



Energotizimlarni rivojlantirish prognoz ko'rsatkichlarini birgalikda qo'llash

Olga V. Radionova¹, Rashid A. Sitdikov^{1,a}

¹PhD, dotsent, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; tstu_energy@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

^{1a} DSc, professor, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; tstu_energy@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-0761-0787>

Dolzarbli: zamonaviy energiya tizimlarining ishlashi ularning rivojlanishini bashorat qilishning samarali usullaridan foydalanishni talab qiladi. Energiya tizimlarining energiya va iqtisodiy ko'rsatkichlarini aniqlashda bashoratning aniqligi va muvozanati kelajakda yoqilg'i-energetika kompleksini to'g'ri shakllantirishning asosini tashkil qiladi. Hozirda asosiy bashorat ko'rsatkichlari ikkita ko'rsatkichdir: EROEI - energiya va LCOE - iqtisodiy. Hozirda bu ko'rsatkichlar alohida, bir-biridan mustaqil ravishda ko'rib chiqiladi. Shu bilan birga, bashorat qilishga tizimli yondashuv ikkala ko'rsatkichni bir vaqtda hisobga olishni talab qilishi aniq. Bu bashorat xususiyatlarini, ularning ob'ektivligini, aniqligini va tezkorligini yaxshilashga yordam beradi. Shu sababli, EROEI/LCOE ko'rsatkichlarining kombinatsiyasini bir vaqtda hisobga olgan holda bashorat modellarini takomillashtirish bo'yicha tahlillar va tadqiqotlar o'tkazish, shuningdek, ularning bir-biriga ta'sirini o'rganish dolzarbdir. Bashoratga ta'sir qiluvchi boshqa o'zgaruvchan omillarni ham hisobga olish zarur. Bashorat ko'rsatkichlarini bir vaqtda ko'rib chiqish energiya tizimlarining kelajakdagi ekspluatatsiya xususiyatlarini yanada aniq va ob'ektiv aniqlash imkonini beradi.

Maqsad: ishning maqsadi energetika rivojlanishining asosiy bashorat ko'rsatkichlarini, ularning bir-biriga ta'sirini tahlil qilish, shuningdek, EROEI va LCOE bashorat ko'rsatkichlarini bir vaqtda ko'rib chiqqanda bashorat samaradorligini oshiruvchi tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat.

Metodlar: ishda quyidagi usullar qo'llaniladi: kompleks tahlil, tizimli yondashuv, ko'p mezonli optimallashtirish, energetika sohasida bashorat qilish bo'yicha xalqaro tajribadan foydalaniladi.

Natijalar: ishda energiya tizimlarining rivojlanishining asosiy samaradorlik ko'rsatkichlaridan (energetik - EROEI va iqtisodiy - LCOE) foydalanish tahlil qilingan. Ushbu ko'rsatkichlar energiya tizimlarining rivojlanishini bashorat qilish va asoslashda qo'llaniladi. EROEI/LCOE ning bir-biriga matematik bog'liqligi tasdiqlangan; ko'rsatkichlar bir-biriga ta'sir qilishi tasdiqlangan, shu sababli ikkala ko'rsatkichning bir vaqtda bashorat qilinadigan kombinatsiyasini ko'p mezonli baholash bilan tizimli yondashuvdan foydalanish zarur. Bu energiya tizimlarining rivojlanishini bashorat qilishning ob'ektivligi va aniqligini ta'minlaydi.

Kalit so'zlar: samaradorlik ko'rsatkichlari, EROEI, LCOE, energiya tizimi, yoqilg'i turlari, energiya tashuvchilar, rivojlanishni bashorat qilish, tizimli yondashuv, ko'p mezonli model, skalyarizatsiya va normalizatsiya.

For citation: Radionova O.V., Sitdikov R.A. Joint use of the indicators for forecasting energy systems development. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 14-22.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21156010>

Received: 10.12.2025

Revised: 14.04.2026

Accepted: 02.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Olga V. Radionova, Rashid A. Sitdikov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Совместное использование показателей прогнозирования развития энергосистем

Ольга В. Радионов¹, Рашид А. Ситдинов^{1,а}

¹ PhD, доц. Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; tstu_energy@mail.ru;

<https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

^{1a} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; tstu_energy@mail.ru;

<https://orcid.org/0009-0002-0761-0787>

Актуальность: функционирование современных энергосистем требует использования эффективных методов прогнозирования их развития. Точность и сбалансированность прогноза при определении энергетических и экономических показателей энергосистем лежит в основе правильного формирования топливно-энергетического комплекса в будущем. В настоящее время основными прогнозными показателями являются два показателя: EROEI - энергетический и LCOE - экономический. В настоящее время эти показатели рассматриваются отдельно, независимо друг от друга. В то же время, очевидно, что системный подход к прогнозированию диктует одновременный учёт обоих показателей. Это будет способствовать улучшению прогнозных характеристик, их объективности, точности и оперативности. Поэтому актуальными являются анализ и проведение исследований по усовершенствованию моделей прогнозирования с одновременным учётом сочетания показателей EROEI/LCOE, а также их влияния друг на друга. Необходим учёт и других изменяющихся факторов, влияющих на прогноз Одновременное рассмотрение прогнозных показателей позволяет более точно и объективно определять будущие эксплуатационные характеристики энергосистем.

Цель: целью работы является анализ основных прогнозных показателей развития энергетики, их влияние друг на друга, а также разработка рекомендаций, повышающих эффективность прогноза при одновременного рассмотрения прогнозных показателей EROEI и LCOE.

Методы: в работе применяются методы: комплексного анализа, системного подхода, многокритериальной оптимизации, используется международный опыт прогнозирования в энергетике.



Результаты: в работе сделан анализ использования ключевых показателей эффективности развития энергосистем (энергетического - EROEI и экономического – LCOE) Эти показатели используются при прогнозировании и обоснования развития энергетических систем. Подтверждена математическая связь EROEI/LCOE друг с другом; подтверждено, что показатели влияют друг на друга, поэтому необходимо использование системного подхода с многокритериальной оценкой одновременного прогнозного сочетания обеих показателей. Это обеспечит объективность и точность прогнозирования развития энергосистем.

Ключевые слова: показатели эффективности, EROEI, LCOE, энергосистема, виды топлива, энергоносители, прогнозирование развития, системный подход, многокритериальная модель, скаляризация и нормализация.

Joint use of the indicators for forecasting energy systems development

Olga V. Radionova¹, Rashid A. Sitdikov^{1,a)}

¹ PhD, Associate Professor, Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; tstu_energy@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

^{1a} DSc, Professor, Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; tstu_energy@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-0761-0787>

Relevance: the functioning of modern energy systems requires the use of effective methods for forecasting their development. The accuracy and balance of forecasts in determining the energy and economic indicators of energy systems form the basis for the correct formation of the future fuel and energy complex. Currently, the main forecasting indicators are two: EROEI – energy and LCOE – economic. At present, these indicators are considered separately, independently of each other. At the same time, it is evident that a systematic approach to forecasting dictates the simultaneous consideration of both indicators. This will contribute to improving forecast characteristics, their objectivity, accuracy, and timeliness. Therefore, analyzing and conducting research on improving forecasting models with simultaneous consideration of the EROEI/LCOE combination of indicators, as well as their mutual influence, is relevant. The influence of other variable factors affecting the forecast also needs to be taken into account. The simultaneous consideration of forecasting indicators will allow for a more accurate and objective determination of the future operational characteristics of energy systems.

Aim: the objective of this work is to analyze the main forecasting indicators for the development of the energy sector, their mutual influence, and to develop recommendations that increase the efficiency of forecasting when simultaneously considering the EROEI and LCOE forecasting indicators.

Methods: the work employs the following methods: comprehensive analysis, a systematic approach, multi-criteria optimization, and utilizes international experience in energy forecasting.

Results: this work analyzes the use of key performance indicators for the development of energy systems (energy – EROEI and economic – LCOE). These indicators are used in forecasting and justifying the development of energy systems. A mathematical relationship between EROEI/LCOE has been confirmed; it has been confirmed that the indicators influence each other, therefore, a systematic approach with multi-criteria evaluation of the simultaneous forecast combination of both indicators is necessary. This will ensure the objectivity and accuracy of energy system development forecasting.

Keywords: performance indicators, EROEI, LCOE, energy system, fuel types, energy carriers, development forecasting, systematic approach, multi-criteria model, scalarization and normalization.

1. Введение (Introduction)

Мировая энергетика переживает крупнейшую трансформацию, в которой также участвует энергосистема Республики Узбекистан, осуществляющая коренную модернизацию энергетического сектора по энергопереходу к безуглеродной энергетике [1-6]. Страна, как и большинство государств, сталкивается с ростом спроса, износом активов, стремлением к декарбонизации и интеграции ВИЭ. В таких условиях развитие энергетических систем является длительным, сложным и многостадийным процессом, в котором необходимо учитывать многие значимые факторы в число входят: сроки выполнения, состав участников процесса, используемые технологии, динамика изменения цен и многое другое. Поэтому актуально проводить исследования по определению и внедрению более эффективных процессов прогнозирования развития энергосистем на краткосрочную и долгосрочную перспективу [7,8].

В работе проводится анализ основных используемых факторов развития энергетике [9-14], - показателей EROEI и LCOE для разработки рекомендаций по улучшению их использования. При этом прогнозные показатели: энергетический - EROEI и экономический – LCOE, рассматриваются одновременно, так как они нелинейно влияют друг на друга, что необходимо учитывать при прогнозировании развития энергосистем.

Использование системного подхода с многокритериальной оценкой результатов прогнозирования долгосрочного развития энергосистем позволит улучшить объективность результатов [15,16].



2. Методы и материалы (Methods and materials)

Для прогнозирования развития энергосистем используются различные методы и модели, и, как было указано выше, в работе рассматриваются два наиболее распространённых, используемых при прогнозировании показателя: EROEI - энергетической рентабельности и LCOE - экономической эффективности.

Показатель EROEI и анализ его использования. На сегодняшний день одним из определяющих критериев выбора технологий получения электроэнергии и тепла является показатель энергетической рентабельности EROEI (energy return over energy investment, часто сокращают до EROI) — отдача полученной энергии на энергию, вложенную в процесс ее получения. Данный показатель является показателем рентабельности, т.е. показывает отдачу на вложенные усилия; такой показатель универсален для любой деятельности. Если для некоторого ресурса показатель EROEI меньше или равен единице, то такой ресурс превращается в «поглотитель» ресурса (энергии) и не может быть использован как источник ресурса (энергии). Показатель EROEI редко обсуждается в энергетических обзорах совместно с другими показателями, однако именно EROEI прогнозирует и определяет будущее энергетики [9-11].

Впервые идею EROEI для определения энергетической рентабельности предложил в 70-х годах прошлого века американский учёный-биолог Чарльз Холл [17], по формуле:

$$\text{EROEI} = E_p / E_z; \quad (1)$$

где E_p - энергия полученная; E_z – энергия, затраченная на добычу (производство). Значение этого отношения должно быть больше, чем 1,0.

В результате исследований, проведённых Ч.Холлом в прошлом веке, были получены следующие значения EROEI для энергоресурсов: природный газ – 10, уголь – 80, ядерная энергия – 15, битуминозные пески – 4, биодизель – 1,3. Единой методики расчёта EROEI Ч.Холл не предлагает и не рассматривает.

Более подробно формула расчёта EROEI, выглядит следующим образом [18]:

$$\text{EROEI} = E_2 / (E_{11} + E_{12} + E_{13}); \quad (2)$$

где E_2 - энергия добытого топлива, энергоресурса;

E_{11} - энергия, затраченная на капитальные работы, т.е. на строительство и монтаж, создание инфраструктуры энергетического объекта;

E_{12} - энергия, затраченная на операционные работы, связанные с добычей, подготовкой и использованием энергоресурса, т.е. эксплуатационные затраты;

E_{13} - энергия, затраченная на ликвидационные работы, связанные с демонтажем сооружений, рекультивацией земель и др. после завершения эксплуатации данного объекта. Существуют другие формулы расчёта показателя, с более подробным составом знаменателя в (2).

Значение EROEI, вычисленное по формуле (2), зависит не только от глубины учёта прямых и вспомогательных энергозатрат, но от точности и полноты вычисления потерь, связанных с выработкой и транспортировкой энергии. Чтобы получить полное представление о затратах, необходимо учитывать все элементы и ступени превращения энергии, содержащейся в топливе или энергоносителе, в электрическую (тепловую) энергию. Таким образом, формулы могут отличаться, однако вместе с ними различаются результаты расчётов на основе использования различных методик. Тем не менее, показатель EROEI является достаточно объективным, показывающим изменение энергетической эффективности генерации в зависимости от вида источников энергии (рис.1).

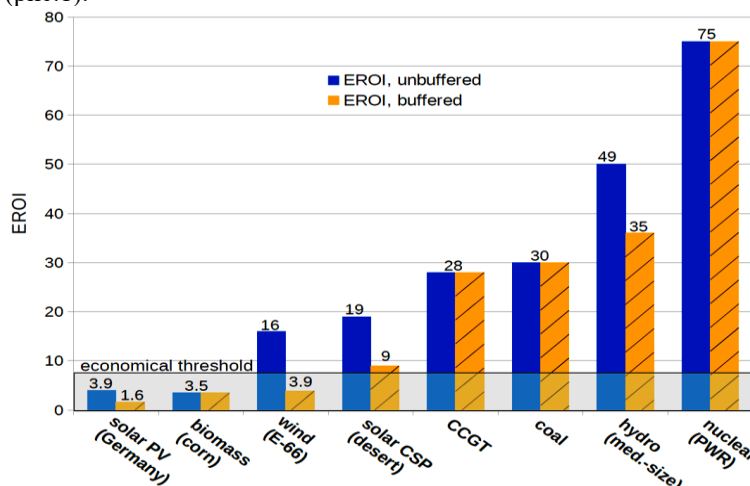


Рис. 1. Изменение EROEI для разных видов генерации (из «Energy Transition»)

Fig. 1. EROEI changes for different generation types (from «Energy Transition»)



Синие столбцы показывают расчёт EROEI без учёта прерывистости возобновляемых источников энергии; жёлтые столбцы учитывают прерывистость источников энергии, особенно таких, как ветер и солнечная энергия, и показывают, что для поддержания стабильности выработки ими энергии требуется использование устройств хранения (буферизация), следовательно, показатель EROEI должен это учитывать. Из рис.1 очевидно, что в настоящее время ядерная и гидроэнергетика стоят на первом месте с EROEI 75 и 35 (с буферизацией), соответственно. Комбинированная газовая и угольная генерации показывают показатели от 28 до 30. На графике обозначен «энергетический порог» - $7,0 \div 8,0$, ниже которого использование данной технологии считается убыточным.

В (табл.1) показана зависимость показателя EROEI от вида топлива и используемых технологий генерации.

Таблица 1. Показатели EROEI для различных технологий генерации [19]

Table 1. EROEI Values for Different Generation Technologies [19]

№№	Технология	EROEI
1	АЭС	75-106
2	Уголь	29-31
3	Природный газ в комбинированном цикле	28
4	Биогаз в комбинированном цикле	3,5
	Речные гидроэлектростанции	50
6	Солнечные концентраторы в пустыне	21
7	Ветрогенераторы на побережье	16-51
8	Оффшорные ветрогенераторы	16
9	СЭС	4-7

Вышеописанное показывает, что энергетическая рентабельность EROEI является не просто техническим параметром, а фундаментальной метрикой, определяющей способность общества обеспечивать себя энергией, от которой напрямую зависит уровень жизни и перспективы будущего.

Показатель LCOE и анализ его использования. Показатель LCOE (Levelized Cost of Electricity - приведенная стоимость электроэнергии) — является основополагающим инструментом оценки и сравнения энергетических проектов, поскольку он позволяет определить среднюю стоимость производства энергии на протяжении всего срока службы проекта, применяется при расчете стоимости электростанций. Показатель LCOE - это средняя себестоимость производства 1 кВт·ч электроэнергии в период всего жизненного цикла электростанции, служит индикатором для сравнения экономической эффективности различных источников [12-14].

Показатель тесно связан с другими финансовыми, экономическими и системными показателями, такими как:

- капитальные затраты (CAPEX);
- эксплуатационные расходы (OPEX);
- ставка дисконтирования (WACC) [20];
- коэффициент использования установленной мощности (КИУМ / Capacity Factor).

Показатель LCOE прямо пропорционален капитальным затратам на строительство объекта, расходам на топливо и техническое обслуживание; и обратно пропорционален выработке энергии. Чем больше станция работает на максимуме своей мощности (высокий КИУМ), тем ниже конечная стоимость энергии, так как фиксированные затраты распределяются на больший объем.

Основная формула для расчёта нормированной (средней) расчётной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла генерирующего объекта LCOE (из Интернет):

$$LCOE = (\sum_{t=1}^n (I_t + M_t + F_t) / (1 + r)^t) / (\sum_{t=1}^n E_t / (1 + r)^t); \quad (3)$$

где I_t — инвестиционные затраты в год t ;

M_t — операционные затраты и затраты на содержание в год t ;

F_t — затраты на топливо в год t ;

E_t — производство электроэнергии в год t ;

r — ставка дисконтирования;

t — жизненный цикл системы.



Показатель LCOE отражает стоимость вырабатываемого киловатт-часа электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки, учитывая плановый коэффициент извлечения установленной мощности (КИУМ), капитальные расходы на строительство, операционные расходы, расходы на топливо, проценты по привлекаемым кредитам, ремонты и вывод из эксплуатации. Величина LCOE представляет собой среднюю минимальную цену продажи электрической энергии, которая обеспечивает безубыточность генерирующего объекта в течение всего срока эксплуатации [12,13]. На рис.2 показано изменение показателя LCOE для различных видов энергии и энергоносителей в период 2009 – 2025 гг. [21]

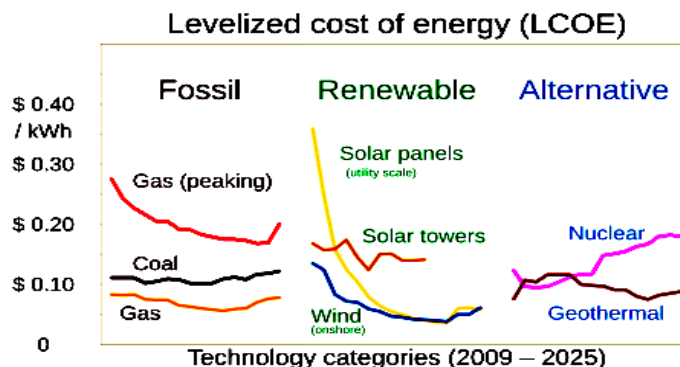


Рис.2. Динамика изменения показателя LCOE для различных видов энергии и энергоносителей в период 2009 – 2025 гг

Fig.2. LCOE dynamics for various energy forms and carriers in the 2009–2025years

LCOE — это оценка затрат на производство электроэнергии, при этом значение показателя LCOE сильно зависит от выбора исходных значений. Возможность интерпретировать и сравнивать результаты модели LCOE зависит от уровня детализации исходных данных и чувствительности к их выбору. Для любой технологии производства электроэнергии показатель LCOE может значительно варьироваться в зависимости от региона и таких факторов, как стоимость топлива, доступность ВИЭ и др.

Проблема использования показателя LCOE для анализа экономической эффективности работы электростанций разного типа заключается в том, что не существует единой методики, которая строго предписывает состав и значения исходных нормативных параметров, входящих в расчёт LCOE.

3. Результаты (Results)

Проведённый анализ показывает, что для улучшения качества прогноза развития энергетики необходим системный подход для одновременного прогноза энергетических и экономических показателей (EROEI и LCOE) с учётом их взаимосвязи, которая заключается в том, что оба показателя участвуют в процессах прогнозирования развития энергетики, энергетических систем и отдельных электростанций. Предлагаемое в статье совместное, использование показателей EROEI и LCOE в процессе прогнозирования позволит одновременно учесть и оптимизировать как энергетическую рентабельность, так и финансовые затраты на развитие энергосистем, скоординировать и сбалансировать их общую эффективность.

Многокритериальный подход [22]. Для совместной оценки различных показателей эффективности, естественно использование системного многокритериального подхода. При постановке задачи в виде многокритериальной (векторной) целевые функции запишутся следующим образом:

- по показателю EROEI: $\Phi_1 \rightarrow \max$;
- по показателю LCOE: $\Phi_2 \rightarrow \min$.

Для решения такой векторной, двухкритериальной задачи можно использовать:

1. Методы свертки критериев (скаляризации).
2. Лексикографический метод.
3. Метод субоптимизации (ϵ -ограничений).
4. Экспертные и метаэвристические методы.

Для решения нашей двухкритериальной задачи в наибольшей степени подходит метод ϵ -ограничений — это классический подход, который сводит задачу многокритериальной оптимизации к однокритериальной. Он заключается в выборе одного критерия в качестве главного, остальные критерии переводятся в разряд обязательных условий (ограничений-неравенств, не превышающих заданную величину ϵ). Меняя шаг за шагом значения ϵ , получаем серию оптимальных решений (множество Парето), из которых лицо, принимающее решения (ЛПР), может



выбрать лучшее.

При решении данной задачи предлагается осуществлять ротацию главного критерия, т.е. проводить расчет в виде итеративного процесса с последовательной сменой главного критерия и переводом прежних главных в разряд ограничений – неравенств вида:

$$f_i(x) \geq \varepsilon_i; \text{ или } f_j(x) \leq \varepsilon_j; i = 1, 2, \dots, k; \text{ где } k - \text{ количество критериев максимизации}; \\ j = 1, 2, \dots, m, \text{ где } m - \text{ количество критериев минимизации}; i \neq j.$$

После всех итераций, полученные результаты сравниваются ЛПП, который окончательно принимает для использования сбалансированные показатели EROEI и LCOE.

Взаимосвязь показателей. Анализ свидетельствует, что показатели EROEI (энергетическая рентабельность) и LCOE (приведенная стоимость энергии) взаимосвязаны, имеют общие и значимые в формулах (2) и (3) переменные, такие как выработка энергии E , жизненный цикл t .

Эти переменные по-разному влияют на показатели, например, увеличение длительности (жизненного цикла) работы электростанций снижает показатель LCOE, и нелинейно искажает показатель EROEI; учёт других переменных также может влиять на рассматриваемые показатели. Для удобства последующего анализа запишем формулу (3) в виде:

$$LCOE = (C + \sum M_t (1+r)^t) \cdot (\sum E_t (1+r)^t); \quad (5)$$

где C - капитальные затраты (включающие первичные на выработку энергии, из которых складывается EROEI);

M_t - эксплуатационные расходы в году t ;

E_t - выработка энергии в году t ;

r - ставка дисконтирования.

Очевидно, что формулы (2) и (5) имеют общие переменные E – выработка энергии и t – жизненный цикл; возможны также другие, косвенные взаимовлияющие переменные.

Таким образом, подтверждается связь между энергетической рентабельностью и экономической эффективностью. Эту взаимосвязь можно выразить следующим образом: чем больше отношение полученной энергии к затраченной (EROEI), тем меньше приведенная стоимость энергии (LCOE), так как требуется меньше инвестиций на единицу полезной мощности.

4. Обсуждение (Discussion)

На расчеты показателей EROEI/LCOE влияет множество факторов, которые не всегда учитываются; ниже представлены некоторые из них.

- Развитие киберфизических технологий, использование искусственного интеллекта и Big Data.
- Деграция материалов, особенно в ФЭС: реальные измерения показывают, что с каждым годом производительность многих ФЭС падает, а затраты на их обслуживание растут. Увеличение периода расчёта без учета этих факторов приводит к искусственному занижению LCOE.
- Изменения ставки дисконтирования: ставка дисконтирования r , например, на N -й год работы другая, чем на 1-й год.
- Процессы энергосбережения у потребителей и просьюмеров.
- Фактические затраты для EROEI: при расчете и длительном сроке службы необходимо тщательно учитывать суммарную энергию, затраченную на инфраструктуру, подготовку кадров, замену компонентов в конце их цикла, утилизацию станции и др.

В последнее время показатель EROEI стал меньше использоваться в расчетах и исследованиях, по причине того, что EROEI не обладает достаточной точностью. Другая причина заключается в том, что показатель EROEI изменчив, и цифры расчетов, как правило, быстро устаревают по причине внедрения современных энерготехнологий.

LCOE — это оценка затрат на производство электроэнергии; LCOE обычно используется для обоснования новых проектов по производству электроэнергии.

При использовании показателя LCOE следует соблюдать особую осторожность, поскольку его результаты сильно зависят от выбора исходных значений. Возможность интерпретировать и сравнивать результаты модели LCOE зависят от уровня детализации исходных значений и результатов анализа чувствительности к выбранным исходным значениям. Для любой технологии производства электроэнергии показатель LCOE может значительно различаться в зависимости от региона и таких факторов, как стоимость топлива, метеосостояние, доступность ВИЭ. Чтобы показатель LCOE можно было использовать для ранжирования альтернативных источников энергии, необходимо учитывать его для конкретных, фактических, «реальных» условий, в том числе с различными поправками.

Хотя LCOE является удобным обобщающим показателем общей конкурентоспособности различных технологий производства электроэнергии, однако у него есть недостатки,



которые следует учитывать. Один из основных недостатков метода LCOE заключается в том, что он не учитывает временные факторы, связанные с приведением производства электроэнергии в соответствие со спросом. Например, если затраты на хранилища энергии не включены в проекты по использованию переменчивых ВИЭ, таких как солнечная и ветровая, то такие ВИЭ могут вырабатывать электроэнергию в те периоды, когда она не нужна в сети, так как отсутствуют хранилища. Стоимость такой электроэнергии может быть ниже, чем если бы она была произведена в другое время, или даже отрицательной. В то же время переменчивые источники конкурентоспособны, если они доступны для производства в периоды наибольшего спроса и цен, например, солнечная энергия в жарких странах днём, когда кондиционеры потребляют больше всего энергии.

Кроме того, LCOE может значительно завысить/занизить стоимость регулируемой электростанции, если значение Et в расчете имеет постоянную величину в течение всего срока службы электростанции, в то время как в реальности значение может значительно меняться в течение жизненного цикла.

Имеются и другие факторы, влияющие на вышеуказанные показатели, поэтому для каждого случая, в зависимости от географических, метеорологических и других причин, необходимо проведение соответствующих научно-прикладных исследований по прогнозным расчётам развития конкретных энергетических систем.

Обсуждение также показывает, что необходимо использовать международный опыт (МЭК, СИГРЭ и др.) при проведении прогнозных расчетов развития энергетики.

5. Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования был сделан анализ, который обосновывает необходимость и методически подтверждает улучшаемость прогноза развития энергетики путём совместного и одновременного учёта показателей EROEI/LCOE.

Из работы можно сделать следующие выводы:

1. Представлен анализ значимости показателей EROEI/LCOE и необходимость их совместного одовременного рассмотрения при проведении прогнозных расчетов развития энергосистем на основе использования различных способов генерации.
2. Подтверждена математическая связь между показателями EROEI/LCOE, имеющая нелинейный, динамический характер. Учёт взаимосвязи повышает эффективность результатов прогнозирования развития энергосистем.
3. Показана перспективность применения системного многокритериального подхода к решению задач прогнозирования развития энергетики с учетом нескольких факторов. Для данного случая наиболее перспективным является метод субоптимизации (ε -ограничений), т.е. выделение одного главного критерия, с переводом других критериев в разряд ограничений - неравенств.
4. Работа показала, что различные подходы и математические модели расчётов показателей EROEI/LCOE энергосистем приводят к разбросу результатов и их различной интерпретации; поэтому необходимо разработать единую комплексную математическую модель, основанную на системной методологии и многокритериальном подходе к пониманию решений.
5. Проведённый анализ и разработанные предложения по методологии одновременного учёта двух и более показателей прогнозирования закладывают фундамент для создания современной системы автоматизированного прогнозирования на основе нейронных сетей, способной учитывать множество различных факторов и генерировать высокоточные варианты развития энергосистем и электростанций.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Energy Council (2019), Energy & Mobility Background material report, London.
2. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 с.
3. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем / Н.И. Воропай // Электричество, 2020. – № 7. – С. 12-21.
4. О.В. Радионова, Р.А. Ситдилов, С.Б. Талипова. Кластеризация энергетики в условиях энергоперехода Республики Узбекистан. // PROBLEMS OF ENERGY AND SOURCES SAVING scientific and technical Journal. 2025, № 4. Pp.16-25.
5. Системные исследования в энергетике: методология и результаты // Под ред. А.А. Макарова и Н.И. Воропая. — М.: ИНЭИ, Издательский дом МЭИ, 2018. — 309 с. ISBN 978- 5-383-01306-9.

6. Global Renewable Energy [Электронный ресурс] Официальный сайт International Energy Agency URL: <https://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/> (дата обращения: 04.03.2018).
7. Мировые запасы природных ресурсов: на сколько лет Земле хватит полезных ископаемых? [Электронный ресурс]: URL: <https://lindeal.com/trends/mirovye-zapasy-prirodnikh-resursozna-skolko-let-zemle-khvatit-poleznykh-iskopaemykh> (дата обращения: 21.05.2023).
8. Прогноз развития энергетики мира и России 2024 / под ред. А.А. Макарова, В.А. Кулагина, Д.А.Грушевенко, А.А.Галкиной; ИНЭИ РАН – Москва, 2024. – 208 с. - ISBN 978-5-91438-038-7.
9. Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested (англ.) // Annals of the New York Academy of Sciences: journal. — 2010. — Vol. 1185. — P. 102—118. — doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.
10. Gupta, Ajay K; Hall, Charles A.S. A Review of the Past and Current State of EROI Data (англ.) // Sustainability: journal. - 2011. -Vol. 3, no. 10. -P. 1796 -1809. -doi:10.3390/su3101796.
11. Темукуев Т.Б. О методе расчета EROEI с учетом коэффициента полезного использования энергии // Экономика и управление. 2014, 3(112). –С. 62-67.
12. Смит, Дж. (2019). Нормированная стоимость энергии (LCOE). Энциклопедия устойчивых технологий. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11518-X>.
13. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA). (2020). Стоимость производства возобновляемой энергии в 2019 году. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>.
14. Управление энергетической информации США (EIA). (2021). Нормированная стоимость и нормированная предотвращенная стоимость новых генерирующих ресурсов в ежегодном энергетическом прогнозе 2021 г. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf.
15. Клименко, И. С. Теория систем и системный анализ [Электронный ресурс] : учебное пособие / И.С. Клименко. —Электрон. текстовые данные. — М.: Российский новый университет, 2014. — 264 с. — 978-5-89789-093-4.
16. Zhang, Ling (2014), "Multi-attribute Decision Making", Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research, Springer, Dordrecht, pp. 4164–4166, doi:10.1007/978-94-007-0753-5_1863, ISBN978-94-007-0753-5, retrieved 8 June 2025.
17. Murphy D.J. and Hall C.A.S. Year in review - EROI or energy return on (energy) invested / Ann. N.Y. Acad. Sci. – 2010. - №1185. - P. 102–118.
18. А.С. Смоляков и др. Методика сравнительного анализа нормированной стоимости производства электроэнергии для обоснования модернизации энергосистем Дальнего Востока //Естественно-гуманитарные исследования №2 (58), 2025. -С 425-429.
19. <https://vestnik.ispu.ru>.
20. Short W., Packey D.J., Holt Th. A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. NREL; U.S. DoE; Midwest Research Institute. Golden, Colorado, U.S. Mart 1995. 120 p.
21. Общий отчет: "Lazard LCOE: приведенная стоимость электроэнергии". Lazard. Июнь 2025. -14 с.

REFERENCES

1. World Energy Council (2019), Energy & Mobility Background material report, London.
2. Allaev K.R. Modern Energy and Its Development Prospects / edited by Salimov A.U. - T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. - 952 p. (In Russ.).
3. Voropai N.I. Directions and Problems of Transformation of Electric Power Systems / N.I. Voropai // Electricity, 2020. - No. 7. - Pp. 12-21. (In Russ.).
4. O.V. Radionova, R.A. Sitdikov, S.B. Talipova. Clustering of Energy in the Context of the Energy Transition of the Republic of Uzbekistan. // PROBLEMS OF ENERGY AND SOURCES SAVING scientific and technical Journal. 2025, No. 4. pp. 16-25. (In Russ.).
5. Systems Research in Energy: Methodology and Results // Ed. A.A. Makarov and N.I. Voropaya. - M.: INEI, MPEI Publishing House, 2018. - 309 p. ISBN 978-5-383-01306-9. (In Russ.).
6. Global Renewable Energy [Электронный ресурс] Официальный сайт International Energy Agency URL: <https://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/> (дата обращения: 04.03.2018).
7. World Reserves of Natural Resources: How Many Years Will the Earth Have Enough Minerals? [Electronic resource]: URL: <https://lindeal.com/trends/mirovye-zapasy-prirodnikh-resursozna-skolko-let-zemle-khvatit-poleznykh-iskopaemykh> (accessed: 21.05.2023). (In Russ.).
8. Forecast for the Development of the Energy Sector of the World and Russia to 2024 / edited by A.A. Makarov, V.A. Kulagin, D.A. Grushevenko, A.A. Galkina; ERI RAS – Moscow, 2024. – 208 p. - ISBN 978-5-91438-038-7. (In Russ.).

9. Murphy D.J.; Hall C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested (англ.) // Annals of the New York Academy of Sciences: journal. — 2010. — Vol. 1185. — P. 102—118. — doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.
10. Gupta, Ajay K; Hall, Charles A.S. A Review of the Past and Current State of EROI Data (англ.)// Sustainability: journal. - 2011. - Vol. 3, no. 10. - P. 1796-1809. - doi:10.3390/su3101796.
11. Temukuev, T.B. "On the Method of Calculating EROEI Taking into Account the Energy Efficiency Factor" // Economics and Management. 2014, 3(112). —P. 62-67. (In Russ.).
12. Smith, J. (2019). Levelized Cost of Energy (LCOE). Encyclopedia of Sustainable Technologies. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11518-X>. (In Russ.).
13. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Renewable Power Costs in 2019. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. (In Russ.).
14. U.S. Energy Information Administration (EIA). (2021). Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generating Resources in the 2021 Annual Energy Outlook. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf. (In Russ.).
15. Klimenko, I. S. Systems Theory and Systems Analysis [Electronic resource]: a tutorial / I. S. Klimenko. - Electronic text data. - Moscow: Russian New University, 2014. - 264 p. - 978-5-89789-093-4. (In Russ.).
16. Zhang, Ling (2014), "Multi-attribute Decision Making", Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research, Springer, Dordrecht, pp. 4164–4166, doi:10.1007/978-94-007-0753-5_1863, ISBN978-94-007-0753-5, retrieved 8 June 2025.
17. Murphy D.J. and Hall C.A.S. Year in review - EROI or energy return on (energy) invested / Ann. N.Y. Acad. Sci. – 2010. - №1185. - P. 102–118.
18. A.S. Smolyakov et al. Methodology of comparative analysis of the standardized cost of electricity production to justify the modernization of energy systems in the Far East // Natural Sciences and Humanities Research No. 2 (58), 2025. - P. 425-429. <https://vestnik.ispu.ru>. (In Russ.).
19. <https://vestnik.ispu.ru>.
20. Short W., Packey D.J., Holt Th. A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. NREL; U.S. DoE; Midwest Research Institute. Golden, Colorado, U.S. Mart 1995. 120 p.
21. Lazard LCOE: Levelized Cost of Electricity, a summary report. Lazard. June 2025. -14 p.