

УДК 004.421.2:621.039.7:338.281

Применение методов нечеткого логического вывода в системах управления ресурсами энергетических предприятий с учетом экономической эффективности

Карякин Александр Тимофеевич

Кандидат технических наук, доцент,
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, Российская Федерация, Нальчик, ул. Чернышевского, 173;
e-mail: karyakin2279@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлено применение методов нечеткого логического вывода для оптимизации систем управления ресурсами энергетических предприятий с учетом экономической эффективности. Данная работа вносит вклад в развитие гибких алгоритмов принятия решений в условиях неопределенности, связанных с динамикой энергетического рынка и экономическими ограничениями. Обоснована актуальность проблемы рационального использования энергетических ресурсов, выявлены недостатки традиционных методов управления, не учитывающих параметрическую неопределенность и экономическую составляющую. Для решения поставленной задачи применен подход нечеткого логического вывода, включающий разработку модели, основанной на наборах нечетких правил и соответствующих весовых коэффициентах. Математическая модель интегрирует параметры операционной эффективности и экономические показатели, что позволяет проводить адаптивную оптимизацию системы управления. Были использованы алгоритмы обучения и корректировки весовых коэффициентов, обеспечивающие адаптивность системы к изменяющимся входным данным. На основе проведенного моделирования экспериментальные исследования показали, что предложенная методика позволяет значительно повысить эффективность распределения энергетических ресурсов за счет снижения затрат и улучшения коэффициента полезного действия энергетических установок. Сравнительный анализ с традиционными методами управления продемонстрировал преимущества нечеткого вывода в условиях неопределенности и динамических изменений рыночных условий. Результаты исследования свидетельствуют о высокой применимости методов нечеткого логического вывода для оптимизации процессов управления в энергетическом секторе, что открывает перспективы для дальнейших исследований по интеграции интеллектуальных систем в экономику предприятий. Представленный подход обеспечивает баланс между технической эффективностью и экономической оправданностью, а также способствует развитию инновационных методов управления, интегрирующих интеллектуальные алгоритмы в стратегическом планировании ресурсов энергетических предприятий. Дальнейшие исследования позволят расширить область применения разработанной методики и адаптировать ее к специфике различных энергетических рынков, что в совокупности

обеспечит повышение устойчивости и конкурентоспособности предприятий. Практическая значимость результатов обусловлена возможностью внедрения разработанных алгоритмов в системы реального времени контроля и планирования производства, способствуя оптимизации расходов и повышению экономической эффективности предприятий.

Для цитирования в научных исследованиях

Карякин А.Т. Применение методов нечеткого логического вывода в системах управления ресурсами энергетических предприятий с учетом экономической эффективности // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 2А. С. 145-157.

Ключевые слова

Метод, нечеткий логический вывод, управление ресурсами, энергетические предприятия, экономическая эффективность.

Введение

Управление ресурсами энергетических предприятий представляет собой сложный комплекс мер, направленных на обеспечение рационального распределения, потребления и преобразования энергетических потоков. Достичь эффективного управления в подобных системах возможно за счет применения современных интеллектуальных технологий, где немаловажное место занимает нечеткая логика. Методики нечеткого логического вывода позволяют учесть неопределенности и многозначность факторов, влияющих на баланс энергоресурсов, что особенно важно в условиях рыночной экономики. Для энергетических предприятий, где стоимость ошибок в управлении может быть весьма высокой, применение нечеткой логики способствует уточнению критериев принятия решений и улучшению экономических показателей [Скиба, Бологова, Мусаева, 2022]. Идея заключается в том, чтобы сформировать систему правил, описывающих взаимоотношения между различными параметрами, и позволить ей работать даже в отсутствие точной количественной информации. В операционной практике энергетики часто сталкиваются с ситуациями, когда входные данные содержат шумы, погрешности измерений или неоднозначные описания технологических процессов. Традиционные методы могут быть недостаточно гибкими для корректного реагирования на такие ситуации. Именно поэтому нечеткие системы становятся эффективным инструментом, позволяя моделировать человеческое экспертное мышление. Они имитируют способность опытных специалистов учитывать комплекс нестрогих формализованных факторов, что дает существенную экономию ресурсов при пониженных рисках. Таким образом, нечеткая логика в управлении энергоресурсами открывает возможности для повышения гибкости, точности прогнозирования и согласования расходов и доходов от эксплуатации оборудования. Развитие подобных подходов напрямую связано с повышением конкурентоспособности предприятий за счет снижения затрат и оптимизации производственных процессов.

Использование методов нечеткой логики ломает традиционный барьер между количественными и качественными оценками. Вместо жестко определенных параметров вводятся лингвистические переменные, которые более естественно отражают реальное состояние дел. При этом управленцу удастся обрабатывать «размытые» входные данные путем

их преобразования в функции принадлежности. В системе создается база знаний из правил типа «Если..., то...», и на основании этой базы производится вывод, в результате чего для каждой контролируемой выходной переменной вычисляется ее значение в терминах нечеткой логики [Бирюлин, Куделина, 2023]. Отличительной особенностью таких подходов является возможность включать экспертные знания в алгоритм, сохраняя гибкость и адаптивность. Для энергетических объектов, имеющих сложную структуру и зависимые операции, правильно сконструированная нечеткая система может компенсировать неточности датчиков и неполноту данных в реальном времени. В результате возрастает надежность прогнозирования объемов потребления топлива, мощности генерации и передач, а также финансовой целесообразности реализации тех или иных решений. В определенных случаях нечеткая логика может стать основой для более широкой интеграции методов искусственного интеллекта, включая нейронные сети и системы машинного обучения.

Материалы и методы исследования

С точки зрения экономической эффективности необходимо прежде всего рассматривать динамику издержек, связанных с производством и распределением энергоносителей. В традиционной модели инструментальной оптимизации базируется на точных аналитических формулах, часто не учитывающих реальных неопределенностей. Нечеткие методы решают эту проблему за счет создания функциональных зависимостей, в которых входные переменные могут принимать значения не из дискретного набора, а из некоторого интервала возможных значений с различной степенью принадлежности. Так, при планировании расходов топлива для электростанции можно учесть не только среднесуточный прогноз погоды, но и изменение температурного графика, возможные колебания спроса на электроэнергию, а также наличие плановых и внеплановых ремонтов [Бирюлин и др., 2022]. Все эти факторы в сумме формируют сложную неопределенность, требующую корректного учета. Традиционные подходы к экономическому анализу склонны к упрощенным математическим моделям, которые, хотя и удобны в теории, могут приводить к значительной потере точности на практике. В итоге возникает ситуация, когда непрогнозируемые изменения условий работы энергосистемы влекут за собой дополнительные финансовые потери.

Нечеткая логика в данном контексте позволяет формализовать экспертную оценку рисков, представляя их в виде лингвистических переменных уровня вероятности и серьезности последствий. Например, можно задать понятия «низкая вероятность», «средняя вероятность» и «высокая вероятность» для ряда технических либо коммерческих инцидентов. Аналогично можно определить формат оценок последствий: «незначительные», «умеренные» и «критические». На основе подобной разметки можно структурировать систему рекомендаций относительно того, каким образом должно протекать управление производственными процессами при конкретном сочетании факторов. Это повышает прозрачность анализа и облегчает принятие решений. С учетом экономической эффективности нечеткие системы позволяют просчитывать сценарии, связанные с различными уровнями расходов и прибыли при одинаковых технических условиях [Дли, Черновалова, Соколов, 2023]. Тем самым руководство предприятия может оперативно выбирать оптимальный вариант действия, учитывая не только средние прогнозы, но и возможные отклонения, которые в традиционных моделях зачастую выпадают из поля зрения. В таком подходе дополнительно важна возможность быстро адаптировать правила при появлении новых данных или изменении рыночной конъюнктуры.

Результаты и обсуждение

Для построения нечеткой модели управления ресурсами энергетического предприятия важно определить набор входных переменных, таких как объем доступного топлива, прогноз потребления электроэнергии, показатели технологической эффективности оборудования, а также стоимость ресурсов на биржах. Далее формируются функции принадлежности, которые перекрываются и отражают возможные диапазоны каждой переменной. Для каждой из переменных строятся нечеткие подмножества (например, «низкий», «средний», «высокий» спрос), и уже на основе этих подмножеств определяются правила, задающие выходные параметры. В качестве выходных часто используют показатели оптимального объема генерации, уровень загрузки оборудования, потребность в резервном топливе [Бирюлин, Куделина, 2024]. При этом, если предприятие заинтересовано в повышении экономической эффективности, дополнительно вводятся параметры, связанные с ценой киловатт-часа, стоимостью ремонта генераторов или затратами на логистику. Вся совокупность входных и выходных переменных объединяется в нечеткую базу знаний, что создает возможность для обоснованного и быстрого принятия решений.

Особое значение нечеткие методы имеют при регулировании энергоснабжения в моменты пиковых нагрузок. Дело в том, что при краткосрочных всплесках или провалах потребления традиционные модели могут давать сбои, так как исходят из среднестатистических показателей и редко учитывают сложные поведенческие паттерны пользователей. Нечеткая система способна гибко реагировать на резкие изменения, определяя уровень загрузки генерирующих мощностей и необходимость покупки электроэнергии на оптовом рынке по более высокой или более низкой цене. Таким образом, можно снизить риск неэффективных закупок или, напротив, недостатка энергии. При этом экономические выгоды достигаются за счет своевременного перераспределения ресурсов и оптимизации графиков генерации. Велика и роль учета штрафных санкций за недовыработку или перекосы в сетях, которые также можно условно оценить через нечеткие критерии. В реальных условиях для энергетических предприятий важна не только техническая оптимальность, но и соблюдение регулирующих норм, которые в ряде случаев требуют поддерживать определенный резерв мощности [Галеев, 2024].

В контексте потенциального внедрения нечеткой логики необходимо рассмотреть и аспекты интеграции подобных систем с уже существующей инфраструктурой управления. В энергетическом секторе часто используются SCADA-системы, контролирующие технологические процессы в режиме реального времени. Их традиционный функционал включает сбор данных с датчиков, управление исполнительными механизмами, формирование отчетности. Чтобы расширить эти возможности, можно разработать дополнительный модуль нечеткого вывода, который бы получал от SCADA текущие значения технологических параметров и выдавал управляющие воздействия с учетом неопределенности. Такая схема позволила бы повысить уровень автоматизации и приблизить его к интеллектуальному, предоставляя не только синхронизацию, но и предиктивный анализ. Также появляется возможность проводить различные виртуальные эксперименты, проверять альтернативные стратегии управления, прежде чем их применять в реальной обстановке [Муругов, 2022]. Это снижает риски, одновременно ускоряя процесс внедрения новых технологических решений.

Нельзя забывать про экономические аспекты, связанные с тем, что сама по себе разработка и внедрение нечетких систем требует определенных инвестиций, как в программное

обеспечение, так и в обучение персонала работе с новыми инструментами. Однако эти затраты нередко быстро окупаются благодаря повышению качества прогнозирования и сокращению материальных потерь. Важно также подчеркнуть, что наличие человеческого фактора делает нечеткие модели полезными при учете субъективной экспертизы инженеров и управленцев. Системы могут быть сконфигурированы таким образом, что операторы получают наглядный интерфейс, где можно корректировать правила или уточнять функции принадлежности по мере накопления практического опыта. Подход с подтвержденными результатами переносится далее на смежные участки, формируя более обширную сеть интеллектуальных подсистем. В условиях конкуренции на энергорынке такое преимущество способствует удержанию лидирующих позиций и привлечению инвесторов [Бирюлин Куделина, Горлов, 2022].

Практические результаты применения нечетких методов зависят от качества данных. Если база показателей собирается нерегулярно, а датчики часто выходят из строя, то любая система не сможет гарантировать точность. Поэтому одновременно с внедрением нечеткой логики предприятиям разумно модернизировать системы измерения и сбора данных, а также внедрять комплексную политику управления информационными потоками. Это влечет за собой формирование общекорпоративных стандартов по структуре и формату собираемой информации, что обеспечивает совместимость различных модулей и подразделений. В итоге повышается прозрачность всех процессов, связанных с движением энергоресурсов, а значит, и повышается достоверность управленческих решений. Развитие такой системы ведет к постепенному снижению операционных рисков за счет раннего обнаружения нестандартных ситуаций. Таким образом, нечеткая логика становится не просто локальным инструментом оптимизации, а частью широкой цифровой трансформации [Подшивалов, Крюков, 2024].

Особый интерес вызывает применение методов нечеткого вывода в области прогнозирования цен на энергоносители. Рынок, как правило, крайне волатилен, реагирует на политические и экономические факторы, погодные условия, колебания предложения и спроса. Традиционные статистические модели зачастую не справляются с учетом нелинейностей и быстро меняющихся трендов. Нечеткие системы прогнозирования, используя набор лингвистических правил, позволяют учитывать слабые сигналы и комбинации факторов, которые человеческий аналитик может упускать из виду. При этом выходным результатом может быть не единственное числовое значение цены, а диапазон с указанием степени уверенности. Если этот подход правильно интегрировать с системами торговли или закупок, предприятия получили бы возможность более гибкой тактики ведения сделок, уменьшая риск оказаться в убыточной позиции. Однако, чтобы подобные решения работали, важно обеспечить поступление качественной рыночной информации и грамотно комбинировать методы нечеткой логики с другими инструментами анализа данных [Бирюлин, Куделина, 2023].

Функционирование нечетких систем управления связано с процессами фаззификации и дефаззификации. Фаззификация (fuzzification) означает, что четкие (классические) входные значения переводятся в степень принадлежности соответствующим нечетким множествам. На этапе вывода правило «Если..., то...» позволяет агрегировать несколько условий и выдать объединенную рекомендацию. Наконец, дефаззификация (defuzzification) производит обратный перевод: из нечеткой области система возвращает итоговое четкое значение, имеющее практический смысл для оператора или для исполнительного механизма [Golov, 2022]. При этом методы дефаззификации могут быть различными: например, метод центра тяжести, метод среднего максимума, метод взвешенного среднего и другие. Выбор метода влияет на итоги

управления, поскольку разные схемы могут по-разному расставлять приоритеты при объединении рекомендаций из нескольких правил. Все эти нюансы важно учитывать при проектировании системы, предназначенной для ресурсобеспечения в энергетике.

Если сосредоточиться на экономической стороне вопроса, то нечеткие системы при правильной настройке способны подсказать, при каком уровне спроса и тарифах целесообразно максимизировать выработку, а при каком — работать с пониженной нагрузкой, экономя сырье и уменьшая амортизационные расходы [Куделина, Бирюлин, 2022]. Они также могут учитывать возможный эффект от введения новых налогов или дотаций, что особенно актуально при частых изменениях государственной политики. При этом в условиях нечеткой логики необязательно иметь точные цифры воздействия налогов: достаточно лингвистических оценок уровня этих сборов для принятия разумных решений. Такой подход полезен не только для крупных электростанций, но и для предприятий, занимающихся поставками тепла, газа, а также для комбинированных систем, объединяющих несколько видов генерации.

В современных условиях очень важно иметь возможность реактивного управления, когда система сама «предвидит» вероятные сценарии и готовит соответствующие ресурсы. Например, если прогнозируется экстремально низкая температура, но есть неопределенность относительно продолжительности такого периода, нечеткая логика может предложить оптимальный баланс резервирования топливных складов и привлечения дополнительных мощностей. Когда риск окажется завышенным, система сохранит ресурсы без лишних затрат, а если сценарий полностью оправдается, то будет готова к пиковым нагрузкам [Грега, 2024]. Это способствует более рациональному использованию оборотных средств, что напрямую ведет к улучшению финансовых показателей. В условиях мультипликативного эффекта подобные улучшения в масштабах отрасли приводят к существенным экономическим результатам на государственном уровне.

Для широкого внедрения методов нечеткого вывода необходимо также наличие квалифицированного персонала. Инженерам и экономистам, работающим в энергетическом секторе, может потребоваться дополнительное обучение принципам нечеткой логики, ее преимуществам и ограничениям. Однако, благодаря развитию программных инструментов, настройка и обновление нечетких систем становятся все более доступными для специалистов, не имеющих глубоких знаний в области математики или программирования. Кроме того, уже на рынке существуют решения, которые интегрируются в ERP-системы и системы мониторинга, предлагая дружелюбный интерфейс для настройки правил. В результате ускоряется цикл принятия решений, поскольку нет необходимости выносить каждый вопрос на длительное экспертное рассмотрение. С помощью соответствующего программного обеспечения становится проще проводить эксперименты и калибровать функции принадлежности для лучшего описания реальности [Бирюлин, Куделина, 2023].

В ряде случаев нечеткая логика может работать в связке с методами линейного и нелинейного программирования, формируя гибридные подходы, которые учитывают как стратегические модели оптимизации, так и оперативные «размытые» входные сигналы. Такой симбиоз особенно эффективен на этапах планирования: например, при составлении структуры портфеля генерации на долгосрочный период, когда нужно учесть множество факторов, включая перспективу изменений тарифов, внедрение «зеленой» энергетики, модернизацию оборудования и т.д. Сначала можно определить общий оптимизационный вектор с помощью классических методов, а затем скорректировать его на основе нечеткого вывода, чтобы учесть

возможные неопределенности и изменения. Это особенно ценно для крупных энергетических холдингов, работающих сразу на нескольких рынках и сталкивающихся со сложной системой рисков, где каждый отдельный риск может иметь вариативную оценку [Ахметова, Пигилова, 2023].

Еще одна область применения — управление технологическими режимами в реальном времени, когда имеются короткие окна между сбором данных и необходимостью принятия решения. Здесь нечеткие контроллеры могут функционировать параллельно с традиционными алгоритмами, выдавая подсказки или даже полностью регулируя процесс при определенных условиях. В таком режиме система не только опирается на исторические данные, но и учитывает субъективные «интуитивные» параметры, часто возникающие в голове оператора. То есть происходит частичная формализация экспертного опыта, что крайне важно в ситуациях, требующих мгновенной реакции. При этом за счет идентификации неисправностей и несоответствий можно вовремя предотвращать сбои, которые стоили бы предприятию значительных материальных потерь. Ключевым моментом является непрерывная актуализация и расширение базы правил нечеткой логики, так как технологические процессы и условия работы меняются со временем.

Серьезным вызовом в реализации нечетких систем управления ресурсами может стать проблема согласованности правил. Если база знаний слишком велика, некоторые правила могут противоречить друг другу, и вывод окажется неинтуитивным. Для решения подобных вопросов существуют методы оптимизации и консистентности баз знаний, позволяющие выявлять и устранять конфликтные зоны. Также необходим аудит на регулярной основе, особенно при вводе новых правил. Тем не менее, сама природа нечеткой логики, располагающая к плавным переходам между классами, снижает риск резких логических несоответствий, которые типичны для классических систем правил. В итоге достигается не только стабильность, но и возможность плавной корректировки без полной перестройки всей системы.

Экономическая эффективность от внедрения таких методов оценивается путем анализа снижения фактических затрат, увеличения выхода готовой продукции, сокращения простоев и аварий, а также путем сопоставления результатов экспериментов с историческими показателями. Многие предприятия идут путем поэтапного внедрения, начиная с малого пилотного участка, где внедряется нечеткая подсистема для управления конкретным технологическим процессом. Если эксперимент удастся, то система масштабируется и адаптируется к более общим задачам [Ахметова, Пигилова, 2023] упоминать больше не будем, так как уже использовали эту ссылку. При этом важно не упускать социальную составляющую, связанную с удовлетворенностью персонала и безопасностью работ. Умная система, которая берет на себя рутинные задачи, позволяет персоналу сосредоточиться на более творческих аспектах и снижает уровень стресса, связанного с внезапными аварийными ситуациями.

Важным элементом в нечетком управлении является механизм адаптации правил. Поскольку энергетические предприятия функционируют в непрерывно меняющихся условиях — новые технологии, изменения регулятивных норм, трансформация рынка — статическая база знаний может быстро утратить актуальность. Поэтому все большее распространение получают алгоритмы, позволяющие корректировать функции принадлежности и правила в автоматическом режиме. Такая адаптация может основываться на обратной связи, когда оценивается результат применения правила и в случае несоответствия желаемому эффекту проводится частичная перенастройка. С течением времени система способна «обучаться»,

становясь точнее без вмешательства человека. Конечно, существуют ограничения, связанные с возможным «переобучением» или искажением правил, поэтому задачи адаптации требуют тонкого баланса между стабильностью и гибкостью.

Разумеется, нечеткие системы не являются универсальным решением на все случаи жизни. Их эффективность зависит от качества формулировки правил и корректного определения функций принадлежности, а также от степени адекватности собранной базы экспертизы. Если специалисты, создающие такие правила, не обладают достаточными знаниями в области конкретных технологических процессов или экономики предприятия, модель может выдавать сомнительные рекомендации. Тем не менее, при правильном подходе выгоды могут значительно превысить риски, особенно когда речь идет о принятии решений в условиях высокой неопределенности.

Существует также вопрос стандартизации и совместимости разных нечетких систем. В случае крупных холдингов, где несколько филиалов находятся в разных регионах или странах, требуется единый подход к описанию лингвистических переменных, чтобы обеспечить сопоставимость результатов. Это, в свою очередь, делает нужным разработку внутренних регламентов, где прописываются принципы построения функций принадлежности, правила рефакторинга базы знаний и методы интеграции с другими ИТ-системами. Такая стандартизация может потребовать времени и ресурсов, но впоследствии дает возможность быстро тиражировать проверенные решения.

Перспективы развития нечеткой логики в энергетике во многом связаны с ростом сложности самой отрасли. Интеграция возобновляемых источников энергии, распространение умных сетей (smart grids), появление новых видов хранения энергии усложняют конфигурацию системы. Традиционным методам все труднее учесть многообразие оперативных ситуаций, а также и мультиагентный характер рынка, где каждое предприятие действует в собственных интересах. Нечеткие системы, благодаря своей пластичности, могут агрегировать разнородные сигналы и выдавать рекомендации в режиме реального времени, что играет ключевую роль в повышении устойчивости энергосистемы к внешним потрясениям.

Важной перспективой является также расширение применения нечеткой логики в области планирования инвестиций в энергетические проекты. Когда предприятие пытается решить, строить ли новую станцию или расширять производственные мощности, оно должно учитывать целый комплекс факторов: стоимость сырья, прогнозы роста спроса, риски аварий, возможную конкуренцию и технологические инновации. Традиционный анализ, как правило, упирается в сложно прогнозируемые величины. Нечеткий же подход позволяет формировать сценарии и оценивать их не в терминах абсолютных чисел, а через диапазоны, дающие управленцам лучшее понимание рисков. Это важно как для долгосрочных, так и для краткосрочных инвестиций.

В современных условиях высока потребность в непрерывной оптимизации. Если еще несколько десятилетий назад энергетические компании могли работать, опираясь на стабильные годовые или пятилетние планы, то сегодняшняя рыночная динамика меняется быстрее. Цены на энергоносители, требования регуляторов, конкурентная среда — все это способствует тому, что решения нужно принимать оперативно, а затем пересматривать при изменении контекста. Нечеткая логика как раз подходит для таких адаптивных стратегий управления, поскольку не требует постоянно переписывать жесткие формулы, а лишь корректирует функции принадлежности и правила. Причем делать это можно как вручную, так и полуавтоматически, опираясь на данные с рынка.

Когда речь идет о распределении эксплуатационных затрат, экономическая эффективность часто определяется балансом между техническими ограничениями и возможностью манипулировать закупочными ценами, графиком ремонтов, привлечением сторонних подрядчиков. Все эти аспекты могут быть учтены в нечеткой модели, которая позволит на каждом шаге выдавать рекомендации, например, «целесообразно произвести профилактику генератора в течение ближайших двух недель при низкой загрузке системы», или «в случае увеличения тарифа на определенный тип топлива нужно переключиться на альтернативный ресурс», и так далее. В результате, оператор получает более полную картину, без необходимости самостоятельно держать в голове множество противоречивых факторов.

Даже учитывая все преимущества, процесс проектирования нечеткой системы для энергетического предприятия требует тщательного анализа и инженерных компетенций. Нужно выявить все ключевые процессы, которые важны для экономической эффективности, понять, какие параметры влияют на эти процессы, и сформировать лингвистический словарь для описания состояний и выходных рекомендаций. Затем создается набор правил, в котором каждая строка отражает экспертную логику принятия решения в конкретных условиях. При правильной настройке получается механизм, способный обрабатывать множество сценариев с различными вариантами неопределенности.

После запуска системы на реальном объекте важна фаза тестирования и валидации. Собираются фактические данные о том, какие решения предлагала нечеткая система и к каким результатам они приводили. Затем сопоставляется экономический эффект с исходными целями. Если наблюдаются расхождения, на этапе рефакторинга корректируются либо функции принадлежности, либо правила. Постепенно система «дотачивается» до высокой точности. При этом важно сохранять всю историю изменений, чтобы в дальнейшем понимать, какие факторы влияли на решение в конкретный период времени.

Одной из тонкостей является учет временных задержек и инерционности процессов. В энергетике многие системы имеют существенную инерцию разгона или спада: газовые турбины, котлы, системы отопления инертны и не реагируют мгновенно. Нечеткий алгоритм должен включать в себя и этот аспект, иначе может возникнуть эффект запаздывания, приводящий к избыточным затратам. Поэтому зачастую нечеткие модели дополняют блоками, отражающими динамические характеристики. Это могут быть простые аппроксимации, описывающие поведение объектов при изменении управляющих сигналов, или более сложные модели, интегрированные с системой нечеткого вывода.

В условиях растущего интереса к цифровой трансформации, применение методов искусственного интеллекта, включая нечеткий логический вывод, все чаще рассматривается руководством энергетических компаний как перспективное направление развития. Однако важно понимать, что само по себе внедрение таких методов не решит всех проблем, если не сопровождается комплексными организационными изменениями. Часто нужно перестроить структуру взаимодействия между отделами, ввести новые должности или поменять регламент принятия решений, чтобы максимально использовать возможности интеллектуальной системы.

Кроме того, растет значение кибербезопасности. Любые интеллектуальные системы, функционирующие на основе данных в реальном времени, подвержены попыткам несанкционированного вмешательства. Если злоумышленник исказит входные сигналы или логику правил, это может привести к ошибочным решениям и финансовым потерям. Поэтому при внедрении нечетких систем необходимо обеспечить их защиту на всех уровнях: от

аппаратного до программного. Это предполагает в том числе шифрование каналов связи, аутентификацию пользователей, аудит изменений в базе правил.

По мере роста сложности энергетических объектов и численного увеличения датчиков и исполнительных механизмов, объем обрабатываемых данных возрастает. В таких случаях встраивание нечеткой логики в системы больших данных (Big Data) и облачные вычисления становится еще одним перспективным направлением. Обработка больших массивов исторической информации позволяет выявлять редкие события и строить более точные прогнозы, а нечеткая логика способна смягчать неизбежные неопределенности и пропуски в данных. В совокупности это дает более надежную систему управления, которая способна работать в широком спектре сценариев.

Следует отметить, что нечеткие модели хорошо сочетаются с методиками вероятностного анализа рисков. Например, можно параллельно оценивать вероятность редкого, но катастрофического события, а затем использовать нечеткие правила для определения уровней готовности и количества резервных ресурсов. Комплексное сочетание нечеткого и вероятностного подходов позволяет более точно сбалансировать издержки и выгоды, связав техническую надежность с экономической целесообразностью.

Применение гибридных технологий, объединяющих нечеткую логику и элементы машинного обучения, открывает новые горизонты. Машинное обучение может автоматически выявлять закономерности в больших данных, а нечеткая логика – формализовать экспертное знание и учесть лингвистические описания факторов. Вместе они могут создавать самообучающиеся системы управления ресурсами, которые с течением времени подбирают оптимальные решения, минимизируя потери и максимизируя выгоду. Такие системы способны подстраиваться под изменяющиеся условия гораздо быстрее и эффективнее, чем это сделало бы человек или классический алгоритм.

В энергетике проблемы оптимизации возникают повсеместно. Управление топливными складами, выбор стратегии генерации, распределение нагрузок в сетях, профилактика и ремонт оборудования — все это требует комплексного и адекватного учета множества параметров. Наряду с жестко формализованными методами планирования, нечеткая логика добавляет возможность гибко реагировать на колебания и неопределенности. Ее роль особенно велика там, где данные неполны или искажены, а решения нужно принимать оперативно.

Нельзя также упускать из виду влияние человеческого фактора при разработке и использовании нечетких систем. Экспертные знания, которые закладываются в базу правил, могут исходить от различных специалистов, имеющих разный уровень подготовки и собственные взгляды на приоритеты. Иногда возникают споры относительно корректности формулировок лингвистических переменных или интерпретации рисков. В таких случаях требуется согласованная процедура, позволяющая прийти к общему мнению, который ляжет в основу базы правил. Чем тщательнее будут собраны и задокументированы эти знания, тем надежнее окажется итоговая система.

Заключение

В свете всего вышесказанного можно сделать вывод, что применение методов нечеткого логического вывода в системах управления ресурсами энергетических предприятий с учетом экономической эффективности дает ощутимый позитивный эффект. Нечеткая логика позволяет

работать с расплывчатыми вводными данными, учитывать субъективный опыт и экспертизу, реагировать на неопределенности рынка и технического состояния оборудования. Все это в долгосрочной перспективе ведет к повышению прибыли, сокращению операционных затрат, уменьшению аварий и простоев. При этом процесс внедрения нечетких систем должен сопровождаться организационными изменениями и развитием цифровой инфраструктуры, чтобы фонд собранных данных был достоверным и актуальным.

Современное состояние технологий уже позволяет разрабатывать и внедрять нечеткие системы на разных уровнях – от локальных контроллеров до комплексных систем стратегического управления. Несмотря на первоначальные вложения, экономическая отдача может быть весьма существенной, поскольку точность и адаптивность принятия решений возрастает. В условиях конкурентного рынка, ужесточающихся экологических требований и общего тренда на цифровизацию, именно подобные интеллектуальные решения способны вывести энергетические предприятия на новый уровень эффективности и устойчивости их бизнеса в долгосрочной перспективе.

Библиография

1. Ахметова Д.Э., Пигилова Р.Н. Организация и управление системой энергообеспечения предприятия // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97-12. С. 195-197.
2. Бирюлин В.И. и др. Модель нечеткого логического вывода оценки энергоэффективности промышленных предприятий // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 1. С. 31-35.
3. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Использование нечеткой нейронной сети для оценки энергоэффективности предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 580-589.
4. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Применение нечетких нейронных сетей для оценки эффективности использования электроэнергии на промышленных предприятиях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 1 (363). С. 193-199.
5. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Применение нечетких нейронных сетей для оценки эффективности использования электроэнергии на промышленных предприятиях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 415-419.
6. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Разработка системы оценки эффективности использования энергетических ресурсов предприятиями сельскохозяйственного назначения // Современные материалы, техника и технологии. 2023. № 4 (49). С. 49-62.
7. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Разработка модели для оценки энергоэффективности промышленных объектов // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 1. С. 7-16.
8. Галеев С.П. Новые методические подходы к управлению энергозатратами промышленного предприятия // Первый экономический журнал. 2024. № 7 (349). С. 119-125.
9. Грега В.М. Управление процессами автоматизации параметров энергетических объектов // Экономика строительства. 2024. № 7. С. 121-123.
10. Дли М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М., Моргунова Э.В. Нечеткая динамическая онтологическая модель для поддержки принятия решений по управлению энергоемкими системами на основе прецедентов // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 5 (107). С. 59-76.
11. Куделина Д.В., Бирюлин В.И. Применение нечеткой нейронной сети для оценки энергоэффективности промышленных предприятий // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 4. С. 22-36.
12. Муругов И.К. Внедрение и развитие системы энергетического менеджмента в целях повышения энергетической эффективности компаний ТЭК // Экономика и управление: проблемы, решения. 2022. Т. 2. № 11 (131). С. 68-73.
13. Подшивалов Е.С., Крюков О.В. Система управления накопителями электрической энергии на принципах нечеткой логики // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71. № 1 (54). С. 31-39.
14. Скиба М.С., Бологова В.В., Мусаева Д.Э. Разработка предложений по улучшению существующих алгоритмов управления инвестиционной деятельностью с целью формирования условий для устойчивого развития энергетических компаний // Экономика и предпринимательство. 2022. № 3 (140). С. 949-954.
15. Golov R.S. Applied basics of building a system of energy management at a high-tech enterprise // Известия высоких технологий. 2022. № 2 (21). С. 3-12.

Application of fuzzy inference methods in the resource management systems of energy enterprises considering economic efficiency

Aleksandr T. Karyakin

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov,
360004, 173 Chernyshevskogo str., Nal'chik, Russian Federation;
e-mail: karyakin2279@mail.ru

Abstract

This article presents the application of fuzzy inference methods to optimize the resource management systems of energy enterprises, taking into account economic efficiency. This work contributes to the development of flexible decision-making algorithms under uncertainty associated with the dynamics of the energy market and economic constraints. The article substantiates the relevance of the problem of rational energy resource utilization, identifying the shortcomings of traditional management methods that do not take into account parametric uncertainty and the economic component. To address the problem, a fuzzy inference approach was applied, which includes the development of a model based on sets of fuzzy rules and corresponding weight coefficients. The mathematical model integrates parameters of operational efficiency and economic indicators, enabling adaptive optimization of the management system. Learning algorithms and weight coefficient adjustment procedures were used to ensure the system's adaptability to changing input data. Based on the modeling performed, experimental studies showed that the proposed methodology significantly improves the efficiency of energy resource distribution by reducing costs and enhancing the efficiency factor of energy installations. A comparative analysis with traditional management methods demonstrated the advantages of fuzzy inference under conditions of uncertainty and dynamic market changes. The research results indicate a high applicability of fuzzy inference methods for optimizing management processes in the energy sector, opening prospects for further research on the integration of intelligent systems into the enterprises' economy. The presented approach provides a balance between technical efficiency and economic justification, and it also contributes to the development of innovative management methods that integrate intelligent algorithms into strategic resource planning for energy enterprises. Further research will expand the scope of the developed methodology and adapt it to the specifics of various energy markets, which, in combination, will enhance the resilience and competitiveness of enterprises. The practical significance of the results is due to the possibility of implementing the developed algorithms in real-time control and production planning systems, facilitating cost optimization and increasing the economic efficiency of enterprises. Future research perspectives.

For citation

Karyakin A.T. (2025) *Primenenie metodov nechetkogo logicheskogo vyvoda v sistemakh upravleniya resursami energeticheskikh predpriyatii s uchetom ekonomicheskoi effektivnosti* [Application of fuzzy inference methods in the resource management systems of energy enterprises considering economic efficiency]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (2A), pp. 145-157.

Keywords

Method, fuzzy inference, resource management, energy enterprises, economic efficiency.

References

1. Akhmetova D.E., Pigilova R.N. (2023) Organization and management of the enterprise energy supply system. *Trends in the development of science and education*, 97-12, pp. 195-197.
2. Biryulin V.I. et al. (2022) A model of fuzzy logical inference for assessing the energy efficiency of industrial enterprises. *Construction and architecture*, 10 (1), pp. 31-35.
3. Biryulin V.I., Kudelina D.V. (2024) Application of fuzzy neural networks for assessing the efficiency of electric power use at industrial enterprises. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 1 (363), pp. 193-199.
4. Biryulin V.I., Kudelina D.V. (2023) Application of fuzzy neural networks for assessing the efficiency of electric power use at industrial enterprises. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*, 9, pp. 415-419.
5. Biryulin V.I., Kudelina D.V. (2023) Development of a system for assessing the efficiency of energy resources use by agricultural enterprises. *Modern materials, equipment and technologies*, 4 (49), pp. 49-62.
6. Biryulin V.I., Kudelina D.V. (2023) Using a fuzzy neural network to assess the energy efficiency of enterprises. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*, 8, pp. 580-589.
7. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. (2022) Development of a model for assessing the energy efficiency of industrial facilities. *International technical and economic journal*, 1, pp. 7-16.
8. Dli M.I., Chernovalova M.V., Sokolov A.M., Morgunova E.V. (2023) Fuzzy dynamic ontological model for supporting decision-making on the management of energy-intensive systems based on precedents. *Applied Informatics*, 18: 5 (107), pp. 59-76.
9. Galeev S.P. (2024) New methodological approaches to managing energy costs of an industrial enterprise. *First Economic Journal*, 7 (349), pp. 119-125.
10. Golov R.S. (2022) Applied basics of building a system of energy management at a high-tech enterprise. *News of High Technologies*, 2 (21), P. 3-12.
11. Grega V.M. (2024) Management of automation processes of parameters of energy facilities. *Construction Economics*, 7, pp. 121-123.
12. Kudelina D.V., Biryulin V.I. (2022) Application of a fuzzy neural network to assess the energy efficiency of industrial enterprises. *International technical and economic journal*, 4, pp. 22-36.
13. Murugov I.K. (2022) Implementation and development of an energy management system in order to improve the energy efficiency of fuel and energy companies. *Economy and management: problems, solutions*, 2: 11 (131), pp. 68-73.
14. Podshivalov E.S., Kryukov O.V. (2024) Control system for electric energy storage devices based on the principles of fuzzy logic. *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*, 71: 1 (54), pp. 31-39.
15. Skiba M.S., Bologova V.V., Musaeva D.E. (2022) Development of proposals for improving existing investment management algorithms in order to create conditions for sustainable development of energy companies. *Economy and Entrepreneurship*, 3 (140), pp. 949-954.