

УДК 621.311:658.86

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ДОЛГОСРОЧНОГО СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В ЭКОНОМИКЕ АРМЕНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Т.С. Гнуни

ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики”

Задача прогнозирования долгосрочного спроса на электроэнергию характеризуется наличием факторов неопределенности нестохастической природы. Для решения поставленной задачи предлагается методика, основанная на применении методов теории нечетких множеств и нечеткой логики. На основе анализа показателей макроэкономического развития и электроемкостей отраслей экономики ряда стран выявлены некоторые общие тенденции в их изменении. Наличие этих тенденций позволяет для определения долгосрочного спроса на электроэнергию в отраслях экономики применить метод Мамдани, суть которого заключается в формализации лингвистической неопределенности, формировании нечеткого вывода и преобразовании его в обычное количественное значение. Приведен численный пример прогнозирования долгосрочного спроса на электроэнергию в экономике Армении, основанный на предложенной методике.

Ключевые слова: долгосрочный спрос, функция принадлежности, прогнозирование, терм-множество, фазсификация, агрегирование, база правил.

Введение. Прогнозирование долгосрочного спроса на энергетические ресурсы является одной из ключевых задач при планировании развития энергетических систем. Для оценки величины долгосрочного спроса на энергоресурсы широко используются методические подходы теории стратегического управления [1, 2] и регрессионного анализа [3-5]. Однако часто практическое применение полученных регрессионных зависимостей оказывается недостаточно обоснованным ввиду очень низких значений величин коэффициентов корреляции.

Методы исследования. В основу предлагаемой методики положен принцип декомпозиции различных изменяющихся во времени факторов [5, 6], в соответствии с которым оценка величины долгосрочного спроса на электроэнергию в экономике может быть осуществлена по выражению

$$W_{\Sigma} = A \sum_j s_j \cdot \varepsilon_j = N \cdot b \sum_j s_j \cdot \varepsilon_j, \quad (1)$$

где W_{Σ} - суммарный спрос на электроэнергию, *т н.э.*; A - суммарный объем внутреннего валового продукта (ВВП), *млн.\$*; N - численность населения,

млн.чел.; b - объем ВВП на душу населения, $\$/чел.$; j - индекс сектора экономики; s_j - долевое участие в ВВП валового продукта (ВП) j -го сектора экономики; ε_j - электроемкость ВП j -го сектора экономики, $т н.э./млн.\$$.

Постановка задачи. В приведенной выше постановке задача сводится к выявлению долгосрочных тенденций изменения структуры экономики, объемов производства валовой продукции и электроемкости секторов экономики.

Исходные данные и их анализ. В табл. 1 приведены данные Всемирного банка [7] о макроэкономических показателях и данные Международного энергетического агентства [8] об электроемкостях ВП секторов экономики в ряде стран мира.

Таблица 1

Макроэкономические и энергетические показатели ряда стран мира в 2012 г.

Страна	Население, млн.чел.	ВВП на душу населения, $\$/чел.$	Долевое участие в ВВП, %			Электроемкость ВП, $т н.э./млн.\$$		
			промышленность	сфера услуг	сельское хозяйство	промышленность	сфера услуг	сельское хозяйство
Армения	3,0	2 236	33	45	22	59,8	36,8	8,2
Азербайджан	9,3	3 113	63	32	5	14,3	41,3	52,5
Беларусь	9,5	4 860	43	47	10	58,1	22,3	29,4
Бельгия	11,1	36 816	22	77	1	27,3	1,1	9,1
Болгария	7,3	4 631	31	63	6	20,6	12,3	2,0
Великобритания	63,7	37 561	21	78	1	16,7	4,5	13,9
Венгрия	9,9	10 982	31	65	4	22,7	10,2	15,4
Германия	81,9	37 523	31	68	1	20,4	6,2	0,0
Греция	11,1	18 775	16	80	4	29,9	8,2	28,2
Грузия	4,5	2 080	24	67	9	110,2	15,3	40,4
Испания	46,2	25 140	26	72	2	20,7	6,3	14,8
Италия	60,9	28 400	24	74	2	24,9	6,1	14,5
Латвия	2,0	8 443	22	74	4	45,3	13,4	17,5
Литва	3,0	10 054	28	68	4	29,6	13,2	12,5
Польша	38,5	10 577	32	64	4	29,8	14,6	8,2
Россия	143,5	6 834	37	59	4	80,2	24,1	33,5
Румыния	20,1	5 834	42	52	6	35,7	11,1	10,1
Словакия	5,4	11 665	35	61	4	46,4	11,2	9,9
США	314,3	45 283	20	79	1	25,6	3,8	18,6
Турция	74,9	8 381	27	64	9	45,8	10,8	8,7
Украина	45,6	2 094	29	62	9	196,0	33,4	38,3
Франция	65,4	34 379	19	79	2	2,9	1,2	0,9
Чехия	10,5	14 238	37	61	2	10,0	5,7	27,7
Эстония	1,3	11 806	29	67	4	16,6	4,8	1,6

В табл. 2 приведены регрессионные зависимости долевого участия в ВВП основных секторов экономики и их электроемкостей от ВВП на душу населения, полученные на основе применения к данным табл. 1 стандартных функций

тренда программной среды Microsoft Excel, обеспечивающих наиболее высокие значения коэффициентов корреляции.

Таблица 2

Регрессионные зависимости и коэффициенты корреляции

Сектор экономики	$s_j = f(b)$	Коэффициент корреляции	$\varepsilon_j = f(b)$	Коэффициент корреляции
Промышленность	$140,37 \cdot b^{-0,17}$	0,55	$4064,83 \cdot b^{-0,53}$	0,61
Сфера услуг	$15,91 \cdot b^{0,15}$	0,68	$1586,82 \cdot b^{-0,8}$	0,84
Сельское хозяйство	$4572,83 \cdot b^{-0,77}$	0,91	$5692,81 \cdot b^{-0,69}$	0,39

В соответствии с принятой в статистическом анализе [4] градацией величины коэффициентов корреляции указывают на наличие очень слабой корреляционной связи при значениях до 0,2, слабой – до 0,5, средней – до 0,7, высокой – до 0,9 и очень высокой – более 0,9.

Анализ приведенных в табл. 2 значений коэффициентов корреляции показывает, что только регрессионная зависимость изменения доли сельского хозяйства от величины ВВП на душу населения характеризуется очень высоким уровнем корреляции с исходными данными. Таким образом, практическое применение четырех из полученных шести регрессионных зависимостей является, как указывалось выше, необоснованным.

Решение задачи на основе методов теории нечетких множеств и нечеткой логики. Задача прогнозирования перспективного спроса на электроэнергию характеризуется наличием факторов неопределенности нестохастической природы. Одним из путей решения такой задачи является применение методов теории нечетких множеств и нечеткой логики [9, 10]. Рассмотрим алгоритм реализации этих методов на примере прогнозирования долгосрочного спроса на электроэнергию в экономике Армении.

Анализ исходных данных позволяет сделать следующие предположения:

- по мере роста ВВП на душу населения доля ВП сельского хозяйства в ВВП уменьшается;
- по мере роста ВВП на душу населения и уменьшения доли ВП сельского хозяйства увеличивается доля ВП сферы услуг в ВВП.

Поскольку общий тренд $s_{cx} = f(b)$ характеризуется очень высоким уровнем корреляции с исходными данными, то в соответствии с первым предположением уменьшение доли ВП сельского хозяйства будет происходить с постепенным приближением к этому тренду. С учетом этого предположения и данных табл. 1 для прогнозирования динамики изменения доли сельского

хозяйства в Армении предлагается воспользоваться стандартной степенной функцией тренда

$$s_{CX} = 59500 \cdot b^{-1,025}. \quad (2)$$

Второе предположение имеет описательный характер и в терминах теории нечетких множеств представляет собой лингвистическую неопределенность. Для решения поставленной задачи предлагается воспользоваться известным в теории нечетких множеств методом Мамдани. Алгоритм метода Мамдани заключается в последовательной реализации описанных ниже операций.

1. Фаззификация входных параметров представляет собой процесс формирования функции принадлежности нечетких множеств, в ходе которого лингвистические переменные задаются термами-множествами $T\{T_i\}$, элементы которых (термы) представляются как нечеткие множества T_i на универсальном множестве U . Для каждого терма задается функция принадлежности $\mu_{T_i}(u)$, характеризующая степень принадлежности элемента u нечеткому множеству $T_i = \{[u; \mu_{T_i}(u)] \mid u \in U\}$. Для рассматриваемой задачи зададим:

а) универсальные множества $B = [2000; 45500]$, $S_{CX} = [0; 22]$, $S_V = [30; 80]$, которые путем нормирования по нижней и верхней границам соответствующего множества могут быть приведены к более удобному для последующих расчетов виду $B^* = S_{CX}^* = S_V^* = [0; 100]$;

б) терм-множество $T\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\} = \{Н, НС, С, ВС, В\} = \{\text{низкий, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий}\}$ со следующими функциями принадлежности его элементов:

$$\mu_{T_i}(u_j) = \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{u_j - (i-1) \cdot 25}{10,617} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где i - индекс соответствующего элемента терма-множества; u_j - элемент матрицы $u = [b^*, s_{CX}^*, s_V^*]$, причем $b^* \in B^*$, $s_{CX}^* \in S_{CX}^*$ и $s_V^* \in S_V^*$.

2. Формирование базы правил нечеткого вывода представляет собой формализацию имеющихся знаний о рассматриваемой проблеме. На основе анализа представленных в табл. 1 данных может быть сформирована база правил в виде импликаций типа “если выполняются условия b_i^* и $s_{CX\ i}^*$, то следствием будет $s_{V\ i}^*$ ”. База правил для рассматриваемой задачи приведена в табл. 3.

3. Агрегирование является этапом определения степени истинности каждого из подзаключений по каждому из правил нечеткого вывода. Определяются степени принадлежности каждого из заданных значений входных переменных соответствующему элементу терма-множества. Для этого заданные, например,

значения $b = 15000\$/\text{чел.}$ и $s_{CX} = 10\%$ преобразуем к виду $b^* = 29,89$ и $s_{CX}^* = 45,45$. Путем подстановки этих значений в выражение (3) определяем значения степеней их принадлежности термам, которые приведены в табл. 4.

Таблица 3

База правил системы нечеткого вывода о доле сферы услуг в ВВП

Если ВВП на душу населения, b^*	Если доля сельского хозяйства в ВВП, s_{CX}^*				
	Н	НС	С	ВС	В
	то доля сферы услуг в ВВП, s_Y^*				
Н		Н	ВС	С	Н
НС	С	С	С	НС	НС
С	ВС	ВС	ВС	НС	
ВС	В	ВС	ВС		
В	В	В			

Таблица 4

Степень принадлежности заданных значений входных переменных термам

Наименование	Н	НС	С	ВС	В
$b^* = 29,89$	0	0,899	0,166	0	0
$s_{CX}^* = 45,45$	0	0,157	0,912	0	0

Далее определяем степени истинности правил нечеткого вывода. Поскольку левые части всех приведенных в табл. 3 правил содержат конъюнкции, то для установления степени истинности их посылок используется процедура логического умножения типа $\mu_{T_i}(b^*) \wedge \mu_{T_j}(s_{CX}^*) = \min[\mu_{T_i}(b^*); \mu_{T_j}(s_{CX}^*)]$.

Для приведенных в табл. 4 значений получим

а) $\min[\mu_{T_2}(b^*); \mu_{T_2}(s_{CX}^*)] = \min[0,899; 0,157] = 0,157;$

б) $\min[\mu_{T_3}(b^*); \mu_{T_2}(s_{CX}^*)] = \min(0,166; 0,157) = 0,157;$

в) $\min[\mu_{T_2}(b^*); \mu_{T_3}(s_{CX}^*)] = \min(0,899; 0,912) = 0,899;$

г) $\min[\mu_{T_3}(b^*); \mu_{T_3}(s_{CX}^*)] = \min(0,166; 0,914) = 0,166;$

д) во всех остальных случаях: 0.

4. Активизация подусловий в нечетких правилах продукции заключается в определении степени истинности вывода, которая задается функцией принадлежности соответствующего термина. Применяв к базе правил метод нечеткой импликации Мамдани, определенный как минимум левой и правой частей базы правил нечеткого вывода, получим новую нечеткую переменную, соответствующую степеням принадлежности термам значений выходных данных при применении соответствующего правила к заданным входным.

Наконец, полученные в результате применения всех правил функции принадлежности необходимо объединить. Эта процедура называется аккумуляцией и заключается в построении максимума полученных функций принадлежности.

Результаты применения метода нечеткой импликации Мамдани и аккумуляции для рассматриваемого примера приведены на рис. 1 и 2.

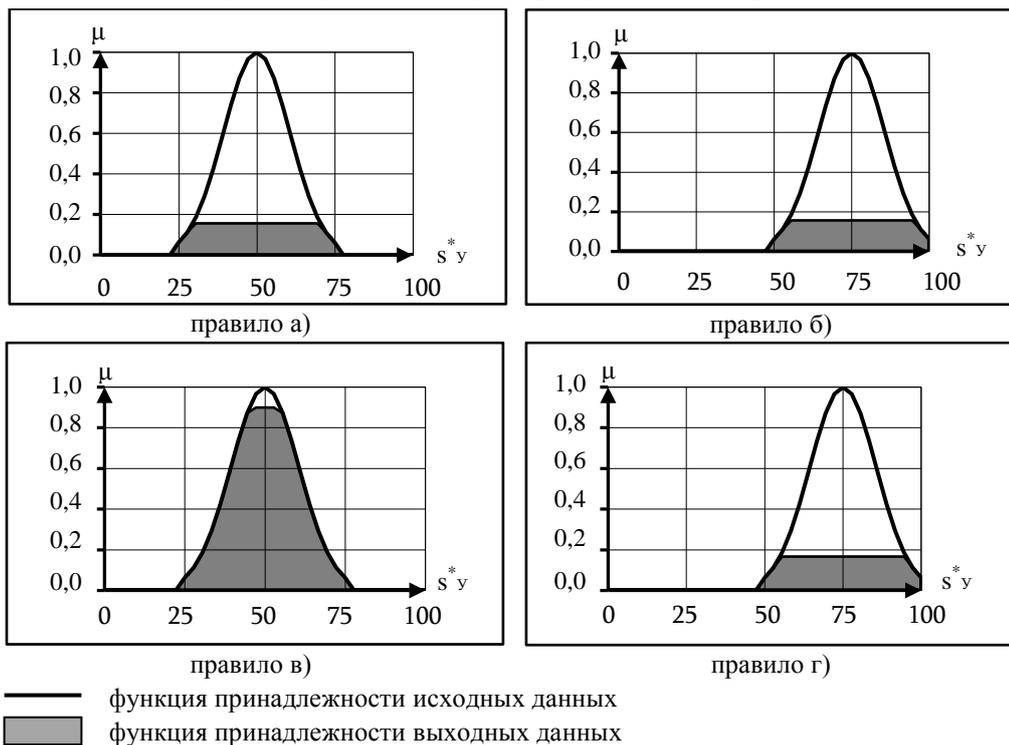


Рис. 1. Функции принадлежности выходных данных

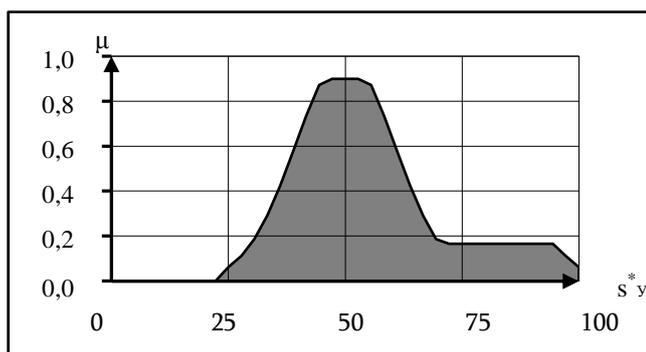


Рис. 2. Функция принадлежности нечеткого вывода

5. Дефаззификация представляет собой процедуру преобразования полученного нечеткого вывода в обычное количественное значение. В методе Мамдани дефаззификация осуществляется путем отыскания абсциссы центра тяжести однородной плоской фигуры, очерченной осью абсцисс и функцией принадлежности нечеткого вывода. В рассматриваемом примере абсцисса центра тяжести $s_v^* = 55,4$, что соответствует $s_v = 57,7\%$.

Таким образом, решение задачи долгосрочного прогнозирования изменения структуры ВВП предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

Шаг 1. В соответствии с прогнозируемым значением b на основе выражения (1) определяется долевое участие в ВВП сельского хозяйства $s_{сх}$.

Шаг 2. На основе метода Мамдани определяется долевое участие в ВВП сферы услуг s_v .

Шаг 3. Остальная часть ВВП будет покрываться за счет промышленности $s_{п}$.

В табл. 5 приведены результаты долгосрочного прогноза динамики изменения структуры ВВП в Армении для определенного сценария развития ВВП на душу населения.

Таблица 5
Долгосрочный прогноз динамики изменения структуры ВВП

Год	2015	2020	2025	2030
b , \$/чел.	2739	3733	4121	4331
$s_{сх}$, %	18	13	12	11
s_v , %	52	60	62	63
$s_{п}$, %	30	27	26	26

Аналогично вышеизложенному может быть осуществлено прогнозирование изменения электроемкости ВП основных отраслей экономики.

В качестве лингвистической переменной принимается предположение о том, что величина электроемкости ВП отрасли экономики зависит от величины ВВП на душу населения и доли ВП этой отрасли в ВВП. Термы-множества и функции принадлежности их элементов задаются аналогично выражению (3). На основе анализа приведенных в табл. 1 статистических данных формируются базы правил нечеткого вывода, которые для рассматриваемой задачи приведены в табл. 6-8.

Таблица 6

База правил системы нечеткого вывода об электроемкости ВП промышленности

Если ВВП на душу населения, b^*	Если доля ВП промышленности в ВВП, s_{II}^*				
	Н	НС	С	ВС	В
	то электроемкость ВП промышленности, \mathfrak{E}_{II}^*				
Н	В	В	В	ВС	НС
НС	ВС	ВС	В	С	
С	ВС	С	С	НС	
ВС	С	НС	Н		
В	НС	НС			

Таблица 7

База правил системы нечеткого вывода об электроемкости ВП сферы услуг

Если ВВП на душу населения, b^*	Если доля ВП сферы услуг в ВВП, s_y^*				
	Н	НС	С	ВС	В
	то электроемкость ВП сферы услуг, \mathfrak{E}_y^*				
Н	В	ВС	С	С	НС
НС	ВС	С	С	НС	Н
С		С	НС	Н	Н
ВС				Н	Н
В					Н

Таблица 8

База правил системы нечеткого вывода об электроемкости ВП сельского хозяйства

Если ВВП на душу населения, b^*	Если доля ВП сельского хозяйства в ВВП, $s_{C/X}^*$				
	Н	НС	С	ВС	В
	то электроемкость ВП сельского хозяйства, $\mathfrak{E}_{C/X}^*$				
Н	С	Н	В	С	Н
НС	С	С	С	НС	
С	НС	ВС	НС		
ВС	НС	ВС			
В	Н				

В результате реализации метода Мамдани получим представленные на рис. 3 прогнозируемые значения электроемкостей ВП по отраслям экономики.

Подставив полученные прогнозируемые значения объемов ВВП, изменения структуры ВВП и электроемкостей ВП по секторам экономики в выражение (1), может быть рассчитана величина прогнозируемого спроса на электроэнергию в отраслях экономики. Результаты расчета приведены на рис. 4.

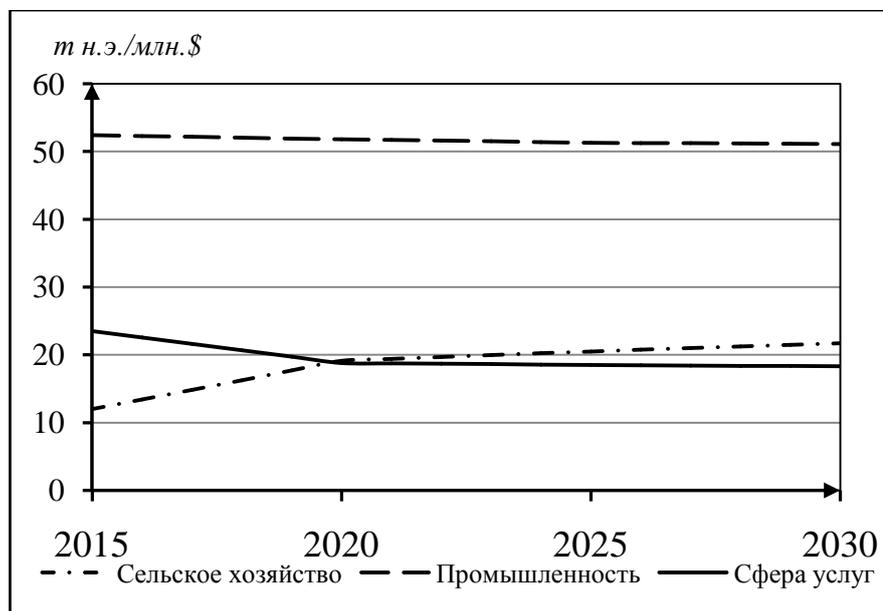


Рис. 3. Прогнозируемые значения электроемкостей ВП по отраслям экономики

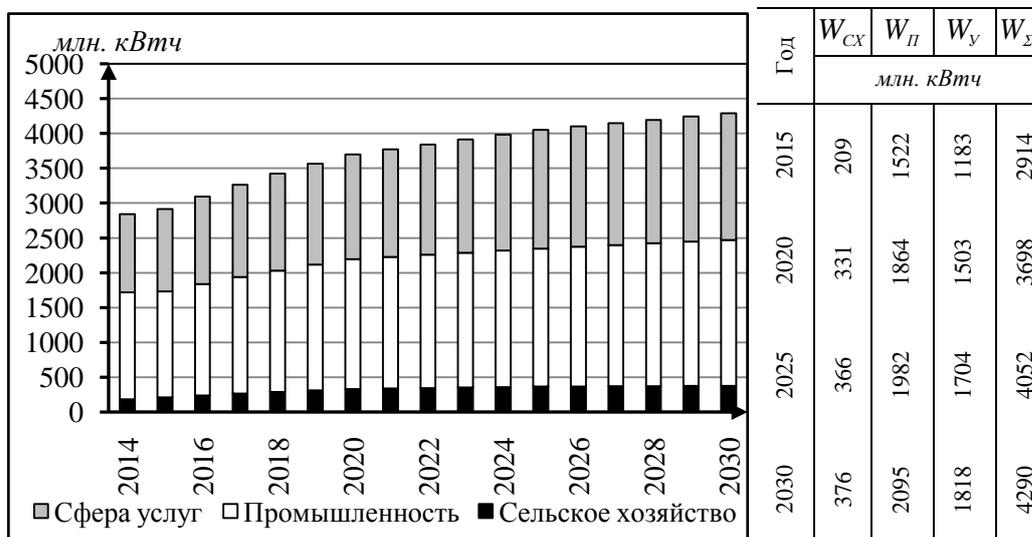


Рис. 4. Прогнозируемый спрос на электроэнергию в экономике Армении

Выводы

1. Предложена методика оценки долгосрочного спроса на электроэнергию по секторам экономики, основанная на методах факторной декомпозиции, статистического анализа и теории нечетких множеств.
2. На основе предложенной методики осуществлено прогнозирование долгосрочного спроса на электроэнергию в экономике Армении.
3. Выявлено, что наибольшее негативное влияние на рост величины долгосрочного спроса на электроэнергию будет оказывать сектор промышленности. Для смягчения этого влияния особое внимание следует уделить реализации в промышленности энергосберегающих мероприятий и ее реконструкции на базе современных энергоэффективных технологий.

Литература

1. **Забелин П.В., Моисеева Н.К.** Основы стратегического управления: Учебное пособие. - М.: Информационно-внедренческий центр "Маркетинг", 1998. - 195 с.
2. **Kathryn M. Bartol, David C. Martin.** Management. - New York: International Edition, 1994. - 684 p.
3. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики: Учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1984. - 439 с.
4. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. - 543 с.
5. **Гнуни Т.С., Саркисян В.О., Колян Г.Л.** Анализ результатов применения метода факторной декомпозиции к задачам прогнозирования долгосрочного спроса на энергию в Армении // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2008. - N 4. - С. 11-19.
6. **Energy Indicators for Sustainable Development.** International Atomic Energy Agency United Nations Department for Economic and Social Affairs, International Energy Agency, Eurostat, European Environment Agency. –Austria: IAEA STI/PUB/1222, April 2005. -161p.
7. **World Bank Group.** 2014. - Режим доступа: <http://data.worldbank.org/country>, свободный. - Загл. с экрана.
8. **International Energy Agency.** 2014. - Режим доступа: <http://www.iea.org/>, свободный. - Загл. с экрана.
9. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 165 с.
10. **Kosko B.** Fuzzy systems as universal approximations // IEEE Transactions on Computers. - November 1994. - Vol. 43, No. 11. - P. 1329-1333.

*Поступила в редакцию 29.09.2014.
Принята к опубликованию 21.11.2014.*

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՏՆՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԵՐԿԱՐԱԺԱՄԿԵՏ
ՊԱՀԱՆՋԱՐԿԻ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ՝ ՈՉ ՀՍՏԱԿ ԲԱԶՄՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐՈՎ**

S.U. Գնունի

Էլեկտրաէներգիայի երկարաժամկետ պահանջարկի կանխատեսման խնդիրը բնութագրվում է ոչ ստոխաստիկ բնույթի անորոշության գործոնների առկայությամբ: Տվյալ խնդրի լուծման համար առաջարկվում է մեթոդիկա՝ հիմնված ոչ հստակ բազմությունների և ոչ հստակ տրամաբանության տեսությունների մեթոդների կիրառման վրա: Մի շարք երկրների տնտեսության ճյուղերի մակրոտնտեսական զարգացման և էլեկտրատարության ցուցանիշների վերլուծության արդյունքում բացահատվել են դրանց փոփոխման որոշակի համընդհանուր միտումներ: Այդ միտումների առկայությունը թույլ է տալիս տնտեսության ճյուղերում էլեկտրաէներգիայի երկարաժամկետ պահանջարկի որոշման համար կիրառել Մամդանի մեթոդը, որի էությունը լեզվաբանական անորոշության ֆորմալացումը, եզրակացության ոչ հստակ ձևակերպումը և հասարակ թվային արժեքով դրա արտահայտումն է: Բերված է Հայաստանի տնտեսության էլեկտրաէներգիայի երկարաժամկետ պահանջարկի կանխատեսման թվային օրինակ՝ հիմնված առաջարկված մեթոդիկայի վրա:

Առանցքային բաներ. երկարաժամկետ պահանջարկ, պատկանելության ֆունկցիա, կանխատեսում, տերմ-բազմություն, ֆազաֆիկացում, ագրեգացում, կանոնների բազա:

**EVALUATION OF THE LONG-TERM ELECTRICITY DEMAND IN THE
ECONOMY OF ARMENIA BASED ON THE FUZZY SET THEORY METHODS**

T.S. Gnuni

The problem of forecasting long-term electricity demand is characterized by the presence of uncertain factors of non-stochastic nature. To solve this problem, the methodology based on the methods of fuzzy set and fuzzy logic theory is proposed. Based on the analysis of macroeconomic development and the energy intensity indicators of the economy branches in several countries, some common trends of their changes have been identified. The presence of these trends allows to apply the Mamdani method for determining the long-term demand for electricity in the economy branches whose essence lies in the formalization of linguistic uncertainty, fuzzy inference formation and its transformation into a common quantitative value. Based on the proposed method, a numerical example of long-term electricity demand forecast in the Armenian economy is presented.

Keywords: long-term demand, membership function, forecasting, term set, fuzzification, aggregation, base of rules.