

## Зависимость состава и значимости индикаторов энергетической безопасности от целей прогноза и рассматриваемой перспективы

Кононов Юрий Дмитриевич, Кононов Дмитрий Юрьевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, Иркутск, *kononov@isem.irk.ru*

**Аннотация.** Рассматривается проблема распространения существующих методов индикативного анализа текущего состояния энергетической безопасности (ЭБ) на комплексную оценку вариантов развития систем энергетики. Актуальность этой проблемы обусловлена ростом неопределенности будущего, в том числе из-за начинающегося перехода к низкоуглеродной стратегии. Предложен состав индикаторов, меняющийся в зависимости от рассматриваемой перспективы и учитывающий экономический и экологический аспекты ЭБ. Описан подход к оценке значимости отдельных индикаторов при формировании комплексных обобщающих показателей состояния ЭБ. Представлены результаты оптимизационных расчетов по оценке изменения этих показателей для двух вариантов электроснабжения Европейской части страны и Урала. Эти варианты отличаются стоимостью топлива для электростанций (во втором варианте газ на 25%, а уголь на 5% дороже, чем в первом). Удорожание топлива сказывается на структуре ввода мощностей в разных регионах, увеличивая долю безуглеродных станций и уменьшая эмиссию CO<sub>2</sub>. Но при этом увеличивается стоимость генерации электроэнергии и риски для потенциальных инвесторов. Комплексный показатель ЭБ учитывает это разнонаправленное влияние. Его рост говорит о предпочтительности первого варианта с позиции ЭБ. Сделан вывод о возможности и целесообразности использования такого рода показателей в качестве дополнительного критерия эффективности при сравнении вариантов развития ТЭК и региональной системы энергоснабжения. С увеличением горизонта прогнозирования состав используемых индикаторов должен уменьшаться, а значимость экономического и экологического аспектов ЭБ будет расти.

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, индикативный анализ, прогнозирование, оптимизация

**Цитирование** Кононов Ю.Д. Зависимость состава и значимости индикаторов энергетической безопасности от целей прогноза и рассматриваемой перспективы / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2(26). – С. 97-103. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.009.

**Введение.** Комплексной оценке состояния энергетической безопасности уделяется серьезное внимание во многих странах [1]. Ее основой является индикативный анализ. Он включает определение состава, численной оценки и значимости индикаторов, а также конструирование обобщающих показателей – комплексные индексы ЭБ (КИЭБ). Как правило, такие индексы имеют иерархическую структуру: состоят из 2-3 уровней, на каждом из которых индикаторы объединяются в группы с разными весами [2]. Такой индекс можно представить следующим образом [3]:

$$\text{КИЭБ} = \sum_{i=1}^3 \left( s_i \sum_{j=1}^m \left( s_{ij} \sum_{k=1}^l s_{ijk} \cdot I_{ijk} \right) \right),$$

где  $I_{ijk}$  – значение индикатора  $i$ ;  $l$  – его номер в соответствующей группе,  $m$  – номер группы в определенном блоке,  $s_{ijk}$  – вес индикатора в группе,  $s_{ij}$  – вес группы в блоке.

При оценке текущего состояния ЭБ разных стран применяется от 12 (Мировой Энергетический Форум [4]) до 34 (Международный Энергетический Совет [5]) и более индикаторов.

В России для этой цели в [6] предлагается использовать 37 индикаторов. Из них к числу наиболее важных объектов анализа относятся 14 [7]. В их число входят: доля природного газа в структуре первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), динамика

уровня цен на ТЭР внутри страны, изменение энергоемкости ВВП, соотношение добычи и использования внутри страны разных видов топлива, доля экспорта ТЭР в общем объеме экспорта, доля в общем экспорте ТЭР продукции нефтепереработки и нефтехимии. Эти индикаторы можно использовать и при комплексной оценке ЭБ прогнозируемых вариантов развития ТЭК страны. Остальные предлагаемые в этой публикации индикаторы (объем неплатежей, забастовки, чрезвычайные ситуации на объектах ТЭК и другие) важны лишь при характеристике текущего состояния ЭБ.

Очевидно, что в условиях энергетического перехода даже для оценки текущего состояния ЭБ России потребуется расширить круг учитываемых факторов за счет таких индикаторов, как эмиссия CO<sub>2</sub> на человека, изменение площади лесов, разнообразие и стоимость источников энергоснабжения и других, используемых в международной практике индикативного анализа.

**1. Обоснование состава и значимости индикаторов.** Возможный состав индикаторов для комплексной оценки состояния ЭБ в прогнозных исследованиях ТЭК России показан в табл. 1. При его формировании учитывались: меняющиеся цели прогнозных исследований, зарубежный опыт и российские особенности – независимость от импорта энергоресурсов. Следует отметить, что предлагаемые индикаторы характеризуют, прежде всего, экономический и экологический аспекты ЭБ.

При группировке индикаторов, имеющих разные единицы измерения, возникает проблема их нормирования – приведение в сопоставимый вид. При мониторинге изменения состояния ЭБ за определенный промежуток времени эта проблема решается выражением всех индикаторов в процентах к их значению в реперном году или в базовом варианте.

Важной и сложной проблемой, возникающей при конструировании обобщенного индекса ЭБ, является определение весов отдельных индикаторов. В настоящее время эти веса, как правило, задаются экспертно. Однако, если варианты развития ТЭК определяются с помощью оптимизационных моделей, то появляется возможность оценивать значимость некоторых индикаторов по их влиянию на решение (критерий оптимальности) модели.

Такой оценке может также помочь анализ опыта зарубежных организаций, определяющих и сравнивающих состояние ЭБ разных стран. При этом надо учитывать, что численные значения того или иного индикатора зависят от структуры интегрального индекса ЭБ и количества используемых индикаторов. Эта зависимость видна из табл. 2, в которой приведены некоторые индикаторы и их веса, используемые в практике Global Energy Institute (США) – U.S. Energy Security Risk [8], International Energy Security Risk [9] и World Energy Council – World Energy Trilemma Index [5].

**Таблица 1.** Возможный состав индикаторов для комплексной оценки состояния ЭБ вариантов развития ТЭК

Угрозы	Индикаторы	Перспектива	
		5-10 лет	более 10 лет
Экономические	Энергоемкость ВВП	+	+
	Доля затрат на потребляемую энергию в ВВП	+	-
	Душевое потребление ТЭР	+	+
	Душевое потребление электроэнергии	+	+
	Затраты на энергию и топливо в расходах населения	+	-
	Цены на электроэнергию	+	+
	Динамика цен на топливо	+	+
	Волатильность мировых цен на нефть	+	-
	Доля энергетического экспорта в ВВП	+	-
	Отношение прироста запасов ТЭР к их добыче	+	-

	Доля ТЭК в ВВП	+	-
	Доля ТЭК в общих капиталовложениях	+	-
Экологические	Эмиссия CO <sub>2</sub> на душу населения	+	+
	Карбоноёмкость экономики	+	+
	Эмиссия CO <sub>2</sub> от электростанций	+	+
	Доля безуглеродной генерации	+	+
Технологические	Износ основных производственных фондов в отраслях ТЭК	+	-
	Удельный расход топлива на электростанциях	+	+
	Доля распределенной генерации	+	-
	Резервные мощности электростанций	+	-

Целесообразность использования того или иного индикатора при конструировании обобщенного индекса ЭБ отмечена знаком плюс.

**Таблица 2.** Веса некоторых индикаторов, используемых при комплексной оценке состояния ЭБ

Индикаторы	Интегральные индексы ЭБ		
	US Energy Security Risk	International Energy Security Risk	World Energy Trilemma Index
Энергоемкость экономики	3,2	7,0	5,0
Душевое энергопотребление	2,5	3,0	-
Доля затрат на потребляемую энергию в ВВП	3,6	4,0	-
Затраты на энергию в расходах населения	1,7	3,0	-
Цены на электроэнергию	3,0	6,0	3,0
Цены на моторное топливо	9,0	7,0	3,0
Цены на газ	-	-	3,0
Волатильность цен на нефть	4,4	5,0	-
Разнообразие источников электроснабжения	2,0	5,0	-
Доля безуглеродной генерации	1,1	2,0	5,0
Карбоноёмкость экономики	2,4	2,0	2,0
Эмиссия CO <sub>2</sub> на человека	1,6	2,0	1,0

Включены лишь некоторые индикаторы, учитывающие в основном экономический и экологический аспекты ЭБ и не учитывающие страновые особенности, геополитический и технологический аспекты ЭБ.

Из зарубежного опыта построения интегральных показателей ЭБ интересны не сами численные значения весов отдельных индикаторов, а их относительная значимость. Ее можно определить, сравнив вес данного индикатора с весом выбранного ведущего индикатора. Пример такого подхода показан в табл. 3. Из нее и из анализа других зарубежных источников следует, что с позиции ЭБ значимость цены электроэнергии оценивается в 1,2-1,9 раза выше значимости индикатора эмиссии CO<sub>2</sub>.

**Таблица 3.** Оценка сравнительной значимости некоторых индикаторов

Индикаторы	Интегральные индексы ЭБ		
	US Energy Security Risk	International Energy Security Risk	World Energy Trilemma Index
Энергоемкость экономики	1	1	1

Душевое энергопотребление	0,9	0,6	-
Доля затрат на потребляемую энергию в ВВП	1,13	0,57	-
Затраты на энергию в расходах населения	0,59	0,43	-
Цены на электроэнергию	0,94	0,84	0,50
Цены на моторное топливо	2,8	1	0,7
Цены на газ	-	-	0,5
Волатильность цен на нефть	1,34	0,7	-
Разнообразие источников электро-снабжения	-	0,7	-
Доля безуглеродной генерации	0,34	0,29	0,83
Карбоноемкость экономики	0,34	0,29	0,33
Эмиссия CO <sub>2</sub> на человека	0,5	0,29	0,17

Значимость индикатора определялась путем сравнения его веса с весом индикатора «Энергоемкость экономики». Численные значения весов этих индикаторов приведены в табл. 2. Источник: авторская оценка

**2. Комплексная оценка ЭБ варианта.** Такая оценка была использована в расчетах, иллюстрирующих применение индекса ЭБ для сравнения вариантов энергоснабжения Европейской части страны и Урала (табл. 4).

Расчеты проводились с использованием оптимизационной модели МИСС-ЭЛ [10]. Критерий оптимальности модели – минимум дисконтированных затрат на генерацию и магистральный транспорт электроэнергии. Все основные исходные данные интервально. Учет их неопределенности и множества возможных комбинаций требует получения и сравнения большого количества оптимальных для разных условий решений. Для этого в компьютерной программе МИСС-ЭЛ используется известный метод Монте Карло. При этом предусматривается выбор характера распределения вероятности значений исходных показателей внутри задаваемого диапазона.

Важная особенность МИСС-ЭЛ – определение инвестиционных рисков сооружения каждой рассматриваемой электростанции и варианта энергоснабжения в целом. Для этого определяется вероятность (частота) попадания данной станции в оптимальное решение. Чем меньше эта вероятность, тем выше риск реализации соответствующего инвестиционного проекта. Представляется, что риски для потенциальных инвесторов могут дополнить список индикаторов ЭБ [11].

**Таблица 4.** Значения используемых индикаторов энергетической безопасности рассматриваемых вариантов

Показатель	Ед. измер.	Регион	Вариант А	Вариант Б
Средняя стоимость электроэнергии	Цент/кВтч	Европейская часть	7,8	8,1
		Урал	7,6	7,9
Инвестиционный риск варианта (вероятность дефицита)	%	Европейская часть	3-6	8-15
		Урал	1-4	4-10
Доля станций с риском для инвесторов более 50%	%	Европейская часть	2-5	4-8
		Урал	0	1
Выбросы CO <sub>2</sub>	Млн. т	Европейская часть	3,0	2,9
		Урал	1,4	1,3

Результаты оптимизационных расчетов для прогнозируемых условий энергоснабжения Урала и шести (объединенных в таблице) федеральных округов Европейской части РФ в период 2025-2030 гг. В варианте Б стоимость топлива выше, чем в варианте А (газа на 25%, угля на 5%).

Удорожание топлива снижает долю угольных и газовых электростанций в прогнозируемом вводе новых мощностей, уменьшая выбросы CO<sub>2</sub> (особенно на Урале). Но при этом увеличиваются стоимость генерации электроэнергии и риски для инвесторов (табл. 5). Комплексный показатель ЭБ учитывает это разнонаправленное влияние. Его рост говорит о негативных в целом последствиях для состояния ЭБ повышения цен на топливо. Эти последствия разные в разных регионах. Изменение обобщенного индекса ЭБ всего макрорегиона равно 1,6% (учитывая, что доля Урала в производстве электроэнергии составляет 22%).

**Таблица 5.** Оценка состояния ЭБ регионов при удорожании топлива

Показатель	Вес индикатора	Изменение показателя, %	
		Европейская часть	Урал
Стоимость электроэнергии	0,5	3,8	3,6
Выбросы CO <sub>2</sub>	0,3	-3,0	-7,0
Инвестиционный риск варианта	0,1	6,5	4,5
Доля станций с риском более 50%	0,1	2,5	1,5
Комплексный (обобщающий) индекс ЭБ		2	0,3

В России при оценке состояния ЭБ важно учитывать территориальные различия в условиях энергоснабжения [12]. При таком учете комплексный индекс ЭБ энергоснабжения страны упрощенно можно выразить следующим образом:

$$КИЭБ = \sum_r \sum_i (I_{ri} \cdot \gamma_{ri}) \cdot \gamma_r,$$

где  $I_{ri}$  – индикатор  $i$  в регионе  $r$ ,  $\gamma_{ri}$  – его вес,  $\gamma_r$  – доля региона в энергопотреблении страны.

**Заключение.** Как за рубежом, так и в России индикативный анализ в основном используется для оценки текущего состояния энергетической безопасности. Представляется, что получаемые на его основе комплексные индексы ЭБ могут дополнить состав критериев, используемых при сравнении и выборе вариантов развития ТЭК и региональных систем энергоснабжения. С увеличением горизонта прогнозирования состав используемых индикаторов должен уменьшаться. При этом значимость экономической и экологической составляющей ЭБ будет расти. Индикативный анализ ЭБ играет ключевую роль в краткосрочных прогнозах. В оценке вариантов на перспективу до 10-15 лет важнее становится численная оценка стратегических угроз, а в долгосрочных прогнозах преимущество будет иметь сравнение вариантов (траекторий развития) по устойчивости к вероятным принципиальным изменениям в условиях развития ТЭК.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003 рег. № АААА-А21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

#### Список источников

1. Кононов Ю.Д. Анализ зарубежного опыта комплексной оценки энергетической безопасности / Ю.Д. Кононов // Энергетическая политика, 2018. – № 6. – С. 98-107.

2. Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide / OESD, 2018, 152 p.
3. Augutis J., et all. Integrated energy security assessment // Energy, 2017, v. 138, pp. 890-901.
4. WEF. Global Energy Architecture Performance Index, Report 2017, 32 p., available at: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Energy\\_Architecture\\_Performance\\_Index\\_2017.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf) (accessed: 14.02.2020)
5. WEC. World Energy Trilemma 2019 Map, 2019, 79 p., available at: [http://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma\\_2019\\_Full\\_Report\\_v4\\_pages.pdf](http://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma_2019_Full_Report_v4_pages.pdf) (accessed: 06.07.2020)
6. Методические рекомендации по оценке состояния энергетической безопасности Российской Федерации на федеральном уровне. / Под ред. С.М. Сендерова. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – 35 с.
7. Сендеров С.М. Состояние энергетической безопасности России на федеральном уровне: методические подходы к оценке и основные результаты / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук // Известия РАН. Энергетика, 2018. – № 2. – С. 3-12.
8. Index of U.S. Energy Security Risk (2018 Edition) / Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerce, 2018, 92 p., available at: <http://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/us-energy-security-risk-2018.pdf> (accessed: 31.01.2020)
9. International Index of Energy Security Risk (2018 Edition). Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerce, 2018, 88 p.
10. Кононов Ю.Д., Использование стохастического моделирования при выборе вариантов энергоснабжения регионов с учетом инвестиционных рисков / Ю.Д. Кононов, В.Н. Тыртышный, Д.Ю. Кононов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2018. – № 2(10). – С. 80-87.
11. Кононов Ю.Д. Экономическая составляющая энергетической безопасности методические подходы к ее оценке / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2019. – Т. 15. – № 6. – С. 1086-1096.
12. Смирнова С.М. Энергетическая безопасность регионов России: состояние и тенденции изменения за последние шесть лет / С.М. Смирнова, С.М. Сендеров, // Энергетическая политика, 2018. – № 1. – С. 16-23.

*Кононов Юрий Дмитриевич, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории взаимосвязей экономики и энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, [konoнов@isem.irk.ru](mailto:konoнов@isem.irk.ru). Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.*

*Кононов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории взаимосвязей экономики и энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, [stranger72@bk.ru](mailto:stranger72@bk.ru). Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.*

UDC 661.311:338.27

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.009

## **The mix and significance of energy security metrics as depending on the objectives of a projection and the time frame covered by it**

**Yuri D. Kononov, Dmitry Yu. Kononov**

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, [konoнов@isem.irk.ru](mailto:konoнов@isem.irk.ru)

**Abstract.** This study considers the issue of extending the existing methods of indicator-based analysis of the current energy security (ES) performance to a comprehensive assessment of options for the development of energy systems. The relevance of the above issue is due to the increasing uncertainty of the future, including the beginning of the transition to a low-carbon strategy. The study proposes a mix of metrics that varies depending on the time frame covered and takes into account the economic and environmental aspects of ES. An approach to assessing the significance of individual metrics in the formation of comprehensive overall metrics of the ES performance is outlined. The results of optimization calculations to assess changes in such metrics for two options for power supply of the European Russia and the Ural are presented. These options differ in the cost of fuel for power plants (in the second option, gas is 25% more expensive and coal 5% more expensive than in the first option). The rising cost of fuel affects the mix of capacity additions in different regions, increasing the share

of carbon-free plants and reducing CO<sub>2</sub> emissions. However, this increases the cost of generating electricity and risks for potential investors. The overall metric of ES takes into account this multidirectional influence. Its growth indicates that the first option is more preferable from the standpoint of ES. It is concluded that it is possible and expedient to use this kind of metrics as an additional performance criterion when comparing options for the development of the energy sector and the regional system of energy supply. As the projection time frame increases, the number of the metrics used should decrease, and the importance of the economic and environmental aspects of ES will grow.

**Keywords:** energy security, indicator-based analysis, forecasting, optimization

**Acknowledgements:** The research was carried out under State Assignment No. (FWEU-2021-0003 reg. No. AAAA-A21-121012090014-5) of the program for basic research of the Russian Federation for 2021-2030 and was supported in part by a Russian Foundation for Basic Research grant under research project No. 20-010-00204.

## References

1. Kononov Yu.D. Analiz zarubezhnogo opyta kompleksnoj ocenki energeticheskoy bezopasnosti [Analysis of foreign experience of a comprehensive assessment of energy security ]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2018, no. 6, pp. 98-107.
2. Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide. OESD, 2018, 152 p.
3. Augutis J., et all. Integrated energy security assessment, Energy, 2017, v. 138, pp. 890-901.
4. WEF. Global Energy Architecture Performance Index, Report 2017, 32 p., available at: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Energy\\_Architecture\\_Performance\\_Index\\_2017.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Energy_Architecture_Performance_Index_2017.pdf) (accessed 14.02.2020)
5. WEC. World Energy Trilemma 2019 Map, 2019, 79 p. available at: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma\\_2019\\_Full\\_Report\\_v4\\_pages.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma_2019_Full_Report_v4_pages.pdf)
6. Metodicheskie rekomendacii po ocenke sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii na federal'nom urovne [Guidelines for assessing the state of energy security of the Russian Federation at the federal level]. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2013, 35 p.
7. Senderov S.M., Rabchuk V.I. Sostoyanie energeticheskoy bezopasnosti Rossii na federal'nom urovne: metodicheskie podhody k ocenke i osnovnye rezul'taty [The state of Russia's energy security at the federal level: methodological approaches to assessment and main results]. Izvestiya RAN. Energetika, , 2018, no. 2, pp. 3-12.
8. Index of U.S. Energy Security Risk (2018 Edition). Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerce, 2018, 92 p. available at: <https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/us-energy-security-risk-2018.pdf> (accessed 31.01.2020)
9. International Index of Energy Security Risk (2018 Edition). Global Energy Institute, U.S. Chamber of Commerce, 2018, 88 p
10. Kononov Yu.D., Tyrtyshtnyj V.N., Kononov D.Yu. Ispol'zovanie stohasticheskogo modelirovaniya pri vybore variantov energosnabzheniya regionov s uchetom investicionnyh riskov [The use of stochastic modeling in the selection of energy supply options for regions, taking into account investment risks]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2018, no. 2(10), pp. 80-87.
11. Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. E'konomicheskaya sostavlyayushhaya e'nergeticheskoy bezopasnostii metodicheskie podhody k ee ocenke [Economic component of energy security and methodological approaches to its assessment]. Natsional'nyye interesy: priority i bezopasnost', 2019, vol. 15, no. 6, pp. 1086-1096.
12. Smirnova S.M., Senderov S.M. Energeticheskaya bezopasnost' regionov Rossii: sostoyanie i tendencii izmeneniya za poslednie shest' let [Energy security of Russian regions: state and trends of change over the past six years]. Energeticheskaya politika [Energy Policy.], 2018, no. 1, pp. 16-23.

*Yuri D. Kononov, Prof. Dr. of Sciences in Economics, Principal Researcher, "Economy and Energy Relationships" Laboratory Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, kononov@isem.irk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

*Dmitry Yu. Kononov, Senior Researcher, "Economy and Energy Relationships" Laboratory Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, stranger72@bk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

*Статья поступила в редакцию 12.05.2022; одобрена после рецензирования 20.05.2022; принята к публикации 14.06.2022.*

*The article was submitted 05/12/2022; approved after reviewing 05/20/2022; accepted for publication 06/14/2022.*