УДК 330.4: 339.13

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ РЫНКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ РЫНОЧНОЙ СИЛЫ НА КОНЪЮНКТУРУ ЭНЕРГОРЫНКА

© 2013

Е.М. Лисин, кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономики промышленности и организации предприятий
Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва (Россия)
В. Стриелковски, Ph.D, младший профессор Экономического института
Карлов университет в Праге, Прага (Чешская Республика)
А.Н. Григорьева, студент кафедры экономики промышленности и организации предприятий
Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва (Россия)
Ю.А. Анисимова, кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры «Финансы и кредит»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (России)

Ключевые слова: оптовый рынок электроэнергии; олигополия; агентское моделирования; рыночная власть; генерирование; стратегическое поведение.

Аннотация: В статье рассматриваются классические и современные подходы к моделированию рынков электроэнергии, основанных на применении моделей олигополии и агентно-ориентированных подходов моделирования, применительно к разработке комплексной имитационной модели оптового рынка электроэнергии. Внимание уделяется исследованию влияния рыночной силы генерирующих компаний на конъюнктуру рынка. Результаты исследования рассматриваются применительно к платформе оптового рынка электроэнергии WPMP (Wholesale Power Market Platform, США в 2003 г.) как модель для всех американских оптовых рынков электроэнергии.

1. Анализ моделей олигополии

Привлекательность создания комплексных моделей для рынков электроэнергии способствует применению вычислительных подходов для моделирования технологической инфраструктуры и стратегии поведения участников рынка. В моделированной среде участники рынка могут неоднократно взаимодействовать друг с другом и таким образом воспроизводить реалистичную и динамическую систему. В работах российских исследователей Е. Лисина и А. Григорьевой [1] представлена модель оптовых рынков электроэнергии Европейского Союза и России.

Современные подходы исследования оптового рынка электроэнергии строятся на основе разработки математических моделей энергосистемы. Базовыми моделями являются оптимизационные модели развития энергосистемы с одним критерием оптимальности (например, минимизации расходов на производство электроэнергии). Реструктуризация энергосистемы и децентрализация структуры управления энергосистемой привело к появлению на рынке субъектов, которые самостоятельно принимают решения относительно объемов производства и ввода мощностей. В сложившейся ситуации оптимизация развития энергосистемы требует решения задач со многими целевыми функциями. Показателен международный опыт создания многофункциональных моделей, разработанных как олигополистические модели энергосистем в США и ЕС в рамках национальных исследовательских проектов. В основе предложенных моделей лежит математический аппарат теории игр, предполагающий рациональное поведение участников рынка.

В настоящее время все математические модели олигополии делятся на две большие группы. Первая группа моделей включает в себя олигополии без сговора, в которых каждая фирма, ориентируясь на действия конкурентов, самостоятельно максимизирует прибыль, управляя собственной ценой и объемом поставок продукции. Вторая группа – олигополии со сговором, когда фирмы пытаются в целях повышения собственной прибыли найти кооперативное решение.

Модели олигополии без сговора определяются видом параметра, который использует компания при принятии решения. Если принимается решение об объеме выпуска продукции, то модель представляет собой количественную олигополию, если о цене – ценовая олигополия. Модели количественной олигополии наиболее адаптированы к ситуации, когда компаниям после принятия операционного плана трудно изменить производственные мощности и объем поставок. Подобная ситуации характерна для энергетической отрасли.

Модели без сговора описывают, так называемую, «мгновенную» конкуренцию: компании в единый момент времени устанавливают цены, получают прибыль и уходят с рынка. Практический опыт демонстрирует, что постоянное взаимодействия участников приводит к необходимости повторно решать игровую задачу с относительно устойчивом множестве фирм. В своей работе Э. Чемберлин «Теория монополистической конкуренции» [2] рассматривает, что в условиях стандартизированной олигополии (производящей однородный продукт), компании признают свою взаимозависимость и будут поддерживать монопольную цену без явного сговора. Если каждая компания будет принимать рациональные решения и стремиться максимизировать прибыль, то при наличии небольшого числа конкурентов их действия будут оказывать существенное влияние друг на друга, что приведет к сильному противодействию. Поскольку снижение цены, предпринятое любым их конкурентов, приведет к снижению цен остальных компаний и уменьшению собственной прибыли предприятия и, несмотря на то, что продавцы полностью независимы, равновесный результат будет таким же, как если бы между ними существовало монополистическое соглашение.

Описанные выше обстоятельства привели к активному развитию и применению на практике моделей олигополии со сговором. В данных моделях выделяется компания, являющаяся ценовым лидером (потенциальный победитель в ценовой войне). Лидер оказывает

влияние на уровень рыночной цены и принимает на себя ответственность за приспособление цены к изменяющимся условиям рынка. На рынке, кроме лидера, значительное число конкурентных компаний предлагает товар. Они принимают цену, установленную лидером, и определяют оптимальный объем производства из условия максимизации прибыли.

При разработке моделей олигополии для оптового рынка электроэнергии необходимо учитывать существующие ограничения для входа новых участников на данный рынок. Условия выхода на рынок новых участников могут в немалой степени повлиять на финансовые результаты других компаний и равновесный результат. Для изучения данного вопроса применяются модели олигополии с барьерами входа.

Под входным барьером понимается наличие препятствия выхода на рынок для новых компаний, что позволяет действующим на рынке продавцам получать сверхприбыли без угрозы появления новых конкурентов. Такие барьеры возникают как по причине регулирования рынка государственными структурами (справедливо для рынка электроэнергии), так и из-за коллективного противодействия со стороны продавцов, находящихся на рынке.

В работе «Barriers to New Competition» Дж. Бэйн [3] ввел термин «барьеры входа-выхода» и выделил ряд рыночных ограничений на вход новых конкурентов. Тем самым, определил барьеры как условия входа, при которых действующая фирма может устанавливать цену выше минимума средних издержек производства и реализации без привлечения в данную отрасль новых фирм. Для рынка электроэнергии будут справедливы такие ограничения как абсолютные преимущества в издержках и положительный эффект масштаба за счет более низких издержек на единицу продукции (доля рынка новых конкурентов будет слишком мала чтобы обеспечить требуемый уровень доходности). Абсолютные преимущества в издержках дают возможность установления цены на уровне ниже минимума средних издержек компаний-последователей, что может полностью заблокировать вход конкурентов.

Рассмотрим возможные ситуации на рынке:

– блокированный вход. Компании конкурируют не обращая на вход новичков, но при этом угроза входа фактически отсутствует по причине не привлекательности рынка для новых продавцов;
– ссдерживаемый вход. Компании модифицируют свое поведение, чтобы эффективно мешать появлению новых конкурентов;
– предоставляемый вход. Каждая компания в отдельности находит более выгодным позволить новичкам осуществить вход на рынок, нежели возводить дорогостоящие входные барьеры.

Вопросы математического моделирования рынков нашли свое отражение в работах основоположников математического направления в экономической науке – А. Курно (1838), Ж. Бертрана (1883), Ф. И. Эджворт (1897) и др.

В таблице 1 представлена классификация наиболее распространенных математических моделей олигополии в хронологическом порядке.

2. Агентный подход к моделированию энергорынка

В последние десятилетия проведенные исследования зарубежными учеными Д. Канеман Д., А. Тверски, Р. Талер, А. Рубинштейн, К. Камерер, Дж. Лоуэнстайн опровергают один из основных применяемых подходов в игровых моделях (в частности, в моделях олигополии) – подход рациональности поведения рыночных агентов. Фундаментальными трудами в данной области принято считать исследования Дэниэла Канемана [4] и Амоса Тверски [5], которые показали, что в действительности лица, принимающие решения плохо справляются с задачами логического анализа, зато достаточно успешны в быстром распознавании шаблонов поведения. Довольно часто интерпретация информации основана собственном опыте и интуитивных решениях. Возникающий человеческий фактор приводит к наличию иррациональных особенностей при принятии решения, что не позволяет описывать поведение участников рынка в виде задачи оптимизации. Таким образом, в действительности участники рынка не стремятся максимизировать полезность при принятии решений. Данных условиях задача принятия решения направлена на поиск наиболее удовлетворительного решения, которое даст средний результат. При этом основной задачей моделирования становится не поиск оптимального экономического равновесия, а попытка описать и понять природу, лежащую в основе социально-экономических явлений. Это привело к созданию нового динамического подхода к моделированию, получившее название агентно-ориентированного моделирования.

Агентное моделирование является инструментом, предназначенным для разработки сложных адаптивных систем. В основе модели лежит набор основных элементов, взаимодействие которых определяет обобщенное поведение системы. Возникает необходимость корректно отобразить механизм поведения и взаимодействия элементов системы – так называемых «агентов».

Одно из наиболее полных определений агентов приводят Ч. Макал и М. Норт в работе «Tutorial on agent-based modeling and simulation» [6], согласно которому агент должен обладать следующими характеристиками:

– агент является «идентифицируемым», т.е. представляет собой конечного индивидуума с набором определенных характеристик и правил, определяющих его поведение и правила принятия решений. Агент автономен и может независимо действовать и принимать решения по взаимодействию с другими агентами;
– агент находится в определенной среде, позволяющей ему взаимодействовать с другими агентами. Агент может коммуницировать с другими (контактировать при определенных условиях и отвечать на контакт);
– агент имеет определенную цель (но не обязательно целью является максимизация блага, как принято считать в классической экономике), влияющую на его поведение.

В современных агентских моделях также можно выделить способность агента к самообучению: агент ги-

Таблица 1. *Классификация моделей олигополии*

Название модели	Год	Класс модели	Основные положения
Модель Курно	1838	Без сговора, количественная	1. На рынке действует фиксированное число компаний (более одной), выпускающих продукцию одного наименования. 2. Вход на рынок новых фирм и выход из него отсутствуют. 3. Фирмы обладают рыночной властью. 4. Фирмы максимизируют свою прибыль и действуют без кооперации. 5. Каждая фирма, принимая свое решение, считает выпуск остальных фирм заданным параметром (константой). 6. Функции издержек фирм также предполагаются известными всем участникам. 7. Функция спроса представляет собой убывающую функцию от цены товара. 8. Цена товара задается как равновесная цена отраслевого рынка (величина отраслевого предложения равна величине спроса при одной и той же цене).
Модель Бертрана	1883	Без сговора, ценовая	1. На рынке действует фиксированное число компаний (более одной), выпускающих одну продукцию. 2. Отсутствует кооперация между фирмами. 3. Предельные издержки фирм одинаковы и постоянны. 4. Функция спроса линейна. 5. Фирмы конкурируют, устанавливая цену на свою продукцию, и выбирают ее независимо и одновременно. 6. После выбора цены фирмы производят объем товара, равный величине спроса на их продукцию. 7. Если цены различны, потребители предъявляют спрос на более дешевый товар. 8. Если цены одинаковы, приобретаются товары всех фирм в равных долях. 8. Модель статична (рассматривается принятие решения в единичный момент времени). 9. Фирмы могут легко изменять объем выпуска продукции, однако изменить цену после выбора очень трудно или невозможно.
Модель Эджворта	1897	Без сговора, ценовая	1. Является версией модели Бертрана, которая показывает модель ценовой конкуренции фирм с ограниченными размерами выпуска продукции. 2. Объем выпуска каждой фирмы ограничен величиной, составляющей половину того объема выпуска отрасли, на который предъявляется спрос при цене, равной предельным издержкам. 3. Отсутствует статичное равновесие (нескончаемая ценовая война). 4. Если одна из фирм назначит более высокую цену, часть покупателей все равно будут приобретать у нее товар
Модель Форхаймера	1908 (1930 - Zeuthen)	Основанная на сговоре	1. Есть фирма-лидер и фирмы конкурентного окружения (аутсайдеры). 3. Фирма-лидер предпринимает попытку занять определенную долю на рынке. 4. Издержки фирмы-лидера ниже издержек фирм-аутсайдеров. 5. Количество фирм-аутсайдеров фиксировано. 6. Аутсайдеры производят равный объем продукции и ориентируются на цену лидера. 7. Фирма имеет информацию о спросе на продукцию и предложениях фирм-конкурентов. 8. Стратегия поведения фирмы-лидера: монопольная реализация продукции; стать ценовым лидером и сохранить конкурентный

			сектор. В последнем случае она предоставляет конкурентам возможность выпускать свой объем продукции по установленной цене. Это позволяет ей, с одной стороны, формировать цены ниже конкурентных, но все же выше собственных предельных издержек, а, с другой, для некоторых из фирм-аутсайдеров, у кого издержки близкие к издержкам доминирующей фирмы, предоставляет возможность даже получать дополнительные доходы, за счет «ценового зонтика».
Модель Штакельберга	1934	Без сговора, количественная	1. Поведение фирм описывается динамической игрой с полной совершенной информацией (что отличает её от модели Курно, в которой поведение фирм моделируется с помощью статической игры). 2. Отрасль производит однородный товар. Покупатель при выборе продавца ориентируется только на цену. 3. Фирмы устанавливают количество производимой продукции, а цена на неё определяется исходя из спроса. 4. Имеется лидирующая фирма, которая первой устанавливает объём выпуска продукции, а остальные фирмы ориентируются в своих расчетах на нее.
Модель Бэйна	1956	С барьерами входа	1. Выбор стратегии поведения осуществляется на основе сравнения дисконтированной ценности потока прибыли, которую получит закрепившаяся на рынке фирма, препятствуя входу потенциальных конкурентов (при этом угроза входа конкурентов будет незначительна), и потока прибыли, который фирма получит, максимизируя прибыль в краткосрочном периоде (при этом вход конкурентов вероятен). 2. Выбор между двумя стратегиями будет зависеть также от дисконтирующего множителя, отражающего предпочтения фирмы по отношению к будущим и текущим суммам денег, а также от уровня хозяйственного риска. 3. Чем ниже дисконтирующий множитель и выше уровень хозяйственного риска, тем предпочтительнее оказывается стратегия максимизировать сегодняшнюю прибыль, не обращая внимания на угрозу потенциального входа.

бок и обладает способностью самообучения с течением времени на основе собственного опыта. В ряде случаев агент может даже изменять правила поведения на основе полученного опыта.

В целом можно выделить три стадии построения агенто-ориентированной модели:

– определение границ модели: какое явление (событие) моделируется, каковы его рамки?
– определение поведения (взаимодействия) агентов: разработка модели поведения (принятия) решений агентом и его взаимодействия с остальными агентами;
– разработка и апробация модели, проведение анализа чувствительности.

Практически неограниченные возможности по программированию агентов дают возможность исследователю создавать при необходимости очень сложные модели и в деталях отражать процесс принятия решений экономическими агентами.

Для энергетической отрасли одним из наиболее перспективных направлений применения агентного подхода является использование его при разработке модели оптового рынка электроэнергии. Так, летом 2000 г. калифорнийский кризис оптового рынка электроэнергии показал, что может случиться, когда плохо разработанный рыночный механизм реализован без надлежащего тестирования. В статье «The trouble with electricity markets: Understanding California's restructuring disaster» [7] приводятся доводы о том, что отчасти кризис в Калифорнии произошел из-за неучтенного в модельных расчетах стратегического поведения участников рынка, приведшего к нарушению конструктивных особенностей рынка. После калифорнийского кризиса многие исследователи в энергетике доказывали необходимость в совмещении структурного рынка электроэнергии с экономическим анализом стимулов участников рынка при разработке модели развития оптового рынка электроэнергии.

В апреле 2003 г. Федеральная энергетическая комиссия предложила платформу оптового рынка электроэнергии Wholesale Power Market Platform (WPMP) как модель для всех американских оптовых энергетических рынков [8]. Данная модель предполагает интегрированную, а не разрозненную форму рынка. Она реко-

мендует выделение Независимых системных операторов ISOs (Independent System Operators) и Региональных передающих компаний RTOs (Regional Transmission Organizations), которые будут использовать предельные издержки для определения цены электроэнергии в месте ее производства или подключения к сети. Варианты этой модели были реализованы на площадках в Новой Англии (ISO-NE), Нью-Йорке (NYISO), Средне-Атлантических штатах (PJM), на Среднем Западе (MISO) и Калифорнии (CAISO). В настоящее время ISO/RTO управляют более чем 50% генерирующих мощностей в США.

Из-за сложности модели WPMP чрезвычайно трудно проводить экономические и физические исследования надежности системы стандартными статистическими и аналитическими методами (рис. 1). Востребованность новых подходов к моделированию и анализу рынков электроэнергии привело к дальнейшему развитию агентно-ориентированных моделей.

В настоящее время существует множество агентно-ориентированных моделей, позволяющих исследовать экономические процессы рынков электроэнергии, например, модель EMCAS, разработанная исследователями из Аргоннской национальной лаборатории [9]. Кроме того, такие исследователи, как Боуэр и Бунн (Bower, Bunn 2001), Николайсен (Nicolaisen and etc., 2001), Вейт (Veit and etc., 2004) использовали агентно-ориентированные модели для изучения важных аспектов реструктуризации энергетических рынков. [10]

3. Агентно-ориентированная среда моделирования AMES

Специально для исследования динамической эффективности (как экономическая система использует имеющиеся ресурсы через определенный промежуток времени) и надежности модели WPMP американскими учеными Юндцы Сан (Junjie Sun) и Ли Тесфатсен (Leigh Tesfatsion) из экономического подразделения Университета штата Айова (Iowa State University) была разработана вычислительная модель организации оптового энергетического рынка в соответствии с основными особенностями WPMP и с воспроизведением реально существующих передающих сетей. Данная система получила название Agent-based Modeling of Electricity Systems (AMES).

AMES является первой некоммерческой системой с открытым кодом для разработки и проведения вычислительных исследований модели рынка WPMP [11]. Основные элементы рынка WPMP, включенные в модель AMES представлены в табл. 2.

Для обеспечения эмпирической достоверности размещения заявок участниками рынка в модели торговой системы AMES предлагается поддержка совместного итерационного моделирования. Текущий совместный процесс изучения рынка электроэнергии включает следующие повторяющиеся стадии анализа:

- полевые исследования и сбор данных;
- обсуждение сценария и ролевые игры;
- разработка агентно-ориентированной модели;
- интенсивные вычислительные эксперименты (расчет модели).

Одним из преимуществ модели AMES является воспроизведение системы самообучения трейдеров энергорынка, которая основывается на результатах экспериментов многоагентных игр Рота и Ерева (Roth A., Erev I.) [12]. Применяемые обучающие алгоритмы позволяют генерациям выбрать наилучшую методику формирования заявок на поставку электроэнергии, которые они ежедневно подают системному оператору AMES для участия на WPMP рынке на сутки вперед. Результаты тестовых экспериментов показывают, что генерации со временем учатся создавать неявный сговор и предоставляют завышенные предельные издержки, тем самым значительно влияя на стоимость электроэнергии в узлах модели.

В настоящее время модель AMES используется для изучения среднесрочной эффективности оптовых энергетических рынков, принявших модель WPMP. В частности, авторами проводится исследование, в какой степени данная модель способна поддерживать эффективное, прибыльное и устойчивое функционирование существующих объектов генерации и передачи в течение длительного времени, несмотря на попытки некоторых участников рынка получить преимущество за счет реализации стратегий рыночной силы (физического и финансового изъятия ценовых заявок) на усовершенствованной тестовой модели пятиузловой сети электропередачи, широко используемой в исследовательских целях независимыми системными операторами ISO-NE и PJM (Рис. 2).

В тоже время моделям AMES свойственны все преимущества и недостатки агентного моделирования. Они представлены в таблице 3.

Резюмируя вышесказанное, перечислим основные возможности вычислительной среды AMES на современном этапе развития:

- имеется возможность разработки и испытания моделей от 2 до 500 узлов ценообразования;
- доступно проведение тестирования структуры и правил поведения рыночных агентов;
- есть возможность проведения модельных расчетов во времени с условием самообучения энерготрейдеров;
- имеются инструменты для проведения экспериментов на исследование чувствительности модели к изменению рыночных факторов, что дает возможность эмпирического и качественного понимания происходящих процессов на оптовом рынке электроэнергии;
- позволяет выявлять причины наблюдаемых закономерностей, отслеживать взаимосвязь нормативной базы, структуры энергорынка и инвестиционной политики, формировать и проверять рыночные теории;

4. Анализ влияния рыночной силы генерирующих компаний на конъюнктуру энергорынка

На оптовом рынке электроэнергии генерирующие компании могут применить ряд стратегических решений, в основе которых лежит рыночная сила предприятия. Рыночная сила генерирующей компании заключается в ее способности влиять на цену предложения и условия реализации электроэнергии на рынке без реакции со стороны конкурентов.

Рис. 1. *Сложность экономических процессов на оптовом рынке электроэнергии*

Таблица 2. *Основные элементы рынка WPMP для модели AMES*

Время	В основе оптового рынка электрической энергии AMES лежит гибкая система передачи переменного тока. Функционирование рынка осуществляется в течение заданной последовательности дней *Dmax*, где каждый день *D* состоит из 24 часовой последовательности H = 00, 01, . . ., 23.
Участники	Оптовый рынок электрической энергии AMES включает в себя ISO, продавцов и покупателей электроэнергии: Гарантирующих поставщиков Load-Serving Entities (LSEs) и Генерирующих компаний (Генераторов), распределяющих электроэнергию по узлам передающей сети (ЛЭП).
Структура рынка	Независимый системный оператор AMES ежедневно осуществляет функцию передающей сети в рамках двухуровневой системы, состоящей из рынка реального времени и рынка на сутки вперед и разделенной на узлы передачи для определения локальной предельной цены
Прием заявок, определение цены	В течение обеденного времени каждого дня *D* независимый системный оператор AMES определяет обязательства и предельные локальные цены для рынка на сутки вперед для дня *D+1* на основе заявок предложения Генераторов и заявок спроса Гарантирующих поставщиков (форвардные финансовые контракты), поданных в период от 00 до 11 часов дня *D*.
График нагрузки (обязательств)	В конце каждого дня *D* независимый системный оператор AMES формирует и публикует график обязательств Генераторов и Гарантирующих поставщиков и формирует финансовые контракты на основе *D+1* дня для Гарантирующего поставщика.
Регулирование отклонений от плана	Все отклонения, которые возникают в течении дня *D+1* между реальными условиями и финансовыми контрактами на день вперед, заключенными в конце дня *D*, должны быть урегулированы на балансирующем рынке для дня *D+1* в режиме реального времени.
Регулирование перегрузок передающей сети	Перегрузка передающей сети на рынке на сутки вперед регулируется через подключение перегруженных компонентов к Гарантирующему поставщику.

Выделим следующие стратегии поведения генерирующих компаний на основе применения рыночной силы [13, 14]:

– финансовое изъятие (увеличение цены) – формирование заявок на поставку электроэнергии по более высокой цене (в частности выше предельных издержек выработки электроэнергии). При преобладании на рынке спроса (неэластичности спроса) это должно привести к росту равновесной рыночной цены, а значит и потенциального дохода генераций;
– физическое изъятие (снижение объема) – подача заявок на поставку электроэнергии с сокращенным объемом в сравнении с тем, который может быть выработан на генерирующем оборудовании предприятия. Это приводит к изъятию определенного количества мощности с рынка, а значит также к росту равновесной рыночной цены;
– физическое изъятие при помощи свободных двусторонних договоров. Заключаются свободные двусторонние договоры, с помощью которых изымается часть «дешевого» объема. При росте потребления электроэнергии это приводит к увеличению равновесной рыночной цены.

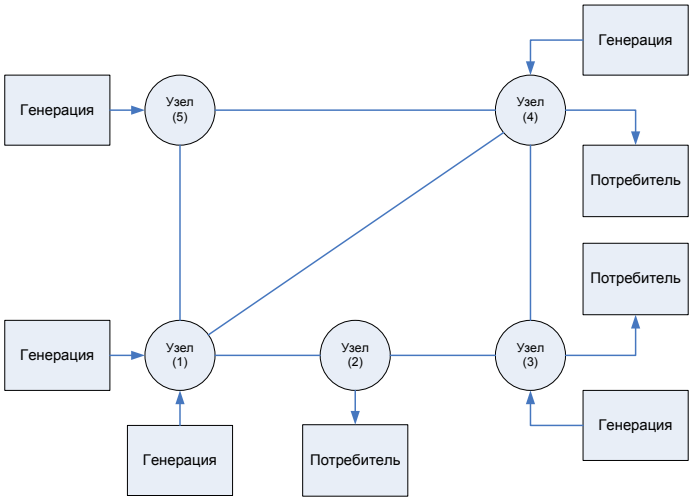

Рис. 2. *Модель пятиузловой передающей сети.*

Таблица 3. *Преимущества и недостатки агентного моделирования*

Преимущества	**Недостатки**
Обеспечивает эмпирическую проверку модели, после чего допущения аналитического подхода (упрощения, не заслуживающие доверия) больше не являются проблемой.	Необходимо проводить интенсивные вычислительные эксперименты с соответствующими параметрическими диапазонами для достижения устойчивых выводов.
Позволяет проводить систематическое экспериментальное исследование сложных экономических процессов.	Результатом экспериментов часто является распределение, а не конкретное значение.
Поощряются творческие эксперименты.	Творческое моделирование (вместо использования уже существующих структур) может потребовать значительных затрат времени и сил, в том числе для приобретения навыков программирования.
Исследователи могут оценить интересные гипотезы собственного изобретения с немедленной обратной связью. При этом не требуется разработка оригинальных программных решений.	Могут возникнуть затруднения с тем, чтобы результаты отражали интересующие аспекты исследуемой проблемы. Также достаточно сложны особенности реализации программной среды.

Далее будем рассматривать одну из стратегий применения рыночной силы генерирующей компанией, а именно стратегию финансового изъятия. На рисунке 3 отражено изменение кривой предложения при данном сценарии.

Определив ценообразующие заявки одной из генераций в течение суток и подняв их стоимость на следующий ценовой уровень, получим следующее графическое представление экономического эффекта от применения стратегии финансового изъятия (рис. 4).

Возникает вопрос, возможно ли разработать наилучшую стратегию (стратегическую инновацию) на основе метода финансового изъятия, обеспечивающую максимальный доход генерации на каждый час суток. Если заявка генерации согласно прогнозу является ценообразующей, то увеличение ее стоимости выше следующего ценового уровня приводит к тому, что полностью или частично объем заявки не принимается рынком. Генерация теряет прибыль на данной заявке. Но при этом ценообразующей заявкой станет заявка с более высоким уровнем цены, что приведет к росту равновесной цены, а значит и прибыли генерации от продажи электроэнергии от оставшихся принятых рынком заявок. Фактически возникает оптимизационная задача. Необходимо найти такой новый ценовой уровень заявки, чтобы обеспечить выполнение условия максимизации дохода генерации.

Предлагается следующий пошаговый алгоритм решения оптимизационной задачи:

1. Рассматривается заявка $i = k - 1$ генерации. Стоимость заявки поднимается на следующий ценовой уровень.
2. Строится новая кривая предложения. Определяется равновесная рыночная цена на данный час суток.
3. Рассчитываются отрицательная и положительная составляющие дохода генерации на данный час.
4. Определяется часовой доход генерации и сопоставляется с доходом при маржинальной стратегии. Фиксируется наибольший доход и наилучшая стратегия формирования заявок.
5. Стоимость заявки $i = k - 1$ повышается на следующий ценовой уровень.
6. Проверяется условие, сравнялась ли стоимость заявки i со стоимостью самой дорогой заявки в торговой системе. Если НЕТ, то операции 1-5 повторяются.

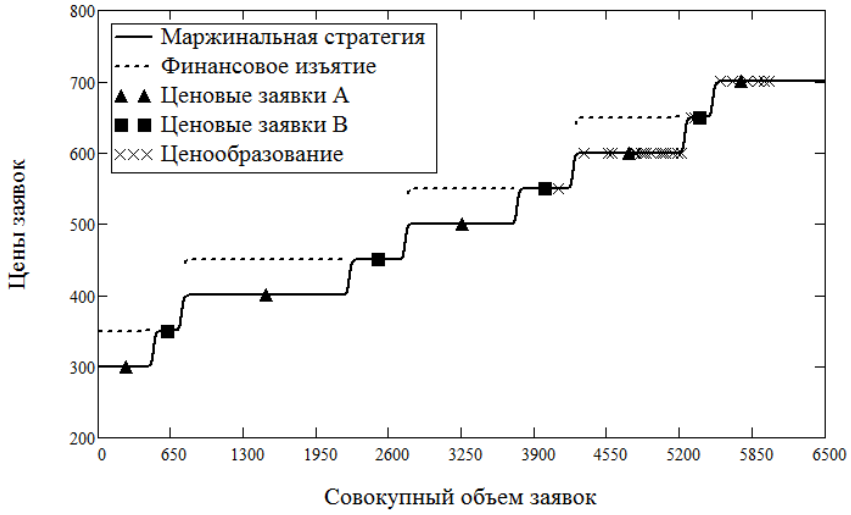

Рис. 3. *Изменение кривой предложения при переходе на стратегию финансового изъятия*

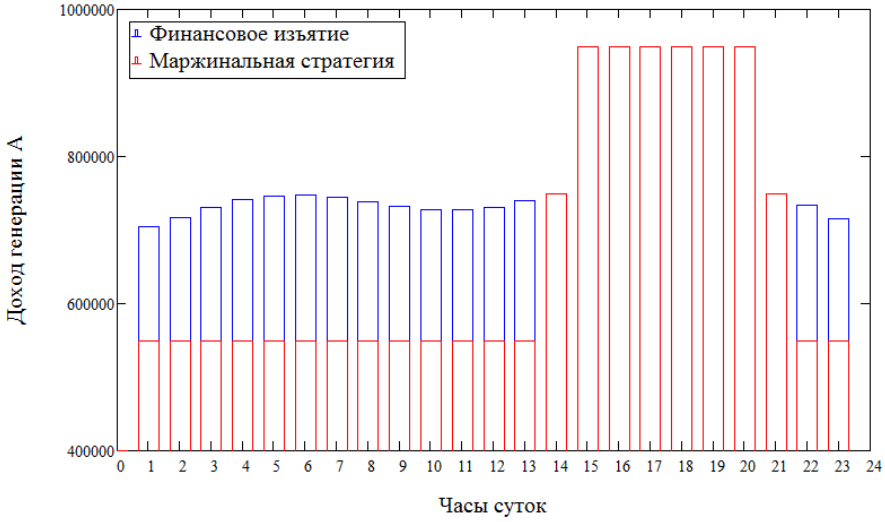

Рис. 4. *График почасового дохода генерации при маржинальной стратегии и стратегии финансового изъятия*

1. Если ДА – переходим к рассмотрению следующей более дешевой заявки $i = k - 2$.
2. Для заявки $i = k - 2$ выполняются операции 1-6. По аналогии рассматривается следующая более дешевая заявка, пока не будут проанализированы все заявки генерации.
3. После рассмотрения всех заявок генерации на данный час суток, аналитического анализа кривых предложения и определения наилучшей стратегии на данный час, которой соответствует максимально возможный часовой доход, переходим к расчету максимального дохода и определения наилучшей стратегии на следующий час. Повторяем шаги 1-7.

В итоге после выполнения алгоритма получим наилучшие стратегии формирования заявок соответствующие наибольшему доходу, который можно получить на каждый час суток генерация (рис. 5).

Как видно из графика стратегическая инновация дает наилучший результат, особенно в сравнении с традиционной маржинальной стратегией. При этом на каждый час суток необходимо определять наилучшую стратегию по формированию заявок. Данная стратегия может существенно менять вид кривой предложения. На рисунке 6 в качестве примера приведено сопоставление кривых предложения, образованных согласно маржинальной и наилучшей стратегий на определенный час суток.

Заключение

Последние работы в области разработки моделей оптового рынка электроэнергии показывают, что основное направление исследований связано с изучением поведения участников оптового рынка электроэнергии. В действительности участники рынка не стремятся максимизировать полезность при принятии решений, скорее задача принятия решения направлена на поиск наиболее удовлетворительного решения, которое даст средний результат.

Понимание данного факта привело к созданию новых динамических моделей рынка электроэнергии, в

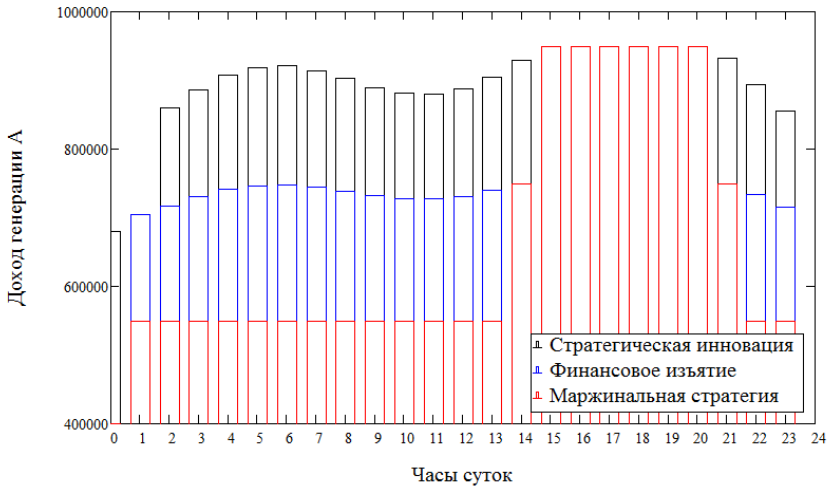

Рис. 5. *График почасового дохода генерации при стратегической инновации, финансового изъятия и маржинальной стратегии*

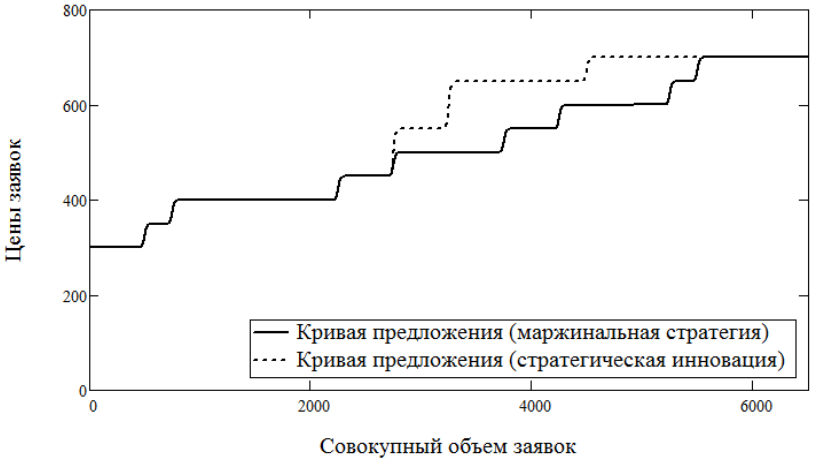

Рис. 6. *Сравнение вида кривых предложения при маржинальной стратеги и стратегической инновации*

основе которых лежит новая методология, базирующаяся на агентном моделировании. При этом модель рынка электроэнергии формируется из взаимодействия множества рыночных агентов, каждый из которых обладает определенными особенностями поведения.

Особое внимание заслуживают программно-вычислительные модели с открытым исходным кодом. К таким моделям относится проект AMES экономического подразделения Iowa State University, специально созданный для исследования динамической эффективности и надежности модели энергорынка WPMP. AMES является первой подобной некоммерческой системой с открытым кодом.

Одна из особо значимых проблем, решаемых в рамках агентно-ориентированных моделей, является изучение вопроса влияния рыночной силы генерации на конъюнктуру энергорынка, а также поиск наилучшей поведенческой стратегии энергокомпании. Рыночная сила генерирующей компании заключается в ее способности влиять на цену предложения и условия реализации электроэнергии на рынке без реакции со стороны конкурентов. Рассматривалась ситуация, когда в основе рынка электроэнергии лежит торговая площадка почасовых контрактов на физическую поставку электроэнергии, реализуемых на сутки вперед с помощью двустороннего аукциона. Такой механизм функционирования рынка справедлив для большинства мировых рынков электроэнергии.

В ходе работы с системой AMES был составлен ряд вычислительных сценариев, основанных на описании механизмов финансового изъятия заявок из торговой системы. Исследование данных сценариев показало, что подобные механизмы применения рыночной силы позволяют существенно увеличить доход генерации в сравнении с принятой маржинальной стратегией ценообразования. Результатом исследования стало предложение авторами пошагового алгоритма по разработке наилучшей стратегии поведения генерирующей компании на рынке электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Lisin E., Grigoryeva A. (2012). Generators' strategic behaviour research based on the agent approach to the power market modelling. – Czech Journal of Social Sciences, Business and Economics, Vol. 1, Issue 1, pp. 75-81

2. Chamberlin E. (1933). The Theory of Monopolistic Competition. – Harvard University Press.
3. Bain J. (1956). Barriers to New Competition. – Harvard University Press.
4. Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (1982). Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases. – New York: Cambridge University Press.
5. Kahneman, D., & Tversky, A. (Eds.). (2000). Choices, values and frames. – New York: Cambridge University Press.
6. Macal C., North M. (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Center for Complex Adaptive Systems Simulation (CAS). Argonne National Laboratory.
7. Borenstein S., (2002), The trouble with electricity markets: Understanding California's restructuring disaster, in Journal of Economic Perspective, Vol. 16, № 1.
8. Federal energy regulatory commission White Paper, (April 28, 2003), Wholesale Power Market Platform
9. Michael North, Guenter Conzelmann, Vladimir Koritarov, Charles Macal, Prakash Thimmapuram, Thomas Veselka. 2002 American Power Conference. E-laboratories: agent-based modeling of electricity markets. April 15-17, 2002 Chicago, IL, USA
10. Tesfatsion, Leigh (2007a). ACE Research Area: Restructured Electricity Markets, Website available at http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/aelect.htm
11. Tesfatsion, Leigh (2007c). The AMES Market Package (Java): A Free Open-Source Test Bed for the Agent-based Modeling of Electricity Systems, Website available at: http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/AMESMarketHome.htm
12. Roth A., Erev I. (1995). Learning in Extensive-Form Games: Experimental Data and Simple Dynamic Models in the Intermediate Term // Games and Economic Behavior.
13. Е. М. Лисин. Разработка стратегических инноваций генерирующих компаний на основе применения модели финансового на рынке электроэнергии. Сборник VI-го Международного школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение: теория и практика» - М.: Издательский дом МЭИ. – 2012, с.-399-406.
14. Stoft S., (2002). Power system economics: designing markets for electricity, in Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Press.

MODERN APPROACHES TO MODELLING ELECTRICITY MARKETS AND RESEARCH OF INFLUENCE OF MARKET FORCES THE SITUATION ON ENERGY MARKET

© 2013

E.M. Lisin, candidate of economic sciences,
associate professor of the department of economy of Industry and organization of enterprises
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow (Russian Federation)
W. Strielkowski, Ph.D., associate professor at Charles University, Prague, Institute of Economic Studies, Faculty of Social Sciences
Charles University in Prague, Czech Republic
A.N. Grigoryeva, a student of the department of economy of Industry and organization of enterprises
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow (Russian Federation)
I.A. Anisimova, candidate of economic sciences**,** senior lecturer of the department «Finance and Credit»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: wholesale power market; agent-based modeling; market power; generator; strategic behavior.

Annotation: The article discusses classical and modern approaches to the modeling of markets based on the use of models of oligopoly and agent-oriented modeling techniques. Attention is paid to the influence of market power generating companies to the market conditions. Results of the study are considered in relation to the wholesale electricity market platform WPMP (Wholesale Power Market Platform, USA in 2003) as a template for all of American wholesale electricity markets.