

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РАНЖИРОВАНИЯ

Лесс В.М., Любченко В.Я., Павлюченко Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

lessv134@gmail.com

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Повышение энергоэффективности является одним из необходимых условий модернизации российской экономики. Высокая энергоемкость и анализ энергоэффективности обусловлены совокупным влиянием ряда факторов как глобальных, так и частных. Так, для электросетевых организаций проблема энергетической эффективности является приоритетной. Имея в своем распоряжении электросетевые хозяйство, включающее точки приема и передачи электрической энергии, электротехническое оборудование и линии электропередачи, электросетевые организации несут огромные убытки, вызванные потерями при передаче электрической энергии, потерями, связанными с неучтенной долей электроэнергии, а также сторонними факторами. **ЦЕЛЬ.** Провести анализ энергетической эффективности электросетевой организации, которая имеет в своем составе 10 филиалов. Сформировать иерархию показателей энергоэффективности, определить влияние каждого показателя на интегральный показатель, отражающий энергетическую эффективность объекта. Провести бенчмаркинг, выявить лидеров и аутсайдеров среди электросетевых организаций. **МЕТОДЫ.** Для расчета весовых коэффициентов применялся метод анализа иерархий в классической и нечеткой постановках. Бенчмаркинг энергоэффективности выполнялся с помощью ранжирования электросетевых организаций по интегральному показателю энергоэффективности. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Сформирована трехуровневая иерархия показателей энергоэффективности. Представлен алгоритм принятия решения при проведении анализа энергетической эффективности объектов энергетической отрасли. Рассчитаны весовые коэффициенты показателей и интегральные значения энергоэффективности организаций. Были определены показатели, оказывающие наибольшее влияние на суммарную эффективность объекта. Сформирована сводная диаграмма сравнения всех филиалов, выявлены наиболее и наименее успешные организации. **ВЫВОДЫ.** Анализ энергетической эффективности, проведенный с применением двух методов анализа иерархий позволил выявить преимущества и недостатки классического представления метода. Определение лидеров внутри филиальной структуры электросетевой организации позволяет проанализировать применяемые методы повышения энергоэффективности, а также внедрить их в дальнейшем в менее успешные филиалы.

**Ключевые слова:** метод анализа иерархии; интегральный показатель; весовой коэффициент; лингвистическая переменная; степень нечеткости; электросетевая организация; экспертный анализ.

**Для цитирования:** Лесс В.М., Любченко В.Я., Павлюченко Д.А. Анализ энергоэффективности энергетических объектов с применением методов ранжирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58.

## ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF ENERGY FACILITIES USING RANKING METHODS

Less V.M., Lyubchenko V.Y., Pavlyuchenko D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

lessv134@gmail.com

**Abstract:** *RELEVANCE.* Increasing energy efficiency is one of the necessary conditions for modernizing the Russian economy. High energy intensity and energy efficiency analysis are due to the combined influence of a number of factors, both global and private. Thus, for electric grid organizations the problem of energy efficiency is a priority. Having at their disposal electrical grid facilities, including points of reception and transmission of electrical energy, electrical equipment and power transmission lines, electrical grid organizations incur huge losses caused by losses during the transmission of electrical energy, losses associated with the unaccounted share of electricity, as well as third-party factors. *OBJECT.* Conduct an analysis of the energy efficiency of an electric grid organization that has 10 branches. Form a hierarchy of energy efficiency indicators, determine the impact of each indicator on the integral indicator that reflects the energy efficiency of the facility. Conduct benchmarking, identify leaders and outsiders among power grid organizations. *METHODS.* To calculate the weight coefficients, the method of analysis of hierarchies in the classical and fuzzy formulations was used. Energy efficiency benchmarking was carried out by ranking power grid organizations according to the integral indicator of energy efficiency. *RESULTS.* A three-level hierarchy of energy efficiency indicators has been formed. A decision-making algorithm is presented when analyzing the energy efficiency of energy industry facilities. The weight coefficients of indicators and integral values of energy efficiency of organizations are calculated. The indicators that have the greatest impact on the overall efficiency of the facility were identified. A summary diagram of comparison of all branches has been formed, the most and least successful organizations have been identified. *CONCLUSIONS.* The analysis of energy efficiency, carried out using two methods of analysis of hierarchies, made it possible to identify the advantages and disadvantages of the classical representation of the method. Determination of leaders within the branch structure of the electric grid organization allows us to analyze the methods used to improve energy efficiency, as well as to introduce them in the future to less successful branches.

**Keywords:** *hierarchy analysis method; integral indicator; weight coefficient; linguistic variable; degree of fuzziness; power grid organization; expert analysis.*

**For citation:** Less V.M., Lyubchenko V.Y., Pavlyuchenko D.A. Energy efficiency analysis of energy facilities using ranking methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58.

### **Введение (Introduction)**

Развитым странам мира, обладающим значительными запасами энергетических природных ресурсов, высокая энергоёмкость обходится дорого. Объясняется это необходимостью обеспечения энергетической безопасности и охраны окружающей среды. Проблема высокого уровня энергоёмкости решается путем разработки энергоэффективных технологий, внедряемых на энергетических объектах, а также с помощью нормативно-правовых мер, регулирующих энергопотребление, как на государственном, так и частном уровне.

Энергетическая эффективность подразумевает экономически оправданное использование топливно-энергетических ресурсов при современном уровне развития оборудования и технологий. В отличие от энергосбережения, целью которого является уменьшение энергопотребления, термин энергоэффективность подразумевает рациональное расходование энергии. Вопрос сохранения и рационального использования природных ресурсов решается на мировом, государственном, областном, региональном и муниципальном уровнях. Это связано с тем, что по мере развития промышленности и разрастания городов увеличивается негативное влияние на окружающую среду. Актуальность темы подтверждается принятой стратегией развития на период до 2030 года, целью которой является снижение энергоёмкости на 50% относительно 2007 года. Кроме этого, в России активно обновляются Государственные стандарты, нормирующие показатели энергетической эффективности, внедряются новые нормативные документы и санитарные нормы.

Одним из наиболее информативных документов является Федеральный закон № 261 «Об энергосбережении», относящийся к сфере энергетической эффективности. Данный закон регламентирует процесс формирования стратегий на региональном и частном секторах экономики, посвященных увеличению уровня энергетической эффективности, а также разработки и внедрения мер, предназначенных для увеличения эффективности регулирования тарифной сферы.

Каждая отрасль производства по-своему подвержена влиянию низкой энергетической эффективности: большие затраты энергетического топлива, неоправданный износ оборудования, убытки, вызванные потерями энергии. В связи с этим, для анализа энергоэффективности и ее дальнейшего повышения разрабатываются универсальные математические методы, применяемые к разнообразным энергетическим объектам.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Высокая энергоемкость и анализ энергоэффективности обусловлены совокупным влиянии ряда факторов как глобальных, так и частных, что нашло отражение в ряде научных работ и публикаций.

В статье Давыдова А.Р. [1] была проанализирована динамика изменения энергетической эффективности стран мира с использованием статистических данных за двадцать лет. За этот период в большинстве рассматриваемых стран Азии наблюдался существенный рост потребления энергии, который вызвал изменение структуры потребления по секторам. Так, например, в Китае были разработаны стратегии развития промышленного и жилого секторов, без которых страна на сегодняшний день потребляла бы на 25% больше энергии.

В исследовании [2] освещается роль и значимость законодательно-правовой базы в сфере энергосбережения, а также описываются основные причины низкой результативности применяемых мер по энергосбережению на промышленных предприятиях. К таким причинам автор работы относит отсутствие системности при замене устаревшего оборудования, неверное восприятие энергетически обследований как непосредственные энергосберегающие мероприятия, а также крайне низкое использование энергосервиса, как механизма современного энергосбережения. Внедрение энергетического сервиса, по мнению автора, представляет собой один из важнейших драйверов системного энергосбережения в промышленности, использование которого способно коренным образом повысить ее энергоэффективность.

В статье «Анализ мероприятий повышения энергоэффективности» [3] приводятся организационные мероприятия и меры технического характера политики энергоэффективности торговой сети. Предлагаемые методы охватывают широкую область деятельности рассматриваемого объекта: начиная с обучения персонала основам энергосбережения и совершенствованием организационной структуры управления и заканчивая разработкой новых технологий производства и внедрением дорогостоящего современного энергоэффективного оборудования. Безусловно, каждый из предложенных методов в той или иной мере способствует повышению энергетической эффективности объекта. Однако, чаще всего основная сложность повышения энергоэффективности заключается в выборе наиболее перспективных путей развития энергетического объекта. Автор статьи также отмечает, что предложить единый подход к оптимизации тепло- и энергоснабжения не представляется возможным ввиду наличия индивидуальных признаков у рассматриваемых энергетических объектов.

Не менее важное значение имеют научные исследования, посвященные анализу энергетической эффективности с целью оказания помощи в принятии решения в процессе модернизации энергетического объекта. В частности, в статье Ратмановой [4] приводится описание метода оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на региональном уровне с помощью нечеткой логики. Для установления логической связи между количественными значениями энергоэффективности с комплексными показателями, автором вводятся лингвистические переменные, характеризующие динамику использования ТЭР. В статье Заславского И.С. освещаются актуальность и методы оценивания энергетической безопасности объектов энергосистемы [5]. Следует отметить, что сложность оценивания во многом зависит от источников рисков и возможности или невозможности подлинно их прогнозировать. Прежде всего, трудоемкость выявления критериев для анализа, связанна с меняющейся энергетической политикой регионов, изменением технических характеристик энергосистемы, подверженностью региона к природным или техногенным катастрофам. Для проведения исследования авторами применяются такие методы, как индикативный метод, метод анализа иерархий, метод нечетких множеств. В статье приводится сравнение данных методов, выявление их достоинств и недостатков. Следует отметить, что метод анализа иерархий (МАИ) предложенный Т. Саати широко используется при оценке показателей энергоэффективности. Так, например, в статье [6] для совершенствования системы управления энергоэффективностью бюджетных организаций основным математическим аппаратом выступает МАИ. В исследовании [7] метод анализа иерархий применяется для

оценки качества освещения в аудиториях. Научная работа [8] посвящена «зеленой» экономической эффективности Китая в условиях пандемии COVID-19. Пути достижения эффективности оценивались путем анализа критериев и десяти подкритериев в контексте природоохранного законодательства. В статье [9] МАИ совместно с информационно-аналитической системой позволил разработать алгоритм анализа энергетической эффективности электросетевых организаций.

Гапонов А.И. в своей статье [10] для решения задач многокритериального анализа применяет синтез МАИ и теории нечетких множеств. В этом случае математический алгоритм основан на совместном использовании принципа оценок лингвистических переменных Белмана-Заде и метода парных сравнений Саати. Подобный синтез методов также применяется в [11] для комплексной оценки силовых трансформаторов на основе многокритериального подхода к принятию решений и в [12] для анализа видов и последствий отказов.

Для анализа критериев энергоэффективности часто используется метод анализа иерархий с элементами нечеткой логики (НМАИ). В исследовании [13] нечеткий метод анализа иерархий применяется для построения многокритериальной комплексной системы оценки энергоэффективности угольных агрегатов, включая технологии, охрану окружающей среды, экономику и социальные выгоды. В статье [14] традиционные и возобновляемые источники энергии для устойчивого развития энергетического сектора Индии оцениваются с разных точек зрения, включая экономические, технические, социальные, экологические, политические. Метод энтропии Шеннона позволил определить веса критериев принятия решений, а метод нечеткой аналитической иерархии (НМАИ) применялся для определения приоритетов альтернатив устойчивой энергетики. Для выполнения оценки энергетических систем и инвестиционных планов в Саудовской Аравии в [15] были использованы такие методы как нечеткий МАИ, VIKOR, TOPSIS, а метод анализа иерархий использовался для определения весовых коэффициентов рассматриваемых критериев.

Приведенный обзор научных публикаций по теме исследования подчеркивает актуальность проблемы и широкий интерес к решению анализу энергетической эффективности при принятии решения в процессе управления и модернизации энергетических объектов.

В представленной работе в качестве объекта исследования рассмотрены региональные электрические сети. Для этого энергетического объекта разработана иерархическая система показателей энергоэффективности, а также представлена методика анализа энергоэффективности с использованием метода анализа иерархий в четкой и нечеткой постановках, а также решение задач бенчмаркинга.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

На рисунке 1 представлена общая процедура принятия решения, основанная на систематизации процесса анализа энергоэффективности функционирования электросетевых организаций.

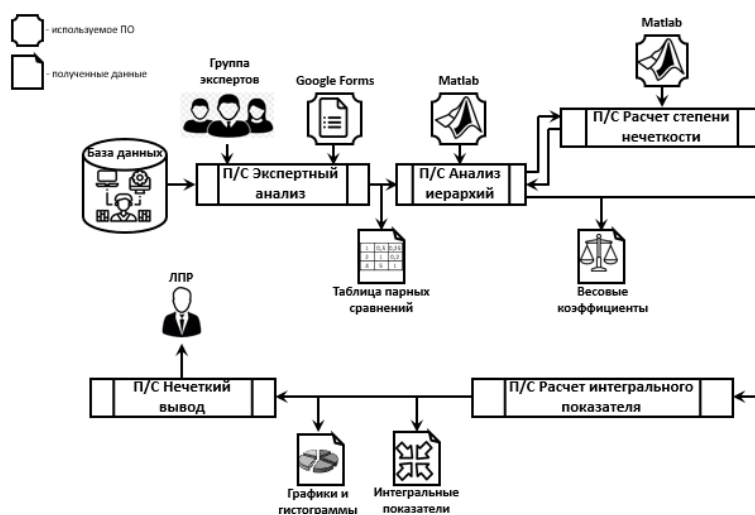


Рис. 1. Общая процедура принятия решения для анализа энергоэффективности объекта

Fig.1. Common decision measures for analyzing the energy efficiency of a facility

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сформированная база данных содержит статистические данные о функционировании объекта, сведения об энергобалансе и состоянии имеющегося оборудования, а также общую информацию, касающуюся технологических особенностей исследуемого объекта. С использованием методов экспертного анализа производится парное сравнение показателей энергоэффективности электросетевых организаций. Обработка и анализ данных об энергообъекте осуществляется на основе метода анализа иерархий в четкой и нечеткой постановках (МАИ/НМАИ). Полученные весовые коэффициенты применяются для расчета интегрального показателя. На последнем этапе осуществляется нечеткий логический для принятия решения.

Таким образом, предложенная процедура принятия решений основана на методе анализа иерархий. Разработанный Томасом Саати метод анализа иерархий представляет собой алгоритм проведения систематической оценки сформированных в иерархическую форму элементов, характеризующих исследуемую задачу. Метод подразумевает дробление единой, обширной, сложной цели на более локальные и простые задачи (декомпозиция). Дальнейшим этапом является анализ последовательности мнений лиц, принимающих решения (ЛПР) на основании результатов проведенных парных сравнений исследуемых элементов. Выходными переменными МАИ являются данными относительно интенсивности взаимодействия рассматриваемых показателей между собой внутри иерархической структуры.

Метод анализа иерархий формируется из таких математических процессов, как синтез многовариативных мнений, определение важности каждого показателя, выявление альтернативных способов решения поставленных задач. Структура данного алгоритма сформирована на основании человеческой способности мыслить нестандартно. Таким образом, использование данного метода приводит к тому, что поставленная в исследовании цель и все сопровождающие факторы, оказывающие влияние на ее достижение, формируют зависимые друг от друга ступени многоуровневой иерархии [16].

Первый уровень иерархии всегда определяет цель проводимого исследования и занимает вершину всей иерархической структуры. Второй уровень формируется элементами, оказывающими явное влияние на ее достижение. Следует отметить, что при этом, каждый из них представляет из себя вершину формируемого уровня, имеющую связь с вершиной 1-го уровня. По аналогии со вторым уровнем, третий уровень формируется из показателей, влияющих на вершины предыдущего уровня иерархии.

Алгоритм МАИ, после непосредственного формирования иерархии, подразумевает оценку весовых коэффициентов для каждой локальной вершины уровня. Коэффициенты, в свою очередь, характеризуют уровень зависимости исследуемой вершины от вершин более низкого уровня. Основу математических расчетов составляет метод парных сравнений показателей. Полный список математических приемов, формирующих метод анализа иерархий, представлен ниже:

- попарное сравнение критериев внутри каждого структурного уровня. Группе экспертов предлагается соотнести параметры между собой и присвоить каждой паре соответствующий балл. На основании опроса составляются обратно симметричные матрицы;
- расчет компонентов собственного вектора каждой матрицы, определение нормированной оценки вектора локальных приоритетов и проверка мнения каждого респондента на согласованность;
- определение весовых коэффициентов, которые в численной форме характеризуют значимость каждого показателя для предприятия;
- расчет интегрального показателя каждого филиала электросетевой организации на основе данных энергетических паспортов, отчетов МРСК и рейтинговых списков энергетической электросетевой компании (ЭСК).

Трехуровневая иерархическая структура показателей энергоэффективности электросетевой организации представлена на рисунке 2.

В связи с тем, что у электросетевых организаций имеются в собственности электрические сети, а также осуществляется хозяйственная деятельность по распределению и передаче электрической энергии с использованием электросетевого хозяйства, для них наиболее существенными являются факторы, характеризующие сведения о потерях электрической энергии и сведения о технической оснащённости организации.

Третий уровень иерархии формируется из показателей, влияющих на вершины 2-го уровня иерархии.

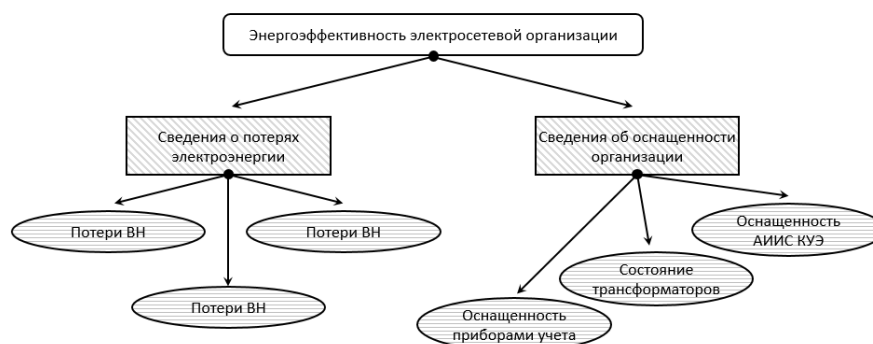


Рис.2. Иерархическая структура показателей энергоэффективности

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сведения о потерях, находящиеся на втором уровне иерархии, характеризуются потерями в сетях высокого (ВН), среднего (СН) и низкого (НН) напряжений.

Что касается сведений об оснащённости рассматриваемого объекта, то в 3-ий уровень иерархии этого показателя входят: техническое состояние трансформаторов, степень оснащённости приборами учета электроэнергии, степень оснащённости автоматизированными информационно-измерительными системами коммерческого учета энергоресурсов (АИИС КУЭ).

Анализ иерархии проводится с использованием метода парных сравнений, который, в свою очередь, подразумевает сравнение показателей друг с другом внутри иерархического уровня. Сравнение производится группой экспертов в области энергоэффективности. Эксперту необходимо присвоить каждой паре критериев определенную цифру:

- 1 – критерии равнозначны;
- 3 – первый критерий обладает чуть более высокой значимостью;
- 5 – первый критерий обладает более высокой значимостью;
- 7 – первый критерий обладает очень высокой значимостью;
- 9 – первый критерий обладает абсолютно доминирующей значимостью.

В случае, если первый критерий уступает в значимости второму, то присваивается обратное значение (1/3; 1/5; 1/7; 1/9).

Для выполнения поставленных задач было привлечено 10 экспертов в области энергосбережения, которые в онлайн режиме заполнили формы анкет по сравнительному анализу показателей энергоэффективности электросетевых организаций.

С целью упрощения сбора экспертных результатов, а также для ускорения распространения анкеты среди респондентов, в работе задействовано программное обеспечение *Google Forms*. В связи с тем, что *Google Forms* - это программа для администрирования опросов, входящая в состав бесплатного веб-пакета редакторов документов *Google*, результаты опроса экспертной группы сразу же отправляются интервьюеру. Так как услуга также включает в себя *Google Sheets*, по результатам анкетирования автоматически формируются обратно-симметричные матрицы парных сравнений

На основании каждого экспертного мнения формируется матрица размером  $n \times n$ , где  $n$  - количество показателей в иерархическом уровне. В связи с тем, что каждый показатель равен сам себе по значимости, диагональ матрицы заполняется единицами. Верхняя треугольная часть матрицы формируется исходя из предоставленных респондентом ответов, нижняя часть – обратно-симметрична (ОСМ) (табл. 1).

Таблица 1  
Table 1

Обратно симметричная матрица  
An inversely symmetric matrix

Эксперт №m	Г1	Г2	...	Гn
Г1	1	$a_{12}$	...	$a_{1n}$
Г2	$a_{21}$	1	...	$a_{2n}$
...			1	
Гn	$a_{n1}$	$a_{n2}$	...	1

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве примера ниже рассмотрим результатов парных сравнений показателей третьего уровня иерархии, относящегося к показателю «Сведения о потерях».

Для этого показателя сформирована обратно-симметричная матрица размером 3х3 (табл. 2), в которой отображены результаты сравнения показателя «Потери ВН» (далее П1), показателя «Потери СН» (далее П2) и показателя «Потери НН» (далее П3).

Таблица 2

Table 2

Обратно-симметричная матрица (ОСМ) сравнения П1, П2 и П3

*Inversely symmetric matrix (OSM) of comparison P1, P2 and P3*

Эксперт №1	П1	П2	П3
П1	1	3	1/5
П2	1/3	1	1/3
П3	5	3	1

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналогичные матрицы формируются для всех показателей 2 и 3 уровня иерархии.

Далее производится расчет компонентов собственного вектора каждой матрицы, определение нормированной оценки вектора локальных приоритетов и проверка мнения каждого респондента на согласованность. Первоначально производится определение главного собственного вектора. Его дальнейшее преобразование (нормализация) формирует вектор приоритетов.

$$a_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $a_i$  – собственный вектор  $i$ -ой строки,  $a_{ij}$  – элемент  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца матрицы,  $n$  – количество столбцов матрицы.

$$a_1 = (a_{11} \cdot a_{12} \cdot a_{13})^{\frac{1}{3}} = \left( 1 \cdot 3 \cdot \frac{1}{5} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,84$$

$$a_2 = (a_{21} \cdot a_{22} \cdot a_{23})^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,48$$

$$a_3 = (a_{31} \cdot a_{32} \cdot a_{33})^{\frac{1}{3}} = (5 \cdot 3 \cdot 1)^{\frac{1}{3}} = 2,47$$

Далее, по выражению (2) определяются нормированные оценки вектора локальных приоритетов:

$$T_j = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $T_j$  – вектор локальных приоритетов  $j$ -го столбца,  $a_i$  – собственный вектор  $i$ -ой строки.

Все составляющие вектора элементы характеризуют сравнительную значимость рассматриваемого показателя относительно критериев, находящихся на более высоких уровнях иерархии. В данном случае – интегрального показателя.

$$T_1 = \frac{a_1}{(a_1 + a_2 + a_3)} = \frac{0,84}{(0,84 + 0,48 + 2,47)} = 0,22$$

$$T_2 = \frac{a_2}{(a_1 + a_2 + a_3)} = \frac{0,48}{(0,84 + 0,48 + 2,47)} = 0,13$$

$$T_3 = \frac{a_3}{(a_1 + a_2 + a_3)} = \frac{2,47}{(0,84 + 0,48 + 2,47)} = 0,65$$

Используя выражения (3), производится расчет вектора приоритетов для показателей П1, П2 и П3.

$$P_g = \frac{1}{m} \cdot \sum_{h=1}^m T_{gh}, \quad (3)$$

где  $P_g$  – вектор приоритета  $g$ -го показателя,  $m$  – количество экспертов,  $T_{gh}$  – вектор локальных приоритетов  $g$ -го показателя третьего уровня иерархии и  $h$ -го эксперта.

$$P_1 = \frac{1}{6} \cdot (0,22 + 0,14 + 0,57 + 0,13 + 0,28 + 0,28) = 0,27$$

$$P_2 = \frac{1}{6} \cdot (0,13 + 0,58 + 0,32 + 0,65 + 0,58 + 0,58) = 0,48$$

$$P_3 = \frac{1}{6} \cdot (0,65 + 0,28 + 0,11 + 0,22 + 0,14 + 0,14) = 0,26$$

Используя выражение (4) производится расчет весовых коэффициентов каждого показателя, представленного в иерархии. Таким образом, значимость критериев корректируется на основе иерархической структуры.

$$K_g = P_g \cdot P_l, \quad (4)$$

где  $P_g$  - значение вектора приоритетов относительно  $g$ -го показателя третьего уровня иерархии,  $P_l$  - значение вектор приоритетов относительно 1-го показателя второго уровня иерархии.

На рисунке 3 представлена круговая диаграмма весовых коэффициентов показателей энергоэффективности третьего уровня иерархии.

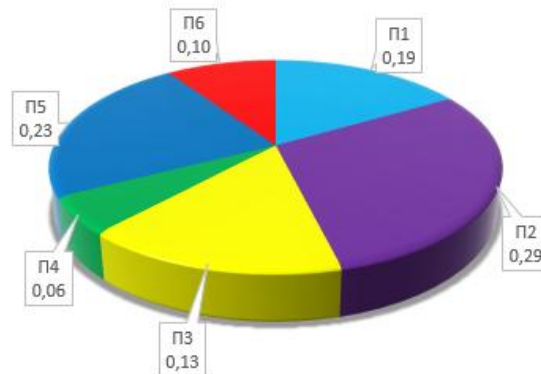


Рис. 3. Диаграмма весовых коэффициентов показателей энергоэффективности

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, МАИ представляет собой способ поиска ответов для глобальных вопросов области принятия решений. Метод анализа иерархий получил широкое распространение среди научных сотрудников и технических специалистов в области разработки математических приложений, а также стратегий поиска решений, целесообразных с экономической точки зрения [9,10].

Однако, использование четкого МАИ имеет существенный недостаток, связанный с трудностями в составлении точной шкалы оценки критерия «эффективность» при проведении экспертизы на первом этапе МАИ. В связи с этим, в работе предложена методика использования метода иерархии в нечеткой постановке НМАИ с применением лингвистических переменных.

Целью внедрения лингвистических переменных является описание нематематических выражений с помощью слов естественного языка. Формирование лингвистической переменной производится на основании функции, содержащей 5 элементов:

$$\{x, T(x), X, G, M\}, \quad (5)$$

где  $x$  – имя, присваиваемое аргументу,  $T(x)$  – множество имен лингвистических переменных аргументу  $x$ ,  $X$  – множество элементов выбранного формата,  $G$  – синтаксическое правило, формирующее имена, присваиваемые  $x$ , и тем самым создающие новые термы,  $M$  – математическая функция, формирующая из каждого терма нечеткое выражение.

В связи с тем, что предлагаемая экспертам форма анкетирования обладает существенной погрешностью, связанной с восприятием числовой оценки показателей, используемые изначально варианты ответов 1, 3, 5, 7, 9, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9 для каждого респондента обладают различными лингвистическими значениями. Если эксперт №1 присваивает паре показателей значение «3», и допустим, подразумевает, небольшое преобладание первого показателя над вторым, то для эксперта №2, то же значение «3» может принимать иной лингвистический смысл, например, значительное преобладание. На основании (5) лингвистические переменные будут строиться следующим образом:

-  $x$  – «значимость»;



-  $X$  – множество чисел из диапазона (1;9);  
 -  $T(x) \supset \{ \text{«одинаковая»}, \text{«преобладание»}, \text{«отставание»} \};$   
 -  $X_1$  - «одинаковая значимость»,  $X_2$  - «преобладание значимости»,  $X_3$  - «отставание значимости»;  
 -  $G \supset \{ \text{«незначительное»}, \text{«значительное»}, \text{«сильное»}, \text{«абсолютное»} \};$   
 -  $M$  – процесс присваивания  $X$  нечетких аргументов. Помимо этого, задаются нечеткие множества для термов  $G(T)$  на основании условий формирования нечетких связей. Путем создания функций принадлежности, относящихся к перечисленным ранее лингвистическим переменным  $x_1, x_2, x_3$  можно произвести аналитическое определение процедуры  $M$ .

Отличительной особенностью от анкеты, используемой в четком МАИ, является предлагаемые варианты ответов: «одинаковая значимость», «незначительное преобладание значимости», «значительное преобладание значимости», «сильное преобладание значимости», «абсолютное преобладание значимости». Применение подобных лингвистических переменных улучшит уровень психологического восприятия респондента и позволит минимизировать субъективное суждение о значении каждой, ранее предлагаемой цифры.

Пусть переменная «одинаковая значимость» принимает значение (1;1;1). Функции принадлежности для остальных переменных определяются с шагом  $\delta$  - степень нечеткости. Для определения степени нечеткости необходимо сопоставить весовые коэффициенты, рассчитанные по МАИ и НМАИ. Однако, для расчетов по нечеткому методу анализа иерархий требуется значение  $\delta$ . В связи с этим, разработан циклический алгоритм по подбору степени нечеткости.

Нечеткое число, соответствующее лингвистической переменной, определяется триангулярной функцией принадлежности в виде:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m < x \leq u, \\ 0, & x \notin [l; u] \end{cases} \quad (6)$$

где  $l$  - точка, в которой значение функции равно нулю (левый ноль),  $m$  - точка, в которой значение функции равно единице,  $u$  - точка, в которой значение функции равно нулю (правый ноль).

Элементы матрицы ОСМ определяются по выражениям (7) - (8):

$$a_{ij} = (l, m, u) \quad (7)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}} = \left( \frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l} \right) \quad (8)$$

Согласно алгоритму метода анализа иерархий, определение значений весов критериев энергоэффективности с использованием нечетких выражений опирается на результаты анализа нечетких матриц парных сравнений (НМПС). Данные матрицы парных сравнений модернизируются с помощью замены дискретных значений, составляющих основу матрицы, на нечеткие. Нечеткие величины, в свою очередь, обладают триангулярными функциями принадлежности вида (8). В связи с тем, что эти функции имеют три элемента, НМПС становится прямоугольной матрицей. Ее размерность –  $n \times 3n$ , где  $n$  – количество показателей, участвующих в сравнении. Для построения обратнo-симметричных матриц используется шкала относительной важности показателей, которая, в свою очередь, определяется функциями принадлежности (табл. 3).

Степень нечеткости предварительно принимается  $\delta = 1$ .

Таблица 3

Table 3

Нечеткая шкала значимостей критериев энергоэффективности

*Fuzzy scale of significance of energy efficiency criteria*

Лингвистическая переменная	При $\Gamma 1 > \Gamma 2$	При $\Gamma 1 < \Gamma 2$	$a_{ij}$ (по шкале Саати)
Одинаковая значимость	(1;1;1)	(1;1;1)	1
Незначительное преобладание	(2;3;4)	(0,5;0,33;0,25)	3
Значительное преобладание	(4;5;6)	(0,25;0,2;0,17)	5
Сильное преобладание	(6;7;8)	(0,17;0,14;0,13)	7
Абсолютное преобладание	(8;9;10)	(0,13;0,11;0,10)	9

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При изменении значения  $\delta$ , значения рангов для нечеткой матрицы рассчитываются по формуле:

$$a_{ij} = (a_{ij} - \delta; a_{ij} + \delta), \quad (9)$$

где  $a_{ij}$  - средние четкие ранги приоритетов,  $\delta$  - степень нечеткости.

В связи с тем, что функция принадлежности задается тройкой значений, все математические операции будут производиться также с тремя цифрами, вплоть до определения весовых коэффициентов.

Используя выражение (1) запишем формулу вычисления собственного вектора НМПС:

$$a_i = \left[ \left( \prod_{j=1}^n l_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}; \left( \prod_{j=1}^n m_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}; \left( \prod_{j=1}^n u_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \right], i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

где  $l_{ij}$  – первый элемент нечеткого числа  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца,  $m_{ij}$  – второй элемент нечеткого числа  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца,  $u_{ij}$  – третий элемент нечеткого числа  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца,  $n$  – количество столбцов НМПС, для таблицы 3 принимается равным 3.

$$\begin{aligned} a_1 &= \left[ (1 \cdot 2 \cdot 0,17)^{\frac{1}{3}}; (1 \cdot 3 \cdot 0,2)^{\frac{1}{3}}; (1 \cdot 4 \cdot 0,25)^{\frac{1}{3}} \right] = [0,69; 0,84; 1] \\ a_2 &= \left[ (0,25 \cdot 1 \cdot 0,25)^{\frac{1}{3}}; (0,33 \cdot 1 \cdot 0,33)^{\frac{1}{3}}; (0,5 \cdot 1 \cdot 0,5)^{\frac{1}{3}} \right] = [0,40; 0,48; 0,63] \\ a_3 &= \left[ (4 \cdot 2 \cdot 1)^{\frac{1}{3}}; (5 \cdot 3 \cdot 1)^{\frac{1}{3}}; (6 \cdot 4 \cdot 1)^{\frac{1}{3}} \right] = [2; 2,47; 2,88] \end{aligned}$$

Нормированные оценки вектора локальных приоритетов:

$$T_j = \left( \frac{l_i}{\sum_{i=1}^n a_i}; \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n a_i}; \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right), i=1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

где  $l_i$  – первый элемент собственного вектора  $i$ -ой строки,  $m_i$  – второй элемент собственного вектора  $i$ -ой строки,  $u_i$  – третий элемент собственного вектора  $i$ -ой строки,  $a_i$  – собственный вектор  $i$ -ой строки.

$$\begin{aligned} T_1 &= \left( \frac{0,69}{0,69+0,84+1}; \frac{0,84}{0,69+0,84+1}; \frac{1}{0,69+0,84+1} \right) = \\ &= (0,22; 0,22; 0,22) \\ T_2 &= \left( \frac{0,4}{0,4+0,48+0,63}; \frac{0,48}{0,4+0,48+0,63}; \frac{0,63}{0,4+0,48+0,63} \right) = \\ &= (0,13; 0,13; 0,14) \\ T_3 &= \left( \frac{2}{2+2,47+2,88}; \frac{2,47}{2+2,47+2,88}; \frac{2,88}{2+2,47+2,88} \right) = \\ &= (0,65; 0,65; 0,64) \end{aligned}$$

На данном этапе производится дефаззификация - обратное преобразование нечеткого множества лингвистических выходных переменных в числовые значения. Процесс дефаззификации сопровождается сначала определением среднегеометрического значения внутри вектора локальных приоритетов по выражению (12). Затем определяется среднесарифметическое значения среди всех векторов локальных приоритетов, полученных на основании опроса экспертов по выражению (13).

$$T_i = (l_i \cdot m_i \cdot u_i)^{\frac{1}{3}}, i=1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где  $l_i$  – первый элемент вектора локальных приоритетов  $i$ -ой строки,  $m_i$  – второй элемент вектора локальных приоритетов  $i$ -ой строки,  $u_i$  – третий элемент вектора локальных приоритетов  $i$ -ой строки.

$$T_1 = (0,22 \cdot 0,22 \cdot 0,22)^{\frac{1}{3}} = 0,22$$

$$T_2 = (0,13 \cdot 0,13 \cdot 0,14)^{\frac{1}{3}} = 0,13$$

$$T_3 = (0,65 \cdot 0,65 \cdot 0,64)^{\frac{1}{3}} = 0,65$$

Определение вектора приоритетов НМПС:

$$N_g = \frac{1}{m} \cdot \sum_{h=1}^m T_{gh}, \quad (13)$$

где  $m$  - количество экспертов,  $T_{gh}$  - вектор локальных приоритетов  $g$ -го показателя третьего уровня иерархии и  $h$ -го эксперта.

$$N_4 = \frac{1}{6} \cdot (0,14 + 0,11 + 0,08 + 0,12 + 0,28 + 0,16) = 0,15$$

$$N_5 = \frac{1}{6} \cdot (0,58 + 0,63 + 0,68 + 0,48 + 0,58 + 0,67) = 0,60$$

$$N_6 = \frac{1}{6} \cdot (0,28 + 0,26 + 0,24 + 0,40 + 0,14 + 0,16) = 0,25$$

Используя выражение (14) производится расчет весовых коэффициентов каждого показателя:

$$F_g = N_g \cdot N_l, \quad (14)$$

где  $N_g$  - вектор приоритетов  $g$ -го показателя третьего уровня иерархии,  $N_l$  - вектор приоритетов  $l$ -го показателя второго уровня иерархии.

Следует отметить, что принятое ранее значение степени нечеткости  $\delta = 1$  оказывает существенное влияние на результаты анализа экспертного мнения. Значение степени нечеткости характеризует погрешность, связанную с субъективным мнением респондентов. Чем ниже степень нечеткости, тем меньше границы функций принадлежности. Слишком низкое значение  $\delta$  не позволит в полной мере учесть погрешность мнений экспертов, в тоже время слишком большое значение приведет к столь большому значению нечеткости, что будет нецелесообразно проводить расчеты на основании опроса. Следовательно, внедрение нечеткой логики должно вносить коррективы в значения весовых коэффициентов и никак не влиять на ранги показателей энергоэффективности.

Алгоритм поиска оптимального значения степени нечеткости следующий (рис. 4):

- определение весовых коэффициентов при разных значениях  $\delta$ ;
- определение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по МАИ;
- определение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по НМАИ;
- выявление оптимального значения  $\delta$  путем сравнения результатов расчета.

В связи с тем, что дисперсия ( $\sigma^2$ ) подразумевает меру разброса значений случайной величины относительно ее математического ожидания, можно утверждать, что наиболее оптимальное значение степени нечеткости будет при:

$$\sigma_{МАИ}^2 \approx \sigma_{НМАИ}^2, \quad (15)$$

где  $\sigma_{МАИ}^2$  - значение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по МАИ,  $\sigma_{НМАИ}^2$  - значение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по НМАИ (рис. 5).



*fuzziness*

*Source: compiled by the author.*



*Fig. 5. Variance plot*

*Source: compiled by the author*

степени нечеткости наблюдаются наименьшие погрешности.

$$\Delta = \left| \frac{K_g - F_g}{K_g} \cdot 100 \right|, \quad (16)$$

где  $K_g$  - значение весового коэффициента  $g$ -го показателя, рассчитанного по МАИ,  $F_g$  - значение весового коэффициента  $g$ -го показателя, рассчитанного по НМАИ.

Как видно из графика, представленного на рисунке 5, значение дисперсии  $\sigma^2_{\text{НМАИ}}$  приближается к оптимальному при степени нечеткости  $\delta = 0,8$ . Отклонение в таком случае составляет минимальное значение  $\Delta = 6,39\%$ .

#### Результаты (Results)

На гистограмме, изображенной на рисунке 6 демонстрируется сравнение весовых коэффициентов, полученных по МАИ ( $K_g$ ) и весовых коэффициентов, полученные по НМАИ ( $F_g$ ). Как видно из гистограммы, ранги показателей изменились. Внедрение нечеткой логики в алгоритм метода анализа иерархий Т. Саати позволило скорректировать значения весовых коэффициентов. Таким образом, наибольшей значимостью обладает показатель энергоэффективности, характеризующий потери в сетях среднего напряжения. Также был выявлен наименее значимый показатель – оснащенность АИИС КУЭ.

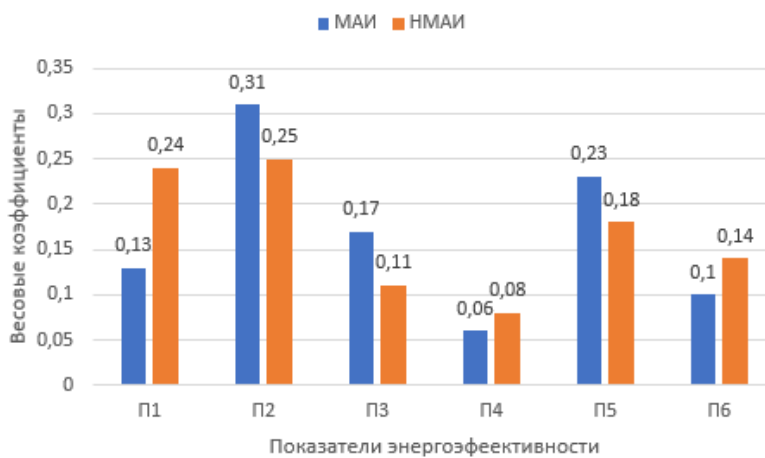


Рис. 6. Сравнительная гистограмма весовых коэффициентов Fig. 6. Comparative weight histogram

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Расчетные значения весовых коэффициентов позволяют перейти к заключительному этапу анализа энергоэффективности электросетевых организаций. В оценке энергетической эффективности на основании интегрального показателя участвует 10 филиалов электросетевой организации (О1 – О10), которые предоставили данные за три прошедших года: 2018, 2019, 2020. Непосредственно перед определением интегрального показателя электросетевых организаций, необходимо проанализировать уровень энергетической эффективности. Для этой цели производится формирование числовых промежутков каждого показателя энергоэффективности и определение их значимости.

По выражению (17), определяется степень влияния числового промежутка на энергетическую эффективность организации.

$$g_{jk} = \frac{k}{b}, \quad (17)$$

где  $k$  – порядковый номер числового промежутка,  $b$  – количество числовых промежутков.

Выражение для определения интегрального показателя энергетической эффективности электросетевой организации по всем показателям:

$$\varepsilon_j = \sum_{k=1}^{\Sigma b} g_{jk} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{kn} \cdot F_n}{n}, j = 1, 2, \dots, m, \quad (18)$$

где  $\Sigma b$  - количество элементов в матрице значимости числовых промежутков,  $\Sigma g_{jk}$  – значимость  $k$ -го числового промежутка  $j$ -ой организации,  $\Sigma \lambda_{kn}$  – степень принадлежности значения  $n$ -го показателя к  $k$ -му промежутку,  $F_n$  – значение весового коэффициента, относящегося к  $n$ -му показателю,  $n$  – число показателей энергоэффективности,  $m$  – количество электросетевых организаций.

### Обсуждение (Discussions)

Проведенные исследования по вышеприведенному алгоритму (рис.1) на основе нечеткого НМАИ позволили рассчитать интегральные показатели энергоэффективности по всем электросетевым организациям энергосистемы. Кроме этого, в алгоритме заложена возможность анализа для отдельной организации внутри одного года. Также предусмотрены наглядные формы представления полученных результатов в форме графиков и диаграмм.

В качестве примера на рисунке 7 приведена сравнения сводная диаграмма организаций по энергоэффективности.

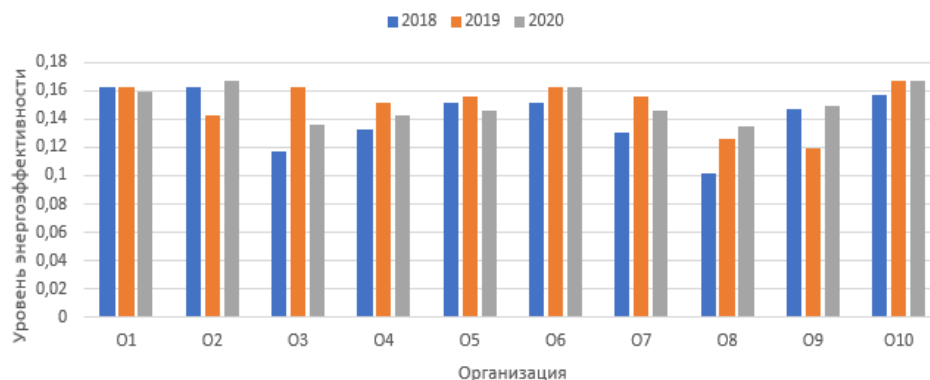


Рис. 7. Сводная диаграмма сравнения организаций Fig. 7. Organization comparison pivot chart

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленный алгоритм позволил не только проанализировать динамику развития организаций в течение трех лет, но и решить задачи бенчмаркинга - выявил лидирующих и отстающих участников филиальной структуры. Наименее энергоэффективной организацией можно считать O8, интегральный показатель которой, был равен 0,102 о.е. (при среднем значении 0,141 о.е.). На протяжении трех лет в данной электросетевой организации наблюдались высокие по сравнению с остальными организациями потери в сетях среднего и высокого напряжения. Помимо этого, в O8 наблюдается неудовлетворительный уровень технического состояния трансформаторов – 0,51 о.е. (при среднем значении 0,19 о.е.). Лидирующие позиции занимают организации O2 и O10 со значением интегрального показателя – 0,167 о.е. Наибольшей динамикой развития обладает организация O3, повысившая свой интегральный показатель на 40% в течение года. Это связано, прежде всего с резким уменьшением уровня потерь в сетях высокого и среднего напряжений.

### Заключение (Conclusions)

В работе представлен алгоритм анализа энергоэффективности электросетевых организаций (рис.1), основанный на формировании интегрального показателя.

С учетом существующих требований и показателей энергоэффективности сформирована иерархическая модель (рис.2), которая может быть при необходимости адаптирована и актуализирована с учетом изменений нормативных документов РФ.

Одним из важных этапов при формировании интегрального показателя является определение весовых коэффициентов отдельных показателей. На первом этапе в работе проведен расчет весовых коэффициентов с использованием метода анализа иерархий в четкой постановке. Несмотря на имеющиеся достоинства этого метода анализа, в ходе исследования были выявлены некоторые неточности, влияющие на результаты расчетов. В результате проведенных исследований было принято решение внедрить в МАИ элементы нечеткой логики.

Как показало сравнение МАИ и НМАИ, при использовании четкой постановки метода анализа иерархий не берётся во внимание неопределённость, которая связана с отображением человеческого мнения на естественном языке. Данную проблему можно устранить, применяя нечёткую методологию, которая, в свою очередь, учитывает субъективное мнение респондентов и их психологическое восприятие оценочной шкалы. НМАИ выгодно применять, когда сложно формализовать входные данные четким образом, поскольку в данном методе применяется относительная шкала сравнений. Недостатком МАИ является слабое различие общих рангов предпочтений альтернатив, когда их больше 5-7. В тоже время, результаты НМАИ имеют сильную зависимость от

правильного формирования функций принадлежности входных данных.

Для повышения адаптационных свойств НМАИ разработан алгоритм поиска оптимального значения степени нечеткости, определяющейся субъективным мнением респондентов.

В результате применение НМАИ позволило не только упростить респондентам процесс назначения экспертных оценок путем замены цифр на лингвистические переменные, но и скорректировать ранее определенные по МАИ весовые коэффициенты показателей энергоэффективности.

По разработанному алгоритму рассчитаны интегральные показатели энергоэффективности по всем электросетевым организациям энергосистемы, а также для отдельных организаций внутри одного года.

### Литература

1. Давыдов А.Р., Крузе А.А., Крылова Ю.А. Статистический анализ динамики энергоэффективности мировой экономики // Московский экономический журнал. – 2021. - №6. – С. 175-181.
2. Паламарчук А.Г. Анализ современного состояния энергосбережения в Российской промышленности (часть 2) // Научные труды ВЭО России. – 2020. – Том 222. - №2. – С. 362-379.
3. Гнездилов Д.К. Анализ мероприятий повышения энергоэффективности использования энергетических ресурсов для тоговой сети // Журнал «Постулат». – 2021. - №2. – 7 с.
4. Ратманова И.Д. Подход к оценке энергопотребления в регионе на основе использования нечеткой логики // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения). – 2021. – С. 43-46.
5. Заславский И.С., Карташова Е.Э., Паскарь И.Н. Методы оценивания энергетической безопасности объектов энергосистемы // Сборник трудов конференции «Развивая энергетическую повестку будущего». – 2021. – Санкт-Петербург. – С. 299-304.
6. Любченко В.Я., Павлюченко Д.А. Рейтинговая оценка показателей энергоэффективности метода анализа иерархий // Журнал «Новое в Российской электроэнергетике». – 2017. - №11. – С. 77-91.
7. Leccese F., Salvadori G., Rocca M., Belloni E. A method to assess lighting quality in educational rooms using analytic hierarchy process // Building and Environment. – 2020. – 27 p.
8. Saira Naseer, Huaming Song, Muhammad Shamrooz Aslam, Daud Abdul, Arsalan Tanveer, Assessment of green economic efficiency in China using analytical hierarchical process (AHP) // Soft computing in decision making and in modeling in economics. – 2021. 2489-2499 p.
9. Лесс В.М., Павлюченко Д.А., Любченко В.Я., Анализ энергоэффективности электросетевых организаций с использованием информационно-аналитических систем // Материалы научной студенческой конференции «Дни науки НГТУ-2021». – 2021. – С 112-116.
10. Гапонов А.И. Синтез метода анализа иерархий и теории нечетких множеств для решения задач ранжирования // XVI Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция "Теория и практика экономики и предпринимательства" – Симферополь – 2019. – С 184-185.
11. Stojan Vasović, Aleksandar Dragašević, Slaviša Puzović, Sanja Puzović, Vladan Paunović, Comprehensive power transformers evaluation based on multi-criteria decision-making approach // Tehnički vjesnik. – 2021. - №5. – 1448-1455 p.
12. Фам Ван Ты, Нечеткий метод анализа иерархий и применение для анализа видов и последствий отказов // Журнал «Наука и бизнес: пути развития». – 2021. - № 3 (117). – С. 49-52.
13. Tong Si, Chunbo Wang, Ruiqi Liu, Yusheng Guo, Shuang Yue, Yujie Ren, Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: A case study of post-treatment technologies for coal-fired units // Energy. – 2020.
14. S.K. Saraswat, Abhijeet K. Digalwar, Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multicriteria decision approach // Renewable Energy. – 2021. - № 171. – 58-74 p.
15. Osman Taylan I, Rami Alamoudi I, Mohammad Kabli, Alawi AlJifri, Fares Ramzi and Enrique Herrera-Viedma, Assessment of energy systems using extended fuzzy AHP, fuzzy VIKOR, and TOPSIS approaches to manage non-cooperative opinions // Sustainability. – 2020. - № 12 (7). – 27 p.
16. Смирнова Д.А., Гурко Н.С. Энергоэффективность предприятия. Анализ использования энергоресурсов регрессионными методами // Журнал «Главный энергетик». – 2021. - № 8. – С. 26-31.

### Авторы публикации

**Лесс Виталий Максимович** – аспирант Новосибирского государственного технического университета, <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, [lessv134@gmail.com](mailto:lessv134@gmail.com)

**Любченко Валентина Яковлевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0001-8343-2105>, [lyubchenko57@mail.ru](mailto:lyubchenko57@mail.ru)

**Павлюченко Дмитрий Анатольевич** - канд. техн. наук, заведующий кафедры «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, [d\\_pavluc@mail.ru](mailto:d_pavluc@mail.ru)

### References

1. Davydov A.R., Kruze A.A., Krylova Yu.A. Statistical analysis of energy efficiency dynamics of the world economy // Moscow economic journal. – 2021. - №6. – 175-181 p.
2. Palamarchuk A.G. Analysis of the current state of energy saving in the Russian industry (part 2) // Scientific works of the FES of Russia. – 2020. – Volume 222. - №2. – 362-379 p.
3. Gnezdilov D.K. Analysis of measures to improve the energy efficiency of the use of energy resources for the trading network // Journal «Postulate». – 2021. - №2. – 7 p.
4. Ratmanova I.D. Approach to the assessment of energy consumption in the region based on the use of fuzzy logic // Status and prospects for the development of electrical and thermal technology (XXI Benardos Readings). – 2021. – 43-46 p.
5. Zaslavskii I.S., Kartashova E.E., Paskar' I.N. Methods for assessing the energy security of energy system facilities // Proceedings of the conference "Developing the Energy Agenda of the Future". – 2021. – St. Petersburg. – 299-304 p.
6. Lyubchenko V.Ya., Pavlyuchenko D.A. Rating assessment of energy efficiency indicators of the hierarchy analysis method // Journal "New in the Russian Electric Power Industry". – 2017. - №11. – 77-91 p.
7. Leccese F., Salvadori G., Rocca M., Belloni E. A method to assess lighting quality in educational rooms using analytic hierarchy process // Building and Environment. – 2020. – 27 p.
8. Saira Naseer, Huaming Song, Muhammad Shamrooz Aslam, Daud Abdul, Arsalan Tanveer, Assessment of green economic efficiency in China using analytical hierarchical process (AHP) // Soft computing in decision making and in modeling in economics. – 2021. 2489-2499 p.
9. Less V.M., Pavlyuchenko D.A., Lyubchenko V.Ya., Analysis of the energy efficiency of electric grid organizations using information and analytical systems // Proceedings of the scientific student conference «Days of Science NSTU-2021». – 2021. – 112-116 p.
10. Gaponov A.I. Synthesis of the method of analysis of hierarchies and the theory of fuzzy sets for solving problems of ranking // XVI All-Russian Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Economics and Entrepreneurship" with international participation – Simferopol – 2019. – 184-185 p.
11. Stojan Vasović, Aleksandar Dragašević, Slaviša Puzović, Sanja Puzović, Vladan Paunović, Comprehensive power transformers evaluation based on multi-criteria decision-making approach // Tehnički vjesnik. – 2021. - №5. – 1448-1455 p.
12. Fam Van Ty, Fuzzy method of analysis of hierarchies and application for the analysis of types and consequences of failures // Journal "Science and Business: Ways of Development". – 2021. - № 3 (117). – 49-52 p.
13. Tong Si, Chunbo Wang, Ruiqi Liu, Yusheng Guo, Shuang Yue, Yujie Ren, Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: A case study of post-treatment technologies for coal-fired units // Energy. – 2020.
14. S.K. Saraswat, Abhijeet K. Digalwar, Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multicriteria decision approach // Renewable Energy. – 2021. - № 171. – 58-74 p.
15. Osman Taylan 1, Rami Alamoudi 1, Mohammad Kabli, Alawi AlJifri, Fares Ramzi and Enrique Herrera-Viedma, Assessment of energy systems using extended fuzzy AHP, fuzzy VIKOR, and TOPSIS approaches to manage non-cooperative opinions // Sustainability. – 2020. - № 12 (7). – 27 p.
16. Smirnova D.A., Gurko N.S. Enterprise energy efficiency. Analysis of the use of



energy resources by regression methods // Journal "Chief Power Engineer" – 2021. - № 8. – 26-31 p.

**Authors of the publication**

**Vitalii M. Less** –Novosibirsk state technical university, <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, [lessv134@gmail.com](mailto:lessv134@gmail.com).

**Valentina Y. Lyubchenko** – Novosibirsk state technical university, <https://orcid.org/0000-0001-8343-2105>, [lyubchenko57@mail.ru](mailto:lyubchenko57@mail.ru).

**Dmitrii A. Pavlyuchenko** - Novosibirsk state technical university, <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, [d\\_pavluc@mail.ru](mailto:d_pavluc@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»*

<b>Получено</b>	<b>11.11..2022 г.</b>
<b>Отредактировано</b>	<b>21.02.2023 г.</b>
<b>Принято</b>	<b>27.10.2023 г.</b>