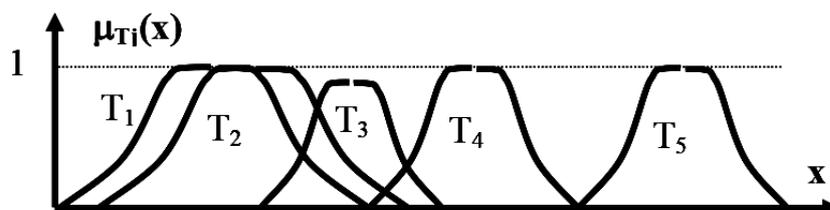


Рис. 4. Виды нечетких множеств
 Fig. 4. Types of fuzzy sets

Поскольку каждое понятие имеет хотя бы один типичный объект, обозначаемый этим понятием, введено условие (5), запрещающее наличие в множестве термов типа T_5 . Выражения (6) ограничивают область определения конечным множеством точек. Данное условие констатирует имеющиеся в любой задаче управления физические ограничения на числовые значения параметров. Наконец, условие (7) указывает на то, что при изменении множества термов меняется и функция принадлежности нечетких множеств, описывающих семантику термов.

Следует отметить особенности построения начальных нечетких подмножеств по выходной переменной, т.к. она является входом исполнительных механизмов, которые обладают существенно нелинейными характеристиками. Нелинейности в системе могут быть учтены соответствующим выбором нечетких множеств. Так, для учета ограничений на управляющие воздействия необходимо наложить ограничения на универсальное множество, т.е. задают границы

изменения управляющего воздействия (рис. 5).

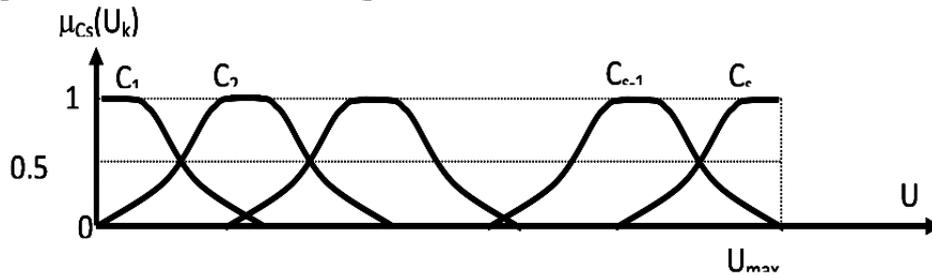


Рис. 5. Учет ограничения на управляющее воздействие
 Fig. 5. Accounting for the constraint on the control action

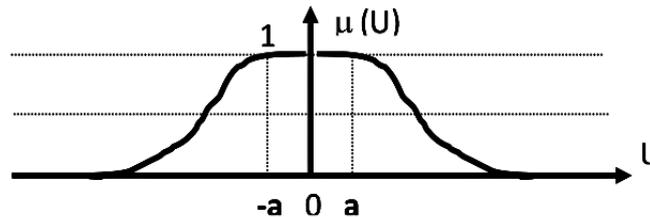


Рис. 6. Учет зоны нечувствительности
 Fig. 6. Accounting for the dead zone

Существенным аспектом нелинейности исполнительных механизмов помимо её асимметричности, является зона нечувствительности.

На рис. 6 графически изображено нечеткое подмножество, которое позволяет учитывать зоны нечувствительности (например, от $-a$ до a) исполнительного механизма.

Методы, рассмотренные для учета этих нелинейностей с помощью нечетких множеств, оказываются особенно пригодными для учета неизвестных нелинейностей.

Наименования термов T_j определяются с помощью семи основных нечетких подмножеств: 1. Положительное Большое (ПБ); 2. Положительное Среднее (ПС); 3. Положительное Маленькое (ПМ); 4. Нулевое (Н); 5. Отрицательное Маленькое (ОМ); 6. Отрицательное Среднее (ОС); 7. Отрицательное Большое (ОБ).

Это естественный выбор, отражающий обычный путь, которому следуют при определении количественных характеристик, т.е. в зависимости от их знака и величины. Эти первичные множества могут затем использоваться с тремя основными операциями объединения, пересечения и дополнения для вычисления таких значений, как «ПБ или ПС».

Анализ вопросов применения составных термов для описания элементов задач управления техническими системами показывает, что, во-первых, набор модификаторов (не, очень,), позволяющих с помощью процедуры G (G - синтаксическое правило, порождающее название значений переменных) описывать имеющие смысл в задачах управления расширения множества T до T' , не должен быть слишком большим; во-вторых, количество элементов в нем также не должно быть большим. Наконец, мощность множества $|T|$ согласно известной гипотезе о ёмкости памяти лица, принимающего решения [13] должна удовлетворять неравенству $|T| = 7 - 10$.

Построение нечетких правил принятия решений. Пусть задано непрерывное пространство P переменных X, Y , где $X, Y \subset P, X \cap Y = \emptyset$. Пусть также задано множество управлений U . Построим отображения $F: P \rightarrow U$ следующим образом:

1. Разобьём области изменения аргументов X и Y на J_0 и M_0 нечетких подмножеств. Для определенности множества этих нечетких подмножеств будем обозначать

$$A = \{A_{j_0}, j_0 = 1, \dots, J_0\}, \quad B = \{B_{m_0}, m_0 = 1, \dots, M_0\} \quad (8)$$

2. Введём в рассмотрение функции принадлежности $\mu_{A_{j_0}}(x_i)$ и $\mu_{B_{m_0}}(y_n)$, отражающие сте-

пень принадлежности элементов $x_i \in X$, $y_n \in Y$ к выделенным нечетким подмножествам соответственно. В этих обозначениях $i=1, \dots, I$; $n=1, \dots, N$ - число элементов в универсальных множествах X , Y , таких, что $X \cap Y = \emptyset$

3. Построим график функций $\mu_{A_{j_0}}(x_i)$ и $\mu_{B_{m_0}}(y_n)$ для всех $j_0 \in J_0$ и $m_0 \in M_0$ (рис.7 и 8), соответственно.
4. Аналогичные построения, описанные в пп. 1, 2 выполним и для области изменения аргумента управления U . При этом множество нечетких подмножеств обозначим $C = \{C_{s_0}, s_0=1, \dots, S\}$
5. Построим также график (рис.9) функции принадлежности $\mu_{C_{s_0}}(u_k)$, где $u_k \in U$, а $k=1, \dots, K$ - число элементов в универсальном множестве U .

Тогда будем считать, что нечеткие подмножества A_{j_0} , B_{m_0} , C_{s_0} , определены, если задана совокупность пар вида $\{x_i / \mu_{A_{j_0}}(x_i)\}$, $\forall x_i \in X$; $\{y_n / \mu_{B_{m_0}}(y_n)\}$, $\forall y_n \in Y$ и $\{u_k / \mu_{C_{s_0}}(u_k)\}$, $\forall u_k \in U$.

Эти нечеткие подмножества совместно с лингвистическими правилами принятия решения в дальнейшем могут быть использованы для построения нечетких алгоритмов управления (НАУ), описывающих стратегию управления оператора процесса.

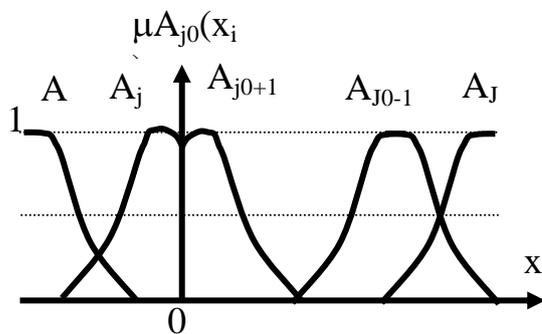


Рис. 7. График функции $\mu_{A_{j_0}}(x_i)$
 Fig. 7. Graph of the function $\mu_{A_{j_0}}(x_i)$

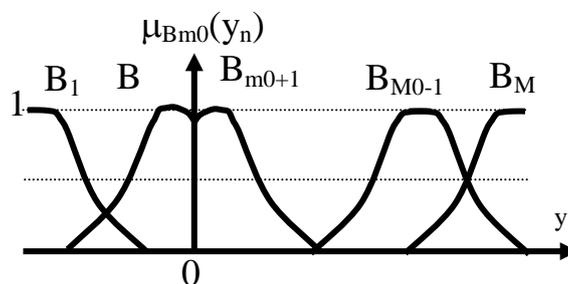


Рис. 8. График функции $\mu_{B_{m_0}}(y_n)$
 Fig. 8. Graph of the function $\mu_{B_{m_0}}(y_n)$

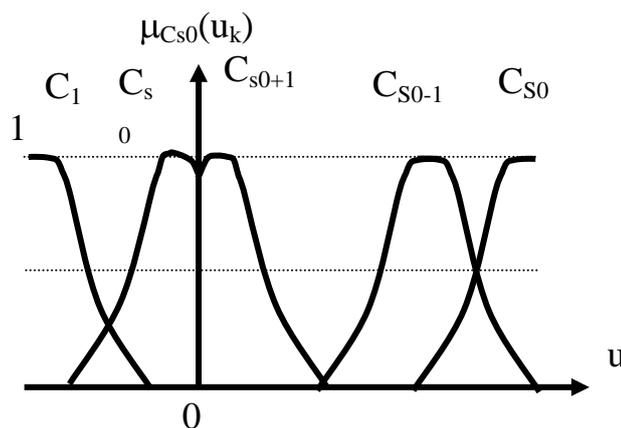


Рис. 9. График функции $\mu_{C_{s_0}}(u_k)$
 Fig. 9. Graph of the function $\mu_{C_{s_0}}(u_k)$

Пусть задана система лингвистических правил принятия решений, которая по терминологии [5] образует нечеткий алгоритм управления, представленный в матричной форме на рис. 10

	B_1	....	B_{m0}	....	B_{M0}
A_1	C_{11}	....	C_{1m0}	....	C_{1M0}
....
A_{j0}	C_{j01}	....	C_{j0m0}	....	C_{j0M0}
....
A_{J0}	C_{J01}	....	C_{J0m0}	....	C_{J0M0}

Рис. 10. Матричная форма представления нечеткого алгоритма управления

Fig. 10. Matrix form of representation of the fuzzy control algorithm

На рис. 10 исходными элементами являются нечеткие подмножества A_{j0} и B_{m0} , а элементами - нечеткие подмножества C_{s0} . Из рис. 11 видим, что нечеткий алгоритм управления является нечетким двухмерным многоуровневым реле: непрерывное пространство P делится на области из пространства Q с одинаковым нечетким выходом.

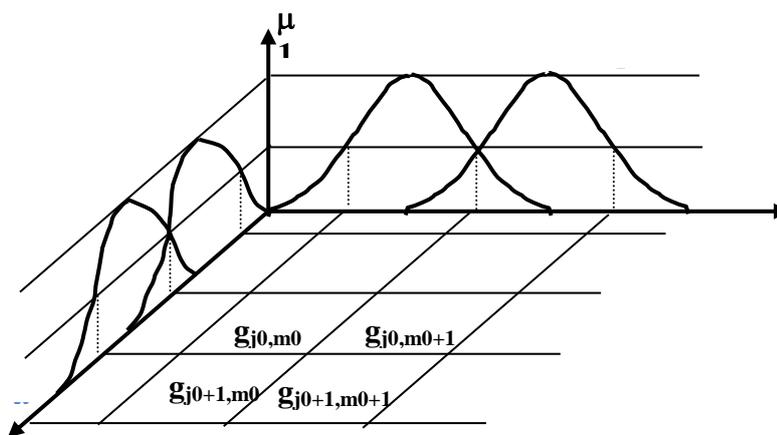


Рис. 11. Нечеткий алгоритм управления как нечеткое двухмерное многоуровневое реле

Fig. 11. Fuzzy control algorithm as a fuzzy two-dimensional multilevel relay

В случае нечеткого регулятора с двумя нечеткими входами и с одним нечетким выходом происходит следующее; нечеткие подмножества, определенные на входных универсальных множествах X и Y разбивают непрерывное пространство P на конечное число подпространств (рис.11), т.е. строится отображение $F_1: P \rightarrow Q$. Точки, где $\mu_{A_{j0}}(x_i) = \mu_{A_{j0+1}}(x_i)$ являются границами подмножеств A_{j0} и A_{j0+1} . Аналогично и для B_m .

$$\text{т.е. } u_t = \arg \max \mu_{C_{s0}}(u_k), \text{ что эквивалентно } F: U \rightarrow u_k.$$

Тогда можем говорить, что каждому подпространству $g_{j0 m0} \in Q$, заданному лингвистическим правилом (рис.11), ставится в соответствие нечеткое подмножество C_{s0} из пространства U , что соответствует отображению $F_2: P \rightarrow Q$. И, наконец, определяется то конкретное управляющее воздействие $u_t \in U$, для которого функция принадлежности имеет максимальное значение. Следовательно, функцию вход-выход нечеткого регулятора можно представить как функцию многоуровневого двухмерного реле при условии, что выполнено одно из следующих достаточных условий:

$$\text{Sup } \mu_{A_{j0}}(x_i)=1; \quad \text{Sup } \mu_{B_{m0}}(y_n)=1; \quad \text{Sup } \mu_{C_{s0}}(u_k)=1; \quad x_i \in X, y_n \in Y, \quad u_k \in U \quad (9)$$

входные и выходные подмножества нормальны; график функции принадлежности выходного нечеткого подмножества $\mu_{C_{s0}}$ симметричен относительно своего максимума; алгоритм состоит из исчерпывающего множества лингвистических правил (существует правило для каждой возможной входной комбинации нечетких подмножеств A_{j0} и B_{m0}).

Обсуждение результатов. Процедура реализации нечетких алгоритмов управления. В настоящее время известны два способа реализации нечетких алгоритмов управления.

Первый способ. Основная идея первого способа, предложенного А.Н.Мелиховым в работе [20], заключается в классификации текущей ситуации, т.е. отнесении конкретной ситуации к одному из заранее определенных классов возможных ситуаций, при которых нужно принимать то или иное решение в данный момент времени подобно тому, как это делает оператор в процессе управления. При этом четкие множества признаков, описывающих текущую ситуацию, сравниваются с эталонными и с определенной точностью классифицируются. Как правило, это возможно в случаях, когда речь идет о системах с ограниченной сложностью с небольшим числом ситуаций и их признаков.

Однако в реальных системах число четких ситуаций чрезвычайно велико. Использование традиционных четких методов либо невозможно, либо приводит к очень сложным вычислительным структурам.

Исходя из этих соображений, авторами [20], предлагается для описания сложных ситуаций использовать лингвистические переменные [1-4], набор которых нечетко отображает все признаки ситуаций, а для представления текущей ситуации - использовать нечеткие подмножества, опирающиеся на те же универсальные множества, что и лингвистические переменные. Для принятия решения необходимо установить степень равенства нечеткой текущей ситуации S^T со всеми нечеткими эталонными ситуациями $S^i = \{s^i, i=1, \dots, L\}$, соответствующими нечетким значениям управляющих воздействий. Если имеет место нечеткое равенство, то в текущей ситуации принимается то решение, которое предписано нечетко равной эталонной ситуации.

Отнесение текущей нечеткой ситуации к тому или иному классу состоит в определении степени равенства, текущего нечеткого подмножества с каждым из нечетких подмножеств, определяющих значения лингвистических переменных в эталонных ситуациях заключается в следующем.

Пусть A и B - произвольные нечеткие подмножества в универсальном множестве X . Тогда по [20], степень равенства

$$\mu(A, B) = \min\{A(x_i) \leftrightarrow B(x_i)\}, \quad x_i \in X \quad (10)$$

где $i=1, \dots, I$ - число элементов в универсальном множестве; знак « \leftrightarrow » - операция нечеткой эквивалентности, определяемая по формуле.

Если $\mu(A, B) \geq 0.5$, то $A \leftrightarrow B = \min\{\max(\bar{A}, B), \max(A, \bar{B})\}$ полагаем, что нечеткие подмножества A и B нечетко равны, и обозначим $A \approx B$. Если $\mu(A, B) < 0.5$, то считаем, что A и B нечетко неравны, и обозначаем $A \neq B$.

Второй способ, предложенный Л.А. Заде [1, 2] и названный им «составным правилом вывода», заключается в следующем: пусть задано правило вида «Если $\beta_1=A$, и если $\beta_2=B$, то $\beta_3=C$ ». Тогда подразумеваемое отношение между тремя нечеткими лингвистическими переменными β_1 , β_2 и β_3 выражается в терминах декартова произведения трех нечетких подмножеств A , B и C . Декартово произведение подмножеств A , B и C обозначается $R=A \times B \times C$ и определяется с помощью равенства:

$$\mu_R(x, y, u) = \min\{\mu(x), \mu(y), \mu(u)\}, \quad (11)$$

где $x \in X$, $y \in Y$, $u \in U$.

Выразив таким образом отношение между тремя переменными, теперь мы можем ответить на вопрос «Если $\beta_1=A'$, а $\beta_2=B'$, то каково значение β_3 ?», если задано нечеткое отношение R и заданы нечеткие подмножества A' и B' . Тогда отношение R используется для определения соответствующего значения C' с помощью составного правила вывода, которое записывается как $C' = A' \circ B' \circ (A \times B \times C)$, а функция принадлежности определяется выражением:

$$\mu_{C'}(U_k) = \max_k \max_{i_n} \max_{i_{nk}} \min\{\mu_{A'}(x_i), \mu_{B'}(y_n), \mu_R(x_i, y_n, \mu_k)\} \quad (12)$$

Результатом выполнения составного правила вывода является нечеткое подмножество, описывающее изменение управляющего воздействия β_3 , определяемого правилом для измеренных значений переменных. Для того, чтобы получить общее нечеткое управление, требуется результаты каждого отдельного правила объединить с использованием операции объединения.

Например, в случае трех правил нечеткое подмножество управления имеет такой вид, как на рис. 12 (толстая линия).

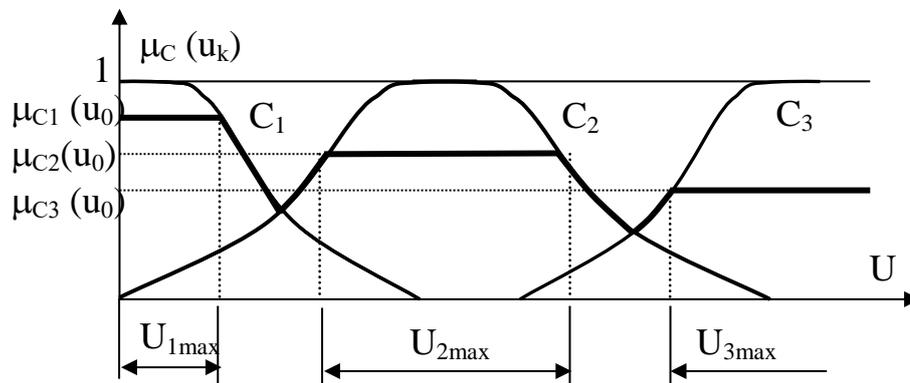


Рис. 12. Нечёткое управляющее воздействие
 Fig. 12. Fuzzy control action

Управление, полученное в результате взятия максимума из подмножества, приведённого на рис. 12, совпадает с диапазоном u_{1max} и тем самым мы определим нечеткое управляющее воздействие для данных нечетких значений входных переменных. Тогда конкретное управляющее воздействие для данного примера определяется соотношением

$$U_t = \arg \max \mu_C(u_k). \quad k \quad (13)$$

Построение логико-лингвистической модели управления движением морского геофизического комплекса. Основной особенностью построения нечеткого алгоритма управления является использование нечетких понятий, содержащихся в естественном языке человека-оператора, на основании которых принимаются четкие или нечеткие решения, воплощаемые в конкретные действия. Каждое нечеткое понятие в дальнейшем формально представляется в виде нечеткого подмножества. Это позволяет выполнить эквивалентные преобразования нечетких понятий и образовать новые понятия с помощью различных операций над нечеткими множествами.

Например, типичным правилом для управления движением МПО по заданной траектории может быть: «Если **отклонение** от заданной траектории положительно среднее и **скорость изменения отклонения** отрицательно маленькая, то **угол перекадки руля** отрицательно большой, где «среднее» и «маленькое» нечеткие значения отклонения и скорости его изменения, а «большой» - нечеткое значение угла перекадки руля, т.е. управляющего воздействия. Набор таких правил, связывающих важные наблюдаемые переменные с управляющим воздействием, образует нечеткий алгоритм управления и является **логико-лингвистической (нечеткой)** моделью управляемого процесса. Реализация системы управления, использующей нечеткий алгоритм, должна быть в общем случае аналогична подходу оператора к процессу управления.

Так, состояние МПО при его движении по заданной траектории в каждый момент времени характеризуется двумя переменными: во-первых, величиной отклонения от заданной траектории β_1 и, во-вторых, скоростью изменения отклонения β_2 , которые зависят от величины управляющего воздействия β_3 , и от случайных внешних возмущений.

Можно сказать, что опытный судоводитель принимает оптимальное, с его точки зрения, решение именно на основе этих двух переменных, опираясь на свой опыт и интуицию, хотя ему неизвестны математические зависимости между наблюдаемыми переменными и величиной воздействия. При этом часто опытный оператор может управлять подобными процессами более эффективно, чем автоматическая система, а когда он испытывает затруднения, это можно объяснить за счет скорости и способности отображать информацию или за счет глубины, с которой он может оценить решения.

В работе представлены результаты применения логико-лингвистических моделей для управления движением МПО по заданной траектории. Обоснованием для этой работы является исследование того, могут ли быть методы, аналогичные тем, которые использует человек-оператор, применимы в системах автоматического управления МПО, которые с трудом управляются обычными методами.

Для достижения поставленной цели на основе анализа результатов математического моделирования процессов управления МПО [17] и с учетом протокола экспертного опроса руководителя построена система лингвистических решающих правил, приведённая в табл. 2.

Таблица 2. Логико-лингвистическая модель управления движением морского подвижного объекта по заданной траектории
Table 2. Logical-linguistic model for controlling the movement of a marine mobile object along a given trajectory

V_{m0} A_{j0}	ПБ	ПС	ПМ	ПН	ОН	ОМ	ОС	ОБ
ПБ	ПМ	Н	ОМ	ОМ	ОМ	ОС	ОБ	ОБ
ПС	ПС	Н	Н	ОМ	ОМ	ОМ	ОС	ОБ
ПМ	ПС	Н	Н	Н	Н	ОМ	ОС	ОБ
ПН	ПС	ПС	ПМ	Н	Н	ОМ	ОМ	ОС
ОН	ПС	ПМ	Н	Н	Н	ОМ	ОС	ОС
ОМ	ПС	ПМ	ПМ	Н	Н	ОМ	ОМ	ОС
ОС	ПБ	ПБ	ПС	ПМ	Н	Н	ОМ	ОС
ОБ	ПБ	ПБ	ПС	ПМ	ПМ	ПМ	Н	ОМ

Вид применяемых правил принятия решения зависит от управляемого процесса и используемой эвристики. В случае задач с двумя входами и одним выходом, которые являются предметом исследования данного параграфа, предполагается, что нечеткими входными переменными являются отклонения управляемого объекта от заданной траектории β_1 и скорость изменения величины отклонения β_2 , а управляющим воздействием - величина угла перекладки руля β_3 .

Нечеткая система управления разработана для функционирования в таких ситуациях, где имеющиеся источники информации неточны, с шумами, субъективно интерпретируются или ненадежны. В рассматриваемом примере имеются результаты измерения величины отклонения с точностью, определяемой РНС, и вычисляется скорость изменения отклонения. Для построения нечеткого алгоритма области определения $X, Y \subset Q$ переменных β_1, β_2 , характеризующие пространство состояния управляемого объекта, квантуются в 22-х точках с разделенным нулем и их значения определяются с помощью следующих множеств

$A = \{A_{j0}, j_0 = 1, \dots, J_0\}$, $V = \{V_{m0}, m_0 = 1, \dots, M_0\}$, где A_{j0}, V_{m0} - базовые нечеткие подмножества, определяемые в областях X, Y соответственно (в нашем примере $J_0 = M_0 = 8$). При этом содержательный смысл нечетких подмножеств A_{j0} , и V_{m0} определяется как ПБ, ПС, ПМ, ПН, ОН, ОМ, ОС, ОБ, где ПБ - Положительно Большое, ОБ - Отрицательно Большое, ПС - Положительно Среднее, ОС - отрицательно Среднее, ПМ - Положительно Маленькое, ОМ - Отрицательно Маленькое, ПН - Положительное Нулевое, ОН - Отрицательное Нулевое, а их субъективные численные значения, определены и приведены в табл. 3 и 4 соответственно. Заметим, что совпадение знаков переменных β_1 и β_2 , интерпретируется как движение управляемого объекта к заданной траектории, а несовпадение - от траектории. Управляющее воздействие β_3 , характеризующее пространство управлений U , квантуется в 21 точке, охватывая интервал от минимально допустимого и до максимально допустимого значения (табл. 5), без дальнейшего деления нуля.

Множество нечетких подмножеств управления обозначим через $C = \{C_{s0}, s_0 = 1, \dots, S_0\}$, где $S_0 = 7$ для нашего примера.

Таблица 5. Базовые нечеткие подмножества лингвистической переменной «угол перекаладки пера руля»

Table 5. Basic fuzzy subsets of a linguistic variable "rudder angle"

$k=1,\dots,K$	$U=\{u_k\}$	ПБ	ПС	ПМ	Н	ОМ	ОС	ОБ
1	-10	0	0	0	0	0	0.1	1
2	-9	0	0	0	0	0	0.2	1
3	-8	0	0	0	0	0.1	0.5	0.9
4	-7	0	0	0	0	0.2	0.7	0.8
5	-6	0	0	0	0	0.4	0.9	0.6
6	-5	0	0	0	0	0.6	1.0	0.4
7	-4	0	0	0	0	0.8	0.9	0.1
8	-3	0	0	0	0	0.9	0.7	0
9	-2	0	0	0	0	1.0	0.3	0
10	-1	0	0	0	0	0.9	0.1	0
11	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
12	1	0	0	0.1	0.9	0	0	0
13	2	0	0	0.2	1.0	0	0	0
14	3	0	0.1	0.6	0.9	0	0	0
15	4	0.1	0.2	0.9	0.8	0	0	0
16	5	0.2	0.4	1.0	0.6	0	0	0
17	6	0.4	0.6	0.9	0.4	0	0	0
18	7	0.6	0.8	0.7	0.2	0	0	0
19	8	0.7	0.9	0.5	0.1	0	0	0
20	9	0.9	1.0	0.2	0	0	0	0
21	10	1.0	1.0	0.1	0	0	0	0

Ограничение на величину управляющего воздействия учитывается заданием границ соответствующей области определения, т.е. U . Процедура принятия решения заключается в следующем:

1. Вычисление текущего отклонения и скорости его изменения;
2. Преобразование величин отклонения и скорости его изменения в нечеткие подмножества A_j и B_m соответственно;
3. Оценка правила принятия решения с использованием составных правил вывода и определения нечеткого подмножества управляющих воздействий C_s ;
4. Вычисление детерминированного управляющего воздействия, требуемого для реализации.

Оценка качества логико-лингвистической модели управления (ЛЛМУ). Исследование работы ЛЛМУ проводилось методом математического моделирования на цифровом моделирующем комплексе. Основной задачей моделирования является исследование логико-лингвистической модели управления движением МПО по заданной траектории (в том числе по траекториям, имеющим сложные формы; при случайных внешних воздействиях и дрейфе параметров управляемого объекта).

В качестве математической модели объекта управления были использованы уравнения движения МПО, приведённые в [23]. Моделирование информационных помех осуществлялось наложением на величину отклонения Гауссовского шума с различным среднеквадратичным отклонением. Для проверки функциональной устойчивости нечётких алгоритмов к случайным внешним возмущениям и к дрейфу параметров управляемого объекта эксперимент проводился при следующих условиях: начальное отклонение от заданной траектории - 60 м для режима вы-

хода на траекторию; скорость движения МПО - 2,5 м/сек; скорость течения - от 0 до ± 1 м/сек; волнение моря - до 6 баллов; изменение параметров управляемого объекта - до $\pm 30\%$.

Как показали результаты моделирования, качество нечеткого управления существенно зависит от частоты формирования нового значения управляющего воздействия, равной $1/T_B$, где T_B - интервал выборки управления.

Управление объектом обычно происходит с помощью изменения какого-либо параметра в соответствии с управляющим воздействием. Это может быть, к примеру, угол перекладки руля. Данные о состоянии объекта, необходимые для системы управления можно собирать с помощью различных датчиков. В данной работе судно полностью моделируется с использованием объектно-ориентированного подхода, поэтому получение данных и управление объектом происходит через методы объекта

Как видно из результатов моделирования (рис. 13), нечеткие алгоритмы позволяют решить задачу управления МПО по заданной траектории с достаточно хорошим качеством управления.

На первом графике изображаются две траектории: зеленая – требуемая траектория, синяя – траектория судна, полученная в результате моделирования.

На втором графике отображено значение управляющего воздействия.

Третий и четвертый график показывают значения, которыми руководствовалась САУ – отклонение от траектории и скорость изменения отклонения соответственно.

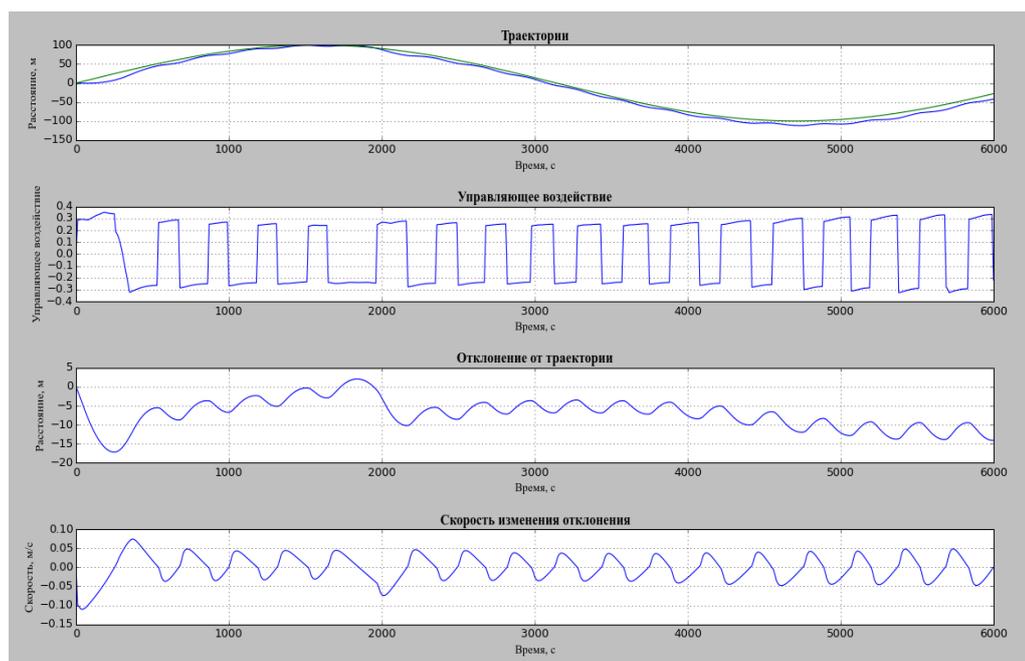


Рис. 13. Результаты моделирования движения МПО по криволинейной траектории при различных внешних возмущениях
Fig. 13. Simulation results of MPO movement along a curvilinear trajectory under various external disturbances

Вывод. В данной статье рассмотрены основные этапы построения ЛЛМУ морскими подвижными объектами, а также приведены результаты математического моделирования логико-лингвистических моделей управления траекторным движением морских подвижных объектов при различных внешних возмущениях и процесса выхода МПО (рис. 14) на траекторию при изменении параметров управляемого объекта на 30%.

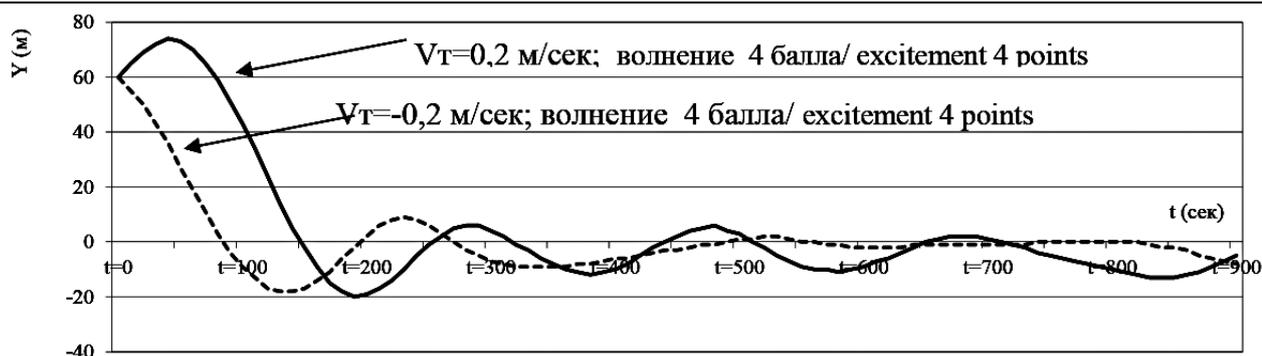


Рис. 14. Результаты моделирования процесса выхода МПО на траекторию при изменении параметров управляемого объекта на 30%

Fig. 14. The results of modeling the process of MPO exit to trajectory when changing the parameters of the controlled object by 30%

Результаты моделирования показали, что ЛЛМУ позволяют обеспечивать движение МПО по заданной траектории с достаточным для практических целей качеством управляемого процесса в условиях различных внешних возмущений и дрейфа параметров управляемого объекта. Применение нечетких алгоритмов управления позволяет существенно сократить затраты машинного времени по сравнению с оптимальным поисковым алгоритмом при допустимом ухудшении качества процесса и обеспечить реализацию процесса управления в реальном масштабе времени.

Библиографический список:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1963, v. 8, p. 338-353.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистического переменного и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 168 с.
3. В.Я. Пивкин, Е. П. Бакулин, Д. И. Кореньков. Нечеткие множества в системах управления//Под редакцией доктора технических наук, профессора Ю.Н. Золотухина. <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=83618>
4. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва, 2001.
5. Берштейн Л.С., Мелихов В.Б., Канаев М.М., Выбор величины управления при реализации нечетких управляющих алгоритмов//Электронное моделирование, 1989, №1-с. 97-99.
6. Магомедов И.А., Нечаев В.А. Алгоритм параметрической идентификации морского подвижного объекта. Известие СКНЦ №2, 1985.
7. Магомедов И.А. Построение оптимальных алгоритмов управления траекторным движением морского геофизического комплекса. Тезисы доклада на РНТК "Новые информационные технологии и их применение в медицине, образовании и технике", Махачкала, 1999г.
8. King R.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica*. 1977;13:235-242.
9. Tong R.M. Analysis and Control of fuzzy systems using finite discrete relations. *inform. Control*, 1978; 27(3):431-440.
10. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEC*, 1974;212:1383-1389.
11. Lemke van H.R., Kickert W.J.M. The application of fuzzy set theory set control a warm water process. *J. Automatica*, 1976; 17: 8-18.
12. Kickert W.J.M., Lemke Van H.R. Application of fuzzy controller in a warm water plant. *Automatica*. 1976;12: 301-308.
13. Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 264 с.
14. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. и др. Принципы описания химико-технологических процессов с помощью нечетких множеств. Докл. АН СССР, т.243, № 1, 1978, с. 159-162.
15. Магомедов И.А., Рождественский Ю.В., Беляев Н.И. Нечеткая система управления морскими геофизическими комплексами на базе микро-ЭВМ 5-ая Всесоюзная НТК «Технические средства изучения и освоения океана» (Океанотехника-85), Ленинград, 1985.
16. Магомедов И.А., Кокаев О.Г. Применение теории нечетких множеств к задачам управления нестационарными процессами. В кн. «Методы и системы принятия решений». Рига, 1984г.
17. Магомедов И.А. Логико-лингвистические модели управления движением морского подвижного объекта//Известия Института инженерной физики. 2015. Т. 2. № 36. С. 52-59.
18. Кудряшов В.Е., Нечаев В.А., Антонов А.А. Синтез цифровой адаптивной системы управления сейсморазведочным комплексом. Изв. ЛЭТИ, 1980, вып. 269, 16-20 с.
19. Магомедов И.А., Нечаев В.А. Микропроцессорная система управления движением морского геофизического комплекса по заданной траектории, VIII научно-практическая конференция ученых Дагестана «Автоматизация производства и использование средств ВТ в народном хозяйстве», Махачкала, 1985.
20. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С. Расплывчатая логика - основа построения вычислительных структур для обработки расплывчатой информации. В сб. Однородные цифровые вычислительные и интегрирующие структуры. Вып. IX, Таганрог, 1978, с.4-8.
21. Магомедов И.А. Нечеткий алгоритм управления траекторным движением морского геофизического комплекса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №3, 1999г.

22. Борисов А.Н. Методика оценки функций принадлежности элементов размытого множества. - В кн.: Кибернетика и диагностика. Рига: Зинатне, 1970, вып. 4, с. 125-134.
23. Пospelов Д.А., Ежкова И.В. Принятие решений при нечетких основаниях: 1 Универсальная шкала. Изв.АН СССР. Сер. Техническая кибернетика, 1977, №6, с. 3-11.

References:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *inform. Control*. 1963; 8: 338-353.
2. Zade L.A. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions. *Mir*. 1976; 168. (In Russ)
3. V. Ya. Pivkin, E. P. Bakulin, D. I. Korenkov. Fuzzy sets in control systems//Edited by Doctor of Technical Sciences, Professor Yu.N. Zolotukhin <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=83618> (In Russ)
4. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. Fuzzy logic and artificial neural networks. Moscow, 2001 Publisher: *Fizmatlit* (In Russ)
5. L. S. Bershtein, V. B. Melekhin, M. M. Kanaev. Choice of control value in the implementation of fuzzy control algorithms. [Elektronnoye modelirovaniye] *Electronic modeling*, 1989; 1: 97-99 (In Russ)
6. Magomedov I.A., Nechaev V.A. Algorithm for parametric identification of a marine mobile object. *News of the SKNTs* 1985; 2. (In Russ)
7. Magomedov I.A. Construction of optimal algorithms for controlling the trajectory motion of a marine geophysical complex. Abstracts of the report at the RNTK "New information technologies and their application in medicine, education and technology", Makhachkala, 1999. (In Russ)
8. King R.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica*. 1977; 13: 235-242.
9. Tong R.M. Analysis and Control of fuzzy systems using finite discrete relations. *inform. Control*, 1978; 27(3): 431-440.
10. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEC*, 1974; 212: 1383-1389.
11. Lemke Van H.R., Kickert W.J.M. The application of fuzzy set theory set control a warm water process. *Automatica*. 1976; 17: 8-18.
12. Kickert W.J.M., Lemke Van H.R. Application of fuzzy controller in a warm water plant. *Automatica*. 1976; 12: 301-308.
13. Shreider Yu.A. Equality, similarity, order. *M.[Nauka] Science*, 1971; 264. (In Russ)
14. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. etc. Principles of description of chemical-technological processes using fuzzy sets. -Report. USSR Academy of Sciences, 1978; 243 (1): 159-162. (In Russ)
15. Magomedov I.A., Rozhdestvensky Yu.V., Belyaev N.I. Fuzzy control system for marine geophysical complexes based on a micro-computer 5th All-Union Scientific and Technical Complex "Technical means for studying and developing the ocean" (Okeanotekhnika-85), Leningrad, 1985 (In Russ)
16. Magomedov I.A., Kokaev O.G. Application of the theory of fuzzy sets to control problems of non-stationary processes. In book. "Methods and systems of decision making". Riga, 1984.
17. Magomedov I.A. Logical-linguistic models of motion control of a marine moving object. *Proceedings of the Institute of Engineering Physics*. 2015.; 2(36): 52-59. (In Russ)
18. Kudryashov V.E., Nechaev V.A., Antonov A.A. Synthesis of a digital adaptive control system for a seismic complex. *Izv. LETI*, 1980; 269: 16-20 p. (In Russ)
19. Magomedov I.A., Nechaev V.A. Microprocessor control system for the movement of a marine geophysical complex along a given trajectory, VIII scientific and practical conference of scientists from Dagestan "Automation of production and the use of VT in the national economy", Makhachkala, 1985 (In Russ)
20. Melikhov A.N., Bershtein L.S. Fuzzy logic is the basis for constructing computational structures for processing fuzzy information. On Sat. Homogeneous digital computing and integrating structures. Issue.IX, Taganrog, 1978; 4-8. (In Russ)
21. Magomedov I.A. Fuzzy algorithm for controlling the trajectory motion of a marine geophysical complex. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 1999; 3 (In Russ)
22. Borisov A.N. A technique for estimating the membership functions of elements of a fuzzy set. In the book: *Cybernetics and diagnostics*. Riga: *Zinatne*, 1970; 4: 125-134.
23. Pospelov D.A., Ezhkova I.V. Decision making under fuzzy bases: 1 Universal scale. *Izv. AN USSR. Ser. Technical Cybernetics*, 1977; 6: 3-11. (In Russ)

Сведения об авторах:

Магомедов Иса Алигаджиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; misa1949@mail.ru.

Мирзабеков Мурадхан Мевлюдинович, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; mirzabekov_1994@bk.ru.

Айгумов Тимур Гаджиевич, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; 915533@mail.ru

Information about the authors:

Isa A. Magomedov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; misa1949@mail.ru,

Muradkhan M. Mirzabekov, Postgraduate student, Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; mirzabekov_1994@bk.ru

Timur G. Aygumov, Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof., Head of the Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems; 915533@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 23.01.2022.

Одобрена после рецензирования Revised 14.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 14.02.2022.