

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ВАРИАНТОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ С УЧЕТОМ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РИСКОВ<sup>1</sup>

**Кононов Юрий Дмитриевич**

Д.э.н., г.н.с., e-mail: kononov@isem.irk.ru

**Тыртышный Владимир Николаевич**

К.т.н., вед. инж., e-mail: tyrtu@mail.ru

**Кононов Дмитрий Юрьевич**

К.т.н., с.н.с., e-mail: dima@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 130

**Аннотация.** Рассматривается одна из актуальных задач долгосрочного прогнозирования электроэнергетики – комплексная оценка сравнительной эффективности вариантов энергоснабжения регионов. Показано, что в условиях значительного роста неопределенности важно оценивать и учитывать инвестиционные риски. Для этого целесообразно использовать стохастические оптимизационные модели. Приводится описание такой модели. Ее расчеты демонстрируют заметное влияние на результаты прогнозов характера неопределенности исходных данных.

**Ключевые слова:** прогнозирование, неопределенность, стохастическое программирование, оптимизация, риски.

**Цитирование:** Кононов Ю.Д., Тыртышный В.Н., Кононов Д.Ю. Использование стохастического моделирования при выборе вариантов энергоснабжения регионов с учетом инвестиционных рисков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2 (10). С. 80–87. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-08

**Введение.** Задачи, решаемые при прогнозных исследованиях эффективного развития энергетики регионов и крупных энергетических компаний, характеризуются особенно большой неопределенностью будущего. В этих условиях повышается важность оценки и учета не только сравнительной экономической эффективности, но и рискованности рассматриваемых вариантов для потенциальных инвесторов. Таковую возможность дает использование стохастических моделей.

В стохастических моделях исходные данные, условия функционирования и характеристики состояния моделируемого объекта представлены случайными величинами и связаны стохастическими (т.е. случайными, нерегулируемыми) зависимостями. Основные параметры таких моделей определены не однозначно, а через законы распределения их вероятности [6].

В общем случае цель оптимизационных стохастических моделей состоит в том, чтобы найти некоторое решение, которое является допустимым для всех (или почти всех)

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта государственного задания Ш.17.5.2, рег. № АААА-А17-117030310452-7 и при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 16-06-00091)

возможных значений данных и максимизирует математическое ожидание некоторой функции решений и случайных переменных [1].

В практике прогнозирования для решения проблем неопределенности с учетом стохастичности может использоваться комбинированный подход – сочетание детерминированных оптимизационных моделей с известным методом статистических испытаний (Монте-Карло) [3]. Такой подход применялся, например, при анализе рисков развития газовой отрасли России [2] и при оценке влияния неопределенности на эффективность вариантов топливоснабжения регионов [4].

За рубежом стохастические модели стали все шире применяться при прогнозировании рынков газа (например, [9]) и при выборе лучших технологий в производстве электроэнергии (например, [8]).

В прогнозных исследованиях долгосрочного развития такой сложной и многофункциональной системы, как ТЭК, стохастические модели целесообразно использовать на заключительных этапах прогнозирования – при решении наиболее значимых для каждого временного этапа задач (табл. 1). К числу таких задач относится оценка конкурентоспособности новых технологий и принципиальных изменений в структуре производства и потребления электроэнергии и топлива.

**Таблица 1.** Область целесообразного использования стохастических моделей при прогнозировании развития ТЭК страны

Типы моделей	Горизонт прогнозирования	Решаемые задачи
<b>Детерминированные</b> <u>Основные:</u> оптимизационные ТЭК и электроэнергетики <u>Дополнительные:</u> разагрегированные модели отраслевых систем ТЭК, макроэкономики, потребностей в энергоносителях и динамики их стоимости по макрорегионам	Более 20-25 лет  До 20-25 лет	Определение границ прогнозной области (конуса неопределенности), инвариантов (устойчивых решений). Выявление возможных проблем, стратегических угроз. Уточнение целей и задач дальнейших исследований
<b>Стохастические</b> Энерго- и топливоснабжения регионов, региональных энергетических рынков, развития энергетических компаний	До 15-20 лет	Количественная оценка стратегических угроз и пороговых значений индикаторов энергетической безопасности. Ценовая эластичность спроса на топливо и электроэнергию. Перспективы развития региональных энергосистем и новых источников электроэнергии. Риск-анализ крупномасштабных проектов и программ

Взаимозависимость сравнительной эффективности новых электростанций, спроса и цен на электроэнергию делает возможным и целесообразным определение рационального ввода мощностей и стоимости производства на них электроэнергии в единой оптимизационной модели энергоснабжения региона. С ее помощью должна решаться задача приближенной оценки конкурентоспособности разных электростанций, разных способов рационального обеспечения заданной потребности в электроэнергии на рассматриваемой территории с учетом неоднозначности ожидаемых условий и инвестиционных рисков.

Такая модель и компьютерная программа под названием МИСС-ЭЛ (Модель Имитационная Стохастическая Статическая) разработана в ИСЭМ СО РАН. Ее описание и некоторые результаты экспериментальных расчетов описаны ниже.

**1. Модель МИСС-ЭЛ.** Критерий оптимальности в этой модели – минимум цены на генерацию (производство) электроэнергии на рассматриваемой территории, а ограничениями являются: потребности в электроэнергии, ее возможный экспорт или импорт, мощность существующих станций и потенциально возможный ввод электростанций разного типа, ограничения на поставку в регион газа. Все эти ограничения задаются интервально. Верхняя и нижняя граница принимаются также для цен на топливо, удельных капиталовложений и технико-экономических показателей, влияющих на себестоимость электроэнергии. Рассматриваемые в модели крупные регионы представлены несколькими подрегионами. Это позволяет учесть особенности условий их энерго- и топливоснабжения и межрегиональные энергетические связи. Искомыми переменными в модели являются: мощности новых электростанций, выработка электроэнергии на них, объемы потребления разных видов топлива, цены производителя на каждой станции, а также средневзвешенная и маргинальная (предельная) цена генерации в регионе.

Для учета неопределенности приходится получать и рассматривать множество (сотни и тысячи) оптимальных решений для разной комбинации исходных данных. Это предполагает использование в компьютерной программе модели МИСС-ЭЛ метода Монте-Карло. Программа дает возможность выбирать характер распределения случайных величин внутри задаваемого диапазона.

Вероятностные законы распределения варьируемых величин (ВВ) задаются крайними концами интервалов своих значений и параметрами бета-распределения:

$$F_x(a, b, \alpha, \beta) = (x - a)^{\alpha-1}(b - x)^{\beta-1} / B(a, b, \alpha, \beta),$$

где  $B(a, b, \alpha, \beta) = \int (x - a)^{\alpha-1}(b - x)^{\beta-1} dx$ ;  $a, b$  – границы интервалов изменений;  $\alpha, \beta > 0$  – числовые параметры, определяющие характер распределения вероятностей ВВ внутри диапазона.

Вариация параметров  $\alpha$  и  $\beta$  позволяет генерировать случайные величины, моделируя самые разные законы вероятностных распределений (рис. 1). Они могут быть равномерными, нормальными, логнормальными, показательными и т.д.

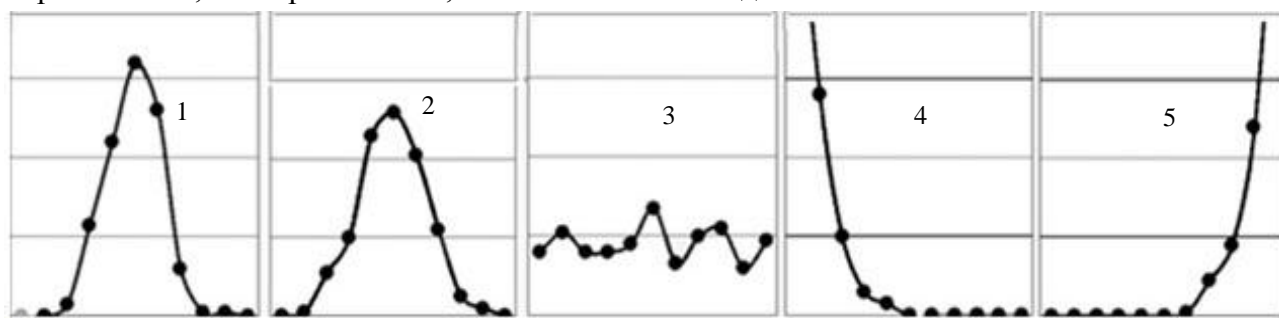


Рис. 1. Вид функции плотности бета-распределения для различных  $\alpha$  и  $\beta$

Примечание. Варианты законов распределения: 1 – нормальное ( $\alpha=10, \beta=10$ ), 2 – нормальное ( $\alpha=6, \beta=6$ ), 3 – равномерное (интервальная неопределенность) ( $\alpha=1, \beta=1$ ), 4 – смещение к нижней границе ( $\alpha=10, \beta=1$ ), 5 – смещение к верхней границе ( $\alpha=1, \beta=10$ ).

Основные уравнения модели МИСС-ЭЛ формулируются следующим образом (параметры из множества варьируемых величин взяты в фигурные скобки):

$W_{er} = \{h_{er}\} \cdot N_{er}$  – выработка электроэнергии (э/э) на новых электростанциях типа  $e$  в регионе  $r$ ;

$\underline{N}_{er} \leq N_{er} \leq \overline{N}_{er}$  – новые и реконструируемые мощности электростанций;

$\sum W_{er} + (\underline{Im}_r - \overline{Ex}_r) = \{D_r\}$  – баланс потребности в э/э в регионе  $r$  и его обеспечение;

$\underline{Im}_r \leq Im_r \leq \overline{Im}_r$  – импорт э/э в регион;

$\underline{Ex}_r \leq Ex_r \leq \overline{Ex}_r$  – экспорт э/э из региона  $r$ ;

$\sum Im_r - \sum Ex_r = Imp - Exp$  – баланс импорта/экспорта (внутреннего и внешнего);

$Fuel_r = \sum \{b_{er}\} \cdot W_{er}$  – расход газа/угля на выработку э/э в регионе;

$\underline{Fuel}_r \leq Fuel_r \leq \overline{Fuel}_r$  – ограничения на топливо для электростанций;

$R_{er} = \{c_{er}\} \cdot \{b_{er}\} + \{u_{er}\} + \sigma \cdot \{k_{er}\} / \{h_{er}\}$  – приведенная стоимость э/э;

$Cost_r = \sum (R_{er} \cdot \{h_{er}\} \cdot N_{er}) + \{pIm_r\} \cdot Im_r - \{pEx_r\} \cdot Ex_r$  – затраты на э/э в регионе.

Функционал модели:  $\sum Cost_r \rightarrow \min$ ,

где:  $\{D_r\}$  – потребность в э/э региона  $r$ , которую не могут удовлетворить действующие станции;

$\{pIm_r\}$  – транспортный тариф на импортируемую э/э в регион;

$\{pEx_r\}$  – тариф на экспортируемую э/э из региона;

$\{h_{er}\}$  – число часов использования установленной мощности;

$\{k_{er}\}$  – удельные капвложения;

$\{b_{er}\}$  – удельный расход топлива;

$\{c_{er}\}$  – цена топлива;

$\{u_{er}\}$  – прочие расходы;

$\sigma$  – коэффициент дисконтирования.

В компьютерной программе реализован двухэтапный процесс расчетов. На первом этапе проводится серия расчетов (имитационных испытаний), когда для каждой переменной исходных данных с помощью генератора случайных чисел в соответствии с их вероятностными характеристиками находятся числовые реализации, а затем вычисляются зависимые от них переменные из множества искомых показателей. После чего числовые значения всех переменных модели заносятся в базу данных. На следующем этапе проводится статистическая обработка результатов имитационных испытаний с целью выделения наиболее устойчивого варианта и определения инвестиционных рисков.

Многовариантные расчеты МИСС-ЭЛ позволяют определять не только наиболее эффективный состав и мощность вводимых электростанций по заданному критерию для каждой комбинации возможных условий, но и инвестиционные риски сооружения каждой станции и рискованность варианта в целом. Для этого компьютерная программа включает определение частоты (вероятность) попадания данной станции в оптимальные решения. Чем меньше эта вероятность, тем выше риск реализации соответствующего инвестиционного проекта.

Из множества рассчитанных вариантов сбалансированного ввода мощностей программа МИСС-ЭЛ формирует основной, включающий наименее рискованный состав электростанций и обеспечивающий минимальную стоимость генерации в рассматриваемых условиях.

**2. Результаты экспериментальных расчетов модели МИСС-ЭЛ.** Расчеты проводились для сценария ввода новых электростанций в Европейской части страны (включая Урал). При этом исходные данные принимались с ориентацией на разработки Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2035 года [5].

Основные данные (спрос на электроэнергию, цены на топливо, технико-экономические показатели электростанций) задавались не однозначно, а диапазоном их вероятных значений с разным распределением вероятностей внутри этих диапазонов. Учитывались особенности шести рассматриваемых в модели регионов (федеральных округов), в том числе и ограничения на возможное размещение и мощность некоторых электростанций. Результаты расчетов отражены в табл. 2 и 3.

Структура ввода новых мощностей электростанций в принятом сценарии заметно реагирует на задаваемое в расчетах распределение вероятности исходных данных в зависимом интервале их возможных значений. Менее значима реакция средней стоимости генерации электроэнергии. Лишь в варианте со смещением цены газа к верхней границе по сравнению с вариантом нормального распределения исходных данных, стоимость электроэнергии увеличивается с 7,2 до 7,9 цент/кВтч. При этом доля газовых электростанций снижается с 49% до 42%, доля угольных станций увеличивается с 31% до 35,5%, а доля станций на возобновляемых энергоресурсах (ВИЭ) и ГЭС растет с 6,4% до 7,7% (табл. 2).

**Таблица 2.** Влияние принимаемого закона распределения вероятности исходных данных на результаты расчетов

Показатель	Единицы измерений	Распределение вероятностей		
		Нормальное (вариант 1)	Равномерное (вариант 3)	Смещение к верхней границе (вариант 5)
Стоимость генерации				
средняя	цент/кВтч	7,2	7,3	7,5
маржинальная	цент/кВтч	7,7	7,9	7,9
Структура новых мощностей				
Газовые	%	49,0	47,5	42,2
Угольные ЭС	%	31,0	30,7	35,5
АЭС	%	13,8	14,4	14,6
ГЭС	%	3,2	3,9	4,0
ВИЭ	%	3,0	3,5	3,7
Средний риск варианта	%	6,4	13,1	4,2

Примечание. Расчеты проводились для одного из сценариев развития электроэнергетики в ЕЭС Европейской части РФ и Урала в период 2025-2030 гг. Принимаемые в вариантах значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  показаны на рис. 1.

Значительно сильнее влияние характера неопределенности на инвестиционные риски (табл. 3). Оно особенно заметно для угольных ТЭС: среднее значение рисков, равное 4% при нормальном распределении вероятности исходных данных, увеличивается почти до 23% при интервальной неопределенности. При этом рискованность для потенциальных инвесторов отдельных электростанций может достигать до 70%.

**Таблица 3.** Усредненные значения инвестиционных рисков прогнозируемого ввода различных типов электростанций, %

Тип станции	Распределение вероятностей исходных данных		
	нормальное	равномерное	смещение к верхней границе
Газовые			
КЭС	12,5	21,8	8,9
ТЭЦ	6,7	6,2	6,2
Угольные			
КЭС	0	2,5	0
ТЭЦ	3,9	22,8	2,8
АЭС	17,8	26,2	10,9
ГЭС	13,4	6,2	13,6
ВИЭ	51,0	41,0	4,2

Источник: результаты расчетов авторов на модели МИСС-ЭЛ.

Следует отметить, что результаты экспериментальных расчетов в значительной степени зависят от задаваемого при оптимизации диапазона ограничений на ввод электростанций и особенно от его верхней границы.

**Заключение.** При поэтапном подходе к долгосрочному прогнозированию ТЭК с включением в итерационную схему расчетов региональных моделей энергоснабжения, а также моделей, имитирующих поведение потенциальных инвесторов – энергетических компаний [5], целесообразно учитывать сравнительную рискованность рассматриваемых вариантов с помощью стохастических моделей.

Недостаток инвестиционных ресурсов может стать одной из основных угроз отставания прогнозируемого ввода мощностей в электроэнергетике и других отраслевых системах ТЭК от растущей потребности в них. Выявление реальности и значимости этой стратегической угрозы энергетической безопасности должно основываться на количественной оценке инвестиционных рисков как отдельных крупномасштабных проектов, так и вариантов развития энергетики страны и макрорегионов. При этом весьма полезно и эффективно совместное использование оптимизационных моделей с методом Монте-Карло. Такой комбинированный методический подход реализован в стохастической модели и компьютерной программе МИСС-ЭЛ. Он позволяет учитывать характер неопределенности используемой в прогнозах информации. Важность этого учета и работоспособность МИСС-ЭЛ показали результаты экспериментальных расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Википедия (2001). Оптимизационная стохастическая модель. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/> (дата обращения: апрель 2014 г.)
2. Елисеева О.А., Лукьянов А.С., Тарасов А.Э. Исследование перспектив и анализ рисков развития газовой отрасли России // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 119–132.
3. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1975. 472 с.
4. Кононов Ю.Д., Тыртышный В.Н. Оценка влияния неопределенности исходных данных на эффективность вариантов энерго- и топливоснабжения регионов в прогнозных исследованиях // Проблемы прогнозирования. 2013. № 1. С. 90–94.

5. Кононов Ю.Д. Поэтапный подход к повышению обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК и к оценке стратегических угроз // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 2. С. 61–70.
  6. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки. М.: Дело. 2003. 520 с.
  7. Министерство энергетики РФ. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 г. [электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.minenergo.gov.ru>.
  8. Di Lorenzo G., Pilidis P., Witton J., Probert D. Monte-Carlo simulation of investment integrity and value for power – plants with carbon – capture // Applied Energy. 2012. № 98. Pp. 467–478.
  9. Zhuang J., Gabriel S.A. A complementarity model for solving stochastic natural gas market equilibria // Energy Economics. 2008. № 30 (1). Pp. 113–147.
- 

UDK 621.11:338.27

## USING STOCHASTIC MODELLING FOR RISK ASSESSMENT AND RANKING OF REGIONAL ENERGY SUPPLY OPTIONS

**Yury D. Kononov**

Doctor of Economical Sciences, e-mail: [kononov@isem.irk.ru](mailto:kononov@isem.irk.ru)

**Vladimir N. Tyrtysnyi**

PhD, Leading Engineer, e-mail: [tyrty@mail.ru](mailto:tyrty@mail.ru)

**Dmitry Yu. Kononov**

PhD, Senior Researcher, e-mail: [dima@isem.irk.ru](mailto:dima@isem.irk.ru)

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
664033 Irkutsk, Lermontov St., 130

**Abstract.** The paper studies a comprehensive comparative performance evaluation of regional energy supply options, which ranks among relevant open problems of long-term electric power industry forecasting. We demonstrate that it is essential to assess and account for investment risks as uncertainty undergoes a significant growth. To this end we propose to employ stochastic optimization models. The description of such a model is provided. The model calculations prove conclusive of a notable effect the nature of input data uncertainty has on forecasting results.

**Keywords:** forecasting, uncertainty, stochastic programming, optimization, risks.

### References

1. Vikipediya (2001). Optimizatsionnaya stohasticheskaya model'. [Wikipedia, the Free Encyclopedia. Stochastic programming. Retrieved April, 2014]. Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic\\_programming](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic_programming). (in Russian)
2. Eliseeva O.A., Luk'yanov A.S., Tarasov A.EH. Issledovanie perspektiv i analiz riskov razvitiya gazovoj otrasli Rossii [Investigation of prospects and risk analysis of the gas industry of

- Russia] // *Izvestija RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*, 2010. No. 4. Pp. 119–132. (in Russian)
3. Ermakov S.M. *Metod Monte-Karlo i smezhnye voprosy [Monte Carlo methods and related problems]*. Moscow: Nauka = Science. 1975. 472 p. (in Russian)
  4. Kononov Yu.D., Tyrtshnyj V.N. *Ocenka vliyaniya neopredelennosti iskhodnyh dannyh na ehffektivnost' variantov ehnergo- i toplivosnabzheniya regionov v prognoznyh issledovaniyah [Assessing the effect of the input data uncertainty on the value of regional energy and fuel supply options for forecasting studies]* // *Problemy Prognozirovaniya = Studies on Russian Economic Development*. 2013. No. 1. Pp. 90–94. (in Russian)
  5. Kononov Yu.D. *Poehtapnyj podhod k povysheniyu obosnovannosti dolgosrochnyh prognozov razvitiya TEHK i k ocenke strategicheskikh ugroz [A multi-staged approach to enhance the validity of long-term forecasts of the Fuel and Energy Sector development and strategic threats assessment]* // *Izvestija RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2014. No. 2. Pp. 61–70. (in Russian)
  6. Lopatnikov L.I. *Ehkonomiko-matematicheskij slovar': Slovar' sovremennoj ehkonomicheskoy nauki. [Economic and mathematical dictionary: The Dictionary of Modern Economics]*. Moscow: Delo. 2003. 520 p. (in Russian)
  7. Ministerstvo ehnergetiki RF. *General'naya skhema razmeshcheniya ob"ektov ehlektroehnergetiki do 2035 g. [The General scheme of placing of objects of electric power industry until 2035]*. Available at: <http://www.minenergo.gov.ru>. (in Russian)
  8. Di Lorenzo G., Pilidis P., Witton J., Probert D. Monte-Carlo simulation of investment integrity and value for power – plants with carbon – capture // *Applied Energy*. 2012. № 98. Pp. 467–478.
  9. Zhuang J., Gabriel S.A. A complementarity model for solving stochastic natural gas market equilibria // *Energy Economics*. 2008. № 30. Pp. 113–143.