

## КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Мировые тенденции в энергетике значительно повлияли на развитие электроэнергетики в Российской Федерации. Одним из направлений будущего в электроэнергетике России является создание систем электроснабжения с источниками малой генерации, включая возобновляемые (солнечные и ветроэлектростанции). В связи с появлением большого числа источников малой генерации появилась необходимость контролировать не только правовые и экономические отношения между отдельными участниками, но и технические. В Европе, США на сегодняшний день уже успешно работают платформы, позволяющие потребителям выбирать поставщика и генерирующую компанию, в Российской Федерации, в виду сложившейся традиционной структуры электроэнергетического комплекса, таких возможностей у потребителей электроэнергии практически не существует. Однако за последнее время появилось большое число исследований и разработок в области микрогенерации, как традиционной, так и возобновляемой. В данной работе кратко описана комплексная модель системы электроснабжения с разнородными источниками малой генерации, позволяющая в перспективе создать интеллектуальную модель рынка микрогенерации, учитывая при этом особенности состояния и режимов работы существующих систем электроснабжения, а также обеспечивающую поиск оптимального поставщика и/или производителя электроэнергии по критерию минимума тарифа на электроэнергию и максимума надежности электропередачи.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, малая генерация, распределительная сеть, потери электроэнергии, надежность электроснабжения, параметры режима.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблемы глобального потепления повлияли на все сферы жизни общества и индустрии. В частности, в энергетике наблюдается тенденция перехода на чистые источники энергии, обеспечивающие сокращение углеродного следа.

В Российской Федерации только начали создаваться предпосылки для Энергоперехода 4.0 (анализ проблем и перспектив развития распределенной энергетики приведен в [1]):

- вводятся новые регулирующие документы, направленные на упрощение продажи мощности в сеть источниками малой генерации (11 декабря 2019 г. внесены изменения в федеральный закон № 35-ФЗ «... в части развития микрогенерации» (проект № 581324-7));
- организуются стратегические инициативы, поддерживающие проекты по исследованиям и разработкам в области распределенной энергетики (EnergyNet);
- утверждаются стратегии развития электроэнергетики в части ускорения ввода в эксплуатацию источников распределенной генерации (Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года).

Одним из ярких примеров, который является фундаментом для развития распределенной энергетики в РФ, является создание А-Платформы [2] – инструмента, позволяющего осуществлять взаимодействие между отдельными генерирующими источниками и сетью, создающего предпосылки появления рынков микрогенерации и активных потребителей в РФ.

Существующие исследования в данной области направлены на решения задач поиска оптимального места расположения [3-5], определения числа и мощ-

ности [4] источников в условиях систем электроснабжения, учитывая при этом существующую конфигурацию электрических сетей, уровень напряжения и допустимость режимов работы элементов после внедрения дополнительных источников.

Также при разработке моделей Microgrids рассматриваются вопросы влияния изменения нагрузки на основные их элементы, такие как генераторы малой мощности, накопители, а также создаются способы их компенсации [6].

Авторами [7] предлагается подход, позволяющий сокращать провалы напряжения в системах электроснабжения с источниками малой генерации за счет накопителей и источников электрической энергии.

Важными остаются и вопросы устойчивости источников распределенной генерации и внешней сети [8], а также их влияние на режимную надежность [9]. Согласно [9] в указанных системах должны быть обеспечены повышенные требования к устройствам релейной защиты и автоматики.

Актуальными являются вопросы бизнес-моделирования Microgrids. В [10] приводится модель системы электроснабжения с распределенной генерацией, построенная с точки зрения функционирования рынка микрогенерации, а также приведены основные ограничения по применению данной бизнес-модели в будущем.

Развитие систем электроснабжения с источниками малой энергетики является новым и перспективным для Российской Федерации.

В данной работе автором приводится комплексная модель Microgrid, учитывающая особенности режимов работы генераторов, электрических сетей, внешних источников и потребителей электроэнергии. Созданная модель направлена на разработку имитационной модели рынка микрогенерации, позволяющего не только

осуществлять быстрые расчеты по покупке электроэнергии, но и выбирать потребителями наилучшего поставщика и/или источник электроэнергии из возможных вариантов.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
С ИСТОЧНИКАМИ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В данной работе описан общий подход к созданию комплексной модели системы электроснабжения с источниками малой мощности. Система рассматривается как совокупность собственных малых источников мощности, внешних источников, потребителей и элементов электрических сетей.

Отдельные модели элементов системы спроектированы для решения оптимизационной задачи, направленной на поиск наилучшего источника электроэнергии (как внешнего, так и местного) с использованием метода динамического программирования. В общем виде оптимизационная задача имеет следующий вид:

$$\min (3) = \min (\beta \cdot P + C_{\Delta W} + (\alpha_{(1)} + \alpha_{(2)} + \alpha_{(3)}) Y), \quad (1)$$

где  $\beta$  – тариф на электроэнергию от конкретного поставщика, руб./кВт·ч;  $P$  – необходимая потребителю мощность, или мощность от внешнего источника, кВт;  $C_{\Delta W}$  – стоимость потерь электроэнергии в системе электроснабжения, руб.;  $\alpha_{(1)}$ ,  $\alpha_{(2)}$ ,  $\alpha_{(3)}$  – коэффициент надежности внешнего источника электрической энергии, собственных генераторов системы и элементов передачи мощности соответственно;  $Y$  – экономический ущерб от перерыва электроснабжения, руб.

На целевую функцию накладываются ограничения, отражающие баланс мощности в системе электроснабжения и допустимость параметров режима ее элементов. Система ограничений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \sum P_{\text{ист}} + \sum P_{G_N} = P_{\text{нагрузки}} + \Delta P_{\text{СЭС}}, \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, \\ S_{i\min} \leq S_i \leq S_{i\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sum P_{\text{ист}}$  – суммарная мощность источников распределенной генерации, кВт;  $\sum P_{G_N}$  – активная мощность, вырабатываемая собственными источниками системы электроснабжения, кВт;  $P_{\text{нагрузки}}$  – нагрузка системы электроснабжения с распределенной генерацией, кВт;  $\Delta P_{\text{СЭС}}$  – потери активной мощности в системе электроснабжения с учетом мощности, принимаемой от внешнего источника, кВт;  $U_{i\min}$ ,  $U_{i\max}$  – предельно допустимые потери напряжения в узле ( $\pm 10\%$  от номинального значения), кВ;  $S_{i\min}$ ,  $S_{i\max}$  – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью, кВА.

Модели отдельных элементов системы электроснабжения целесообразнее представлять в табличном виде, что обеспечит упрощение ввода исходных данных и реализацию алгоритма оптимизации, основанного на методе динамического программирования.

Модели элементов системы электроснабжения представлены в табл. 1-4.

Таблица 1

Модель внешнего источника электроэнергии

$P$ , кВт	$P_1$	$P_2$	$P_3$	...	$P_n$
$\beta$ , руб./кВт·ч	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	...	$\beta_n$
$\Delta P$ , кВт	$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	...	$\Delta P_n$
$\alpha_{(1)}$	$\alpha_{(1)1}$	$\alpha_{(1)2}$	$\alpha_{(1)3}$	...	$\alpha_{(1)n}$

Таблица 2

Модель собственных источников электроэнергии

$P$ , кВт	$P_1$	$P_2$	$P_3$	...	$P_n$
$\beta$ , руб./кВт·ч	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	...	$\beta_n$
$\alpha_{(2)}$	$\alpha_{(2)1}$	$\alpha_{(2)2}$	$\alpha_{(2)3}$	...	$\alpha_{(2)n}$

Таблица 3

Модель потребителя

$P$ , кВт	$P_1$	$P_2$	$P_3$	...	$P_n$
$Z$ , руб.	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	...	$Z_n$

Таблица 4

Модель поставщика электроэнергии

$P$ , кВт	$P_1$	$P_2$	$P_3$	...	$P_n$
$\beta$ , руб./кВт·ч	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	...	$\beta_n$
$\Delta P$ , кВт	$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	...	$\Delta P_n$
$\alpha_{(3)}$	$\alpha_{(3)1}$	$\alpha_{(3)2}$	$\alpha_{(3)3}$	...	$\alpha_{(3)n}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена комплексная модель системы электроснабжения с источниками малой генерации, каждый из элементов которой (источник, нагрузка, распределительные сети) представлен в виде зависимостей, позволяющих создать модель рынка микрогенерации, а также осуществлять контроль и анализ параметров отдельных элементов системы электроснабжения как с экономической, так и с технической точки зрения.

Модель позволяет осуществлять задачи поиска потребителями электроэнергии от оптимальных (экономически выгодных и надежных, с точки зрения потребителей) поставщиков и источников энергии.

Важным также является применение данной модели при проектировании новых и реконструкции существующих систем электроснабжения с источниками малой генерации, что обеспечивает уже на этапе проектирования оптимальную конфигурацию сети, учитывающую надежность и экономичность передачи электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин П.А. Проблемы и перспективы развития распределенной генерации в Российской Федерации // Экономика и социум. 2018. №6(49). С. 802-804.
2. Официальный сайт «А-Платформа – Российская программная платформа управления распределенной энергетикой». URL: <https://a-platform.ru/> (дата обращения 10.10.2021)
3. Research on distributed generation source placement / Z. Jun-fang, D. Si-min, H. Yin-li, H. Guang // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. 2009. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5347869
4. Оптимизация местоположения и мощности малой генерации в распределительных сетях / С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, С.Е. Кокин, А.В. Паздерин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. №1-2. С. 82-89.
5. Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации / А.В. Варганова, Ю.М. Байрамгулова, И.Н. Гончарова, О.А. Кроткова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 68-72. doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72
6. Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems /

- J. Baba, S. Suzuki, S. Numata, T. Yonezu // European Conference on Power Electronics and Applications. 2005. Pp. 10. doi: 10.1109/EPE.2005.219399
7. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Van Huan Nguyen. Reduction in microgrids voltage dips based on power accumulators and controlled distributed generation plants // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019. Pp. 24-28. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877687.
8. The impact of distributed generation and its parallel operation on distribution power grid / Z. Kai, L. Kexue, Y. Naipeng, J. Yuhong, L. Wenjun, Q. Lihan // 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). 2015. Pp. 2041-2045. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432575
9. Liu J., Zhang J., Zhang D. Effect of distributed generation on power supply reliability of distribution network // 8th International Conference on Grid and Distributed Computing (GDC). 2015. Pp. 32-35. doi: 10.1109/GDC.2015.13
10. Business model status of distributed power supply and its concerns in future development / Q. Zhang, J. Zhang, X. Han, X. Jin, H. Fu, T. Zang // IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2017. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EI2.2017.8245542

Поступила в редакцию 28 августа 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INTEGRATED MODEL OF A POWER SUPPLY SYSTEM WITH DISTRIBUTED GENERATION

Aleksandra V. Varganova

Ph.D(Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Department of Management in Energy and Industry, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru

World trends in the energy sector influenced the trends and prospects for the development of electric power industry in the Russian Federation. One of the directions of the future in Russia's electric power industry is the development of power supply systems with low-generation sources, including renewable (solar and wind power plants). Due to the advent of a large number of sources of small generation, there will be a need to control not only legal and economic relations between individual participants, but also technical. In Europe, the United States today has been successfully working platforms, allowing consumers to choose a supplier and a generating company, in the Russian Federation, in view of the current trailing structure of the electric power complex, there are practically no such possibilities for electricity consumers. However, recently has a large number of research and development in the field of microgeneration, both traditional and renewable. In this paper, a comprehensive model of the power supply system with diverse sources of small generation is briefly described, which allows the intellectual model of the microgeneration market in the future, given the characteristics of the state and modes of the existing power supply systems, as well as to search for the optimal supplier and / or electricity producer. The criterion of the minimum of the tariff for electricity and the maximum power reliability maximum.

**Keywords:** power supply system, small generation, distribution network, electricity loss, power supply reliability, mode parameters.

#### REFERENCES

1. Nikulin P.A. Problems and Prospects of Development of Distributed Generation in the Russian Federation. *Ekonomika i sotsium* [Economics and Society], 2018, no. 6(49), pp. 802-804. (In Russian)
2. A-Platform - Rossijskaya programmnaya platforma upravleniya raspredelyonnoj energetikoj (A-Platform -Russian software platform management distributed energy). Available at: <https://a-platform.ru/> (accessed 27 June 2021)
3. Jun-fang Z., Si-min D., Yin-li H., Guang H. Research on distributed generation source placement. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. 2009. pp. 1-4. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5347869
4. Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., Pazderin A.V. Optimization of Location and Power of Small Generation in Distribution Networks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Proceedings of higher educational establishments. Energy problem], 2012, no. 1-2, pp. 82-89. (In Russian)
5. Varganova A.V., Bayramgulova Yu.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Technical and economic substantiation of the place of installation of sources of distributed generation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 68-72. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72
6. Baba J., Suzuki S., Numata S., Yonezu T. Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, pp. 10. doi: 10.1109/EPE.2005.219399
7. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Van Huan Nguyen. Reduction in Microgrids Voltage Dips Based on Power Accumulators and Controlled Distributed Generation Plants. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 24-28. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877687
8. Kai Z., Kexue L., Naipeng Y., Yuhong J., Wenjun L., Lihan Q. The impact of distributed generation and its parallel operation on distribution power grid. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015, pp. 2041-2045. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432575
9. Liu J., Zhang J., Zhang D. Effect of Distributed Generation on Power Supply Reliability of Distribution Network. 2015 8th International Conference on Grid and Distributed Computing (GDC), 2015, pp. 32-35. doi: 10.1109/GDC.2015.13
10. Zhang Q., Zhang J., Han X., Jin X., Fu H., Zang T. Business model status of distributed power supply and its concerns in future development. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/EI2.2017.8245542

Варганова А.В. Комплексная модель системы электро-снабжения с источниками малой генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 69-71. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-69-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-69-71)

Varganova A.V. Integrated Model of a Power Supply System with Distributed Generation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 69-71. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-69-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-69-71)