

Научная статья

УДК 621.316

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-39-50

Завьялов Никита Витальевич, Паскарь Иван Николаевич, Лебедев Геннадий Михайлович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

E-mail: z79000554445@gmail.com

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА****Аннотация.**

В статье выполнен анализ функционирующей Кузбасской энергетической системы в трех проекциях по двум исследуемым критериям, обработаны и описаны результаты проведенного исследования, оценено потребление электроэнергии отраслями экономики субъекта Российской Федерации, подробно описан математический программный аппарат для реализации исследования на основе техноценнологического подхода, найдены точки предполагаемого к проведению оптимизационного воздействия, которые обосновывают внедрение объектов распределенной генерации (в том числе на основе возобновляемых источников электроэнергии). Ранговый анализ в ходе проведенного исследования включает в себя три этапа, позволяющих в результате описать сложнейшие технологические системы: интервальное оценивание, нормирование и прогнозирование. Преимущества техноценнологического подхода к анализу энергосистемы заключаются в исследовании изменяющихся технологических систем как единого целого, которое характеризуется устойчивыми параметрами. Исследование проведено с опорой на актуальные статистические данные от Системного Оператора Единой Энергетической Системы (далее – СО ЕЭС), данные Федеральной Службы Государственной статистики, а также официально опубликованные актуальные документы Правительства РФ, схемы и программы перспективного развития электроэнергетики (далее – СИПРЭ) всех субъектов Российской Федерации. Среди ярко выраженных особенностей исследуемого техноценоза региональной энергосистемы выделены три отрасли экономики – добывающая, обрабатывающая и транспортная. В результате исследования определена величина отклонения оптимизационного параметра (уровень электропотребления отраслями промышленности, установленная мощность электростанций и их количество), изучен перспективный характер поведения аномальных показателей, выделившихся из доверительного интервала. Отмечено, что сложившийся в энергосистеме дефицит электроэнергии будет расти ввиду прогрессирующих объемов производств на территории исследуемого субъекта РФ.

**Информация о статье**

Поступила:

29 октября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 апреля 2024 г.

Принята к печати:

15 мая 2024 г.

Опубликована:

06 июня 2024 г.

Ключевые слова:

техноценоз; энергосистема; оптимизация; энергоэффективность; математический анализ

Для цитирования: Завьялов Н.В., Паскарь И.Н., Лебедев Г.М. Исследование региональных энергетических систем с применением техноценнологического подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 39-50. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-39-50, EDN: LMPVXG

Введение

Растущие объемы производства, связанные с развитием новых энергоемких технологий, открытие новых промышленных центров и модернизация имеющихся мощностей – все эти процессы ставят энергетику в такое положение, которое обязывает ее поддерживать темпы промышленности, совершенствуя все аспекты электроснабжения. Повышение энергоэффективности, обеспечение надежного

энергоснабжения, снижение негативного воздействия на окружающую среду и применение современных технологий – основные направления, в которых на сегодняшний день активно развивается энергетика.

При анализе данных Министерства энергетики Российской Федерации, Правительства субъектов РФ, Системного оператора Единой энергетической системы и крупных сетевых компаний замечено,

что на территории страны доля морально устаревшего оборудования составляет больше трети от общего числа эксплуатируемого электрического оборудования.

Техноценоз — это сложное, ограниченное в пространстве и времени любое выделенное единство, включающее сообщество изделий [1].

Для описания процессов, происходящих в рамках исследуемого техноценоза, применяется ранговый анализ, включающий в себя статистический математический анализ, прогнозирование и оптимизацию.

В данной статье рассматривается применение методики рангового анализа для определения оптимальной структуры энергосистемы на примере Кузбасской энергетической системы с целью повышения энергобезопасности и экономических показателей субъектов энергетики региона на перспективный период.

Научная новизна исследования энергосистемы как техноценоза заключается в анализе структурно-топологического поведения объектов энергосистемы Кемеровской области – Кузбасса, реализованном ранговом анализе структуры потребления электроэнергии различными отраслями экономики и предложении варианта ранговой оптимизации распределенных объектов генерации с целью повышения эффективности функционирования энергосистемы на перспективный период.

В исследовании оптимизации подвергается состав генерирующего и силового электрооборудования функционирующей региональной энергетической системы. Управляющими переменными для воздействия на имеющуюся энергетическую ситуацию (режим) определены две составляющие – количество и мощность генерирующего оборудования в составе энергетической системы. Определяющими величинами, относительно которых выстраивается стратегия оптимизационных воздействий – количество и мощность основных потребителей электрической энергии на территории Кемеровской области – Кузбасса.

Математический аппарат, реализованный в рамках написания данной статьи, применим для оценки возможности внедрения новых генерирующих мощностей в любую из существующих энергетических систем, а также в разработке направления повышения эффективности энергосистем [2,3].

За основу (исходные данные) в исследовании принята структура потребления электрической энергии Кемеровской области – Кузбасса, представленная несколькими крупными группами потребителей, преобладающим лидером среди которых является область добычи полезных ископаемых – средняя доля электропотребления в период с 2015 по 2019 годы составила 72%. Также при выполнении исследования используется информация о составе эксплуатируемых генерирующих мощностей на территории Кузбасса – электростанций суммарной установленной мощностью 5525,34 МВт (все генерирующие предприятия – тепловые электростанции). [4,5,6].

Цель исследования – реализация и применение на практике методики техноценологического подхода к исследованию существующих энергетических систем для нахождения слабых мест и оценки внедрения оптимизационных воздействий, направленных на повышение надежности электроснабжения, снижение эксплуатационных издержек и рост экономических показателей.

Методология проведенного исследования.

Для выполнения рангового анализа по любому из исследуемых параметров – установленная мощность электростанций в энергосистеме, их количество и мощность потребления отраслями промышленности – необходимо произвести построение рангового распределения техноценоза в зависимости от ключевого параметра:

$$W^* = f(r^*), \quad (1)$$

где W^* – ресурс первичного параметрического распределения; r^* – ранг первичного распределения.

Следующий этап рангового анализа — это аппроксимация и определение формы распределения с целью формирования тренда доверительного интервала:

$$W^* = \frac{W_1}{r^* \beta_W^*}, \quad (2)$$

где W_1 – начальная точка первичного распределения; β_W^* – ранговый коэффициент первичного распределения.

Далее необходимо задать точки, определяющие значение максимального и минимального показателя для кластеров (W_{max} и W_{min} соответственно), также на данном этапе определяется общее количество видов исследуемого техноценоза – рассчитывается данная величина как отношение суммарного показателя (ресурса) к максимальному:

$$S = \Omega_{\Sigma} \frac{W_{\Sigma}^*}{W_{max}^*} \quad (3)$$

где s – количество видов; $W_{\Sigma}^* = \sum_{k=1}^k W_k^*$ – суммарный показатель; W_{max}^* – максимальный показатель.

Определение показателя, который приходится на популяцию i -го вида:

$$W_{i\Sigma} = W_{max}^* \quad (4)$$

Определение численности самого массового вида:

$$\Delta \frac{W_{i\Sigma}}{W_{min\ max}^*} \quad (5)$$

где W_{min}^* – ресурс, соответствующий самому малому кластеру техноценоза [7].

Для нахождения граничных точек рангового распределения точкам присваиваются координаты $(1; \Delta_{max})$ и $(s; 1)$ и осуществляется процесс оптимизации (увеличение статистической энтропии), заключающийся в подборе вариаций численности особей (от единицы до максимально возможного значения):

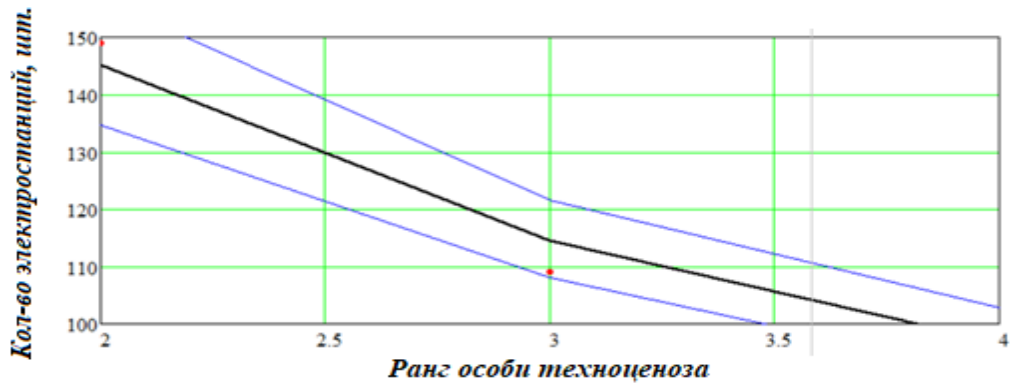


Рис. 1. ОЭС Сибири в составе ЕЭС России по количеству электростанций с установленной мощностью более 5 МВт

Fig. 1. UES of Siberia as part of the RAO UES a by the number of power plants with an installed capacity of more than 5 MW

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^S \left(-\frac{\Lambda_i}{\Lambda_{\Sigma}} \ln \left(-\frac{\Lambda_i}{\Lambda_{\Sigma}} \right) \right) \xrightarrow{\Lambda_{\Sigma} \rightarrow \text{var}} \max, \\ \Lambda^{\circ}(i) = \Lambda_{\max} \wedge \Lambda^{\circ}(S) = 1; \\ \Lambda_{\Sigma} = 1 \dots (S: \Lambda_{\max}) \end{array} \right\} \rightarrow \{ \Lambda^{\circ} = f(r_B) \}, \quad (6)$$

где $\Lambda^{\circ}(r_B)$ – оптимальное ранговое видовое распределение.

В найденных границах исследуемого распределения осуществляется определение оптимизируемых параметров и аппроксимация оптимального рангового распределения:

$$\Lambda^{\circ} = \frac{\Lambda_i^{\circ}}{r_B^{\beta_{\Lambda}}}, \quad (7)$$

где Λ° и β_{Λ} – параметры, характеризующие оптимальное ранговое распределение.

Полученная функция оптимального рангового распределения позволяет определить окончательное значение количества особей техноценоза:

$$n = \Lambda_{\Sigma}^{\circ} = \sum_{i=1}^S \Lambda^{\circ}(i). \quad (8)$$

Далее выполняется решение системы балансных уравнений, связывающих между собой значение численности и видообразующего параметра:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln \Lambda_{P1} = \xi - \eta \cdot \ln W_{P1}, \\ \ln \Lambda_{P2} = \xi - \eta \cdot \ln W_{P2}; \\ \Lambda_{P1} = \Lambda_{\max}; W_{P1} = W_{\min}^* \\ \Lambda_{P2} = 1; W_{P2} = W_{\max}^* \end{array} \right\} \overline{W_1, \beta_W} \left\{ W = \frac{W_1}{r^{\beta_W}} \right\}, \quad (7)$$

где Λ_p , W_p – расчетные значения; ξ , η – коэффициенты балансного уравнения.

Полученные полигоны численных значений представляются в графическом виде и позволяют отследить тренд рангового параметрического распределения, а также сформировать график, описывающий связь параметрических и видовых рангов.

Находящийся в нестабильном состоянии техноценоз математически описывается со стороны минимаксной теории, позволяя создать оптимальное

видовое разнообразие видов и подобрать характеристики с целью дальнейшей оптимизации.

Имеющиеся «проблемные» точки распределения, как и весь техноценоз в совокупности, должны подвергаться прогнозированию на перспективный период с целью определения областей и мест, наиболее рациональных к оптимизационным мероприятиям. Процедура оптимального управления техноценозом в рамках рассматриваемых полигонов значений является отдельной темой для исследования и осуществляется G-методом (Гауссовская математическая статистика) и Z-методом (математическая статистика Ципфа) [8].

Математический метод, применимый в исследовании, разработан профессором МЭИ Борисом Ивановичем Кудриным, методика исследования на основе программного аппарата разработана и описана Виктором Ивановичем Гнатюком [1,9,10].

Результаты исследования и их обработка.

Энергосистему Кемеровской области – Кузбасса можно по всем критериям отнести к понятию «техноценоз» и вполне обоснованно применить интервальное оценивание по таким параметрам: количество электростанций (более 5 МВт) и суммарная установленная мощность электростанций региона. Оценку предлагается проводить в рамках рассмотрения следующих вариаций:

- Ранговый анализ ОЭС Сибири в составе ЕЭС России;
- Ранговый анализ Кузбасской ЭС в составе ОЭС Сибири;
- Ранговый анализ объектов генерации Кузбасской ЭС.

Анализ ОЭС Сибири в составе ЕЭС России по количеству электростанций, как и другие варианты исследования, начинается со сбора статистической отчетной информации. Данные для рассматриваемого техноценоза взяты из документов «Схема и программа перспективного развития электроэнергетики» для 81 субъектов РФ и 3 городов федерального значения (Москва, Санкт-Петербург и Севастополь).

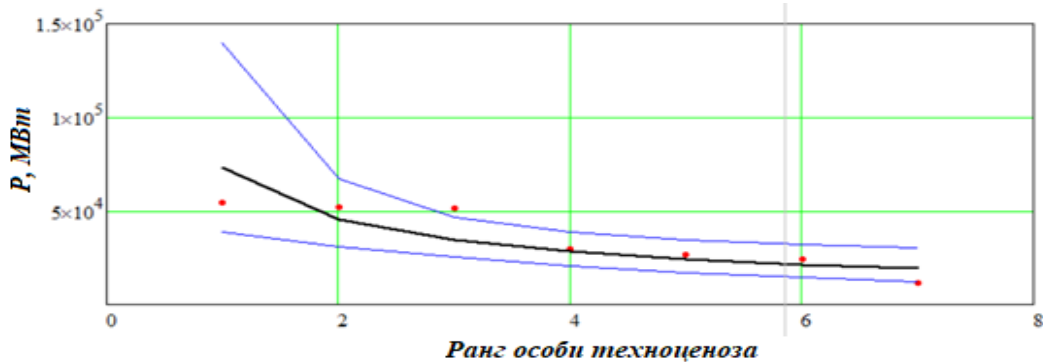


Рис. 2. Доверительный интервал и эмпирические значения рангового распределения ОЭС в составе ЕЭС России по уст. мощности электростанций

Fig. 2. Confidence interval and empirical values of the rank distribution of the UES in the RAO UES according to the capacity of power plants

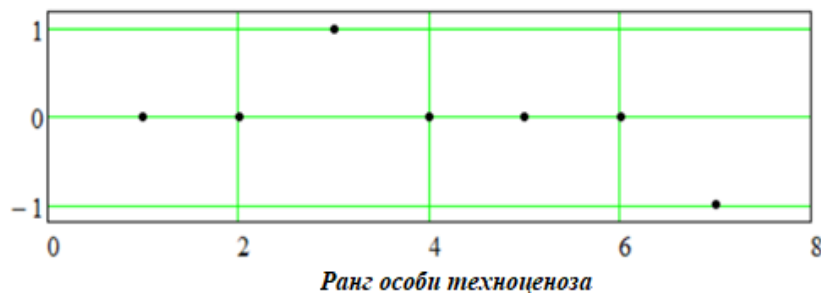


Рис. 3. Определение особей, не попавших в доверительный интервал рангового распределения ОЭС в составе ЕЭС России по уст. мощности электростанций

Fig. 3. Determination of individuals who did not fall into the confidence interval of the ranking distribution of the UES as part of the RAO UES by the installed capacity of power plants

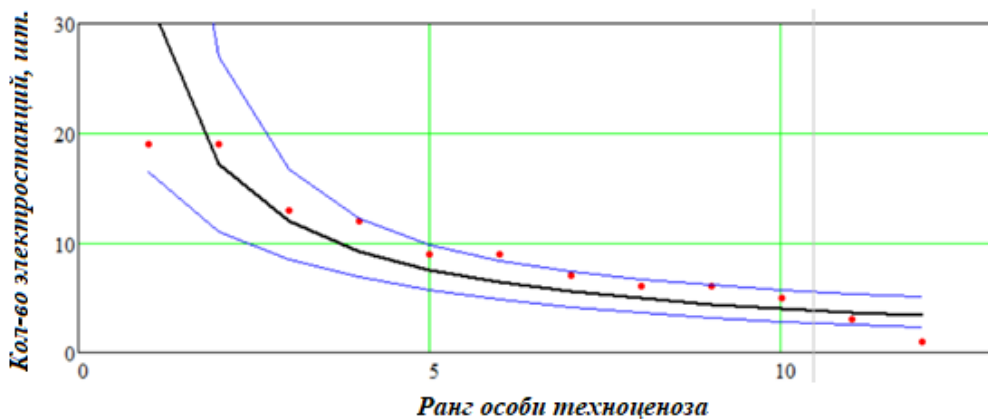


Рис. 4. Доверительный интервал и эмпирические значения рангового распределения региональных ЭС в составе ОЭС Сибири по количеству электростанций

Fig. 4. Confidence interval and empirical values of the rank distribution of regional ES in the composition of the Siberian UES by the number of power plant

По данным СО ЕЭС сформированы базы данных по каждой из 7 ОЭС на территории РФ, содержащие информацию о количестве станций и их установленной мощности (применительно к каждому ОДУ). Статистические данные применены в математическом аппарате, описанном ранее и реализованном в программной среде Mathcad.

Ранговый анализ ОЭС Сибири в составе ЕЭС России.

В результате исследования семи ОЭС в составе ЕЭС России по количеству электростанций определено, что ОЭС Юга находится выше доверительно-

го интервала по исследуемому параметру, остальные ОЭС расположились в пределах доверительного интервала.

Следует отметить тот факт, что ОЭС Сибири, в состав которой входит Кузбасская ЭС, по количеству электростанций (более 5 МВт) находится на значении, близком к крайнему нижнему в пределах доверительного интервала (Рис. 1).

Результат исследования ОЭС Сибири в составе ЕЭС России по параметру установленной мощности электростанций представлен на Рис. 2, «выпадения» из доверительного интервала – на Рис. 3.

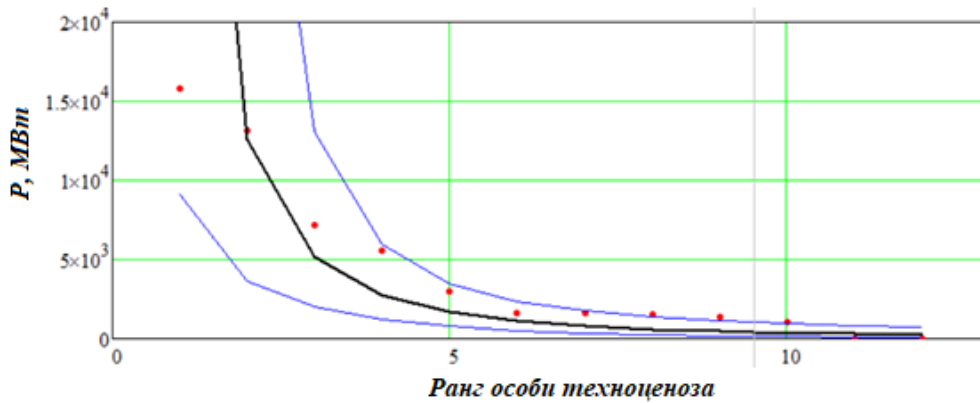


Рис. 5. Определение особей, не попавших в доверительный интервал рангового распределения ОЭС в составе ЕЭС России по уст. мощности электростанций
 Fig. 5. Identification of individuals who did not fall into the confidence interval of the rank distribution of the UES as part of the RAO UES by the capacity of power plants

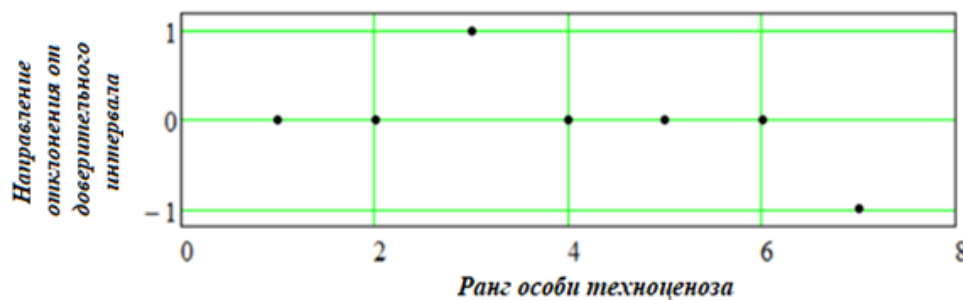


Рис. 6. Определение особей, не попавших в доверительный интервал рангового распределения региональных ЭС в составе ОЭС Сибири по установленной мощности электростанций
 Fig. 6. Identification of individuals who did not fall into the confidence interval of the rank distribution of regional power plants within the UES of Siberia according to the installed capacity of power plants

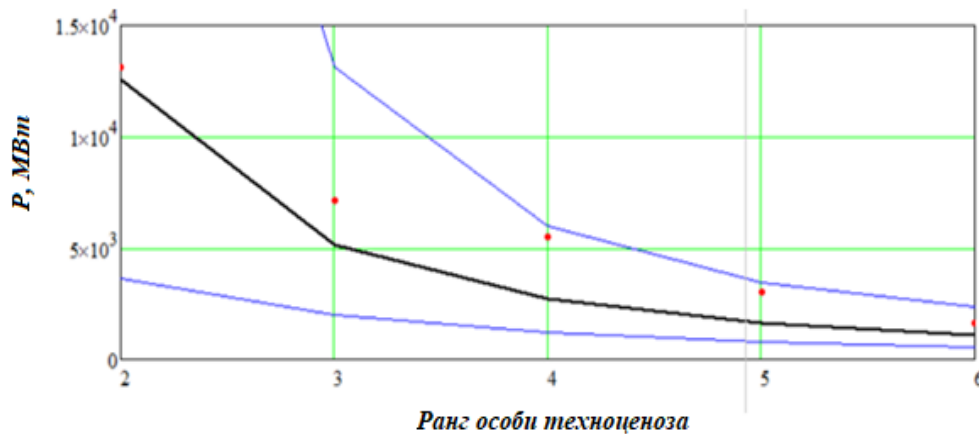


Рис. 7. Расположение ЭС Кузбасса (ранг 4) в области доверительного интервала по параметру установленной мощности электростанций
 Fig. 7. Location of Kuzbass power plants (rank 4) in the region of the confidence interval according to the parameter of the installed capacity of power plants

Значения, не попавшие в доверительный интервал, соответствуют ОЭС Центра – выше верхней границы и ОЭС Востока – ниже доверительного интервала. ОЭС Сибири по параметру установленной мощности электростанций входит в область допустимых значений и располагается достаточно близко к аппроксимированной кривой.

Ранговый анализ Кузбасской ЭС в составе ОЭС Сибири.

В ходе выполнения анализа Кузбасской ЭС в составе ОЭС Сибири по количеству электростанций получена кривая рангового распределения (Рис. 4).

Энергосистеме Кузбасса присвоен третий ранг, по результату визуальной оценки Кузбасская ЭС располагается в области допустимых значений по рассматриваемому параметру, «аномальные» объ-

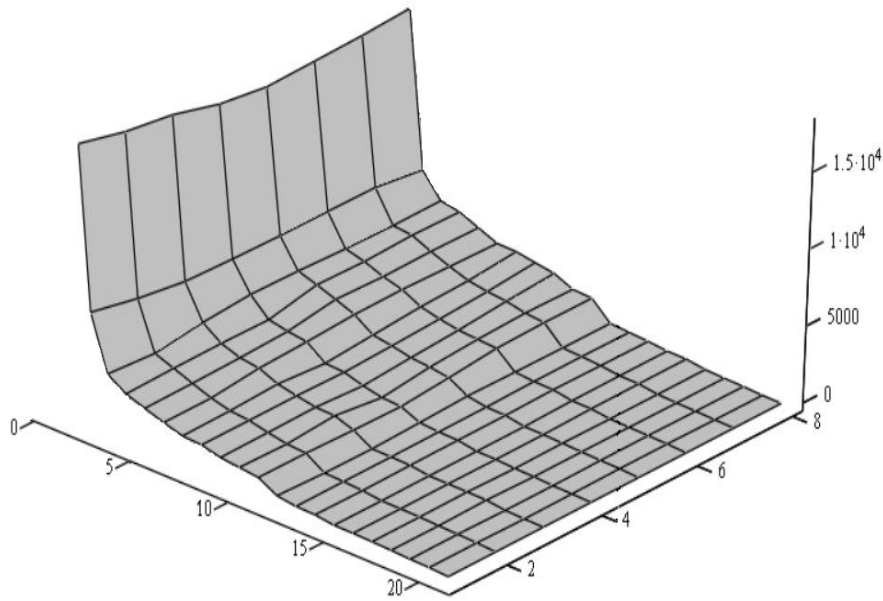


Рис. 8. Трехмерная ранговая поверхность исследуемого техноценоза
 Fig. 8. Three-dimensional rank surface of the studied technocenosis

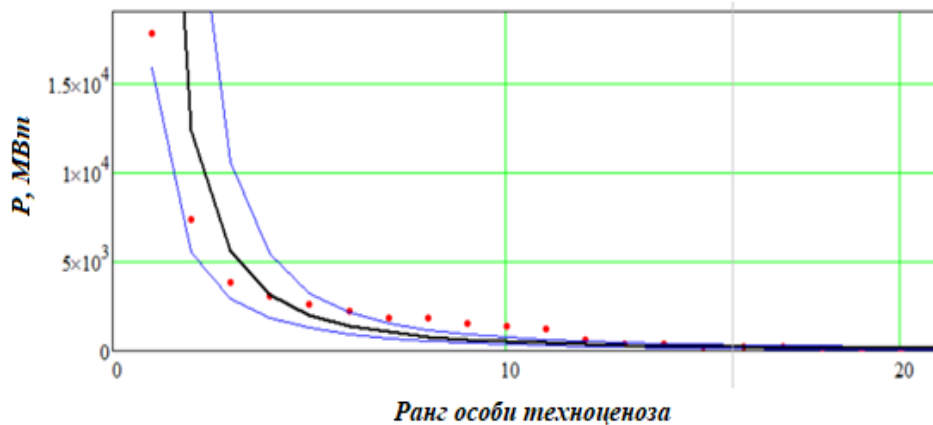


Рис. 9. Визуализация рассчитанного доверительного интервала
 Fig. 9. Visualization of the calculated confidence interval

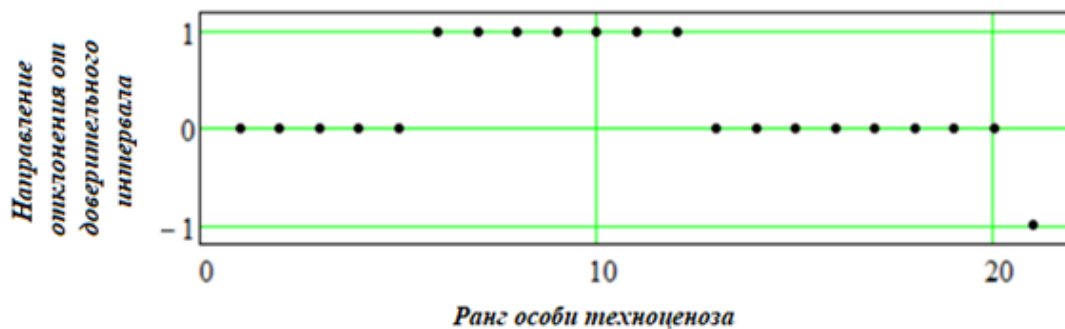


Рис. 10. График, определяющий «аномальные» особи исследуемого техноценоза
 Fig. 10. Graph identifying «abnormal» individuals of the technocenosis under study

екты техноценоза, не вошедшие в доверительный интервал – ЭС Алтайского края, расположившаяся выше допустимых значений и ЭС Республики Тыва – ниже доверительного интервала.

Анализ Кузбасской ЭС в составе ОЭС Сибири по критерию установленной мощности электростанций показал, что почти половина региональных энергосистем находится вне допустимого диапазона значений (Рис. 5).

Особь техноценоза, оказавшиеся выше области допустимых значений – ЭС Алтайского края, Томская и Бурятская энергосистемы (отклонение от доверительного интервала от 50 до 120 МВт). Ниже интервала расположились энергосистемы республик Алтай и Тыва с аналогичным значением отклонения. Визуализированы отклонения от доверительного интервала на Рис. 6.

Следует отметить и тот факт, что по установленной мощности ЭС Кузбасса (ранг 4) находится достаточно близко к верхней границе доверительного интервала с запасом в 350 МВт (Рис. 7).

Ранговый анализ существующего техноценоза Кузбасской ЭС по параметру электропотребления отраслями экономики.

В исследовании энергетического техноценоза нельзя ориентироваться только на объекты генерации, необходимо оценивать и различных потребителей, ими могут являться: районы, населенные пункты, отрасли экономики (промышленности) и отдельные крупные производственные центры.

В данной статье исследование техноценоза энергосистемы Кемеровской области выполнено по параметру потребления отраслями экономики. Данные для выполнения исследования предоставлены Единой межведомственной информационно-

торая является тесно связанной со смежными отраслями и прогрессирует, развиваясь согласно планам других производств. Увеличение объемов добычи угля, открытие новых промышленных производств – все это ведет за собой развитие транспортных сетей и увеличение масштабов перевозок.

Согласно Стратегии социально-экономического развития Кемеровской области, до 2035 года на территории рассматриваемого субъекта РФ планируется реализовать следующие мероприятия:

- строительство и реконструкция около 13 железнодорожных путей необщего пользования;
- строительство двух железнодорожных тупиков;
- строительство и реконструкция 13 железнодорожных станций;

Мероприятия запланированы к реализации в Беловском, Прокопьевском, Ленинск-Кузнецком, Ки-

Таблица 1. Результаты рангового анализа

Table 1. Rank analysis results

Отрасль экономики	Направление и величина отклонения, млн кВт·ч
Собственные нужды электростанций	+50
Транспорт и связь	+320
Потери в электрических сетях общего пользования	+640
Деятельность железнодорожного транспорта	+630
Электротяга на железнодорожном транспорте	+640
Прочие виды экономической деятельности	+590
Добыча полезных ископаемых	+30
Транспортирование газа и продуктов его переработки	-66

статистической системой, введенной в эксплуатацию приказом Минкомсвязи России и Росстата в 2011 году. Информация по потреблению электроэнергии отраслями экономики на территории области берется на период с 2014 по 2021 год. Всего на территории Кемеровской области выделена 21 рассматриваемая особь техноценоза, представляющая собой соответствующую ей отрасль экономики.

Алгоритм проведения исследования идентичен исследованиям, проведенным ранее, за исключением ведения трехмерного массива данных ввиду присутствия нескольких временных промежутков в исследовании.

Результат визуализации техноценоза за 8 прошедших лет представлен на трехмерной диаграмме, где ось абсцисс – ранг объекта, ось ординат – номер года исследования, ось аппликат – электропотребление отраслей экономики, млн кВт·ч (Рис. 8).

Финальный шаг исследования – расчет доверительного интервала и определение «аномальных» особей, выходящих за его границы (Рис. 9 и 10).

В процессе исследования определено, что 8 особей техноценоза по параметру потребления электроэнергии выходят за границы доверительного интервала, подробный результат с величиной приведен в Таблице 1.

Анализируя полученные результаты, стоит выделить отрасль железнодорожного транспорта, ко-

селевском и Новокузнецком муниципальных округах в перспективе до 2024 года. Согласно стратегии развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года, организация выделяет несколько тенденций развития:

- рост доли экспедиторских, логистических и складских услуг в общем обороте рынка;
- сохранение высокого уровня бюджетного финансирования;
- увеличение транзитных перевозок в 2-3 раза;
- создание дополнительного грузопотока и расширение территорий охвата;
- повышение экономической эффективности перевозок и снижение рисков, связанных с деятельностью холдинга.

Оценивая предприятие ОАО «РЖД» как организацию, смежную в своей деятельности со многими отраслями, можно смело предположить о растущем стабильном спросе на логистические услуги в перспективе до 2025 года. Предположение основано на прогнозируемых показателях в документах Правительства Кузбасса, внутренних документах организации и исследованиях, проведенных в данной работе.

Рассматривая карту полезных ископаемых Кузнецкого угольного бассейна и существующие добывающие предприятия (угольные шахты и разре-

зы), можно акцентировать внимание на расположении залежей каменного угля по обе стороны реки Томь на территории Междуреченского МО. Добыча угля ведется четырьмя шахтами и пятью угольными разрезами. Реализуя планы по увеличению объемов добычи полезных ископаемых, должное внимание стоит уделить и транспортной отрасли, основой которой на территории России является эксплуатирующая организация ОАО «РЖД».

Особенностью рассматриваемого объекта является большая протяженность железнодорожного полотна по поверхности, значительная удаленность имеющегося центра питания от резервных источников электроснабжения транспорта. На исследуемом участке осуществляется стабильно постоянный поток пассажирских и грузовых составов.

Суммарная установленная мощность предлагаемого к вводу генерирующего оборудования основана на мощности имеющегося тягового силового оборудования подстанций ОАО «РЖД» с учетом перспективного запаса на развитие транспортных сетей.

Анализ технического состояния силового электрического оборудования ОАО «РЖД» по данным СИПР Кемеровской области – Кузбасса показал, что:

- На тяговой ПС 220 кВ «Теба», которая питает крупную магистраль Сибирской железной дороги, оба силовых трансформатора отработали свой нормативный срок эксплуатации. Один из них находится в работе уже 55 лет, второй отработал 34 года;

- На тяговой ПС 220 кВ «Артышта-2», которая также питает крупный участок межрегионального транспортного пути, силовые трансформаторы эксплуатируются уже 40 и 57 лет;

- На электросетевых объектах 110 кВ, питающих тяговые источники электроснабжения, 88% от общего количества ПС отработали свыше 35 лет (самое продолжительное время эксплуатации имеют тяговые ПС, располагающиеся на территории Ленинск-Кузнецкого и Новокузнецкого МО – от 62 до 83 лет).

По результатам анализа состава и состояния силового электрического оборудования решено предложить к строительству несколько объектов распределенной генерации - мини-ТЭЦ на твердом топливе с установленной электрической мощностью по 25-32 МВт. Разработка и определение точного территориального расположения мини-ТЭЦ является темой для отдельной исследовательской работы, но уже на данном этапе с уверенностью можно сказать о вполне обоснованном к рассмотрению варианте строительства в Новокузнецком и Междуреченском МО.

Заключение

В ходе исследования Кузбасской энергосистемы были найдены «слабые» места (со стороны электрических режимов и экономичности) и подтверждена необходимость в проведении оптимизационных мероприятий, нацеленных на повышение надежности Кузбасской энергетической системы. Среди ярко выраженных особенностей техноценоза реги-

ональной энергосистемы выделены три отрасли экономики – добывающая, обрабатывающая и транспортная. В результате исследования определена величина отклонения оптимизационного параметра (уровень электропотребления отраслями промышленности, установленная мощность электростанций и их количество), спрогнозирован характер поведения аномальных показателей, выделенных из доверительного интервала. Отмечено, что ввиду растущих производств на территории исследуемого субъекта РФ дефицит электроэнергии в энергосистеме будет расти, в связи с этим стоит обратить внимание на вариант с внедрением распределенной энергетики, выдвигая в качестве альтернативы одной устаревшей электростанции несколько современных распределенных генерирующих мощностей, которые могут быть реализованы на основе возобновляемых источников электроэнергии.

Техноценологический подход, применимый к решению оптимизационных задач на примере проведенного исследования, позволяет смоделировать и реализовать в программном комплексе Mathcad имитационную модель рассматриваемого объекта и произвести целенаправленное энергетическое исследование, описывающее его актуальное состояние и позволяющее обосновать внедрение тех или иных оптимизационных мероприятий на перспективный период.

Среди положительных ожидаемых результатов от проведенных оптимизационных мероприятий выделены несколько основных [23-26]:

- снижение уровня потерь в распределительных сетях;
- обеспечение возможности развития возобновляемой энергетики;
- соответствие уровня развития энергетики темпу развития производства;
- рациональное использование углеводородного сырья, достигаемое за счет увеличения доли местных источников энергетических ресурсов;
- повышение надежности электроснабжения за счет достаточного резерва энергосистемы.

Нельзя обойти стороной возникновение следующих негативных аспектов:

- увеличение мощности короткого замыкания;
- необходимость перерасчета, перенастройки и модернизации имеющегося оборудования релейной защиты;
- малая степень изученности параллельной работы объектов распределенной энергетики с ЕЭС;
- отсутствие ориентированности нормативных актов и регламентов к объектам распределенной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатюк В. И. Закон оптимального построения техноценозов [Электронный ресурс]: Монография. Калининград : Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019.

896 с. Режим доступа: <http://gnatukvi.narod.ru/ind/>. — Загл. с экрана

2. Паскарь И. Н., Лебедев Г. М., Захаров С. А. Техноценологический подход к анализу электропотребления Кемеровской области // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. №1. С. 75–82.

3. Гнатюк В. И., Кивчун О. Р., Луценко Д. В., Морозов Д. Г. Режимное нормирование электропотребления при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42) Т. 3. С. 116–121.

4. Закон Кемеровской области «О внесении изменений в Закон Кемеровской области «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Кемеровской области до 2035 года» от 23.12.2020 № 123-ОЗ. Официальный сайт Администрации Правительства Кузбасса. 2020.

5. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» от 09.06.2020 № 1523-р. Официальный сайт Министерства Энергетики Российской Федерации. 2020.

6. Приказ Министерства Энергетики Российской Федерации «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2020-2026 годы» от 30.06.2020 № 508. Официальный сайт Министерства Энергетики Российской Федерации. 2020.

7. Кудрин, Б. И. Введение в технику. 2-е изд. Томск : Изд-во ТГУ, 1993. 552 с.

8. Хорьков С. А., Маврикиди Ф. И. Ценозы, системы и их модели [Монография]. Ижевск : ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» Институт нефти и газа им. М.С. Гущериева, 2021.

9. Gnatyuk V. I., Polevoy S. A., Kivchun O. R., Lutsenko D. V. Applying the potentiating procedure for optimal management of power consumption of technocenose // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 837. Advanced technologies in the fuel and energy complex (Scopus). Moscow : Russia, 2020.

10. Гнатюк В. И. Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт]. Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409]. (дата обращения: 28.05.2021).

11. Puttgen H. B., Macgregor P. [Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era? / H. Puttgen, Текст] / N.Y. : IEEE Power Energy Mag, 2017. P. 318.

12. Аксенова А. А. Сравнение методов оптимизации для развития энергосистемы // Сборник материалов XIV Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Сборник материалов XIV Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 19-22 апр. 2022 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: Костиков К. С. (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2022.

13. Алехин Р. А., Кубарьков Ю. П., Закамов Д. В., Умаров Д. В. Обзор метаэвристических методов оптимизации, применяемых при решении электроэнергетических задач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. №3(63). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metaevristicheskikh-metodov-optimizatsiiiprimenyayemyh-pri-reshenii-elektroenergeticheskikh-zadach>.

14. Толба М.А.Х. Развитие методов оптимизации размещения компенсирующих устройств и возобновляемой распределенной генерации в радиальных электрических сетях. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. Наук. М. : МЭИ, 2018.

15. Yang S. [et al.] A multi-objective stochastic optimization model for electricity retailers with energy storage system considering uncertainty and demand response // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 277. P. 124017.

16. Yang D. [et al.] Optimal dispatching of an energy system with integrated compressed air energy storage and demand response // Energy. 2021. Vol. 234. P. 121232.

17. Xu W. [et al.] Optimal allocation of power supply systems in industrial parks considering multi-energy complementarity demand response // Applied Energy. 2020. Vol. 275. P. 115407.

18. Алябьев В. Н., Куделина Д. В., Муратов М. А., Деденко В. Э. Исследование результатов внедрения АСУ энергосбережением на промышленных предприятиях // Электроэнергетическая отрасль: современные тенденции развития и практические разработки: сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции, Курск, 01–02 ноября 2021 года. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 121–126.

19. Наумов И. И., Моторин Д. Е., Кочубей А. Л., Кудрявцев И. А. Повышение энергоэффективности и модернизация энергетических систем в России: Энергоэффективность и энергоменеджмент // Дневник науки. 2021. № 10(58). DOI: 10.51691/2541-8327_2021_10_5.

20. Токменинов К. А., Токменинов А. К. Некоторые мероприятия повышения энергоэффективности в промышленности // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 24–25 апреля 2014 года. Могилев : Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет», 2014. С. 412–413.

21. Пузина Е. Ю., Сыромятников И. А. Управление энергоэффективностью в Российской Федерации и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности и энергосбережения в РФ // Техноэкономические проблемы развития регионов: материалы научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 26–27 ноября 2020 года. Иркутск : ИРНТУ, 2020. С. 202–205.

22. Субботин Д. Е., Ахмеров А. В. Мероприятия по повышению энергетической эффективности на предприятии // Поволжский научный вестник. 2019. № 2. С. 23–30.

23. Turan Gonen. Distribution Engineering. Boca Raton. : CRC Press, 2014. P. 1061.

24. Хохлов А. А. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М. : Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018.

25. Устюжанина А. С. Экологические аспекты внедрения распределенной генерации // Сборник материалов XIV Всерос. научно-практической кон-

ференции с международным участием, 19-22 апр. 2022 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: Костиков К. С. (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2022.

26. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф. [и др]. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М. : Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018. 89 с. [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Завьялов Никита Витальевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), z79000554445@gmail.com.

Паскарь Иван Николаевич, старший преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), paskar-ivan@mail.ru

Лебедев Геннадий Михайлович, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), доктор техн. наук, gennadij.lebedev.49@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Завьялов Никита Витальевич – анализ существующей ситуации в функционирующей энергосистеме; реализация математического алгоритма; сбор и анализ данных; аналитические расчеты; выводы; написание текста.

Паскарь Иван Николаевич – постановка исследовательской задачи в соавторстве; научный менеджмент; формирование структуры основных задач.

Лебедев Геннадий Михайлович – постановка исследовательской задачи в соавторстве; научный менеджмент; формирование структуры основных задач; формулировка выводов..

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-39-50

Nikita V. Zavyalov, Ivan N. Paskar, Gennady M. Lebedev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

E-mail: z79000554445@gmail.com

STUDY OF REGIONAL ENERGY SYSTEMS USING THE TECHNOCENTRIC APPROACH



Article info

Received:

29 October 2023

Accepted for publication:

30 April 2024

Abstract.

The article analyzes the functioning Kuzbass energy system in three projections according to the two studied criteria, processes and describes the results of the study, evaluates electricity consumption by economic sectors of the Russian Federation, describes in detail the mathematical software to implement the study based on the technocentric approach, finds points of the proposed optimization impact, which justify the implementation of distributed generation facilities (including - on the o Ranking analysis in the course of the conducted research includes three stages, which allow to describe complex technological systems as a result: interval estimation, rationing and forecasting. The advantages of the technocentric approach to the power system analysis lie in the study of changing technological systems as a unified whole, which is characterized by stable parameters. The

Accepted:
15 May 2024

Published:
06 June 2024

Keywords: technocenosis;
power system; optimization;
energy efficiency; mathematical analysis.

study is based on current statistical data from the System Operator of the Unified Energy System (hereinafter - SO UES), data from the Federal State Statistics Service, as well as officially published relevant documents of the Government of the Russian Federation, schemes and programs of prospective development of the electric power industry (hereinafter - SIPRE) of all subjects of the Russian Federation. Among the pronounced individuals of the technocenosis of the regional power system under study, three sectors of the economy were identified - mining, manufacturing and transport. As a result of the study the deviation value of the optimization parameter (the level of electricity consumption by industries, installed capacity of power plants and their number) was determined, the prospective nature of the behavior of abnormal indicators, separated from the confidence interval was studied. It is noted that the current shortage of electricity in the energy system will grow due to the progressive volumes of production on the territory of the studied subject of the Russian Federation.

For citation: Zavyalov N.V., Paskar I.N., Lebedev G.M. Study of regional energy systems using the technocentric approach. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 2(172):39-50 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-39-50, EDN: LMPBXG

REFERENCES

1. Gnatyuk V.I. Zakon optimal'nogo postroeniia tekhnosenozov [The law of optimal construction of technoceneses]. Kaliningrad, KITS «Tekhnosenoz», 2019, 896 p. Available at: <http://gnatukvi.narod.ru/ind>. (in Russian)
2. Paskar I.N., Lebedev G.M., Zakharov S.A. Tekhnosenologicheskii podkhod k analizu elektropotrebleniia Kemerovskoi oblasti [Technocenological approach to the analysis of electricity consumption in the Kemerovo region]. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2017; 1:75–82.
3. Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Lucenko D.V., Morozov D.G. Rezhimnoe normirovanie elektropotrebleniya pri ekspluatatsii ob"ektov regional'nogo elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Morskije intelektual'nye tekhnologii*. 2018; 4(42(3)):116–121.
4. Zakon Kemerovskoj oblasti "O vnesenii izmenenij v Zakon Kemerovskoj oblasti "Ob utverzhdenii Strategii social'no-ekonomicheskogo razvitiya Kemerovskoj oblasti do 2035 goda" ot 23.12.2020 № 123-OZ. Oficial'nyj sajt Administratsii Pravitel'stva Kuzbassa. 2020.
5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii "Ob utverzhdenii Energeticheskoi strategii Rossijskoj Federatsii na period do 2035 goda" ot 09.06.2020 № 1523-r. Oficial'nyj sajt Ministerstva Energetiki Rossijskoj Federatsii. 2020.
6. Prikaz Ministerstva Energetiki Rossijskoj Federatsii "Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya Edinoj energeticheskoi sistemy Rossii na 2020–2026 gody" ot 30.06.2020 № 508. Oficial'nyj sajt Ministerstva Energetiki Rossijskoj Federatsii. 2020.
7. Kudrin B.I. Vvedenie v tekhniku [Introduction to technique]. Tomsk: Izd-vo TGU; 1993.
8. Hor'kov S.A., Mavrikidi F.I. Cenozy, sistemy i ih modeli [Monografiya]. Izhevsk: FGBOU VO «Udmurtskij gosudarstvennyj universitet» Institut nefti i gaza im. M.S. Gucerieva; 2021.
9. Gnatyuk V.I., Polevoy S.A., Kivchun O.R., Lutsenko D.V. Applying the potentiating procedure for optimal management of power consumption of technocenose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 837.
10. Gnatyuk V.I. Tekhnika, tekhnosfera, energosberezhenie [Technology, technosphere, energy saving]. Elektronnyye tekstovye dannye. M., 2000. <http://www.gnatukvi.ru> (accessed may 28, 2021).
11. Puttgen H.B. Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era? N.Y.: IEEE Power Energy Mag; 2017.
12. Aksenova A.A. Sravnenie metodov optimizatsii dlia razvitiia energosistemy [Comparison of optimization methods for the development of the power system]. *Sbornik materialov XIV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Kemerovo, 2022.
13. Alekhin R.A., Kubar'kov Yu.P., Zakamov D.V., Umyarov D.V. Obzor metaevristicheskikh metodov optimizatsii, primenyaemykh pri reshenii elektroenergeticheskikh zadach [Overview of metaheuristic optimization methods used in solving electric power problems]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo universiteta, Seriya: Tekhnicheskije nauki*. 2019; 3(63).
14. Tolba M.A.H. Razvitie metodov optimizatsii razmeshcheniya kompensiruyushchih ustrojstv i vobnovlyaemoj raspredeljenoj generatsii v radial'nykh elektricheskikh setyah [Development of methods to optimize the location of compensating devices and renewable distributed generation in radial power grids]. Moskva: MEI; 2018.
15. Yang S. [et al.] A multi-objective stochastic optimization model for electricity retailers with energy storage system considering uncertainty and demand response. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 277:124014.
16. Yang D. [et al.] Optimal dispatching of an energy system with integrated compressed air energy storage and demand response. *Energy*. 2021; 234:121232.
17. Xu W. [et al.] Optimal allocation of power supply systems in industrial parks considering multi-

energy complementarity demand response. *Applied Energy*. 2020; 275:115407.

18. Alyab'ev V.N., Kudelina D.V., Muratov M.A., Dedenko V.E. Issledovanie rezul'tatov vnedreniya ASU energosberezheniem na promyshlennykh predpriyatiyah. *Sbornik nauchnykh statej po materialam II Mezhdu-narodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Kursk: Yugo-Zapadnyj Gosudarstvennyj Universitet; 2021 Pp. 121–126.

19. Naumov I.I., Motorin D.E., Kochubej A.L., Kudryavcev I.A. Povyshenie energoeffektivnosti i modernizaciya energeticheskikh sistem v Rossii: Energoeffektivnost' i energomenedzhment. *Dnevnik nauki*. 2021; 10(58).

20. Tokmeninov K.A., Tokmeninov A.K. Nekotorye meropriyatiya povysheniya energoeffektivnosti v promyshlennosti. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: Materialy mezhdu-narodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Mogilev: Gosudarstvennoe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Belorussko-Rossijskij universitet"; 2014. Pp. 412–413.

21. Puzina E.Yu., Syromyatnikov I.A. Upravlenie energoeffektivnost'yu v Rossijskoj Federacii i razrabotka meropriyatij po povysheniyu energoeffektivnosti i energosberezheniya v RF. *Tekhnikoekonomicheskie problemy razvitiya regionov. Mate-*

rialy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Irkutsk: IRNITU; 2020. Pp. 202–205.

22. Subbotin D.E., Ahmerov A.V. Meropriyatiya po povysheniyu energeticheskoy effektivnosti na predpriyatii. *Povolzhskij nauchnyj vestnik*. 2019; 2:23–30.

23. Turan Gonen. *Distribution Engineering*. Boca Raton.: CRC Press, 2014.

24. Hohlov A.A. Raspredeennaya energetika v Rossii: potencial razvitiya [Distributed Energy in Russia: Potential for Development]. Moskva: Energeticheskij centr Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO; 2018.

25. Ustyuzhanina A.S. Ekologicheskie aspekty vnedreniya raspredelennoj generacii [Environmental aspects of the implementation of distributed generation]. *Sbornik materialov XIV Vseros. nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, 19-22 apr. 2022*. Kemerovo, FGBOU VO «Kuzbas. gos. tekhn. un-t im. T. F. Gorbacheva»; 2022.

26. Hohlov A., Mel'nikov Yu., Veselov F. Raspredeennaya energetika v Rossii: potencial razvitiya [Distributed Energy in Russia: Potential for Development]. Moskva: Energeticheskij centr Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO; 2018.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Yuliya Yu. Leonova, Postgraduate student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennaya, Kemerovo, 650000, z79000554445@gmail.com

Vladislav A. Negadaev, C Scientific Researcher, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russia, paskar-ivan@mail.ru

Yuliya Yu. Leonova, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennaya, Kemerovo, 650000, ORCID: Dr.Sc., Associate Professor, gennadij.lebedev.49@mail.ru

Contribution of the authors:

Zavyalov Nikita Vitalievich – analysis of the existing situation in the functioning energy system; implementation of a mathematical algorithm; data collection and analysis; analytical calculations; conclusions; writing text.

Paskar Ivan Nikolaevich – formulation of the research problem in co-authorship; scientific management; formation of the structure of the main tasks.

Lebedev Gennady Mikhailovich – formulation of the research problem in co-authorship; scientific management; formation of the structure of the main tasks; formulation of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

