

УДК 621.311.003

Е.В. ЗАПАРА, аспирант НТУ «ХПИ»

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНКУРЕНТНОГО ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Наведена інформація про реформування структури оптового ринку електроенергії (ОРЕ) України. Приведений огляд підходів до моделювання функціонування конкурентних оптових ринків електроенергії та наведені принципи побудови мультиагентної імітаційної моделі ОРЕ України.

Представлена інформація о реформировании структуры оптового рынка электроэнергии (ОРЭ) Украины. Сделан обзор подходов к моделированию функционирования конкурентных оптовых рынков электроэнергии и сформулированы принципы мультиагентной модели ОРЭ Украины.

The information about Ukrainian wholesale electricity market structure reform has been presented. The survey of competitions electricity wholesale markets modeling methods has been done and the principles of multy-agent simulation model of Ukrainian wholesale electricity market have been defined.

Введение. Важным вопросом в настоящее время является совершенствование энергетических рынков Украины и внедрение в соответствии с мировой практикой эффективных механизмов конкуренции и государственного регулирования. В 2002 г. Кабмином Украины была принята Концепция функционирования и развития оптового рынка электрической энергии (ОРЭ) Украины [1], которая предусматривает постепенный переход к модели двусторонних договоров с балансирующим рынком (ДДБР) - наиболее широко применяемой в мире в последнее время. Цель реформы - сделать рынок привлекательнее для инвесторов, что будет способствовать привлечению инвестиций в отрасль и снижению цен за счет большей конкуренции. Разработку рекомендаций по реформированию ОРЭ Украины осуществляет консультационный консорциум в составе: КЕМА, ЕСА, Norton

Rose, Mycroft, DIW и Трансэнергokonсалтинг. Внедрение новой модели рынка планируется осуществить поэтапно в течении 2009 – 2014 гг.

Постановка проблемы. Модель ДДБР состоит из нескольких субрынков, которые охватывают различные временные интервалы: рынок долгосрочных договоров, рынок «на сутки вперед» и балансирующий рынок. Участники рынка свободны в выборе между комбинацией долго-, средне- и краткосрочных договоров и покупкой или продажей электроэнергии на балансирующем рынке [2].

Сложность этой модели в том, что объемы электроэнергии, отмеченные в контрактах между участниками рынка, должны быть согласованы с работой системы в реальном времени. Поэтому устанавливаются детально разработанные и обязательные правила предоставления информации об объемах электрической энергии в контрактах Оператору системы. На балансирующем рынке для участников создаются ценовые стимулы для приближения объемов электрической энергии по контрактам покупки-продажи к фактическим. Для этого устанавливаются две разные цены в зависимости от того покупается или продается электроэнергия.

Модель ДДБР предоставляет широкие возможности участникам рынка электроэнергии по оптимизации своей деятельности. Кроме возможности варьировать договорные объемы электроэнергии на разных субрынках и управлять своими ценовыми рисками с помощью долгосрочных двухсторонних контрактов, участники ОРЭ могут, например, объединяться в балансирующие группы для оплаты только за сальдованные небалансы или участвовать в работе добровольной биржи электроэнергии для более гибкого уточнения своих договорных позиций.

Новая модель рынка требует более сложной информационной системы управления рынком и диспетчеризации энергосистемы, чем существующие. В странах с подобной ДДБР архитектурой ОРЭ накоплен достаточно большой опыт управления функционированием энергосистемы в конкурентных условиях. Очевидна необходимость использования успешных решений и наработок, которые используются в других странах с аналогичной моделью энергорынка, но необходима их адаптация к особенностям украинской энергосистемы.

Специфика предметной области требует использования модели объекта управления из-за того, что невозможно исследовать особенности функционирования новой архитектуры рынка в существующих условиях на реальной энергосистеме. Также важными являются вопросы моделирования поведения участников ОРЭ, эффективности правил функционирования рынка и системы управления, тестирования информационной технологии управления ДДБР, обучения персонала. Эти вопросы можно успешно решать с помощью имитационной модели ОРЭ.

Цели статьи. Важной задачей при создании информационной системы управления функционированием ОРЭ является построение адекватной

имитационной модели энергосистемы и динамики рынка. Статья посвящена обзору методов моделирования оптовых рынков электроэнергии и рассмотрению принципов такого моделирования для ОРЭ Украины.

Анализ литературных источников по вопросам моделирования конкурентных рынков электроэнергии показал, что за последние 15 лет проведен ряд успешных исследований в университетах Европы и США по этой теме [3]. Удачно зарекомендовал себя подход агентного моделирования [4], представляющий моделируемую систему в виде совокупности интеллектуальных агентов, которые могут самостоятельно реагировать на внешние воздействия со стороны окружающей среды и других агентов и осуществлять ответные действия. Общее состояние системы, при таком подходе, является результатом взаимодействия всех агентов и внешней среды. Этот подход к моделированию включает также оптимизационные и балансовые модели при описании функционирования разных типов агентов-участников рынка. Далее будет рассматриваться только агентное моделирование ОРЭ, как наиболее эффективное средство для решения исследовательских задач в этой предметной области.

Можно выделить несколько основных направлений в моделировании энергорынков [3], направленных на анализ возможностей конкретной структуры рынка, изучение поведения участников рынка, рассмотрение вопросов развития инфраструктуры и принятия решений участниками рынка в долгосрочной перспективе.

Первое направление моделирования включает ряд исследований структуры рынка, определения её эффективности для конкретных энергосистем. Здесь применяется комбинация моделей рынка и электросети для учета технических ограничений по передаче электроэнергии, рассматриваются различные механизмы клиринга и рыночных стратегий. Можно выделить проекты Marketecture [5] и AMES [6], как наиболее полные исследования этого направления.

При моделировании поведения агентов используются такие подходы, как обучение с поддержкой [7] и генетические алгоритмы обучения [8]. Рассматриваются вопросы функционирования генерирующих компаний и потребителей при заключении двухсторонних контрактов, участия в аукционах и балансирующем рынке.

Вопросы развития энергетической инфраструктуры рассматриваются на комплексных моделях энергетической отрасли, которые, кроме моделей электроэнергетических рынков, включают модели рынков нефтепродуктов и природного газа. Примерами таких проектов являются SMART II+ [9] и EMCAS [10].

Создан целый ряд коммерческих систем от различных производителей программного обеспечения для моделирования оптовых рынков в энергосистемах различных государств: Gridview (разработчик - ABB); LMPSIM (Shaw PTI), MAPS (General Electric), PROMOD VI (Siemens AG),

PROSYM (Henwood), UPLAN (LCG), Electricity Market Module of National Energy Modelling System – NEMS (DOE/EIA).

Проекты по моделированию конкурентных рынков электроэнергии охватывают широкий спектр проблем в этой области - от вопросов оптимальных потоков электроэнергии до ценообразования и стратегии поведения участников рынка. Но для моделирования реформируемого ОПЭ Украины невозможно применить уже готовое решение. Причинами этого являются специфика правил функционирования ДДБР и диспетчеризации, особенности других информационных систем в работе энергосистемы (АСКУЭ, системы управления рынком и других), с которыми необходимо взаимодействие модели, широкий спектр задач для исследования конкурентной модели рынка и др. Но для моделирования украинского энергорынка все-таки возможно адаптировать уже существующие подходы зарубежных ученых.

Принципы построения агентной имитационной модели динамики функционирования ОПЭ Украины. Модель бизнес-процесса функционирования рынка «на сутки вперед» и функционирования в реальном времени может быть представлена в нотации BPMN [11] следующим образом (рис. 1). Это описание удобно использовать для построения правил взаимодействия агентов, моделирующих участников рынка.

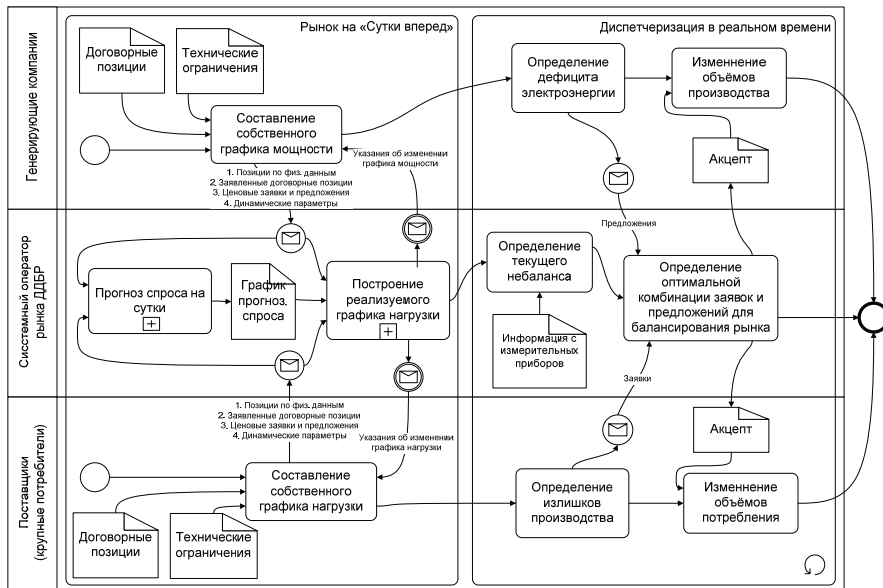


Рис. 1. Описание процесса функционирования балансирующего рынка

Состояние модели динамики функционирования ОПЭ изменяется в дискретные моменты времени согласно правилам функционирования ДДБР.

Для украинского ОПЭ необходимо выделить различные типы агентов для моделирования системного оператора, коммерческого оператора, генерирующих компаний, поставщиков, квалифицированных потребителей. Им соответствуют следующие типы агентов: агент-диспетчер, финансовый агент, агент-генератор, агент-поставщик, агент-потребитель.

Агент-диспетчер, являясь ключевым агентом модели, осуществляет регистрацию заявок и предложений агентов генераторов и поставщиков, составляет общий прогноз потребления в системе, решает задачу построения реализуемого графика нагрузок, контролирует текущий небаланс и выдает команды для балансирования системы. Главным критерием функционирования является минимизация затрат на балансирование производства и потребления электроэнергии в энергосистеме.

Финансовый агент осуществляет распределение финансовых потоков в энергосистеме согласно установленным правилам, осуществляет расчет цен.

Агенты-генераторы заключают прямые договора на поставку электроэнергии с агентами-потребителями, составляют собственный график производства на плановый период, участвуют в балансировании системы путем подачи заявок и предложений на изменение уровня производства. Критерии – прибыль и надежность.

Агенты-поставщики заключают прямые договора на поставку электроэнергии с агентами-генераторами, составляют собственный график потребления на плановый период, участвуют в балансировании системы путем подачи заявок и предложений по изменению уровня потребления. Главный критерий – уменьшение затрат для обеспечения внутреннего спроса.

В предлагаемой модели адаптивными агентами являются агент-диспетчер, агенты-генераторы и агенты-потребители. Для обучения системного оператора целесообразно применять комбинацию генетического алгоритма обучения и обучения с поддержкой, а для агентов-генераторов и агентов-потребителей достаточно обучения с поддержкой [7].

Например, каждый адаптивный агент может выбирать свое действие из некоторого множества допустимых действий M . Если n -й агент выбрал в момент времени t действие k_n и получил при этом выгоду $R(x)$, то он изменяет свое предпочтение в выборе j -го действия согласно следующей формуле:

$$s_{nj}(t+1) = (1-\phi) \cdot s_{nj}(t) + \begin{cases} R(x) \cdot (1-\varepsilon), & j = k \\ s_{nj}(t) \cdot \frac{\varepsilon}{M-1}, & j \neq k \end{cases} \quad (1)$$

где $s_{nj}(t)$ - предпочтение в выборе j -го действия в момент t ;

ϕ, ϵ - параметры, отображающие степень обновления предпочтений и степень разнообразия выбираемых действий, соответственно.

Агенты выбирают k -е действие со следующей вероятностью:

$$p_{nk}(t+1) = \frac{s_{nk}(t)}{\sum_{j=1}^M s_{nj}(t)} \quad (2)$$

Таким образом, вероятность выбора действия, которое принесло большую выгоду, увеличивается.

Основные взаимодействия между агентами отображают правила функционирования балансирующего рынка. Агент-диспетчер запрашивает информацию о графиках нагрузки участников рынка, их заявках и предложениях для участия в балансирующем рынке. Далее он составляет прогноз спроса на следующие сутки и строит реализуемый график нагрузки, выдавая участникам рынка команды по коррекции уровней потребления и производства. Осуществляет контроль баланса при функционировании системы в реальном времени и осуществляет коррекцию дисбаланса. По окончании суток настает этап фактических расчетов, в котором финансовый агент проводит расчеты между остальными агентами; генераторы и потребители пересчитывают собственные предпочтения.

Удобным инструментом для реализации агентной модели является библиотека RePast .NET [12], которая содержит такие важные компоненты, как параллельный дискретный планировщик по времени, среду для визуализации модели и адаптивные средства поведения.

Выводы. Главными задачами создания имитационной модели конкурентного ОРЭ Украины являются изучение динамики функционирования рынка, исследование возможностей участников рынка по максимизации собственной прибыли, изучение механизмов диспетчеризации, рассмотрение вопросов ценообразования на балансирующем рынке. Модель может применяться для апробации и тестирования алгоритмического и программного обеспечения информационной системы управления функционированием ОРЭ.

Возможно расширение модели для изучения взаимодействия между энергосистемами смежных государств, учета аварийных ситуаций в энергосистеме (например, функционирование в режиме "плановых" отключений электроэнергии).

Список литературы: 1. Концепція функціонування та розвитку оптового ринку електричної енергії України – Постанова кабінету міністрів України від 16 листопада 2002 р. № 1789. 2. Левінгтон І. Головні принципи архітектури нового ринку та переходу до нього // <http://www.nerc.gov.ua/document/74567/29.09.08-Lewington.zip>. 3. F. Sensfu, M. Ragwitz, D. Most. Agent-based simulation of electricity markets – A literature review // Working Paper Sustainability and Innovation №5, 2007. 4. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в

арсенале аналитика // Exponenta Pro. Математика в приложениях. - 2004. № 3/4. С. 38-47. 5. Atkins K., C. Barret, C. Homa. Marketecture: A simulation based framework for studying experimental deregulated power markets. 6. Koesrindartoto D., Tesfatsion L. 'Testing the reliability of FERC'S Wholesale Power Market Platform: An agent-based computational economics approach.' // In Proceedings of USAEE/IAEE North American Conference, Washington D.C. July 8-10. 7. I. Erev, A. Roth. Predicting How People Play Games: Reinforcement Learning in Experimental Games with Unique, Mixed Strategy Equilibria. // American Economic Review. – 1998. № 88, p. 848–881. 8. Ortiz-Boyer D., Hervas-Martinez C., Garcia-Pedrajas N.A. Crossover operator for evolutionary algorithms based on population features. // Journal of Artificial Intelligence Research, №24 - 2005, p. 1-48. 9. North M. 'Multi-Agent Social and Organizational Modeling of Electric Power and Natural Gas Markets'. // Computational & Mathematical Organization Theory, vol. 7, 2001, p. 331–337. 10. Conzelmann G., M. North., G. Boyd. Agent-Based Power Market Modeling: Simulating strategic market behavior using an agent-based modeling approach. // 6th IAEE European Energy Conference, Zurich, 2004. 11. BPMN Specification. // <http://www.bpmn.org/Documents/OMGFinalAdoptedBPMN1-0Spec06-02-01.pdf>. 12. J. Vos, M. North. Repast .NET. // Proceedings of the Agent 2004 Conference on Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence, Chicago, 2004.

Поступила в редакцию 19.03.09