

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

TECHNICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 621.311.1:519.237.5

ББК 31.264.5

О-93

DOI: 10.53598/2410-3225-2023-4-331-22-32

Оценка влияния внедрения возобновляемых источников энергии на стоимость электроэнергии в регионе*

(Рецензирована)

Павел Юрьевич Бучацкий¹, Семен Васильевич Теплоухов²,
Стефан Владимирович Онищенко³, Дмитрий Николаевич Лисов⁴,
Ирина Николаевна Воробьева⁵

¹⁻⁴ Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия

⁵ Отделение Национального банка по Республике Адыгея Южного главного
управления Центрального банка Российской Федерации, Майкоп, Россия,
79SVC_ECON@cbr.ru

¹ buch@adygnet.ru

² tepl_sv@adygnet.ru

³ osv@adygnet.ru

⁴ lisov_dn@adygnet.ru

Аннотация. Использование различных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) во всем мире с каждым годом получает все более широкое распространение, поскольку многие страны придерживаются политики энергетической трансформации, включающей множество различных пунктов, основным из которых является максимально возможное повышение уровня безуглеродной энергетики и переход на более чистые виды энергии. Долгое время многие скептически относились к использованию ВИЭ в качестве основных видов производства энергии в силу их высокой стоимости в сравнении с традиционной энергетикой. Однако развитие технологий преобразования энергии позволило повысить эффективность энергетических преобразователей и удешевить процесс их производства, в результате чего на протяжении последних нескольких лет наблюдается снижение себестоимости энергии, производимой при помощи использования альтернативных источников энергии. Можно отметить, что в странах, которые исчерпали свои запасы углеродных ресурсов или имеют их в ограниченном количестве, стоимость возобновляемой энергии является более низкой по сравнению с традиционной энергетикой. Несколько иная ситуация складывается в странах с обширными запасами углеводородных ресурсов, к которым, в частности, относится и Россия. В связи с этим было проведено исследование, которое позволило оценить влияние интеграции ВИЭ в общую энергетическую систему региона на процесс формирования тарифов на электроэнергию. В качестве региона для исследования была выбрана Республика Адыгея, поскольку данный регион является энергодефицитным и имеет расположенные на его территории крупные станции генерации на основе использования альтернативной энергии. Для проведения эмпирического исследования использовались данные о величине тарифов на электроэнергию до введения в эксплуатацию станций и после их запуска, в качестве методов были рассмотрены различные виды регрессий и методы кластеризации. Результаты исследования показали наличие сильной взаимосвязи между процессом вовлечения ВИЭ в энергосистему региона и формированием цен, в результате которой наблюдается изменение тренда роста тарифов.

Ключевые слова: стоимость электроэнергии, возобновляемые источники энергии, безуглеродная энергетика, регрессионный анализ, кластерный анализ, машинное обучение

* Настоящая статья отражает личную позицию авторов. Содержание и результаты данного исследования не следует рассматривать, в том числе цитировать в каких-либо изданиях как официальную позицию Банка России или указание на официальную политику или решения регулятора. Любые ошибки в данном материале являются исключительно авторскими.

Original Research Paper

Assessment of the impact of the introduction of renewable energy sources on the cost of electricity in the region**

**Pavel Yu. Buchatskiy¹, Semen V. Teploukhov², Stefan V. Onishchenko³,
Dmitriy N. Lisov⁴, Irina N. Vorobeva⁵**

¹⁻⁴ Adyghe State University, Maykop, Russia

⁵ Branch of the National Bank for the Republic of Adyghea of the Southern Main Directorate of the Central Bank of the Russian Federation, Maykop, Russia,
79SVC_ECON@cbr.ru

¹ buch@adygnet.ru

² tepl_sv@adygnet.ru

³ osv@adygnet.ru

⁴ lisov_dn@adygnet.ru

Abstract. The use of various types of renewable energy sources (RES) around the world is becoming more widespread every year, as many countries adhere to energy transformation policies that include many different points, the main of which is to maximize the level of carbon-free energy and transition to cleaner types of energy. For a long time, many people has been skeptical about the use of renewable energy as the main types of energy production due to their high cost in comparison with traditional energy. However, the development of energy conversion technologies has made it possible to increase the efficiency of energy converters and reduce the cost of their production, as a result of which, over the past few years, there has been a decrease in the cost of energy produced using alternative energy sources. It may be noted that in countries that have exhausted their reserves of hydrocarbons resources, or have them in limited quantities, the cost of renewable energy is lower compared to traditional energy. The situation is somewhat different in countries with vast reserves of hydrocarbon resources, which, in particular, includes Russia. In this regard, a study has been carried out that made it possible to assess the impact of the integration of RES into the general energy system of the region on the process of forming electricity tariffs. The Republic of Adyghea was chosen as the region for the study, since this region is energy-deficient and has large generation stations based on the use of alternative energy located on its territory. To conduct an empirical study, data on the amount of electricity tariffs before the commissioning of the stations and after their launch were used, various types of regressions and clustering methods were considered as methods. The results of the study showed that there is a strong relationship between the process of involving RES in the energy system of the region and the formation of prices, as a result of which there is a change in the trend of tariff growth.

Keywords: the cost of electricity, renewable energy sources, carbon-free energy, regression analysis, cluster analysis

Введение

Использование возобновляемых источников энергии в мировой энергетической отрасли давно стало актуальным направлением, которое получает все большее распространение и признание в самых различных странах [1]. В последние годы наблюдается стремительный рост генерации энергии, получаемой за счет использования ВИЭ, чему способствует множество различных факторов [2–4]:

- ВИЭ позволяют создавать гибкие энергетические системы;
- возможность создания автономных систем в труднодоступных регионах;
- отсутствие вредного воздействия на окружающую среду;
- большой потенциал данных источников энергии;
- неисчерпаемый объем энергии.

Помимо этого, за счет разработки новых технологий и принципов преобразова-

** The present paper reflects the personal position of the authors. The content and results of this research should not be considered or referred to in any publications as the Bank of Russia's official position, official policy, or decisions. Any errors in this document are the responsibility of the authors.

ния энергии [5, 6] наблюдается увеличение эффективности элементов преобразователей при снижении их общей стоимости производства (рис. 1), что приводит к уменьшению стоимости производства энергии [7], которая является одним из основных параметров определения целесообразности интеграции альтернативной энергии в общую энергетическую систему, что особенно актуально при наличии большого количества традиционных ресурсов, имеющих невысокую стоимость и высокую степень доступности.

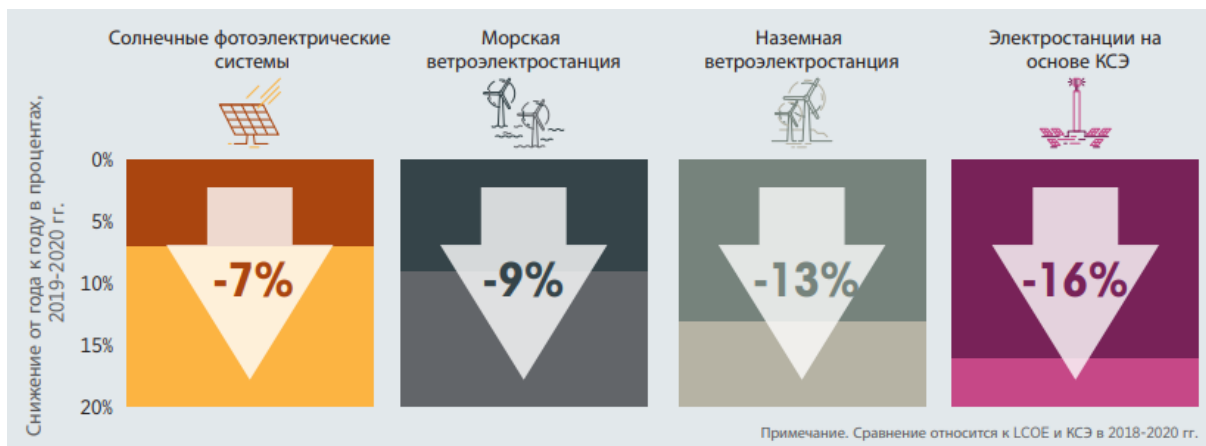


Рис. 1. Тенденции снижения стоимости строительства и эксплуатации энергетических систем на основе ВИЭ

Fig. 1. Trends in reducing the cost of construction and operation of RES-based energy systems

Существует ряд исследований [8–10], доказывающих, что интеграция энергетических систем на основе использования ВИЭ действительно приводит к снижению общей цены на электроэнергию, однако основным ограничением данных работ является то, что в качестве примеров были рассмотрены развитые страны в европейском и азиатском регионах, которые имеют большой дефицит полезных ископаемых, что приводит к тому, что использование альтернативной энергетики является одной из наиболее экономичных и реализуемых стратегий энергетической трансформации, позволяющих избежать возникновения кризиса энергопотребления в условиях высокой геополитической нестабильности и роста потребляемых мощностей.

Несколько отличная ситуация складывается в нашей стране, обладающей большими запасами традиционных ресурсов, имеющих низкую стоимость в сравнении с общемировыми ценами на энергоресурсы. Однако, согласно политике энергетического развития [11], в России предполагается наращивать объемы генерации энергии на основе ВИЭ для поддержания общей политики мировой декарбонизации [12]. В связи с этим в данной работе предлагается провести исследование, позволяющее оценить влияние внедрения возобновляемых источников энергии на процесс ценообразования на примере Республики Адыгея, в которой с 2020 года функционирует крупный ветроэнергетический парк, мощность которого позволила повысить самообеспеченность региона энергией на 10% [13].

Материалы и методы

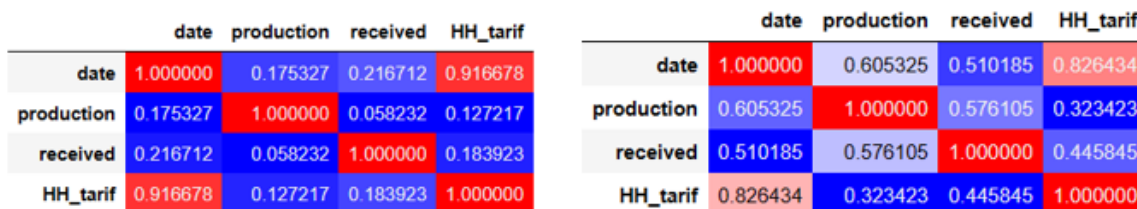
При выборе региона для проведения исследования учитывались два основных фактора: наличие в регионе крупных генерирующих станций на основе возобновляемых источников энергии и процент самообеспеченности региона, в результате чего была выбрана Республика Адыгея, удовлетворяющая этим условиям. В качестве данных была использована статистика, содержащая сведения о тарифе по месяцам (NH_tarif), количестве закупаемой (received) и вырабатываемой энергии (production), а также о факторе наличия электростанций на альтернативной энергетике (VZR) (рис. 2).

	date	production	received	HH_tarif	VZR
0	2016-01-01	13.423	115.184006	8067.55	0
1	2016-02-01	14.088	105.354415	8067.55	0
2	2016-03-01	14.778	106.000263	8067.55	0
3	2016-04-01	15.550	95.635603	8067.55	0
4	2016-05-01	15.860	88.943694	8067.55	0

Рис. 2 Структура используемой выборки данных

Fig. 2. Structure of the data sample used

Прежде всего была определена существующая зависимость между основными параметрами используемых статистических данных, для чего использовался корреляционный анализ, по результатам которого было установлено, что после внедрения ветроэнергетической станции (ВЭС), помимо роста генерации энергии, произошло уменьшение коэффициента корреляции между параметрами величины тарифа и даты, хотя до этого связь была чрезвычайно сильной (рис. 3).



а) без ВЭС

б) после внедрения ВЭС

Рис. 3. Матрицы корреляций: а) до внедрения ВЭС и б) после ее введения в эксплуатацию

Fig. 3. Correlation matrices: a) before the introduction of RES and b) after its commissioning

Этот признак не является подтверждением гипотезы о снижении тарифного плана или замедлении роста тарифов, поэтому следующим шагом был переход к более информативным способам анализа.

В качестве первого метода анализа использовалась процедура построения тренда для определения динамики изменения цен в регионе. Объем используемой выборки позволяет построить линию тренда, начиная с 2014 года, что необходимо для оценки изменения цен. Существует несколько различных методов [14, 15], используемых для получения интересующего нас тренда, наиболее простым из которых является метод линейной регрессии [16]. Для реализации такой модели использовался язык программирования Python, в частности библиотеки numpy и pandas, предназначенные для осуществления процедур анализа данных, в результате чего было получено следующее уравнение модели линейной регрессии:

$$y = 0,421x - 5,953486. \quad (1)$$

В процессе визуализации построенной модели был получен следующий результат, представленный на рисунке 4.

Как видно, использованная модель линейной регрессии не позволяет в полной мере аппроксимировать существующую кривую изменения тарифного плана цен на электроэнергию и не позволяет определить общее изменение тренда после введения в эксплуатацию ВЭС. Для решения этой проблемы исходная выборка была разделена на две части: до внедрения ВЭС и после с целью построения модели линейной регрессии для каждой из полученных подвыборок (рис. 5).

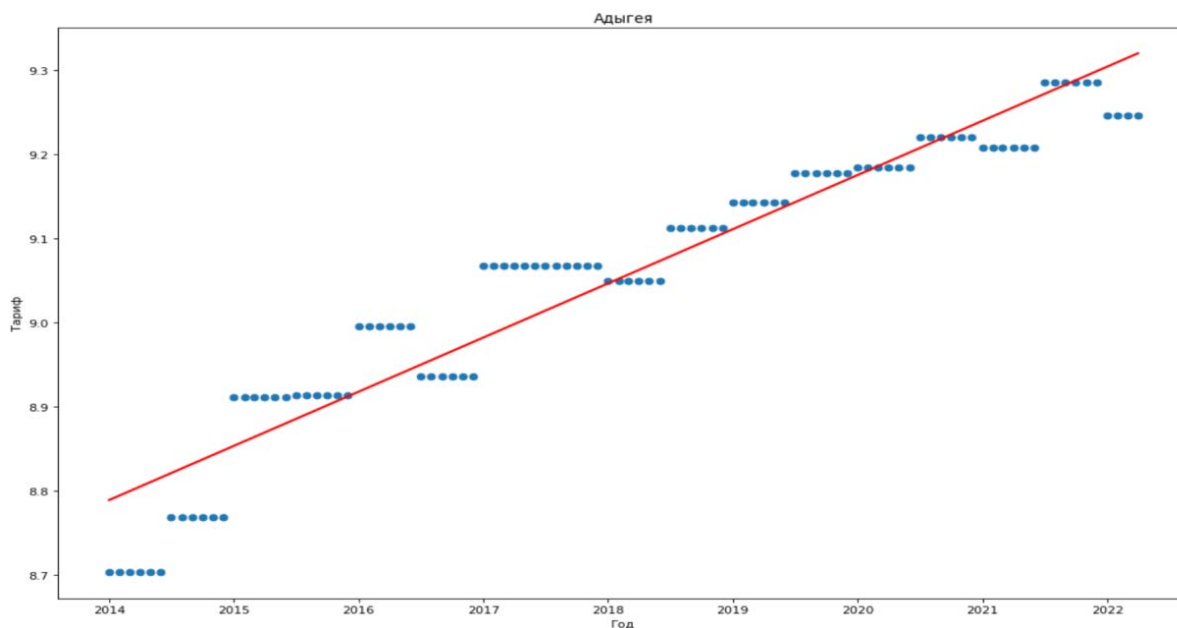


Рис. 4. Визуализация модели линейной регрессии

Fig. 4. Linear regression model visualization

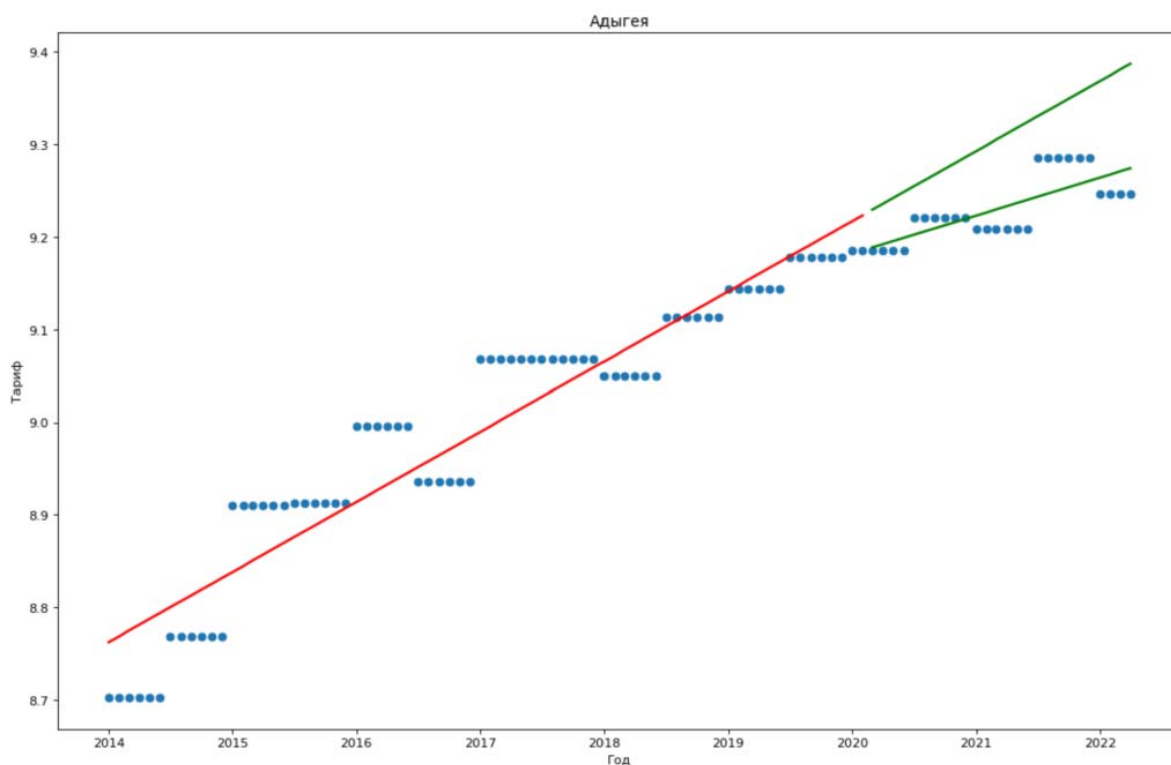


Рис. 5. Построение линейной регрессии для подвыборок исходных данных

Fig. 5. Construction of linear regression for subsamples of the original data

В результате были получены две различных модели, аппроксимирующие значения до процесса внедрения ВЭС и после, функции которых представлены ниже:

$$y = 0,3989x - 5,4315, \quad (2)$$

$$y = 0,3020x - 7,1272. \quad (3)$$

Результат визуализации полученной модели наглядно продемонстрировал возникшее изменение угла наклона прямой, полученной в результате построения второй

модели, что говорит об изменении общей динамики роста цен в сторону замедления после введения в эксплуатацию ВЭС.

Поскольку линейная регрессия может показать недостоверные результаты при построении на данных, обладающих нелинейным характером, было принято решение использовать нелинейную регрессию (полиномиальная регрессия, рис. 6), которая показывает более приемлемые результаты на данных, которые явно не демонстрируют линейной зависимости [17]. В результате чего были получены две модели, функции которых представлены ниже. Модель для подвыборки значений до внедрения ВЭС:

$$y = -0,00000211x^4 - 0,000527x^3 - 0,0454x^2 - 2,08x, \quad (3)$$

и для данных о тарифах после внедрения ВЭС:

$$y = -0,000547x^4 - 0,1892x^3 - 24,45x^2 - 14,002x. \quad (4)$$

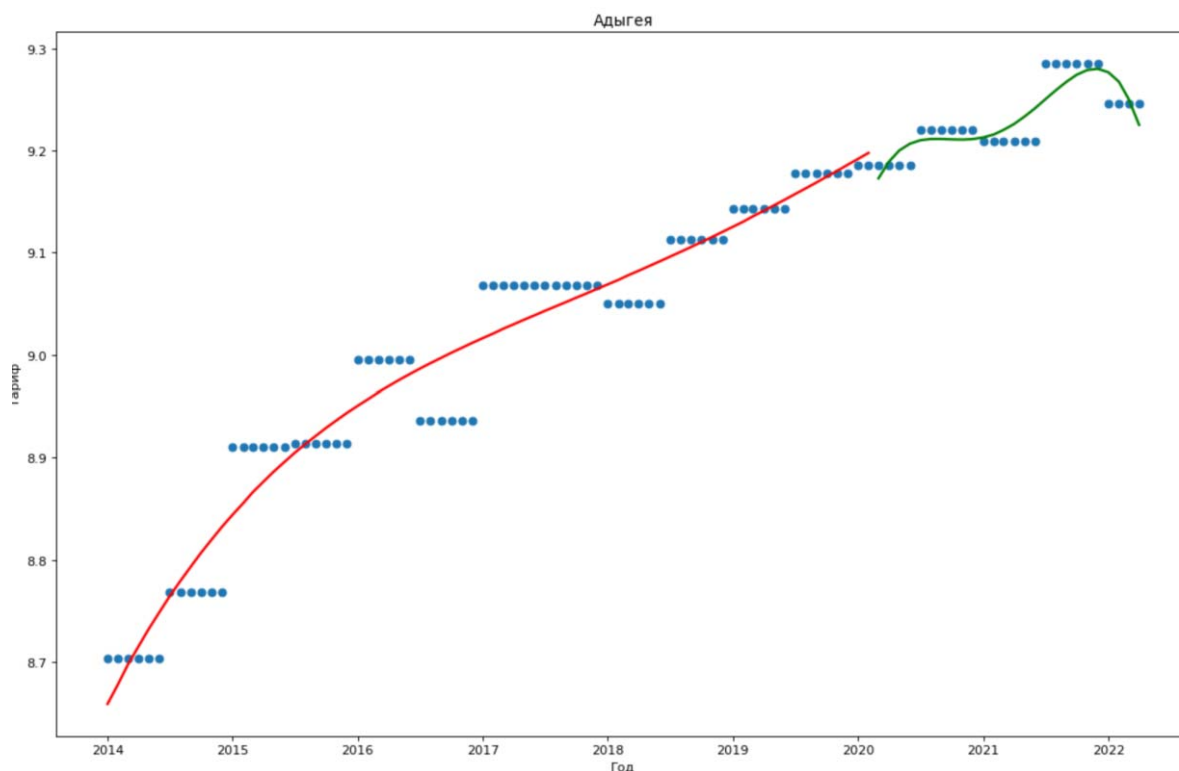


Рис. 6. Полиномиальная регрессия 4 порядка

Fig. 6. Polynomial regression of the order 4

Полученные модели полиномиальной регрессии показали более точный результат аппроксимации, в целом подтвердив имеющуюся динамику в изменении процесса ценообразования. Для оценки моделей был использован коэффициент детерминации, также называемой оценкой R^2 , который рассчитывается по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \quad (5)$$

где SS_{res} – сумма квадратов остаточных ошибок, SS_{tot} – общая сумма ошибок. Результат расчета R^2 для модели линейной регрессии равен $R^2=0,192$, в то время как для полиномиальной регрессии $R^2=0,34$. Значения коэффициента детерминации говорят о слабой мощности полученной модели, что не позволяет использовать ее в полной мере для построения будущих трендов

Для более точных результатов воспользуемся одним из методов машинного обучения [18, 19] – моделью многофакторной регрессии, для построения которой в каче-

стве дополнительных факторов будем использовать показатели производства и закупки электроэнергии. В качестве основного метода использовалась классическая линейная многофакторная регрессия (рис. 7).

```

X_0 = region_01_vzr0[['date', 'production', 'received']]
Y_0 = region_01_vzr0['HH_tarif']
X_1 = region_01_vzr1[['date', 'production', 'received']]
Y_1 = region_01_vzr1['HH_tarif']
X_train_0, X_test_0, y_train_0, y_test_0 = train_test_split(X_0, Y_0, test_size = 0.3,
random_state = 0)
X_train_1, X_test_1, y_train_1, y_test_1 = train_test_split(X_1, Y_1, test_size = 0.3,
random_state = 0)
lr0 = LinearRegression()
lr1 = LinearRegression()
y_pred_test0 = lr0.predict(X_test_0)
y_pred_test1 = lr1.predict(X_test_1)
    
```

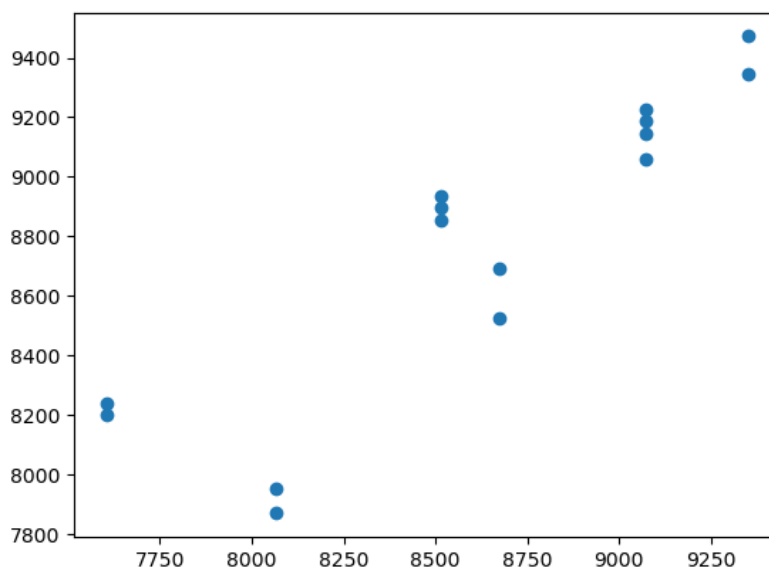


Рис. 7. Линейная многофакторная регрессия
 Fig. 7. Linear multivariate regression

Итоговое уравнение линейной многофакторной регрессии имеет следующий вид:

$$y = 5,9223x_{rec} - 7,0346x_{prod} - 22118,7637, \quad (6)$$

где x_{rec} – объемы производства энергии, x_{prod} – объемы закупки недостающей энергии в соседних регионах.

Модель множественной регрессии содержит дополнительные регрессоры, что как правило, приводит к увеличению значения коэффициента детерминации, поэтому для более корректной оценки полученной модели необходимо использовать скорректированный коэффициент детерминации Тейла [20]:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \left(\frac{n-1}{n-k} \right), \quad (7)$$

где n – количество наблюдений, а k – количество параметров модели.

Вторым важным аспектом применения данного коэффициента является возможность сравнения моделей с разным количеством регрессоров, что недопустимо при использовании обычного коэффициента детерминации R^2 . Для полученной модели мно-

гофакторной регрессии значение коэффициента $\bar{R}^2 = 0,7115$ – для тестовой выборки значений до внедрения ВЭС и $\bar{R}^2 = 0,615$ – для значений, полученных после введения ВЭС в эксплуатацию, что подтверждает изменение в характере исходных данных, в результате чего модель начинает аппроксимировать значения с меньшей точностью.

В качестве еще одного наглядного метода определения изменения тарифных планов использовался метод кластеризации данных (метод k -средних) [21], позволяющий сгруппировать данные в схожие группы по определенным признакам (рис. 8).

В результате применения данного метода было четко получено разделение имеющихся данных на две различные группы, что позволяет говорить об изменении существующей динамики формирования цен после ввода в эксплуатацию ВЭС.

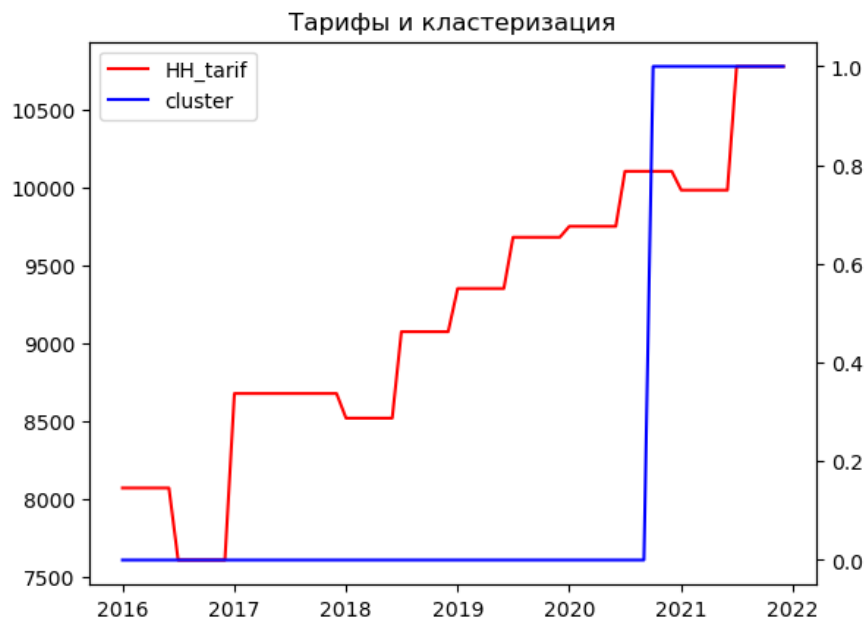


Рис. 8. Кластеризация данных о тарифном плане

Fig. 8. Clustering tariff plan data

Заключение

В данной работе было проведено исследование для определения влияния внедрения энергостанций на основе ВИЭ на поведение тарифов в регионе, для чего использовался ряд различных методов: корреляционный, кластерный и регрессионный анализ. Каждый из использованных методов показал существующую динамику в изменении цен после внедрения ВИЭ. Конечно, введенные мощности не позволяют говорить о снижении цен на электроэнергию, поскольку они могли покрыть только 10% потребностей региона в электроэнергии, но была замечена тенденция в изменении роста тарифного плана – цены продолжили повышаться, но с меньшей интенсивностью.

Таким образом, можно сделать вывод, что интеграция ВИЭ в общую энергосистему энергодефицитных регионов может не только повысить самообеспеченность региона электроэнергией, но и повысить экономическую стабильность за счет более гибкого процесса ценообразования.

Примечания

1. Indra Overland, Javlon Juraev, Roman Vakulchuk. Are renewable energy sources more evenly distributed than fossil fuels? // Renewable Energy. 2022. Vol. 200. P. 379–386. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.046> (дата обращения: 09.10.2023).

2. Distributed Renewable Energy Technologies / Н. Tazvinga, М. Thopil, Р.В. Numbi, Т. Adefarati R. Bansal (eds) // Handbook of Distributed Generation. Springer, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51343-01> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Обзор моделей оценки и прогнозирования поступления солнечной энергии / В.С. Симанков, П.Ю. Бучацкий, С.В. Онищенко, С.В. Теплоухов // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Майкоп, 15–19 мая 2023 г. Майкоп: Кучеренко Вячеслав Олегович, 2023. Ч. 2. С. 167–174.
4. Review of Estimating and Predicting Models of the Wind Energy Amount / V. Simankov, P. Buchatskiy, S. Teploukhov, S. Onishchenko // Energies. 2023. No. 16 (16). P. 5926. URL: <https://doi.org/10.3390/en16165926> (дата обращения: 09.10.2023).
5. Новые технологии преобразования возобновляемой энергии / П.Ю. Бучацкий, С.В. Онищенко, С.В. Теплоухов, А.Н. Лисова // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Майкоп, 15–19 мая 2023 г. Майкоп: Кучеренко Вячеслав Олегович, 2023. Ч. 1. С. 49–57.
6. Теплоухов С.В., Онищенко С.В., Кузьмин К.А. Особенности выбора и применения современных технологий накопления и хранения энергии // Дистанционные образовательные технологии: сб. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф., Ялта, 19–21 сентября 2023 г. Симферополь: Типография «Ариал», 2023. С. 250–255.
7. Стоимость производства электроэнергии из Возобновляемых источников в 2020 году – краткий обзор. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-2020-Summary-RU> (дата обращения: 10.10.2023).
8. Machiel Mulder, Bert Scholtens. The impact of renewable energy on electricity prices in the Netherlands // Renewable Energy. 2013. Vol. 57. P. 94–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.025> (дата обращения: 10.10.2023).
9. Frauendorfer K., Paraschiv F., Schürle M. Cross-border effects on Swiss electricity prices in the light of the energy transition // Energies. 2018. No. 11 (9). P. 2188. URL: <https://doi.org/10.3390/en11092188> (дата обращения: 09.10.2023).
10. Merit-order effects of renewable energy and price divergence in California's day-ahead and real-time electricity markets / С.К. Woo, J. Moore, B. Schneiderman [et al.] // Energy Policy. 2016. Vol. 92. P. 299–312.
11. Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1-р от 08.01.2009 // СПС КонсультантПлюс. Москва, 2021. 38 с.
12. Иктисанов В., Шкруднев Ф. Декарбонизация: взгляд со стороны // Энергетическая политика. 2021. № 8 (162). С. 42–51.
13. Использование «зеленой» энергии в энергосистеме региона / П.Ю. Бучацкий, С.В. Онищенко, С.В. Теплоухов, К.А. Кузьмин // Международная научно-практическая конференция «ESG-факторы и технологии роста»: сб. докл. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. 209 с.
14. Белевцев А.А., Белевцев А.М., Балыбердин В.А. Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 6 (230). С. 84–94.
15. Введение в анализ временных рядов: учеб. пособие дл вузов / Н.В. Артамонов, Е.А. Ивин, А.Н. Курбацкий, Д. Фантацини. Вологда: ВолНЦ РАН, 2021. 134 с.
16. Шумилина В.Е., Цвель М.М. Построение модели регрессии по временным рядам с целью прогнозирования индекса производительности труда в Российской Федерации // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12, № 1. 9 с.
17. Амелеченя М.А. Регрессионный анализ в прогнозировании стоимости коллекционных монет: сб. материалов 58-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Д.В. Лихаческий [и др.]. Минск, 2022. С. 102–104. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926> (дата обращения: 09.10.2023).
18. Симанков В.С., Теплоухов С.В. Аналитическое исследование методов и алгоритмов искусственного интеллекта // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. 2020. Вып. 3 (266). С. 16–25. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
19. An Approach to the Definition of System Intelligence in the Management of Complex Systems, 2023. 26th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Saint Pe-

tersburg, 2023. P. 159–162. DOI: 10.1109/SCM58628.2023.10159122

20. Домбровский В.В. Эконометрика: учебник. Москва: Новый учебник, 2004. 342 с.

21. Евстратов В.В., Ананьевский М.С. Применение метода k -средних в задаче оценки характеристик процесса для веб-приложений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 5. С. 755–760. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-755-760

References

1. Indra Overland, Javlon Juraev, Roman Vakulchuk. Are renewable energy sources more evenly distributed than fossil fuels? // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 200. P. 379–386. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.046> (access date: 09/10/2023).

2. Distributed Renewable Energy Technologies / H. Tazvinga, M. Thopil, P.B. Numbi, T. Adefarati R. Bansal (eds) // *Handbook of Distributed Generation*. Springer, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51343-01> (access date: 10/10/2023).

3. Review of models for estimating and predicting the amount of energy produced by solar energy systems / V.S. Simankov, P.Yu. Buchatskiy, S.V. Onishchenko, S.V. Teploukhov // *Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies: materials of the 7th International scient. and practical conf.*, Maykop, May 15–19, 2023. Maykop: Kucherenko Vyacheslav Olegovich, 2023. Part 2. P. 167–174.

4. Review of Estimating and Predicting Models of the Wind Energy Amount / V. Simankov, P. Buchatskiy, S. Teploukhov, S. Onishchenko // *Energies*. 2023. No. 16 (16). P. 5926. URL: <https://doi.org/10.3390/en16165926> (access date: 09/10/2023).

5. New renewable energy conversion technologies / P.Yu. Buchatskiy, S.V. Onishchenko, S.V. Teploukhov, A.N. Lisova // *Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies: materials of the 7th International scient. and pract. conf.*, Maykop, May 15–19, 2023. Maykop: Kucherenko Vyacheslav Olegovich, 2023. Part 1. P. 49–57.

6. Teploukhov S.V., Onishchenko S.V., Kuzmin K.A. Features of the selection and application of modern energy accumulation and storage technologies // *Distance educational technologies: collection of proceedings of the 8th International scient. and pract. conf.*, Yalta, September 19–21, 2023. Simferopol: Arial Printing House, 2023. P. 250–255.

7. Renewable power generation cost in 2020 – a brief overview. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-2020-Summary-RU> (access date: 10/10/2023).

8. Machiel Mulder, Bert Scholtens. The impact of renewable energy on electricity prices in the Netherlands // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 57. P. 94–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.025> (access date: 10/10/2023)

9. Frauendorfer K., Paraschiv F., Schürle M. Cross-border effects on Swiss electricity prices in the light of the energy transition // *Energies*. 2018. No. 11 (9). P. 2188. URL: <https://doi.org/10.3390/en11092188> (access date: 09/10/2023).

10. Merit-order effects of renewable energy and price divergence in California's day-ahead and real-time electricity markets / C.K. Woo, J. Moore, B. Schneiderman [et al.] // *Energy Policy*. 2016. Vol. 92. P. 299–312.

11. On the main directions of state policy in the field of increasing the energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources for the period until 2035: Order of the Government of the Russian Federation No. 1-r dated 01/08/2009 // *SPS ConsultantPlus*. Moscow, 2021. 38 p.

12. Iktisanov V., Shkrudnev F. Decarbonization: outside view // *Energy Policy*. 2021. No. 8 (162). P. 42–51.

13. The use of “green” energy in the regional energy system / P.Yu. Buchatskiy, S.V. Onishchenko, S.V. Teploukhov, K.A. Kuzmin // *International scientific and practical conference “ESG factors and growth technologies”*: coll. of reports. St. Petersburg: SPbSETU “LETP”. 2023. 209 p.

14. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. On technology trends and technology priorities entimation methods research // *News of the Southern Federal University. Engineering Sciences*. 2022. No. 6 (230). P. 84–94.

15. Introduction to time series analysis: a manual for universities / N.V. Artamonov, E.A. Ivin, A.N. Kurbatsky, D. Fantatstini. Vologda: VolNTs RAS, 2021. 134 p.

16. Shumilina V.E., Tsvil M.M. Building a time series regression model with the aim of pre-

dicting the labor productivity index in the Russian Federation // The Eurasian Scientific Journal. 2020. Vol. 12, No. 1. 9 p.

17. Amelchenya M. A. Regression analysis in predicting the value of collectible coins: coll. of proceedings of the 58th scient. conf. for postgraduate students, master's students and students of BSUIR, Minsk, April 18–22, 2022 / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Editorial Board: D. V. Likhachesky [et al.]. Minsk, 2022. P. 102–104. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926> (access date: 09/10/2023).

18. Simankov V. S., Teploukhov S. V. Analytical study of methods and algorithms of artificial intelligence // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2020. Iss. 3 (266). P. 16–25. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>

19. An Approach to the Definition of System Intelligence in the Management of Complex Systems, 2023. 26th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Saint Petersburg, 2023. P. 159–162. DOI: 10.1109/SCM58628.2023.10159122

20. Dombrovsky V. V. Econometrics: a textbook. Moscow: New textbook, 2004. 342 p.

21. Evstratov V. V., Ananyevsky M. C. Process characteristics estimation in web applications using k-means clustering // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. Vol. 20, No. 5. P. 755–760. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-755-760

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена после рецензирования 15.11.2023; принята к публикации 16.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 27.10.2023; approved after reviewing 15.11.2023; accepted for publication 16.11.2023.

© П. Ю. Бучацкий, С. В. Теплоухов, С. В. Онищенко,
Д. Н. Лисов, И. Н. Воробьева, 2023