

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОГНОЗАХ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

Kononov D.Yu.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE STATE OF ENERGY SECURITY IN THE FORECASTS OF THE DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY

Аннотация. Рассмотрены способы многокритериальной оценки и сравнения вариантов (сценариев) развития ТЭК. Предложены несколько способов обобщения (агрегирования) индикаторов энергетической безопасности, в том числе индекс устойчивости для комплексной характеристики экономического аспекта энергобезопасности. Выполнены экспериментальные расчеты, показывающие влияние различных факторов на численные значения индексов энергетической безопасности.

Ключевые слова: прогнозирование, топливно-энергетический комплекс, энергетическая безопасность, индикативный анализ, стратегические угрозы, макроэкономика.

Abstract. The methods of multi-criteria assessment and comparison of options (scenarios) for the development of the fuel and energy complex are considered. Several ways of generalization (aggregation) of energy security indicators are proposed, including the sustainability index for a comprehensive characteristic of the economic aspect of energy security. Experimental calculations have been performed showing the influence of various factors on the numerical values of energy security indices.

Keywords: forecasting, fuel and energy complex, energy security, indicative analysis, strategic threats, macroeconomics.

Энергетическая безопасность (ЭБ), понимаемая как надежное снабжение потребителей топливом и энергией в необходимых объемах и по экономически приемлемым ценам, стала одним из основных системных вызовов, с которыми столкнулась современная энергетика [1]. Для характеристики состояния ЭБ используется индикативный анализ, включающий определение состава, численной оценки и значимости индикаторов, а также конструирование обобщающих показателей.

В зарубежной практике такие показатели – комплексные индексы ЭБ (КИЭБ) могут иметь иерархическую структуру: состоять из 2-3 уровней, на каждом из которых индикаторы объединяются в группы с разными весами. Такой индекс можно представить следующим образом:

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

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 конструировании интегральных показателей неизбежна значительная степень субъективизма как при выборе состава индикаторов, так и при оп-

ределении их значимости (весов). Несмотря на этот недостаток, КИЭБ все шире используются в отдельных странах (например, в США, Китае, Индии). Ежегодную оценку и сравнение состояния ЭБ разных стран проводят Международный Энергетический Совет (WEC), Мировой Энергетический Форум (WEF), Глобальный энергетический Институт США. В этих оценках Россия находится где-то в середине списка из 125 стран.

В России вопрос собственной комплексной численной оценки состояния ЭБ только ставится. Но еще в конце прошлого столетия стала осознаваться необходимость комплексного рассмотрения и анализа существующих проблем ЭБ. В частности, это нашло отражение в книге «Энергетическая безопасность (ТЭК и государство)», входящей в многотомный труд «Безопасность России» [2]. Большое количество исследований по индикативному анализу и проблемам мониторинга ЭБ выполнено и опубликовано в Институте систем энергетики СО РАН. Они в основном посвящены вопросам надежного энерго- и топливоснабжения потребителей.

Предложенная в [3] методика качественного анализа текущего состояния и мониторинга ЭБ страны или регионов предусматривает сочетание индикативного и модельного подхода с использованием следующего обобщающего показателя:

$$Q = PK, \sum_{i=1}^n V_i^K \leq \begin{cases} H, \sum_{i=1}^n V_i^H \geq \delta_H \\ \delta_K \text{ и } \sum_{i=1}^n V_i^H \leq \delta_H, \\ K, \sum_{i=1}^n V_i^K \geq \delta_K \end{cases}, \quad i = 1, n, \quad (2)$$

где Q – интегральная оценка качественного состояния энергетической безопасности; V_i^H и V_i^K – удельный вес i -того индикатора, находящегося в области нормальных и кризисных значений, соответственно; δ_H и δ_K – коэффициенты, характеризующие уровень достижения нормального или кризисного состояния, соответственно.

Состояние ЭБ оценивается как критическое, если доля индикаторов с такой оценкой в их совокупности превышает установленное допустимое значение (например, 40%).

Анализ, проведенный по этой методике в 2018 г., показал улучшение состояния ЭБ России – переход из кризисного состояния в 2015 г. в предкризисное в 2016 г. Состав индикаторов, использованных для такой оценки состояния ЭБ включал: изменение энергоемкости ВВП, динамику цен на топливо внутри страны, долю природного газа в структуре первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), соотношения добычи и использования внутри страны разных

видов топлива, долю экспорта ТЭР в общем объеме экспорта, долю в общем экспорте ТЭР продукции нефтепереработки и нефтехимии и другие показатели.

Очевидно, что в условиях энергетического перехода даже для оценки текущего состояния ЭБ России потребуется расширить круг учитываемых факторов за счет таких индикаторов как эмиссия CO₂, разнообразие и стоимость источников энергоснабжения, доля импорта в энергетическом оборудовании и других, в т.ч. используемых в международной практике индикативного анализа.

Представляется, что состав индикаторов ЭБ должен зависеть от решаемой задачи и от рассматриваемой перспективы. С увеличением горизонта прогнозирования не только уменьшается их число, но и увеличивается значимость индикаторов, характеризующих экономический аспект ЭБ [14].

В Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации, утвержденной Президентом РФ в мае 2019 г., при мониторинге и систематической оценке состояния ЭБ предлагается использовать систему индикаторов, отслеживая их отклонение от задаваемых предельно допустимых значений. Располагая пороговыми значениями индикаторов, комплексное состояние ЭБ можно оценивать, используя следующее выражение:

$$\text{КИЭБ} = \sum_i (1 - I_i / \bar{I}_i) \cdot \gamma_i, \quad (3)$$

где I_i и $\bar{I}_i$ – располагаемое и пороговое значение индикатора i , γ_i – его удельный вес (относительная значимость).

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

$$\text{КИЭБ} = \sum_r \left(\sum_i I_{ir} \gamma_{ri} \right) \cdot \gamma_r, \quad (4)$$

где I_i – значение индикатора i в регионе r , γ_{ri} – его вес, γ_i – доля региона в энергопотреблении страны.

Важной и сложной проблемой, возникающей при конструировании комплексного индекса ЭБ, является определение весов отдельных индикаторов. В настоящее время они, 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.

Другая проблема построения КИЭБ – разная размерность используемых индикаторов ЭБ. Для сопоставимости (нормирования) приходится рассматривать не их численные значения, а различия, выраженные в процентах. В этом случае формула (4) преобразуется следующим образом:

$$\text{КИЭБ} = \sum_r \left(\sum_i \Delta_{ri} \gamma_{ri} \right) \gamma_i, \quad (5)$$

где ΔI_{ij} – отличие (в %) индикатора i_{ij} от его значения в альтернативном или базовом варианте.

Иллюстративный пример использования такого показателя для сравнительной оценки ЭБ вариантов энергоснабжения приводится ниже (таблицы 1-3).

Решалась задача определения возможного влияния изменения стоимости топлива для электростанций на величину КИЭБ в объединенных энергетических системах (ОЭС) Европейской части страны, включая ОЭС Урала. При этом состав индикаторов был ограничен только отражающим экономическую составляющую ЭБ.

С ориентировкой на Генеральную схему размещения объектов электроэнергетики до 2035 г. были рассчитаны два условных варианта. Они получены с помощью оптимизационных расчетов на модели МИСС-ЭЛ [3-4]. Исходные данные отличались между собой только стоимостью газа для электростанций.

Удорожание топлива снижает долю газовой генерации (табл. 1), уменьшая выбросы CO_2 . Но при этом увеличивается стоимость производства и межсистемного транспорта электроэнергии. Рост стоимости электроэнергии негативно влияет на потребителей, но снижает риски инвестиций в новые электростанции. Эффект разнонаправленного изменения этих и других индикаторов ЭБ позволяет определить предлагаемый комплексный показатель (5).

Таблица 1

Изменение региональной структуры производства электроэнергии
(в процентных пунктах) при удорожании газа

Электростанции	Европейская часть РФ				Урал
	Северо-Запад	Центр	Поволжье	Юг	
Газовые	-5,9	-9,7	-0,9	-0,7	-4,0
Угольные	0,2	0,6	0,4	0,2	9,4
ГЭС	0,1	0,1	0,1	0	1,4
АЭС	5,9	9,1	0,4	0,4	0
Солнечные и ветровые	0,1	0	0,1	2,0	-

Состав индикаторов ЭБ, выбранный для примера, приведен в табл. 2. Он, как и принятые значения их весов (значимости), условны. Иллюстративный характер носят также и результаты оценки влияния удорожания газа на величину индикаторов. Это влияние, как показывают результаты оптимизационных расчетов, заметно отличается по регионам: стоимость генерации увеличивается на 5-8%, а эмиссия CO_2 снижается на 1-10%. Особенно велики региональные различия в изменении индикаторов, характеризующих инвестиционные риски. В расчетах их численные значения определяются как величина, обратная вероятности попадания той или иной электростанции в оптимальное решение (чем выше вероятность, тем, при прочих равных условиях, меньше риск для потенциальных инвесторов).

Таблица 2

**Относительное изменение значений индикаторов ЭБ
в регионах ОЭС при удорожании газа**

Индикатор	Вес индикатора	Регионы				
		Северо-Западный	Центральный	Волжский	Южный	Уральский
Средняя стоимость электроэнергии	0,50	1,07	1,08	1,06	1,05	1,08
Выбросы CO ₂	0,35	0,90	0,86	0,98	0,98	0,99
Инвестиционный риск варианта	0,10	0,89	0,75	0,94	0,87	0,69
Доля новых ЭС с риском более 50%	0,05	0,10	0,16	0,89	1,10	0,70

В табл. 3 показано совокупное влияние изменения отдельных индикаторов на значение комплексного индекса ЭБ отдельного региона и макрорегиона в целом. По сравнению с базовым вариантом, величина КИЭБ почти во всех регионах увеличилась. Это может говорить об ожидаемом негативном влиянии удорожания газа на состояние ЭБ. Очевидно, что численные результаты такой оценки во многом зависят от состава индикаторов и принимаемых их весов.

Таблица 3

Изменение значения КИЭБ при удорожании газа, %

Показатель	Р е г и о н ы					Макро-регион
	Северо-Западный	Центральный	Волжский	Южный	Уральский	
Место региона в электропотреблении макрорегиона, в %	12,7	31,0	13,1	13,2	30,0	100
КИЭБ	1,03	0,92	1,01	1,02	1,03	0,98

Используемый в приведенном примере КИЭБ предлагается применять (при меняющемся составе индикаторов) в качестве одного из критериев эффективности сравниваемых вариантов развития систем энергетики при краткосрочных и среднесрочных прогнозах. При рассмотрении долгосрочной перспективы важнее оценивать устойчивость вариантов (траекторий динамики ключевых показателей) к возможным стратегическим угрозам, выделяя экономический и экологический аспекты ЭБ.

Представляется, что еще на стадии формирования той или иной стратегии долгосрочного развития должен определяться уровень ее устойчивости.

Соответствующий показатель – индекс устойчивости (ИУС) можно выразить следующим образом:

$$\text{ИУС} = \sum_i I_i \gamma_i \lambda_i, \quad (6)$$

где I_i – нормированный показатель i , характеризующий ту или иную составляющую ЭБ; γ_i – вес (значимость) такого показателя; λ_i – коэффициент, учитывающий неопределенность принимаемых в расчетах численных значений i –ого показателя.

Степень неопределенности рассматриваемого показателя можно охарактеризовать верхней и нижней границей его вероятных значений:

$$\lambda_i = 0,5 \left(\frac{\bar{I}_i}{\underline{I}_i} + 1 \right) \cdot \varepsilon_i, \quad (7)$$

где $\bar{I}_i$ и $\underline{I}_i$ – верхняя и нижняя границы диапазона значений i -го показателя, ε_i – коэффициент, характеризующий его отклонение от среднего значения, а также учитывающий корректирующее влияние на ИУС возможной взаимозависимости принимаемых значений показателей.

При конструировании ИУС в состав показателей следует включить не обычные индикаторы ЭБ, а комбинированные (обобщающие), отражающие наиболее устойчивые тенденции. Их численные значения должны учитывать результаты анализа многих вариантов, в т.ч. с разными темпами развития экономики и спроса на энергоносители.

Таковыми показателями могут, например, быть: эластичность энергопотребления по ВВП, ценовая эластичность спроса на электроэнергию, доля ТЭК в ВВП, доля ТЭК в общем экспорте, углеродоемкость экономики. Последний показатель, характеризующий выбросы CO_2 на единицу ВВП, при построении ИУС может быть заменен на процент возможного отклонения эмиссии CO_2 от задаваемой цели. Такая замена облегчает нормирование показателей с разной размерностью.

Эти показатели выбраны для иллюстрационного примера комплексной оценки устойчивости одной из гипотетической стратегии долгосрочного развития ТЭК. Их численные значения (табл. 3) условны, но правдоподобно отражают ожидаемое изменение (уменьшение) через 20-30 лет по сравнению с настоящим временем.

Рассматривалось два сценария. В первом (исходном) сценарии предполагался одинаковый вес указанных показателей. В другом значимость показателя, характеризующего эмиссию CO_2 , увеличивается в два раза. При этом, во втором сценарии, как и в первом, не учитывалась взаимозависимость численных значений рассматриваемых показателей.

Результаты иллюстративных расчетов (табл. 4) свидетельствуют, что даже при постоянном составе показателей ИУС реагирует на изменение их значимости. Рост величины этого комплексного индекса означает снижение устойчивости сценария (стратегии).

Таблица 4

Влияние неопределенности значений и веса показателей ЭБ на индекс устойчивости гипотетической стратегии низкоуглеродного развития ТЭК

№ п/п	Показатель	Единицы измерения	Возможное значение в рассматриваемой перспективе	Сценарий 1			Сценарий 2		
				Принимаемое значение *	Вес показателя	Устойчивость	Принимаемое значение *	Вес показателя	Устойчивость
1.	Эластичность энергопотребления по ВВП	%/%	0,4-0,5	1,13	0,2	0,23	1,13	0,15	0,17
2.	Ценовая эластичность спроса на энергию	%/%	0,05-0,07	1,20	0,2	0,24	1,20	0,15	0,18
3.	Доля ТЭК в ВВП	%	4-6	1,25	0,2	0,25	1,25	0,15	0,19
4.	Доля ТЭК в экспорте	%	20-30	1,25	0,2	0,25	1,25	0,15	0,19
5.	Отклонение эмиссии CO ₂ от целевой установки	%	1-5	1,75	0,2	0,25	1,75	0,4	0,4
Устойчивость стратегии (значение ИУС)						1,32			1,43

* Отклонение среднего значения показателя от его нижней границы (коэффициент λ в формуле ИУС).

В рассматриваемом примере одно только повышение веса цели достижения низкоуглеродного развития в 2 раза, увеличивает величины ИУС на 8%. С учетом же взаимозависимости значений используемых показателей, этот рост, согласно расчетам, составляет 18%. Это подтверждает высказываемые соображения о возможных негативных последствиях для экономики форсирования реализации такой стратегии.

Представляется, что описанный методический подход может быть полезен на начальном этапе прогнозных исследований для предварительной оценки с позиции энергетической безопасности намечаемых стратегий достижения задаваемых целевых установок долгосрочного развития ТЭК.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мастепанов А.М.** Проблемы обеспечения энергетической безопасности в новых геополитических условиях // Энергетическая политика. 2017. Вып. 1. С. 20-37.
2. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути их решения / Отв. ред. Н.И. Воропай и М.Б. Чельцов. Новосибирск: Наука, 2011. 198 с.
3. **Кононов Ю.Д., Тиртышный В.Н., Кононов Д.Ю.** Использование стохастического моделирования при выборе вариантов энергоснабжения регионов с учетом инвестиционных рисков // Информационные и математические технологии в науке и практике. 2018. № 2 (10). С. 80-87.
4. **Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю.** Возможное влияние введения платы за выбросы парниковых газов на стоимость электроэнергии // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2021. Т. 17. № 9. С. 1612-162.