

Научная статья  
УДК 51-7

## ДВУХУРОВНЕВАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫМИ МИКРОСЕТЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ ЗАДЕРЖКИ СВЯЗИ

Чунья Доу<sup>1</sup>, С.В. Горбачев<sup>2,\*</sup>, В.Ф. Кузин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нанкинский университет почты и телекоммуникаций, Нанкин, Китай

<sup>2</sup> Российская инженерная академия, Москва, Россия

\* E-mail: [hanuman1000@mail.ru](mailto:hanuman1000@mail.ru)

**Аннотация.** Построена двухуровневая мультиагентная система на основе распределенной согласованной структуры управления для кольцевой шины микросетей постоянного тока с электромобилями, где каждый агент управления первого уровня, связанный с распределенным энергоресурсом, предназначен для реализации локального распределенного управления, а также связан с распределенным управляющим агентом второго уровня, чтобы совместно реализовывать распределенное согласованное управление. Для обеспечения высокой устойчивости к влиянию задержек связи на производительность управления, распределенный согласованный контроллер спроектирован с использованием метода робастного управления  $H_\infty$ , зависящего от задержки связи. Обоснованность предложенной схемы управления подтверждается результатами имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** микросеть; распределенное координированное управление; двухуровневая мультиагентная система; электромобили

**Для цитирования:** Чунья Доу, Горбачев С.В., Кузин В.Ф. Двухуровневая распределенная мультиагентная система управления автомобильными микросетями постоянного тока в условиях задержки связи // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №4. С. 48–56.

Original article

## TWO-LEVEL DISTRIBUTED MULTI-AGENT CONTROL SYSTEM FOR DC MICROGRIDS WITH ELECTRIC VEHICLES UNDER COMMUNICATION DELAY

Chunxia Dou<sup>1</sup>, S.V. Gorbachev<sup>2,\*</sup>, V.F. Kuzin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, China

<sup>2</sup> Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

\* E-mail: [hanuman1000@mail.ru](mailto:hanuman1000@mail.ru)

**Abstract.** A two-level multi-agent system based on a distributed coordinated control structure for DC ring-bus microgrids with electric vehicles has been built, where each first-level control agent associated with a distributed energy resource is designed to implement local distributed control, and is also connected to a distributed coordinated control agent of the second level in order to jointly implement distributed coordinated control. To ensure high resistance to the impact of communication delays on control performance, the distributed coordinated controller is designed using the robust control method  $H_\infty$ , which depends on the communication delay. The

validity of the proposed control scheme is confirmed by the results of simulation modeling.

**Key words:** DC microgrid, distributed coordinated control, two-level multi-agent system, electric vehicles

**For citation:** Chunxia Dou, Gorbachev S.V., Kuzin V.F. Two-level distributed multi-agent control system for DC microgrids with electric vehicles under communication delay. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9. No. 4. pp. 48–56.

## Введение

Растущее использование распределенных энергетических ресурсов постоянного тока (DERs), таких как фотоэлектрические (PV) панели, топливные элементы и устройства хранения данных, стимулировало растущий интерес к микросетям постоянного тока (DC MG) [1, 2]. DC MG обладают следующими хорошо известными особенностями:

- (1) распределение мощности более эффективно, чем в микросетях переменного тока (AC MG), поскольку в DC MG отсутствует реактивная мощность;
- (2) источник питания для нагрузок постоянного тока более эффективен, чем в сетях переменного тока. Пятьдесят процентов нагрузок во всех зданиях приходится на нагрузки постоянного тока [3].

Кроме того, развитие электромобилей предполагает тенденцию к увеличению спроса на постоянный ток. Чтобы питать эти нагрузки постоянным током, микросеть переменного тока должна использовать двухступенчатую топологию преобразования: сначала AC-DC, а затем DC-DC-DC. Использование DC MG для питания этих нагрузок постоянным током позволило бы избежать ненужного этапа преобразования переменного тока в постоянный и, таким образом, может повысить общую эффективность.

Одной из основных проблем, связанных с микросетями постоянного тока, является разработка приемлемой и эффективной схемы управления для улучшения характеристик напряжения шины. До сих пор многие исследователи предлагали распределенную схему управления «peer to peer», которая означает, что каждый блок DER управляется независимо, используя только локальную информацию, например, локальное управление droop [4], [5]. Очевидно, что эту схему управления легко реализовать. Однако это может привести к большим динамическим отклонениям напряжения на шине между блоками DER.

Чтобы решить вышеуказанную проблему, многие исследователи предложили вторичные скоординированные средства управления, которые в основном подразделяются на три категории: централизованные коммуникации и контроль [6-8], централизованные коммуникации и распределенное управление [9, 10] и распределенное скоординированное управление [11-13]. Первые две схемы управления могут эффективно улучшить производительность всей системы. Однако, поскольку они зависят от глобальной информации, задержки связи и сбоев связи, существующие в системе глобальной связи, могут ухудшить надежность системы [14]. В отличие от них, третья схема полагается только на распределенную информацию от соседей, что может привести к высокой устойчивости к влиянию сбоев связи на всю функциональность управления. Однако, как и в случае с первыми двумя схемами управления, на работу третьей схемы все еще могут влиять потенциальные задержки связи, которые существуют в сети широкополосных DC MG. Следовательно, независимо от того, какая схема вторичного скоординированного управления, описанная выше, используется, необходимо учитывать влияние задержек связи. До сих пор в предыдущих работах редко учитывалась проблема временной задержки.

В данной статье исследуется метод проектирования распределенного согласованного управления на основе двухуровневой мультиагентной системы, который может улучшить характеристики напряжения шины постоянного тока микросети с задержками связи. Основные вклады этой статьи можно резюмировать следующим образом.

Представлена двухуровневая распределенная согласованная структура управления на основе мультиагентных систем. На первом уровне агент управления, связанный с DER,

предназначен для реализации локального первичного управления. На втором уровне каждый распределенный согласованный агент, связанный с агентом управления первого уровня, отвечает за синтез согласованных законов управления. Соединя взаимодействия между двухуровневыми агентами, согласованные законы управления передаются от агента второго уровня к агенту управления первого уровня, а затем объединяются с локальным распределенным контроллером для формирования распределенного согласованного контроллера с целью реализации вторичного согласованного управления напряжением шины. Стоит отметить, что согласованные законы управления синтезируются с использованием информации о состоянии, распространяемой между соседними агентами второго уровня, так что коммуникационное давление в сети будет в значительной степени снижено.

Чтобы обеспечить высокую устойчивость к влиянию задержек связи на производительность управления, распределенный координированный контроллер спроектирован с использованием зависящего от задержки метода  $H_\infty$ -робастного управления. Наконец, эффективность управления подтверждается результатами моделирования.

### Распределенная согласованная схема управления на основе мультиагентной системы

На рис.1 показан пример кольцевой шины микросети постоянного тока, где каждый блок DER питает локальную нагрузку и общую нагрузку, подключенную рядом с его шиной.

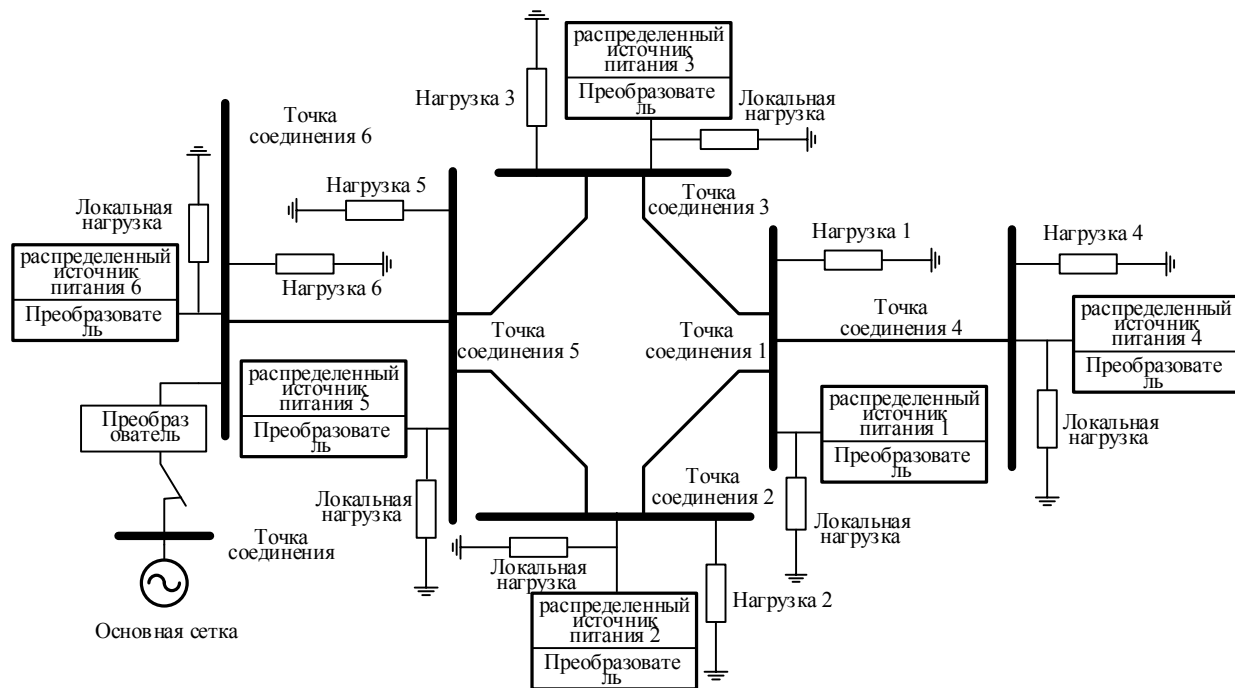


Рисунок 1 – Пример кольцевой шины микросети постоянного тока

Когда переключатель точки общей связи (PCC) между MG постоянного тока и основной сетью отключен, MG с кольцевой шиной DC работает в изолированном режиме. В этом случае предлагается реализовать распределенное согласованное управление двухуровневой мультиагентной системой. Схема распределенного согласованного управления на основе мультиагентной системы изображена на рис.2.

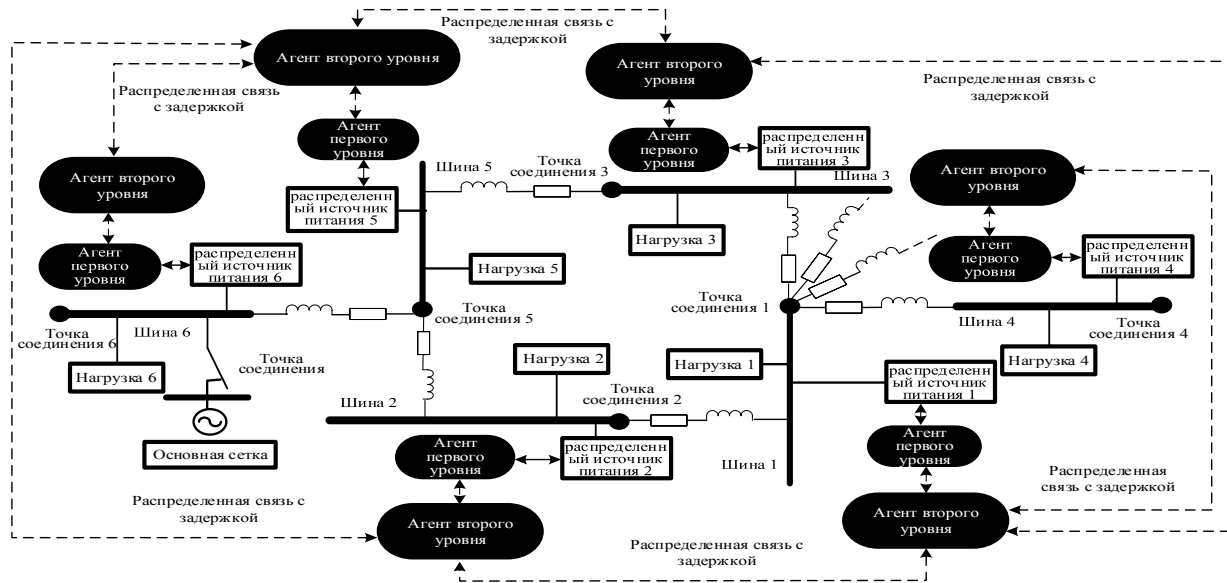


Рисунок 2 – Распределенная согласованная схема управления на основе двухуровневой мультиагентной системы

Каждый агент управления первого уровня спроектирован как гибридный агент, который состоит из реактивного слоя и совещательного слоя, как показано на рисунке 3.

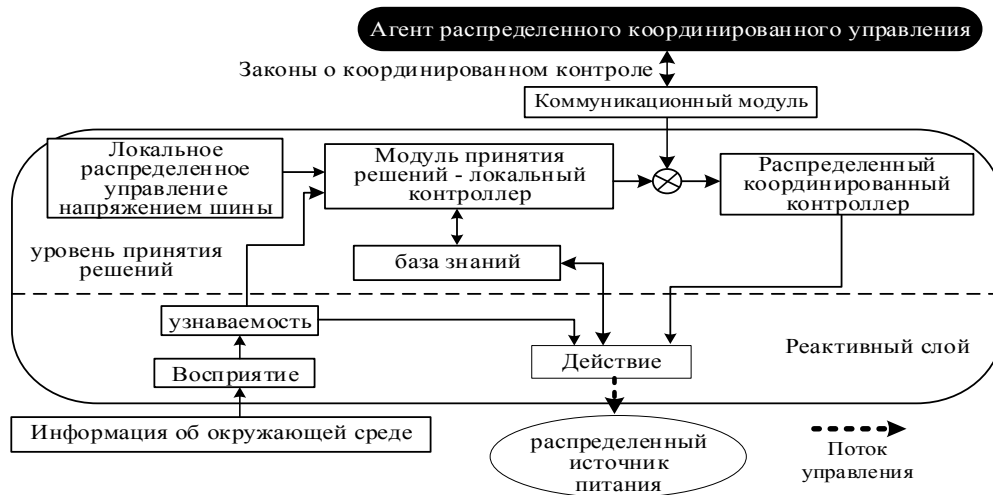


Рисунок 3 – Структура управляющего агента первого уровня

Реактивный уровень, определяемый как «распознавание, восприятие и действие», имеет приоритет для быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации, связанные с состоянием операции. Совещательный уровень, определяемый как «убеждение, желание и намерение (BDI)», обладает высоким интеллектом для управления динамическим поведением своего DER. Локальный контроль (т.е. намерение) определяется в модуле принятия решений с помощью локального знания и информации о распознавании (т.е. убеждения) и реализуется с помощью модуля действия (т.е. желания).

Каждый распределенный агент согласованного управления второго уровня спроектирован как агент BDI, как показано на рис. 4.

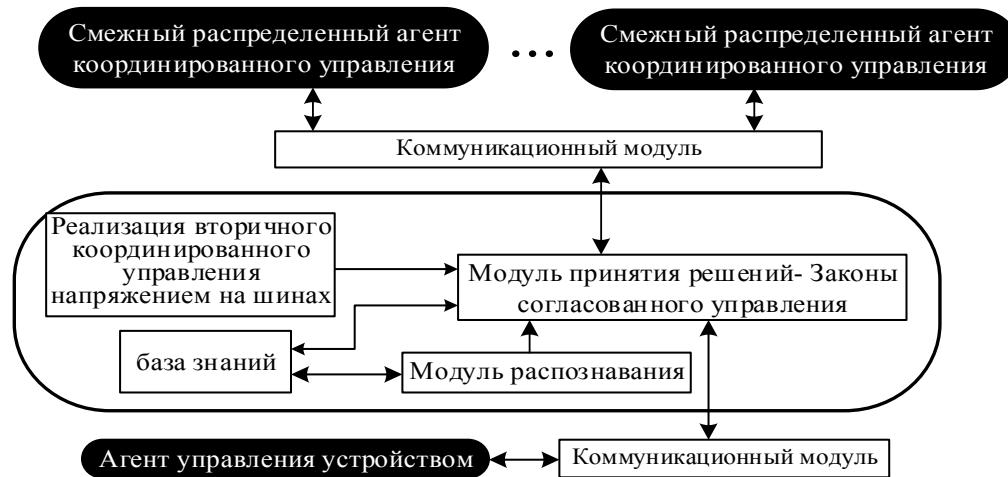


Рисунок 4 – Структура распределенного согласованного управляющего агента второго уровня

Во-первых, в модуле распознавания определяется оценочный индекс. Когда оценочный индекс превышает заданный порог, в модуле принятия решений синтезируются законы согласованного управления (т.е. намерения) с использованием информации о знаниях, а также информации о состояниях, которой обмениваются соседние агенты второго уровня (т.е. доверие). Соединяя взаимодействия между двухуровневыми агентами, законы согласованного управления передаются подключенному агенту управления первого уровня, а затем объединяются с локальным контроллером для формирования распределенного координированного управления для реализации вторичного координированного управления напряжением шины (т.е. желание).

Взаимодействие между агентами осуществляется следующим образом:

- (1) режим «ведущий-ведомый» между различными уровнями агентов;
- (2) режим «равный-равный» среди агентов того же уровня.

Первый режим означает, что на запрос от агента второго уровня должен ответить запрошенный агент первого уровня. Другими словами, агент второго уровня имеет приоритет над агентом первого уровня. Второй режим подразумевает, что агенты одного и того же уровня взаимодействуют на равных.

### Эксперименты и обсуждение

Для того, чтобы оценить эффективность предлагаемого распределенного координированного управления на основе мультиагентной системы, рассматриваются два случая.

*Случай 1:* большие изменения нагрузки.

*Случай 2:* различные временные задержки передачи.

Кроме того, предложенное распределенное координированное управление на основе мультиагентной системы сравнивается с распределенным управлением, основанным на улучшенной характеристике спада [11].

#### А. Случай 1: большие изменения нагрузки

Задержка связи принимается равной  $\tau_{12} = 200ms$ . Кроме того, при  $t=2s$  нагрузка на шину 1 увеличивается в два раза, в то же время нагрузка на шину 2 уменьшается вдвое. Два изменения напряжения приводят к значительному отклонению переходного напряжения между шиной 1 и шиной 2. В соответствии с предложенным оценочным показателем, блокам DER 1 и DER 2 необходимо осуществлять распределенное координированное управление на основе двухуровневых агентов. С использованием метода выпуклой оптимизации LMI из

набора инструментов MATLAB, можно обнаружить, что система асимптотически устойчива для любой задержки связи, удовлетворяющей  $0 \leq \bar{\tau} \leq 3.0978s$ . Для сравнения с локальным распределенным управлением, на рис. 5(a) и 5(b), во-первых, приведены характеристики управления в отношении напряжений шины 1 и шины 2 в режиме управления 1. С помощью предлагаемого режима управления 2 эффективность управления показана на рис. 5(c) и 5(d). Также это показано на рис. 5(e) и 5(f) с использованием сравниваемого распределенного управления [11].

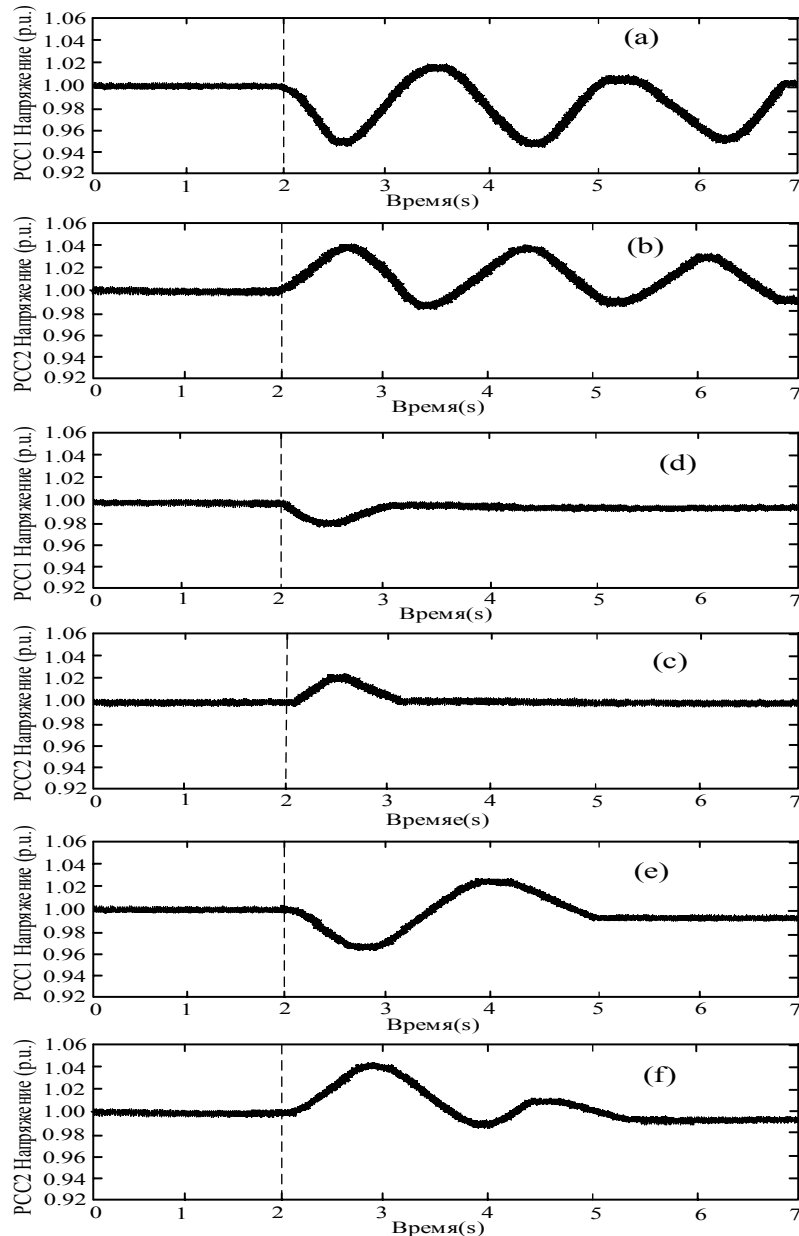


Рисунок 5 – Управляющая производительность напряжений шины в случае 1 (большие изменения нагрузки): напряжение шины 1 в режиме управления 1; (b) напряжение шины 2 в режиме управления 1; (c) напряжение шины 1 в режиме управления 2; (d) напряжение шины 2 в режиме управления 2; (e) напряжение шины 1 при распределенном управлении [11]; (f) напряжение шины 2 при распределенном управлении [11].

Из рис. 5(а) и 5(б) можно видеть, что при использовании только локального контроллера в агенте управления устройством первого уровня, без согласованных законов управления от агентов второго уровня, напряжения на двух шинах имеют большие колебания, а затем в конечном итоге не стабилизируются. Из рис. 5(с) и 5(д) можно наблюдать, что с помощью предлагаемого режима управления 2 напряжения на двух шинах демонстрируют меньшие колебания в течение периода от 2 до 3 секунд, после чего быстро восстанавливаются до желаемого значения (т.е. 1 р.у.) почти без отклонений. Рис. 5(е) и 5(ф) показывают, что при использовании сравниваемого распределенного управления [11] напряжения на двух шинах имеют большие колебания на начальном этапе изменения нагрузки, так что для их стабилизации требуется больше времени. Приведенные выше результаты моделирования показывают, что предлагаемый подход к распределенному скоординированному управлению обеспечивает наилучшую эффективность регулирования напряжения на шине при изменении нагрузки.

### **Б. Случай 2: задержка связи**

Задержка связи предполагается  $\tau_{12} = 2s$ . Изменения нагрузки в этом случае такие же, как и в случае 1. С использованием сравниваемого распределенного управления [11], эффективность управления относительно напряжения шины 1 и шины 2 показана на рис. 6(а) и 6(б). По сравнению с предыдущими результатами на рисунках 5(е) и 5(ф) с задержкой связи  $\tau_{12} = 200ms$ , напряжения двух шин на рис. 6(а) и 6(б) имеют гораздо более серьезные флуктуации, так как большая задержка связи приводит к неправильному сдвигу напряжения при улучшенном управлении падением. Рис. 6(с) и 6(д) показывают эффективность управления в предлагаемом режиме управления 2. Можно видеть, что напряжение двух шин не имеет явных изменений по сравнению с результатами, показанными на рисунках 5(с) и 5(д) при задержке связи  $\tau_{12} = 200ms$ . Причина заключается в том, что предложенный метод робастного управления может гарантировать надежную стабилизацию системы только в том случае, если задержки связи не превышают допустимую максимальную верхнюю границу.

### **Заключение**

В статье разработан подход к распределенному скоординированному управлению на основе двухуровневой мультиагентной системы для кольцевой шины микросетей постоянного тока с задержкой связи. В отличие от традиционного иерархического подхода к управлению, он не требует центрального контроллера, который зависит от глобальной информации. Управление для каждого блока DER структурировано локальным распределенным управлением в сочетании с скоординированными законами управления. Для снижения коммуникационного давления и повышения надежности синтезируются законы скоординированного управления с использованием информации, изменяемой только между соседними агентами второго уровня. Чтобы избежать задержек связи и ухудшения характеристик управления, в поле управления микросетями эффективно применяется зависящий от задержки робастный метод управления для разработки распределенного скоординированного контроллера.

Результаты моделирования показывают, что с помощью предложенного метода достигнуты лучшие характеристики по напряжению. Распределенная скоординированная схема управления на основе мультиагентной системы может быть применена к автомобильным микросетям с кольцевой шиной постоянного тока путем расширения функции управления агентами и создания дополнительных агентов в системе.

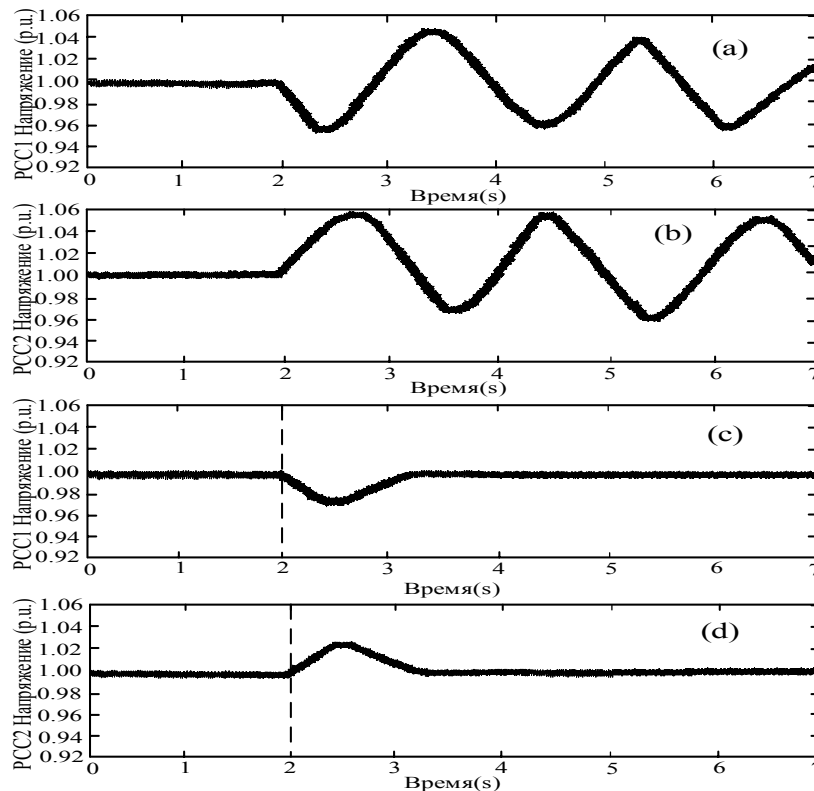


Рисунок 6 – Управляющая производительность напряжений шины в случае 2 (задержка связи): (а) напряжение шины 1 при распределенном управлении [11]; (б) напряжение шины 2 при распределенном управлении [11]; (с) напряжение шины 1 в предлагаемом режиме управления 2; (д) напряжение шины 2 в предлагаемом режиме управления 2.

Из приведенных выше результатов моделирования можно сделать вывод о том, что распределенное координированное управление на основе мультиагентных систем улучшает характеристики напряжения шины при учете изменений спроса на нагрузку и различных задержках связи.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kwasinski A. Quantitative evaluation of dc microgrids availability: Effects of system architecture and converter topology design choices // IEEE Trans on Power Electronics. 2011. Vol. 26, Iss. 3, pp. 835–851.
2. Shafiee Q., Dragicevic T., Vasquez J.C., and Guerrero J.M. Hierarchical Control for Multiple DC-Microgrids Clusters // IEEE Trans on Energy Conversion. 2014. Vol. 29, Iss. 4, pp. 922–933.
3. Elsayed A.T., Mohamed A.A., Mohammed O.A. DC microgrids and distribution systems: An overview «Electric Power Systems Research». 2015. Vol. 119, pp. 407–417.
4. Khorsandi A., Ashourloo M., Mokhtari H. A Decentralized control method for a low-voltage DC Microgrid // IEEE Trans on Energy Conversion. 2014. Vol. 29, Iss. 4, pp. 793–801.
5. Gu Y.J., Xiang X., Li W.H., He X.N. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC Microgrid with enhanced reliability and flexibility // IEEE Trans on Power Electronics. 2013. vol. 29, Iss. 9, pp. 5072-5080.



6. Guerrero J.M., Vasquez J.C., Matas J., Vicuna J. G., Castilla M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - a general approach toward standardization // IEEE Trans on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58, Iss. 1, pp. 158-172.
7. Lu X., Guerrero J.M., Sun K., Vasquez J.C., Teodorescu R., Huang L. Hierarchical control of parallel ac-dc converter interfaces for hybrid microgrids // IEEE Trans Smart Grid. 2014. Vol. 5, Iss. 2, pp. 683-692.
8. Guerrero J.M., Chiang L.P., Lee T.L., Chandorkar M. Advanced control architectures for intelligent Microgrids - Part II : Power quality, energy storage, and AC/DC Microgrids // IEEE Trans on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, Iss. 4, pp. 1263-1270.
9. Shafiee Q., Guerrero J.M., Vasquez J.C. Distributed secondary control for islanded MicroGrids - A novel approach // IEEE Trans on Power Electronics. 2014. Vol. 29, Iss. 2, pp. 1018-1031.
10. Shafiee Q., Stefanovic C., Draginevic T., Popovskii P., Vasquez J., Guerrero J.M. Robust network control scheme for distributed secondary control of islanded Microgrid // IEEE Trans on Industrial Electronics. 2014. Vol. 60, Iss.10, pp. 5363-5374.
11. Anand S., Fernandes B.G., Guerrero J.M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids // IEEE Trans on Power Electronics. 2013. Vol. 28, Iss. 4, pp. 1900-1913.
12. Bidram A., Davoudi A., Lewis F.L., Guerrero J.M. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization // IEEE Trans Power System. 2013. Vol. 28, Iss. 3, pp. 3462-3470.
13. Nasirian V., Moayedi S., Davoudi A., Lewis F.L. Distributed cooperative control for DC Microgrid // IEEE Trans on Power Electronics. 2015. Vol. 30, Iss .4, pp. 2288–2303.
14. Balarko C., Rajat M., Bikash C.P. Wide-area measurement- based stabilizing control of power system considering signal transmission delay // IEEE Trans on power system. 2004. Vol.19, Iss. 4, pp. 1971-1979.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Чунься Доу* – доктор наук, профессор, Институт передовых технологий углеродной нейтральности, Нанкинский университет почты и телекоммуникаций (210023, Китай, г. Нанкин, улица Вэньюань 9, e-mail: [cxdou@ysu.edu.cn](mailto:cxdou@ysu.edu.cn))

*Горбачев Сергей Викторович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Российская инженерная академия (125009, Россия, г. Москва, Газетный переулок, 9, стр. 4, e-mail: [hanuman1000@mail.ru](mailto:hanuman1000@mail.ru))

*Кузин Виктор Федорович* – доктор технических наук, профессор, Российская инженерная академия (125009, Россия, г. Москва, Газетный переулок, 9, стр. 4, e-mail: [vfkuzin@mail.ru](mailto:vfkuzin@mail.ru))

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Chunxia Dou* – Ph. D, Prof., Institute of Advanced Technology for Carbon, Nanjing University of Posts and Telecommunications (210023, China, Nanjing, Wenyuan Street 9, e-mail: [cxdou@ysu.edu.cn](mailto:cxdou@ysu.edu.cn))

*Gorbachev Sergey Victorovich* – Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Russian Academy of Engineering (125009, Russia, Moscow, Gazetny lane, 9, p. 4, e-mail: [hanuman1000@mail.ru](mailto:hanuman1000@mail.ru))

*Kuzin Victor Fedorovich* – Dr. Sci. (Eng), Prof., Russian Academy of Engineering (125009, Russia, Moscow, Gazetny lane, 9, p. 4, e-mail: [vfkuzin@mail.ru](mailto:vfkuzin@mail.ru))

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023, принята к публикации 29.11.2023.

The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 29.11.2023.