УДК 658.5

А.Ю. Домников, М.Я. Ходоровский, Л.В. Домникова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, email: a.y.domnikov@urfu.ru

КОМПЛЕКСНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ КОМПАНИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ключевые слова: электроэнергетика, эффективность, конкуренция, стратегия, надежность, риски, математические экономические модели, неопределенность, централизованные источники энергии.

В современных условиях, характеризующихся экономической нестабильностью энергетические задачи, не содержащие неопределенностей, являются скорее редким исключением, чем правилом. Решение задач анализа состояния и развития систем энергетики, в том числе, энергогенерирующих компаний, серьезно осложняется неопределенностью исходной информации, наблюдаемой при описании текущего и перспективного уровня конкурентоспособности, а также неопределённостью критериев качества состояния и принимаемых управленческих решений по эффективному развитию. Трудности анализа состояния энергосистем, вызванные влиянием объективных факторов таковы, что, несмотря на многочисленные усилия исследователей в этом направлении, они еще далеки от преодоления. Поэтому исследования по совершенствованию системы принятия управленческих решений по повышению конкурентоспособности энергогенерирующей компании с учетом факторов неопределенности при решении поставленных задач, содержащихся в статье, являются актуальными. В статье предложена схема построения системы информационной поддержки управленческих решений по развитию энергогенерирующей компании. Разработаны методы определения результатов операций над нечеткими значениями параметров. Представлены методы решения задач выбора при нечётких значениях критериальных оценок на конечном множестве альтернатив и классификации при нечетком описании классов и значений индикаторов, характеризующих конкурентоспособность энергогенерирующих компаний. Разработан алгоритм информационной поддержки процесса формирования и выбора альтернатив развития энергогенерирующих компаний в условиях высоких экономических рисков. В ходе проведения исследования изучены направления повышения уровня конкурентоспособности энергогенерирующей компании с учетом особенностей использования инновационных технологий в сфере генерации энергии в условиях неопределенности и многокритериальности.

A.Y. Domnikov, M.Y. Khodorovsky, L.V. Domnikova

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, email: a.y.domnikov@urfu.ru

COMPREHENSIVE ANALYTICAL JUSTIFICATION OF MANAGEMENT DECISIONS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF POWER GENERATION COMPANY ON THE BASIS OF FUZZY INFORMATION

Keywords: electric power industry, efficiency, competition, strategy, reliability, risks, mathematical economic models, uncertainty, centralized energy sources.

In modern conditions, characterized by economic instability, energy tasks that do not contain uncertainties are the rare exception rather than the rule. Solving the problems of analyzing the state and development of energy systems, including power generating companies, is seriously complicated by the uncertainty of the initial information observed in the description of the current and prospective level of competitiveness, as well as the uncertainty of the quality criteria of the state and decisions made for effective development. The difficulties of analyzing the state of power systems caused by the influence of objective factors are such that, despite the numerous efforts of researchers in this direction, they are still far from overcoming. Therefore, research on improving the decision-making system to improve the competitiveness of an energy generating company, taking into account the uncertainty factors in solving the tasks contained in the article, is relevant. The article proposes a scheme for building an information support system for decisions on the development of an energy generating company. Methods for determining the results of operations on fuzzy parameter values have been developed. Methods for solving selection problems with fuzzy values of criterion estimates on a finite set of alternatives and classification with a fuzzy description of classes and values of indicators characterizing the competitiveness of power generating companies are presented. An algorithm for information support of the process of formation and selection of alternatives for the development of energy generating companies under conditions of high economic risks has been developed. In the course of the study, the directions for increasing the level of competitiveness of an energy generating company were studied, taking into account the peculiarities of using innovative technologies in the field of energy generation in conditions of uncertainty and multi-criteria.

В условиях высокой волатильности экономики повышается интерес к использованию различных математических методов для анализа закономерностей развития и поведения электроэнергетических систем, причем основные трудности применения этих методов связаны с тем, что параметры внешней среды оказываются неопределенными. Часто приходится сталкиваться с необходимостью расчетов при наличии в уравнениях нечетко заданных параметров или неточной технологической информации. Однако при построении формальных моделей чаще всего пользуются детерминированными методами и вносят определенность в те ситуации, где ее в действительности не существует. Неточность задания тех или иных параметров при расчетах практически не принимается во внимание или, с учетом определенных предположений и допущений, неточные параметры заменяются экспертными оценками или средними (средневзвешенными) значениями. Возникающие при этом нарушения равенств, балансовых соотношений приводят к необходимости варьировать некоторыми параметрами для точного удовлетворения заданных уравнений и получения приемлемого результата. Особенность энергосистем состоит в том, что значительная часть информации, необходимой для их математического описания, существует в форме представлений или пожеланий экспертов. Но в языке традиционной математики нет понятий, с помощью которых можно было бы достаточно точно отразить нечеткость их представлений. Обычные количественные методы анализа систем по своей сути мало пригодны и не эффективны для такого рода систем. Это определяется несовместимостью, состоящую в том, что чем сложнее система, тем менее мы способны дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении для систем, сложность которых превосходит некоторый пороговый уровень, точность и практическая значимость становятся почти взаимоисключающими. Именно в этом смысле точный количественный анализ в реальных экономических, социальных и других системах, связанных с участием человека, не имеет требуемого практического значения [1,2].

Из объективного характера наличия неопределенности в конкретных энергетических задачах вытекает применение для их решения специальных методов, позволяющих оперировать с нечеткими категориями. В практике применения теории нечетких множеств просматриваются два пути: применение нечетких алгоритмов для решения задач с неопределенностями и применение ранее разработанных, опробованных алгоритмов к нечеткой исходной информации. Первый путь чаще всего применяется для задач с большим количеством неопределенностей разного рода, второй – для хорошо проработанных задач с неопределенностью в виде нечетких значений параметров и коэффициентов.

Предложенные в статье методы, в наибольшей мере применимы для управления функционированием энергосистем. В этих методах наиболее полно используются возможности и преимущества рассматриваемого направления математики для моделирования неопределенной, неточной, нечеткой и неполной информации, а также получения решений на основе такой информации [1].

С учетом выше изложенного предлагается применить теорию нечетких множеств для решения задач развития энергогенерирующих компаний и их объектов – электрических станций и электрических сетей. Применение этой теории предоставляет возможность описывать состояние и закономерности функционирования объекта исследования, используя информацию в ее изначальном виде.

В применении теории нечетких множеств к энергетическим задачам в настоящее время просматриваются два направления. Первое заключается в создании нечетких алгоритмов для получения нечетких решений на основе нечеткой информации. Другое представляет собой создание нечеткой топологии, основанной на определении нечеткого значения параметра и применении известных алгоритмов для нахождения решения задачи, которое из-за нечеткости топологии также будет нечетким. Оба этих направления интенсивно используются при решении прикладных задач. В энергетических задачах алгоритмическое направление развивается в случаях, когда

неопределенность приводит к новым формулировкам самой задачи. Следует отметить, что задачи качественной оценки состояния системы и выбора конкурентоспособного варианта развития энергогенерирующей компании и в частности электрических станций при нечетко сформулированной цели являются ярким примером алгоритмического направления применения теории нечетких множеств.

Топологическое направление применения теории нечетких множеств характерно для решения задач, которые уже успешно решались детерминированными методами, но в силу изменившихся условий внешнего окружения системы приобрели в настоящее время неопределенность в исходной информации и в формулировке математической модели. Это касается в основном задач развития систем энергетики. Постановка задачи не претерпевает каких-то серьезных изменений, и поэтому привлекательно применение старого алгоритма решения. Особенность заключается в необходимости учета нечетких значений в исходной информации и в параметрах модели [2, 3].

Цель исследования

На основе методов решения задач выбора и классификации при нечеткой исходной информации построить модель системы поддержки принятия управленческих решений по повышению конкурентоспособности энергогенерирующей компании.

Материал и методы исследования

В применении теории нечетких множеств к энергетическим задачам в настоящее время просматриваются два направления. Первое заключается в создании нечетких алгоритмов для получения нечетких решений на основе нечеткой информации. Другое представляет собой создание нечеткой топологии, основанной на определении нечеткого значения параметра и применении известных алгоритмов для нахождения решения задачи, которое из-за нечеткости топологии также будет нечетким [3]. Оба этих направления интенсивно используются при решении прикладных задач. В энергетических задачах алгоритмическое направление развивается в случаях, когда неопределенность приводит к новым формулировкам самой задачи. Следует отметить, что задачи качественной оценки состояния системы и выбора конкурентоспособного варианта развития энергогенерирующей компании и в частности электрических станций при нечетко сформулированной цели являются ярким примером алгоритмического направления применения теории нечетких множеств [4, 5].

Топологическое направление применения теории нечетких множеств характерно для решения задач, которые уже успешно решались детерминированными методами, но в силу изменившихся условий внешнего окружения системы приобрели в настоящее время неопределенность в исходной информации и в формулировке математической модели [6]. Это касается в основном задач развития систем энергетики. Постановка задачи не претерпевает каких-то серьезных изменений, и поэтому привлекательно применение алгоритма решения, особенность которого заключается в необходимости учета нечетких значений в исходной информации и в параметрах модели.

Далее будут рассмотрены основные понятия теории нечетких множеств, основные черты топологии в части определения нечеткого числа и нечеткой арифметической операции, теоретические основы решения задач выбора и классификации при нечеткой исходной информации и приведена модель построения системы поддержки принятия решений по повышению конкурентоспособности энергогенерирующей компании [5].

Для описания нечетких значений предлагается экспоненциальная функция принадлежности (ФП) с бесконечной областью определения и ограниченной областью значений вида [6, 7]:

$$\mu(x) = exp\left[-b(x-c)^2\right] \qquad (1)$$

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

Алгоритм решения задачи выбора основывается на следующих условиях: задано n альтернатив, и выбор необходимо осуществить по m критериям. При этом

множество альтернативой множество критериев K являются четкими и конечными, а критериальные оценки альтернатив – нечеткими подмножествами универсальных множеств оценок, представляющими собой формализацию нечетких понятий [8-10].

Начальным пунктом решения задачи выбора является формулирование бинарных отношений предпочтения. Их, ввиду конечного числа альтернатив, можно записать в матричном виде. Элементом такой матрицы является максимальная степень, с которой одна альтернатива по рассматриваемому критерию может быть лучше другой [7-9].

Значения элементов матрицы нечеткого отношения предпочтения рассчитываются по формуле [1, 11-13]:

$$r_{ij}^{k} = \sup_{x,y\in X}\left[min\begin{Bmatrix} \mu_i^k(x), \\ \mu_j^k(y), \\ \mu_R^k(x,y) \end{Bmatrix}\right], \qquad (5)$$

где $\mu_i^k(x), \mu_j^k(y)$ – функции принадлежности оценок i-й и j-й альтернатив по критерию k;

$\mu_R^k(x,y)$ – значение функции принадлежности отношения предпочтения k-го критерия.

В задачах энергетики отношение предпочтения обычно представляет собой отношение нестрогого порядка. Тогда формула (5) принимает вид:

$$r_{ij}^{k} = \sup_{\substack{x,y\in X \\ x\geq y}}\left[min\left\{\mu_i^k(x), \mu_j^k(y)\right\}\right], \qquad (6)$$

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 $\left(c_{iR} \geq c_{jR}\right)$, то значение элемента бинарного отношения предпочтения равно единице $(r_{ij} = 1)$. В остальных случаях значение элемента матрицы бинарного отношения предпочтения определяется как ордината точки пересечения функций принадлежности альтернатив. Графически такая функции принадлежности представлена на рис. 1.

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

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, при\, c_{iR} \geq c_{jR}; \\ \exp\left(-b_{iR}b_{jL}\dfrac{\left(c_{jL}-c_{iR}\right)^2}{b_{jL}+b_{iR}+2\sqrt{b_{jL}b_{iR}}}\right), \\ при\, c_{iR} < c_{jR}. \end{cases} \qquad (7)$$

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

Далее для выбора рациональной альтернативы предлагается алгоритм, состоящий из четырех этапов:

1. На основании исходных бинарных отношений предпочтения строятся нечеткие отношения F и Q, определяющие множество эффективных альтернатив и ранжирование альтернатив в этом множестве с учетом важности критериев, соответственно:

$$\mu_F(x,y) = \min\left\{\mu_i(x,y),\ldots,\mu_m(x,y)\right\}, \qquad (8)$$

$$\mu_Q(x,y) = \sum_{i=1}^{m}\lambda_j\mu_j(x,y) \qquad (9)$$

2. Определяются нечеткие подмножества недоминируемых альтернатив по этим отношениям:

$$\mu_F^{UD}(x) = 1 - \sup_{y\in X}\left[\mu_F(y,x) - \mu_F(x,y)\right], \qquad (10)$$

$$\mu_Q^{UD}(x) = 1 - \sup_{y\in X}\left[\mu_Q(y,x) - \mu_Q(x,y)\right] \qquad (11)$$

3. Находится степень недоминируемости каждой альтернативы как пересечение множеств $\mu_F^{UD}(x)$ и $\mu_Q^{UD}(x)$:

$$\mu_F^{UD}(x) = \min\left\{\mu_F^{UD}(x), \mu_Q^{UD}(x)\right\}, \qquad (12)$$

4. Рациональным считаются альтернативы с наибольшей степенью недоминируемости.

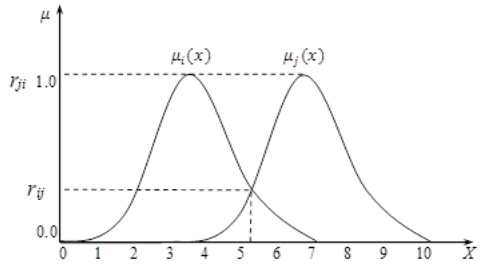

Рис. 1. Графическая интерпретация определения значения элемента бинарного отношения предпочтения

С применением предложенного методического подхода удалось решить ряд практических задач принятия решений по повышению конкурентоспособности энергогенерирующих компаний и их объектов – электрических станций – при нечеткой исходной информации.

Результаты исследования и их обсуждение

В связи с отсутствием вводов новых и неуклонным износом существующих электрогенерирующих мощностей на российских электростанциях возрастает актуальность технического перевооружения тепловых электростанций.

В рамках проводимого исследования, под понятием «техническое перевооружение» понимается комплекс управленческих решений, направленных на повышение конкурентоспособности действующих электроэнергетических объектов. Исходя из этого к техническому перевооружению тепловых станций отнесены следующие мероприятия [1]:

1. Замена узлов и деталей основного и вспомогательного оборудования, отработавшего эксплуатационный ресурс времени;
2. Замена физически изношенного или морально устаревшего оборудования на новое;
3. Изменение тепловых схем тепловых электростанций;
4. Перевод тепловых электростанций на более высокие параметры пара;
5. Утилизация энергоресурсов избыточных параметров;
6. Перевод конденсационных электростанций или отдельных турбин в теплофикационный режим;
7. Перевод энергетического оборудования в режим регулирования суточных и недельных графиков электрических нагрузок;
8. Перевод электростанций на сжигание непроектных видов топлива;
9. Осуществление природоохранных мероприятий, таких как замена или установка устройств по очистке дымовых газов и сточных вод, установка более высоких дымовых труб, утилизация промышленных отходов и др.
10. Замена действующих или применение новых средств механизации и автоматизации;
11. Специальные мероприятия по улучшению условий труда и его безопасности.

Структуризация данных видов технического переоборудования осуществлена по целевой направленности мероприятий и по характеру работ, выполненных на объекте энергетики. При анализе целевой направленности мероприятий по техническому перевооружению тепловых электростанций выделены следующие основные задачи:

1. Продление сроков службы энергетического оборудования;
2. Увеличение производственных мощностей, а также объемов производства энергетической продукции – электрической и тепловой энергии;
3. Существенное улучшение основных системных характеристик – устойчивости параллельной работы и др.;
4. Повышение эффективности использования энергетических, трудовых и материальных ресурсов;
5. Повышение эффективности охраны окружающей среды и безопасности объектов;
6. Осуществление диверсификации производства, в основном, на базе утилизации промышленных отходов (сбросного тепла, золошлаковых остатков
7. Повышение эффективности инвестиционных процессов в условиях самофинансирования;
8. Повышение социальной эффективности электроэнергетики (рост занятости, повышение квалификации кадров и др.).

Следует отметить, что в процессе данной структуризации целей выделен только их верхний слой. В дальнейшем потребовалось провести более детальный анализ «дерева» целей с выходом на совокупность показателей для количественной оценки альтернативных вариантов и на формирование системы критериев эффективности.

Таблица 1

Структуризация видов технического перевооружения по целевой направленности

	Виды технического перевооружения	Целевая направленность							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Замена узлов и агрегатов	+	-	+	-	-	-	+	+
2	Установка нового оборудования	+	+	+	+	+	-	+	+
3	Изменение тепловых схем	-	+	-	+	+	-	+	+
4	Перевод на повышенные параметры пара	-	+	-	+	-	-	+	+
5	Утилизация энергоресурсов	-	-	-	+	-	+	+	+
6	Перевод в теплофикационный режим	-	+	_	+	+	-	+	+
7	Перевод в маневренный режим	-	-	+	-	-	-	+	-
8	Изменение вида топлива	-	-	-	+	+	-	-	+
9	Природоохранные мероприятия	-	-	-	-	+	+	-	-
10	Механизация и автоматизация	-	-	+	+	-	-	-	+
11	Улучшение условий труда	-	-	-	+	-	-	-	+

Примечание: целевая направленность технического перевооружения обозначена: 1 – продление сроков службы; 2 – увеличение производства энергии; 3 – улучшение системных характеристик; 4 – повышение эффективности использования ресурсов; 5 – повышение эффективности охраны окружающей среды; 6 – диверсификация производства; 7 – повышение эффективности инвестиций; 8 – повышение социальной эффективности.

Таблица 2

Характеристика системы критериев для анализа вариантов технического перевооружения электростанций

Критерии	Подкритерии
1. Энергетический	1.1. Удельный расход условного топлива
	1.2. Коэффициент готовности
	1.3. Срок службы объекта
	1.4. Среднегодовая выработка электроэнергии в начальный период эксплуатации (15 лет)
2. Экологический	2.1. Удельные выбросы вредных веществ в атмосферу
	2.1.1. Оксидов азота
	2.1.2. Оксидов серы
	2.1.3. Золы
	2.2. Потребность в земельных ресурсах
3. Экономический	3.1. Удельные капиталовложения
	3.2. Кратность инвестиционного цикла
	3.3. Интегральный экономический эффект
	3.4. Интегральные затраты

Таблица 3

Результаты многокритериального анализа вариантов технического перевооружения

Веса критериев, %			Оценки недоминируемости по вариантам			
1. Энергетический	2. Экологический	3. Экономический	1	2	3	4
0.0	50.0	50.0	0.75	0.70	1.0	0.70
25.0	37.0	37.0	0.79	0.75	1.0	0.77
50.0	25	25.0	0.77	0.76	1.0	0.84
75.0	12.5	12.5	0.74	0.78	1.0	0.91
100.0	0.0	0.0	0.71	0.80	1.0	0.98
50.0	50.0	0.0	0.58	0.65	1.0	0.87
37.0	37.0	25.0	0.74	0.73	1.0	0.81
25.0	25.0	50.0	0.87	0.80	1.0	0.75
12.5	12.5	75.0	1.0	0.85	0.99	0.69
0.0	0.0	100.0	1.0	0.75	0.86	0.50
50.0	0.0	50.0	0.93	0.88	1.0	0.79
37.0	25.0	37.0	0.82	0.78	1.0	0.80
25.0	50.0	25.0	0.65	0.69	1.0	0.78
12.5	75.0	12.5	0.45	0.59	1.0	0.77
0.0	100.0	0.0	0.25	0.50	1.0	0.75

В табл. 1 показано соответствие видов технического перевооружения целевой направленности.

В процессе обобщения возможных направлений технического перевооружения, выделены три конкурирующие варианта восстановления мощностей электростанций, подлежащих рассмотрению на стадии предпроектных разработок:

1. Продление сроков службы энергетических объектов путем модернизации вспомогательного и основного энергетического оборудования с заменой физически изношенных элементов, в основном, работающих в зонах высоких температур и давлений.

2. Замена существующего оборудования новым с сохранением прежних типоразмеров.

3. То же на базе новых технологий производства электроэнергии (природоохранных, энерго– и ресурсосберегающих).

Многокритериальный анализ данных вариантов технического перевооружения проведен на примере конденсационной электростанции на угольном топливе установленной мощностью 2000 МВт с четырьмя энергетическими блоками единичной мощностью по 500 МВт (К-500-240). В качестве общей альтернативы техническому перевооружению принято сооружение новой электростанции такого же типа (вариант 4).

Сопоставление рассматриваемых вариантов проводилось по трем «синтетическим» критериям – энергетическому, экономическому и экологическому, каждый из которых был представлен в виде совокупностей частных критериев (подкритериев) (Табл. 2). В качестве исходных данных для многокритериального анализа приняты количественные оценки по рассматриваемым подкритериям. При этом учитывались возможные интервалы неоднозначности этих оценок. Расчеты выполнены для различных сочетаний весовых коэффициентов в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0,25. Результаты многокритериального анализа приводятся в табл. 3.

При относительно широком диапазоне весовых оценок по группам критериев (0.25-0.5), в который попадает случай равнозначности этих групп (все веса равны 1/3), наиболее конкурентоспособным оказывается вариант технического

перевооружения электростанции на базе новых технологий производства электроэнергии (вариант 3). Этот же вариант обладает наибольшей степенью недоминируемости в сравнении с остальными альтернативами по энергетическому и экологическому критериям (при их весах, равных 1). В указанных условиях вторым по предпочтительности является вариант сооружения новой конденсационной электростанции (вариант 4). Более низкий ранг последнего, как показывает анализ, обусловливается: по энергетическому критерию – существенно меньшими объемами производства электроэнергии на начальном этапе (из-за увеличения сроков энергетического строительства) и по экологическому критерию – потребностью в дополнительном отводе земель для новой электростанции. При повышенном весе экономического, критерия (от 0.75 до 1.0) становится более конкурентоспособным вариант продления сроков службы электростанции (вариант 1), обладающий более благоприятными инвестиционными характеристиками.

Таким образом, по результатам проведенного многокритериального анализа в зону более высокой конкурентоспособности попадают варианты продления сроков службы энергетических объектов путем модернизации оборудования (вариант 1) и замены существующего оборудования новым на базе новых технологий (вариант 2).

Выводы

В ходе проведения исследования разработан специальный программно-вычислительный комплекс для проведения многокритериального анализа по выбору наиболее рационального варианта развития электроэнергетической системы с учетом нечеткой информации.

1. Для решения задач выбора альтернатив развития по конечному числу критериев был использован математический аппарат теории нечетких множеств. На основе этого были изучены практические задачи развития электроэнергетической системы и показаны возможности применения алгоритмов многокритериального анализа к различным стратегиям конкурентного развития энергобизнеса.

2. На основе предложенного методического подхода по выбору конкурентоспособного варианта технического перевооружения угольных электростанций удалось определить наиболее эффективный вариант, который предполагает использование внедрение инновационных энергетических технологий на существующих электростанциях.

3. Полученные области решений поставленной задачи по выбору варианта развития электроэнергетической системы будут полезны менеджменту энергогенерирующих компаний в процессе принятия управленческих решений по оптимизации ресурсов и использованию конкурентных преимуществ за счет совершенствования структуры генерирующих мощностей электростанций и внедрения перспективных технологий для выработки энергии.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), контракт № 20-010-00886.

Библиографический список

1. Домников А.Ю., Домникова Л.В. Разработка методологии и инструментария оценки конкурентного развития систем когенерации энергии. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2021. 348 с.

2. Wang X., Ruan, D., Kerre E. Mathematics of Fuzziness – Basic Issues. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, 2009.

3. Manusov V., Ahyoev J. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. Applied Mechanics and Materials. 2015. № 792. P. 324–329.

4. Domnikov A., Antipova E., Domnikova L. Evaluation of economic risks for power-generating companies. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2019. № 121. P. 125-133. DOI: 10.2495/RISK180111.

5. Domnikov A., Antipova E., Domnikova L. Diagnostics of competitiveness of power-generating companies WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2019. № 222. P. 27-33. DOI: 10.2495/EQ180031.

6. Jardine N., Sibson R. Mathematical Taxonomy. London: John Wiley and Sons. 1971.

7. Zadeh L. Fuzzy logic – A personal perspective. Fuzzy Sets and System. 2015. № 281. P. 4-20. DOI: 10.1016/j.fss.2015.05.009.

8.Lance G.N., Williams W.T A general theory of classificatory sorting strategies. 1. Hierarchical systems. Comput. J. 1967. Vol. 9. № 4. P. 373-380.

9. Jardine N., Sibson R. Mathematical Taxonomy: London: John Wiley and Sons, 1971. 286 p.

10. Schroeck G. (ed), Risk Management and Value Creation in Financial Institutions, John Wiley & Sons, Business & Economics: England, 2002. P. 47-85.

11. Hartigan J.A. Clustering Algorithms: New York: Wiley, 1975. 351 p.

12. Gordon A.D. Identifying genuine clusters in a classification. Computational Statistics and Data Analysis. 1994. № 18. P. 561-581.

13. Scholten D., Künneke R. Towards the comprehensive design of energy infrastructures. Sustainability. 2016. № 8(12). P. 1291-1295.