



УДК 620.9:338.24

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.32](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.32)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ
К ФОРМИРОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Григорьева Н.А.*, к.э.н., доцент¹, **Данилевский Л.Н.**, д.т.н., доцент¹,
Расаходжаев Б. С., д.т.н., профессор²

¹ Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища - НИПТИС им. Атаева С.С.»,
Республика Беларусь, 220076, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 15.

² Лаборатория Национального научно-исследовательского института Возобновляемых
источников энергии при Министерстве энергетики РУз, Республика Узбекистан, 100084, г.
Ташкент, 1-й проезд Чингиза Айтматова, 2Б, корпус 2.

*e-mail: ggrigoryeva@gmail.com

Аннотация. В статье обоснована необходимость перехода от статического формирования структуры энергобаланса к ее периодической корректировке в условиях трансформации энергетического комплекса. Показано, что существующие подходы недостаточно учитывают изменение стоимости энергоресурсов и технологий, системные затраты интеграции переменной генерации, обеспеченную мощность, покрытие пиковой нагрузки, гибкость энергосистемы и требования декарбонизации. На основе анализа нормативных, аналитических и научных источников сформулированы методические предпосылки дальнейшей разработки критериев, триггеров и ограничений пересмотра целевой структуры энергобаланса.

Ключевые слова: энергобаланс, корректировка энергобаланса, энергетический комплекс, возобновляемые источники энергии, обеспеченная мощность, пиковая нагрузка, гибкость энергосистемы, системные затраты, декарбонизация.

UDC 620.9:338.24

**STUDY OF TECHNICAL AND ECONOMIC APPROACHES
TO THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE ENERGY COMPLEX**

Grigoryeva N.A.*, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor¹, **Danilevsky L.N.**, Dr. Sci. (Eng.),
Associate Professor¹,
Rasakhodzhaev B.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor²

¹Republican Unitary Enterprise “Institute of Housing - NIPTIS named after S.S. Ataev”,
Republic of Belarus, 220076, Minsk, F. Skorina St., 15.

²Laboratory of the National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of
Energy of the Republic of Uzbekistan, Republic of Uzbekistan, 100084, Tashkent, 1st Chingiz
Aitmatov Lane, 2B, Building 2.

*e-mail: ggrigoryeva@gmail.com

Abstract. The article substantiates the need to shift from the static formation of the energy balance structure to its periodic adjustment under conditions of transformation of the energy complex. It is shown that existing approaches do not sufficiently take into account changes in the cost of energy resources and technologies, system costs of integrating variable generation, firm capacity, peak load coverage, power system flexibility, and decarbonization requirements. Based on the analysis of regulatory, analytical, and scientific sources, methodological prerequisites are formulated for the further development of criteria, triggers, and constraints for revising the target structure of the energy balance.

Keywords: energy balance, energy balance adjustment, energy complex, renewable energy sources, firm capacity, peak load, power system flexibility, system costs, decarbonization.



Введение

Рациональное формирование структуры энергобаланса относится к числу актуальных задач развития энергетического комплекса, поскольку соотношение различных источников энергии влияет на надежность энергоснабжения, стоимость энергии, уровень импортозависимости, объем выбросов парниковых газов, инвестиционную нагрузку и технологическую устойчивость энергосистемы. В условиях изменения цен на топливно-энергетические ресурсы, снижения стоимости отдельных возобновляемых технологий, развития накопителей энергии, усиления климатического регулирования и роста требований к энергетической безопасности структура энергобаланса должна рассматриваться не как неизменная пропорция источников энергии, а как динамическая система, требующая периодической корректировки. Терминологическая база исследования опирается на нормативные правовые акты Республики Беларусь, определяющие понятия энергетической эффективности [1], возобновляемых источников энергии [2], энергетической безопасности [3], а также увязывающие задачи энергоэффективности, устойчивого энергоснабжения, использования местных топливно-энергетических ресурсов и развития энергетической инфраструктуры [4].

Актуальность проблемы подтверждается динамикой стоимости энергетических технологий. Международное агентство по возобновляемой энергии (International Renewable Energy Agency, далее - IRENA) отмечает, что в 2023 г. глобальная средневзвешенная приведенная стоимость электроэнергии новых солнечных фотоэлектрических проектов промышленного масштаба снизилась на 12% по сравнению с 2022 г., наземной ветровой генерации - на 3%, морской ветровой генерации - на 7% [6]. Программа фотоэлектрических энергетических систем Международного энергетического агентства (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, далее - IEA PVPS) анализирует развитие фотоэлектрических систем за период 1992-2023 гг. [5]. В долгосрочном горизонте требуется учитывать и перспективные направления: Международное агентство по атомной энергии (International Atomic Energy Agency, далее - IAEA) рассматривает термоядерный синтез как потенциально практически неограниченный чистый источник энергии, способный в перспективе внести вклад в диверсификацию генерации [9].

Таким образом целью статьи является обоснование необходимости дальнейшей разработки методического аппарата корректировки структуры энергетического комплекса в условиях трансформации энергобаланса. Достижение указанной цели предполагает выявление методических противоречий существующих подходов, определение факторов, вызывающих необходимость пересмотра энергобаланса, и формирование логики дальнейшего исследования его корректировки.

Методы и материалы

Исследование носит теоретико-методический характер и направлено на обоснование научной задачи последующей разработки методического аппарата корректировки структуры энергобаланса. В работе использованы методы системного анализа, сравнительного анализа, логического обобщения, анализа нормативных правовых источников и научной литературы. Системный анализ применен для рассмотрения энергобаланса как совокупности взаимосвязанных технологических, экономических, экологических и надежности параметров. Сравнительный анализ использован для сопоставления существующих подходов к формированию энергобаланса и выявления их ограничений. Информационную базу составили нормативные правовые акты Республики Беларусь в сфере энергосбережения, использования возобновляемых источников энергии и обеспечения энергетической безопасности [1-4], международные аналитические материалы IEA PVPS, IRENA, Европейской сети операторов систем передачи электроэнергии (European Network of Transmission System Operators for Electricity, далее - ENTSO-E), IAEA [5-9], а также научные работы по стратегическому энергетическому планированию и многокритериальной оценке энергетических решений [10-11]. Объектом исследования является структура энергобаланса энергетического комплекса. Предметом исследования выступают методические условия и



факторы ее корректировки в условиях изменения стоимости энергоресурсов и энергетических технологий. Целью статьи является обоснование необходимости дальнейшей разработки методического аппарата корректировки структуры энергобаланса.

Значительный вклад в разработку теоретических и методических подходов к стратегическому планированию развития энергетики, моделированию перспективных энергетических систем и анализу перехода к возобновляемым источникам энергии внесли Н. Lund, B.V. Mathiesen, K. Karlsson, P.A. Østergaard, F. Hvelplund, D. Connolly. Вопросы открытого моделирования энергетических систем и долгосрочного инвестиционного планирования рассмотрены в работах M. Howells, H. Rogner, N. Strachan, C. Heaps, H. Huntington при разработке модели OSeMOSYS - Open Source Energy Modelling System [10]. Многокритериальная оценка направлений развития возобновляемых источников энергии представлена в работах A. Lenarczyk, M. Jaskólski, P. Bućko [11].

В белорусском и смежном научном контексте вопросы энергоэффективности, энергетической безопасности, рационального использования топливно-энергетических ресурсов, оценки энергетических и экономических эффектов исследовались Л.Н. Данилевским, Н.А. Григорьевой, Л.П. Падалко, А.М. Заборовским, Т.Г. Зориной, Т.Ф. Манцеровой, В.Н. Нагорновым, Т.В. Романьковой, Б.И. Рубенчиком, А.Н. Сидоровым, Н.А. Смольской, А.Г. Таболовым, В.И. Трутаевым, Л.В. Шенцом [12-13]. Вместе с тем, научная задача постоянной корректировки целевой структуры энергобаланса в зависимости от изменения стоимости энергоресурсов, технологий, требований к декарбонизации, надежности и локальности еще не получила достаточного методического развития.

Результаты

Формирование структуры энергобаланса в условиях трансформации энергетического комплекса сопровождается возникновением методических противоречий. Их сущность заключается в том, что новые технологические и климатические условия изменяют требования к источникам энергии быстрее, чем традиционные балансовые подходы успевают отражать эти изменения в целевых параметрах энергобаланса. В связи с этим требуется рассматривать не отдельные факторы корректировки, а взаимосвязь между изменениями в энергетическом комплексе, проявлением этих изменений, ограничениями существующих подходов и методическим результатом, необходимым для дальнейших исследований (таблица 1).

Таблица 1.

Методические противоречия формирования структуры энергобаланса в условиях трансформации энергетического комплекса

Table 1.

Methodological Contradictions in Shaping the Energy Balance Structure amid the Transformation of the Energy Complex

Изменение в энергетическом комплексе	Проявление изменения	Ограничение существующих подходов	Результат
Снижение стоимости возобновляемых энергетических технологий	Солнечная и ветровая генерация из дополнительных источников постепенно переходят в группу экономически конкурентных технологий новой генерации	Структура энергобаланса, рассчитанная на основе прежних стоимостных соотношений, может сохраняться инерционно, несмотря на изменение экономической рациональности источников	Требуется периодическая переоценка структуры энергобаланса с учетом изменения стоимости технологий, а не только изменения спроса на энергию
Рост значения системных затрат интеграции ВИЭ	При увеличении доли солнечной и ветровой генерации возрастает значение резервирования, накопителей, сетевых ограничений и балансирования	Сравнение источников только по приведенной стоимости электроэнергии не отражает полной нагрузки на энергосистему	Необходимо переходить от оценки стоимости отдельной технологии к оценке ее системного эффекта
Усиление роли пиковой нагрузки и обеспеченной мощности	Источник с высокой годовой выработкой не всегда способен участвовать в покрытии максимума потребления	Традиционная структура энергобаланса часто отражает объемы производства, но не показывает надежный вклад источника в критические периоды	Требуется учитывать обеспеченную мощность, участие в покрытии пика, резервы и вероятность непокрытия спроса
Рост доли переменной генерации	Солнечная и ветровая генерация зависят от погодных, сезонных и суточных условий	Увеличение доли ВИЭ без учета гибкости может ухудшать управляемость энергосистемы	Необходимо включать в оценку накопители энергии, управляемый



			спрос, прогнозирование генерации и сетевую гибкость
Одновременное действие требований декарбонизации и энергетической безопасности	Необходимо снижать выбросы, но одновременно сохраняя надежность и доступность энергоснабжения	Климатически предпочтительный сценарий не всегда является системно устойчивым, а наиболее надежный сценарий не всегда соответствует низкоуглеродным требованиям	Требуется многокритериальная оценка, совмещающая экологические, надежные, стоимостные и стратегические параметры
Различная территориальная пригодность источников энергии	Солнечная, ветровая, биогазовая, биомассовая и гидроэнергетика имеют разные требования к ресурсу, сетям, логистике и площадкам	Универсальные целевые доли ВИЭ не учитывают различия природно-ресурсных и инфраструктурных условий	Необходима оценка локальной пригодности источников энергии для конкретной энергосистемы или региона

Из данных таблицы 1 следует, что корректировка структуры энергобаланса обусловлена снижением стоимости возобновляемых технологий, ростом требований к резервированию, накопителям, сетевой инфраструктуре и гибкости спроса, а также задачами декарбонизации. При этом ограничение углеродоемких источников не отменяет необходимости обеспечения пиковой нагрузки, надежности и энергетической безопасности. Важным критерием является ресурсная адекватность. European Network of Transmission System Operators for Electricity использует European Resource Adequacy Assessment для оценки способности энергосистемы покрывать спрос, включая риски дефицита мощности и недоотпуска электроэнергии [7]. Поэтому энергобаланс следует оценивать не только по установленной мощности и годовой выработке, но и по обеспеченной мощности, резервам и покрытию пиковых нагрузок.

Корректировку энергобаланса целесообразно представить как алгоритм, включающий мониторинг условий, основания для пересмотра, переоценку источников энергии, формирование сценариев и проверку ограничений с учетом стоимости, спроса, выбросов, гибкости энергосистемы, накопителей энергии и технологической зрелости решений (рисунок 1).

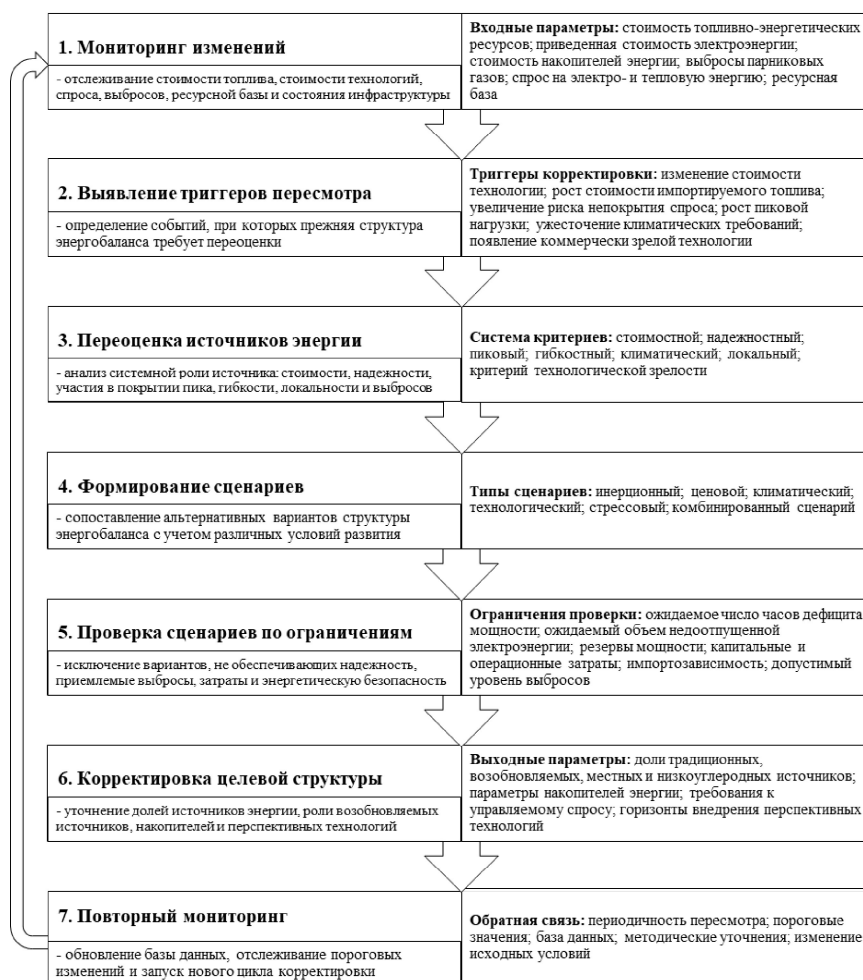


Рис. 1. Алгоритм корректировки структуры энергобаланса.
Fig. 1. Algorithm for Revising the Structure of the Energy Balance.



Представленный алгоритм показывает, что корректировка структуры энергобаланса должна рассматриваться как повторяемый цикл, включающий мониторинг изменений, обновление исходных данных, выявление оснований для пересмотра и переоценку роли отдельных источников энергии. Такой подход позволяет перейти от инерционного сохранения сложившихся пропорций к адаптивной модели энергобаланса, учитывающей изменение стоимости технологий, требований к надежности, климатических ограничений и доступности ресурсов. Особое значение в данном алгоритме имеет гибкость энергосистемы. При росте доли переменной генерации возрастает роль управляемого спроса, накопителей энергии и сетевых решений. Международное энергетическое агентство рассматривает гибкость спроса как инструмент более эффективного использования генерирующих и сетевых активов, снижения пиковой нагрузки, сетевых ограничений и интеграции чистой энергии [8]. Поэтому управляемый спрос должен учитываться как самостоятельный элемент корректировки энергобаланса.

При этом источники энергии необходимо разделять по горизонту применения и системной роли. Солнечная и ветровая энергетика, биомасса, биогаз, малая гидроэнергетика, накопители энергии и управляемый спрос могут рассматриваться в текущем и среднесрочном планировании, тогда как термоядерный синтез и иные технологии дальнего горизонта должны учитываться только в контуре научно-технологического прогноза. Возобновляемые источники энергии также не являются однородными: их эффективность зависит от инсоляции, ветрового потенциала, сырьевой базы, логистики, сетевых условий и территориальной пригодности.

Следовательно, дальнейшие исследования должны быть направлены на формирование системы триггеров пересмотра энергобаланса. К ним могут относиться изменение стоимости топлива или технологий, ухудшение показателей надежности, рост пиковой нагрузки, изменение климатических требований, снижение доступности местных ресурсов, появление коммерчески зрелых технологий и изменение структуры спроса. Формализация таких триггеров позволит перейти от реактивной корректировки к регулярной адаптации структуры энергобаланса.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что структура энергобаланса в условиях трансформации энергетического комплекса должна рассматриваться не как неизменное соотношение источников энергии, а как динамическая система, подлежащая периодической корректировке. Такая корректировка обусловлена не только изменением спроса на энергию, но и изменением стоимости топливно-энергетических ресурсов и технологий, развитием возобновляемых и низкоуглеродных источников, усилением требований к надежности энергоснабжения, декарбонизации и энергетической безопасности. Выявлены методические противоречия, ограничивающие применение традиционных подходов к формированию энергобаланса. Снижение стоимости возобновляемых технологий повышает их конкурентоспособность, однако рост их доли одновременно усиливает значение системных затрат, резервирования, накопителей энергии, сетевых ограничений и управляемого спроса. Источники с высокой годовой выработкой не всегда обеспечивают необходимый вклад в покрытие пиковой нагрузки, а климатически предпочтительные сценарии не всегда являются достаточными с точки зрения надежности и энергетической безопасности. Это требует перехода от оценки отдельных источников энергии к оценке их системной роли в энергетическом комплексе.

Предложен алгоритм корректировки структуры энергобаланса, включающий мониторинг изменений технологической и технической базы энергетического баланса, выявление триггеров пересмотра, переоценку значимости источников энергии, формирование сценариев, проверку ограничений и последующее уточнение целевых параметров. Методическое значение такого подхода состоит в возможности формализовать условия, при которых ранее принятая структура энергобаланса утрачивает актуальность и требует пересмотра. Дальнейшее развитие исследования целесообразно направить на



разработку системы критериев и индикаторов корректировки энергобаланса, включая оценку значимости источников энергии, прогноз стоимости технологий и топлива и приведенных системных затрат, обеспеченную мощность, участие в покрытии пиковой нагрузки, гибкость энергосистемы, уровень выбросов, локальную пригодность источников энергии и степень технологической и технической проработки перспективных решений. Полученные положения могут служить основой для последующей оптимизационной постановки задачи формирования рациональной структуры энергобаланса.

Литература

1. Об энергосбережении : Закон Респ. Беларусь, 8 янв. 2015 г., № 239-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. - URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11500239> (дата обращения: 12.05.2026).
2. О возобновляемых источниках энергии : Закон Респ. Беларусь, 27 дек. 2010 г., № 204-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. - URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H11000204> (дата обращения: 12.05.2026).
3. Об изменении постановления Совета Министров Республики Беларусь от 23 декабря 2015 г. № 1084 : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 2 апр. 2026 г., № 161 // Правительство Республики Беларусь. - URL: <https://www.government.by/sites/default/files/resolution/2026-04/161.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).
4. О Государственной программе «Устойчивая энергетика и энергоэффективность» на 2026 - 2030 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 31 дек. 2025 г., № 819 // Правительство Республики Беларусь. - URL: <https://www.government.by/sites/default/files/resolution/2026-01/819.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).
5. Trends in Photovoltaic Applications 2024 / International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. - URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/10/IEA-PVPS-Task-1-Trends-Report-2024.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).
6. Renewable Power Generation Costs in 2023 / International Renewable Energy Agency. - Abu Dhabi : IRENA, 2024. - URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (дата обращения: 12.05.2026).
7. European Resource Adequacy Assessment // European Network of Transmission System Operators for Electricity. - URL: <https://www.entsoe.eu/eraa/> (дата обращения: 12.05.2026).
8. The Value of Demand Flexibility / International Energy Agency. - Paris : IEA, 2025. - URL: <https://www.iea.org/reports/the-value-of-demand-flexibility> (дата обращения: 12.05.2026).
9. IAEA World Fusion Outlook 2025 / International Atomic Energy Agency. - Vienna : IAEA, 2025. - URL: <https://www.iaea.org/publications/15935/iaea-world-fusion-outlook-2025> (дата обращения: 12.05.2026).
10. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System. An introduction to its ethos, structure and development / M. Howells [et al.] // Energy Policy. - 2011. - Vol. 39, № 10. - P. 5850-5870. - DOI: 10.1016/j.enpol.2011.06.033.
11. Lenarczyk, A. The Application of a Multi-Criteria Decision-Making for Indication of Directions of the Development of Renewable Energy Sources in the Context of Energy Policy / A. Lenarczyk, M. Jaskólski, P. Bućko // Energies. - 2022. - Vol. 15, № 24. - Article 9629. - DOI: 10.3390/en15249629.
12. Григорьева, Н.А. Методическое обеспечение экономической оценки энергоэффективности жилых зданий : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Н.А. Григорьева. - Минск : БНТУ, 2019. - 179 с.
13. Данилевский, Л.Н. Энергоэффективные жилые здания: тепловая защита; утилизация тепловых выбросов; измерение теплоэнергетических показателей. LAMBERT Academic Publishing 2018, 540 с.