

УДК 621.316.722

Н.Н. Малышева¹, Е.А. Третьяков²¹Нижевартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия²Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ С ИСТОЧНИКАМИ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Внедрение источников генерации и регулируемых устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях железных дорог требует разработки новых методов группового управления напряжением, например, на основе агентного подхода. Мультиагентное управление напряжением позволяет получить новые результаты, связанные с возможностью самоорганизации агентов – активных элементов электрической сети, что приводит к повышению надежности электроснабжения и качества электроэнергии. Моделирование рассматриваемых мультиагентных систем управления на классических моделях системной динамики представляет трудности из-за сложного взаимодействия агентов ввиду их индивидуальных целей полезности, наличия логических операций и событийного характера процессов. Значительная часть публикаций по мультиагентному управлению режимами электрической сети, в том числе с элементами распределенной генерации, накопителями энергии, посвящена разработке концепций и подсистем такого управления, в которых результаты моделирования представлены по отдельным компонентам. Реализация подхода на основе сочетания традиционных методов системной динамики и агентного метода моделирования позволит решить эти проблемы. Представлены принципы координации локальных агентов источников мощности по типу «аукцион» и выражения для определения управляющих воздействий на основе чувствительности напряжений в узлах электрической сети к инъекциям мощности. Разработаны диаграммы состояний агентов для моделирования мультиагентного управления напряжением с помощью источников реактивной мощности в распределительных электрических сетях железных дорог в среде Anylogic. Выполнено моделирование управления напряжением в тестовой электрической сети при изменении параметров режима. Полученные результаты моделирования свидетельствуют об обоснованности подходов к стабилизации напряжения методами мультиагентного управления и возможности их практической реализации на базе современного оборудования.

Ключевые слова: моделирование, источники реактивной мощности, стабилизация напряжений, групповое управление, агентный подход, диаграмма состояний

N.N. Malysheva¹, E.A. Tretyakov²

¹Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russian Federation

²Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

GROUP VOLTAGE CONTROL MODELING WITH SOURCES OF ACTIVE AND REACTIVE POWER IN ELECTRICAL NETWORKS

The introduction of generation sources and adjustable reactive power compensation devices in distribution electric networks of railways requires the development of new methods of group voltage control, for example, based on an agent-based approach. Multi-agent voltage management allows to obtain new results related to the possibility of self-organizing agents-active elements of the electrical network, which leads to an increase in the reliability of power supply and power quality. Modeling the considered multi-agent control systems on classical models of system dynamics is difficult because of the complex interaction of agents due to their individual utility goals, the presence of logical operations and the event-driven nature of the processes. A significant part of publications on multi-agent control of electric network modes, including those with elements of distributed generation, energy storages, is devoted to the development of concepts and subsystems of such management, in which the simulation results are presented for individual components. The implementation of the approach based on a combination of traditional methods of system dynamics and agent-based modeling will solve these problems. The principles of coordination of local agents of power sources of the type "auction" and expressions for determining control actions based on the sensitivity of voltages in the electrical network nodes to power injections are presented. Agent state diagrams have been developed for modeling multi-agent voltage control using reactive power sources in distribution electrical networks of railways in the Anylogic environment. The simulation of the voltage control in the test electrical network when changing the parameters of the mode. The obtained simulation results indicate the validity of approaches to voltage stabilization by multi-agent control methods and the possibility of their practical implementation on the basis of modern equipment.

Keywords: modeling, reactive power sources, voltage stabilization, group control, agent approach, state diagram.

Введение. Внедрение регулируемых устройств компенсации реактивной мощности (КУ) в распределительных электрических сетях железных дорог открывает новые возможности для повышения эффективности их работы за счет методов группового управления напряжением на основе агентного подхода. Значительная часть публикаций по мультиагентному управлению режимами электрической сети, в том числе с элементами распределенной генерации, накопителями энергии, посвящена разработке концепций и подсистем такого управления, в которых результаты моделирования представлены по отдельным компонентам [1–4].

Моделирование рассматриваемых мультиагентных систем управления на классических моделях системной динамики представляет трудности из-за сложного взаимодействия агентов ввиду их индивидуальных целей полезности, наличия логических операций и событийного характера процессов.

При расчетах параметров режимов распределительных сетей часто предполагается [4–9], что электрическая сеть статична, все значения данных являются известными константами, а фактическое изменение нагрузки во времени рассматривается с учетом несколько различных дискретных случаев. Реализация подхода на основе сочетания традиционных методов системной динамики и агентного метода моделирования позволит решить эти проблемы.

1. Основное содержание статьи. Для создания агентных моделей разработаны специализированные программные продукты, например, NetLogo, StarLogo, Repast Simphony, Eclipse AMP, JADE, Jason и другие [12–15], многие из которых основаны на спецификации FIPA [16]. Однако указанные агентные платформы требуют специальных навыков программирования, поэтому их широкое использование исследователями в широких областях знаний ограничено. Одним из удобных инструментов для научных исследований по моделированию агентных систем является программный продукт AnyLogic, который пока не имеет готовых библиотек по электроэнергетике.

Модель мультиагентного управления напряжением в распределительной электрической сети железных дорог в Anylogic может быть представлена в виде известного описания установившихся режимов и характеристик локальных агентов, и агентов-координаторов в виде диаграмм состояний, онтологии, алгоритмов взаимодействия и координации [17–20].

В качестве локальных агентов в рассматриваемой задаче выступают контроллеры активных элементов – устройств компенсации реактивной мощности, агентов-координаторов – управляющие по напряжению контроллеры участка электрической сети.

Локальные контроллеры имеют свои правила поведения, и их совместная работа создает сложность модели, эмерджентные свойства которой определяют поведение системы управления напряжением в электрической сети в целом. Для наилучшего поведения указанной мультиагентной системы управления должны быть задействованы локальные агенты, которые имеют максимальную эффективность для выполнения конкретной задачи, обладая правилом самоорганизации при внешних и внутренних воздействиях [18]:

$$J = \sum_{v=1}^n q_v \rightarrow \max; \quad n \rightarrow \min ,$$

где q_v – оценка эффективности выполнения агентом действия; n – число агентов, среди множества действий которых имеются все действия, обеспечивающие достижение целевой задачи.

Координация локальных агентов осуществляется на основе принципа «аукцион», который заключается в выборе лучших предложений для целей управления среди локальных агентов. Аукцион проводится итерационно, пока все задачи не будут распределены между локальными агентами наилучшим образом (рис. 1). Основные действия агентов: формирование агентами ценового массива (k_Q), выбор наиболее эффективных агентов, оповещение агентов о выполнении задачи, исключение задачи из ценовых массивов агентов.

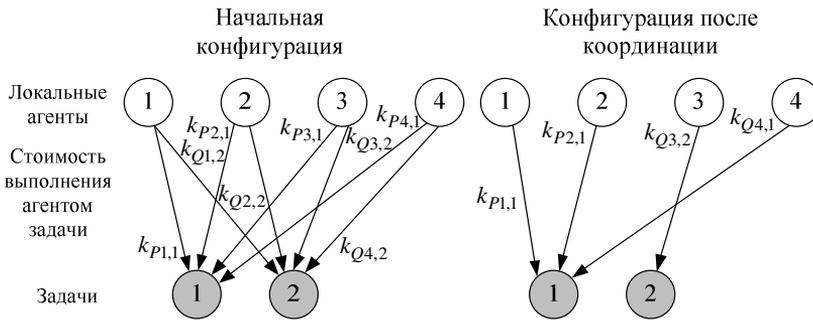


Рис. 1. Координация агентов

Выбор агентов осуществляется на основе ранжирования их оценок эффективности (в данном случае соотношений «стоимости» выполнения задачи к чувствительности шин электрической сети по напряжению к инъекции реактивной мощности КУ – k_Q/b_{jk}).

Чувствительность шин электрической сети по напряжению к инъекции реактивной мощности КУ локального агента b_{jk} определяется на основе соответствующих элементов матрицы Якоби [16]. Величина инъекций КУ локальных агентов определяется в результате решения задачи с учетом известных ограничений параметров режима:

$$\Delta U_D = \sum_{j=1}^N (k_P \Delta P_j + k_Q \Delta Q_j) \rightarrow \min,$$

где k_P, k_Q – коэффициенты по активной и реактивной мощности;

$$\sum_{j=1}^N (a_{jk} \Delta P_j + b_{jk} \Delta Q_j) = \Delta U_D.$$

Для рассматриваемого случая $k_P = 0$; $b_{jk} = 0$.

Моделирование мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях состоит в интеграции расчетов параметров режима и имитации работы локальных агентов, агентов-координаторов.

Для описания онтологии используются диаграммы состояний и заданные ограничения параметров режима, на основе которых описываются все знания, которые необходимы агенту как для индивидуальной работы, так и для взаимодействия с другими агентами [18, 19].

Примерный перечень команд протокола коммуникации в мультиагентной системе управления напряжением:

- информирование агентов о готовности и об окончании переговоров;
- запрос величины «стоимости» регулирования напряжения;
- ответ с величиной «стоимости» выполнения агентом задачи;
- предварительное согласие на работу;
- отказ на работу;
- уведомление о согласии всех агентов на работу;
- уведомление об отказе некоторых агентов;
- подтверждение согласия и переход к работе;
- отклонение предварительного согласия и возврат к исходной работе.

Алгоритм управления напряжением за счет координированной выработки активной и реактивной мощности в электрической сети представлен на рис. 2.

Рассматривается реализация моделирования мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог в программном продукте AnyLogic на примере фрагмента электрической сети 10 кВ (рис. 3).

Расчет установившихся режимов по заданной топологии, параметрам схемы замещения электрической сети выполнялся на каждом шаге по времени. При моделировании были приняты двадцать четыре шага, которые могут быть увеличены до уровня детализации временного графика в несколько минут или секунд.

Для описания поведения рассматриваемых агентов в AnyLogic на основе представленного алгоритма и принципов их координации разработаны диаграммы состояний локального агента КУ и агента-координатора, представленные на рис. 4.

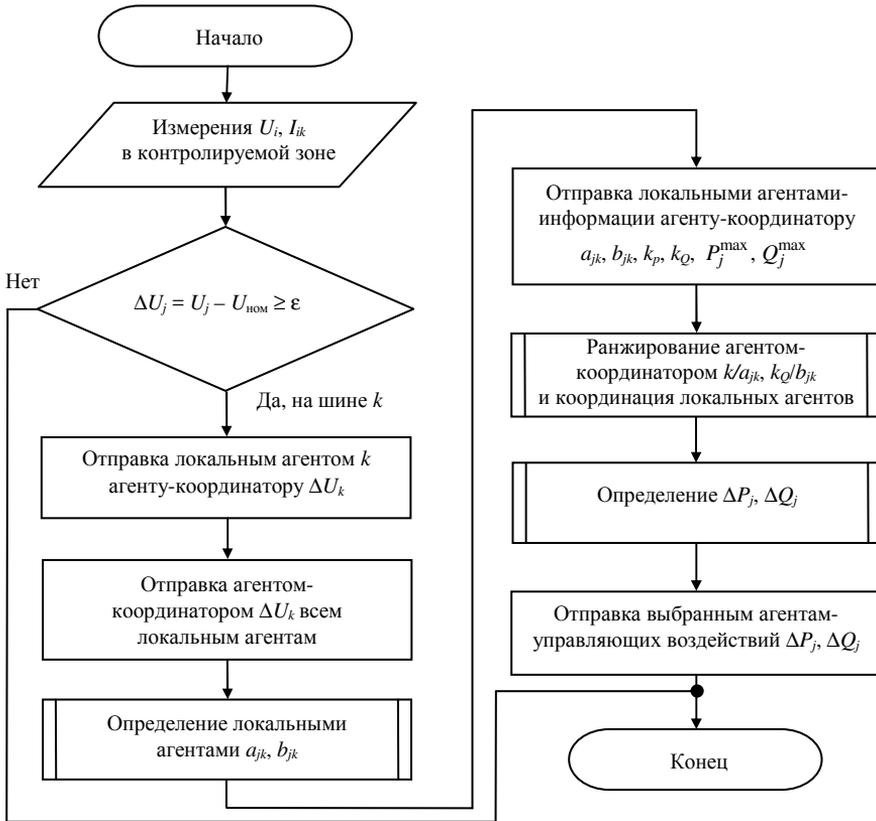


Рис. 2. Алгоритм управления напряжением

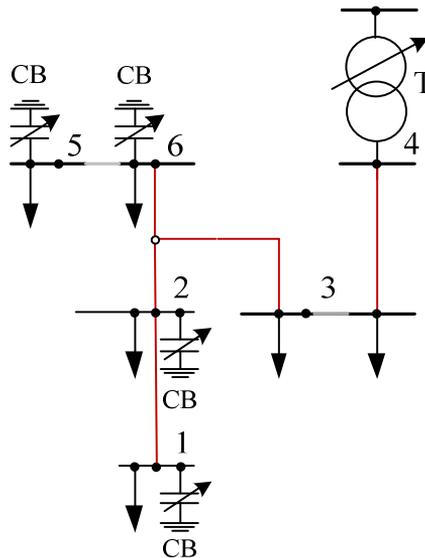


Рис. 3. Фрагмент электрической сети

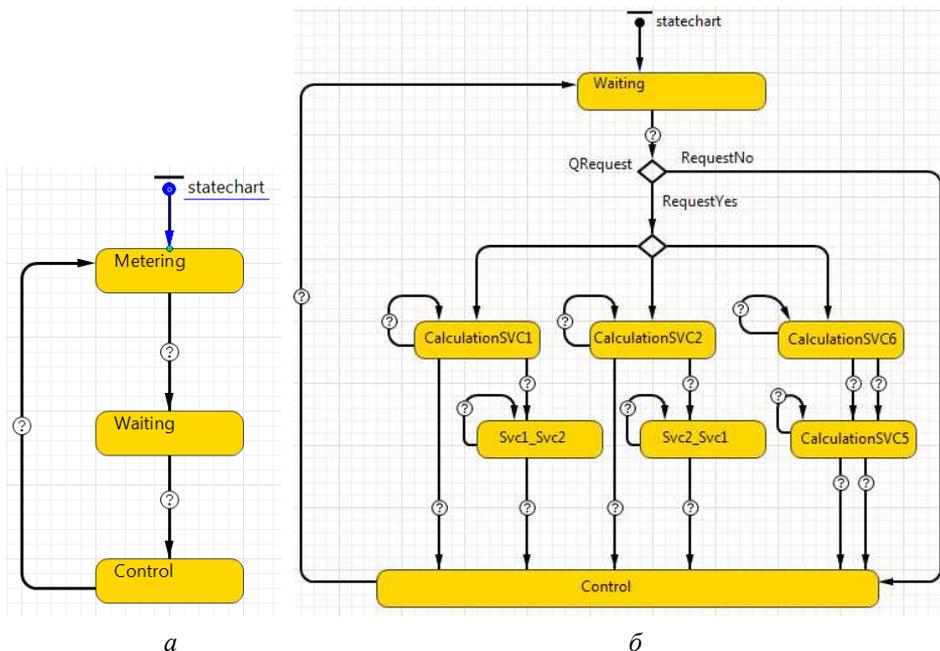
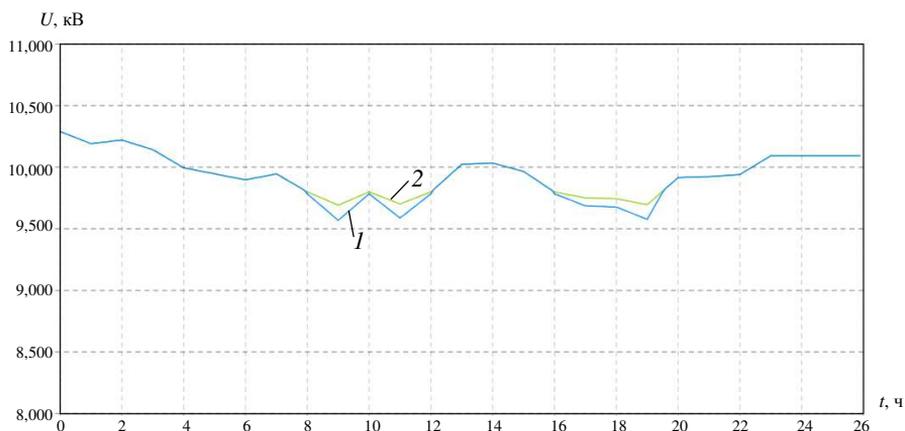


Рис. 4. Диаграмма состояний локального агента КУ (а) и агента-координатора (б)

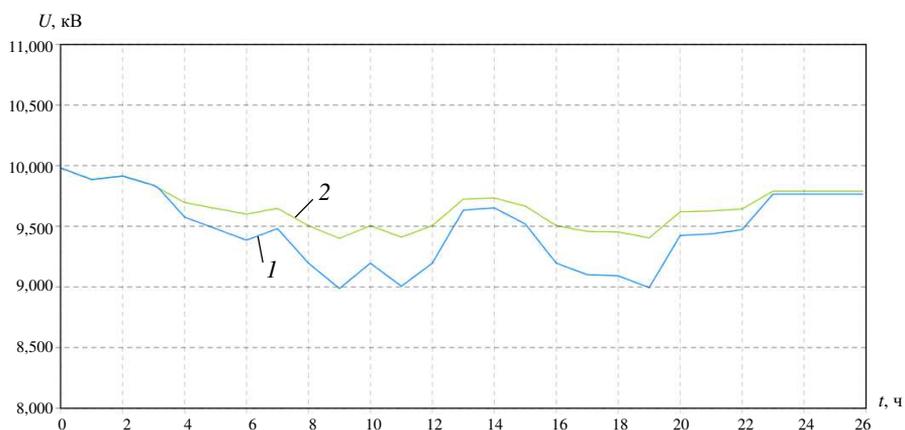
Локальные агенты каждого КУ имеют три состояния: измерение (Metering), ожидание работы (Waiting), работа (Control). Агент-координатор осуществляет координацию работы локальных агентов по представленному на рис. 2 алгоритму с учетом производственных правил и ограничений по напряжению, предельной мощности КУ. Переход из одного состояния агентов в другое осуществляется при получении сообщений, по времени или в результате событий внутри агента.

На рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования мультиагентного управления напряжением на шинах 1 и 2 в тестовой электрической сети на основе представленных подходов в программе AnyLogic.

Результаты моделирования свидетельствуют о работоспособности моделирования мультиагентного управления напряжением в электрической сети. По условиям моделирования допустимое отклонение на шинах задано в пределах $\pm 6\%$, предел реактивной мощности КУ 400 квар. Устройство КУ на шине 2 тестовой электрической сети включается в работу только при невозможности КУ на шине 1 обеспечить стабилизацию уровня напряжений в заданных пределах, что основывается на представленных выше принципах координации локальных агентов и решении оптимизационной задачи.



a



б

Рис. 5. Результаты моделирования напряжения на шине 2 (*a*), на шине 1 (*б*) электрической сети: 1 – без стабилизации напряжения; without voltage stabilization; 2 – с управлением напряжением с помощью КУ; with voltage control using SVC

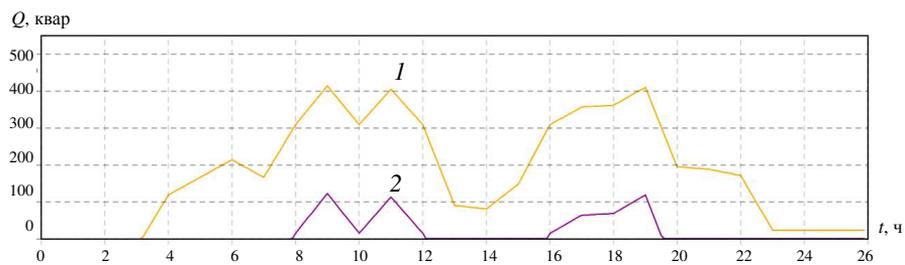


Рис. 6. Реактивная мощность, вырабатываемая КУ для стабилизации напряжений: 1 – на шине 1; 2 – на шине 2

Выводы. Результаты исследований показали практическую реализуемость моделирования управления напряжением в распределительных электрических сетях на основе представленного подхода. Интеграция в одном программном продукте компонентов системной динамики и поведения агентов позволяет целостно моделировать поведение системы мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог.

Результаты исследований могут быть заложены в основу автоматической системы управления распределением и потреблением электроэнергии в интеллектуальных распределительных электрических сетях на основе цифровых подстанций, структура и конфигурация которых выполнена по стандарту МЭК 61850. Агенты-координаторы аппаратно-программно могут быть реализованы на уровне присоединений в виде интеллектуальных электронных устройств, которые подключаются через Ethernet к станционной шине и шине процессов с возможностью передачи сообщений исполнительным устройствам по протоколу МЭК 61850-8-1 (GOOSE) с синхронизацией времени.

Значительный научный интерес представляют также вопросы моделирования мультиагентного управления напряжением в электрических сетях при отказе и ограничениях в работе одного или нескольких КУ, заданных ограничениях параметров режима, наличии распределенной генерации с активными потребителями, энергоузелами, что является предметом дальнейших исследований авторов

Библиографический список

1. Исмоилов С.Т., Фишов А.Г. Моделирование и анализ эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1–2. – С. 302–305.

2. Niknam T., Zare M., Aghaei J. Scenario-based multiobjective volt/var control in distribution networks including renewable energy sources // IEEE Trans. Power Del. – 2012. – Vol. 27, № 4. – P. 2004–2019.

3. Karbalaei F., Shahbazi H. A quick method to solve the optimal coordinated voltage control problem based on reduction of system dimensions // Electronic Power Systems Research. – 2017. – № 142. – P. 310–319.

4. Juamperez M., Yang G.Y., Kjaer S.B. Voltage regulation in LV grids by coordinated volt-var control strategies // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2014. – № 4(2). – P. 319–328.

5. Distributed cooperative voltage control based on curve-fitting in active distribution networks / H.B. Wu, C.Y. Huang, M. Ding, B. Zhao, P. Li // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2017. – № 5(5). – P. 504–511.

6. Morattab A., Akhrif O., Saad M. Decentralised coordinated secondary voltage control of multi-area power grids using model predictive control // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2017. – № 11. – P. 4546–4555.

7. A coordinated consistency voltage stability control method of active distribution grid / YE Xi, LE Jian, LIU Yongyan, ZHOU Wu, LIU Kaipei // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2018. – № 6(1). – P. 85–94.

8. Farag H.E., Saadany E.F., Chaar L.E. A multilayer control framework for distribution systems with high DG penetration // *Proceedings of the 2011 International Conference on Innovations in Information Technology (IIT'11)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2011. – P. 94–99.

9. Ghiani E., Pilo F. Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2015. – № 3(4). – P. 504–511.

10. Alobeidli K., Moursi S. Novel coordinated secondary voltage control strategy for efficient utilisation of distributed generations // *IET Renewable Power Generation*. – 2013. – Vol. 8, № 5. – P. 569–579.

11. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control / H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand, A. Rabiee // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2017. – № 93. – P. 384–394.

12. Ссылка на web-страницу JADE // JAVA Agent DEvelopment Framework. – URL: <http://jade.tilab.com/> (дата обращения: 20.10.2018).

13. Ссылка на web-страницу MASwarm // MASwarm Agent Platform. – URL: <http://navizv.github.io/MASwarm/> (дата обращения: 20.10.2018).

14. Ссылка на web-страницу NetLogo // NetLogo Agent Platform. – URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения: 20.10.2018).

15. Ссылка на web-страницу Repast Symphony // Repast Suite. – URL: <http://repast.sourceforge.net/> (дата обращения: 20.10.2018).

16. Ссылка на web-страницу FIPA // Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). – URL: <http://www.fipa.org> (дата обращения: 20.10.2018).

17. Пат. 2587128 Рос. Федерация. Способ управления системой электроснабжения железных дорог / Е.А. Третьяков; заяв. и патенто-обл. Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015103374/11; заявл. 02.02.2015; опубл. 10.06.2016. Бюл. № 16. – 4 с.

18. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход; пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.

19. Javad A., AminG., Ahad K. Multi-agent systems for reactive power control in smart grids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2016. – № 83. – P. 411–425.

20. Research on a hierarchical dynamic automatic voltage control system based on the discrete even-driven method / W. Hu, L. Zheng, Q. Lu, Y. Min // *Energies*. – 2016. – № 6. – P. 2949–2965.

References

1. Ismoilov S.T., Fishov A.G. Modelirovanie i analiz effektivnosti regulirovaniia napriazheniia v elektricheskoi seti s raspredelennoi generatsiei [Modeling and Analysis of the Effectiveness of Voltage Regulation in an Electrical Network with Distributed Generation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2014, no. 1-2, pp. 302-305.

2. Niknam T., Zare M., Aghaei J. Scenario-based multiobjective volt/var control in distribution networks including renewable energy sources. *IEEE Trans. Power Del*, 2012, vol. 27, no. 4, pp. 2004-2019.

3. Karbalaei F., Shahbazi H. A quick method to solve the optimal coordinated voltage control problem based on reduction of system dimensions. *Electronic Power Systems Research*, 2017, no. 142, pp. 310-319.

4. Juamperez M., Yang G.Y., Kjaer S.B. Voltage regulation in LV grids by coordinated volt-var control strategies. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, no. 4(2), pp. 319-328.

5. Wu H.B., Huang C.Y., Ding M., Zhao B., Li P. Distributed cooperative voltage control based on curve-fitting in active distribution networks. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, no. 5(5), pp. 504-511.

6. Morattab A., Akhrif O., Saad M. Decentralised coordinated secondary voltage control of multi-area power grids using model predictive control. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, no. 11, pp. 4546-4555.

7. Xi YE, Jian LE, Yongyan LIU, Wu ZHOU, Kaipei LIU A coordinated consistency voltage stability control method of active distribution

grid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, no. 6(1), pp. 85-94.

8. Farag H.E., Saadany E.F., Chaar L.E. A multilayer control framework for distribution systems with high DG penetration. *Proceedings of the 2011 International Conference on Innovations in Information Technology (IIT'11)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2011, pp. 94-99.

9. Ghiani E., Pilo F. Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2015, no. 3(4), pp. 504-511.

10. Alobeidli K., Moursi S. Novel coordinated secondary voltage control strategy for efficient utilisation of distributed generations. *IET Renewable Power Generation*, 2013, vol. 8, no. 5, pp. 569-579.

11. Yassami H., Bayat F., Jalilvand A., Rabiee A. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, no. 93, pp. 384-394.

12. JAVA Agent DEvelopment Framework, available at: <http://jade.tilab.com/> (accessed 20 October 2018).

13. MASwarm Agent Platform, available at: <http://navizv.github.io/MASwarm/> (accessed 20 October 2018).

14. NetLogo Agent Platform, available at: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (accessed 20 October 2018).

15. Repast Suite, available at: <http://repast.sourceforge.net/> (accessed 20 October 2018).

16. Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA), available at: <http://www.fipa.org> (accessed 20 October 2018).

17. Tret'iakov E.A. Sposob upravleniia sistemoi elektrosnabzheniia zheleznykh dorog [The Method of Controlling the Power Supply System of Railways]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2587128 (2016).

18. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podkhod* [Artificial Intelligence: a Modern Approach]. Moscow: Vil'iams, 2006. 1408 p.

19. Javad A., AminG., Ahad K. Multi-agent systems for reactive power control in smart grids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, no. 83, pp. 411-425.

20. Hu W., Zheng L., Lu Q., Min Y. Research on a hierarchical dynamic automatic voltage control system based on the discrete even-driven method. *Energies*, 2016, no. 6, pp. 2949-2965.

Сведения об авторах

Малышева Надежда Николаевна (Нижневартовск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика» Нижневартовского государственного университета (628611, ХМАО-Югра, Нижневартовск, ул. Дзержинского, 11, e-mail: malyshevann@list.ru).

Третьяков Евгений Александрович (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (644046, Омск, пр. Маркса, 35, e-mail: eugentr@mail.ru).

About the authors

Malysheva Nadezhda Nikolayevna (Nizhnevartovsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Energy Nizhnevartovsk State University (628611, Khanty-Mansiyskiy Autonomous Okrug, Nizhnevartovsk, 11, Dzerzhinskogo str., e-mail: malyshevann@list.ru).

Tretyakov Evgeny Aleksandrovich (Omsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor the Electric Railway Rolling Stock department Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marksa ave., e-mail: eugentr@mail.ru).

Получено 17.07.2019