

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*В.Т. Черемисин, Е.А. Третьяков, Г.Е. Головнев*

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия*

Внедрение регулируемых устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях железных дорог открывает новые возможности для повышения эффективности их работы за счет методов группового управления напряжением 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 вызывает трудности из-за сложного взаимодействия агентов в виду их индивидуальных целей полезности, наличия логических операций и событийного характера процессов. 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, агентный подход, диаграмма состояний.

## **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, не раскрывая работу системы управления в целом в автоматическом режиме [1–11].

Моделирование рассматриваемых мультиагентных систем управления на классических моделях системной динамики вызывает 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 [4–8], 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.

## **Постановка задачи.**

Для создания агентных моделей разработаны специализированные программные продукты, например, NetLogo, StarLogo, Repast Symphony, 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 активное 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.

## **Теоретическая часть**

Модель мультиагентного управления напряжением в распределительной электрической сети железных дорог в AnyLogic может быть представлена в виде известного описания установившихся режимов [17, 18] и характеристик локальных агентов, и агентов-координаторов в виде диаграмм состояний, онтологии, алгоритмов взаимодействия и координации [19, 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 слож-

ность 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 [20]:

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

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.

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 [18].

Величина инъекций КУ локальных агентов определяется в результате решения задачи с учетом известных ограничений параметров режима:

$$\Delta U_D = \sum_{j=1}^N (k_P \Delta P_j + k_Q \Delta Q_j) \rightarrow \min, \quad (2)$$

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

$$\Delta U_D = \sqrt{\sum_{k=1}^N (U_k - U_{\text{зад}})^2};$$

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

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 [20].

Примерный перечень команд протокола коммуникации в мультиагентной системе управления напряжением:

- информирование агентов о готовности и 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.

Рассмотрим реализацию моделирования мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог в программном продукте AnyLogic на примере фрагмента электрической сети 10 кВ, представленной на рис. 3.

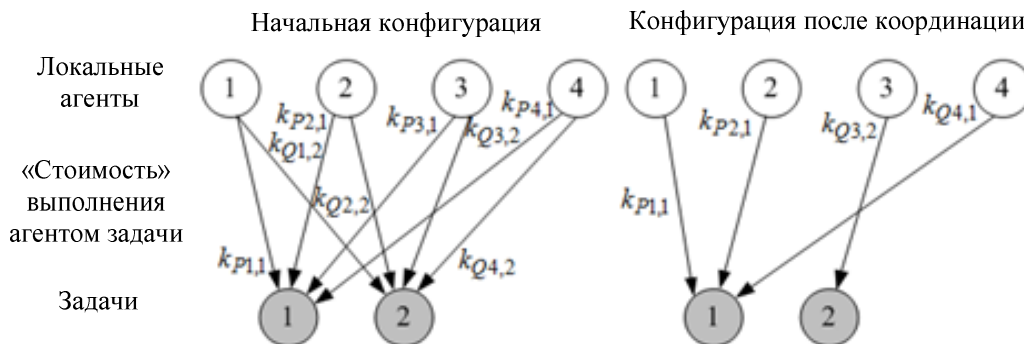


Рис. 1. Координация агентов

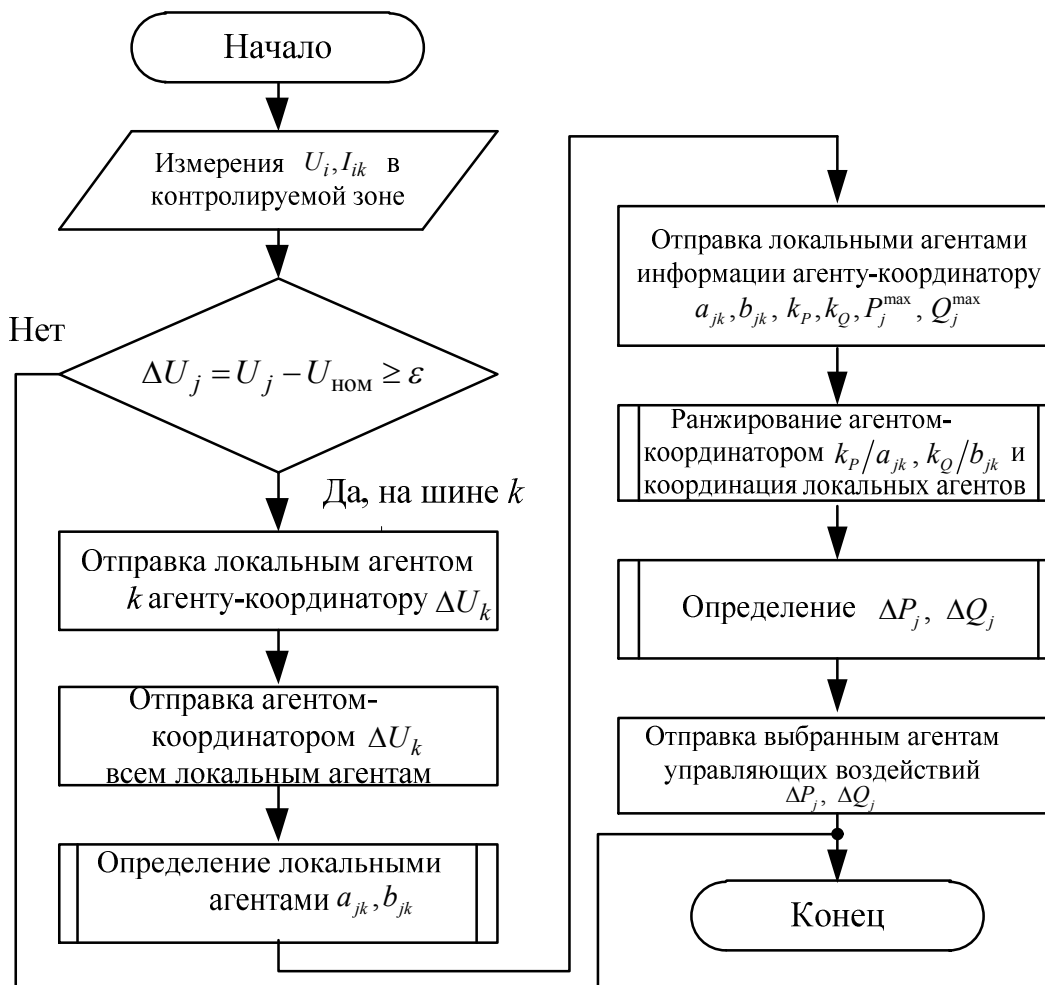


Рис. 2. Алгоритм управления напряжением

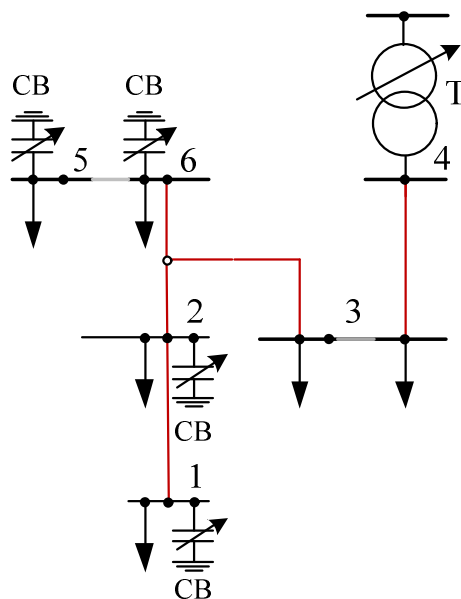


Рис. 3. Фрагмент электрической сети

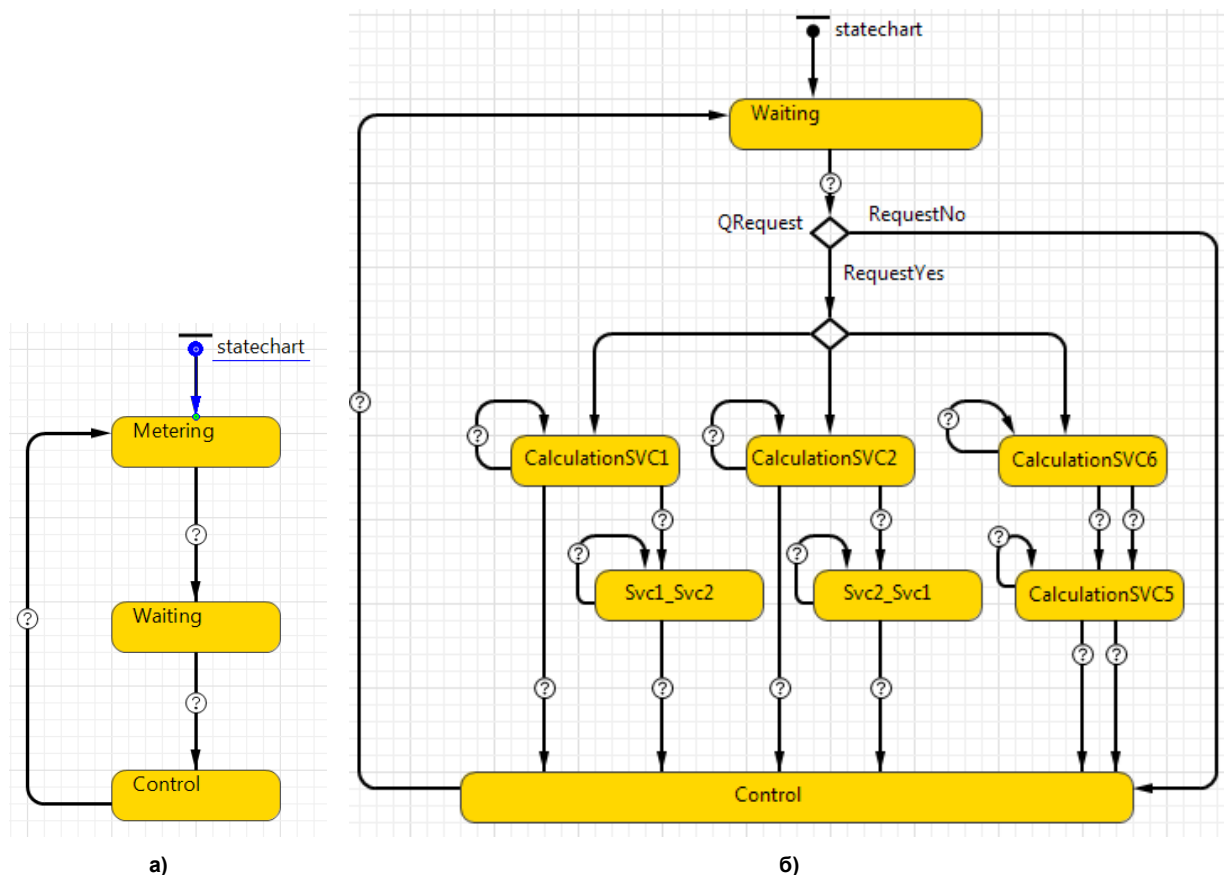


Рис. 4. Диаграмма состояний локального агента КУ (а) и агента-координатора (б)

Расчет установившихся режимов по заданной топологии, параметрам схемы замещения электрической сети выполнялся на каждом шаге по времени. При моделировании было принято 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.

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.

#### Практическая часть

На рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования мультиагентного управления напряжением на шинах 1 и 2 в тестовой электрической се-

ти 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 (2).

#### Заключение

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.

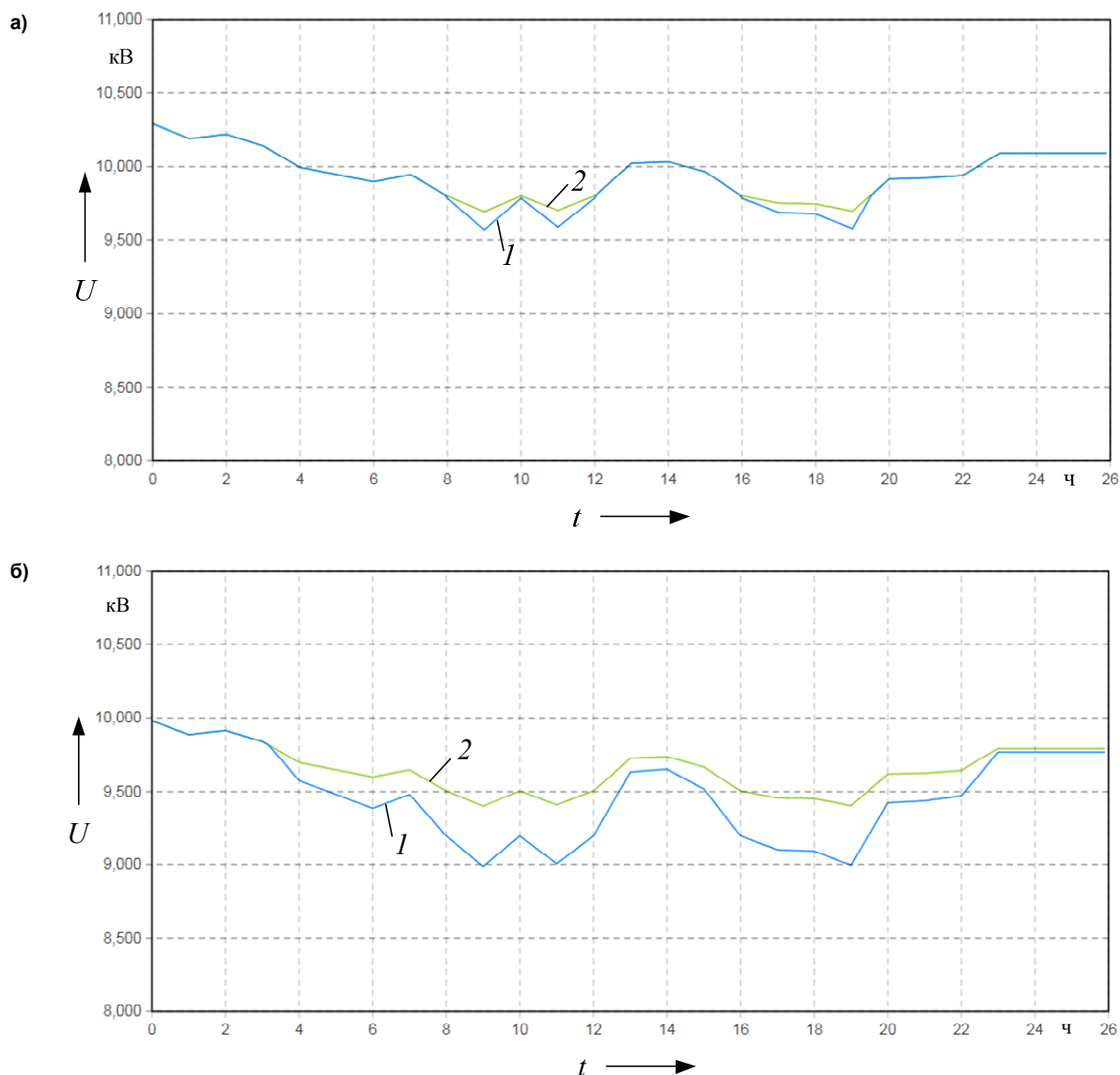


Рис. 5. Результаты моделирования напряжения на шине 2 (а), на шине 1 (б) электрической сети: 1 – без стабилизации напряжения; 2 – с управлением напряжением с помощью КУ

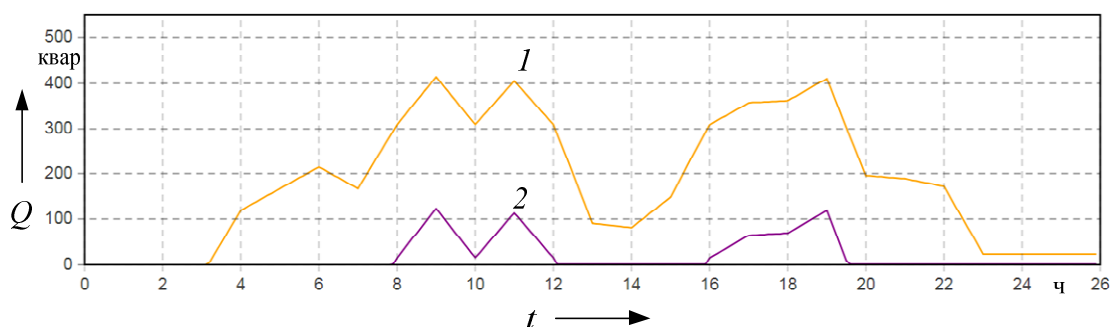


Рис. 6. Реактивная мощность, вырабатываемая КУ для стабилизации напряжений: 1 – на шине 1; 2 – на шине 2

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 и наличии распределенной генерации с активными потребителями, что является предметом дальнейших исследований авторов.

### Литература

1. Исмоилов, С.Т. Моделирование и анализ эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией / С.Т. Исмоилов, А.Г. Фишов // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2014. – № 1–2. – С. 302–305.
2. Niknam, T. Scenario-based multiobjective volt/var control in distribution networks including renewable energy sources / T. Niknam, M. Zare, J. Aghaei // *IEEE Trans. Power Del.* – 2012. – Vol. 27, no. 4. – P. 2004–2019.
3. Karbalaee, F. A quick method to solve the optimal coordinated voltage control problem based on reduction of system dimensions / F. Karbalaee, H. Shahbazi // *Electronic Power Systems Research*. – 2017. – No. 142. – P. 310–319.
4. Juamperez, M. Voltage regulation in LV grids by coordinated volt-var control strategies / M. Juamperez, G.Y. Yang, S.B. Kjaer // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2014. – No. 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 et al. // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2017. – No. 5 (5). – P. 504–511.
6. Morattab, A. Decentralised coordinated secondary voltage control of multi-area power grids using model predictive control / A. Morattab, O. Akhrif, M. Saad // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2017. – No. 11. – P. 4546–4555.
7. A coordinated consistency voltage stability control method of active distribution grid / YE Xi, LE Jian, LIU Yongyan et al. // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2018. – No. 6 (1). – P. 85–94.
8. Farag, H.E. A multilayer control framework for distribution systems with high DG penetration / H.E. Farag, E.F. Saadany, L.E. Chaar // *Proceedings of the 2011 international conference on innovations in information technology (IT'11)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2011. – P. 94–99.
9. Ghiani, E. Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic systems / E. Ghiani, F. Pilo // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2015. – No. 3 (4). – P. 504–511.
10. Alobeidli, K. Novel coordinated secondary voltage control strategy for efficient utilisation of distributed generations / K. Alobeidli, S. Moursi // *IET Renewable Power Generation*. – 2013. – Vol. 8, no. 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. – No. 93. – P. 384–394.
12. JAVA Agent DEvelopment Framework. – <http://jade.tilab.com/> (дата обращения: 20.10.2018).
13. MASwarm Agent Platform. – <http://navizv.github.io/MASwarm/> (дата обращения: 20.10.2018).
14. NetLogo Agent Platform. – <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения: 20.10.2018).
15. Repast Suite. – <http://repast.sourceforge.net/> (дата обращения: 20.10.2018).
16. Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). – <http://www.fipa.org> (дата обращения: 20.10.2018).
17. Почаевец, В.С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог: учеб. / В.С. Почаевец. – М.: УМЦ ЖДТ, 2003. – 318 с.
18. Овчаренко, Н.И. Автоматика энергосистем: учеб. / Н.И. Овчаренко; под ред. А.Ф. Дьякова – М.: Издат. дом МЭИ, 2016. – 476 с.
19. Пат. 2587128 Российская Федерация. Способ управления системой электроснабжения железных дорог / Е.А. Третьяков; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015103374/11; заявл. 02.02.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. – 4 с.
20. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Издат. дом Вильямс, 2006. – 1408 с.

**Черемисин Василий Титович**, д-р техн. наук, профессор, директор Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; cheremisinv@gmail.com.

**Третьяков Евгений Александрович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; eugentr@mail.ru.

**Головнев Григорий Евгеньевич**, аспирант, кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; grishantiy@gmail.com.

Поступила в редакцию 28 октября 2018 г.

## SIMULATION OF MULTI-AGENT VOLTAGE CONTROL IN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS OF RAILWAYS

V.T. Cheremisin, [cheremisinvt@gmail.com](mailto:cheremisinvt@gmail.com),

E.A. Tretyakov, [eugentr@mail.ru](mailto:eugentr@mail.ru),

G.E. Golovnev, [grishantiy@gmail.com](mailto:grishantiy@gmail.com)

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

The introduction of adjustable devices for reactive power compensation in distribution electric networks of railways reveals new opportunities to increase their efficiency through the use of group-based voltage control methods based on the agent-based approach. Multi-agent voltage management allows obtaining new results linked the possible of self-management of the 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. Agent state diagrams have been developed in the AnyLogic environment to model multi-agent voltage control using reactive power sources in distribution electrical networks of railways. The voltage control is simulated in the test network featuring the changing mode parameters. The obtained simulation results indicate the validity of the approaches to voltage stabilization with multi-agent control methods and the possibility of their practical implementation on the basis of modern equipment.

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

### References

1. Ismoilov S.T., Fishov A.G. [Modeling and Analysis of the Effectiveness of Voltage Regulation in an Electrical Network with Distributed Generation]. *Scientific Problems of transport in Siberia and the Far East*, 2014, no. 1–2, pp. 302–305. (in Russ.)
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. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2209900
3. Karbalaee 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. DOI: DOI: 10.3906/elk-1712-410
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, vol. 4, no. 4 (2), pp. 319–328. DOI: 10.1007/s40565-014-0072-0
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. 777–786. DOI: 10.1007/s40565-016-0236-1
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. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.2054
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. DOI: 10.1007/s40565-017-0294-z
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. DOI: 10.1109/INNOVATIONS.2011.5893877
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. DOI: 10.1007/s40565-015-0165-4
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. DOI: 10.1049/iet-rpg.2013.0135

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. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.06.014
12. JAVA Agent DEvelopment Framework. Available at: <http://jade.tilab.com> (accessed 20.10.2018).
13. MASwarm Agent Platform. Available at: <http://navizv.github.io/MASwarm> (accessed 20.10.2018).
14. NetLogo Agent Platform. Available at: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo> (accessed 20.10.2018).
15. Repast Suite. Available at: <http://repast.sourceforge.net> (accessed 20.10.2018).
16. Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA). Available at: <http://www.fipa.org> (accessed 20.10.2018).
17. Pochaeveys V.S. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya ustroystvami ehlektrosnabzheniya zheleznih dorog: uchebnik* [Automated Control Systems for Power Supply Devices for Railways: Textbook]. Moscow, UMC ZDT Publ., 2003. 318 p.
18. Ovcharenko N.I. *Avtomatika ehnergosistem: uchebnik* [Automation of Power Systems: textbook]. Moscow, Publishing House MEI Univ. Publ., 2016. 476 p.
19. Tretyakov E.A. *Sposob upravleniya sistemoy ehlektrosnabzheniya zheleznih dorog* [The Method of Controlling the Power Supply System of Railways]. Patent RF, no. 2587128, 2016.
20. Russel S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod* (Artificial Intelligence: a Modern Approach). Moscow, Williams Publ., 2006. 1408 p.

Received 28 October 2018

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Черемисин, В.Т. Моделирование мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог / В.Т. Черемисин, Е.А. Третьяков, Г.Е. Головнев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 22–29. DOI: 10.14529/power180403

#### FOR CITATION

Cheremisin V.T., Tretyakov E.A., Golovnev G.E. Simulation of Multi-Agent Voltage Control in Distribution Electric Networks of Railways. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 22–29. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180403