



ISSN 2072-8441

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<http://elibrary.miu.by/journals!/item.eiup.html>

Зорина, Т.Г. Разработка стратегии развития энергетической системы Республики Беларусь на основе модели оптимального планирования энергопроизводства с нечеткими параметрами / Т.Г. Зорина, И.В. Кашникова // Экономика и управление. – 2013. – № 4 (36). – С. 49–53.

# РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА С НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Т.Г. Зорина<sup>а</sup>, И.В. Кашникова<sup>б</sup>

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

топливно-энергетический комплекс, энергоэффективность, экономико-математические модели, оптимальное планирование энергопроизводства, нестохастическая неопределенность информации, теория нечетких множеств

### АННОТАЦИЯ

В статье дается характеристика энергетической системы Республики Беларусь, перечисляются основные направления развития топливно-энергетического комплекса республики, дается описание особенностей энергетической системы как объекта моделирования. Авторы приходят к выводу, что при полной неопределенности входных данных или когда известен лишь предполагаемый диапазон изменений, что характерно при построении моделей долгосрочного прогнозирования, целесообразно использование теории нечетких множеств. Для разработки стратегии развития энергетической системы Республики Беларусь авторами была предложена и решена задача моделирования энергопроизводства с нечеткими параметрами. В качестве нечетких параметров были использованы цены на первичные энергоресурсы и спрос на электро- и теплоэнергию. В результате использования предложенной модели была получена оптимальная структура энергопроизводства Республики Беларусь, в которой объемы производства каждой станции имеют нечеткое значение. На основе полученных результатов авторами был сделан вывод о целесообразности использования результатов оптимального планирования с нечеткими параметрами в процессе разработки стратегии развития энергетической системы Республики Беларусь.

### СТАТЬЯ ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ

6 мая 2013 г.

### ВЕБ

<http://elibrary.miu.by/journals!/item.eiup/issue.36/article.10.html>

## 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

T.G. Zorina<sup>а</sup>, I.V. Kashnikova<sup>б</sup>

### KEYWORDS

fuel-energy complex, energy efficiency, economic and mathematical models, optimal planning of energy production, non-stochastic ambiguity of information, fuzzy-set theory

### ABSTRACT

Energy system of the Republic of Belarus is characterized in the article. Main trends of the country's fuel-energy complex development are enumerated. Description of peculiarities of the energy system as a modeling object is given. The authors come to the conclusion that it is reasonable to use the fuzzy-set theory under complete uncertainty of input data or when only estimated variation range is known, which is typical of long-range projection modeling. The authors suggested and solved the modeling task of energy production with fuzzy parameters for elaboration of a development strategy of the energy system of the Republic of Belarus. Prices for primary energy resources and demand for electric and heat power were used as the fuzzy parameters. Resulting from the use of the suggested model, the optimal structure of the Republic of Belarus energy production, in which production volume of each station has a fuzzy value, was obtained. On the basis of the obtained results, the authors draw the conclusion that results of the optimal planning with fuzzy parameters are reasonable to be used in the process of elaboration of the development strategy of the energy system of the Republic of Belarus.

### RECEIVED

May 6, 2013

### WEB

<http://elibrary.miu.by/journals!/item.eiup/issue.36/article.10.html>

<sup>а</sup> Зорина Т.Г., кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры логистики и ценовой политики Белорусского государственного экономического университета, [innabseu@mail.ru](mailto:innabseu@mail.ru)

Zorina T.G., PhD in Economic sciences, Associate Professor, associate professor in the Department of Logistics and Pricing Policy at Belarusian State Economic University, [innabseu@mail.ru](mailto:innabseu@mail.ru)

<sup>б</sup> Кашникова И.В., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и экономической кибернетики Белорусского государственного экономического университета, [tanyazorina@tut.by](mailto:tanyazorina@tut.by)

Kashnikova I.V., PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor, associate professor in the Department of Applied Mathematics at Belarusian state economic university (Minsk, Belarus), [tanyazorina@tut.by](mailto:tanyazorina@tut.by)

Уровень развития экономики государства зависит от степени развития топливно-энергетического комплекса в целом и энергетической системы в частности. Вместе с тем, энергетическая система является одной из наиболее капиталоемких отраслей экономики, поэтому задача формирования стратегии ее развития особенно актуальна.

Разработка стратегии развития энергетической отрасли — сложная задача, требующая качественного и количественного анализа ситуации с различных точек зрения: экономической, социологической, инженерной и формально-математической. В задачах, связанных с распределением энергетических ресурсов, наиболее ответственный этап — предварительные исследования, определяющие постановку задачи.

### **1. Энергетическая система как объект моделирования**

Электроэнергетика — это стратегическая отрасль, состояние которой отражается на уровне развития государства в целом. В настоящее время электроэнергетика является наиболее стабильно работающим комплексом белорусской экономики. Предприятиями отрасли обеспечено эффективное, надежное и устойчивое энергоснабжение потребителей республики.

Электроэнергетика республики представляет собой постоянно развивающийся высокоавтоматизированный комплекс, объединенный общим режимом работы и единым централизованным диспетчерским управлением. Поэтому производственный потенциал белорусской энергосистемы включает около 40 электростанций с суммарной установленной мощностью 8264 МВт.

Главным приоритетом энергетической политики Республики Беларусь является повышение эффективности использования электроэнергии в целях обеспечения устойчивого развития экономики страны, повышения конкурентоспособности производительных сил и охраны окружающей среды.

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.

Процессы функционирования реальных систем практически невозможно описать детально ввиду их сложности. Основная проблема при разработке модели состоит в нахождении компромисса между просто-

той 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 энергопредприятий. 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.

### **2. Анализ существующих подходов к моделированию энергетических систем**

В зависимости от моделируемых объектов и назначения моделей, используемая в них исходная информация имеет различный характер и происхождение. Она может быть разделена на две категории: о прошлом развитии и современном состоянии объектов (статистические данные и их обработка) и о будущем развитии объектов, и включать данные об ожидаемых изменениях их внутренних параметров и внешних условий (прогнозы). Вторая категория информации является результатом самостоятельных исследований, которые также могут выполняться посредством моделирования. Таким образом, с одной стороны, моделирование с достаточно высокой степенью точности может быть проведено только в том случае, когда есть достаточная объективная информация об объектах системы. С другой стороны, точность моделирования напрямую зависит от достоверности входных прогнозных параметров.

Точность обработки статистических данных в значительной степени предопределяет и точность конечных результатов количественного анализа посредством моделирования. Поэтому необходимым условием эффективного использования математического моделирования является совершенствование качества исходных данных.

Существует несколько подходов для преодоления негативного воздействия неопределенности информации на результаты задачи управления формированием стратегии развития электроэнергетической системы.

Первый — сценарный подход, заключается в проведении серии вариантных расчетов при изменении исходных данных. В последние десятилетия для решения задач поддержки управленческих решений в энергетике стали широко использоваться методы имитационного моделирования. Сущность метода имитационного моделирования — в математическом описании динамических процессов, воспроизводящего функционирование изучаемой системы.

Каждый сценарий связывает изменение внешних условий с результирующими переменными.

К числу моделей, используемых в энергетических исследованиях и основанных на сценарном подходе, относятся MESSAGE, NEMS, TIMES, WASP, LEAP и др.

Использование сценарного подхода в моделировании энергетических систем сопряжено с рядом трудностей:

- большим количеством получаемых на выходе сценариев;
- невозможностью оценки точности прогнозных показателей;
- сложностью принятия управленческих решений на основе полученных в процессе моделирования результатов.

Второй способ — использование вероятностно-го подхода. Вероятностно-определенная информация отражает случайный характер параметров и может быть получена на основе обработки статистических выборок. При этом сама точность данных может быть оценена лишь условно, так как любое измерение до какой-то степени приблизительно. Вероятностно-определенная информация обусловлена, с одной стороны, тем, что многие параметры не могут быть заданы в принципе точно. С другой стороны, исследуя статистику случайных процессов, можно установить законы распределения случайных величин, найти значение «в среднем» и его изменение (Левченко, Зорина, 2010).

Во многих случаях достаточные статистические выборки отсутствуют. Возможны различные причины этого явления: объективная неопределенность будущих условий развития или функционирования, связанная, например, с научно-техническим прогрессом, изменением структуры энергопотребления, невозможностью перенесения статистических зависимостей (нестационарных случайных процессов), т.д. Эта информация является нечетко определенной.

Теория нечетких множеств все чаще используется в исследовании энергетических систем по ряду причин. Во-первых, она позволяет анализировать параметры, которые обладают свойством нестохастической неопределенности, и к которым неприменимы методы вероятностного анализа и математической статистики. Во-вторых, теория нечетких множеств позволяет учитывать также субъективные суждения лица, принимающего решения (Алиев и др., 1991).

### 3. Разработка модели оптимального планирования энергопроизводства с нечеткими параметрами

Для разработки стратегии развития энергетической системы Республики Беларусь была предложена и решена задача моделирования энергопроизводства с нечеткими параметрами.

Основой структуры энергетической отрасли являются электрические станции разных видов. По первичному энергоресурсу, потребляемому для производства электрической (в некоторых случаях и тепловой) энергии, электростанции подразделяются на:

- теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) — производят тепловую и электроэнергию, работают на газе и мазуте (в соотношении 95:5) или только на газе;
- конденсационные электростанции (КЭС) — производят только электроэнергию и работают, в зависимости от типа станции, на газе, на газе и мазуте (в соотношении 95:5), или на угле;

— гидравлические электростанции (ГЭС) — в качестве источника энергии используют энергию водного потока;

— ветряные электростанции (ВЭС) — производят электроэнергию за счет энергии ветра;

— котельные — производят тепловую энергию и работают или на газе и мазуте, или на торфе и дровах (Самсонов, Вяткин, 2003).

Все перечисленные типы электростанций обладают разными экономическими и техническими характеристиками. Основные показатели, которые включены в модель: капитальные затраты, годовые расходы по эксплуатации, мощность станций, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), топливные расходы станций.

Цель моделирования энергосистемы — определить режимы нагрузки каждого типа электростанций таким образом, чтобы суммарные эксплуатационные затраты были минимальными.

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  $t$ ;

$R_m$  — добыча ресурса вида  $m$  в период  $t$ ;

$I_{ml}$  — импорт ресурса вида  $m$  в период  $t$ ;

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

$fom_n$  — капитальные затраты станции  $n$ ;

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

$\tilde{c}_l$  — стоимость ресурса  $l$  в период  $t$  (задается нечетким числом);

$\tilde{c}_l^i$  — стоимость импортируемого ресурса  $l$  в период  $t$  (задается нечетким числом).

Как говорилось ранее, критерий оптимальности описывает суммарные эксплуатационные затраты. Они включают в себя: постоянные, капитальные, переменные затраты.

$$f = \sum_t \sum_l (R_m \tilde{c}_m + I_{ml} \tilde{c}_m^i) + \sum_n \left( \sum_m \sum_t \left( \left( \sum_l U_{nmlt} \right) vom_{nm} \right) + fom_n \right) + \sum_t \sum_l I_{et} \tilde{c}_l^i \rightarrow \min \quad (1)$$

Ограничения можно разделить на несколько групп:

1. Балансовые соотношения по распределению ресурсов:

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

2. Ограничение по мощности

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

Условие по нормам потребления ресурсов

$$z_{mt} \leq 0,05(z_{mt} + z_{gt}) \quad t = 2000, 2025 \quad (4)$$

условие говорит, что мазут и газ потребляются в соотношении 5:95

4. Ограничение по спросу:

$$\sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} \geq \tilde{U}_{lt} \quad (5)$$

5. Ограничения по добыче сырья:

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

6. Взаимозависимость между параметрами:

$$U_{nmlt} = k_{nmlt} z_{nmlt} \quad (7)$$

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

$hov_{mt}$  — мощность  $n$ -ой станции в период  $t$ ;

$\tilde{U}_{lt}$  — величина спроса на энергию  $l$  в период  $t$  (задается нечетким числом);

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

При решении данной задачи рассматриваются две группы параметров, обладающих нестохастической неопределенностью. Это часть коэффициентов целевой функции, включающих цены на ресурсы и правые части ограничений по спросу (5).

Данные параметры рассматриваются в виде нечетких треугольных чисел  $A = (a_{\min}, \bar{a}, a_{\max})$ . Эти числа моделируют высказывание следующего вида: «параметр  $A$  приблизительно равен  $\bar{a}$  и однозначно находится в диапазоне  $[a_{\min}, a_{\max}]$ ». Такой подход позволяет учесть и проанализировать более широкий объем информации.

Классическое математическое программирование и его разновидности представляют собой, в значительной степени, нормативную методологию эффективного выбора. Нечеткое программирование позволяет учесть естественную множественность неточно определенных целей, значений и ограничений.

Идея нечеткого математического программирования в общем виде была сформулирована Р. Беллманом и Л. Заде как задача достижения нечетко поставленной цели. Приведем постановку этой задачи. Пусть  $\mathcal{X}$  — множество допустимых решений,  $x \in \mathcal{X}$ . Нечеткой целью на множестве  $\mathcal{X}$  будет некое нечеткое подмножество  $G \subset \mathcal{X}$ . Нечеткое подмножество описывается функцией принадлежности  $\mu_G: \mathcal{X} \rightarrow [0, 1]$ , которая показывает степень принадлежности каждого элемента множества допустимых решений этому подмножеству цели.

Нечеткие ограничения тоже представляют некоторые подмножества  $C$  из того же универсального множества допустимых решений.

Пусть некоторый вектор  $x^*$  обеспечивает достижение желаемой цели  $G(x)$  со степенью  $\mu_G(x)$  и удовлетворяет имеющимся ограничениям  $C(x)$  со степенью  $\mu_C(x)$ . В этом случае есть все основания считать, что степень принадлежности вектора  $x^*$  к оптимальному решению будет равна наименьшему из этих чисел. То есть вектор  $x^*$  принадлежит подмножеству  $D$ , являющемуся пересечением двух нечетких подмножеств — подмножества нечеткого достижения цели и подмножества области допустимых решений, т.е.  $D = G \cap C$  и  $\mu_D(x) = \min[\mu_G(x), \mu_C(x)]$  (Лью, 2005).

В рамках предложенной модели сущность методики поиска оптимального решения задачи нечеткого линейного программирования заключается в том, что осуществляется аппроксимация нечетких ограничений задачи четким эквивалентом, что обеспечивает переход к модели четкого математического программирования. При аппроксимации осуществляется приближительная замена каждого из ограничений конечным множеством детерминированных ограничений, представленных в виде линейных неравенств. Детерминированные ограничения строятся на основе понятия  $\alpha$ -уровня. Подмножеством  $\alpha$ -уровня некоторого множества  $A$  называется множество  $A_\alpha = \{x \in \mathcal{X} : \mu_A(x) \geq \alpha\}$ .

Легко показать, что на каждом  $\alpha$ -уровне нечеткое число будет представлено в виде интервала  $[x_{\min}^\alpha, x_{\max}^\alpha]$ . А задача (1)–(7) для каждого  $\alpha$ -уровня будет представлять собой совокупность двух детерминированных линейных оптимизационных задач:

$$\begin{aligned} f &= \sum_t \sum_l (R_{mt} [c_{mt}]_{\min}^t + I_{mt} [ci_{mt}]_{\min}^t) + \\ &+ \sum_n \left( \sum_m \sum_t \left( \left( \sum_i U_{nmlt} \right) vom_{nm} \right) + fom_n \right) + \\ &+ \sum_t \sum_l \sum_l I_{et} [ci_{et}]_{\min}^t \rightarrow \min \\ \sum_{n,l} z_{nmlt} &\leq R_{mt} + I_{mt} \\ \sum_{m,l} U_{nmlt} &\leq hov_{mt} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} z_{mt} &\leq 0,05(z_{mt} + z_{gt}) \\ \sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} + y_{lt} &\geq [U_{lt}]_{\min}^t \\ \sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} + y_{lt} &\leq [U_{lt}]_{\max}^t \\ R_{mt} &\leq \bar{R}_{mt} \\ f &= \sum_t \sum_l (R_{mt} [c_{mt}]_{\max}^t + I_{mt} [ci_{mt}]_{\max}^t) + \\ &+ \sum_n \left( \sum_m \sum_t \left( \left( \sum_i U_{nmlt} \right) vom_{nm} \right) + fom_n \right) + \\ &+ \sum_t \sum_l \sum_l I_{et} [ci_{et}]_{\max}^t \rightarrow \min \\ \sum_{n,l} z_{nmlt} &\leq R_{mt} + I_{mt} \\ \sum_{m,l} U_{nmlt} &\leq hov_{mt} \\ z_{mt} &\leq 0,05(z_{mt} + z_{gt}) \\ \sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} + y_{lt} &\geq [U_{lt}]_{\min}^t \\ \sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} + y_{lt} &\leq [U_{lt}]_{\max}^t \\ R_{mt} &\leq \bar{R}_{mt} \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, процесс решения задачи линейной оптимизации с нечеткими коэффициентами можно представить как совокупность обычных задач линейного программирования на всевозможных множествах уровня множества допустимых альтернатив. Если альтернатива  $x_0$  есть решение задачи (8)–(9) на множестве уровня  $\alpha$ , то можно считать что чис-

ло  $\alpha$  есть степень принадлежности альтернативы  $x_0$  нечеткому множеству решений исходной задачи. Перебрав таким образом всевозможные значения  $\alpha$ , мы построим функцию принадлежности нечеткого решения.

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.

### Заключение

Используя треугольные нечеткие оценки спроса на электро- и теплоэнергию, а также цен на первичные энергоресурсы, с помощью предложенной модели можно получить оптимальную структуру энергопроизводства Республики Беларусь, в которой объемы производства каждой станции имеют нечеткое значение. Таким образом, при оперативном планировании функционирования энергосистемы Республики Беларусь можно учитывать минимальные и максимальные объемы энергопроизводства каждой станции, при которых функционирование энергосистемы в целом остается приемлемым с точки зрения минимизации затрат на ее функционирование.

В рамках ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энерге-

тика», предложенная модель оптимального планирования энергопроизводства с нечеткими параметрами была апробирована на реальных данных, в результате был построен прогноз энергопроизводства до 2025 года.

Полученные результаты позволили сделать вывод о целесообразности использования задач оптимизации с нечеткими параметрами в процессе разработки стратегии развития энергосистемы Республики Беларусь.

### Литература/References

1. Управление производством при нечеткой исходной информации. / Р.А. Алиев [и др.]; под общ. ред. Алиева А.Р. — Москва: Энергоатомиздат. 1991. — 241 с.  
Upravleniye proizvodstvom pri nechetkoy iskhodnoy informatsii / R.A. Aliyev [i dr.]; Pod obshch. red. Aliyeva A.R. — Moskva: Energoatomizdat, 1991 goda. — 241 p.
2. Levchenko, S.A. Strengthening of Energy Security on the Basis of Sustainable Energy Systems Modeling. / S.A. Levchenko, T.G. Zorina // Sciences, Engineering, and Humanities for the Energy World. Book of abstracts of International Conference of Humboldt-Kolleg Series. Odessa: OFAX. 2009. — С. 41–43.
3. Levchenko, S.A. Simulation veracity at construction long-term energy systems modeling. / S.A. Levchenko, T.G. Zorina // 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. — С. 263.
4. Лю, Б. Теория и практика неопределенного программирования. / Б. Лю. — Москва: Бинном. Лаборатория знаний, 2005. — 416 с.  
Lyu, B. Teoriya i praktika neopredelennoy programmirovaniya. / B. Lyu. — Moskva: Binom. Laboratoriya znaniy, 2005 goda. — 416 p.
5. Самсонов, В.С. Экономика предприятий энергетического комплекса / В.С. Самсонов, М.А. Вяткин; Москва: «Высшая школа». 2003. — 416 с.  
Samsonov, V.S. Ekonomika predpriyatiy energeticheskogo kompleksa / V.S. Samsonov, M.A. Vyatkin; Moskva: «Vysshaya shkola», 2003 goda. — 416 p.