

Генетический поиск как инструмент преодоления лингвистической неопределённости

В.В. Игнатьев

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В данной статье приводится описание разработанного метода автоматической оптимизации параметров интеллектуального регулятора на основе адаптивного генетического алгоритма. Ключевой целью разработки выступает совершенствование механизма формирования базы правил интеллектуального регулятора посредством многопараметрической оптимизации. Применение генетического алгоритма предназначено для устранения лингвистической неопределённости при конструировании систем управления на базе интеллектуальных регуляторов. В рамках исследования предложен оригинальный алгоритм, реализующий комплексную оптимизационную процедуру, которая структурирована в виде трёх последовательных этапов: идентификации оптимальных параметров систем управления, функционирующих на принципах нечёткой логики, оптимизации структуры базы правил интеллектуального регулятора с целью повышения эффективности управления, имитационного моделирования процесса автоматической генерации и последующей оптимизации параметров интеллектуального регулятора, что обеспечивает валидацию разработанного подхода. На первом этапе осуществляется поиск и верификация набора параметров, обеспечивающих максимально эффективное управление в условиях неопределённости, на втором этапе выполняется целенаправленная модификация системы правил с целью повышения качественных показателей управления, третий этап – это функция валидации разработанного решения. Реализация данного подхода обеспечивает оптимизацию следующих параметров нечёткого регулятора в рамках интеллектуальной системы: весов правил базы нечёткой логики; центров функций принадлежности лингвистических переменных (как входных, так и выходной). Приводится доказательный пример, который позволяет оценить работу алгоритма для модели с применением интеллектуального регулятора, спроектированного на основе классического, нечеткого регуляторов и системы ANFIS. Полученные экспериментальные данные позволяют объективно оценить преимущества предложенного подхода к оптимизации параметров интеллектуального регулятора и подтвердить его практическую значимость для задач современного интеллектуального управления.

Ключевые слова: интеллектуальный регулятор, оптимизация, генетический алгоритм, неопределенность, терм-множество.

Введение

Современные фундаментальные исследования в сфере индустриального искусственного интеллекта характеризуются выраженной ориентацией на генерацию инновационных методологических подходов. В фокусе научного поиска – конструирование: концептуально новых математических моделей; алгоритмических схем повышенной

вычислительной эффективности; формализованных методов управления, обеспечивающих оптимизацию как качественных, так и количественных показателей производственных систем.

При этом наблюдается существенный дисбаланс между темпами теоретического развития и степенью его практической имплементации. Несмотря на высокую научную ценность создаваемых имитационных моделей, их трансформация в прикладные решения (включая прототипирование программных модулей и экспериментальных продуктов для верификации исследовательских гипотез) зачастую остаётся незавершённой. Данный феномен обусловлен рядом факторов:

- сложностью масштабирования абстрактных моделей до уровня промышленных систем;
- высокими требованиями к вычислительным ресурсам при внедрении инновационных алгоритмов;
- необходимостью дополнительной валидации теоретических конструкций в условиях реальных производственных сред.

Таким образом, ключевой проблемой современной науки в области индустриального искусственного интеллекта становится преодоление разрыва между фундаментальными разработками и их операционализацией в прикладных технологических решениях.

Одной из явных и регулярно выделяемых исследователями задач в рамках представленной проблемы является задача преодоления лингвистической неопределенности при разработке передовых систем автоматизации. Решение данной задачи позволит обеспечить быстрый переход от имитационных моделей к внедрению реальных практических решений в промышленные системы.

Научная актуальность исследования определяется применением генетического поиска в качестве способа устранения лингвистической

неопределённости при конструировании систем управления на базе интеллектуальных регуляторов.

Научная новизна представленного исследования заключается во внедрении генетического алгоритма в структуру контура управления интеллектуального регулятора, сконструированного на основе синтеза классического и нечёткого регуляторов и дальнейшим его обучением с помощью адаптивной системой нейро-нечёткого вывода (далее ANFIS). Разработанный алгоритм выполняет функцию многопараметрической оптимизации интеллектуального регулятора и реализуется через последовательное выполнение трёх ключевых этапов:

- идентификации оптимальных параметров систем управления, функционирующих на принципах нечёткой логики;
- оптимизации структуры базы правил нечёткого регулятора с целью повышения эффективности управления;
- имитационном моделировании процесса автоматической генерации и последующей оптимизации параметров нечёткого регулятора, что обеспечивает валидацию разработанного подхода.

Реализация данного подхода обеспечивает оптимизацию следующих параметров нечёткого регулятора в рамках интеллектуальной системы: весов правил базы нечёткой логики; центров функций принадлежности лингвистических переменных (как входных, так и выходной).

Современные достижения и тенденции в изучении научной проблемы

В ходе исследования предметной области, посвящённого оптимизации параметров интеллектуального регулятора с применением генетического алгоритма, был проведён аналитический обзор исходного материала. Результаты проведённого анализа демонстрируют следующие актуальные разработки.

В исследовании [1] разработан оптимизатор коэффициентов усиления системы нечеткого регулятора для беспилотного летательного аппарата (далее БПЛА), основанный на метаэвристическом алгоритме. Генетический алгоритм применяется для настройки коэффициентов усиления на входе нечеткого регулятора. Смоделирован, спроектирован и реализован типовой нечеткий регулятор в математической модели, полученной с помощью метода Ньютона-Эйлера. Затем коэффициенты усиления управления были оптимизированы с помощью метаэвристического алгоритма. Цель управления заключается в том, чтобы БПЛА потреблял наименьшее количество энергии. Генетический алгоритм находит необходимые коэффициенты усиления для соответствия проектным параметрам. Испытания проводились в среде MATLAB/Simulink. Результаты свидетельствуют о следующих улучшениях: в одних задачах ошибка отслеживания траекторий снизилась на 30%, в других появилась возможность отслеживания, что было невозможно выполнить без настроенного с помощью генетического алгоритма регулятора.

В работе [2] авторами представлен алгоритм управления на базе искусственного интеллекта, использующий машинное обучение и генетическую оптимизацию для повышения визуального комфорта в адаптивных фасадах. Эффективное управление дневным светом и визуальным комфортом в офисных помещениях остается сложной задачей, поскольку существующие системы затенения часто не способны адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и потребностям пользователей. В данной статье представлен алгоритм управления затенением в реальном времени на базе искусственного интеллекта, который оптимизирует визуальный комфорт с помощью суррогатных моделей на основе машинного обучения и эволюционной оптимизации. Генетический алгоритм сортировки обеспечивает баланс

между уменьшением бликов и использованием дневного света, оптимизируя конфигурацию фасада в реальном времени. В отличие от аналогичных подходов, в статье представлена обобщаемая многокритериальная структура управления. Результаты показывают, что оптимизация на основе искусственного интеллекта значительно улучшает характеристики адаптивного фасада, предлагая масштабируемое решение для интеллектуального управления дневным светом и комфортом.

Метод энергоэффективной оптимизации терминальных систем кондиционирования воздуха в интернет-центрах обработки данных на основе генетического алгоритма представлен в работе [3]. В данном исследовании представлен подход к оптимизации энергопотребления путем интеграции технологий искусственного интеллекта в систему управления и контроля энергопотребления. Метод объединяет энергетическую модель, модель теплопередачи и генетический алгоритм для повышения эффективности воздухообрабатывающих установок компьютерных залов.

Оптимизированный пропорциональный резонансный регулятор тока на основе генетического алгоритма для повышения эффективности шунтирующего фильтра активной мощности предложен в работе [4]. Гармоники тока, создаваемые нелинейными нагрузками, оказывают деструктивное воздействие, которое влияет на качество электроэнергии энергосистемы и вызывает серьёзные проблемы во всей сети. Активный фильтр мощности (далее АФМ) является одним из лучших и наиболее распространённых решений для снижения или устранения гармонических возмущений. Однако, ввиду сложности и чувствительности этих фильтров, точность и быстродействие используемых в них технологий управления являются важным и основным требованием. Таким образом, точная и оптимальная настройка управления АФМ позволяет значительно повысить производительность системы и качество электроэнергии. Авторами

рассматриваются принципы проектирования шунтирующего активного фильтра мощности (далее ШАФМ) и объясняется оптимальный метод управления этой системой с помощью соответствующего моделирования. Также в качестве подходящей структуры для управления током системы ШАФМ предлагается пропорционально-резонансный регулятор (далее ПР), оптимизированный с помощью генетического алгоритма. ПР-регулятор с возможностью точного отслеживания гармонических токов и быстрого динамического отклика обладает высокой совместимостью с системой ШАФМ. В целом, целью является достижение более высоких и подходящих характеристик для снижения гармонических возмущений и создания надежной, быстрой, точной, гибкой, стабильной и оптимальной производительности этих систем при обнаружении и генерации сигналов компенсации. Моделирование проводилось в среде MATLAB/Simulink, а также экспериментальные испытания данного устройства были проведены и проверены в реальном ШАФМ на базе цифрового сигнального процессора. Согласно результатам, полученным в установившемся режиме с благоприятным динамическим откликом, коэффициент гармонических искажений тока сети был значительно снижен, что и требовалось решить с помощью ПР.

Система самонастройки на основе нейронных сетей и генетических алгоритмов для регулятора с возвратным движением БПЛА представлена в работе [5]. Управление с возвратным движением широко применяется в дронах, поскольку учитывает динамику системы при разработке закона управления и устойчиво к параметрическим неопределенностям. В данной статье представлена интеллектуальная система самонастройки с возвратным движением для многороторного дрона. Автонастройка выполняется на основе динамической реакции аппарата, оптимизируя энергопотребление и минимизируя время нарастания сигнала, но не вызывая перерегулирования,

приводящего к ненужному расходу энергии. Для достижения этого эффекта нейронная сеть с обратным распространением ошибки была обучена на базе данных, учитывающей динамический отклик системы. База данных была получена с помощью метаэвристического алгоритма, гарантирующего использование только комбинаций, удовлетворяющих этим условиям. Для тестирования системы было проведено несколько независимых испытаний. Результаты показывают, что предложенный метод адекватно настроен и реализуем, с ожидаемым динамическим откликом для 95% тестов и динамическим откликом с незначительным перерегулированием и временем установления по сравнению с ПИД-регулятором, настроенным с помощью генетического алгоритма.

Исследование метода оптимизации энергосбережения в электрофургоне-рефрижераторе на основе генетического алгоритма рассмотрено в работе [6]. В данной работе предложен метод оптимизации холодильной системы для продления времени работы аккумулятора электрофургона-рефрижератора. Генетический алгоритм используется для оптимизации рабочих параметров холодильной системы. Сначала выбираются соответствующие переменные оптимизации. Затем определяется целевая функция для минимизации энергопотребления, а затем устанавливаются ограничения, соответствующие фактическим рабочим условиям. С помощью генетического алгоритма рассчитываются такие параметры, как расход хладагента, расход насоса перекачки хладагента и расход подаваемого воздуха. Результаты показывают, что при разумных параметрах генетический алгоритм может быть эффективно применен для оптимизации холодильной системы автофургона-рефрижератора, что позволяет снизить энергопотребление.

В работе [7] авторами предложен квантовый генетический алгоритм, основанный на оптимальном управлении для шестисочлененной

роботизированной руки. Алгоритм используется для поиска наилучшего управления с учетом рассчитанной траектории. Классические генетические алгоритмы обычно используются для решения задач оптимизации в роботах-манипуляторах, однако квантовый генетический алгоритм обеспечивают стабильное преимущество с точки зрения качества решения.

В исследовании [8] представлена разработка нейронечёткого регулятора для управления БПЛА. Регулятор реализован в среде MATLAB с применением гибридного подхода: в его основе лежит ANFIS, дополненная генетическим алгоритмом. ANFIS обеспечивает воспроизведение заданной траектории движения БПЛА в двумерной вертикальной плоскости. Генетический алгоритм выполняет оптимизацию параметров ANFIS, ускоряя сходимость к оптимальным значениям, снижая ошибки обучения и повышая качество управления БПЛА. Проведённое моделирование подтвердило превосходство разработанного регулятора над традиционным ПИД-регулятором, продемонстрировав его высокую производительность.

В исследовании [9] анализируется система управления для телескопа с функцией слежения. В качестве регулятора используется адаптивный нечёткий ПИД-регулятор, параметры которого оптимизируются посредством генетического алгоритма. Механизм работы метода состоит в том, что эволюционный алгоритм автоматически подбирает функции принадлежности нечёткого регулятора, правила управления. Регулятор демонстрирует высокую эффективность в задачах, требующих прецизионного управления. Тем не менее, в работе отсутствуют данные о том, как он ведёт себя при воздействии различных видов неопределённостей – в том числе при их одновременном возникновении.

В исследовании [10] предложен инновационный метод отслеживания глобальной точки максимальной мощности в фотоэлектрических системах при неоднородном затенении. Проблема частичного затенения

фотоэлектрических панелей приводит к появлению множественных пиков мощности, что затрудняет корректное распознавание локальных и глобальных максимумов существующими алгоритмами и снижает эффективность энергоотдачи. Для преодоления этих ограничений авторы разработали гибридный подход, объединяющий ANFIS и генетический алгоритм. ANFIS эффективно моделирует нелинейные характеристики и неопределённости фотоэлектрических систем, а генетический алгоритм в динамическом режиме оптимизирует параметры ПИД-регулятора, минимизируя расхождение между фактической выходной мощностью и расчётной максимальной мощностью, полученной в ANFIS. Разработанный регулятор демонстрирует способность адаптироваться к нелинейному и изменяющемуся во времени поведению DC/DC SEPIC-преобразователя, обеспечивая улучшенное время отклика и повышенную стабильность работы в различных эксплуатационных условиях. Реализация алгоритма выполнена в среде MATLAB/Simulink. Результаты моделирования подтвердили эффективность предложенного метода в повышении производительности фотоэлектрических систем в сложных динамических условиях.

Для улучшения отклика адаптивных регуляторов без необходимости дополнительных специальных знаний в работе [11] предлагается процедура самонастройки (оптимальной параметризации) адаптивных регуляторов прямого типа с использованием генетического алгоритма. Это предложение не ухудшает свойства устойчивости и сходимости адаптивной стратегии, добавляя лишь автономный этап выбора параметров, выполняемый за разумное время вычислений. Экспериментальные результаты, полученные для объекта в статье, показали, что предложенная процедура с использованием генетического алгоритма обеспечивает меньшую ошибку слежения, более быструю динамику регулирования и меньшее время

установления, что приводит к лучшим характеристикам по сравнению с тем же регулятором с параметрами, инициализированными эмпирически.

Многомерный алгоритм размещения ресурсов, основанный на параллельном генетическом алгоритме рассмотрен в работе [12]. С развитием облачных технологий появились системы управления кластерами контейнеров, такие как Kubernetes, Swarm и Mesos. Разработанный генетический алгоритм адаптирован к облачному контексту благодаря улучшениям в дизайне генетического кодирования, генерации начальной популяции и формулировке целевой функции, что позволило повысить вычислительную эффективность и решить сложную задачу размещения ресурсов в облачных средах.

В работе [13] применен нелинейный предиктивный регулятор и генетический алгоритм для улучшения возможностей отслеживания спутников на низкой орбите. Генетический алгоритм используется в таких системах для оптимизации параметров регулятора с целью снижения возмущений и улучшения его характеристик. Результаты экспериментов показали, что нелинейный предиктивный регулятор не только может противостоять крупным ошибкам и возмущениям, но и компенсировать эти ошибки, возвращая спутник на основную орбиту и поддерживая ее.

Оптимальная гибкая стратегия управления распределением мощности для гибридной системы накопления энергии с предиктивным управлением на основе генетического алгоритма представлена в работе [14]. В данной статье предлагается оптимальная гибкая система управления энергией для гибридных систем накопления энергии в электромобилях. Основным преимуществом предлагаемой системы использование предиктивного управления на основе генетического алгоритма с оптимальной настройкой весовых коэффициентов и ограничений, что позволяет максимально

эффективно использовать суперконденсаторы в течение всего цикла вождения.

Проведённый анализ научных публикаций, доступных в сети Интернет, позволил выявить широкий спектр методологических подходов к разработке интеллектуальных регуляторов и систем управления с использованием технологий искусственного интеллекта. Отобранные в ходе исследования работы характеризуются содержательной релевантностью поставленной научной проблематике, поскольку включают результаты, непосредственно сопряжённые с тематикой настоящего исследования.

На основании проведённого аналитического обзора обоснованно утверждается, что предлагаемый в данной статье метод автоматической оптимизации параметров интеллектуального регулятора, базирующийся на адаптивном генетическом алгоритме, представляет собой значимый вклад в развитие методологии проектирования интеллектуальных систем автоматизации. Данный подход претендует на равноправную позицию в ряду существующих научно-методических решений в рассматриваемой предметной области.

Метод автоматической оптимизации параметров интеллектуального регулятора на основе адаптивного генетического алгоритма

Рассмотрим общую структуру метода в разрезе представленной научной новизны. Как было отмечено генетический алгоритм встроен в структуру управления интеллектуального регулятора, сконструированного на основе синтеза классического и нечёткого регуляторов. В общем виде рассматриваемая модель управления на основе интеллектуального регулятора приведена на рис.1.

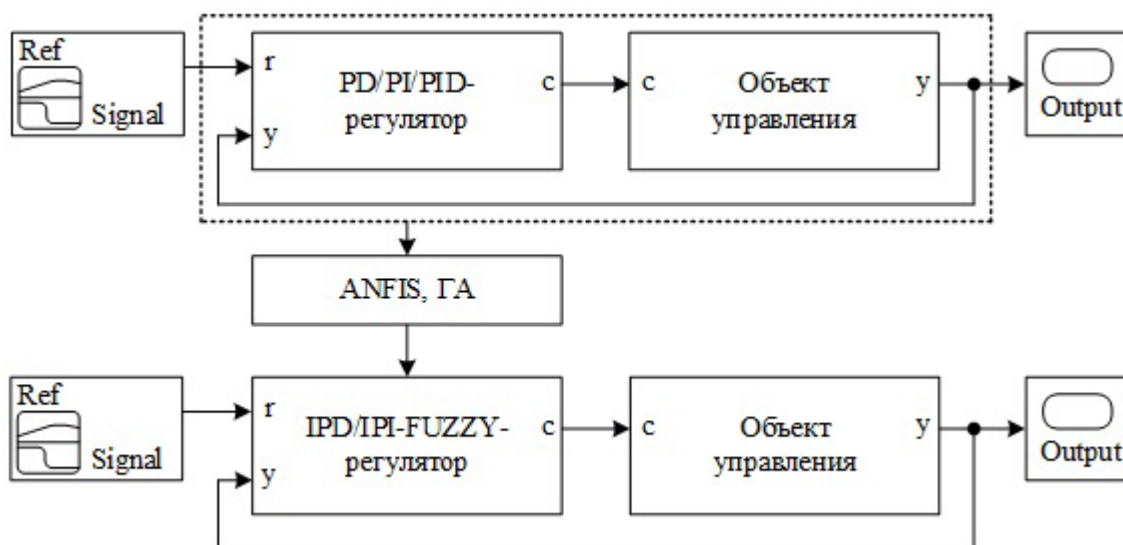


Рис. 1. – Модель интеллектуального регулятора

В данной модели база правил IPD/IPI-FUZZY-регулятора создается автоматически на основе статистических данных, полученных с классического регулятора. Для построения нечеткого регулятора используются данные сигналов от классического регулятора (отклонения, интеграла или дифференциала отклонения и управляющего воздействия). Далее автоматически создается база правил нечеткого регулятора, отличающаяся полнотой, исключающая избыточность и противоречивость правил, строится ANFIS.

Предлагаемая модель структурирована как двухконтурная система управления, функционирующая по заданному алгоритму: первый контур включает классический регулятор, взаимодействующий с объектом управления, второй – нечёткий регулятор, также сопряжённый с объектом управления. Данная конфигурация выступает в качестве базовой платформы в рамках исследовательской программы автора, направленной на разработку интеллектуальных гибридных регуляторов. Поскольку метод автоматической оптимизации параметров интеллектуального регулятора на основе адаптивного генетического алгоритма, рассматриваемый в настоящей статье, ориентирован именно на регуляторы указанного типа, публикуемая работа

представляет собой логическое продолжение и дальнейшее развитие ранее начатых автором исследований [15].

Подробное описание алгоритма функционирования упомянутых регуляторов представлено в ряде предшествующих публикаций автора и в рамках данной статьи не дублируется.

1. Первым этапом предложенного метода является идентификация оптимальных параметров систем управления, функционирующих на принципах нечёткой логики.

Представим задачу оптимизации конфигурации функции принадлежности в процессе разработки нечёткого регулятора с применением генетического алгоритма. Для реализации выбран треугольный тип функций принадлежности – он отличается простотой и наглядностью. Треугольная форма такой функции задаётся посредством трёх параметров, которые определяют координаты вершин $A(x,y)$, $B(x,y)$, $C(x,y)$. В дальнейшем значение координаты не учитывается, фиксировано на уровне равном 0 для вершин A и C , для B – на уровне 1. Графическая иллюстрация процедуры, в рамках которой терм-множество лингвистической переменной представляется как фрагмент хромосомы параметров, в общем виде приведена на рис. 2.

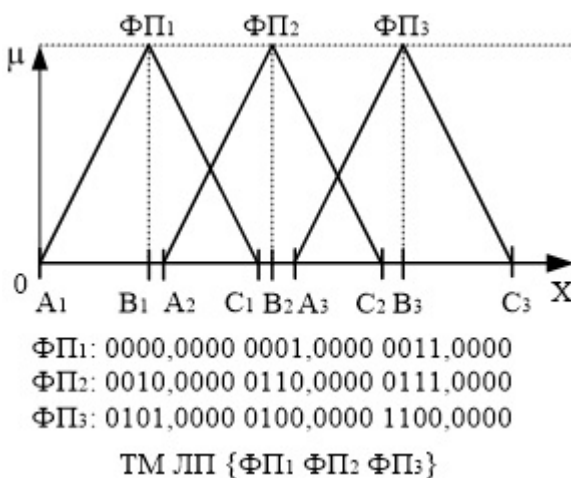


Рис. 2. – Представление терм-множества лингвистической переменной в виде

части хромосомы параметров

Координата x для вершин A , B и C задана посредством бинарного кода Грея. Аналогичная процедура применяется и к остальным терм-множествам лингвистических переменных нечёткого регулятора. Кодовая последовательность представляет собой одно из возможных решений в рамках определённого множества, с дальнейшим преобразованием. Схематичное изображение данного процесса приведено на рис. 3.

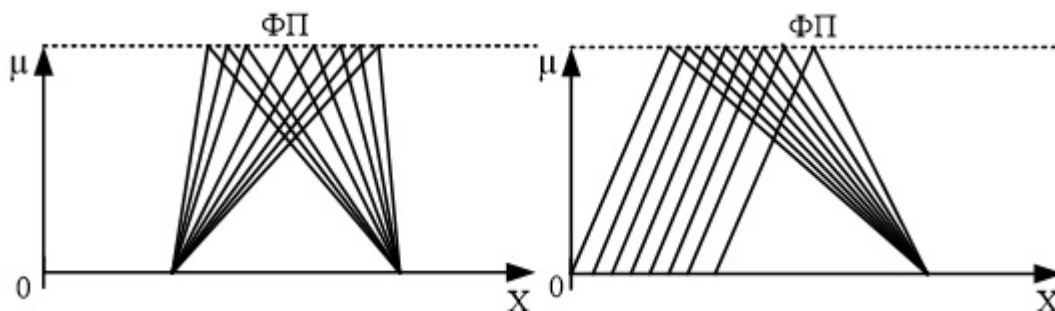


Рис. 3. – Изменение параметров функций принадлежности на основе генетического алгоритма

Используя оценку приспособленности создаваемых решений, генетический алгоритм позволяет в сжатые сроки подобрать наилучшие параметры функций принадлежности для нечёткого регулятора.

2. Вторым этапом метода является оптимизация структуры базы правил нечёткого регулятора с целью повышения эффективности управления.

Предлагаемый подход к оптимизации базируется на разбиении комплексной задачи на отдельные подзадачи. К числу таких подзадач относятся:

- определение метода формирования начальной популяции решений в рамках генетического алгоритма;
- выбор стратегии отбора решений для новой популяции в генетическом алгоритме;
- разработка способа представления параметров управляющих правил в виде хромосомы генетического алгоритма;

- подбор функции для оценки приспособленности хромосом в генетическом алгоритме и др.

Эффективность применения генетического алгоритма в конкретной ситуации зависит от совокупности его параметров. Чтобы объединить оптимизируемые параметры в единое решение, используется метод кодирования хромосом. Для нечёткого регулятора возможны три варианта кодирования настраиваемых параметров:

- параметров терм-множеств лингвистических переменных;
- параметров базы правил;
- параметров терм-множеств лингвистических переменных и базы правил.

Методика кодирования параметров терм-множеств лингвистических переменных нечёткого регулятора ранее была детально рассмотрена в исследованиях [16].

3. Третий этап метода – имитационное моделирование процесса автоматической генерации и последующей оптимизации параметров нечёткого регулятора (с обучением ANFIS). Моделирование выполнялось для неустойчивого нелинейного технического объекта третьего порядка. На рис. 4 показаны полученные графики переходных процессов.

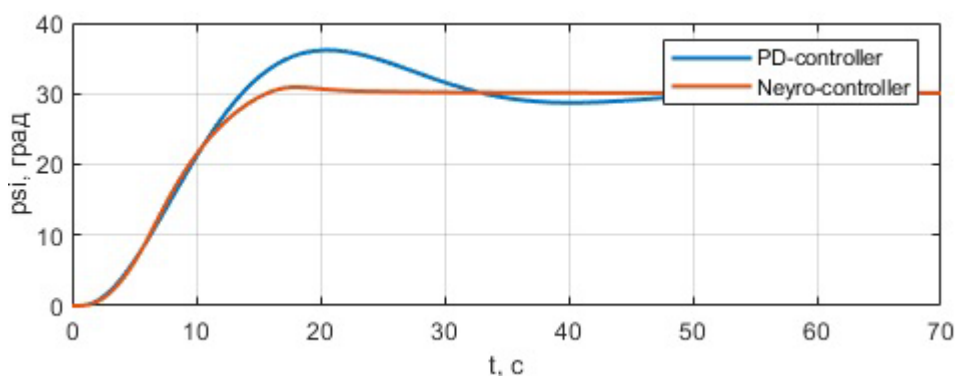


Рис. 4. – Графики переходных процессов

Был проведён анализ нечёткого регулятора (Neuro-controller), синтезированного на основе данных классического ПД-регулятора (PD-

controller)), в котором лингвистические переменные имели по пять термов. Оптимизация его параметров осуществлялась поэтапно в таком порядке:

1) На первом этапе подбирались оптимальные центры функций принадлежности для лингвистической переменной «отклонение».

2) Затем аналогичным образом оптимизировались центры функций принадлежности для переменной «дифференциал отклонения».

3) Следующий шаг – оптимизация центров функций принадлежности для лингвистической переменной «управляющее воздействие».

4) Далее производилась настройка (оптимизация) ключевых операций алгоритма Мамдани: агрегирования, активизации, аккумуляции и дефаззификации.

5) На заключительном этапе оптимизировались весовые коэффициенты в базе нечётких правил.

Для выполнения оптимизации применялась функция *ga* в среде MatLab 2021a. При этом использовались стандартные (предустановленные) параметры генетического алгоритма. Во всех экспериментах качество оптимизации оценивалось по единому критерию – минимизации суммы квадратов ошибки (1):

$$J = \sum_{i=1}^n (e_i)^2, \quad (1)$$

где e_i – ошибка управления на i -м отсчете, n – количество отсчетов.

В разработанном программном обеспечении внедрена методика оптимизации нечёткого регулятора посредством генетического алгоритма. Данный подход позволяет находить оптимальные значения весов в базе нечётких правил, центров функций принадлежности для входных лингвистических переменных, центров функций принадлежности для выходной лингвистической переменной.

Анализ полученных результатов

На основании анализа графических зависимостей, отражающих динамику переходных процессов в исследуемой системе управления, можно сделать обоснованный вывод о существенном улучшении качественных показателей регулирования после проведения оптимизации нечёткого регулятора. В результате применения генетического алгоритма для настройки параметров интеллектуального регулятора наблюдаются следующие позитивные изменения в характеристиках переходного процесса:

1) Сокращение длительности переходного процесса – время, необходимое для достижения установившегося режима работы системы, заметно уменьшилось, что свидетельствует о повышении быстродействия системы управления.

2) Снижение величины перерегулирования – амплитуда превышения регулируемой переменной над заданным установившимся значением существенно уменьшилась, что повышает точность управления и снижает риск выхода системы за допустимые границы регулирования.

3) Уменьшение колебательности процесса – затухание переходных колебаний происходит более интенсивно, а число колебаний в переходном процессе сократилось, что указывает на повышение устойчивости системы и снижение энергетических потерь, связанных с колебательными режимами.

Обсуждение результатов

Совокупность указанных улучшений позволяет с высокой степенью достоверности утверждать об эффективности применённого подхода к оптимизации параметров нечёткого регулятора посредством генетического алгоритма, что продемонстрировано на примере управления неустойчивым нелинейным техническим объектом. Данный результат особенно значим ввиду присущей таким объектам сложности управления, обусловленной их

склонностью к потере устойчивости и наличием существенных нелинейных характеристик.

Особого внимания заслуживает тот факт, что предложенная методология оптимизации позволила в автоматизированном режиме определить оптимальное количество термов для лингвистических переменных системы нечёткого вывода. Например, в ходе исследований было установлено, что для обеспечения требуемого качества управления достаточно использовать пять термов как для входных, так и для выходной лингвистических переменных, что является устранением лингвистической неопределённости.

Полученные результаты имеют важное практическое значение, поскольку они были успешно интегрированы в процесс разработки ANFIS. Определение оптимального числа термов позволило:

- снизить вычислительную сложность системы без потери качества управления;
- обеспечить баланс между детализацией описания лингвистических переменных и ресурсоёмкостью вычислений;
- повысить обобщающую способность ANFIS-системы при работе с различными режимами функционирования управляемого объекта.

Таким образом, проведённые исследования демонстрируют перспективность комбинированного применения генетических алгоритмов и нечёткой логики с нейросетью для задач, связанных с необходимостью использования для их решения интеллектуальных технологий, например, задач, рассматриваемых в [16, 17]. Основной акцент дальнейшего применения предложенного алгоритма сосредоточен на управлении сложными техническими объектами, работающими в условиях неопределённости. Это открывает новые возможности для разработки

высокоэффективных интеллектуальных систем автоматического регулирования.

Заключение

В ходе исследований был создан метод многопараметрической оптимизации, использующий адаптивный генетический алгоритм. Его ключевая задача – устранение лингвистической неопределённости при проектировании систем управления с интеллектуальными регуляторами. Применение этого метода позволяет оптимизировать два ключевых параметра нечёткого регулятора: веса правил в базе нечёткой логики и центры функций принадлежности для всех лингвистических переменных (включая входные и выходную). Разработанный подход характеризуется расширенной универсальностью, повышенной гибкостью, более высокой эффективностью и минимальной необходимостью участия оператора, что дает ему определенные преимущества в равнении с представленными исследованиями в области современных достижений и тенденций развития научной проблемы.

Литература

1. Rodriguez-Abreo O., Rodriguez-Resendiz J., Garcia-Cerezo A., Garcia-Martinez J.R. Fuzzy logic controller for UAV with gains optimized via genetic algorithm. Heliyon, Volume 10, Issue 4, 29 February 2024, e26363. URL: doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26363.
2. Manesh M.T., Hoonejani M.R., Gousheh S.G., Abdolmaleki A., Dehnavi A.N., Shahrashoob A. AI-driven control algorithm using machine learning and genetic optimization for enhancing visual comfort in adaptive façades. Automation in Construction, Volume 179, November 2025, 106474. URL: doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106474.

3. Huang X., Yan J., Zhou X., Yang Z., Huang X. Energy-efficient optimization method for air conditioning terminal systems in IDC based on genetic algorithm. *Energy*, Volume 333, 1 October 2025, 137502. URL: doi.org/10.1016/j.energy.2025.137502.

4. Amini B., Rastegar H., Pichan M. An optimized proportional resonant current controller based genetic algorithm for enhancing shunt active power filter performance. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 156, February 2024, 109738. URL: doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109738.

5. Rodriguez-Abreo O., Aviles M., Rodriguez-Resendiz J., Garcia-Cerezo A. Neural networks and genetic algorithms-based self-adjustment system for a backstepping controller of an unmanned aerial vehicle. *Alexandria Engineering Journal*, Volume 126, July 2025, Pages 70-80. URL: doi.org/10.1016/j.aej.2025.04.034.

6. Song H., Cai M., Cen J., Xu C., Zeng Q. Research on energy saving optimization method of electric refrigerated truck based on genetic algorithm. *International Journal of Refrigeration*, Volume 137, May 2022, Pages 62-69. URL: doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.003.

7. Dahassa M.S., Zioui N. Optimal control-based quantum genetic algorithm for a six jointed articulated robotic arm. *Results in Control and Optimization*, Volume 20, September 2025, 100584. URL: doi.org/10.1016/j.rico.2025.100584.

8. Selma B., Chouraqui S., Selma B. A genetic algorithm-based neuro-fuzzy controller for unmanned aerial vehicle control, *International Journal of Applied Metaheuristic Computing*, Volume 13, Issue 1, 1 January 2022, URL: doi.org/10.4018/IJAMC.292505.

9. Demidova, G.L., Lukichev, D.V., Kuzin, A.Yu. (2019) ‘A genetic approach for auto-tuning of adaptive fuzzy PID control of a telescope’s tracking system’, *Procedia Comput. Sci.*, 150, pp. 495–502. URL: [doi:10.1016/j.procs.2019.02.084](https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.084).

10. Guler N., Hazem Z.B., Gunes A., Saidi F. Adaptive neuro-fuzzy inference system-genetic algorithm approach for global maximum power point tracking in PV systems under different shading conditions, *Green Technologies and Sustainability*, Volume 3, Issue 4, October 2025, 100239, URL: doi.org/10.1016/j.grets.2025.100239.
11. Hollweg G.V., Dias de Oliveira Evald P.J., Mattos E., Borin L.C., Tambara R.V., Montagner V.F. Self-tuning methodology for adaptive controllers based on genetic algorithms applied for grid-tied power converters. *Control Engineering Practice*, Volume 135, June 2023, 105500. URL: doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105500.
12. He Q., Zhang F., Bian G., Zhang W., Li Z. Multi-dimensional resource placement algorithm based on parallel genetic algorithm. *Computer Communications*, Volume 241, 1 September 2025, 108235. URL: doi.org/10.1016/j.comcom.2025.108235.
13. Yasini T., Roshanian J., Taghavipour A. Improving the low orbit satellite tracking ability using nonlinear model predictive controller and Genetic Algorithm. *Advances in Space Research*, Volume 71, Issue 6, 15 March 2023, Pages 2723-2732. URL: doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.037.
14. Ma B., Li P.-H. Optimal flexible power allocation energy management strategy for hybrid energy storage system with genetic algorithm based model predictive control. *Energy*, Volume 324, 1 June 2025, 135958. URL: doi.org/10.1016/j.energy.2025.135958.
15. Ignatyev V.V., Beloglazov D.A., Soloviev V.V., Kovalev A.V. Development of a method for automatic generation and optimization of fuzzy controller parameters based on an adaptive genetic algorithm // *Artificial intelligence in intelligent systems. Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021*, Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems Volume 229. Springer Nature Switzerland AG 2021. R. Silhavy (Ed.): CSOC 2021, LNNS 229,

pp. 404–416, 2021. URL: doi.org/10.1007/978-3-030-77445-5_38.
ISSN 2367-3370.

16. Игнатьев В.В., Соловьев В.В., Белоглазов Д.А. Метод поиска оптимальных параметров систем управления с нечеткой логикой на основе генетических алгоритмов // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике. Электронный научный журнал «Вестник молодёжной науки России». Выпуск №4, 2019. ISSN 2658-7505. URL: elibrary.ru/item.asp?id=44592500&ysclid=mhxd6w7qnf138939175.

17. Боженюк А.В., Косенко О.В., Косенко Е.Ю. Решение задачи формирования распределительной системы в условиях неопределенности // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_97_Bozhenyuk_N.pdf_e72b8827be.pdf.

18. Боженюк А.В., Беяков С.Л., Косенко О.В., Алехина О.М. Определение доминирующего множества интуиционистского нечеткого графа // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_46_Bozhenyuk_Beliakov_Kosenko_Alekhina.pdf_f912ee658e9.pdf.

References

1. Rodriguez-Abreo O., Rodriguez-Resendiz J., Garcia-Cerezo A., Garcia-Martinez J.R. Heliyon, Volume 10, Issue 4, 29 February 2024, e26363. URL: doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26363.

2. Manesh M.T., Hoonejani M.R., Gousheh S.G., Abdolmaleki A., Dehnavi A.N., Shahrashoob A. Automation in Construction, Volume 179, November 2025, 106474. URL: doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106474.

3. Huang X., Yan J., Zhou X., Yang Z., Huang X. Energy, Volume 333, 1 October 2025, 137502. URL: doi.org/10.1016/j.energy.2025.137502.

4. Amini B., Rastegar H., Pichan M. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 156, February 2024, 109738. URL: doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109738.
 5. Rodriguez-Abreo O., Aviles M., Rodriguez-Resendiz J., Garcia-Cerezo A. Alexandria Engineering Journal, Volume 126, July 2025, Pages 70-80. URL: doi.org/10.1016/j.aej.2025.04.034.
 6. Song H., Cai M., Cen J., Xu C., Zeng Q. International Journal of Refrigeration, Volume 137, May 2022, Pages 62-69. URL: doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.003.
 7. Dahassa M.S., Zioui N. Results in Control and Optimization, Volume 20, September 2025, 100584. URL: doi.org/10.1016/j.rico.2025.100584.
 8. Selma B., Chouraqui S., Selma B. International Journal of Applied Metaheuristic Computing, Volume 13, Issue 1, 1 January 2022, URL: doi.org/10.4018/IJAMC.292505.
 9. Demidova, G.L., Lukichev, D.V., Kuzin, A.Yu. Procedia Comput. Sci., 150, pp. 495–502. URL: [doi:10.1016/j.procs.2019.02.084](https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.084).
 10. Guler N., Hazem Z.B., Gunes A., Saidi F. Green Technologies and Sustainability, Volume 3, Issue 4, October 2025, 100239, URL: doi.org/10.1016/j.grets.2025.100239.
 11. Hollweg G.V., Dias de Oliveira Evald P.J., Mattos E., Borin L.C., Tambara R.V., Montagner V.F. Control Engineering Practice, Volume 135, June 2023, 105500. URL: doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105500.
 12. He Q., Zhang F., Bian G., Zhang W., Li Z. Computer Communications, Volume 241, 1 September 2025, 108235. URL: doi.org/10.1016/j.comcom.2025.108235.
 13. Yasini T., Roshanian J., Taghavipour A. Advances in Space Research, Volume 71, Issue 6, 15 March 2023, Pages 2723-2732. URL: doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.037.
-

14. Ma B., Li P.-H. Energy, Volume 324, 1 June 2025, 135958. URL: doi.org/10.1016/j.energy.2025.135958.

15. Ignatyev V.V., Beloglazov D.A., Soloviev V.V., Kovalev A.V. Artificial intelligence in intelligent systems. Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021, Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems Volume 229. Springer Nature Switzerland AG 2021. R. Silhavy (Ed.): CSOC 2021, LNNS 229, pp. 404–416, 2021. URL: doi.org/10.1007/978-3-030-77445-5_38. ISSN 2367-3370.

16. Ignatyev V.V., Soloviev V.V., Beloglazov D.A. Metody i algoritmy prikladnoj matematiki v tekhnike, medicine i ekonomike. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Vestnik molodyozhnoj nauki Rossii». Vypusk №4, 2019. ISSN 2658-7505. URL: elibrary.ru/item.asp?id=44592500&ysclid=mhxd6w7qnf138939175.

17. Bozhenyuk A.V., Kosenko O.V., Kosenko E.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_97_Bozhenyuk_N.pdf_e72b8827be.pdf.

18. Bozhenyuk A.V., Belyakov S.L., Kosenko O.V., Alekhina O.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_46_Bozhenyuk_Beliakov_Kosenko_Alekhina.pdf_912ee658e9.pdf.

Автор согласен на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 8.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025