

УДК 621.311

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-124-134

Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками энергии*

Ю. Н. Булатов, кандидат технических наук, доцент, Братский государственный университет, Братск, Россия
А. В. Крюков, доктор технических наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия
К. В. Суслов, доктор технических наук, профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Системы электроснабжения, построенные с использованием технологий Smart Grid, могут быть реализованы на основе энергетических роутеров, выполненных с помощью высокочастотных твердотельных трансформаторов. Энергетические роутеры могут использоваться для подключения установок распределенной генерации, работающих на возобновляемых источниках, а также накопителей электроэнергии для электроснабжения потребителей в изолированной системе. Кроме того, использование энергетических роутеров позволяет улучшить качество электроэнергии в части несимметрии и несинусоидальности напряжения.

Приведены результаты моделирования режимов работы изолированной системы электроснабжения, включающей следующие элементы: энергетические роутеры, ветрогенерирующая установка с нечетким регулятором угла поворота лопастей ветротурбины, малая гидроэлектростанция и турбогенераторная установка с прогностическими регуляторами напряжения и скорости вращения ротора. Моделирование выполнялось в системе MATLAB с применением пакетов Simulink и SimPowerSystems. Цель исследований состояла в определении эффективности использования энергетических роутеров в изолированной системе электроснабжения для подключения накопителей электроэнергии и установок распределенной генерации, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Результаты компьютерного моделирования различных режимов работы позволили сформулировать следующие выводы.

Применение энергетических роутеров для подключения к ИСЭС генерирующих установок на возобновляемых источниках энергии позволяет эффективно регулировать напряжение и частоту. В отличие от использования обычных силовых трансформаторов энергетические роутеры позволили получить следующие положительные эффекты: снизить провал частоты в сети 10 кВ при подключении дополнительной нагрузки; уменьшить время переходного процесса для частоты при кратковременном трехфазном коротком замыкании; значительно ограничить провалы напряжения и перенапряжения.

Применение прогностических регуляторов скорости вращения ротора у генераторов ТГУ и малой ГЭС позволило убрать колебательность, снизить время переходного процесса и значительно уменьшить перерегулирование для частоты в режимах подключения дополнительной нагрузки и кратковременного короткого замыкания в сети ИСЭС даже при использовании обычных силовых трансформаторов.

При резком уменьшении скорости ветра прогностические АРС дополнительно уменьшают колебательность, время переходного процесса и величину перерегулирования.

Использование энергетических роутеров позволяет значительно уменьшить влияние на ИСЭС изменений генерируемой мощности установок РГ, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Ключевые слова: установки распределенной генерации, возобновляемые источники энергии, изолированная система электроснабжения, энергетический роутер, прогностические регуляторы, моделирование.

Введение

На современном этапе развития электроэнергетики происходит переход к технологиям Smart Grid [1–3], использующим накопители электроэнергии и установки распределенной генерации (РГ) [4–9], работающие вблизи энергопотребителей. Эти технологии актуальны и для изолированных

системах электроснабжения (ИСЭС), в которых могут применяться две группы установок РГ. К первой относятся нетрадиционные возобновляемые источники энергии, такие как солнечные батареи, ветрогенерирующие установки (ВГУ), топливные элементы, мини- и микрогидроэлектростанции (ГЭС) и т. д. Вторую – образуют установки малой и средней мощно-

© Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Суслов К. В., 2021

* Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0667-2020-0039).

сти, работающие на основе паровых и газовых турбин.

Для эффективного использования установок РГ в ИСЭС их целесообразно объединять в энергетические кластеры [10] со специальными интерфейсами для подключения РГ и накопителей энергии. В качестве таких интерфейсов могут применяться энергетические роутеры (рис. 1, а) [11–16], построенные с использованием твердотельных трансформаторов [17–20]. Твердотельный трансформатор представляет собой высоко-

частотный силовой трансформатор в моноблочном исполнении с двумя активными полупроводниковыми мостами (рис. 1, б). Проведенные ранее исследования (Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kryukov A.E., Cherepanov A.V. The use of energy routers to improve reliability of power supply to non-traction consumers. IOP Conference Series. DOI: 10.1088/1757-899X/1100/1/012008) показывают, что применение энергетических роутеров дает возможность обеспечить потребителей качественной электроэнергией.

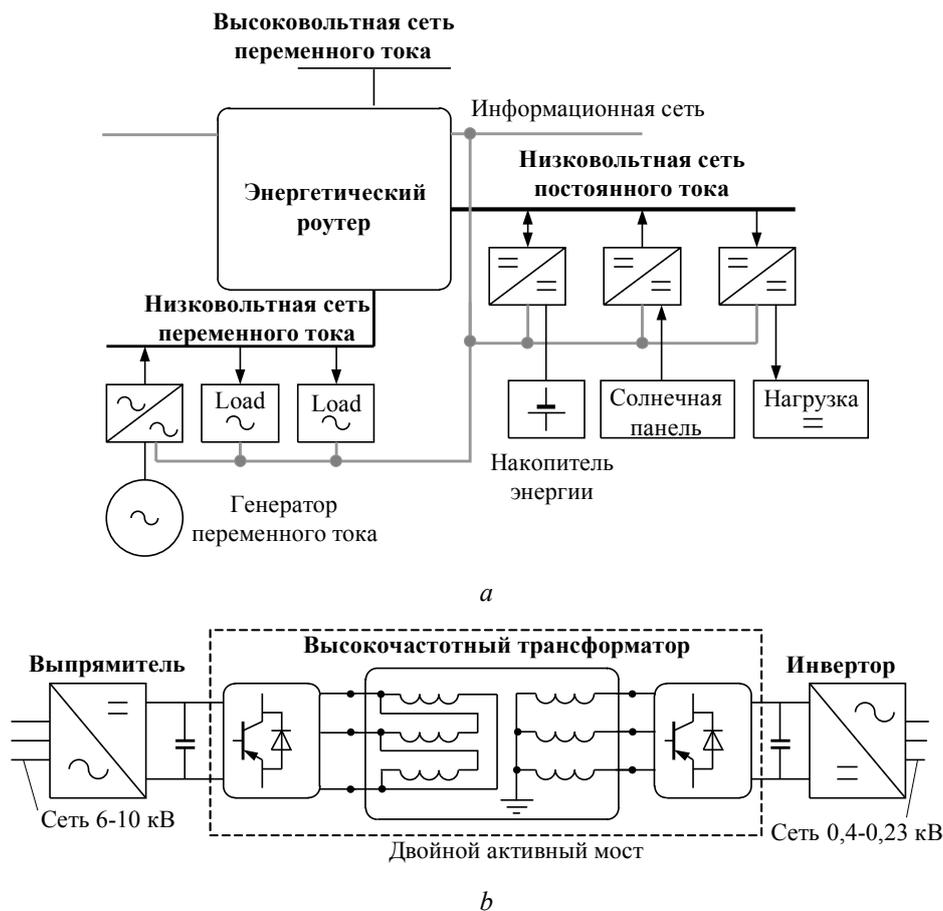


Рис. 1. Схема электроснабжения, построенная на основе энергетического роутера (а) и схема энергетического роутера (б)

Fig. 1. Power supply circuit based on energy router (а) and power router circuit (b)

В статье представлено описание компьютерных моделей энергетического роутера, ВГУ с нечетким регулятором угла поворота лопастей ветротурбины и малой ГЭС, а также турбогенераторной установки (ТГУ) с прогностическим регулятором скорости вращения ротора генератора.

Цель исследования – определение эффективности использования энергетических роутеров в ИСЭС для подключения накопителей электроэнергии и установок распределительной

генерации, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Описание компьютерной модели ИСЭС

Схема исследуемой ИСЭС с указанием мощности установок РГ и нагрузки потребителей показана на рисунке 2. В исходном режиме нагрузка ТГУ составляла 65 % от номинальной, что полностью обеспечивало потребности электроприемников сети 10 кВ с учетом потерь, а также часть нагрузок потребителей 0,4 кВ, получающих питание от малой ГЭС. Загрузка ге-

нератора малой ГЭС составляла 30 %, что лишь частично обеспечивало питание ближайшей нагрузки мощностью $1000 + j500$ кВ·А на шинах 0,4 кВ. Скорость ветра в исходном режиме составляла 8 м/с, и ВГУ вырабатывала 87 % от установленной мощности, что полностью обеспечивало питание потребителей мощностью $850 + j100$ кВ·А на шинах 0,4 кВ.

Рассматривались следующие режимы работы ИСЭС с установками РГ на возобновляемых источниках энергии, подключенных через энергетические роутеры или обычные силовые трансформаторы такой же мощности.

Подключение в сети 10 кВ дополнительной нагрузки мощностью $450 + j10$ кВ·А.

Кратковременное трехфазное короткое замыкание (КЗ) в сети 10 кВ (место замыкания указано на рис. 2).

Резкое уменьшение скорости ветра, вызывающее снижение генерации ВГУ с номиналь-

ной мощностью 1 МВт. Скорость ветра изменялась в пределах 8...0,5 м/с.

Исследования проводились в системе MATLAB с использованием пакетов Simulink и SimPowerSystems. Основное внимание уделялось таким параметрам ИСЭС, как напряжение и частота. Ниже представлено описание компьютерных моделей элементов рассматриваемой ИСЭС.

Схема модели энергетического роутера показана на рисунке 3. Он моделировался на основе высокочастотного трансформатора (блок Transformer на рис. 3) 10/0,4 кВ мощностью 3000 кВ·А. В инверторных блоках предусматривалось применение IGBT-транзисторов и регуляторов напряжения на выходе. В модели также использовались вспомогательные блоки для измерения частоты, тока, напряжения и показателей качества электроэнергии по несимметрии и несинусоидальности.

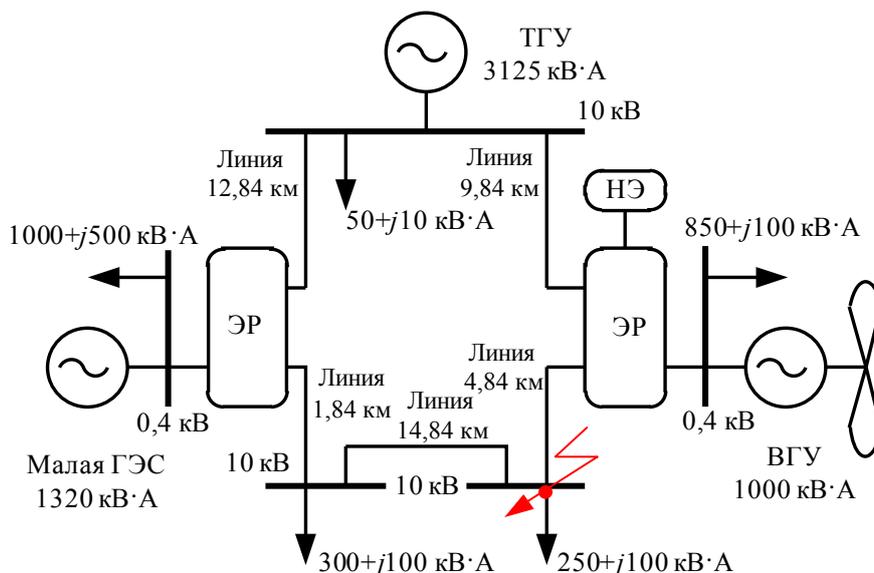


Рис. 2. Схема исследуемой ИСЭС: ЭР – энергетический роутер; НЭ – накопитель энергии

Fig. 2. A diagram of the IPSS under study: ER – energy router; ES – energy storage

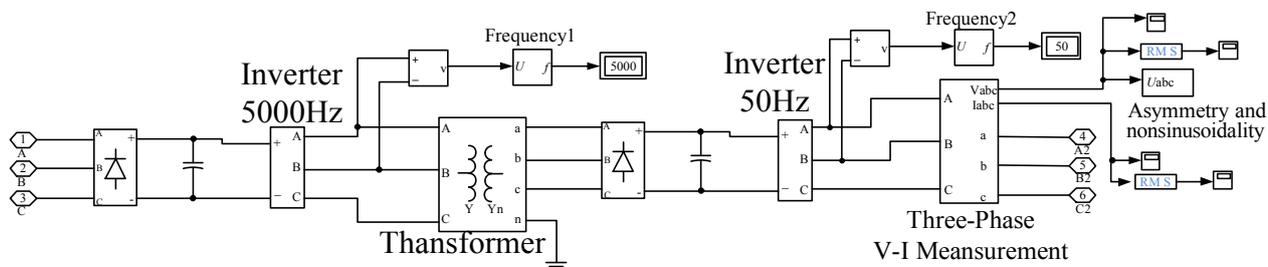


Рис. 3. Схема модели энергетического роутера в MATLAB

Fig. 3. The diagram of energy router model in MATLAB

Схема модели ТГУ, показанная на рисунке 4, состоит из блоков, отвечающих следующим элементам: синхронная машина; возбудитель; автоматические регуляторы скорости и напряжения; паровая турбина.

Параметры модели синхронной машины ТГУ представлены на рисунке 5. Паровая турбина мо-

делировалась передаточной функцией $\frac{1}{0,2s + 1}$, а система возбуждения – передаточной функцией вида $\frac{1}{0,025s + 1}$ [21], которая применялась для всех синхронных генераторов в ИСЭС.

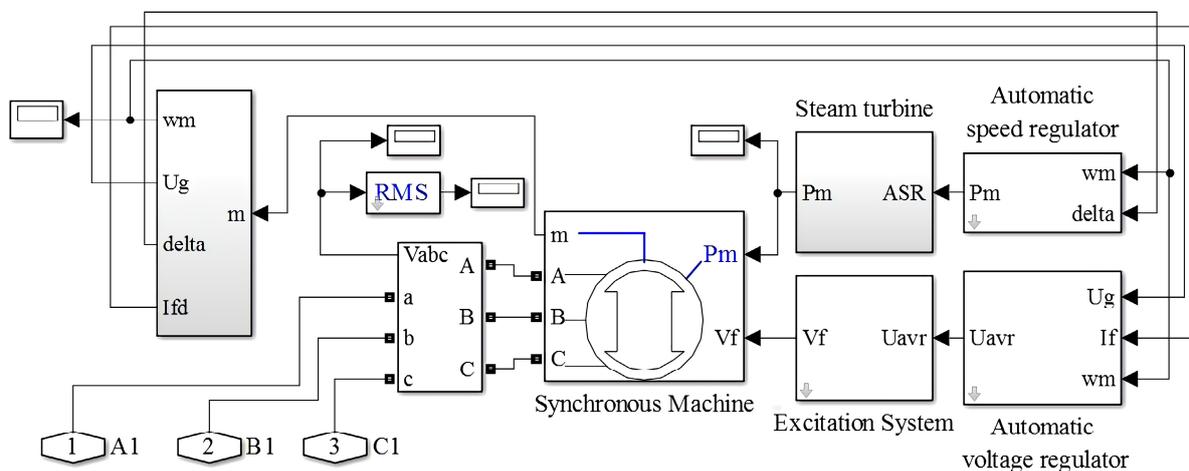


Рис. 4. Схема модели ТГУ в MATLAB

Fig. 4. The TGP model structure in MATLAB

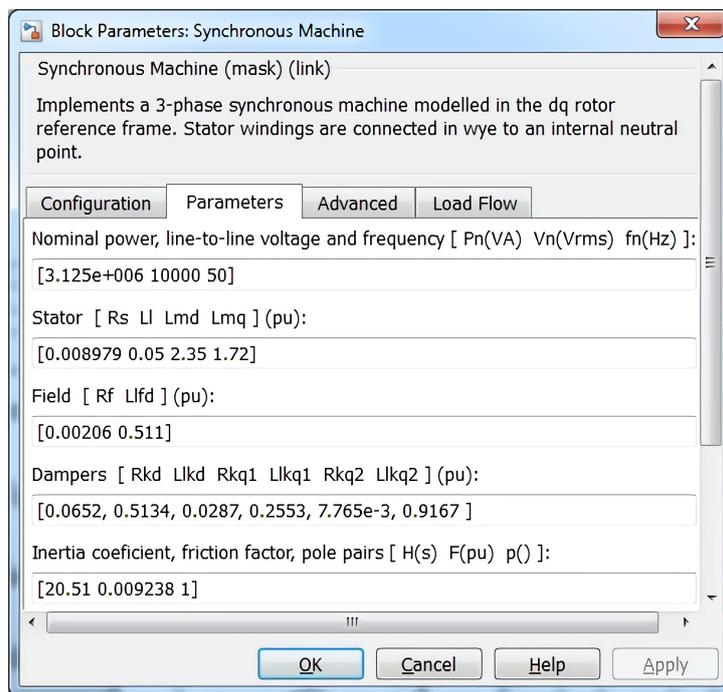


Рис. 5. Блок параметров используемой модели синхронной машины ТГУ

Fig. 5. The parameters unit of the used TGP synchronous machine model

Описание используемых моделей автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и автоматического регулятора скорости (АРС) синхронного генератора ТГУ, в том числе с приме-

нением линейного прогнозирующего звена, приведено в статье Automatic prognostic regulators of distributed generators (Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H. International Multi-

Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602718). Эти модели также использовались для всех генераторов установок РГ в ИСЭС.

Для гидрогенератора малой ГЭС применялась модель, основные параметры которой приведены на рисунке 6, а. Структурная схема модели гидротурбины и главного сервомотора приведена на рисунке 6, б.

Схема модели ВГУ представлена на рисунке 7 и включает следующие элементы: модель синхронной машины с демпферной обмоткой; модели системы возбуждения, редуктора и механизма поворота лопастей ветроколеса, автоматического регулятора напряжения и нечеткого регулятора угла поворота лопастей турбины. С помощью блока Step моделировался режим резкого изменения скорости ветра.

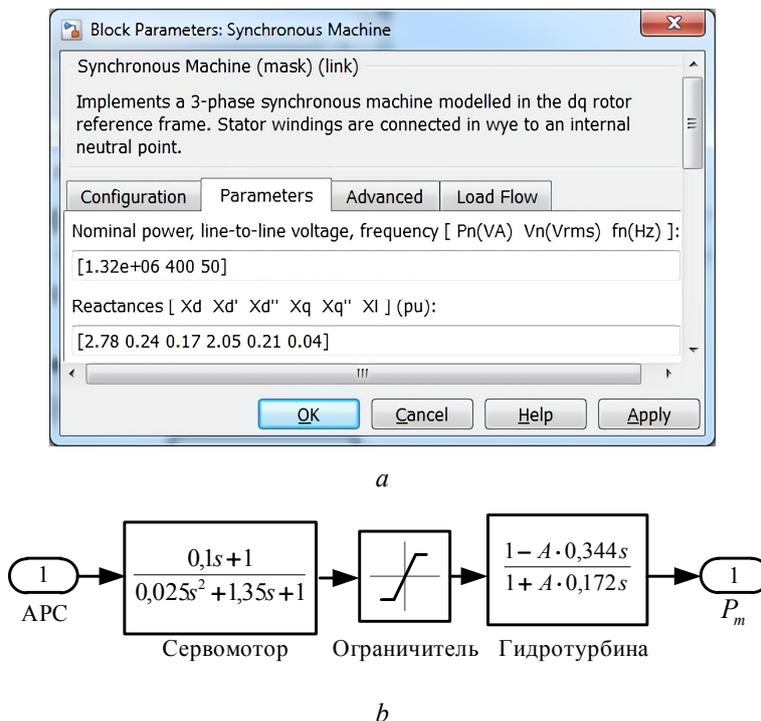


Рис. 6. Блок параметров модели синхронной машины (а) и структурная схема модели гидротурбины с главным сервомотором (б): А – положение открытия направляющего аппарата

Fig. 6. The parameters unit of the synchronous machine model (a) and a structural diagram of a hydraulic turbine with a main servomotor (b): A - the opening position of a wicket gate

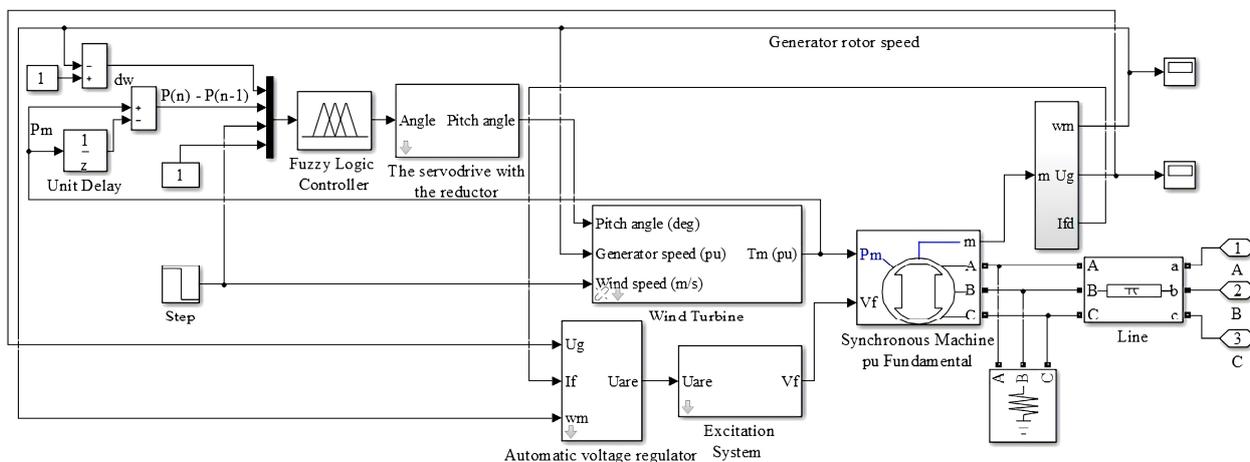


Рис. 7. Схема модели ВГУ в MATLAB

Fig. 7. The WPGP model structure in MATLAB

Для моделирования ветротурбины использовалось следующее уравнение, определяющее выходную мощность турбины или механический момент в относительных единицах [22]:

$$T_m = C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda;$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1},$$

где β – угол поворота лопастей; λ – быстроходность, определяемая отношением скорости вершины лопасти ветротурбины к скорости ветра; $C_1 = 0,52$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0,4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 0,01$ – постоянные коэффициенты.

Описание модели нечеткой системы управления углом поворота лопастей и метода ее настройки приведены в работе Fuzzy Controller of Rotation Angle of Blades of Horizontal-Axial Wind Power Generation Plant (Bulatov Yu., Kryukov A., Nguyen V.H., Tran D.H. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_88).

Результаты моделирования

Результаты компьютерного моделирования режимов подключения дополнительной нагруз-

ки и кратковременного трехфазного КЗ в виде временных зависимостей частоты переменного тока в сети 10 кВ и действующего напряжения в сетях 0,4 кВ малой ГЭС и ВГУ представлены на рисунках 8, *a, b* и 9, *a, b*. Они показывают, что применение энергетических роутеров позволяет эффективно регулировать напряжение и частоту. В отличие от обычных силовых трансформаторов энергетические роутеры позволили получить следующие положительные результаты: снизить провал частоты в сети 10 кВ при подключении дополнительной нагрузки (рис. 8, *a*); уменьшить время переходного процесса для частоты при кратковременном трехфазном КЗ (рис. 8, *b*); значительно ограничить провалы напряжения и перенапряжения, возникающие в сетях 0,4 кВ при кратковременном трехфазном КЗ в сети 10 кВ (рис. 9, *a, b*).

Необходимо отметить, что применение прогностических АРС генераторов ТГУ и малой ГЭС позволило убрать колебательность, снизить время переходного процесса и значительно уменьшить перерегулирование для частоты в сети 10 кВ даже при использовании обычных силовых трансформаторов (характеристики 2 и 3 на рис. 8, *a, b*).

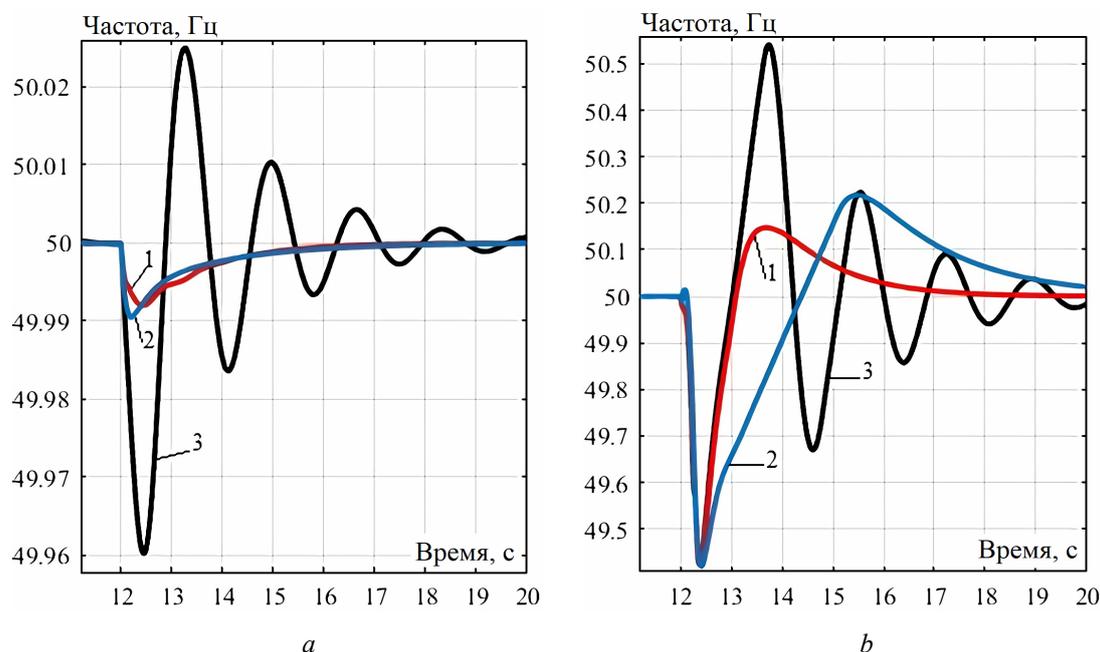


Рис. 8. Частота в сети 10 кВ при подключении дополнительной нагрузки (*a*) и при кратковременном трехфазном КЗ (*b*): 1 – использовались энергетические роутеры и прогностический АРС генераторов; 2 – применялись обычные силовые трансформаторы и прогностический АРС; 3 – применялись обычные силовые трансформаторы и классический АРС (ПИД-регулятор)

Fig. 8. Frequency in the 10 kV grid when additional load is connected (*a*) and during a short-term three-phase fault (*b*): 1 - energy routers and prognostic ASR of generators were used; 2 - conventional power transformers and prognostic ASR were used; 3 - conventional power transformers and classical ASR (PID regulator) were used

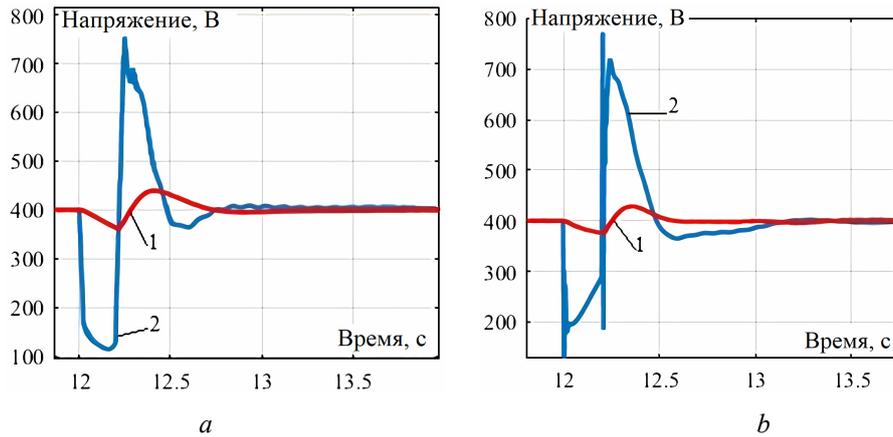


Рис. 9. Действующее напряжение в сети 0,4 кВ малой ГЭС (а) и ВГУ (b) при кратковременном трехфазном КЗ в системе 10 кВ: 1 – использовались энергетические роутеры; 2 – применялись обычные силовые трансформаторы

Fig. 9. The effective voltage in the 0.4 kV grid of a small HPP (a) and WPGP (b) during a short-term three-phase fault in the 10 kV system: 1 - energy routers were used; 2 - conventional power transformers were used

Результаты компьютерного моделирования режима резкого уменьшения скорости ветра, вызывающего значительное снижение генерации от ВГУ, представлены на рисунках 10 и 11, а, b.

При резком снижении генерации ВГУ в случае применения энергетических роутеров удается значительно ограничить провал частоты в сети 10 кВ (характеристики 1 и 2 на рис. 10); при этом использование прогностических АРС дает возможность уменьшить колебательность, время переходного процесса и величину перерегулирования для частоты в сети 10 кВ (характеристики 2 и 3 на рис. 10).

Таким образом, результаты моделирования позволяют сделать вывод, что при возмущениях, связанных с изменением генерации от возобновляемых источников энергии, использова-

ние энергетических роутеров позволяет уменьшить влияние на распределительную сеть 10 кВ ИСЭС (рис. 10), а также на сети 0,4 кВ потребителей электроэнергии, получающих питание от ветрогенераторной установки (рис. 11, b), и удаленных от ВГУ потребителей электроэнергии, получающих питание от малой ГЭС (характеристики 1 и 2 на рис. 11, a). Значительно снижаются провалы напряжения и перенапряжения (рис. 11, a), а также уменьшается время переходного процесса для напряжения в сети 0,4 кВ (рис. 11, a, b). Применение прогностического АРС у генераторов ТГУ и малой ГЭС дает дополнительный эффект в уменьшении колебательности, перерегулирования и времени переходного процесса для напряжения в сети 0,4 кВ (характеристики 2 и 3 на рис. 11, a, b).

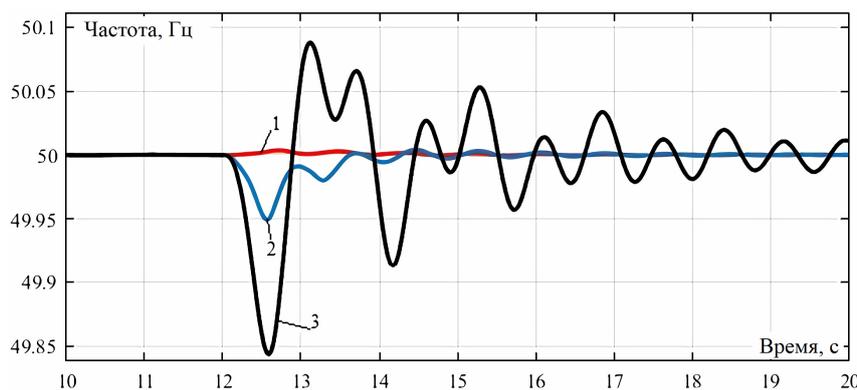


Рис. 10. Частота в сети 10 кВ при резком уменьшении скорости ветра: 1 – использовались энергетические роутеры и прогностический АРС генераторов ТГУ и ГЭС; 2 – применялись обычные силовые трансформаторы и прогностический АРС генераторов ТГУ и ГЭС; 3 – применялись обычные силовые трансформаторы и классический АРС генератора ТГУ

Fig. 10. Frequency in the 10 kV grid at a sharp decrease in wind velocity: 1 - energy routers and prognostic ASR of TGP and HPP generators were used; 2 - conventional power transformers and prognostic ASR of TGP and HPP generators were used; 3 - conventional power transformers and classical ASR of TGP generator were used

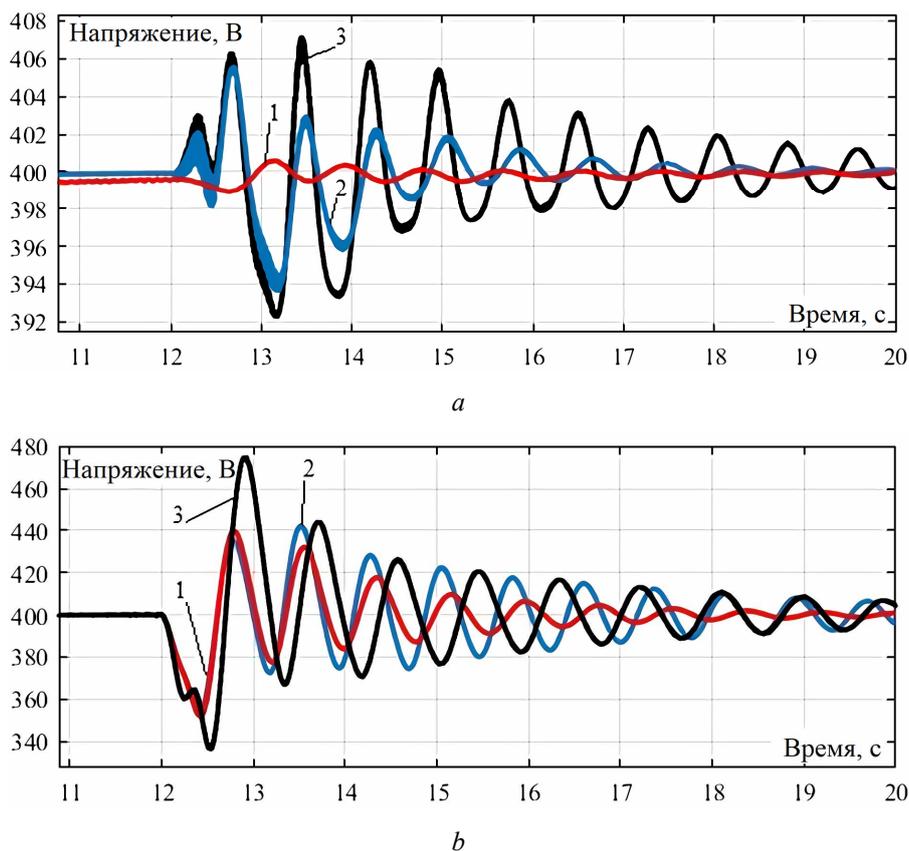


Рис. 11. Действующее напряжение в сети 0,4 кВ малой ГЭС (а) и ВГУ (б) при резком уменьшении скорости ветра: обозначения характеристик 1, 2 и 3 аналогичны рисунку 10

Fig. 11. The effective voltage in the 0.4 kV grid of a small HPP (a) and WPGP (b) during a sharp decrease in the wind velocity: designations of characteristics 1, 2 and 3 are similar to figure 10

Заключение

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Применение энергетических роутеров для подключения к ИСЭС генерирующих установок на возобновляемых источниках энергии позволяет эффективно регулировать напряжение и частоту. В отличие от использования обычных силовых трансформаторов энергетические роутеры позволили получить следующие положительные эффекты: снизить провал частоты в сети 10 кВ при подключении дополнительной нагрузки; уменьшить время переходного процесса для частоты при кратковременном трехфазном коротком замыкании; значительно ограничить провалы напряжения и перенапряжения.

2. Применение прогностических регуляторов скорости вращения ротора у генераторов ТГУ и малой ГЭС позволило убрать колебательность, снизить время переходного процесса и значительно уменьшить перерегулирование для частоты в режимах подключения дополнительной нагрузки и кратковременного короткого замыкания в сети ИСЭС даже при использовании обычных силовых трансформаторов.

3. В ИСЭС с энергетическими роутерами при резком уменьшении скорости ветра ограничиваются провалы напряжения и частоты в сети; при этом прогностические АРС дополнительно уменьшают колебательность, время переходного процесса и величину перерегулирования.

4. Использование энергетических роутеров позволяет значительно уменьшить влияние на ИСЭС изменений генерируемой мощности установок РГ, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Библиографические ссылки

1. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 16-23.
2. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014, 396 p.
3. Wang R., Wang P., Xiao G. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer, 2018, 218 p.
4. Barker Ph.P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 -

Radial Distribution Systems: 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, pp. 222-233.

5. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.

6. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748-764.

7. Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, vol. 7, pp. 348-357.

8. Shen X., Zhu S., Zheng J., Han Y., Li Q., Nong J., Mohammad Sh. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System: Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015, pp. 1-5.

9. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and Economic Impacts of Distributed Generation on Distribution System. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 385-389.

10. Olivares D. Trends in Microgrid Control. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919.

11. Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet: IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011, pp. 31-36.

12. Wang K., Liu X., Zhao L., Zhou Y., Xu D. Research on Structure and Energy Management Strategy of Household Energy Router Based on Hybrid Energy Storage: IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2019. DOI: 10.1109/ISGT.2019.8791644.

13. Ma Y., Wang X., Zhou X., Gao Zh. An overview of energy routers: 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2017. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7979219.

14. Liu B., Wu W., Zhou Ch., Mao Ch., Wang D., Duan Q., Sha G. An AC-DC Hybrid Multi-Port Energy Router With Coordinated Control and Energy Management Strategies. *IEEE Access*, 2019, vol. 7. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2933469.

15. Wu R., Wang B., Zou Y., Fan B., Li L., Zhu Zh. Energy router interface model based on bidirectional flow control for intelligent park: 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/IECON.2017.8217362.

16. Han X., Yang F., Bai C., Xie G., Ren G., Hua H., Cao J. An Open Energy Routing Network for Low-Voltage Distribution Power Grid: IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), 2017. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICEI.2017.63.

17. Shilpakala G.B., Prassad M.J. Solid state transformers: new approach and new opportunity: Proceedings of 11th IRF International Conference, 15th June-2014, Pune, India, pp. 15-21.

18. Zhao T., Yang L., Wang J., Huang A.Q. 270 kVA Solid State Transformer Based on 10 kV SiC Power Devices: Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE, pp. 145-149.

19. Mao X., Falcones S., Ayyanar R. Energy-Based Control Design for a Solid State Transformer: Proc. FREEDM Annual Conference, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2009, pp. 217-220.

20. Rathod D.K. Solid State Transformer (SST) Review of Recent Developments. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 45-50.

21. Anderson P.M., Fouad A.A. *Power System Control and Stability*, Second Edition. IEEE Press, 2003, 688 p.

22. Heier S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd, 1998.

References

1. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 16-23.

2. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. *Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014, 396 p.

3. Wang R., Wang P., Xiao G. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer, 2018, 218 p.

4. Barker Ph.P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems: 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, pp. 222-233.

5. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.

6. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748-764.

7. Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, vol. 7, pp. 348-357.

8. Shen X., Zhu S., Zheng J., Han Y., Li Q., Nong J., Mohammad Sh. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System: Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015, pp. 1-5.

9. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and Economic Impacts of Distributed Generation on Distribution System. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 385-389.

10. Olivares D. Trends in Microgrid Control. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919.

11. Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet: IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011, pp. 31-36.

12. Wang K., Liu X., Zhao L., Zhou Y., Xu D. Research on Structure and Energy Management Strategy of Household Energy Router Based on Hybrid Energy Storage: IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2019. DOI: 10.1109/ISGT.2019.8791644.
13. Ma Y., Wang X., Zhou X., Gao Zh. An overview of energy routers: 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2017. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7979219.
14. Liu B., Wu W., Zhou Ch., Mao Ch., Wang D., Duan Q., Sha G. An AC–DC Hybrid Multi-Port Energy Router With Coordinated Control and Energy Management Strategies. IEEE Access, 2019, vol. 7. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2933469.
15. Wu R., Wang B., Zou Y., Fan B., Li L., Zhu Zh. Energy router interface model based on bidirectional flow control for intelligent park: 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/IECON.2017.8217362.
16. Han X., Yang F., Bai C., Xie G., Ren G., Hua H., Cao J. An Open Energy Routing Net-work for Low-Voltage Distribution Power Grid: IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), 2017. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/ICEI.2017.63.
17. Shilpakala G.B., Prasad M.J. Solid state transformers: new approach and new opportunity: Proceedings of 11th IRF International Conference, 15th June-2014, Pune, India, pp. 15-21.
18. Zhao T., Yang L., Wang J., Huang A.Q. 270 kVA Solid State Transformer Based on 10 kV SiC Power Devices: Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE, pp. 145-149.
19. Mao X., Falcones S., Ayyanar R. Energy-Based Control Design for a Solid State Transformer: Proc. FREEDM Annual Conference, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2009, pp. 217-220.
20. Rathod D.K. Solid State Transformer (SST) Review of Recent Developments. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 45-50.
21. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability, Second Edition. IEEE Press, 2003, 688 p.
22. Heier S. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons Ltd, 1998.

Isolated Power Supply System with Energy Routers and Renewable Energy Sources

Yu.N. Bulatov, PhD in Engineering, Associate Professor, Bratsk State University, Bratsk, Russia

A.V. Kryukov, DSc in Engineering, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

K.V. Suslov, DSc in Engineering, Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Power supply systems built using smart grid technologies can be implemented on the basis of energy routers made using high-frequency solid-state transformers. Energy routers can be used to connect distributed generation plants operating on renewable energy sources and energy storage devices to supply electricity to consumers in an isolated system. In addition, the use of energy routers improves the quality of electricity in the power supply system in terms of voltage asymmetry and nonsinusoidality.

The paper presents the results of modeling the operating modes of an isolated power supply system, which includes the following elements: energy routers, a wind generating plant with a fuzzy regulator of the angle of rotation of the wind turbine blades, a small hydroelectric power plant and a turbine generator set with prognostic voltage and rotor speed regulators. The simulation was carried out in MATLAB using the Simulink and SimPowerSystems packages. The purpose of the research was to determine the efficiency of using energy routers in an isolated power supply system for connecting energy storage devices and distributed generation units operating on renewable energy sources.

The results of computer simulation of various modes of operation made it possible to formulate the following conclusions.

The use of energy routers to connect generating plants based on renewable energy sources to the ISES makes it possible to effectively regulate the voltage and frequency. In contrast to the use of conventional power transformers, energy routers have made it possible to obtain the following positive effects: to reduce the frequency drop in the 10 kV network when an additional load is connected; reduce the transient time for frequency in case of a short-term three-phase short circuit; significantly limit voltage dips and overvoltage.

The use of predictive controllers of the rotor speed of the generators of TSU and small hydroelectric power station made it possible to remove oscillation, reduce the time of the transient process and significantly reduce the overshoot for the frequency in the modes of connecting an additional load and short-term short circuit in the ISES network, even when using conventional power transformers.

With a sharp decrease in wind speed, prognostic ARS additionally reduce oscillation, transient time and the amount of overshoot.

The use of energy routers can significantly reduce the impact on the ISES of changes in the generated power of RG installations operating on renewable energy sources.

Keywords: distributed generation plants, renewable energy sources, isolated power supply system, energy router, prognostic controllers, simulation.

Получено 05.04.2021

Образец цитирования

Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Суслов К. В. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками энергии // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 24, № 2. С. 124–134. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-124-134.

For Citation

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. [Isolated Power Supply System with Energy Routers and Renewable Energy Sources]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 124-134 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-124-134.