

Нечеткая кластеризация как способ повышения эффективности управления в автоматических системах

А.С. Игнатьева ¹✉¹ Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Ссылка для цитирования

Игнатьева А.С. Нечеткая кластеризация как способ повышения эффективности управления в автоматических системах // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 4. С. 566–575. doi: 10.15827/0236-235X.148.566-575

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.1

Поступила в редакцию: 18.06.2024

После доработки: 23.07.2024

Принята к публикации: 30.07.2024

Аннотация. Статья посвящена поиску новых способов повышения эффективности управления в автоматических системах. Предложен новый метод оптимизации процедуры синтеза интеллектуальных регуляторов в системах автоматического управления техническими объектами. С целью организации гибридного управления предлагается метод, в основе которого лежит применение алгоритмов нечеткой кластеризации, а также специально разработанные алгоритмы, реализованные в интеллектуальном регуляторе. Регулятор разработан на основе методов нечеткой логики, нейросетей и биоинспирированных методов. В рамках описания предложенного метода показаны существующие подходы к оптимизации интеллектуальных регуляторов. На концептуальном уровне предложен собственный подход для решения задачи оптимизации параметров интеллектуальных регуляторов, представлено его обобщение. В общем виде описаны модели, для которых применим разработанный метод. В частности, показаны результаты работы метода для ANFIS-системы в гибридных моделях управления. Представлены ANFIS-архитектуры до и после применения кластеризации. Для достижения полученных результатов разработана многоуровневая архитектура комбинированного управления в интеллектуальном регуляторе. Показаны структуры нечетких регуляторов при реализации ANFIS до и после применения нечеткой кластеризации. Выполнен анализ результатов проведенного исследования. В результате применения предложенного метода значительно сокращается количество функций принадлежности лингвистических переменных интеллектуального регулятора и количество управляющих правил. Это позволяет без потери качества управления и без увеличения вычислительных ресурсов снизить трудоемкость разработки интеллектуального регулятора и время его проектирования.

Ключевые слова: нечеткая кластеризация, система управления, технический объект, интеллектуальный регулятор, оптимизация

Введение. В источниках, посвященных проектированию интеллектуальных регуляторов для систем автоматического управления (САУ) особое внимание уделяется разрабатываемым подходам, методам, алгоритмам для оптимизации параметров данных регуляторов [1–3]. Известно, что ПИД-регуляторы широко применяются в САУ, но для современных систем управления, которые функционируют в условиях неопределенности, их ресурсов не всегда достаточно из-за отсутствия оптимальной настройки, наличия задержек управляющих воздействий, сложности настройки их параметров, невозможности использования качественной информации для управления объектами и т.п. [4].

Поэтому для управления объектом, который работает в недетерминированной среде, предпочтение все чаще отдается интеллектуальным регуляторам. Их основа, как правило, – нечеткая логика, нейросети и биоинспирированные методы (генетические алгоритмы). Следует отметить, что перечисленные способы построения

интеллектуальных регуляторов могут быть объединены в систему. Этим реализуется гибридное управление, способствующее наиболее эффективному функционированию объектов в условиях неопределенности.

Данная работа посвящена представлению возможностей нечеткой кластеризации для повышения эффективности управления в автоматических системах, реализованных на основе гибридного подхода.

Обзор релевантных работ

Проблема сокращения вычислительных ресурсов при обработке больших объемов данных в современных системах автоматизации и в других отраслях обусловила разработку эффективных систем управления с применением интеллектуальных технологий, основанных на поиске методов оптимизации баз правил регуляторов. Решению этой задачи посвящено немало научных исследований.

В работе [5] авторы предлагают использовать перекрывающиеся кластеры и систему не-

четкого вывода Такаги-Сугено для обеспечения надежности работы интеллектуальных структур в системе управления. Решения направлены на применение алгоритмов кластеризации для адаптации функций принадлежности, так как эффективность работы интеллектуальных систем управления зависит от наличия неопределенности в физических параметрах, измерениях датчиков и во внешних возмущениях. Полученные результаты демонстрируют более высокую точность работы и способность к обобщению схемы управления на основе данных по сравнению с другими стандартными техническими стратегиями машинного обучения.

Изменения сигнала атмосферного электрического поля (*Atmospheric Electric Field Signal – AEFS*) тесно связаны с изменениями погоды, особенно с грозовой активностью. В работе [6] авторами впервые используется метод кластеризации нечетких C-средних (*Fuzzy C-means – FCM*) для разработки инновационного подхода к характеристике погодных атрибутов, переносимых AEFS. Обнаружение грозовой активности с помощью AEFS с точки зрения технологии нечетких множеств дает содержательное руководство для интерпретируемых гроз. Надежность предлагаемого метода проверяется путем объединения радиолокационных диаграмм и опыта экспертов.

Точное и надежное управление автоматическим регулятором напряжения (*Automatic Voltage Regulators – AVR*) необходимо для поддержания стабильного выходного напряжения синхронного генератора в изменяющихся условиях эксплуатации. Целью исследования [7] является улучшение переходных характеристик и характеристик надежности систем AVR путем разработки новой схемы управления ПИД-LP-регулятора на основе нечеткой логики. Для достижения этой цели авторы сначала разрабатывают новый ПИД-LP-регулятор, затем ПИД-LP-регулятор на основе нечеткой логики для адаптивной настройки параметров первого регулятора с учетом ошибки и ее изменений. Результаты подтверждают применимость и превосходство регулятора в поддержании стабильной работы при флуктуационной динамике энергосистемы с колебаниями до 50 %.

Управление процессом необходимо для обеспечения стабильной и эффективной работы систем управления температурой транскритического CO₂ электромобилей. *Пропорционально-интегральное* (ПИ) управление обычно показывает недостаточную динамическую реакцию

для переменных и сложных условий эксплуатации, а затем вызывает неустойчивое управление процессом. В исследовании [8] была предложена адаптивная стратегия нечеткого ПИ-регулятора, обеспечивающая изменение коэффициентов усиления ПИ-регулятора в реальном времени для быстрого реагирования и подавления колебаний с учетом давления нагнетания компрессора, температуры охлаждающей жидкости и воздуха на выходе. Высокоточная транскритическая тепловая модель CO₂ в электромобилях построена на платформе Amesim для моделирования работы в реальном времени, разработан адаптивный нечеткий алгоритм ПИ-регулятора для оптимизации управления процессом. Результаты показали, что предложенный адаптивный нечеткий ПИ-регулятор может обеспечить подавление перерегулирования на 9,22 % для давления нагнетания, максимальное подавление перерегулирования на 22,29 % и сокращение времени установления на 86 с для температуры воздуха на выходе, а также сокращение времени установления на 25 % для регулирования температуры охлаждающей жидкости. Кроме того, нечеткий ПИ-регулятор улучшил характеристики запуска. Полученные результаты показали, что предлагаемый нечеткий алгоритм ПИ-регулятора может эффективно оптимизировать динамическую работу транскритической тепловой системы CO₂ в электромобилях.

В последнее время бесконтактные методы измерения, такие как лазерное сканирование, приобрели популярность при сборе разрозненных данных из-за их способности генерировать облака точек высокого разрешения, содержащие подробную информацию об объекте. В статье [9] авторами предложен алгоритм оптимизации, основанный на нечеткой кластеризации. Результаты показали, что оптимизированный метод справился с кластеризацией без априорного предположения о числе кластеров для удовлетворения различных требований.

Исследования по использованию различных индексов достоверности кластеров для проверки качества нечеткой кластеризации многомерных наборов данных проведены в работе [10]. По мнению авторов, валидация нечетких кластеров возможна только при применении надежного индекса достоверности кластера (*Cluster Validity Index – CVI*), который правильно распознает структуру данных, при этом его валидации должны быть независимы от любого параметра алгоритма кластеризации или свойства данных. Тем не менее, некоторые классические

нечеткие CVI, такие как коэффициент разделения, энтропия разделения и индекс Фукуяма-Сугено (*Fukuyama-Sugeno* – FS), имеют монотонную тенденцию в зависимости от количества кластеров.

Несмотря на то, что в литературе представлены обширные исследования подобной тенденции, они были проведены для низкоразмерных данных, в которых это свойство данных не влияет на поведение кластеризации. Чтобы исследовать, как такие аспекты влияют на результаты нечеткой кластеризации многомерных данных, авторы сгруппировали объекты из тринадцати реальных наборов данных, используя алгоритм С-средних. Нечеткие разделы были проверены с помощью коэффициента разделения, энтропии разделения индекса FS и с некоторыми предложенными улучшениями, чтобы привести к монотонной тенденции. Помимо анализа кластеров (в сумме восемь проанализированных нечетких CVI), был проведен тест Манна-Кендалла для статистической проверки монотонного тренда результатов CVI. Проведенные анализы показали, что индексы модифицированного коэффициента разделения и индексы энтропии с масштабированным разделением оказались успешными в улучшении по сравнению с индексами энтропии разделения и коэффициента разделения.

В настоящее время алгоритм нечеткой кластеризации широко применяют для сегментации медицинских изображений. Известен метод автоматической сегментации, который объединяет нечеткую кластеризацию с методом установки уровня через динамический ограниченный параметр [11]. Способ установки уровня широко используется в сегментации медицинских изображений, при которой производительность серьезно зависит от инициализации и настройки параметров. Предложенный авторами метод может использовать результаты нечеткой кластеризации непосредственно, что позволяет контролировать эволюцию набора уровней. Более того, добавленный ограниченный параметр постоянно меняется до получения окончательных результатов. Такой алгоритм значительно уменьшает ручную работу и приводит к более надежным результатам сегментации. Предложенный алгоритм был протестирован на некоторых медицинских изображениях, проведено сравнение с другими моделями наборов уровней и современным методом U-Net. Количественные и качественные экспериментальные результаты показывают его эффективность и очевидное улучшение для медицинской сегментации изображения.

В работе [12] авторами решается проблема разложения большой взаимосвязанной электрической сети на более мелкие слабосвязанные зоны для облегчения и гибкого управления системами передачи электроэнергии. Такое разделение обеспечивает контроль напряжения вторичного уровня на региональных уровнях и контролируемое выделение, что может быть использовано для предотвращения распространения отключений большой площади. Система передачи электроэнергии рассматривается как полностью связанный взвешенный ориентированный граф, где узлы и его граничные веса представляют соответственно шины и количественную оценку электрического подобия между любыми двумя шинами.

В отличие от мер подобия, основанных на импедансе или допуске, которые в значительной степени ограничивают и не учитывают топологию электрических сетей, электрическое сходство между любыми двумя шинами в этой работе рассматривается с точки зрения их влияния на оставшуюся часть сети. В частности, электрическое сходство между двумя шинами определяется количественно с точки зрения соответствующих колебаний напряжения на всех шинах в сети в результате возмущений реактивной мощности на этих шинах. Кроме того, количественная оценка электрического влияния не имеет существенного влияния на вычислительную сложность, поскольку она рассчитывается с использованием якобианов, полученных в качестве побочных продуктов решения уравнений потока мощности. Результирующий ориентированный граф затем группируется в заданное количество зон, которые электрически слабо связаны, с помощью теоретико-графического алгоритма кластеризации. Авторами предложена основанная на правилах стратегия децентрализованного управления для эффективного управления напряжениями шины в слабосвязанных зонах, которые получаются в результате процесса кластеризации. Предложенный подход затем тестируется на испытательных системах для таких приложений, как диспетчерское управление напряжением и изоляция, и дает хорошую идентификацию взаимно разделенных подсетей в большой электрической сети.

В работе [13] представлена новая методология прогнозирования SSOFC-Apriori-WRP, которая представляет прогнозирование энергии ветра и скорости на один день вперед. Задача вероятностного прогноза энергии ветра решается с помощью комбинированной интеллекту-

альной структуры и алгоритма нечеткой кластеризации.

Исследования характеристик эксплуатационного поведения ветроэнергетической системы с использованием метода нечеткой кластеризации для мониторинга состояния системы и для исключения ее неисправностей проведены в [14].

Новый метод проектирования систем с помощью входных данных для автоматического определения типов нечетких множеств на основе нечеткости рассмотрены в работе [15]. В нечеткой системе гибридного типа тип нечеткого множества определяется нечеткостью для повышения производительности системы, а интерпретируемость данной системы определяется целостностью, различимостью и избыточностью нечетких множеств. Во-первых, нечеткая кластеризация используется для инициализации базы правил и типов нечетких множеств. Во-вторых, метод роя частиц используется для оптимизации параметров нечеткой системы гибридного типа, а типы нечетких множеств определяются нечеткостью, что означает, что типы нечетких множеств будут динамически меняться в процессе оптимизации. Таким образом, в статье предлагается метод проектирования нечетких систем управления данными, которые могут автоматически определять типы нечетких множеств за счет введения нечеткости.

Многоуровневая нечеткая модель, основанная на кластеризации нечетких правил для задач прогнозирования, предложена в [16]. Такой подход может быть полезен к применению в системах мониторинга эксплуатации и прогноза технического состояния оборудования. В [17] для диагностики и предсказания сбоя ветряной турбины применяется нечеткая кластеризация.

В работе [18] для повышения точности стандартного алгоритма FCM применен лесной алгоритм оптимизации. Нечеткая кластеризация в данном случае представляет собой комбинацию лесного алгоритма оптимизации с градиентным методом, что позволяет получить оптимизированные кластерные центры.

Задача декомпозиции больших электросетей на малые и слабосвязанные с целью упрощения процесса управления системами передачи электроэнергии рассматривается в [12]. В экспертной системе управления на основе правил применена нечеткая кластеризация для проектирования локальных управляющих действий во время перегрузки, недогрузки и разделения.

Представленный обзор показывает широкое распространение в различных областях методов управления, основанных на применении кластеризации, что говорит об актуальности проведенных в настоящей работе исследований.

Разработка метода оптимизации процедуры синтеза интеллектуальных регуляторов в САУ техническими объектами

Анализ существующих подходов к оптимизации управления в САУ позволил сделать вывод о том, что в настоящее время распространение получили комбинированные подходы, которые в своей работе объединяют классическую теорию управления, нечеткую логику, нейросетевые технологии и генетические алгоритмы [19]. Данный комбинированный метод при своей эффективности требует анализа и обработки больших объемов объективной и субъективной информации, что, в свою очередь, влечет за собой необходимость использования повышенных вычислительных мощностей для сокращения времени производимых вычислений.

В результате эффективность работы САУ значительно снижается. Устранить данную проблему предлагается с помощью нечеткой кластеризации с разработанными алгоритмами ее реализации, которая позволяет оптимизировать параметры интеллектуальных регуляторов на основе нечеткого кластерного анализа. В настоящее время для повышения качества предлагается оптимизация интеллектуальных регуляторов (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2024-4/9.jpg>).

В данной работе предлагается метод для решения задачи оптимизации параметров интеллектуальных регуляторов, графически представленный на рисунке 1.

С учетом того, что генетические алгоритмы часто могут выполняться на стадии обучения нейросетей и с учетом модели, на которой выполняется апробация предложенного метода, решение задачи оптимизации параметров интеллектуальных регуляторов приобретает вид, представленный на рисунке 2.

В используемой для апробации модели управления техническими объектами заложен определенный принцип взаимодействия. Реализуется гибридное управление техническим объектом за счет применения интеллектуального регулятора на основе классического регулятора, нечеткого регулятора и нейросети. Его отличительной особенностью является то,



Рис. 1. Решение задачи оптимизации параметров интеллектуальных регуляторов

Fig. 1. Solving the problem of optimization of intelligent controller parameters



Рис. 2. Решение в обобщенном виде

Fig. 2. General solution

что классический регулятор – это источник информации для нечеткого регулятора, который обучает нейросеть, используя информацию с классического.

Подробное описание гибридной модели управления приведено в [20]. Применяв нечеткую кластеризацию (получаемую путем обучения нечеткого регулятора с помощью нейросети данными с классического регулятора) со специально разработанными алгоритмами для подобных моделей, удастся достичь существенной оптимизации синтезируемой адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (*Adaptive Neuro-fuzzy Inference System – ANFIS*).

В общем виде ANFIS-архитектура выглядит несколько громоздкой (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2024-4/10.jpg>). После применения разработанного автором метода ANFIS-архитектура упрощается, отличаясь существенным сокращением количества функций принадлежности для каждой из входных линг-

вистических переменных системы нечеткого вывода и значительным сокращением количества продукционных правил (рис. 3).

Достижение представленных результатов оказалось возможным благодаря разработанной автором многоуровневой архитектуре комбинированного управления в интеллектуальном регуляторе (рис. 4).

Рассмотрим подробнее представленную архитектуру. На первом уровне управление реализуется с помощью классического регулятора с рассчитанными параметрами и объектом управления с известной (рассчитанной) моделью [21]. Для управления объектом в условиях неопределенности на втором этапе синтезируется нечеткий регулятор на основе данных с классического регулятора (используются значения сигналов отклонения, интеграла или дифференциала отклонения для разработки входных лингвистических переменных и сигналы управляющего воздействия для разработки выходной лингвистической переменной) [22]. Формирование базы правил нечеткого регулятора выполняется автоматически (на основе модифицированного алгоритма Мамдани) [20].

Рассмотрим подробнее представленную архитектуру:

На первом уровне управление объектом осуществляется с помощью классического регулятора (модель заранее известна и рассчитана) [21].

На втором этапе на основе данных, полученных с классического регулятора, синтезируется нечеткий регулятор для управления объектом в условии неопределенности. Для разработки выходной лингвистической переменной используются полученные с классического регулятора значения сигналов отклонения, интеграла или дифференциала отклонения и сигналы управляющего воздействия [19]. Формирование базы правил нечеткого регуля-

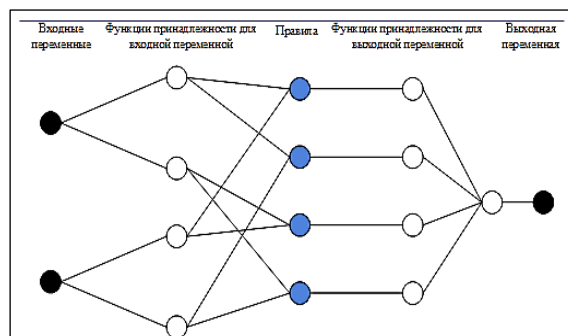
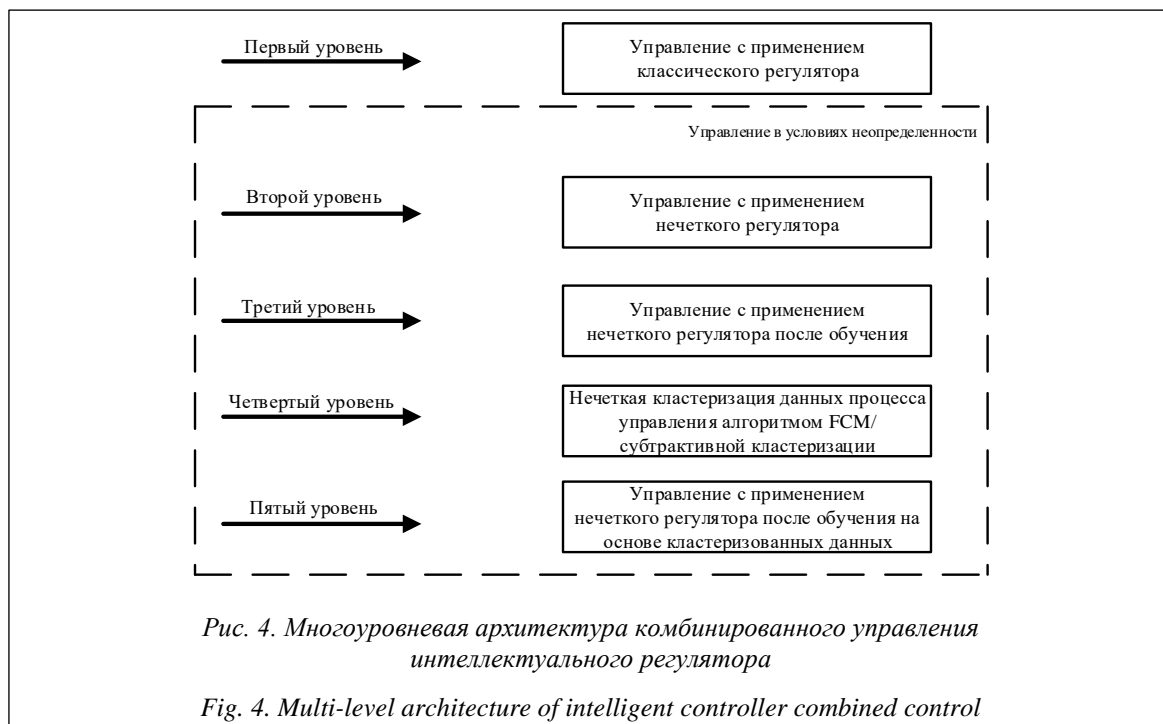


Рис. 3. ANFIS-архитектура после применения кластеризации

Fig. 3. ANFIS architecture after clustering



тора выполняется автоматически (на основе модифицированного алгоритма Мамдани) [20].

На третьем этапе выполняется разработка системы ANFIS для обучения нечеткого регулятора. В качестве обучающих данных используются значения сигналов отклонения, интеграла или дифференциала отклонения и управляющего воздействия, полученные после работы нечеткого регулятора. В качестве проверочных данных используются значения сигналов отклонения, интеграла или дифференциала отклонения и управляющего воздействия, полученные после работы классического регулятора [20, 23].

На четвертом уровне реализуется предложенный автором метод оптимизации, который можно разделить на два отдельных. Первый метод оптимизации предусматривает выполнение нечеткой кластеризации алгоритмом FCM, основу которого составляет метод нечетких множителей Лагранжа, всех значений сигналов ошибки, интеграла ошибки или дифференциала ошибки и управляющего воздействия, полученных при функционировании классического регулятора. Второй метод оптимизации предусматривает выполнение нечеткой кластеризации всех значений этих сигналов алгоритмом субтрактивной кластеризации, которая основана на оценке плотности точек данных вокруг соответствующего центра кластера.

На пятом уровне выполняется разработка системы ANFIS (повторяются работы третьего уровня) для обучения нечеткого регулятора, но

уже используются кластеризованные значения сигналов.

В результате реализации описанной многоуровневой архитектуры комбинированного управления синтезируется новый интеллектуальный регулятор без потери качества управления, позволяющий управлять объектом в условиях неопределенности. Желаемое управление с применением такого регулятора достигается при значительном сокращении количества производимых вычислений.

Предложенный метод позволяет в несколько раз сократить следующие параметры:

- количество требуемых для разработки ANFIS значений для каждого регулятора по показателям отклонения, интеграла или дифференциала отклонения и управляющего воздействия;
- количество функций принадлежности лингвистических переменных интеллектуального регулятора;
- количество правил в базе правил интеллектуального регулятора.

Благодаря этому значительно сократится время выдачи управляющего воздействия в САУ с применением интеллектуального регулятора.

Представим практическую реализацию предложенного метода. На рисунке 5 продемонстрирована структура полученного нечеткого регулятора ANFIS, обученного с помощью нейросети [19] для управления техническим объектом без применения нечеткой класте-

ризации. Из рисунка видно, что количество управляющих правил равно двадцати пяти.

После применения разработанного метода с использованием нечеткой кластеризации алгоритмом FCM и субтрактивного алгоритма кластеризации в этой же модели для этого же объекта управления структура нечеткого регулятора ANFIS принимает вид, представленный на рисунке 6. Количество управляющих правил сократилось до четырех, то есть более чем в шесть раз без потери качества управления [19]. Соответственно, сократилось и количество функций принадлежности с пяти до двух у каждой входной лингвистической переменной.

Анализ полученных результатов

Результаты исследования разработанного метода оптимизации процедуры синтеза интеллектуальных регуляторов позволяют судить о возможности его применения для различных моделей управления техническими объектами в системах автоматизации. Применение метода значительно сокращает количество функций

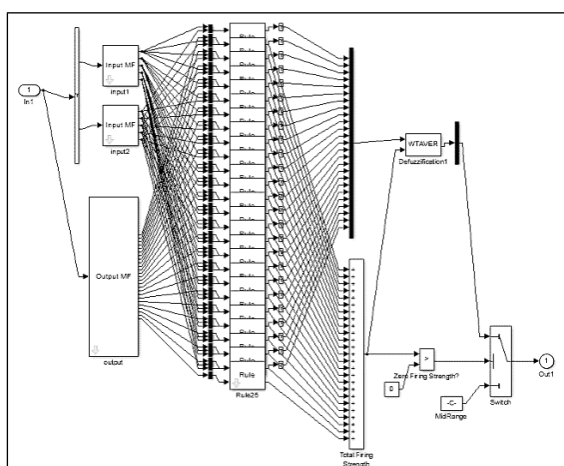


Рис. 5. Структура нечеткого регулятора до применения кластеризации

Fig. 5. Fuzzy controller structure before clustering

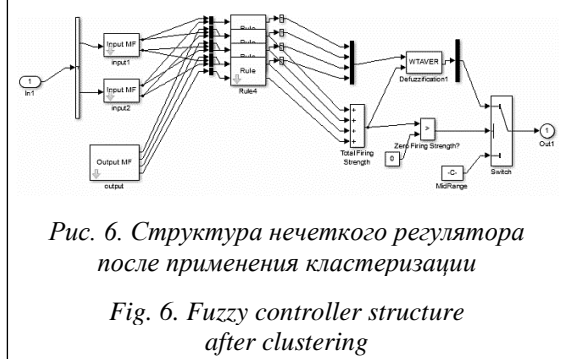


Рис. 6. Структура нечеткого регулятора после применения кластеризации

Fig. 6. Fuzzy controller structure after clustering

принадлежности лингвистических переменных интеллектуального регулятора, количество управляющих правил. Следовательно, можно значительно сократить время выдачи управляющих воздействий без потери качества управления и без увеличения вычислительных ресурсов. Также метод позволяет снизить трудоемкость разработки интеллектуального регулятора и время его проектирования.

Обсуждение результатов

Рассматривая нечеткую кластеризацию в целом как способ решения той или иной научно-практической задачи и анализируя работы исследователей по ее конкретному применению, можно сделать вывод о том, что она является эффективным инструментом для сокращения вычислений в различных областях знаний. Например, подход из работы [15] может привести к ошибкам при разработке базы правил из-за отсутствия точных данных для начальной разработки системы нечеткого вывода. В предлагаемом в данной статье методе кластерный анализ выполняется уже на этапе синтеза нечеткого регулятора, исключая возможные сложности и неточности с проектированием его базы правил.

Анализ работ в области проектирования интеллектуальных САУ показывает, что нечеткий кластерный анализ в данной области или не применяется вовсе, или применяется для отдельных подзадач, без стремления сократить трудоемкость при разработке интеллектуальных регуляторов в САУ. В основном усилия разработчиков направлены на оптимизацию параметров регуляторов с помощью одного или нескольких объединенных (гибридных) методов эффективного управления. Как показали результаты исследований, представленные в данной работе, нечеткая кластеризация может являться полноценным элементом гибридных методов управления, реализация которой позволяет получать требуемое управление без потери качества. При этом фактическим результатом от применения нечеткой кластеризации является значительное улучшение количественных показателей при синтезе интеллектуальных регуляторов.

Заключение

В данном научном исследовании представлен новый метод оптимизации процедуры синтеза интеллектуальных регуляторов. Алгоритмы нечеткого кластерного анализа используются в системах управления, спроектированных на

основе гибридного подхода, поэтому трудоемкость разработки таких систем значительно ниже. Предложенный метод может найти свое применение в интеллектуальных системах в развитии известных подходов к организации эффективного управления без потери качества и с сокращением вычислительных ресурсов с помощью нечеткой кластеризации.

Список литературы

1. Jalali N., Razmi H., Doagou-Mojarrad H. Optimized fuzzy self-tuning PID controller design based on Tribe-DE optimization algorithm and rule weight adjustment method for load frequency control of interconnected multi-area power systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 93, art. 106424. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106424.
2. Solihin M.I., Chuan Ch.Yo., Astuti W. Optimization of fuzzy logic controller parameters using modern meta-heuristic algorithm for gantry crane system (GCS). *Materials Today: Proc.*, 2020, vol. 29, pt. 1, pp. 168–172. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.641.
3. Tripathi S., Shrivastava A., Jana K.C. Self-tuning fuzzy controller for sun-tracker system using Gray Wolf Optimization (GWO) technique. *ISA Transactions*, 2020, vol. 101, pp. 50–59. doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.012.
4. Карабцов, Р.Д., Денисова Л.А. Проектирование нечеткой системы регулирования с использованием генетического алгоритма оптимизации // Омский научн. вестн. 2017. № 6. С. 137–142.
5. Zand J.P., Katebi J., Yaghmaei-Sabegh S. A hybrid clustering-based type-2 adaptive neuro-fuzzy forecasting model for smart control systems. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 239, art. 122445. doi: 10.1016/j.eswa.2023.122445.
6. Yang X., Xing H., Ji X., Xu W., Pedrycz W. Fuzzy clustering for electric field characterization and its application to thunderstorm interpretability. *Digital Communications and Networks*, 2024. doi: 10.1016/j.dcan.2024.03.010.
7. Ahmadnia M., Hajipour A., Tavakoli H. Robust variable-order fractional PID-LP fuzzy controller for Automatic Voltage Regulator systems. *Applied Soft Computing*, 2024, vol. 167, pt. A, art. 112268. doi: 10.1016/j.asoc.2024.112268.
8. Li J., Wang W., Song Yu., Yang X., Cao F. Adaptive fuzzy PI control for the dynamic operation of the transcritical CO₂ thermal system in electric vehicles. *Applied Thermal Eng.*, 2024, art. 124737. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124737.
9. Zhou J., Chen J., Li H. An optimized fuzzy K-means clustering method for automated rock discontinuities extraction from point clouds. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, vol. 173, art. 105627. doi: 10.1016/j.ijrmm.2023.105627.
10. Eustaquio F., Nogueira T. Evaluating the numerical instability in fuzzy clustering validation of high-dimensional data. *Theoretical Computer Sci.*, 2020, vol. 805, pp. 19–36. doi: 10.1016/j.tcs.2019.10.039.
11. Yang Yu., Wang R., Feng Ch. Level set formulation for automatic medical image segmentation based on fuzzy clustering. *Signal Processing: Image Communication*, 2020, vol. 87, art. 115907. doi: 10.1016/j.image.2020.115907.
12. Baranwal M., Salapaka S. Clustering and supervisory voltage control in power systems. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, vol. 109, pp. 641–651. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.025.
13. Li L., Yin X.-L., Jia X.-Ch., Sobhani B. Day ahead powerful probabilistic wind power forecast using combined intelligent structure and fuzzy clustering algorithm. *Energy*, 2020, vol. 192, art. 116498. doi: 10.1016/j.energy.2019.116498.
14. Yang M., Shi Ch., Liu H. Day-ahead wind power forecasting based on the clustering of equivalent power curves. *Energy*, 2021, vol. 218, art. 119515. doi: 10.1016/j.energy.2020.119515.
15. Tan T., Zhao T. A data-driven fuzzy system for the automatic determination of fuzzy set type based on fuzziness. *Inform. Sci.*, 2023, vol. 642, art. 119173. doi: 10.1016/j.ins.2023.119173.
16. Fan Z., Chiong R., Hu Z., Lin Y. A multi-layer fuzzy model based on fuzzy-rule clustering for prediction tasks. *Neurocomputing*, 2020, vol. 410, pp. 114–124. doi: 10.1016/j.neucom.2020.04.031.
17. Ruiz de la Hermosa Gonzalez-Carrato R. Wind farm monitoring using Mahalanobis distance and fuzzy clustering. *Renewable Energy*, 2018, vol. 123, no. C, pp. 526–540. doi: 10.1016/j.renene.2018.02.097.
18. Chaghari A., Feizi-Derakhshi M.-R., Balafar M.-A. Fuzzy clustering based on Forest optimization algorithm. *J. of King Saud University – Computer and Inform. Sci.*, 2018, vol. 30, pp. 25–32. doi: 10.1016/j.jksuci.2016.09.005.
19. Игнатъев В.В. Методы управления техническими объектами с помощью интеллектуальных регуляторов на основе самоорганизации баз знаний. Ростов н/Д; Таганрог: изд-во ЮФУ, 2020. 142 с. doi: 10.18522/801273622.
20. Ignatyeva A., Kureychik V., Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kovalev A. Optimization of the intelligent controller rule base based on fuzzy clustering for controlling an object operating in changing conditions. In: *CCIS. Proc. CIT&DS*, 2021, vol. 1448, pp. 149–162. doi: 10.1007/978-3-030-87034-8_12.
21. Игнатъев В.В., Соловьев В.В. Оптимизация параметров интеллектуального регулятора с помощью генетического алгоритма для управления неустойчивым нелинейным техническим объектом // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2021. № 12-11. С. 76–83.
22. Игнатъев В.В. Компенсация разных типов неопределенностей при управлении техническим объектом с помощью интеллектуальных регуляторов // *Программные продукты и системы*. 2023. Т. 36. № 3. С. 423–431. doi: 10.15827/0236-235X.143.423-431.
23. Игнатъев В.В., Спиридонов О.Б., Курейчик В.М., Ковалев А.В., Игнатъева А.С. Метод гибридного управления в интеллектуальных системах на основе ПИД и ПИД-FUZZY-регуляторов // *Вестн. РГРТУ*. 2017. № 62. С. 110–118. doi: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-110-118.

Fuzzy clustering for improving control efficiency in automatic systemsAlexandra S. Ignatyeva ¹✉¹ Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation**For citation**Ignatyeva, A.S. (2024) 'Fuzzy clustering for improving control efficiency in automatic systems', *Software & Systems*, 37(4), pp. 566–575 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.148.566-575**Article info**

Received: 18.06.2024

After revision: 23.07.2024

Accepted: 30.07.2024

Abstract. The paper focuses on finding new ways to improve control efficiency in automatic systems. It proposes a new method for optimizing the procedure of synthesizing intelligent controllers in automatic control systems for technical objects based on the analysis of advanced approaches to solving this scientific problem. Hybrid control as the most effective when operating objects under conditions of uncertainty. In order to organize hybrid control, the author proposes a method that is based on fuzzy clustering algorithms, as well as specially developed algorithms implemented in an intelligent controller. The controller is based on fuzzy logic methods, neural networks and bioinspired methods. The paper also shows the existing approaches to optimizing intelligent controllers in terms of the proposed method. At the conceptual level, the author proposes an approach to solving the problem of optimizing intelligent controller parameters, presents its generalization. In general, the paper describes the models for applying the developed method. In particular, there are the results of the ANFIS system method in hybrid control models. There is a presentation of ANFIS architectures before and after clustering. The obtained results are due to developing a multi-level architecture of combined control in an intelligent controller. The paper shows fuzzy controller structures when implementing ANFIS before and after fuzzy clustering. The author analyzes the study results. After applying the proposed method, the number of membership functions of linguistic variables of the intelligent controller and the number of control rules are significantly reduced. This allows reducing labor intensity of developing an intelligent controller and the time of its design without losing control quality and increasing computing resources.

Keywords: fuzzy clustering, control system, technical object, intelligent controller, optimization

References

1. Jalali, N., Razmi, H., Doagou-Mojarrad, H. (2020) 'Optimized fuzzy self-tuning PID controller design based on Tribe-DE optimization algorithm and rule weight adjustment method for load frequency control of interconnected multi-area power systems', *Applied Soft Computing*, 93, art. 106424. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106424.
2. Solihin, M.I., Chuan, Ch.Yo., Astuti, W. (2020) 'Optimization of fuzzy logic controller parameters using modern meta-heuristic algorithm for gantry crane system (GCS)', *Materials Today: Proc.*, 29(1), pp. 168–172. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.641.
3. Tripathi, S., Shrivastava, A., Jana, K.C. (2020) 'Self-tuning fuzzy controller for sun-tracker system using Gray Wolf Optimization (GWO) technique', *ISA Transactions*, 101, pp. 50–59. doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.012.
4. Karabtsov, R.D., Denisova, L.A. (2017) 'Designing a fuzzy control system using a genetic optimization algorithm', *Omsk Sci. Bull.*, (6), pp. 137–142 (in Russ.).
5. Zand, J.P., Katebi, J., Yaghmaei-Sabegh, S. (2024) 'A hybrid clustering-based type-2 adaptive neuro-fuzzy forecasting model for smart control systems', *Expert Systems with Applications*, 239, art. 122445. doi: 10.1016/j.eswa.2023.122445.
6. Yang, X., Xing, H., Ji, X., Xu, W., Pedrycz, W. (2024) 'Fuzzy clustering for electric field characterization and its application to thunderstorm interpretability', *Digital Communications and Networks*. doi: 10.1016/j.dcan.2024.03.010.
7. Ahmadnia, M., Hajipour, A., Tavakoli, H. (2024) 'Robust variable-order fractional PID-LP fuzzy controller for Automatic Voltage Regulator systems', *Applied Soft Computing*, 167(A), art. 112268. doi: 10.1016/j.asoc.2024.112268.
8. Li, J., Wang, W., Song, Yu., Yang, X., Cao, F. (2024) 'Adaptive fuzzy PI control for the dynamic operation of the transcritical CO₂ thermal system in electric vehicles', *Applied Thermal Eng.*, art. 124737. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124737.
9. Zhou, J., Chen, J., Li, H. (2024) 'An optimized fuzzy K-means clustering method for automated rock discontinuities extraction from point clouds', *Int. J. of Rock Mech. and Mining Sci.*, 173, art. 105627. doi: 10.1016/j.ijrmms.2023.105627.
10. Eustaquio, F., Nogueira, T. (2020) 'Evaluating the numerical instability in fuzzy clustering validation of high-dimensional data', *Theoretical Computer Sci.*, 805, pp. 19–36. doi: 10.1016/j.tcs.2019.10.039.
11. Yang, Yu., Wang, R., Feng, Ch. (2020) 'Level set formulation for automatic medical image segmentation based on fuzzy clustering', *Signal Processing: Image Communication*, 87, art. 115907. doi: 10.1016/j.image.2020.115907.
12. Baranwal, M., Salapaka, S. (2019) 'Clustering and supervisory voltage control in power systems', *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, 109, pp. 641–651. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.025.
13. Li, L., Yin, X.-L., Jia, X.-Ch., Sobhani, B. (2020) 'Day ahead powerful probabilistic wind power forecast using combined intelligent structure and fuzzy clustering algorithm', *Energy*, 192, art. 116498. doi: 10.1016/j.energy.2019.116498.
14. Yang, M., Shi, Ch., Liu, H. (2021) 'Day-ahead wind power forecasting based on the clustering of equivalent power curves', *Energy*, 218, art. 119515. doi: 10.1016/j.energy.2020.119515.

15. Tan, T., Zhao, T. (2023) 'A data-driven fuzzy system for the automatic determination of fuzzy set type based on fuzziness', *Inform. Sci.*, 642, art. 119173. doi: 10.1016/j.ins.2023.119173.
16. Fan, Z., Chiong, R., Hu, Z., Lin, Y. (2020) 'A multi-layer fuzzy model based on fuzzy-rule clustering for prediction tasks', *Neurocomputing*, 410, pp. 114–124. doi: 10.1016/j.neucom.2020.04.031.
17. Ruiz de la Hermosa Gonzalez-Carrato, R. (2018) 'Wind farm monitoring using Mahalanobis distance and fuzzy clustering', *Renewable Energy*, 123(C), pp. 526–540. doi: 10.1016/j.renene.2018.02.097.
18. Chaghari, A., Feizi-Derakhshi, M.-R., Balafar, M.-A. (2018) 'Fuzzy clustering based on Forest optimization algorithm', *J. of King Saud University – Computer and Inform. Sci.*, 30, pp. 25–32. doi: 10.1016/j.jksuci.2016.09.005.
19. Ignatyev, V.V. (2020) *Methods for Controlling Technical Objects Using Intelligent Controllers Based on Self-Organization of Knowledge Bases*. Rostov-on-Don; Taganrog, 142 p. (in Russ.). doi: 10.18522/801273622.
20. Ignatyeva, A., Kureychik, V., Ignatyev, V., Soloviev, V., Beloglazov, D., Kovalev, A. (2021) 'Optimization of the intelligent controller rule base based on fuzzy clustering for controlling an object operating in changing conditions', in *CCIS. Proc. CIT&DS*, 1448, pp. 149–162. doi: 10.1007/978-3-030-87034-8_12.
21. Ignatyev, V.V., Soloviev, V.V. (2021) 'Optimization of the parameters of an intelligent controller using a genetic algorithm to control an unstable nonlinear technical object', *Actual Sci. Research in the Modern World*, (12-11), pp. 76–83 (in Russ.).
22. Ignatyev, V.V. (2023) 'Compensation of various types of uncertainties when controlling a technical object using intelligent controllers', *Software & Systems*, 36(3), pp. 423–431 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.143.423-431.
23. Ignatyev, V.V., Spiridonov, O.B., Kureychik, V.M., Kovalev, A.V., Ignatyeva, A.S. (2017) 'Method of hybrid control in intelligent systems based on pid and pid-fuzzy-controllers', *Vestn. RGRU*, (62), pp. 110–118 (in Russ.). doi: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-110-118.

Авторы

Игнатъева Александра Сергеевна¹, инженер,
alexandra_25@mail.ru

¹ Южный федеральный университет,
Институт радиотехнических систем и управления,
г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Authors

Alexandra S. Ignatyeva¹, Engineer,
alexandra_25@mail.ru

¹ Southern Federal University,
Institute of Radio Engineering Systems and Control,
Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation