

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ: НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**Порубай Оксана Витальевна**

*PhD, доцент кафедры Информационная безопасность Ташкентского университета*

*информационных технологий имени Мухаммада аль Хорезми,*

*150100, г. Фергана, ул. Мустакиллик, 185*

[\*oksanaporubay@gmail.com\*](mailto:oksanaporubay@gmail.com)

*+998-93-482-48-48*

**Аннотация:** В работе рассматриваются вопросы математического описания динамики функционирования электроэнергетической системы с применением методов теории нечетких множеств, позволяющих учитывать различные виды неопределенностей возникновения производственных ситуаций. Предложен новый способ классификации состояний энергетической системы функционирующей в условиях неопределенности исходной информации. Обосновано применение экспоненциальной функции принадлежности для описания нечетких значений информации и состояний системы. Разработан алгоритм распознавания производственных ситуаций, основанный на моделях нечетко-логического вывода Мамдани, на основе которого формализовано правило базы знаний. Предложенный подход позволяет выбрать рациональный вариант управления энергетической системой при наличии различных видов производственных ситуаций.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, нечеткие множества, алгоритм, модели Мамдани, база знаний, теория нечетких множеств, типы неопределенностей, экспертные системы..

Эффективное управление потоками энергоресурсов и связанными с ними финансовыми и информационными потоками представляет существенный аспект управления экономикой промышленных предприятий (ПП) [1,2]. В Узбекистане уже накоплен ценный опыт разработки комплексных целевых программ, которые направлены на моделирование локальных и глобальных задач оптимального управления промышленными предприятиями и ресурсами. Однако, в условиях переходной экономики, стоит осуществить переосмысление научных и практических разработок отечественных ученых, а также активно применять зарубежный опыт в формировании электроэнергетических систем (ЭЭС) и внутрипроизводственных энергетических систем (ВЭС) [3-5].

Современный логистический подход требует разработки новой методологии, методов и моделей для описания объектов и систем управления, а также для принятия управленческих решений, которые учитывают особенности рыночных преобразований [6-9]. В данной эксплуатационной среде промышленных предприятий становится критически важной задачей снижение затрат на

электроэнергию при одновременном поддержании необходимого уровня производства основных продуктов, учитывая имеющиеся ограничения на энергопотребление [10,11].

В условиях дефицита электрической энергии и роста ее стоимости, главным направлением деятельности ВЭС становится эффективное управление потреблением энергии с помощью современных автоматизированных систем коммерческого учета (АСКУЭ) и технического учета (АСТУЭ) [12]. Поскольку процесс принятия решений связан с анализом и обработкой большого объема информации, использование указанных систем является чрезвычайно важным.

На данный момент существует необходимость в решении актуальных проблем, направленных на повышение эффективности энергопотребления и энергосбережения в ЭЭС, ВЭС и в энергетической отрасли в целом:

- Исследование и разработка новых концепций и подходов к эффективному управлению энергоемкими промышленными предприятиями, воспользуясь преимуществами современного рынка энергоресурсов.
- Разработка машинно-ориентированных алгоритмов и специализированного математического обеспечения для решения оперативных задач формирования и осуществления тарифной стратегии в управлении внутрипроизводственными и электроэнергетическими системами.
- Создание высокоэффективных информационно-управляющих систем оптимального контроля за энергопотреблением промышленных предприятий с использованием современных программно-технических средств и информационных технологий [13].

Эти проблемы требуют инновационных подходов, исследований и разработок, чтобы обеспечить оптимальное использование энергоресурсов, снизить издержки и повысить энергетическую эффективность в промышленных секторах и в обществе в целом.

### **Постановка задачи**

Простые ЭЭС состоят из двух основных компонентов: производственной системы и системы передачи, а также системы вспомогательной передачи и распределения. Система передачи связывает генерирующие станции с крупными подстанциями, которые обычно расположены близко к центрам потребления, чаще всего с использованием воздушных линий электропередачи. Система вспомогательной передачи распределяет мощность по всей области, также часто используя воздушные линии передачи.

Избежать перебоев в работе ЭЭС практически невозможно, это известный факт, и причины этих перебоев весьма многообразны. Такие ситуации могут возникать в связи с естественными условиями, внутренними или внешними факторами, такими как физические события окружающей среды или человеческие ошибки. Сложность систем ЭЭС привела к техническим потребностям и технологическим проблемам при мониторинге параметров процесса и разработке эффективных методов управления переменными состояниями энергетических объектов, которые обеспечивают нормальную работу системы.

Один из показателей, характеризующих качество электроэнергии, связан с количеством сбоев или перебоев в распределении энергии в энергосистеме в определенный период времени. При перегрузке энергосистемы ее оборудование должно быть автоматически отключено, что может привести к перебоям в подаче электроэнергии. Исходя из этого, важно разработать новые методы для эффективной оценки риска перебоев из-за перегрузок в системе, так как критически важно управлять силовыми нагрузками с непрерывным мониторингом линий электропередачи для

снижения частоты отключений электроэнергии. Однако в случае сбоя также важно быстро и безопасно принимать решения о повторном подключении систем после сбоя.

Следовательно, достижение эффективного управления рисками перебоев в электроэнергетических системах требует разработки новых методов мониторинга и управления, направленных на обеспечение стабильной и надежной подачи электроэнергии в системе [14-16]. В настоящее время энергетические системы характеризуются увеличением степени неопределенности условий функционирования и целей управления. Они обладают свойствами, характерными для крупных систем, такими как иерархическая структура и процесс принятия решений, неполная информация, многокритериальность и существенное замедление развития. Исходя из этих свойств, задачи прогнозирования и оценки состояния могут быть сформулированы как многокритериальный анализ альтернатив и классификация состояний в условиях неопределенности. Для решения таких задач перспективно применение понятий и методов теории нечетких множеств.

Данные условия комплексного управления приводят к изменениям мощности или спроса на электроэнергию, и, кроме того, способность линий электропередач (ЛЭП) передавать электроэнергию ограничена физическими и электрическими характеристиками их проводников. В таких ситуациях, классические методы управления, основанные на применении четких моделей процесса управления, не обеспечивают достаточный эффект. Поэтому важно использовать современные методы, опирающиеся на интеллектуальные технологии, которые позволяют учитывать данные вероятностного характера [17].

В СЭ встречаются различные типы неопределенностей, включая неопределенность целей и неопределенность природы (условий функционирования) [18]. В энергетике неопределенность целей может быть связана с их нечеткой формулировкой или возникновением множества целевых задач, неопределенность природы отражает степень нашего незнания об изучаемом объекте и его окружении, а также невозможность точного знания на прогнозируемый период. Кроме того, внешняя среда, относящаяся к рассматриваемой энергосистеме, также может быть источником неопределенностей.

Для адекватного учета неопределенностей хорошо подходят специальные нечеткие математические методы, основанные на теории нечетких множеств [19]. Основное различие между нечеткостью и случайностью приводит к тому, что математические методы, использующие нечеткие множества, существенно отличаются от методов теории вероятностей. Во многих аспектах, они оказываются более простыми, так как понятие вероятностной меры в теории вероятностей соответствует более простому понятию функции принадлежности в теории нечетких множеств.

В области развития электроэнергетических систем задачи выбора решений чрезвычайно многообразны по формальной постановке и по содержанию. Отсюда различны и методы их решения. Существует ряд подходов к описанию процесса выбора: критериальное описание выбора, описание выбора на языке бинарных отношений, описание группового выбора, описание выбора как решение задачи оптимального управления [20].

Использование искусственного интеллекта стало неотъемлемой частью процедур мониторинга, контроля и управления электроэнергетическими системами. Наблюдается активное расширение энергосистем, что подтверждается увеличением числа ответвлений и разнообразием способов установки распределительных линий. Современные генераторы и потребители подключаются к

распределительным линиям несколькими путями (в радиальной форме) и образуют петли между собой [21].

Применение методов теории нечетких множеств [22] для описания неопределенностей в задачах управления и диагностирования состояния энергосистем к настоящему времени затрагивает некоторые частные вопросы, такие как оценка состояния электротехнических устройств, решение задач управления функционированием электроэнергетической системы, начальное описание исходной информации для задач развития с последующим переходом к детерминированным методам линейного программирования.

Исходя из изложенного, возможно применение методов теории нечетких множеств для описания неопределенностей и разработки методов решения задач управления энергетическими системами территорий, обеспечения надежности топливо- и энергоснабжения и развития электроэнергетических систем этих территорий.

#### **Методы и результаты исследования (Solution Methods)**

Целью исследований в области искусственного интеллекта, сфокусированных на ЭЭС, является разработка новых вычислительных средств для поддержки принятия управленческих решений. Однако, из-за постоянных изменений в нагрузке и других характерных для ЭЭС факторов, возникает множество трудностей при поиске эффективных методов. Традиционные методы, использующие бинарную классическую логику для анализа данных энергосистемы с целью предоставления оптимизированных вариантов устранения неисправностей [23], не привели к удовлетворительным результатам. Одной из сложностей при разработке моделей на основе классической логики является то, что они определяются с помощью строгих бинарных законов, что приводит к сложным уравнениям, которые трудно воспроизвести.

С учетом вышеизложенных соображений, данная статья рассматривает возможности применения методов экспертных систем (ЭС) с алгоритмами, основанными на теоретических концепциях нечеткой логики [24].

Предлагаемая в статье ЭС выполняет анализ данных, полученных от ЭЭС в области субпередачи электроэнергии. Она обрабатывает возможные противоречия в информационных сигналах, проанализировав значения напряжения и тока, а также учитывая состояние включения или отключения электрических выключателей на подстанциях. Это позволяет получить информацию о ситуациях риска перегрузок в ЭЭС и различных топологиях конфигурации энергосистемы.

В настоящее время существуют два основных направления применения теории нечетких множеств к энергетическим задачам. Первое направление связано с созданием нечетких алгоритмов для получения нечетких решений на основе нечеткой информации. Второе направление представляет собой создание нечеткой топологии, основанной на определении нечетких значений параметров и применении известных алгоритмов для нахождения решения задачи, которое также будет нечетким из-за нечеткости топологии. Оба этих подхода активно применяются для решения прикладных задач в энергетике.

В энергетических задачах алгоритмическое направление развивается в случаях, когда неопределенность приводит к новым формулировкам самой задачи. Задачи качественной оценки состояния системы и выбора варианта развития ЭЭС и электрических станций при нечетко сформулированной цели являются ярким примером алгоритмического применения теории нечетких множеств.

Для описания нечетких значений предлагается использовать экспоненциальную функцию принадлежности (ФП) с бесконечной областью определения и ограниченной областью значений вида [25].

$$\mu(x) = \exp[-b(x - c)^2], \quad (1)$$

где  $b$  и  $c$  - коэффициенты, определяющие степень нечеткости и положение на числовой оси.

Для определения значений коэффициентов в работе использованы точка начала нечеткой границы ( $\mu(a) = 1$ ). И ширина значимого диапазона неопределенности ( $\mu(a \pm d) = \alpha$ ). При этом значения коэффициентов определяются по выражениям

$$c = a; \quad b = -\frac{\ln(\alpha)}{d^2}. \quad (2)$$

Нечеткое значение параметра можно описать с использованием четырех коэффициентов:  $c_l$  - начало нечеткой левой границы;  $b_l$  - степень размытости левой границы;  $c_r$  - начало нечеткой правой границы;  $b_r$  - степень размытости правой границы. В интервале от начала левой границы до начала правой границы функция принадлежности имеет единичное значение. Так, можно записать нечеткое значение какого-либо параметра как последовательность четырех чисел:  $N = \{c_l; b_l; c_r; b_r\}$ .

В задачах энергетики отношение предпочтения обычно представляет собой отношение, нестрогого порядка.

$$r_{ij}^k = \sup_{\substack{x, y \in X \\ x \geq y}} [\min\{m_i^k(x), \mu_j^k(y)\}], \quad (3)$$

По этой формуле значение элемента матрицы бинарного отношения предпочтения определяется как максимальная степень, с которой альтернатива  $i$  может быть лучше альтернативы  $j$ . Из этого следует, что если абсцисса начала правой нечеткой границы  $i$ -й альтернативы больше или равна абсциссе начала левой нечеткой границы  $j$ -й альтернативы ( $c_{ir} \geq c_{jl}$ ), то значение элемента бинарного отношения предпочтения равно единице. В остальных случаях значение элемента матрицы бинарного отношения предпочтения определяется как ордината точки пересечения функций принадлежности альтернатив.

Исходя из этого, разработаны правила расчета значений элемента матрицы бинарного отношения предпочтения:

$$r_0 = \begin{cases} 1, & \text{при } c_{ir} \geq c_{jl}, \\ \exp\left(-b_{ir} b_{jl} \frac{(c_{jl} - c_{ir})^2}{b_{jl} + b_{ir} + 2\sqrt{b_{jl} b_{ir}}}\right), & \text{при } c_{ir} < c_{jl}. \end{cases} \quad (4)$$

С их использованием могут быть получены матрицы нечетких отношений предпочтения по всем критериям.

Выбор рациональной альтернативы осуществляется следующим образом, сначала на основании исходных бинарных отношений предпочтения строятся нечеткие отношения  $F$  и  $Q$ , определяющие множество эффективных альтернатив и ранжировку альтернатив в этом множестве с учетом важности критериев, соответственно:

$$\mu_F(x, y) = \min\{\mu_1(x, y), \dots, \mu_m(x, y)\},$$

$$\mu_Q(x, y) = \sum_{j=1}^m \lambda_j \mu_j(x, y). \quad (5)$$

Затем, с учетом степени недоминируемости, осуществляется ранжировка нечетких подмножеств и среди них определяется рациональная альтернатива. Рациональными считаются альтернативы с наибольшей степенью недоминируемости.

**Заклучение (Conclusion)**

Произведен анализ особенности математического описания производственных ситуаций в электроэнергетических объектах на языке нечетких множеств. Определены причины возникновения различных видов неопределенностей в процессе энергетических систем. Для описания нечетких состояний энергосистем предложена экспоненциальная функция принадлежности с бесконечной областью определения, позволяющая в более удобном виде определить рациональные альтернативы выбора важности критериев, благодаря возможности ранжировки альтернатив

**Источники:**

1. Abaci, K., Yamacli, V.: Hybrid Artificial Neural Network by Using Differential Search Algorithm for Solving Power Flow Problem. *Advances in Electrical and Computer Engineering* 19(4), 57-64 (2019). doi:10.4316/AECE.2019.04007.
2. Siddikov I., Porubay O. Neural network model of decision making in electric power facilities under conditions of uncertainty // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2021. – vol. 304 (01001), doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130401001>
3. Da Silva Fiho, J. I., Lambert-Torres, G., & Abe, J. M. (2010). Uncertainty Treatment Using Paraconsistent Logic- Introducing Paraconsistent Artificial Neural Networks. IOS Press, 328, 211, *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, Amsterdam, Netherlands.
4. Siddikov I., Porubay O., Mirjalilov O. An algorithm for optimizing short-term modes of electric power systems, taking into account the conditions of the nature of the probability of the information flow of data // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – vol. 2373. – №. 8 (082014), doi: 10.1088/1742-6596/2373/8/082014
5. Da Silva Filho, J. I., Mário, M. C , Pereira, C. D. S. , Angari, A. C. , Ferrara, L. F. P. , Pitoli, O. Jr. , & Garcia, D. V. (2011). An Expert System Structured in Paraconsistent Annotated Logic for Analysis and Monitoring of the Level of Sea Water Pollutants. *Expert Systems for Human, Materials and Automation*, Prof. PetricĂf Vizureanu (Ed.), 978-9-53307-334-7, InTech.
6. Porubay O., Siddikov I., Madina K. Algorithm for optimizing the mode of electric power systems by active power // *2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*. – IEEE, 2022. – pp. 1-4, doi: 10.1109/ICISCT55600.2022.10146996
7. Dieter Betz, Hans, Schumann, Ulrich, & Laroche, Pierre. (2009). *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Springer, 202-203, 978-1-40209-078-3, Retrieved on May 13.
8. Siddikov I. K., Porubay O. V. Neuro-fuzzy system for regulating the processes of power flows in electric power facilities // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2022. – vol. 2432. – №. 1, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0089473>

9. Isamiddin Siddikov, Oksana Porubay, Temurbek Rakhimov. Synthesis of the neuro-fuzzy regulator with genetic algorithm // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2024. – vol. 14. – №. 1. – pp. 184-191, doi: <http://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp184-191>
10. O. Porubay, "Multiscale analysis of wavelet - transformation, as a solution to the problem of compression of information flows," 2016 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2016, pp. 1-4, doi: [10.1109/ICISCT.2016.7777410](https://doi.org/10.1109/ICISCT.2016.7777410)
11. Porubay, O., & Khasanova, M. (2023). Model of innovative progress in the power sector. Engineering problems and innovations.
12. Porubay, O., & Khasanova, M. (2023). Formation of new technologies for innovation management in the modern competitive environment. Engineering problems and innovations.
13. Porubay, O., & Khasanova, M. (2022). Machine learning as a tool of modern pedagogical technologies. Science and innovation, 1(B3), 840-843.
14. Roald L. A., Molzahn D. K., and Tobler A. F., "Power System Optimization with Uncertainty and AC Power Flow: Analysis of an Iterative Algorithm," in 10th IREP Symp. Bulk Power Syst. Dynamics Control, Espinho, Portugal, Aug. 2017.
15. Порубай О.В., & Хасанова М.У. (2022). Концепция безопасности в теории и практике принятия решений. Просвещение и познание, (7 (14)), 11-20.
16. Torres, C. R., Abe, J. M., Lambert-Torres, G., & Da Silva Filho, J. I. (2011). Autonomous Mobile Robot Emmy III. Mobile Robots- Current Trends, Dr. Zoran Gacovski (Ed.), 978-9-53307-716-1, InTech.
17. Сиддииков, И. Х., & Порубай, О. В. (2023). Нейросетевая модель принятия решений в электроэнергетических объектах в условиях неопределенности. Scientific-technical journal. STJ FerPI, ФарПИ ИТЖ, НТЖ ФерПИ, 27, 98-105.
18. Мезенцев, Петр Евгеньевич. Оценка энергетической безопасности территорий и принятие решений по развитию электроэнергетических систем с применением теории нечетких множеств. Диссертация. канд. технич. наук.- Екатеринбург, 2004.- Режим доступа: <https://tekhnosfera.com/otsenka-energeticheskoy-bezopasnosti-territoriy-i-prinyatie-resheniy-po-razvitiyu-elektroenergeticheskikh-sistem-s-primene#1>
19. Порубай О. В. Проблемы принятия управленческих решений на основе строгих методов //Актуальные вопросы техники, науки, технологии. – 2021. – С. 423-427.

20. Порубай, О. В., & Хасанова, М. (2021). Системы поддержки принятия решений с интеллектуальными механизмами поиска для оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике. In Перспективные информационные технологии (ПИТ 2021) (pp. 92-96).
21. Порубай, О. В., & Хасанова, М. У. К. (2022). Обзор процесса принятия решений в условиях риска и неопределенности. *Universum: технические науки*, (7-1 (100)), 17-19.
22. Разанов, Михаил Рашидович. Управление ресурсами топливно-энергетического комплекса в кризисных ситуациях в условиях неопределенности. Диссертация. канд. технич. наук.- М., 2007.- Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/upravlenie-resursami-toplivno-energeticheskogo-kompleksa-v-krizisnyh-situatsiyah-v-usloviyah-neopredelennosti>
23. Сиддиқов, И. Х., Порубай, О. В., Лазарева, М. В., & Абдулхамидов, А. А. У. (2020). Тенденции развития интеллектуальных систем при принятии управленческих решений в Узбекистане. *Universum: технические науки*, (2-1 (71)), 10-13.
24. Сиддиқов, И. Х., & Порубай, О. В. (2022). Обзор многокритериальной модели принятия решений электроэнергетического сектора в Республике Узбекистан. *Процветание науки*, (5 (11)), 3-11.
25. Сиддиқов, И. Х., Порубай, О. В., & Хасанова, М. У. Нейро-нечеткая система регулирования процессов энергопотока в электроэнергетических объектах. *Scientific Bulletin of NamSU- Научный вестник НамГУ-NamDU ilmiy axborotnomasi-2023*, 1, 37-44