

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ  
ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДОВ НЕЧЕТКОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

**Зорина Татьяна Геннадьевна**

Д.э.н., доцент, зав. сектором «Экономика энергетики»,  
Институт энергетики НАН Беларуси,  
220072, г. Минск, ул. Академическая 15/2, e-mail: tanyazorina@tut.by

**Кашникова Инна Васильевна**

К.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры менеджмента,  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: innabseu@mail.ru

**Богдан Игорь Тадеушевич**

Зав. сектором «Развитие энергетики»,  
Научно-исследовательский экономический институт Министерства экономики,  
220086, г. Минск, ул. Славинского 1/1, e-mail: trud33@tut.by

**Аннотация.** В статье дается характеристика энергетической системы Республики Беларусь, предложена и решена задача моделирования оптимальной структуры энергопроизводства с нечеткими параметрами. В качестве нечетких параметров были использованы спрос на электро- и теплоэнергию. В результате использования предложенной модели была получена оптимальная структура энергопроизводства Республики Беларусь, в которой объемы производства каждой станции принимают нечеткое значение.

**Ключевые слова:** Белорусская энергетическая система, прогнозирование оптимальной структуры энергопроизводства, математическое программирование с нечеткими параметрами.

**Цитирование:** Зорина Т.Г., Кашникова И.В., Богдан И.Т. Развитие методов прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства Республики Беларусь с использованием методов нечеткого математического программирования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 111–120. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-10

**Введение.** Энергетическая система относится к классу сложных систем. Она объединяет огромное число элементов, отличается многообразием внутренних связей и связей с другими системами (природная среда, экономика страны и т.д.). В связи с этим при разработке стратегии развития энергетической системы Республики Беларусь целесообразно использовать экономико-математические модели.

В основе настоящего исследования сложных систем с использованием математического моделирования лежит системный подход, конечной целью которого является системное проектирование, направленное на построение системы с заданным качеством. В свою очередь системное проектирование базируется на результатах системного анализа, позволяющего выявить причинно-следственные связи между параметрами и характеристиками исследуемой системы, реализуемого с использованием математических

моделей, которые позволяют прогнозировать эффект, достигаемый при изменении структурно-функциональных параметров системы и параметров нагрузки [8].

**1. Характеристика Белорусской энергетической системы.** В настоящее время в Республике Беларусь деятельностью электроэнергетического комплекса (электростанции, котельные, электрические и тепловые сети) управляет Государственное производственное объединение «Белэнерго». Это ведущая организация в области производства и распределения электрической и тепловой энергии. Данные по общей установленной мощности Белорусской энергетической системы (БЭС) представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Установленная мощность БЭС на 01.01.2019 г. [2]

Категория энергообъекта	Количество	Установленная электрическая мощность, МВт	Удельный вес, %
Энергоисточники ГПО «Белэнерго» всего, в т.ч.:	68	8938,34	88,77
1 Тепловые электростанции всего, в т.ч.:	42	8841,08	87,81
1.1 Тепловые электростанции высокого давления	12	8187,57	81,32
1.2 Малые тепловые электростанции	30	653,51	6,49
2 Гидроэлектростанции (ГЭС)	25	88,26	0,88
3 Ветроэлектростанции (ВЭС)	1	9,00	0,09
Энергоисточники не входящие в состав ГПО «Белэнерго» всего, в т.ч.:	-	1130,34	11,23
1 Ветроэлектростанции (ВЭС)	-	92,10	0,91
2 Энергоисточники, работающие на ВИЭ	-	201,10	2,00
3 Блок-станции	-	837,14	8,31
<b>ИТОГО по всем энергоисточникам</b>	-	<b>10068,68</b>	<b>100,00</b>

Установленная мощность генерирующих энергоисточников БЭС составляет 10068,68 МВт., удельный вес энергоисточников ГПО «Белэнерго» – 88,77%. В технологическом разрезе электроэнергетика представлена генерирующими станциями, а также электро- и теплосетями, передающими от них электро- и теплоэнергию к потребителям. ГПО «Белэнерго» – монополист на внутреннем рынке электроэнергии. Тепло- и электросети являются филиалами областных подразделений компании. Тарифы на тепло и электроэнергию регулируются государством. БЭС представлена линиями электропередачи 220-330 кВ, подстанциями 220-330 кВ и распределительными устройствами электростанций высокого давления.

Тенденции, характерные для электроэнергетики Республики Беларусь:

- доминирование объектов тепловой энергетики (87,81% в БЭС);
- низкий уровень энергоисточников, работающих на ВИЭ (3,88% в БЭС);
- невысокая степень развития объектов распределенной генерации;
- низкий уровень автоматизации учета потребления электрической энергии;
- введение в эксплуатацию в 2020 г. Белорусской атомной электростанции [4, 7].

**2. Построение модели прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства.** В основе структуры БЭС находятся энергообъекты разных видов. По первичному энергоресурсу, потребляемому для производства электрической и тепловой энергии, они подразделяются на:

- теплоэлектростанции (ТЭЦ) – производят тепловую и электрическую энергию, работают на газе и мазуте (в соотношении 95:5) или только на газе;
- конденсационные электростанции (КЭС) - производят электрическую энергию и работают, в зависимости от типа станции, на газе или на газе и мазуте (в соотношении 95:5);
- блок-станции - производят тепловую и электрическую энергию, работают на газе;
- атомная электростанция (АЭС) – производит электрическую энергию на основе ядерного топлива;
- гидроэлектростанции (ГЭС) – производят электрическую энергию, в качестве источника энергии используют энергию водного потока;
- ветровые электростанции (ВЭС) – производят электроэнергию за счет энергии ветра;
- солнечные электростанции (СЭС) – производят электроэнергию за счет энергии солнца;
- котельные – производят тепловую энергию и работают или на газе и мазуте (КОТ 1), или на торфе и дровах (КОТ 2).

Все перечисленные типы энергообъектов обладают разными экономическими и техническими характеристиками. Основные показатели, которые включены в модель: годовые эксплуатационные затраты, установленная мощность, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), расход топлива.

Цель моделирования энергосистемы – спрогнозировать нагрузку каждого типа энергообъектов таким образом, чтобы минимизировать совокупные эксплуатационные затраты.

Введем следующие переменные:

$Z_{nmlt}$  - количество сырья  $m$ , потребленного станцией  $n$  для производства энергии вида  $l$  в период  $t$ ;

$U_{nmlt}$  - производство энергии вида  $l$  станцией  $n$  на сырье вида  $m$  в период  $t$ ;

$R_{mt}$  - добыча ресурса вида  $m$  в период  $t$ ;

$I_{mt}$  - импорт ресурса вида  $m$  в период  $t$ ;

$I_{et}$  - импорт энергии в период  $t$ ;

$vom_{nm}$  - переменные затраты станции  $n$  при работе на ресурсе  $m$ ;

$c_{lt}$  - стоимость ресурса  $l$  в период  $t$ ;

$ci_{lt}$  - стоимость импортируемого ресурса  $l$  в период  $t$ ;

$k_{nmlt}$  - КИУМ  $n$  –станции, работающей на  $m$ –виде ресурсов, производящей  $l$  вид энергии в период  $t$ ;

$pow_n$  - мощность  $n$ - ой станции в период  $t$ ;

$U_{lt}$  - величина спроса на энергию  $l$  в период  $t$  (задается нечетким числом);

$\bar{R}_{lt}$  - ограничения по добыче ресурса  $l$  в период  $t$ .

Критерием оптимальности модели являются суммарные эксплуатационные затраты. Они включают в себя капитальные, постоянные и переменные затраты. Итак, целевая функция включает переменные затраты, затраты на ресурсы и затраты на импорт электроэнергии. Первое слагаемое целевой функции описывает затраты на закупку ресурсов, второе – переменные затраты на обслуживание станций, третье – затраты на импорт электроэнергии. Суммирование по  $t$  задает динамику по годам:

$$f = \sum_l \sum_t R_{mt} c_{mt} + I_{mt} ci_{mt} + \sum_n \left( \sum_m \sum_t \left( \sum_l U_{nmlt} \right) vom_{mt} \right) + \sum_t \sum_l I_{et} ci_{et} \rightarrow \min \quad (1)$$

Ограничения можно разделить на несколько групп:

1. Балансовые соотношения по распределению ресурсов показывают объемы потребленного ресурса с учетом ограничений по их добыче. Такие соотношения в модели описывают балансы по мазуту, торфу, дровам, ядерному топливу. По условию, ограничений на закупку газа не установлено. Кроме того, учитывается, что каждый ресурс поступает из одного источника – либо собственная добыча, либо импорт.

$$\sum_{n,l} z_{nmlt} \leq R_{mt} + I_{mt} \quad (2)$$

2. Ограничения по мощности станций. Это ограничение показывает максимальные объемы производимой энергии каждой из станций.

$$\sum_{m,l} U_{nmlt} \leq pov_{nt} \quad (3)$$

Здесь необходимо учесть взаимосвязь между параметрами:

$$U_{nmlt} = k_{nmlt} z_{nmlt} \quad (4)$$

Это уравнение показывает взаимосвязь между потребленным количеством ресурса и произведенной энергией.

3. Условие по нормам потребления ресурсов:

$$z_{mt} \leq 0,05(z_{mt} + z_{gt}) \quad t = 2000, 2025 \quad (5)$$

4. Ограничения по потреблению сырья:

$$R_{mt} \leq \bar{R}_{mt} \quad (6)$$

5. Ограничение по спросу на энергию.

$$\sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} \geq U_{lt} \quad (7)$$

Левая часть ограничения описывает количество произведенной и закупленной энергии, правая – прогнозируемый спрос на энергию (электрическую либо тепловую). Коэффициент  $E_{lt}=0,97$ . Он учитывает технологические потери при передаче энергии [5].

**3. Разработка прогноза оптимальной структуры энергопроизводства на среднесрочный период.** С целью апробации предложенной модели нами был рассчитан прогноз оптимальной структуры энергопроизводства в Республике Беларусь на период 2019-2025 гг. При этом энергообъекты БЭС для прогнозирования были представлены в укрупненном виде. Исходные данные для прогнозирования, характеризующие основные параметры энергообъектов, представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Исходные данные для прогноза: основные параметры энергообъектов БЭС<sup>1</sup>

Показатели	Мощность станции, МВт	КПД		Переменные затраты, долл. США/кВт*год	Постоянные затраты, долл. США/кВт/год	Капитальные затраты, долл. США/кВт
		электрическое	тепловое			
ТЭЦ	4130	0,2	0,6	31,2	33,6	813,8
КЭС	4700	0,56		4,9	17,8	8000
Блок-станции	807	0,4	0,54	10,5	24	1200
АЭС	1200	0,34		3	52	3500
ГЭС	88,2	1		3,5	9,4	3500
ВЭС	9	0,17		10,5	29,3	1800
СЭС	152,6	0,27		0	11,68	1860
КОТ 1 (газ/мазут)	300		0,88/0,86	16	7,5	200
КОТ 2	50		0,6	22	10	300

Кроме того, были заданы прогнозы производства и закупок ресурсов и прогнозы цен на ресурсы. Отметим, что газ, мазут и ядерное топливо являются импортируемыми ресурсами, а торф, дрова – собственными. Потребление мазута ограничено планом закупок, потребление ядерного топлива ограничено мощностью АЭС, потребление торфа и дров ограничено возможностями его производства. Объемы закупок газа не ограничены (табл. 3).

**Таблица 3.** Исходные данные для прогноза: цены на ресурсы и ограничения по их потреблению

Год	Газ	Мазут		Ядерное топливо		Торф		Дрова	
	цена, долл. США/кВт*год	цена, долл. США/кВт*год	потребление МВт*год						
2019	168,97	200,09	700	98,2		127,02	1097	120,34	2082
2020	174,73	198,75	700	103,11	1000	130,78	1097	123,88	2082
2021	180,70	197,42	700	108,27	2000	134,00	1097	127,50	2082
2022	186,88	196,12	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082
2023	193,26	195,04	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082
2024	199,88	193,76	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082
2025	206,71	192,5	700	113,00	2000	134,00	1097	130,48	2082

В качестве исходных данных использовались результаты прогнозирования потребления электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь в 2019-2025 гг. (табл. 4).

<sup>1</sup> Здесь и далее в таблицах 3-4 показатели представлены в единицах измерения, используемых в расчетной модели

**Таблица 4.** Исходные данные для прогноза: потребление электрической и тепловой энергии

Год	Потребление			
	Электрической энергии		Тепловой энергии	
	МВт*год	млрд. кВт*ч	МВт*год	тыс Гкал
2019	4783,11	41900,04	8879,29	66880,98
2020	4832,19	42329,98	8871,03	66818,76
2021	4880,52	42753,36	8869,54	66807,54
2022	4929,32	43180,84	8885,41	66927,08
2023	4978,61	43612,62	8915,43	67153,20
2024	5028,39	44048,70	8957,82	67472,49
2025	5084,68	44541,80	9003,75	67818,44

Полученные результаты моделирования можно представить в виде трех блоков.

Первый блок описывает оптимальную структуру производства электрической энергии различными типами энергообъектов (табл. 5).

**Таблица 5.** Результаты моделирования: производство электрической энергии различными типами энергообъектов

Год	Производство электрической энергии, млрд кВт*ч						
	ТЭЦ	КЭС	Блок-станции	АЭС	ГЭС	ВЭС	СЭС
2019	24110,94	9808,13	7069,32	0,00	438,00	438,00	1331,52
2020	24085,53	1182,16	7069,32	8760,00	772,63	438,00	1331,52
2021	26288,94	0,00	0,00	17520,00	0,00	0,00	707,37
2022	26288,94	0,00	0,00	17520,00	0,00	0,00	707,37
2023	26381,18	0,00	0,00	17520,00	0,00	0,00	1060,22
2024	26511,53	0,00	0,00	17520,00	48,00	0,00	1331,52
2025	26652,65	0,00	0,00	17520,00	415,14	0,00	1331,52

Анализируя результаты, представленные в таблице 5, можно сделать вывод, что наиболее целесообразным с точки зрения минимизации затрат в прогнозируемом периоде будет производство электрической энергии на ТЭЦ, АЭС и СЭС. Вместе с тем, ГЭС являются более экономически эффективными, чем ВЭС, КЭС и блок-станции. Однако, следует отметить, что с помощью КЭС целесообразно покрывать нагрузку в пиковые периоды, поэтому полностью исключить их из структуры энергопроизводства после ввода АЭС не представляется возможным.

Второй блок описывает оптимальную структуру производства тепловой энергии различными типами энергообъектов (табл. 6).

Анализируя результаты, представленные в таблице 6, можно сделать вывод, что наиболее целесообразным с точки зрения минимизации затрат в прогнозируемом периоде будет производство тепловой энергии на ТЭЦ. После ввода в эксплуатацию АЭС, снижения объемов производства на блок станциях, с учетом изменений цен на ресурсы в прогнозируемом периоде более низкими эксплуатационными затратами будут характеризоваться котельные на газе и дровах.

**Таблица 6.** Результаты моделирования: производство тепловой энергии различными типами энергообъектов

Год	Производство тепловой энергии, тыс. Гкал					
	ТЭЦ	Блок-станции	КОТ 1		КОТ 2	
			газ	мазут	торф	дрова
2019	62195,02	8206,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2020	62129,57	8206,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2021	67813,25	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2022	67813,25	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2023	68051,27	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2024	68387,35	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61
2025	68751,54	0,00	2149,10	110,57	0,00	376,61

Третий блок описывает требуемые объемы ресурсов для оптимального функционирования БЭС (табл. 7).

**Таблица 7.** Результаты моделирования: требуемые объемы ресурсов

Год	Потребление ресурсов, тыс. т. у.т.				
	газ	мазут	ядерное топливо	торф	дрова
2019	19156,33	0,00	0,00	0,00	0,00
2020	17246,08	0,00	3169,06	0,00	0,00
2021	16487,06	18,38	6338,11	0,00	89,79
2022	16517,06	18,38	6338,11	0,00	89,79
2023	16573,80	18,38	6338,11	0,00	89,79
2024	16653,93	18,38	6338,11	0,00	89,79
2025	16740,75	18,38	6338,11	0,00	89,79

На протяжении прогнозируемого периода доминирующим ресурсом для производства электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь останется природный газ.

**4. Прогноз оптимальной структуры энергопроизводства с нечеткими входными данными.** Можно отметить, что ряд параметров модели (1-7) являются недетерминированными. Прежде, всего, это объемы потребления электро- и теплоэнергии. На сегодняшний день разработаны методики, использующиеся для прогнозирования спроса на энергию, однако все они обладают рядом недостатков. В данной ситуации имеет смысл рассматривать параметры модели в виде нечетких треугольных чисел  $A = (a_{min}, a, a_{max})$ . Эти числа моделируют высказывание следующего вида: «параметр А приблизительно равен  $a$  и однозначно находится в диапазоне  $[a_{min}, a_{max}]$ ». Такой подход позволяет учесть и проанализировать более широкий объем информации [6]. Задача (1-7) в результате будет преобразована в задачу математического программирования с нечеткими параметрами [2].

В рамках предложенной модели сущность методики поиска оптимального решения задачи линейного программирования с нечеткими параметрами будет заключаться в аппроксимации нечетких ограничений задачи детерминированным эквивалентом. Детерминированные ограничения строятся на основе понятия  $\alpha$ -уровня. Подмножеством  $\alpha$  - уровня некоторого множества  $A$  называется множество  $A_\alpha = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\}$  [9].

Можно показать, что на каждом  $\alpha$  - уровне нечеткое число будет представлено в виде интервала  $[x_{\min}^{\alpha}, x_{\max}^{\alpha}]$ , а в задаче (1-7) ограничение (7) для каждого  $\alpha$  - уровня будет представлять собой совокупность ограничений:

$$\sum_n \sum_m U_{mnl} E_{lt} + I_{lt} + y_{lt} \geq [U_{lt}]_{\min}^{\alpha} \quad (8)$$

$$\sum_n \sum_m U_{mnl} E_{lt} + I_{lt} + y_{lt} \leq [U_{lt}]_{\max}^{\alpha} \quad (9)$$

Таким образом, процесс решения задачи линейной оптимизации с нечеткими коэффициентами можно представить как совокупность обычных задач линейного программирования на всевозможных множествах уровня допустимых альтернатив. Если альтернатива  $x_0$  есть решение задачи (1-6), (8), (9) на множестве уровня  $\alpha$ , то можно считать, что число  $\alpha$  есть степень принадлежности альтернативы  $x_0$  нечеткому множеству решений исходной задачи. Перебрав, таким образом, всевозможные значения  $\alpha$ , мы построим функцию принадлежности нечеткого решения [1].

**Заключение.** Процессы функционирования реальных систем практически невозможно описать детально ввиду их сложности. Основная проблема при разработке модели состоит в нахождении компромисса между простотой ее описания (что необходимо для её исследования математическими методами) и необходимостью учета многочисленных особенностей, присущих реальной системе. Попытка построить единую универсальную модель сложной системы обречена на неудачу ввиду ее необозримости и невозможности расчета. Кроме того, при моделировании необходимо учитывать влияние факторов неопределенности исходной информации.

Построение модели функционирования энергопроизводства происходит в условиях неполной информации о будущем потреблении энергоресурсов, о выполнении плана производства и планов функционирования энергообъектов. Процессы управления энергосистемой сопровождаются случайными помехами, статистические закономерности которых не всегда могут быть определены и учтены. Тем не менее, учет неопределенности позволяет более адекватно отразить свойства рассматриваемой системы, и, следовательно, принимать более обоснованные решения по управлению электроэнергетической системой [10].

Анализируя предлагаемую методику, можно заметить, что за гибкость приходится платить ценой увеличения размерности задачи. Фактически исходная задача с ограничениями по включению преобразуется в задачу с ограничениями в виде неравенств, с которыми легко обращаться; при этом такая цена не слишком высока, поскольку сохраняется возможность использования хорошо разработанных классических методов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат. 1991. 240 с.
2. ГПО «Белэнерго». Режим доступа: <http://www.energo.by/> (дата обращения: 02.04.2019).
3. Зайченко Ю.П. Исследование операций: Нечеткая оптимизация: Учеб. пособие. К.: Выща шк. 1991. 191 с.
4. Зорина Т.Г. Стратегия устойчивого развития энергетики Республики Беларусь: анализ и основные тенденции // Экономическая наука сегодня. 2017. № 5. С. 168–190.

5. Зорина Т.Г., Кашникова И.В. Разработка стратегии развития энергетической системы РБ на основе модели оптимального планирования энергопроизводства с нечеткими параметрами // Экономика и управление. 2013. № 4 (36). С. 49–53.
  6. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования. М.: Бинوم. Лаборатория знаний. 2005. 416 с.
  7. Рак В.А. Перспективы развития энергетики в Республике Беларусь. Режим доступа: [https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya\\_energetika/perspektivu\\_razvitiya\\_energetiki\\_v\\_respublike\\_bielarus/](https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya_energetika/perspektivu_razvitiya_energetiki_v_respublike_bielarus/) (дата обращения: 02.04.2019).
  8. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. К.: МАУП. 2003. 368 с.
  9. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие. М.: Интернет - Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний. 2006. 316 с.
  10. Levchenko S.A., Zoryna T.G. Simulation veracity at construction long-term energy systems modeling // Integrating science and technology for sustainable energy development as basis for secure future. Book of abstracts of International Conference of Humboldt-Kolleg Series in Minsk. Минск: ИТМО. 2010. Pp. 263.
- 

**UDK 620.92**

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR FORECASTING THE OPTIMAL STRUCTURE OF ENERGY PRODUCTION OF THE BELARUS REPUBLIC USING THE FUZZY MATHEMATICAL PROGRAMMING METHODS**

**Tatsiana G. Zoryna**

Dr., Associate professor, Head Sector "Energy Economics",  
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,  
15/2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Belarus, e-mail: tanyazorina@tut.by

**Ina V. Kashnikava**

PhD, Associate professor, Associate Professor of Management Department,  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
6, P. Brovki Str., 220013, Minsk, Belarus, e-mail: innabseu@mail.ru

**Igar T. Bohdan**

Head Sector "Energy Development",  
Research Economic Institute of the Ministry of Economics,  
1/1, Slavinskogo Str., 220086, Minsk, Belarus, e-mail: trud33@tut.by

**Abstract.** The article describes the characteristics of the energy system of the Belarus Republic, proposes and solves the problem of the optimal structure modeling of energy production with fuzzy parameters. As fuzzy parameters were used the demand for electricity and heat. As a result of the use of the proposed model, the optimal structure of the energy production of the Belarus Republic was obtained, in which the production volumes of each station take an fuzzy value.

**Keywords:** Belarusian energy system, forecasting the optimal structure of energy production, mathematical programming with fuzzy parameters.

### References

1. Aliev R.A., Tserkovnyiy A.E., Mamedova G.A. Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoy ishodnoy informatsii [Production management with fuzzy baseline information]. Moscow. Energoatomizdat = Publishing house "Energoatomizdat". 1991. 240 p. (in Russian)
2. GPO «Belenergo» [SPA "Belenergo"]. Available at: <http://www.energo.by/> (accessed 02.04.2019). (in Russian)
3. Zaychenko Yu.P. Issledovanie operatsiy: Nechetkaya optimizatsiya: Ucheb. posobie. [Operations Research: Fuzzy Optimization: A Tutorial]. Kiev. Vyischa shkola = Publishing house "High school". 1991. 191 p. (in Russian)
4. Zoryna T.G. Strategiya ustoychivogo razvitiya energetiki Respubliki Belarus: analiz i osnovnyie tendentsii [Sustainable Energy Development Strategy of the Republic of Belarus: analysis and main trends] // Ekonomicheskaya nauka segodnya = Economic science today. 2017. No 5. Pp. 168–190. (in Russian)
5. Zoryna T.G., Kashnikava I.V. Razrabotka strategii razvitiya energeticheskoy sistemy RB na osnove modeli optimal'nogo planirovaniya energoproizvodstva s nechetkimi parametrami [Elaboration of a development strategy of the energy system of the Republic of Belarus on the basis of optimal planning model of energy production with fuzzy parameters] // Ekonomika i upravlenie = Economics and Management. 2013. No 4 (36). Pp. 49–53 (in Russian)
6. Lyu B. Teoriya i praktika neopredelennoy programmirovaniya [Theory and practice of uncertain programming]. Moscow. Binom. Laboratoriya znaniy = Publishing House "Binom. Knowledge Laboratory". 2005. 416 p. (in Russian)
7. Rak V.A. Perspektivy razvitiya energetiki v Respublike Belarus [Prospects for the development of energy in the Republic of Belarus]. Available at: [https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya\\_energetika/perspektivy\\_razvitiya\\_energetiki\\_v\\_respublike\\_belarus/](https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya_energetika/perspektivy_razvitiya_energetiki_v_respublike_belarus/), accessed 02.04.2019. (in Russian)
8. Surmin Yu.P. Teoriya sistem i sistemnyiy analiz: Ucheb. posobie [System Theory and System Analysis: A Tutorial]. Kiev. Mezhhregional'naya Akademiya upravleniya personalom (MAUP) = Interregional Academy of Personnel Management (IAPM). 2003. 368 p. (in Russian)
9. Yah'yaeva G.E. Nechetkie mnozhestva i neyronnyie seti: Uchebnoe posobie [Fuzzy Sets and Neural Networks: A Tutorial]. Moscow. Internet-Universitet Informatsionnyih Tehnologiy; BINOM. Laboratoriya znaniy = Internet University of Information Technology; Publishing House "Binom. Knowledge Laboratory". 2006. 316 p. (in Russian)
10. Levchenko, S.A., T.G. Zoryna Simulation veracity at construction long-term energy systems modeling. // Integrating science and technology for sustainable energy development as basis for secure future. Book of abstracts of International Conference of Humboldt-Kolleg Series in Minsk. Minsk. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси (ITMO) = The A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. 2010. 263 p.