

УДК 004.942

# МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОСЕТЕЙ

**И.В. Бычков**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134  
E-mail: idstu@icc.ru

**А.Г. Феоктистов**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134  
E-mail: agf@icc.ru

**М.А. Чекан**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134  
E-mail: chekoopa@mail.ru

**Ключевые слова:** мультиагентная система, поведение агентов, моделирование микросетей, экономические механизмы, регулирование спроса и предложения.

**Аннотация:** Доклад посвящён проблеме интеллектуализации обработки и анализа данных в исследовании функционирования коалиции взаимосвязанных микросетей. Микросети – это современные системы энергетики с преобладающей долей экологически чистого и ресурсосберегающего оборудования. Моделирование различных аспектов организации и работы микросетей актуально для их структурной и параметрической оптимизации. Особого внимания заслуживает изучение этих аспектов при взаимодействии микросетей. При этом возникает возможность учета синергетического эффекта при распределении и потреблении электроэнергии. Предлагается подход к моделированию такого взаимодействия посредством двухуровневой иерархической игры, реализуемой с помощью мультиагентной системы. Описывается модель этой игры и структура системы, поддерживающей ее проведение.

## 1. Введение

Микросеть (англ., microgrid) представляет собой энергетическую сеть, состоящую из небольшого числа различных распределенных генераторов и накопителей энергии, а также локальных нагрузок. Управление энергопотреблением в микросетях имеет ряд преимуществ, таких как снижение потерь энергии и упрощение процесса управления. Однако требуется исследование различных аспектов организации и эксплуатации такой сети с точки зрения ее функционирования [1].

Микросеть, рассматриваемая в данном исследовании, представляет собой локальную систему энергетики (СЭ) с собственной инфраструктурой для генерации и потребления электроэнергии. Она способна работать автономно в течение определенного периода времени. Обычно микросеть может быть связана с глобальной системой энергетики, но под воздействием крупных внешних возмущений, например, стихийных бедствий, связь может быть нарушена.

Микросеть использует разнообразные источники распределенной генерации электроэнергии, включая дизельные генераторы, угольные котельные, а также возобновляемые источники, такие как солнечные батареи и ветрогенераторы, вместе с различными аккумуляторными батареями. Разнообразие источников генерации и систем хранения энергии способствует повышению энергонезависимости и устойчивости сети при воздействии крупных внешних возмущений. Кроме того, исследования микросетей, расположенных в уникальных природных зонах, таких как Байкальская природная территория (БПТ), направлены на улучшение экологической устойчивости и природосбережения.

Математическое моделирование микросети становится сложнее с учетом взаимодействия с другими подобными системами, поэтому требуется использование развитых инструментальных средств и высокопроизводительных вычислений для автоматизации исследования такой сети. Сравнительный анализ инструментальных средств автоматизации процесса изучения микросетей [2] показал, что существуют актуальные направления в этой области.

Теория игр уже несколько десятилетий успешно применяется в широком диапазоне направлений исследований [3,4], в том числе активно проводятся исследования на основе агентных игр. Конвергенция теории игр и агентного моделирования обеспечила достижение хороших результатов при исследовании современных систем энергетики, к которым относятся и микросети (см., например, [5]). Основополагающими концептами агентного моделирования микросетей являются агент и среда, в которой он функционирует. В контексте такого моделирования агенты представляют собой программные сущности, стремящиеся к достижению целей, которые обуславливаются критериями эффективности функционирования микросетей как каждой в отдельности, так и в рамках их коалиции в целом.

## 2. Иерархическая игра

Рассматриваемая задача мультиагентного моделирования функционирования коалиции микросетей (КМ) в общем случае характеризуется следующими отличительными особенностями:

- способностью обмена электроэнергией между микросетями в рамках их коалиции;
- необходимостью решения оптимизационных задач двух разных классов: балансировки спроса и предложения электроэнергии на уровне КМ; удовлетворения спроса на электроэнергию на уровне каждой микросети;
- возможностью динамического изменения состава оборудования и характеристик микросетей, входящих в КМ;
- сетевым взаимодействием агентов, представляющих микросети;
- возникновением разных ролей агентов в зависимости от текущей ситуации и решаемых ими задач – ролей центрального агента (ЦА), подчиненного агента (ПА) и вспомогательного агента (ВА);
- наличием у ПА неопределенности относительно информации о других ПА;
- неантагонистическим характером взаимодействия ЦА и ПА.

МАС для решения задачи моделирования функционирования КМ включает следующих агентов:

- $a$  – агент, представляющий КМ и играющий роль ЦА;
- $a_i^m$  – агент, представляющий автономную СЭ (микросеть)  $i$ -го инфраструктурного объекта и играющий роль ПА,  $i = \overline{1, n_m}$ ;

- $a_{i,\eta}^g$  – агент, представляющий  $j$ -й источник генерации энергии автономной СЭ  $i$ -го инфраструктурного объекта и играющий роль ВА,  $\eta = \overline{1, n_i^g}$ ;
- $a_{i,\mu}^c$  – агент, отражающий потребности  $k$ -го потребителя электроэнергии на  $i$ -м инфраструктурном объекте и играющий роль ВА,  $\mu = \overline{1, n_i^c}$ ;
- $a^i$  – информационный агент, играющий роль ВА и предоставляющий агентам ретроспективные и текущие метеорологические данные, прогнозы погоды, а также хранящий и обрабатывающий историю торгов и репутационные характеристики агентов  $a_i^m$ .

С точки зрения игры ее структура имеет веерный иерархический характер: один игрок первого уровня, представленный агентом  $a$ , и несколько игроков второго уровня, представленных агентами  $a_1^m, a_2^m, \dots, a_{n_m}^m$ . ВА  $a^i$ ,  $a_{i,\eta}^g$  и  $a_{i,\mu}^c$  обеспечивают агентов-игроков информацией о моделируемых объектах и окружающей среде их функционирования. Агент-игрок взаимодействует со средой согласно правилам игры, которые могут иметь различную сложность в контексте решаемых задач. При этом поведение и конкретные действия агента формируются с учетом свойств среды.

Как правило, в иерархической игре применяется фиксированная последовательность ходов [3, 6]. Вначале делает ход игрок верхнего уровня, затем свои действия выполняет игрок следующего уровня и т. д. Ход с последнего уровня передается на предыдущий уровень. Поэтому в рамках взаимодействия игроков иерархическая игра представляет собой адекватный механизм моделирования управления организационными системами [7], к которым безусловно относятся микросети.

Агенты  $a_i^m$  являются антагонистическими сущностями между собой. Каждый агент  $a_i^m$  решает конкретную задачу оптимизации, чтобы решить, сколько электроэнергии он готов расходовать, покупать или продавать в период времени  $T$ . В рамках игры агент  $a$  может применять штрафы и бонусы, чтобы стимулировать агентов  $a_i^m$  на действия, способствующие достижению баланса электроэнергии для КМ с минимальными затратами. Агент  $a$  и агенты  $a_i^m$  взаимодействуют с информационным агентом  $a^i$ . Агент  $a^i$  использует БД, содержащую следующую информацию: историю торгов; многомерный временной ряд метеорологических данных; многомерный временной ряд метеорологических прогнозов; многомерный временной ряд репутации агентов  $a_i^m$ .

Глобальными целями МАС являются:

- стимулирование повышения уровня автономности микросети за счет задействования внутренних резервов и мощностей производства энергии, включая использование возобновляемых источников энергии, на основе экономических механизмов (ЭМ) регулирования спроса и предложения энергии внутри микросети;
- обеспечение условий для взаимоподдержки между субъектами микросети в случае необходимости (возникновения экстремальных условий и т. п.).

На рис. 1 приведена структура МАС, реализующей данную схему взаимодействия. Она включает пять типов агентов, таких как агенты, представляющие микросети, агенты источников генерации электроэнергии, агенты потребителей электроэнергии, агенты мониторинга окружающей среды и агенты ресурсов информационно-вычислительной среды (ИВС), используемых для приема и обработки данных, а также высокопроизводительных вычислений. Первые три типа агентов напрямую соответствуют  $a_i^m$ ,  $a_i^g$ ,  $a_i^c$  в вышеописанной модели. Агенты мониторинга окружающей среды и агенты ресурсов ИВС реализуют функциональность информационного агента в распределенном формате.

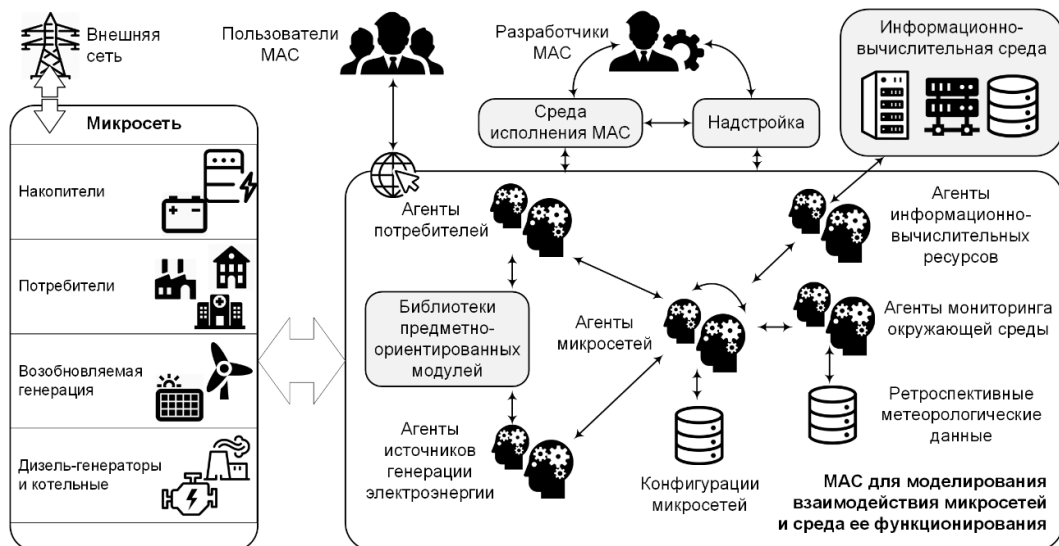


Рис. 1. Структура МАС, моделирующей функционирование КМ.

Игрок первого уровня сообщает игрокам второго уровня состояние КМ, бонусы и штрафы. Затем передает ход на второй уровень. Игроки второго уровня запрашивают ВА  $a_{i,\eta}^g$  и  $a_{i,\mu}^c$  о возможности генерации и потребности в электроэнергии, а также информацию о стоимости генерации электроэнергии, объеме вредных выбросов и т. п. ВА  $a_{i,\eta}^g$  и  $a_{i,\mu}^c$  оценивают возможности генерации и потребности в электроэнергии с учетом категории возмущения  $d$ . На основе этой информации и выбранной стратегии игроки второго уровня определяют возможности генерации и потребность в электроэнергии, формируют свои ставки и передают их игроку первого уровня. Игрок первого уровня формирует виртуальное сообщество (ВС) игроков второго уровня, имеющих возможности генерации и потребность в электроэнергии. Если среди участников ВС достигнут баланс электроэнергии, то игра завершается. Совокупные ресурсы игроков-производителей распределяются пропорционально запросам игроков-потребителей. Для каждого агента  $a_i^m$  определяется его репутация, исходя из временного ряда данных о его вкладе в достижение баланса. Если возможности генерации превышают потребность в электроэнергии или являются недостаточными, то игрок первого уровня идентифицирует состояние КМ, корректирует бонусы и штрафы, формирует свою ставку и начинает новую итерацию игры. Если за определенное число раундов игры баланс не достигнут, то игра завершается. Игрок первого уровня отправляет сообщение администратору КМ о том, что для текущих конфигураций микросетей с используемым ЭМ наблюдается дисбаланс, требуются внесение изменений в конфигурации микросетей или применение другого ЭМ.

### 3. Реализация

Проведен сравнительный анализ существующих инструментов мультиагентного моделирования [8]. Для реализации описанной МАС выбран Java Agent DEvelopment Framework (JADE) [9] с открытой лицензией, который предоставляет как среду для развертывания мультиагентной платформы в целом, так и дополнительные инструменты для реализации агентов в виде программных модулей.

Для снижения накладных расходов на разработку агентов и настройку среды используется специальная надстройка, описанная в [10]. Данная надстройка обеспечивает реализацию модели поведения агентов с использованием конечного

управляющего автомата (КУА), определение условий корректности переходов между состояниями-действиями КУА, формируемыми с использованием прикладных модулей для решения оптимизационных и информационных задач, и формирование ЭМ.

ЭК состоит из следующих основных объектов: параметров ЭМ; ограничений на значения параметров; процедур, определенных над множеством параметров и ставящих в соответствие подмножеству исходных параметров подмножество целевых параметров, значения которых требуется вычислить; модулей, представляющих собой программную реализацию алгоритмов выполнения процедур; продукций, определяющих условия выполнения процедур; ставок игроков; стратегий формирования ставок.

## 4. Заключение

В докладе представлен подход к моделированию функционирования коалиции микросетей на основе веерной иерархической игры, выполняемой в мультиагентной среде. Данная модель ориентирована на исследование живучести автономных систем энергетики инфраструктурных объектов БПТ. При этом модель применима и в МАС другого назначения, например, системы мониторинга информационно вычислительной инфраструктуры центра коллективного пользования. Дальнейшая работа связана с исследованием ЭМ энергообмена в коалиции микросетей.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9).

## Список литературы

1. Jirdehi M.A., Tabar V.S., Ghassemzadeh S., Tohidi S. Different aspects of microgrid management: A comprehensive review // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 30. P. 101457. DOI: 10.1016/j.est.2020.101457.
2. Чекан М.А. Сравнительный анализ программного обеспечения для автоматизации процесса моделирования микросетей // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 9. С. 33-38. DOI: 10.17513/snt.39305.
3. Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. М.: Радио и связь, 1982. 144 с.
4. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
5. Guyot P., Honiden S. Agent-based participatory simulations: Merging multi-agent systems and role-playing games // *Journal of artificial societies and social simulation*. 2006. Vol. 9, No. 4. P. 8. <https://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/4/8.html> (accessed on January 01, 2024).
6. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. 327 с.
7. Губко М.В., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Элементы теории игр. [http://www.mtas.ru/uploads/file\\_45.pdf](http://www.mtas.ru/uploads/file_45.pdf) (дата обращения 15.01.2024).
8. Чекан М.А. Анализ применения средств создания мультиагентных систем в задаче моделирования взаимодействия микросетей // *Материалы международной конференции «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 5-7 декабря 2022 г.)*. Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2022. С. 153-154.
9. Bellifemine F., Poggi A., Rimassa G. JADE: A FIPA2000 compliant agent development environment // *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (AGENTS'01)*. ACM, 2001. P. 216-217. DOI: 10.1145/375735.376120.
10. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Чекан М.А. Модель поведения агента микросети // *Вычислительные технологии*. 2023. Т. 28, № 6. С. 108-117. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.6.010.