

Научная статья

УДК 621.3, 338.2, 005.5

JEL: L94, O12, P28

<https://doi.org/10.18184/2079-4665.2024.15.3.356-370>

О путях снижения издержек энергоснабжения в России

Некрасов Сергей Александрович¹, Клименко Владимир Викторович²¹Центральный экономико-математический институт РАН; Москва, Россия²Национальный исследовательский университет «МЭИ»; Москва, Россия¹san693@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7649-0515>²KlimenkoVV@mpei.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1397-1311>

Аннотация

Цель работы – исследование путей снижения издержек энергоснабжения российских потребителей.

Методы. Анализ трансформации электроэнергетики выполнен с использованием инструментария тектологии и системной экономической теории.

Результаты работы. Выявлена ключевая причина постоянного роста стоимости энергоснабжения, которая заключается в переходе от системного подхода в развитии энергетики, направленного на рост общеэкономической эффективности, к максимизации экономических показателей самостоятельных энергетических компаний. Обоснована необходимость корректировки базовых основ, заложенных в концепцию развития электроэнергетики.

Выводы. Результатом успешного завершения реформы российской электроэнергетики является устойчивый на протяжении десятилетий приток в отрасль значительных инвестиций. Однако, несмотря на увеличение мощности энергосистемы, опережающее динамику спроса на электроэнергию, растет потребность в наиболее дорогих пиковых источниках электроэнергии и системах аккумулирования энергии, что ведет к дополнительному для инвестиционной составляющей росту цен на электроэнергию. Выявлена положительная обратная связь, снижающая структурную устойчивость энергетики, а именно: между ростом цен на электроэнергию; сокращением электропотребления из сети в результате установки частью потребителей собственной генерации; увеличением издержек генерирующих и сетевых компаний; более интенсивным ростом цен на электроэнергию и усилением мотивации в установке собственной генерации той части потребителей, которая продолжает использовать сетевую электроэнергию. Предложены пути и рассмотрены решения, направленные на формирование новых связей между участниками единого технологического процесса производства, передачи и потребления энергетических ресурсов, с целью сокращения издержек энергоснабжения и улучшения удельных показателей функционирования энергосистемы, а в перспективе – снижения затрат на интеграцию в нее возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: издержки энергоснабжения, реформа электроэнергетики, тектология, системная экономическая теория, экономическая тетрада, структурная устойчивость

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в НИУ «МЭИ» в части исследования энергетики России (проект 20-19-00721-П) и в ИНЭИ РАН в части исследования зарубежных энергосистем (проект 21-79-30013).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Некрасов С. А., Клименко В. В. О путях снижения издержек энергоснабжения в России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2024. Т. 15. № 3. С. 356–370

EDN: <https://elibrary.ru/awwefq>. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2024.15.3.356-370>

© Некрасов С. А., Клименко В. В., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

On ways to reduce the energy supply costs in Russia

Sergey A. Nekrasov¹, Vladimir V. Klimenko²¹Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia²National Research University "MPEI"; Moscow, Russia¹san693@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7649-0515>²KlimenkoVV@mpei.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1397-1311>

Abstract

Purpose: is to research of ways to reduce the energy supply costs for Russian consumers.

Methods: the analysis of the transformation of the electric power industry was carried out using the tools of tectology and system economic theory.

Results: the key reason for the constant increase in the cost of energy supply has been identified, which is the transition from a systematic approach to energy development aimed at increasing general economic efficiency to maximizing the economic performance of independent energy companies. The need to adjust the basic principles laid down in the concept of electric power industry development is substantiated.

Conclusions and Relevance: the result of the successful completion of the reform of the Russian electric power industry is a steady influx of significant investments into the industry over the course of decades. But despite the increase in power system capacity, which is outstripping the dynamics of electricity demand, the need for the most expensive peak power sources and energy storage systems is growing, which leads to an increase in electricity prices in addition to the investment component. A positive feedback has been identified that reduces the structural stability of the energy sector, namely: between rising electricity prices; reduction of electricity consumption from the network as a result of the installation of their own generation by some consumers; increasing costs of generating and network companies; more intensive growth in electricity prices and increased motivation to install their own generation for that part of consumers who continue to use grid electricity. The ways are proposed and the solutions are considered aimed at forming new connections between participants in the single technological process of production, transmission and consumption of energy resources, with the aim of reducing the energy supply costs and improving the specific performance indicators of the energy system, and in the future reducing the costs of integrating renewable energy sources into it.

Keywords: energy supply costs, electricity reform, tectology, system economic theory, economic notebook, structural stability

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation at the National Research University "MPEI" in terms of studying the energy sector of Russia (project 20-19-00721-P) and at the Institute of Energy Research of the Russian Academy of Sciences in terms of studying foreign energy systems (project 21-79-30013).

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Nekrasov S. A., Klimenko V. V. On ways to reduce the energy supply costs in Russia. *MIR (Modernizatsiia. Innovatsii. Razvitie) = MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2024; 15(3):356–370. (In Russ.)

EDN: <https://elibrary.ru/awwefq>. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2024.15.3.356-370>

© Nekrasov S. A., Klimenko V. V., 2024

Введение

В последние годы наблюдается качественное изменение динамики экономического развития большинства Европейских стран. ВВП промышленных лидеров Европы снижается. Например, ВВП Германии сокращается с последнего квартала 2022 г., по итогам 2023 г. он снизился на 0,3%¹, и прогнозируется, что эта негативная тенденция сохранится

в 2024 г.² Одной из причин происходящего процесса является увеличение стоимости энергоснабжения, и ее значимость для той или иной страны тем больше, чем выше удельная страновая энергоёмкость экономики.

Энергоёмкость отечественной экономики выше среднемирового уровня: доля Российской Федерации в мировом потреблении электроэнергии

¹ Lindner Says Germany's Lack of Growth Makes Country Poorer // Bloomberg. 05.02.2024. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-02-05/lindner-says-germany-s-lack-of-growth-is-making-country-poorer?srd=premium-europe> (дата обращения: 02.05.2024)

² Germany Likely To Fall Into Recession: Central Bank // Barron's. 19.02.2024. URL: <https://www.barrons.com/news/germany-likely-to-fall-into-recession-central-bank-f27b8ffc> (дата обращения: 22.05.2024)

превышает ее долю в мировом ВВП. Поэтому величина издержек энергоснабжения для российских потребителей, особенно в секторе промышленности, является параметром более значимым по сравнению со странами с меньшей энергоемкостью. Однако к 2018 г. страна стала антилидером по величине среднего тарифа на электроэнергию для промышленных потребителей. Это показано на основе сопоставления этого показателя в России и 14-ти странах, а также в ЕС-28 и в мире, несмотря на лидерство России в наиболее инновационной области электроэнергетики – атомной, традиционно, на протяжении десятилетий, обеспечивающей отечественное народное хозяйство дешевой электроэнергией АЭС. Подобное соотношение сформировалось в условиях наилучшей обеспеченности антилидера первичными энергетическими ресурсами и статуса их экспортера в страны, рассмотренные в исследовании ИПЕМ [1].

В этой связи следует обратить внимание на все более усиливающийся тренд мировой энергетики – рост доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ). С одной стороны, он снижает значимость экспорта первичных энергоресурсов и зависимость от него стран-импортеров, а с другой, особенно на первоначальном этапе, когда энергия ВИЭ дороже по сравнению с традиционной энергетикой, дополнительно увеличивает цены на электроэнергию. Поэтому возрастание платежей по договорам предоставления мощности возобновляемых источников энергии (ДПМ ВИЭ) становится новым, все более существенным с каждым годом фактором, усиливающим рост цен на электроэнергию для российских потребителей [2].

В долгосрочной перспективе негативное влияние на стоимость электроснабжения в результате развития возобновляемой энергетики уменьшится, поскольку цены на электроэнергию ВИЭ в мире ежегодно снижаются: начиная с 2020 г. электроэнергия ветровых электростанций США предлагается по цене около 2-х центов за кВт·ч, а цены на электроэнергию солнечных электростанций в ряде штатов опустилась ниже 2,5 центов за кВт·ч (до 2,375 центов в Неваде, до 2,49 центов в Аризоне и Техасе, а в штате Айдахо, сравнимом по природным условиям с рядом регионов юга России, до 2,175 центов за кВт·ч)³. Однако до тех пор, пока существуют предпосылки для обоснования более высоких цен на электроэнергию ВИЭ по сравнению с традиционной энергетикой, актуальным вопросом является поиск путей снижения издержек интеграции ВИЭ в энергосистему.

Цель статьи – на основе анализа причин роста издержек энергоснабжения разработать пути их снижения с учетом тенденций развития мировой энергетики.

Обзор литературы и исследований

Развитие ВИЭ является значительным, но только одним из множества вызовов, с которым сталкивается электроэнергетика в современной глобальной климатической повестке достижения целей декарбонизации экономики [3]. Среди работ, в которых исследовались пути развития отрасли в период ее реформирования отметим [4–6]. Противоречия в отрасли после завершения реформы исследуют как оппоненты реформирования, так и его идеологи [7, 8].

Рассматривая результаты реформы электроэнергетики в контексте динамики цен на электроэнергию, можно прийти к заключению, что в итоге реформирования отрасль стала «энергетическим тормозом» развития российской экономики [9]; во многих исследованиях указывается на возможность снижения издержек энергоснабжения в результате дополнительных преобразований в электроэнергетике [6, 8, 10].

Реформа электроэнергетики не была полностью завершена ни в одной стране: технологические и социальные изменения требуют постоянного пересмотра принципов функционирования рынков электроэнергии и поиска более эффективных механизмов управления. Российская электроэнергетика не является исключением из этого правила: в 2008 г. в стране завершился только первый этап ее реформы. Был проведен комплекс структурных преобразований, сформированы рынки. Произошло масштабное поступление инвестиций в отрасль [7], высокие показатели социальной устойчивости стали ее отличительной особенностью. Рентабельность предприятий генерации, передачи и распределения электроэнергии стала более высокой по сравнению со средними показателями в экономике [11].

Однако, несмотря на перераспределение капитала из неэнергетических отраслей в электроэнергетику⁴, не снижается потребность ни в новых источниках, производящих самую дорогую – пиковую электроэнергию, ни в накопителях энергии. Высоки затраты интеграции в энергосистему возобновляемых источников энергии. Исследования ИНЭИ РАН показывают, что *системные издержки* (в частности, необходимость частичного дублирования

³ Weaver John. New record low solar power price? 2.175¢/kWh in Idaho. 27.03.2019. PV Magazine. URL : <https://pv-magazine-usa.com/2019/03/27/idaho-seeks-record-low-solar-power-price-2-175%2A2-kwh/> (дата обращения: 02.02.2024)

⁴ Грачев И.Д., Некрасов С.А. Влияние маржинального ценообразования в электроэнергетике на экономику // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. Т. 9. № 4(193). С. 2–6. EDN: <https://elibrary.ru/pmqaed>

мощности) увеличивают цены на электроэнергию, произведенную ветровыми электростанциями (ВЭС) на 30%, а цены на электроэнергию солнечных (СЭС) – на 40%. Применение накопителей приводит к дополнительному росту цен электроэнергии на 60–80%. Проведенные расчеты стали основой для обоснования цен электроэнергии в 2035 г.: для ВЭС в 8,04 руб./кВт·ч, а для СЭС в 11,06 руб./кВт·ч [12].

Материалы и методы

Научной гипотезой дальнейших рассуждений является предположение, что проблема системных издержек российской электроэнергетики заключается в концептуальных положениях, заложенных в основу функционирования отрасли.

Для проверки ее состоятельности выявим отличия базовых принципов развития отечественной электроэнергетики, сформулированных на начальных этапах ее становления в плане ГОЭЛРО и скорректированных по мере создания ЭЭС, с сегодняшними целями функционирования объектов отрасли. Будем основываться на методологии всеобщей организационной науки – тектологии, разработанной А.А. Богдановым в период обсуждения плана ГОЭЛРО [13], а впоследствии развитой в системную экономическую теорию Г.Б. Клейнером [14, 15].

Исходя из предположения об единстве законов организации для всех систем, автором всеобщей организационной науки было обосновано, что исследование каждой системы должно опираться на рассмотрение как отношений всех ее частей, так и ее отношений со средой, то есть со всеми внешними системами [16]. В первые годы молодого Советского государства А.А. Богданов значительное внимание уделял исследованию организационных принципов хозяйственного плана его развития. Результаты были представлены в 1921 г., когда происходило создание Государственной общеплановой комиссии при Совете труда и обороны РСФСР, впоследствии преобразованной в Государственный плановый комитет СССР. В этот период происходило обсуждение исходных положений плана Государственной электрификации России. Электрификация всей страны стала пониматься как базис для развития наиболее передовых производительных сил. На основе электрификации предполагалось проведение планомерного перевооружения народного хозяйства, культуры и быта [17].

План ГОЭЛРО был направлен на повышение эффективности производства в результате роста производительности труда в стране во всех отрас-

лях, а не на улучшение экономических результатов деятельности энергетических компаний. Путем достижения этой цели было замещение ручного труда за счет широкого внедрения в хозяйственную деятельность электрической энергии. Рост производительности труда в экономике страны мог быть достигнут только путем развития энергетики, согласованным с развитием других отраслей экономики. Предполагался переход от роста показателей деятельности отдельных хозяйствующих объектов к развитию экономики как единого целого, «сводящейся к тому, что усиливаются или возникают такие связи, которые направлены на ослабление системных противоречий и на сохранение функциональной целостности системы» [18]. Начиная с плана ГОЭЛРО энергетика создавалась как сложная совокупность трансформаций всех видов энергии – от получения энергетических ресурсов до приемников энергии включительно [19].

В первой половине XX века наиболее значимыми потребителями электроэнергии были промышленные предприятия. Основой комплексного развития энергетики в этот период являлась координация их взаимодействия с развитием энергосистемы. Процесс обеспечивался согласованной работой академических, научно-исследовательских энергетических и отраслевых институтов, направленной на устранение противоречий, возникающих при производстве, передаче и потреблении электроэнергии. А поскольку электропотребление происходило во всех отраслях экономики, из положений ГОЭЛРО следовала необходимость ингрессии экономики с этими отраслями.

Ингрессия – новый термин, введенный А.А. Богдановым для обозначения процесса соединения различающихся элементов в одно целое, вхождения элемента одного комплекса в другой. С латинского (*ingressio*) он переводится как вхождение, медленное («вековое» в геофизике) проникновение морских вод в понижения рельефа прибрежной суши при повышении уровня моря или погружении берега⁵. Ингрессии экономических систем возникают путем формирования межотраслевых связей. Противоположный процесс – дезингрессия – является результатом разрыва ранее существовавших связей и последующего разделения системы на несколько самостоятельных.

Непрерывно проводимая на протяжении десятилетий координация имела межотраслевой характер и не ограничивалась отдельными предприятиями. По мере совершенствования технических решений происходило замещение устаревших технологий на отвечающие возрастающим тре-

⁵ Большой энциклопедический словарь: [В 2 т.] / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. энцикл., 1991. URL: <https://search.rsl.ru/record/01001616257> (дата обращения: 03.06.2024)

бованиям народного хозяйства. Но на протяжении 1920–1990-х гг. вектор эволюции энергетики оставался направленным на снижение издержек энергоснабжения, а само ее развитие было согласовано с надсистемой – экономикой страны.

В результате ингрессии энергетики с другими отраслями экономики росла *структурная устойчивость* – способность энергетики как системы сохранять функционирование при усилении внешних воздействий. Среди проявлений роста структурной устойчивости можно назвать повышение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) энергосистемы, снижение удельного расхода условного топлива (УРУТ) на производство электроэнергии. Помимо этих количественных показателей необходимо отметить качественные трансформации. Была достигнута самообеспеченность собственной научно-технической базы. В короткий период произошло становление отечественных научных школ: были созданы отраслевые НИИ, проектные институты. Постоянно совершенствовалось энергомашиностроение, и новые разработки воплощались в металле.

В результате, в 1930-е гг. энергетика как экономическая система стала представлять собой тетраду с преобладанием системы *средового* типа. Согласно системной экономике, основными особенностями таких экономических систем являются отсутствие временных и пространственных границ, определяющая роль науки в решении наиболее значимых текущих задач [20, 21]. И на протяжении последующих десятилетий основой для достижения общесистемной эффективности в энергетике являлось скоординированное развитие всех звеньев единого технологического процесса «производство – потребление энергетических ресурсов». Поэтому показатели отечественной энергетики были самыми высокими в мире, а потребности экономики в электроэнергии обеспечивались с издержками значительно более низкими по сравнению со странами с рыночной экономикой. Низкие цены на электроэнергию стали конкурентным преимуществом отечественных промышленных и сельскохозяйственных предприятий. И несмотря на то, что многие задачи в области энергоэффективности находились на втором плане и остались нерешенными, высокий запас структурной устойчивости экономики и энергетики как ее подсистемы стал интегральным результатом последовательной реализации базовых принципов ГОЭЛРО.

Именно сформировавшийся в 1930–1980-е гг. высокий уровень устойчивости к внешним воздей-

ствиям стал основой для поддержания надежности энергоснабжения российской экономики на протяжении переходных явлений 1990-х гг. Отсутствие системных аварий было одним из наиболее значимых условий обеспечения качества жизни людей и социальной стабильности в период бартера и взаимозачетов [22], когда внешние воздействия на энергетику превышали любые гипотетически проектно-допустимые значения (уход из отрасли в бизнес-структуры наиболее квалифицированных кадров; хронический недостаток финансирования и снижение объемов не только профилактических, но и ремонтных работ; кратное уменьшение нагрузок базовых потребителей в результате сокращения промышленного производства; несанкционированные подключения к распределительным сетям и рост коммерческих потерь от объема отпущенной электроэнергии в ряде регионов более 30%; непредсказуемое исчезновение элементов сетевой инфраструктуры в результате ее частичной утилизации в пункты приема вторсырья и т.д.).

В этой логике результаты реформы российской электроэнергетики следует оценивать с точки зрения их влияния на структурную устойчивость экономики. Завершившийся в 2008 г. этап реформы обладал целым набором черт, характерных для *процессной* компоненты экономической тетрады. Это высокая значимость политической составляющей при принятии решений⁶, четкая фиксация периода реформирования, отсутствие пространственных ограничений [20]. Произошло разделение по видам деятельности: генерация электроэнергии, ее передача, распределение. По завершению дезингрессий региональные электросети, ТГК, ОГК, различные энергосбыты, ранее функционирующие в рамках единой системы, стали самостоятельными объектами. Каждый из них, став самостоятельной системой, начал вести хозяйственную деятельность, направленную на достижение наилучших собственных экономических показателей. Энергетика, монополярная отрасль, цели, задачи и повседневная деятельность которой определялась государством, превратилась в рыночную, основанную на конкуренции и частной собственности. Именно эта трансформация и являлась изначальной целью отраслевой реформы, которая успешно была достигнута [4, 7]. Однако из достижения множества локальных оптимумов отдельных хозяйствующих объектов не следует, что отрасль как система, как целое перешла в оптимальное состояние.

Итак, по завершению этого этапа реформы, электроэнергетика приобрела признаки *объектной* системы. Особенностью экономических объектных

⁶ «Чубайс говорил: “Ты свою науку мне не толкай, а определись – ты за красных или за белых?”» Интервью Председателя Комитета по энергетике Государственной Думы Российской Федерации И.Д. Грачева // БИЗНЕС Online. 01.06.2019. URL: <https://www.business-gazeta.ru/blog/426612> (дата обращения: 02.05.2024)

систем является ежедневное принятие решений самостоятельными объектами на основе хозяйственной практики, а объекты локализованы в пространстве и не ограничены во времени [20].

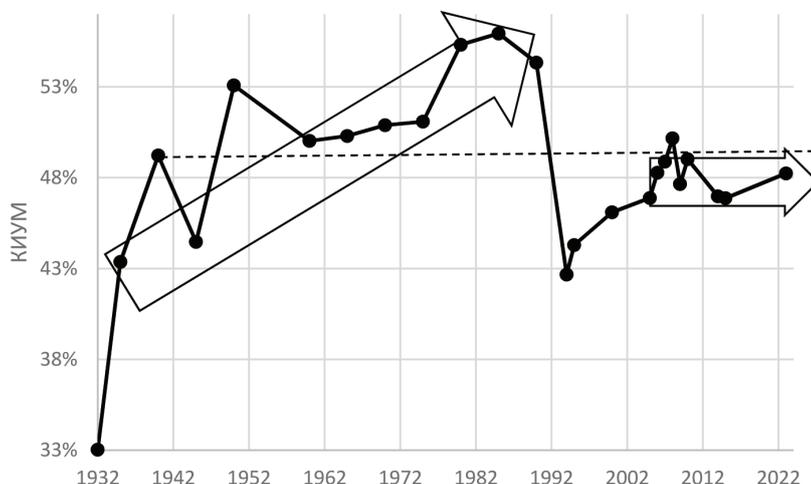
Для значительной части новых объектов не только в электроэнергетике, но и в других отраслях экономики в 2000-х – начале 2010-х гг. было разработано множество стратегий развития. Согласно тектологии, любая система на начальном этапе повышает *количественную устойчивость*. В полном соответствии с теорией, объединяющей целью стратегий развития новых хозяйствующих объектов стало наращивание количественных показателей. В энергетике началось строительство новых энергоблоков и модернизация с увеличением мощности существующих. Произошел переход к преобладанию *проектной* компоненты тетрады. Особенности экономических систем такого типа: дискретные действия для формирования и реализации конкретных адресных решений, четкая локализация каждого проекта во времени и пространстве [21].

Результаты исследования

По мере завершения проектов в области генерации и передачи электроэнергии повышались количественные показатели новых объектов. В 2008–

2017 гг. было введено в эксплуатацию 39,8 ГВт энергетических мощностей, в том числе ТЭС – 30,6 ГВт [7]. При этом приоритет получали технологии, позволяющие обеспечивать маневренность новой генерации с более высокими капитальными затратами новых ТЭС по сравнению с мощностями, предназначенными для работы в базовом режиме.

Совокупный рост количественных показателей множества самостоятельных объектов привел не к увеличению, а к снижению структурной устойчивости отрасли как системы. Действительно, потребление электроэнергии до уровня 1990 г. (1074 млрд кВт·ч) в России восстановилось только в 2016 г. Электропотребление в 2023 г. (1134 млрд кВт·ч) превысило это значение менее чем на 5,6%, что кратно ниже относительного прироста мощности энергосистемы. Результатом опережающего роста спроса ввода энергетических мощностей стало ухудшение удельных показателей производственной деятельности электроэнергетики. По меньшей мере полувековой восходящий тренд (1930–1980-е гг.) КИУМ энергосистемы сменился на нисходящий, а после середины 2000-х гг. стабилизировался на уровне 47-48% – на значении, не превышающем показатель 1940 г. в 49% (пунктирная линия на рис. 1).



Разработано авторами на основе данных: Народное хозяйство СССР за 70 лет: Юбилейный стат. ежегодник // Госкомстат СССР. М.: Финансы и статистика, 1987. 766 с. URL: <https://istmat.org/node/7687>; Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/>; Отчет об объемах поставленной на оптовый рынок мощности в 2023 году // СО ЕЭС. 2024. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/power_reports/power_report_2023.pdf (дата обращения: 17.07.2024)

Рис. 1. Коэффициент использования установленной мощности российской энергосистемы 1932–2023 гг. (до 1991 г. СССР)

Developed by the authors based on the data from: National Economy of the USSR for 70 Years: Jubilee Statistical Yearbook. USSR State Statistics Committee. Moscow: Finance and Statistics, 1987. 766 p. URL: <https://istmat.org/node/7687>; Federal State Statistics Service of the Russian Federation. URL: <https://rosstat.gov.ru/>; Report on the Volumes of Capacity Delivered to the Wholesale Market in 2023. SO EES. 2024. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/power_reports/power_report_2023.pdf (accessed: 17.07.2024)

Fig. 1. Capacity utilization factor of the Russian power system 1932–2023 (USSR before 1991)

Если КИУМ энергосистемы за 1986–2020 гг. снизился с 56% до 48%, то КИУМ ТЭС изменился с 66% до 41%⁷. При переходе к частичной нагрузке оборудования в любой отрасли увеличиваются удельные издержки: растет численность персонала на единицу произведенной продукции, снижается фондоотдача и т.д. В теплоэнергетике дополнительными факторами роста издержек являются увеличение удельного потребления топлива при неполной нагрузке и снижение срока эксплуатации оборудования. Любые переходные режимы, в особенности остановки и последующие запуски энергоблоков, ведут не только к дополнительному потреблению топлива, но и к снижению их ресурса, увеличивая объем ремонтных работ. Поэтому существенным является тот факт, что снижение КИУМ ТЭС оказалось более значительным по сравнению с ухудшением показателей всей энергосистемы.

Рассогласование между избыточными, требующими постоянного обслуживания возможностями энергосистемы и потребностями экономики в электроэнергии происходило не только в генерации, но и в электросетевом хозяйстве: по данным Минэнерго России «с 2011 по 2018 гг. по заявкам потребителей построили сетевую инфраструктуру для максимальной мощности в 88 ГВт, при этом фактическая потребляемая мощность приросла лишь на 8 ГВт»⁸. Или, другими словами, помимо увеличения издержек генерации возрастают количественные показатели потерь, возникающих при передаче электроэнергии, которые снижают результативность инвестиционных проектов повышения эффективности функционирования сетевого хозяйства.

Но, несмотря на рост мощности энергосистемы, сохраняется потребность в пиковой генерации, в системах аккумулирования энергии, в новых проектах ГАЭС. Несбалансированность тетрады, гипертрофированное развитие объектной и проектной при второстепенном значении ее процессной и средовой компонент является результатом потери возможностей вмешательства в технологические процессы потребления электроэнергии. На первоначальном этапе производственная деятельность любого значимого потребителя энергетических ресурсов была взаимосогласована с технологическими возможностями электростанции, построенной, как правило, на единой с ним промышленной пло-

щадке для обеспечения его потребностей в электроэнергии, тепле, паре различных параметров и т.д. По мере развития технологий передачи электроэнергии происходило объединение этих промышленных ТЭС в энергосистему, при этом диспетчеризация потребления технологических процессов промышленных потребителей в соответствии с возможностями генерации сохранялась и успешно использовалась. Потеря востребованности и, как следствие, последующее исчезновение этих возможностей у большинства потребителей привели к повышению спроса на наиболее дорогую электроэнергию, производимую пиковыми источниками. Согласно технологии, данное явление является переходом к суженной среде. Приспособление к суженной среде само по себе должно рассматриваться как регресс, потому что ведет к ограничению организационных возможностей [18].

Снижение эффективности использования как электросетевого хозяйства, так и энергетических мощностей привело к повышению издержек энергоснабжения и постепенной потере у российских электропотребителей значимого конкурентного преимущества по сравнению с потребителями других стран – низких цен на электроэнергию.

«Чем значительнее начальное различие комплексов системы, тем быстрее должно происходить их дальнейшее расхождение, а следовательно, и развитие противоречий, дезинтеграций между ними, тяготеющее к разрыву их связей» [23]. В соответствии с этим положением, в энергоснабжении наметилось расхождение технологических связей, которое стало дополнительным к разделению энергосистемы на множество самостоятельных объектов путем разрыва организационных связей. В условиях роста затрат на энергоснабжение для потребителей рыночно обоснованным решением улучшения своих экономических показателей стала установка собственной генерации и перевода части нагрузки в автономный режим энергоснабжения.

В качестве примеров можно привести: переход к электрообеспечению 70% потребностей предприятий Группы ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» путем установки 657 МВт собственной генерации с себестоимостью электроэнергии примерно в 2 раза ниже покупной⁹;

⁷ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 году // СО ЕЭС. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2021/ups_rep2020.pdf (дата обращения: 02.05.2024)

⁸ Интервью Заместителя министра энергетики Российской Федерации Юрия Маневича // Минэнерго России. 20.08.19. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/15582> (дата обращения: 02.01.2023); Юрий Маневич: «Перекрестное субсидирование в электроэнергетике – это исторически сложившаяся практика, которую нужно менять» // RusCable. 20.08.19. URL: https://www.ruscable.ru/news/2019/08/20/Urij_Manevich_Perekrestnoe_subsidirovanie_v_elektr/ (дата обращения: 02.05.2024)

⁹ Только теплые слова. Энергетики Магнитки произвели 250 млрд кВтч электрической энергии // MR-info. 25.08.15. URL: <https://www.mr-info.ru/12696-talko-teplye-slova-energetiki-magnitki-proizveli-250-mlrd-kvtch-elektricheskoy-energii.html> (дата обращения: 02.02.2024)

реализацию ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» проекта строительства электростанции мощностью 300 МВт, что привело к росту доли собственной генерации в балансе электропотребления с 64% до 94%¹⁰; снижение стоимости электроснабжения в 3 раза по сравнению с сетевой электроэнергией пивоваренной компанией «Балтика» путем собственной генерации на предприятиях Самары и Санкт-Петербурга; модернизацию котельной и установку газопоршневых агрегатов Тихвинским вагоностроительным заводом с переходом на полное обеспечение потребностей промышленных предприятий тихвинской промплощадки¹¹. Налицо эволюция к уровню начала XX века, когда жизненный цикл большей части промпредприятий начинался со строительства ТЭЦ для обеспечения потребностей в различных энергоресурсах.

Естественным стремлением собственника является получение прибыли. Путем достижения этой цели является обеспечение максимальной загрузки собственного оборудования. А поскольку множество собственников стремится обеспечить наибольшую выработку на своих генераторах, в энергосистеме сокращается спрос на базовую и растет на пиковую генерацию.

Итак, успешно реализованные дезинтессии, которые и были целями реформы электроэнергетики, инициировали дальнейшее, уже не отвечающее экономическим интересам новых хозяйствующих объектов электроэнергетики расхождение технологических связей между потребителями и энергосистемой.

Таким образом, особенностью российской электроэнергетики является формирование не отвечающей экономическим интересам ни генерирующих, ни сбытовых, ни сетевых компаний положительной обратной связи между возрастающими динамиками: цен на электроэнергию и объемов устанавливаемой потребителями собственной генерации.

Росту цен на электроэнергию в наибольшей степени подвержены нерегулируемые государством категории потребителей (в первую очередь промышленных предприятий). Для энергосистемы их особой ценностью является постоянный график нагрузки, обеспечивающий устойчивый спрос на базовую генерацию. Однако, в силу ценовой политики на электроэнергию, именно эти потребители в наибольшей степени становятся заинтере-

сованными в снижении собственных издержек энергоснабжения.

Ими привлекаются инвестиции на создание собственной генерации, и по мере ее ввода в эксплуатацию снижается потребление электроэнергии из энергосистемы. Потребитель в результате установки собственной ТЭС, как правило, получает дополнительный бонус: возможность использования не только электрической, но и попутной тепловой энергии. Работа электростанции в теплофикационном режиме, перевод на собственное теплоснабжение промышленного теплопотребления еще в большей степени улучшают экономические показатели хозяйственной деятельности потребителей, реализовавших проекты собственной генерации. И чем лучшим, с точки зрения собственника, является использование его оборудования, тем более быстрый возврат собственных инвестиций в собственные энергетические мощности он обеспечит.

Создание собственной генерации, снижение спроса на электроэнергию из сети, причем на наименее затратную в производстве – электроэнергию базовых станций, приводит к снижению структурной устойчивости энергоснабжения: более интенсивно растут цены на электроэнергию для потребителей-аутсайдеров, продолжающих пользоваться услугами энергосистемы.

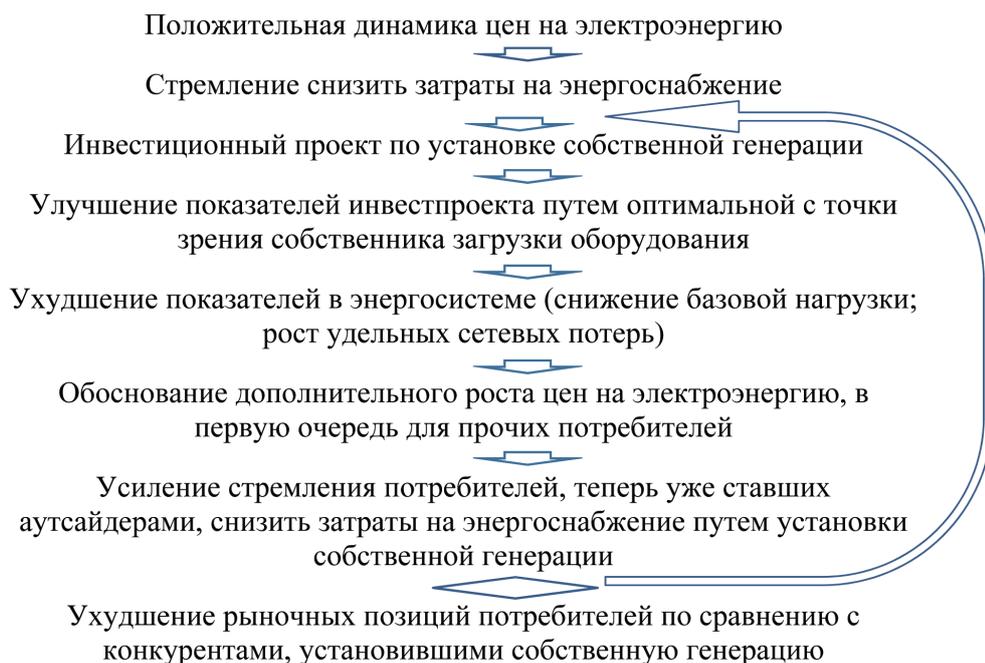
Дополнительным, негативным для энергосистемы фактором такого сценария является рост удельных сетевых потерь, поскольку снижается нагрузка и, как следствие, ухудшаются удельные показатели оборудования сетевой инфраструктуры. Рост сетевых издержек суммируется с ростом издержек генерации. У потребителей-аутсайдеров возрастает мотивация замещения сетевой электроэнергии на собственную генерацию.

В итоге, в результате улучшения экономических показателей части потребителей путем перехода на собственную генерацию, энергосистема эволюционирует в направлении дальнейшего роста удельных издержек производства и передачи электроэнергии и, соответственно, закономерного роста цен на электроэнергию для оставшихся потребителей, тем самым мотивируя их к снижению потребления из сети (рис. 2).

Бесперспективность дальнейшего движения в таком направлении и его негативное влияние на отраслевые показатели производственной деятельности отмечается не только оппонентами ре-

¹⁰ НЛМК сдвинул на 2024 год сроки ввода электростанции для утилизации попутных газов // Интерфакс. 24.04.23. URL: <https://www.interfax.ru/business/897516> (дата обращения: 02.02.2024)

¹¹ Жуков А. Конкурентная модель. К 2026 году собственных энергоисточников станет в 3 раза больше, чем централизованных // Деловой Петербург. 12.02.20. URL: https://www.dp.ru/a/2020/02/11/Konkurentnaja_model (дата обращения: 02.06.2024)



Составлено авторами.

Рис. 2. Положительная обратная связь между ростом цен на электроэнергию и установкой потребителями собственной генерации

Compiled by the authors.

Fig. 2. Positive feedback between rising electricity prices and consumers installing their own generation

формы электроэнергетики, но и ее идеологами: «отсутствие систематической работы, исследований и поиска системных решений привело к потере перспективы. И отправной точкой должна стать разработка долгосрочного целевого видения развития энергетики во взаимосвязи со смежными секторами экономики» [8].

Поэтому можно сделать вывод, что для решения проблемы системных издержек российской электроэнергетики необходима корректировка концептуальных положений ее функционирования.

Анализ развития энергоснабжения на протяжении последних десятилетий в мире свидетельствует не только о возможности, но и об успешности пересмотра базовых положений развития энергетики. В качестве примера можно привести концепцию устойчивого развития, принятую в Рио-де-Жанейро: с 1992 г. в мире стали поддерживаться решения, направленные на сокращение негативного влияния на окружающую среду и разработку технологий по экологизации хозяйственной деятельности человека, в частности, использования энергии ветра и солнца.

Трансформации, охватывающие все большее количество сфер хозяйственной деятельности и не имеющие страновых (пространственных) и вре-

менных ограничений – это показатель перехода к экономической системе *средового* типа. Для разработок, обеспечивающих замещение ископаемых видов топлива на возобновляемые ресурсы, создавались механизмы поддержки их выхода на рынок. Без подобного рода механизмов, зачастую достаточно политизированных, инициация процесса тиражирования различных способов производства электроэнергии по ценам выше сетевого паритета находилась бы в противоречии с законами рыночной экономики. Для ветрогенерации и, в особенности, для фотовольтаики длительное время цены на производимую ими электроэнергию были кратно выше по сравнению с ТЭС, но лидерство ВЭС и СЭС по темпам прироста новых мощностей является характерной особенностью мировой энергетики более трети века.

Сегодня процесс интенсификации замещения потребления ископаемых видов топлива на возобновляемые, в ряде случаев уже без задействования дотационных механизмов, определяет развитие энергетики все большего количества стран (не ограничен в пространстве) и имеет достаточно четкие для каждой страны временные ограничения. В этих условиях авторы считают целесообразным предложить пути снижения системных издержек приема в энергосистему стохастической генера-

ции ВИЭ путем задействования возможностей потребителей. В этом случае график потребления электроэнергии перестает быть экзогенным для энергосистемы. Возникает возможность его корректировки в зависимости от издержек электрогенерации в данный момент времени, в том числе и от изменяющейся в зависимости от погодных условий генерации ВИЭ. Соответственно, меняются роль и задачи потребителя.

Процессы электропотребления могут быть изменены без ущерба для потребителей, путем формирования новых связей между ними и энергосистемой. Управление спросом (demand response) осуществляется за счет формирования активного потребителя. Под этим термином понимается потребитель, управляющий спросом для снижения издержек энергоснабжения и использующий возможности изменения своих технологических процессов, а также собственной генерации (при наличии таковой). Если в России активными потребителями являются только некоторые крупные промышленные предприятия, то в мире управление спросом осуществляется на всех уровнях: в промышленности, на транспорте, в бытовом потреблении [24–26].

Покажем целесообразность расширения границы применения известных в настоящее время технологических решений. Корректировка процессов потребления может быть реализована в бытовом секторе путем использования инверторных двигателей компрессоров холодильников, потребление каждого из которых не превышает 100–500 кВт·ч в год. Особенность инверторного двигателя – постоянная работа с переменной мощностью. В обычном режиме регулирующим параметром мощности двигателя компрессора является отклонение температуры в холодильной камере от заданного значения. Инерционность этого показателя позволяет на протяжении нескольких часов без ущерба для постоянства температуры содержимого заполненной холодильной камеры варьировать потребляемую мощность. В такой постановке вопроса регулирующим параметром становятся издержки производства электроэнергии в каждый момент времени. Результатом является появление у новой системы свойства снижения издержек энергоснабжения: увеличение потребления двигателей компрессоров в периоды минимального спроса является альтернативой вынужденной разгрузке (снижению мощности) крупных энергоблоков, а уменьшение при прохождении максимумов – запуску пиковых электростанций.

Потенциал данного решения превышает 10 ГВт (50 млн инверторных холодильников средней мощностью более 0,2 кВт). Результат его применения – снижение неравномерности работы крупных энергоблоков и уменьшение спроса на пиковую

генерацию. Решение является альтернативой созданию систем аккумулирования энергии. Наиболее экономичный вариант аккумулирования в сопоставимых объемах – реализация нескольких проектов ГАЭС, удельные капитальные затраты которых, в пересчете на киловатт установленной мощности, превышают 200 тыс. руб., а оптимистичный срок их реализации – 5–7 лет.

В отличие от затрат строительства ГАЭС, цены на электронные компоненты для управления работой двигательной нагрузкой непрерывно снижаются. В начале 2000-х гг. частотное регулирование двигательной нагрузкой бытовой техники на основе полупроводниковых силовых приборов только начало распространяться, и предложение холодильников с инверторными двигателями ограничивалось премиальным сегментом. Однако, за счет более высоких потребительских свойств, выражающихся в менее шумном и более мягком режиме работы, приводящем к росту ресурса оборудования и, как следствие, к увеличению срока гарантийного обслуживания, к обеспечению лучшей сохранности продуктов за счет более стабильной температуры в холодильной камере, большая доля покупателей стала выбирать новый вид техники. В итоге в 2010-х гг. модели холодильников с инверторными двигателями из премиального сегмента переместились в рядовой. Различия в ценах холодильников с инверторными и обычными двигателями снизилось до 20–30%. Например, по состоянию на апрель 2024 г. различие розничных цен для холодильников общим объемом более 320 л для моделей «Дон» составляло 25,5 и 33,2 тыс. руб., для моделей «Веко» – 26 и 37,4 тыс. руб. При мощности двигателя компрессора в 0,3 кВт удельные затраты на получение нового качества – возможности участия двигательной нагрузки в диспетчеризации функционирования энергосистемы – составляли 25,7–38 тыс. руб./кВт.

Приведенный пример показывает, что путем по меньшей мере 5-кратного снижения издержек является ингрессия потребления и производства электроэнергии, возникающая за счет корректировки процессов электропотребления. Рассматриваемое решение не ведет не только к ущербу потребителя, но и не вызывает его дискомфорта. Ограничивающим фактором является отсутствие инфраструктуры для управления двигательной нагрузкой бытовых электроприборов, а не доступность электроприемников с инверторными двигателями или отсутствие финансовых средств у населения для их установки. Для реализации этого сценария требуется корректировка концептуальных положений функционирования электроэнергетики. Технологическим решением является модернизация электросетевой инфраструктуры на основе микроинтеллектуальных сетей (micro smart grid).

Данное решение рассмотрено столь подробно по причине интуитивной очевидности для любого потребителя, использующего бытовой холодильник. При системном взгляде на технологический процесс «производство – потребление энергетических ресурсов» можно привести множество подобных примеров в различных областях народного хозяйства. Наиболее емкими решениями являются задействование энергоисточников потребителей для оптимизации работы крупных энергоблоков в энергосистеме, а также расширение области использования электромобилей. Второе решение рассмотрим более подробно. В 2015 г. в ОИВТ РАН было обосновано, что распределенные системы накопления энергии на базе припаркованных электромобилей экономически эффективны при режиме их использования до 1 ч/сут. [27]. В 2015–2024 гг. цены на литий-ионные аккумуляторы снизились, и эффективность использования аккумуляторов припаркованных электромобилей для сглаживания графика загрузки крупных энергоблоков и снижения спроса на пиковые источники возросла.

Отметим, что если в установившихся режимах энергоснабжения использование парка электромобилей способствует выравниванию графика загрузки традиционной энергетики, то в аварийных ситуациях возникает ранее не существовавшее новое качество: возможность обеспечения автономного электроснабжения выделенной нагрузки. Мы видим, что формирование новых связей между достаточно слабо в настоящее время координируемыми системами (транспортной и электроэнергетики) ведет не только к снижению издержек энергоснабжения в результате их ингрессии, но и к возникновению неиспользуемой в настоящее время возможности роста надежности энергоснабжения или, другими словами, увеличивает структурную устойчивость новой системы, включающей в себя ранее самостоятельно функционирующие подсистемы.

Но без корректировки концептуальных положений функционирования электроэнергетики технологические преобразования подобного рода оказываются невостребованными. Сегодня каждый хозяйствующий объект в энергосистеме наиболее эффективным с его точки зрения способом решает задачу улучшения собственных экономических показателей. Деятельность генерирующих компаний в каждый момент времени направлена на выполнение экзогенно заданной, производственной программы. И в перспективе потребуются задействование все большего объема пиковых мощностей, поскольку график спроса на электроэнергию становится менее равномерным по причине снижения промышленного потребления, роста доли коммунально-бытовой нагрузки, а в будущем – роста доли стохастической генерации ВИЭ. В итоге:

- привлеченные в отрасль финансовые ресурсы используются наиболее эффективным образом не системой как единым целым, а в пределах каждого проекта в области генерации или распределения электроэнергии, что приводит к улучшению показателей отдельного хозяйствующего объекта;
- совокупный рост мощности энергоисточников у потребителей дополняет увеличение мощности энергосистемы, спрос на генерацию базовых электростанций снижается, но растет востребованность наиболее дорогих пиковых источников и систем аккумулирования энергии, что обуславливает дальнейший рост издержек энергоснабжения и увеличение финансовой нагрузки на потребителей электроэнергии.

Решением является корректировка концептуальных положений развития электроэнергетики путем ингрессии производителей и потребителей электроэнергии. Использование изменений технологических процессов потребления электроэнергии и энергетических мощностей, установленных в электротехнических комплексах потребителей, для оптимизации функционирования энергосистемы сегодня создаст условия повышения эффективности работы крупных энергоблоков. А в будущем, по мере роста доли стохастической генерации – снижения издержек интеграции ВИЭ в энергосистему. Результатом станет повышение структурной устойчивости энергетики за счет устранения дисбалансов экономической тетрады, достигаемого путем интенсификации развития находящихся сегодня на второстепенном плане ее средовой и процессной компонент. В итоге исчезнут предпосылки для обоснования цен на электроэнергию ВИЭ в России выше значений, установившихся в странах с аналогичными климатическими условиями (а это 1,5–2 руб./кВт·ч по состоянию на 2024 г.). Так как достижение сетевого паритета бездотационных цен недиспетчеризованной электроэнергии ВИЭ происходит во все большем числе стран, станут излишними механизмы, аналогичные ДПМ ВИЭ, которые при неизменности сценария развития электроэнергетики будут приводить к дальнейшему удорожанию электроэнергии для всех потребителей.

Выводы

1. В энергетике трансформация взаимоотношений между производителями и потребителями является непрерывным процессом, происходящем по мере появления новых технологических возможностей в области производства, передачи и потребления энергетических ресурсов. Отечественная энергетика не является исключением из этого правила. Изменения требований совокупности отраслей экономики гармонизировались с производственными возможностями энергосистемы. В результате

была создана система, способная функционировать в широком диапазоне воздействий внешней среды, и благодаря ее структурной устойчивости оказалось возможным в условиях изначально не предусмотренных внешних воздействий 1990-х гг. обеспечивать энергоснабжение страны без системных аварий.

2. В полном соответствии с целями реформы российской электроэнергетики из единой системы были выделены хозяйствующие объекты. Они стали самостоятельными системами и начали вести хозяйственную деятельность, направленную на достижение наилучших собственных экономических результатов. В результате естественного с точки зрения тектологии стремления любой возникшей системы к наращиванию количественных показателей, в 2008–2017 гг. началась реализация новых строительных проектов в энергетике. Анализ произошедшего на основе методологии системной экономической теории показал, что результатом реформы стало гипертрофированное усиление объектной, а в последующем проектной компонент экономической тетрады. Опережающий изменение спроса на электроэнергию рост мощности энергосистемы стал одной из причин увеличения издержек энергоснабжения. С целью снижения платежей за электроэнергию потребители стали устанавливать собственную генерацию,

тем самым снижая потребление базовой электроэнергии и усиливая спрос в энергосистеме на наиболее дорогую пиковую генерацию. Сформировалась положительная обратная связь между ростом цен на электроэнергию, усиливающим стремление потребителей уменьшить свои платежи путем установки собственных генераторов, и дальнейшим повышением издержек энергоснабжения. Таким образом, чрезмерное усиление объектной и проектной компонент экономической тетрады продолжает снижать структурную устойчивость отрасли.

3. Путем согласования компонент экономической тетрады является корректировка энергетической политики, более интенсивное развитие ее средовой и процессной компонент, что может быть достигнуто за счет оптимизации технологического процесса «производство – потребление энергетических ресурсов». Формирование новых связей между производителями и потребителями электроэнергии, направленных на снижение издержек функционирования энергосистемы, является путем повышения структурной устойчивости российской экономики.

4. Целесообразно сконцентрировать усилия на трансформации энергосистемы, направленные на снижение издержек приема энергии ВИЭ и увеличение эффективности использования крупных энергоблоков.

Список источников

1. Нигматулин Б.И. Электроемкость ВВП. Цены на электроэнергию для конечных потребителей и на шинах АЭС в России и США. Сравнение в среднем с миром, ОЭСР, США, Китаем и другими странами // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 6. С. 19–42. EDN: <https://elibrary.ru/uepize>. <https://doi.org/10.1134/S0002331019060074>
2. Алхасов А.Б., Аликеримова Т.Д., Ниналалов С.А. Программа договоров предоставления мощности как средство стимулирования и поддержки возобновляемых источников // Региональные проблемы преобразования экономики. 2021. № 7(129). С. 37–45. EDN: <https://elibrary.ru/lrlftb>. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-7-37-45>
3. Пахомова Н.В., Заединов А.В. Кросс-функциональная трактовка энергоперехода и реформирование российской теплоэнергетики в контексте глобальной климатической повестки // Проблемы современной экономики. 2022. № 3(83). С. 109–114. EDN: <https://elibrary.ru/pfafbu>
4. Электроэнергетика России 2030: Целевое видение / под общей редакцией Б.Ф. Вайнзихера. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. 352 с. EDN: <https://elibrary.ru/qsusmp>
5. Зейгарник Ю.А., Масленников В.М., Нечаев В.В., Шевченко И.С. Целевое видение стратегии развития электроэнергетики России на период до 2030 г. // Теплоэнергетика. 2007. № 11. С. 2–13. EDN: <https://elibrary.ru/icchpf>
6. Богачкова Л.Ю. Совершенствование управления отраслями российской энергетики: теоретические предпосылки, практика, моделирование. Монография. Волгоград: ООО «Волгоградское научное издательство», 2007. 421 с. EDN: <https://elibrary.ru/rwhekj>
7. Чубайс А.Б. Реформа российской электроэнергетики: десять лет спустя // Вопросы экономики. 2018. № 8. С. 39–56. EDN: <https://elibrary.ru/xvlsip>. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-8-39-56>

8. Уринсон Я.М., Кожуховский И.С., Сорокин И.С. Реформирование российской электроэнергетики: результаты и нерешенные вопросы // Экономический журнал ВШЭ. 2020. Т. 24. № 3. С. 323–339. EDN: <https://elibrary.ru/gsnwd>. <https://doi.org/10.17323/1813-8691-2020-24-3-323-339>
9. Кутовой Г.П., Алексеенко Е. 80 лет: формула успеха // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 5-6. С. 22–26. EDN: <https://elibrary.ru/pewpne>
10. Вымятина Ю., Карасева Е., Слоев И. Опыт реформ электроэнергетики в контексте экономической теории // Экономическая политика. 2022. Т. 17. № 3. С. 8–43. EDN: <https://elibrary.ru/ktqtfv>. <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2022-3-8-43>
11. Гибадуллин А.А., Пуляева В.Н. Оценка устойчивости развития в социальной сфере электроэнергетики России // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2017. Т. 10. № 3. С. 76–88. EDN: <https://elibrary.ru/ytwgxf>. <https://doi.org/10.18721/JE.10307>
12. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Макарова А.С., Новикова Т. В., Панкрушина Т.Г. Стратегические перспективы электроэнергетики России // Теплоэнергетика. 2017. № 11. с. 40–52. EDN: <https://elibrary.ru/zhhpzk>. <https://doi.org/10.1134/S0040363617110066>
13. Акимова Е.А., Кайнова Е.В., Мустафин И.Р., Мустафин Р.Р. Управленческая мысль и научно-техническое развитие РСФСР 1918–1922 гг. Н. Новгород: РАНХиГС, НИУ, 2022. 80 с. EDN: <https://elibrary.ru/xeuzir>
14. Клейнер Г.Б. Размышление о системном мышлении: между А. Богдановым и Л. фон Берталанфи // AlterEconomics. 2024. Т. 21. № 1. С. 20–28. EDN: <https://elibrary.ru/chwtsw>. <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2024.21-1.3>
15. Клейнер Г.Б. Системная методология Александра Богданова в контексте современного экономического мировоззрения // Вопросы экономики. 2023. № 3. С. 24–39. EDN: <https://elibrary.ru/vxovrj>. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2023-3-24-39>
16. Локтионов М.В. А.А. Богданов как основоположник общей теории систем // Философия науки и техники. 2016. Т. 21. № 2. С. 80–96. EDN: <https://elibrary.ru/hxzqyh>
17. Кржижановский Г.М. Сочинения. Том 1. Электроэнергетика. АН СССР Энергетический институт. Москва-Ленинград: Энергоиздат, 1933. 628 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005141765> (дата обращения: 07.06.2024)
18. Тахтаджян А.Л. Тектология: история и проблемы // Системные исследования: Ежегодник 1971. С. 200–277. URL: https://systems-analysis.ru/assets/systems_research_1971.pdf (дата обращения: 07.06.2024)
19. Мелентьев Л.А. Очерки истории отечественной энергетики: Развитие науч.-техн. мысли. М.: Наука, 1987. 278 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001360833> (дата обращения: 07.06.2024)
20. Клейнер Г.Б. Устойчивость российской экономики в зеркале системной экономической теории (Часть 1) // Вопросы экономики. 2015. № 12. С. 107–123. EDN: <https://elibrary.ru/uxmgqh>
21. Клейнер Г.Б. Устойчивость российской экономики в зеркале системной экономической теории (Часть 2) // Вопросы экономики. 2016. № 1. С. 117–138. EDN: <https://elibrary.ru/vgsotl>
22. Чубайс А.Б. Неплатежи в российской экономике 1990-х: непредвиденный институт // Вопросы экономики. 2023. № 7. С. 142–158. EDN: <https://elibrary.ru/fyeeai>. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2023-7-142-158>
23. Богданов А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука / В 2-х кн.: ред. кол. Л.И. Абалкин (отв. ред.) и др. М.: Экономика, 1989. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009763001> (дата обращения: 07.06.2024)
24. Faria P., Vale Z. Demand Response in Smart Grids // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 2. P. 863. <https://doi.org/10.3390/en16020863>
25. Jordehi A.R. Optimisation of demand response in electric power systems, a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 103. P. 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.054>
26. Wang L., Lin J., Dong H., Wang Y., Zeng M. Demand response comprehensive incentive mechanism-based multi-time scale optimization scheduling for park integrated energy system // Energy. 2023. Vol. 270. P. 126893. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126893>
27. Жук А.З., Бузоверов Е.А., Шейндлин А.Е. Распределенные системы накопления электроэнергии на основе парков электромобилей // Теплоэнергетика. 2015. № 1. С. 3–8. EDN: <https://elibrary.ru/tbdxsf>. <https://doi.org/10.1134/S0040363615010129>

Статья поступила в редакцию 14.05.2024; одобрена после рецензирования 25.07.2024; принята к публикации 26.09.2024

Об авторах:

Некрасов Сергей Александрович, доктор экономических наук, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории экспериментальной экономики; Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия; SPIN-код: 9623-0772, Researcher ID: AAC-6526-2020

Клименко Владимир Викторович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории глобальных проблем энергетики; Институт энергетических исследований (ИНЭИ) РАН Москва, Россия; SPIN-код: 5498-1833, Researcher ID: O-3105-2013

Вклад авторов:

Клименко В. В. – научное руководство, обеспечение ресурсами.

Некрасов С. А. – подготовка начального варианта текста, развитие методологии, проведение критического анализа материалов, формирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

1. Nigmatulin B.I. Electricity intensity of GDP. Electricity tariffs for end consumers, electricity prices at nuclear power plants in Russia and USA. Comparison with the world, OECD, USA, China and other countries. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2019; (6):19–42. EDN: <https://elibrary.ru/uepjze>. <https://doi.org/10.1134/S0002331019060074> (In Russ.)
2. Alkhasov A.B., Alikirimova T.D., Ninalalov S.A. The program of contracts for the provision of power as a means of stimulating and supporting renewable resources energy sources in Russia. *Regional problems of economic transformation*. 2021; (7(129)):37–45. EDN: <https://elibrary.ru/llrltb>. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-7-37-45> (In Russ.)
3. Pakhomova N.V., Zaedinov A.V. Cross-functional interpretation of energy transition and reforming of Russian heat power engineering in the context of the global climate agenda (Russia, St. Petersburg). *Problems of modern economics*. 2022; (3(83)):109–114. EDN: <https://elibrary.ru/pfafbu> (In Russ.)
4. Electric power industry of Russia 2030: Target vision. Ed. B.F. Vainzikher. Moscow: Alpina Business Books, 2008. 352 p. EDN: <https://elibrary.ru/qsusmp> (In Russ.)
5. Zeigarnik Yu.A., Maslennikov V.M., Nechaev V.V., Shevchenko I.S. Target view of the strategy of the Russian power engineering development during the period to 2030. *Thermal engineering*. 2007; 54(11):851–862. EDN: <https://elibrary.ru/rkmalj>. <https://doi.org/10.1134/S0040601507110018> (In Eng.)
6. Bogachkova L.Yu. Improvement of regulation of the Russian energy sector: theoretical background, practice, modeling. Monograph. Volgograd: LLC "Volgograd Scientific Publishing House", 2007. 421 p. EDN: <https://elibrary.ru/rwhekj> (In Russ.)
7. Chubais A.B. Russian electric power industry reform: 10 years later. *Voprosy Ekonomiki*. 2018; (8):39–56. EDN: <https://elibrary.ru/xvlsip>. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-8-39-56> (In Russ.)
8. Urinson Ja.M., Kozhukhovskii I.S., Sorokin I.S. The Russian electricity reform: achievements and unresolved issues. *HSE Economic Journal*. 2020; 24(3):323–339. EDN: <https://elibrary.ru/gsnjwd>. <https://doi.org/10.17323/1813-8691-2020-24-3-323-339> (In Russ.)
9. Kutovoy G.P., Alekseenok E. 80 years: formula for success. *Regional energy and energy saving*. 2017; (5-6):22–26. EDN: <https://elibrary.ru/pewpne> (In Russ.)
10. Vymyatnina Yu., Karaseva E., Sloev I. Electricity sector reform experience in the context of economic theory. *Economic Policy*. 2022; 17(3):8–43. EDN: <https://elibrary.ru/ktqtfv>. <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2022-3-8-43> (In Russ.)
11. Gibadullin A.A., Pulyaeva V.N. Evaluation of sustainable development in the social sphere of electric power engineering in Russia. *St. Petersburg State Polytechnic University Journal. Economics*. 2017; 10(3):76–88. EDN: <https://elibrary.ru/ytwgxf>. <https://doi.org/10.18721/JE.10307> (In Russ.)
12. Makarov A.A., Veselov F.V., Makarova A.S., Novikova T.V., Pankrushina T.G. Strategic prospects of the electric power industry of Russia. *Thermal engineering*. 2017; 64(11):817–828. EDN: <https://elibrary.ru/xodmxe>. <https://doi.org/10.1134/S0040601517110064> (In Eng.)

13. Akimova E.A., Kaynova E.V., Mustafin I.R., Mustafin R.R. Management thought and scientific and technical development of the RSFSR 1918–1922. Nizhny Novgorod: RANEPА, Nizhny Novgorod Institute of Management, 2022. 80 p. EDN: <https://elibrary.ru/xezuir> (In Russ.)
14. Kleiner G.B. Exploring systems thinking: between Alexander Bogdanov and Ludwig von Bertalanffy. *AlterEconomics*. 2024; 21(1):20–28. EDN: <https://elibrary.ru/chwtsw>. <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2024.21-1.3> (In Russ.)
15. Kleiner G.B. Alexander Bogdanov's system methodology from the perspective of the modern economic worldview. *Voprosy Ekonomiki*. 2023; (3):24–39. EDN: <https://elibrary.ru/vxovrj>. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2023-3-24-39> (In Russ.)
16. Loktionov M.V. Alexander Bogdanov – the founder of general systems theory. *Philosophy of science and technology*. 2016; 21(2):80–96. EDN: <https://elibrary.ru/xzqzqh> (In Russ.)
17. Krzhizhanovsky G.M. Essays. Vol. 1. Electric power industry. USSR Academy of Sciences Energy Institute. Moscow-Leningrad: Energoizdat, 1933. 628 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005141765> (In Russ.) (accessed: 07.06.2024)
18. Takhtadzhyan A.L. Tectology: history and problems. In: *System Research: Yearbook 1971*. P. 200–277. URL: https://systems-analysis.ru/assets/systems_research_1971.pdf (In Russ.) (accessed: 07.06.2024)
19. Melentyev L.A. Essays on the history of domestic energy. Moscow: Nauka, 1987. 278 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001360833> (In Russ.) (accessed: 07.06.2024)
20. Kleiner G.B. Sustainability of Russian economy in the mirror of system economic theory (Part 1). *Voprosy Ekonomiki*. 2015; (12):107–123. EDN: <https://elibrary.ru/uxmgqh> (In Russ.)
21. Kleiner G.B. Sustainability of Russian economy in the mirror of system economic theory (Part 2). *Voprosy Ekonomiki*. 2016; (1):117–138. EDN: <https://elibrary.ru/vgsotl> (In Russ.)
22. Chubais A.B. Non-payments in the Russian economy in the 1990s: an unforeseen institution. *Voprosy Ekonomiki*. 2023; (7):142–158. EDN: <https://elibrary.ru/fyeeai>. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2023-7-142-158> (In Russ.)
23. Bogdanov A.A. Tectology: General organizational science. In 2 books. Ed. Abalkin L.I. Moscow: Economics, 1989. <https://search.rsl.ru/ru/record/01009763001> (In Russ.) (accessed: 07.06.2024)
24. Faria P., Vale Z. Demand Response in Smart Grids. *Energies*. 2023; 16(2):863. <https://doi.org/10.3390/en16020863> (In Eng.)
25. Jordehi A.R. Optimization of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 103:308–319. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.054> (In Eng.)
26. Wang L., Lin J., Dong H., Wang Y., Zeng M. Demand response comprehensive incentive mechanism-based multi-time scale optimization scheduling for park integrated energy system. *Energy*. 2023; 270:126893. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126893> (In Eng.)
27. Zhuk A.Z., Buzoverov E.A., Sheindlin A.E. Distributed energy storage systems on the basis of electric-vehicle fleets. *Thermal Engineering*. 2015; 62(1):1–6. EDN: <https://elibrary.ru/ufrvjh>. <https://doi.org/10.1134/S0040601515010127> (In Eng.)

The article was submitted 14.05.2024; approved after reviewing 25.07.2024; accepted for publication 26.09.2024

About the authors:

Sergey A. Nekrasov, Doctor of Economic Sciences, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Experimental Economics; National Research University "MPEI", Moscow, Russia; SPIN: 9623-0772, Researcher ID AAC-6526-2020

Vladimir V. Klimentko, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Global Energy Problems; Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences Moscow, Russia; SPIN: 5498-1833, Researcher ID O-3105-2013

Contribution of the authors:

Klimentko V.V. – scientific leadership, provision of resources.

Nekrasov S. A. – preparation of the initial version of the text, development of methodology, critical analysis of materials, drawing conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.