

УДК 338.2

JEL: O33, Q42

DOI: <http://doi.org/10.25728/econbull.2022.2.5-iosifov>

РАЗВИТИЕ МИКРОГЕНЕРАЦИИ: ПРОБЛЕМА «БЕГСТВА ПОТРЕБИТЕЛЯ»¹

Иосифов Валерий Викторович

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
e-mail: iosifov_v@mail.ru; SPIN-код: 3558-0754; ORCID ID – нет

Ратнер Павел Дмитриевич

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
e-mail: ratner_p.d@gmail.com; SPIN-код: 2902-4701; ORCID ID – нет

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния перехода потребителей из числа домохозяйств на автономное энергоснабжение на основе возобновляемых источников энергии на затраты на содержание электросети. Подробно проанализирована ситуация с развитием автономного энергоснабжения на основе солнечных панелей и изменением стоимости передачи и распределения электроэнергии по сети в Австрии, Испании и Португалии. Для построения эконометрической модели использована выборка данных по Австрии как стране с наиболее стабильно развивающейся энергосистемой. Построена эконометрическая модель, позволяющая оценить ожидаемый рост стоимости передачи и распределения энергии в цене на электроэнергию для домохозяйств, в случае перехода части потребителей на автономное энергоснабжение и отказа от использования услуг электросетевого комплекса. Полученные количественные оценки в дальнейшем могут быть использованы для построения модели «бегства потребителя».

Ключевые слова: микрогенерация, возобновляемые источники, потребительское поведение, электросетевой комплекс

DEVELOPMENT OF MICROGENERATION: THE PROBLEM OF CONSUMER FLIGHT

Iosifov Valery Viktorovich

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
e-mail: iosifov_v@mail.ru; SPIN Code: 3558-0754; ORCID ID - no

Ratner Pavel Dmitrievich

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
e-mail: ratner_p.d@gmail.com; SPIN-code: 2902-4701; ORCID ID – no

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных научных исследований, проект № 20-010-00589 «Разработка методологии и инструментария оценки эффективности вариантов государственной поддержки инновационных транспортных технологий в контексте новой климатической политики России».

Abstract. The paper is devoted to the study of the impact of the transition of household consumers to an autonomous energy supply based on renewable energy sources on the costs of maintaining the power grid. The situation with the development of autonomous energy supply based on solar panels and the change in the cost of transmission and distribution of electricity through the network in Austria, Spain and Portugal is analyzed in detail. To build an econometric model, we used a sample of data for Austria as a country with the most stable developing energy system. An econometric model has been constructed that allows estimating the expected increase in the cost of transmission and distribution of energy in the price of electricity for households in the event that some consumers switch to autonomous energy supply and refuse to use the services of the electric grid complex. The obtained quantitative estimates can later be used to build a model of "consumer flight".

Keywords: microgeneration, renewable sources, consumer behavior, power grid complex

Введение. Отличительной особенностью большинства используемых в настоящее время на практике транспортных и энергетических технологий является привязанность к работе инфраструктуры, затраты на содержание которой являются чрезвычайно высокими (затраты на содержание электроэнергетических сетей, нефте- и газопроводов и т.д.). Практически во всех странах с развитой электроэнергетикой, доля затрат на передачу и распределение энергии в структуре себестоимости электроэнергии существенно превышает долю генерации (рис. 1). В то же время, развитие новых технологий, таких как микрогенерация электрической и тепловой энергии на основе возобновляемых источников энергии, дает потребителю возможность превратиться в производителя энергии, по меньшей мере, для себя самого [1-2]. Учитывая высокую стоимость капитальных затрат на микрогенерацию, такой возможностью потребители пока пользуются не часто, особенно в тех странах, где не существует системы государственной поддержки развития микрогенерации [3]. Тем не менее, в случаях, когда стоимость подключения к электросети и/или стоимость электроэнергии становятся для потребителя слишком высокими, он может реализовать свою возможность и начать генерировать энергию для собственного потребления с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Привлекательность этой возможности возрастает в том случае, если потребителю нужно гораздо больше энергии, чем в среднестатистической ситуации. Типичным примером такого случая повышенного энергопотребления может быть наличие в домохозяйстве электромобиля, который необходимо заряжать [4].

Переход потребителя на новую модель энергоснабжения оказывает определенное влияние на состояние всей энергосистемы. Как только потребитель в силу перехода на новую транспортно-энергетическую технологию перестаёт пользоваться традиционной технологией, он, соответственно, перестаёт пользоваться и поддерживающей ее инфраструктурой (пример: зарядка электромобиля от личного генерирующего устройства на основе солнечных панелей или малой ветровой турбины). Следовательно, затраты на содержание поддерживающей «старую» технологию инфраструктуру должны перераспределяться между оставшимися пользователями. Дополнительная стоимостная нагрузка на потребителя «старой» технологии делает ее менее эффективной и тем самым, стимулирует оставшихся потребителей к переходу на новую технологию, даже если ее эффективность в реальности не изменилась [5].

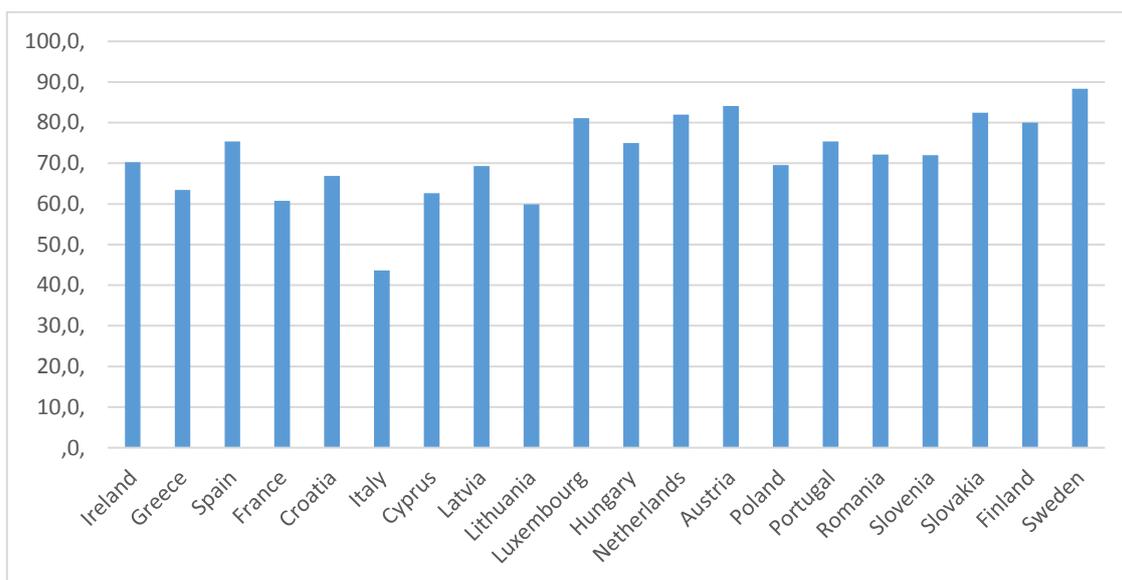


Рис. 1 Доля (в %) затрат на содержание электросетевого комплекса в структуре себестоимости электроэнергии в европейских странах.

Источник: составлено авторами на основе данных Eurostat

Такая ситуация, которая иногда называется в литературе проблемой «бегства потребителя», хорошо известна и описана во множественных источниках на качественном уровне [6]. Уход единичных потребителей из энергосистемы производит мизерный эффект, но уход больших групп потребителей может повлиять на стоимостные параметры ее работы и вероятность такого массового перехода потребителей должна быть предметом тщательного изучения [5]. Однако получить какие-либо количественные оценки параметров модели «бегства потребителя» пока что не удавалось. Следуя простейшей логике можно предположить, что «бегство» потребителя происходит в тот момент, когда совокупные издержки на подключение к традиционной энергосети и электроэнергию начинают превосходить затраты на установку и обслуживание автономной энергоустановки на основе ВИЭ. Оценки такого поворотного момента можно получить на основе расчетов по открытым данным о тарифах на электроэнергию, стоимости подключения к сети, стоимости и ожидаемой энергетической эффективности микрогенерирующего оборудования на основе ВИЭ (солнечных панелей, малых ветровых турбин и т.д.). Также теоретически на основе открытых данных возможно получить оценки удельной стоимости содержания электросети для одного потребителя. Однако для того, чтобы более детально понять взаимосвязь между уходом потребителя и повышением удельных затрат на содержание электросети, а далее, влиянием этого повышения на поворотный момент принятия решений для других потребителей, необходимо прибегнуть к методам моделирования систем с обратными связями, таким как, например, аппарат сетей Петри [7].

Целью данной работы является получение количественных оценок взаимосвязей между ростом автономной микрогенерации и изменением затрат на содержание электросетевого комплекса. Объектом исследования является

энергоснабжение домохозяйств европейских стран. В работе использовались классические методы эконометрического моделирования, а именно, построение моделей линейной регрессии и построение моделей с распределенными лагами. Информационной базой исследования послужили статистические базы данных Международного агентства по возобновляемой энергетике (IRENA) и Европейского статистического агентства.

Методология и данные. Как показатель развития микрогенерации на основе ВИЭ мы использовали данные по объему генерации возобновляемой энергии из источников, не подключенных к общей сети. Такие данные предоставляет IRENA с разбивкой по некоторым технологиям и странам (https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT_Power%20Capacity%20and%20Generation/ELECGEN_2022_cycle1.px/). Так как микрогенерация с использованием фотовольтаических панелей является наиболее распространенной в Европе [8, 9], то для построения модели использовались данные по объему генерации электроэнергии с помощью именно этой технологии. Наиболее представительные выборки данных по объемам генерации электроэнергии автономными фотовольтаическими источниками имеют Австрия, Испания и Португалия (рис. 2).

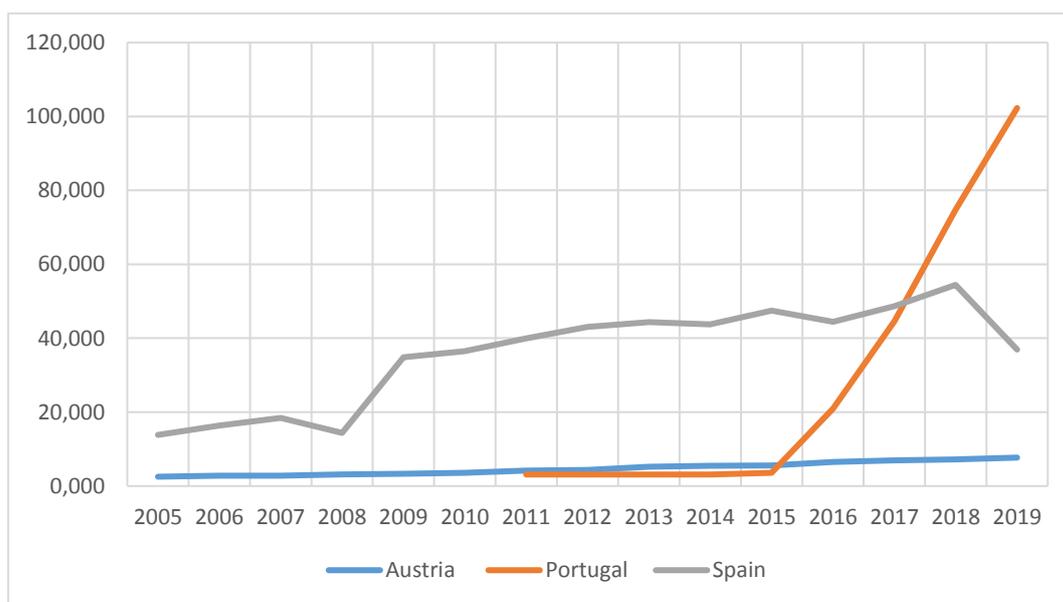


Рис. 2 Динамика автономной генерации электроэнергии (ГВт*час) фотовольтаическими установками в некоторых странах.

Источник: составлено авторами на основе данных IRENA

Данные по стоимости передачи и распределения электроэнергии в выбранных странах были получены с сайта Европейского статистического агентства, раздел «Энергия и окружающая среда» (https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204_c/default/table?lang=en). Графики изменения стоимости данного компонента цены на электроэнергию представлены на рис. 3.

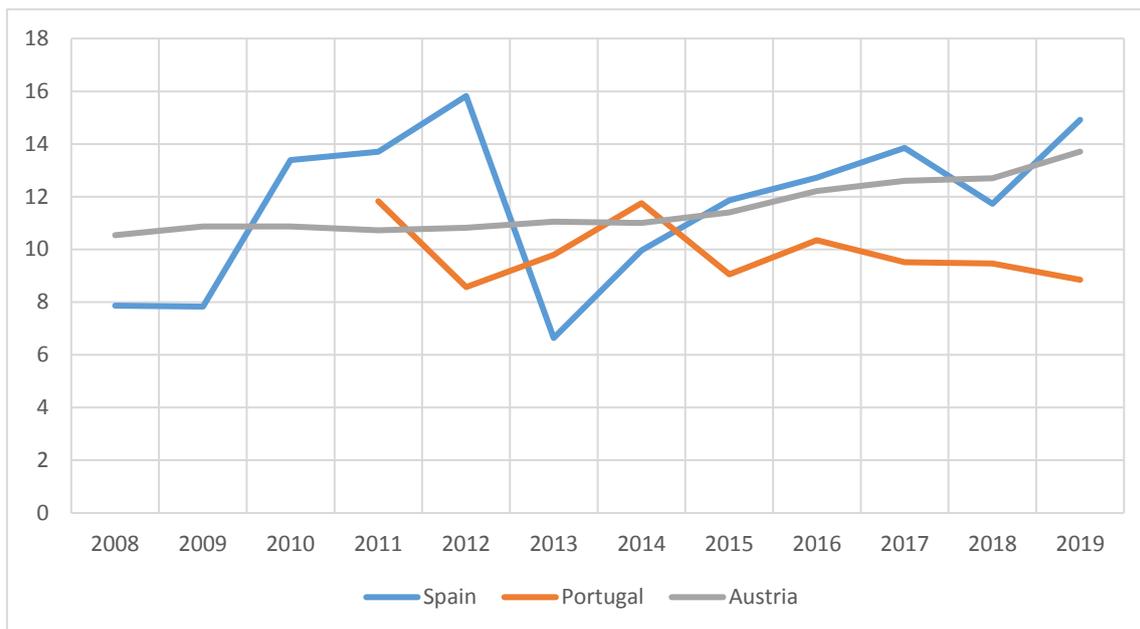


Рис. 3 Стоимость передачи и распределения электроэнергии (в евроцентах) в некоторых европейских странах.

Источник: разработано авторами на основе данных EuroStat

Как видно из графиков, представленных на рис. 2 и 3, в Португалии бум развития автономной электрогенерации на основе солнечных фотовольтаических панелей, произошел сравнительно недавно, а именно в 2016-2019 годах. На стоимость передачи и распределения энергии это отразилось положительным образом - издержки на содержание электросети стали снижаться. Однако резкие колебания издержек на содержание электросетевого комплекса в предыдущие периоды (падение в 2012 году с последующим скачком в 2014, более сглаженное падение в 2015 году и следующий за ним скачок в 2016) свидетельствуют о том, что искомые зависимости между развитием автономной микрогенерации и стоимостью содержания электросети в данном случае являются неочевидными и «зашумленными» многими другими факторами. Такими факторами могут быть ввод новых технологий и оборудования, повышающих эффективность работы электросети, изменение системы управления электросетевым комплексом и т.д. В любом случае, для того, чтобы использовать эти данные в моделировании эффектов ухода потребителей, необходимо более глубокое изучение состояния и динамики развития электроэнергетики Португалии.

Аналогичные выводы можно сделать, анализируя динамику развития автономной солнечной генерации и динамику цены на содержание электросетей в Испании. Несмотря на то, что объемы автономной солнечной электрогенерации в данной стране растут более равномерно, мы также можем наблюдать на графике достаточно резкий спад в 2008 году и в 2019 году (рис. 2). Колебания компоненты цены, отражающей затраты на содержание и функционирование электросети, являются еще более резкими, чем в Португалии. После периода роста в 2009-2012 годах, в 2013 году происходит обвальное снижение стоимости передачи и распределения электроэнергии. После этого тенденция роста данной компоненты стоимости электроэнергии вновь набирает силу (рис. 3).

Гораздо более стабильную и предсказуемую картину можно наблюдать на графиках изменения объемов автономной электрогенерации и стоимости содержания электросетей для Австрии (рис. 2-3). Объемы автономной электрогенерации растут медленно, но стабильно на протяжении всего доступного периода наблюдения. Стоимость передачи и распределения электроэнергии также демонстрирует плавный, но уверенный рост. Более детальное изучение кейса развития Австрийской электроэнергетики показывает, что энергосистема данной страны развивается стабильно, происходит последовательное наращивание доли ВИЭ в генерации электроэнергии [10, 11]. Одновременно с ростом доли ВИЭ в энергобалансе происходит модернизация и обновление электросети, внедрение технологий «смарт»-сетей, способных гибко реагировать на изменения в спросе и предложении электроэнергии и обеспечить снижение потерь при передаче электроэнергии. Поэтому данные по Австрии могут использоваться для построения модели зависимости роста издержек на содержание энергосетей от роста объемов автономной генерации.

При выборе вида модели для описания данной зависимости мы исходили из тех соображений, что рост стоимости сетевых издержек может происходить как непосредственно в тот же период времени, что и уход потребителя, так и с некоторой задержкой. Такая задержка может быть связана с длительностью бюрократических процедур отключения от сети. Поэтому нами тестировались два вида моделей – модели с распределенными лагами [12] и обычная модель линейной регрессии.

Результаты. Результаты построения модели с распределёнными лагами, полученные в пакете прикладных программ Statistica 12.0 и результаты построения модели линейной регрессии, полученные в Excel, представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Polyn. Distr. Lags; Analysis of Variance (Spreadsheet18.sta)					
Indep: Production Dep: COSTS					
Lag: 2 R= ,9888 R-square= ,9777 N: 10					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Square	F	p
Regress.	1349,964	3	449,9882	102,2609	0,000004
Residual	30,803	7	4,4004		
Total	1380,767				

Polyn. Distr. Lags; Regression Coefficients (Spreadsheet18.sta)				
Indep: Production Dep: COSTS				
Lag: 2 R= ,9888 R-square= ,9777 N: 10				
Lag	Regressn Coeff.	Standard Error	t(7)	p
0	3,31803308200	2,384183918583	1,391685035763	0,206638530450
1	-0,26679566145	2,808848368826	-0,094984002841	0,926989381377
2	-1,25814945079	2,584107777374	-0,486879634743	0,641218174968

Рис. 4 Результаты построения модели с распределенными лагами.

Источник: расчеты авторов

ВЫВОД ИТОГОВ						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,91873193					
R-квадрат	0,84406837					
Нормированный R-кв	0,8284752					
Стандартная ошибка	0,41909639					
Наблюдения	12					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	1	9,507607175	9,507607175	54,1306689	2,43276E-05	
Остаток	10	1,756417825	0,175641783			
Итого	11	11,264025				
	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
Y-пересечение	8,4357417	0,439255174	19,20464961	3,1899E-09	7,45702018	9,41446322
Off grid production	0,59030179	0,080232883	7,357354749	2,4328E-05	0,411531781	0,76907179

Рис. 5 Результаты построения модели линейной регрессии.

Источник: *расчеты авторов*

Анализируя результаты построенных моделей можно отметить, что обе модели являются статистически значимыми по F-критерию и, соответственно, могут использоваться на практике. При этом модель с распределенными лагами имеет немного более высокую объясняющую способность ($R^2=0,98$), чем модель линейной регрессии ($R^2=0,84$). Однако у модели линейной регрессии все коэффициенты (коэффициент регрессии и свободный член) являются статистически значимыми на уровне $p=0,01$, тогда как коэффициенты регрессии в модели с распределенными лагами являются не статистически значимыми. Самый высокий уровень статистической значимости коэффициента регрессии у модели с распределенными лагами составляет 0,2 и соответствует нулевому лагу (отсутствие временной задержки).

Поэтому нами было принято решение остановиться на использовании обычной модели линейной регрессии для описания вида зависимости между ростом объемов автономной электрогенерации с помощью солнечных панелей и ростом стоимость передачи и распределения электроэнергии по электросети. В итоге модель имеет следующий вид:

$$Cost_of_grid=0,59*Off_grid_production +8,44 +\varepsilon,$$

где переменная *Cost_of_grid* – компонента стоимости электроэнергии, которая идет на транспортировку и распределение электроэнергии по электросети (в евроцентах), а переменная *Off_grid_production* – объем автономного производства (ГВт*час) электроэнергии солнечными панелями (не подключенными к сети), ε - ошибка.

Таким образом, используя построенную модель можно сделать вывод о том, что увеличение автономного производства электроэнергии на 1 ГВт*час может привести к росту компоненты стоимости электроэнергии, отвечающей за транспортировку и распределение электроэнергии по сети, на 0,59 евроцента. Другими словами, уход потребителей с годовым потреблением электроэнергии в

объеме равном 1 ГВт*час, повышает стоимость электроэнергии для остальных потребителей на 0,59 евроцента.

Подчеркнем, что данный вывод справедлив только для стабильных энергосистем, в которых происходит поступательный рост производства энергии на основе ВИЭ и проводится необходимая модернизация сетевого хозяйства.

Выводы. Полученные оценки силы влияния развития автономного энергоснабжения на стоимость содержания электросети могут быть в дальнейшем использованы при построении параметрической модели «бегства потребителя» с помощью современных методов моделирования систем с развитыми обратными связями. Как уже было отмечено выше, одним из таких современных подходов может быть подход на основе иерархических сетей Петри. Построение подобного рода моделей является приоритетным направлением дальнейшего развития исследований авторов.

В заключение стоит отметить ограничения полученных результатов, которые состоят в том, что количественные оценки взаимосвязи развития автономного энергоснабжения и стоимости содержания электросети были получены на основе разбора только одного кейса (Австрии). Для повышения надежности полученных результатов, по нашему мнению, необходимо проведение дополнительных исследований по другим странам с развитыми одновременно электросетевым комплексом и автономным энергоснабжением (например, по США, КНР и др.). Проведение таких дополнительных исследований также является предметом дальнейшей работы авторов.

Литература

1. Ратнер С.В., Иосифов В.В. Стимулирование распределенной энергетики на основе ВИЭ как механизм инновационного развития региона // Друкерровский Вестник, 2018. №5. Стр. 127-139.
2. Новоселова О.А. Инновационный аспект распределенной генерации // Региональная энергетика и энергосбережение, 2016. -№3
3. Ратнер С.В., Аксюк Т.Д. Зарубежный опыт стимулирования микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии: организационно-экономические аспекты // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2017. Т. 10, № 4. С. 104–113.
4. Ратнер С.В. Эволюция транспортной инфраструктуры в целях охраны климата: развитие инновационных технологий автомобильного транспорта в России и мире// Инновации, 2019. №5, С. 28-34.
5. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2018. С. 89
6. Barton, J., Emmanuel-Yusuf, D., Hall, S., Johnson, V., Longhurst, N., O'Grady, A., Robertson, E., Robinson, E. and Sherry-Brennan, F. Distributing Power. A transition to a civic energy future. Working Paper. - University of Bath Online Publication Store, 2015.
7. Иосифов В.В. Моделирование реконфигурируемых производственных систем с помощью сетей Петри // Экономический вестник ИПУ РАН. 2021. Т. 2. № 3. С. 20-28.
8. Enteria, N., Yoshino, H., Takaki, R., Mochida, A., Satake, A., & Baba, S. et al. Case analysis of utilizing alternative energy sources and technologies for the single family detached house. Solar Energy, 2014. Vol. 105, pp. 243-263.
9. Su W., Liu M., Zeng S., Štreimikienė D., Baležentis T., Ališauskaitė-Šeškienė I., Valuating renewable microgeneration technologies in Lithuanian households: A study on willingness to pay. Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 191, pp. 318-329

10. Suna D., Totschnig G., Schoniger F., Resch G., Spreitzhofer J., Esterl T. Assessment of flexibility needs and options for a 100% renewable electricity system by 2030 in Austria. *Smart Energy*, 2022. Vol. 6 (100077). <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100077>
11. Simoes S., Zeyringer M., Mayr D., Huld T., Nijs W, Schmidt J. Impact of different levels of geographical disaggregation of wind and PV electricity generation in large energy system models: A case study for Austria. *Renewable Energy*, 2017. Vol. 105, pp. 183-198
12. Ратнер С.В., Иосифов В.В. Исследование динамики инвестиционных процессов в машиностроении на основе моделей с распределенными лагами // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 17. С. 37.

References

1. Ratner S.V., Iosifov V.V. Stimulation of distributed energy based on renewable energy sources as a mechanism for innovative development of the region // *Druckerovsky Bulletin*, 2018. No. 5. Page 127-139.
2. Novoselova O.A. Innovative aspect of distributed generation // *Regional Energy and Energy Saving*, 2016. -№3
3. Ratner S.V., Aksyuk T.D. Foreign experience in stimulating microgeneration based on renewable energy sources: organizational and economic aspects // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economic sciences*. 2017. V. 10, No. 4. S. 104–113.
4. Ratner S.V. The evolution of transport infrastructure for climate protection: the development of innovative road transport technologies in Russia and the world // *Innovations*, 2019. No. 5, pp. 28-34.
5. Khokhlov A., Melnikov Yu., Veselov F., Kholkin D., Datsko K. Distributed energy in Russia: development potential. *Energy Center of the Moscow School of Management Skolkovo*, 2018. P. 89
6. Barton, J., Emmanuel-Yusuf, D., Hall, S., Johnson, V., Longhurst, N., O'Grady, A., Robertson, E., Robinson, E. and Sherry-Brennan, F. *Distributing Power. A transition to a civic energy future*. Working Paper. - University of Bath Online Publication Store, 2015.
7. Iosifov V.V. Modeling of reconfigurable production systems using Petri nets // *Economic Bulletin of IPU RAS*. 2021. V. 2. No. 3. S. 20-28.
8. Enteria, N., Yoshino, H., Takaki, R., Mochida, A., Satake, A., & Baba, S. et al. Case analysis of utilizing alternative energy sources and technologies for the single family detached house. *Solar Energy*, 2014. Vol. 105, pp. 243-263.
9. Su W., Liu M., Zeng S., Štreimikienė D., Baležentis T., Ališauskaitė-Šeškienė I., Valuating renewable microgeneration technologies in Lithuanian households: A study on willingness to pay. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 191, pp. 318-329
10. Suna D., Totschnig G., Schoniger F., Resch G., Spreitzhofer J., Esterl T. Assessment of flexibility needs and options for a 100% renewable electricity system by 2030 in Austria. *Smart Energy*, 2022. Vol. 6 (100077). <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100077>
11. Simoes S., Zeyringer M., Mayr D., Huld T., Nijs W, Schmidt J. Impact of different levels of geographical disaggregation of wind and PV electricity generation in large energy system models: A case study for Austria. *Renewable Energy*, 2017. Vol. 105, pp. 183-198
12. Ratner S.V., Iosifov V.V. Study of the dynamics of investment processes in mechanical engineering based on models with distributed lags // *Economic analysis: theory and practice*. 2014. No. 17. P. 37.

Поступила в редакцию 17 июня 2022 г.