

*А.Г. Коваленко, Т.П. Рубцова**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В данной работе предложена математическая модель поиска равновесия на двухстороннем аукционе оптового рынка электроэнергии. Рассмотрено понимание оптового рынка электроэнергии в терминах рассредоточенных рынков и предлагается применение методов теории рассредоточенных рынков для поиска равновесия на исследуемом рынке. Использование методов поиска равновесия на основе поузловой увязки является эффективным при решении задач в сетевой постановке с большим количеством узлов, к которым относится задача поиска равновесия оптового рынка электроэнергии. Применимость таких методов рассмотрена в конкретных исследованиях.

Одной из важнейших задач экономики является задача нахождения равновесия. На сегодняшний момент одним из приоритетных направлений является поиск равновесных цен на аукционах, в частности, поиск равновесных цен на оптовых рынках электроэнергии.

Оптовые рынки начали появляться сравнительно недавно с конца XX в. в результате процессов реструктуризации электроэнергетики всего мира. В России оптовый рынок начал функционировать с конца 2003 г. Здесь торговля электроэнергией осуществляется в секторе свободной торговли, основываясь на принципах организации централизованного двухстороннего аукциона. Специфика аукциона электроэнергии заключается в необходимости решения сложных задач оптимизации, которые должны учитывать сетевую структуру энергосистемы и потоки между ее узлами, а также потери при транспортировке электроэнергии, ограничения пропускной способности энергосистемы.

Рассмотрим оптовый рынок электроэнергии. Рассматриваемый рынок включает фиксированное конечное число производителей, которые неоднородны по производственным мощностям и неубывающим предельным издержкам производства, а потребители не играют какой-либо активной роли, их поведение характеризуется функцией спроса, которая, вообще говоря, общеиз-

* © Коваленко А.Г., Рубцова Т.П., 2007

Коваленко Алексей Гаврилович, Рубцова Татьяна Павловна – кафедра математических методов и информационных технологий в экономике Самарского государственного университета.

вестна. В таких рынках используется двухсторонний аукцион закрытого типа, где каждый участник назначает заявку в виде ступенчатой функции, а рыночная цена определяется из условия равенства спроса и фактического предложения.

На оптовом рынке электроэнергии возникают новые субъекты:

- независимый системный оператор (НСО), организация, осуществляющая централизованное управление технологическими режимами работы объектов электроэнергетики;

- транспортно-сетевые компании, основным видом которых является предоставление сетевых услуг по транспортировке электроэнергии с помощью сетевых комплексов среднего и низкого напряжения;

- рынок краткосрочных контрактов, который включает в себя перечень субрынков: рынок «на сутки вперед», балансирующий рынок (рынок электроэнергии, предназначенный для компенсации формирующихся отклонений фактических объемов поставок от объемов, определенных на рынке «на сутки вперед», представляет собой внутричасовой аукцион), вспомогательный рынок и форвардный рынок.

Переход к оптовому рынку в России происходит по узловой модели взаимоотношений между участниками рынка. Здесь российские компании будут самостоятельно определять объемы поставок энергии при различных ценах, а итоговые цены будут определяться таким образом, чтобы спрос и предложение энергии совпали. Заявка со стороны предложения будет являться просто предложением поставить электроэнергию по цене равной или выше заявленной цены, а заявка со стороны спроса будет являться предложением приобрести электроэнергию по цене равной или ниже заявленной цены.

При этом НСО не занимается оптимизацией загрузки, а выстраивание оптимального плана предложения электроэнергии находится в компетенции энергокомпаний. Расчет по сделкам происходит по рыночной равновесной цене на каждом субрынке отдельно, поэтому продавец электроэнергии может отклоняться от своего плана поставки на рынке «на сутки вперед», торгуя разницей, например, на рынке «на час вперед». Такое упрощение скрывает сложность ситуации. На рынке «на сутки вперед» цена для каждого часа поставки на следующий день определяется независимо от других. В расчет не берется межвременное ограничение энергосистемы. Подобным же образом пространственные факторы, такие как местонахождение генерации, требуемые системным оператором для надежности системы, не учитываются на организованном рынке; системный оператор обеспечивает надежность системы благодаря возможности потребовать необходимые мощности с помощью долгосрочных контрактов.

Ограничения на передачу электроэнергии не учитываются при первоначальном определении рыночной цены. Проблема возможности перегрузки сетей решается с помощью выбора среди предложенных корректирующих лотов

на балансирующем рынке, управляемом системным оператором. НСО компенсирует издержки управления в условиях межзональных ограничений в реальном времени, используя дополнительные заявки на повышение и снижение поставок энергии по уведомлению [1]. При первоначальном определении цены также не учитываются дополнительные услуги, предоставляемые НСО. Он соединяет отдельные рынки с целью оказания дополнительных услуг (в основном по обеспечению резервами), хотя у каждого рынка остается право обеспечивать резерв самостоятельно. Из этого следует, что устройство данных рынков приводит к их изолированности. Рынки «на сутки вперед» по причине существования ограничений на передачу электроэнергии по сетям координируются между собой отдельно с помощью СО путем подведения итогов на прочих рынках.

Основной задачей оптового рынка является обеспечение баланса производства и потребления электроэнергии ЭЭС за счет ее выработки в объеме фактического спроса в каждый момент времени.

В литературе по проблеме поиска равновесия на оптовом рынке существуют несколько направлений. По первому разрабатываются методы вычисления конкурентного равновесия на основе моделей сетевых рынков, эти методы используются на практике для расчета исхода аукциона оптового рынка. При этом предполагается, что заявки участников соответствуют фактическим издержкам производства, хотя эмпирические исследования показывают, что производители для поднятия рыночных цен часто подают заявки, не соответствующие истинным расходам. При таком подходе невозможно оценить ожидаемое отклонение рыночной цены от исхода по Вальрасу и соответствующее уменьшение общественного благосостояния.

Расчет конкурентного равновесия для сетевых рынков происходит по заданным функциям спроса и предложения агентов. Для сетевого аукциона решается задача максимизации суммарного благосостояния.

Концепция функции общественного благосостояния Бергсона-Самуэльсона заключается в том, что из возможных состояний экономики функция позволяет выбрать то, которое обеспечивает наибольшее благосостояние населения за счет выполнения двух требований. Во-первых, функция должна соответствовать критерию эффективности Парето, т.е. если полезность одних членов общества возрастает, а остальных не убывает, то функция должна возрастать. Второе требование (требование симметрии или справедливости) состоит в том, что значение функции не должно зависеть от перестановки ее аргументов, что означает равную значимость всех членов общества. Таким образом, определяется одно из возможных экономических состояний, которое является более предпочтительным с точки зрения общества.

Для рынка электроэнергии задача оптимизации общего благосостояния оказывается в общем случае нелинейной из-за особенностей сетевых ограничений [2]. Hogan не учитывает этих особенностей. Кулиш дает корректную формали-

зацию задачи и линеаризует ее. Модель оптового рынка электроэнергии РФ решает нелинейную задачу с сетевыми ограничениями.

Второе направление в литературе изучает теоретико-игровую модель конкуренции для локального рынка, при котором оплата производится по цене отсечения. И тогда эта цена определяется из условия равенства фактического предложения и спроса. Такой подход позволяет принимать во внимание рыночную силу и стратегию поведения всех участников рынка. В этих моделях рассматриваются модели конкуренции по Курно, а также находится равновесие по Нэшу для двух случаев: 1) когда производители могут предложить произвольные функции предложения; 2) когда производители используют только линейные функции предложения. При построении таких моделей не рассмотрен случай, когда множество стратегий производителя ограничено неубывающими ступенчатыми функциями предложения, которые соответствуют (при аппроксимации первого порядка) истинным затратам производителей электроэнергии, а также действующим правилам ежедневного аукциона в России и ряда других стран. Проблема вычисления и исследования равновесия по Нэшу не решена для сетевых рынков, к которым относится рынок электроэнергии, а также не предложены эффективные методы оценки ожидаемого отклонения рыночной цены от цены по Вальрасу для таких рынков.

Рассмотрим рынок электроэнергии, его субъекты рассредоточены по различным пунктам – локальным рынкам (узлам энергосистемы) связанными между собой линиями электропередачи. Каждый узел может быть либо пунктом производства, либо потребления и характеризуется кривыми спроса и предложения. Каждая коммуникация характеризуется транспортной кривой, описывающей зависимость объема перевозки между пунктами от разности цен в них. Как известно [3], такие рынки называются рассредоточенными. Равновесие на таких рынках понимается как состояние, при котором покупка, продажа и перевозка осуществляются в соответствии с уравнениями материального баланса каждого пункта и соотношениями, определяемыми кривыми.

Для описания рассредоточенного рынка применим аппарат теории гидравлических сетей. Теория гидравлических сетей использует сетевую постановку задач, наиболее близкой к ней является транспортная задача линейного программирования в сетевой постановке и двойственная к ней. Частным случаем задачи потокораспределения является сетевая транспортная задача с выпуклыми функциями стоимостей перевоза по дугам без ограничений на знаки потоков с помощью метода множителей Лагранжа.

Применим аппарат рассредоточенных рынков к моделированию оптового рынка электроэнергии. Пусть $G = (E, V, H)$ – связный конечный ориентированный граф, где E – множество вершин графа, V – множество дуг, H – отображение $H: V \rightarrow E \times E$. Каждой дуге $v \in V$ отображение H ставит в соответствие упорядоченную пару $(h1(v), h2(v))$ вершин из E ; $h1(v)$ – начало дуги v ; $h2(v)$ – конец. Будем говорить, что из вершины i выходит дуга v , если $i = h1(v)$, и входит

в вершину j , если $j=h2(v)$. Множество дуг, входящих в вершину i , обозначим через $V^+(i)$, множество дуг, выходящих из вершины i , обозначим через $V^-(i)$. Граф G может быть интерпретирован как единая энергосистема страны или как энергозона, содержащая от одной до нескольких энергосистем. Каждая вершина графа представляет собой узел энергосистемы, т. е. пункт энергосистемы, к которому подключается генерирующее предприятие или нагрузка. Дуги графа представляют линии электропередачи.

Вершины графа $i \in E$ будем интерпретировать как локальные пункты купли-продажи электроэнергии. В качестве субъектов локального пункта (рынка) представлены:

- продавцы оптового рынка (лица, имеющие право осуществления поставки электроэнергии на рынке) ;
- покупатели оптового рынка (лица, имеющие право осуществления покупки электроэнергии);
- транспортно-сетевые компании, основным видом которых является предоставление сетевых услуг по транспортировке электроэнергии с помощью сетевых комплексов среднего и низкого напряжения.

Каждой вершине $i \in E$ поставлены в соответствие цена P_i электроэнергии, производство η_i и потребление ξ_i электроэнергии. Поведение каждого субъекта рынка описывается в виде функций предложения генерирующего предприятия $\eta_i(P_i)$, функций спроса $\xi_i(P_i)$ покупателей конкурирующего рынка.

Вершины $i \in E$ разобьем на три непересекающиеся части E^1 , E^2 и E^3 . Вершины из E^2 являются узлами, принадлежащими транспортно – сетевым компаниям, в них сходятся и расходятся линии электропередач. В вершинах из E^1 находятся генерирующие станции электроэнергии (продавцы). В вершинах из E^3 находятся конечные потребители электроэнергии (покупатели). Дуги $v \in V$ участка сети принадлежат конкурирующим между собой транспортно-сбытовым компаниям. Они покупают электроэнергию в узлах из E^1 , по дугам $v \in V$ и через узлы E^2 транспортируют ее к узлам E^3 – конечным потребителям.

Цены P_i определены только в узлах E^1 и E^3 , в которых происходит обмен товаром – электроэнергией. Среди элементов E^1 и E^3 множеств выделим соответственно подмножества E^1_c и E^3_c . В вершинах E^2 цен нет, это промежуточные узлы транспортно-сбытовых компаний.

Торговля на двухстороннем аукционе оптового рынка накладывает ограничения на построения кривых предложения и спроса. Функция заявок спроса и предложения представляет собой трехступенчатую функцию, согласно регламенту РАО ЕЭС РФ подачи ценовых заявок.

Таким образом, в узлах системы $i \in E^1 \cup E^2$ заданы кусочно-постоянные функции спроса (предложения), отсортированные в порядке убывания (возрастания). Поведение каждого субъекта можно описать следующим образом:

$$\eta_i = \eta_i(P_i), i \in E^1 \setminus \{E^1_c\}, \quad (1)$$

где η_i – объем предложения в зависимости цены в вершине.

$$P_i = P_i^*, i \in E^1_c, \quad (1^*)$$

E^1_c – вершины с постоянной ценой и свободным отбором.

Модель потребления

$$\xi_i = \xi_i(P_i), i \in E^3, \quad (2)$$

где ξ_i – объем спроса в зависимости цены в вершине.

$$P_i = P_i^*, i \in E^3_c, \quad (2^*)$$

E^3_c – вершины с постоянной ценой и свободным отбором.

Соотношения (1*), (2*) будем называть граничными условиями.

Модель транспорта по дуге

Пусть $v \in V$, y_v – поток передаваемой мощности по дуге (положительный по направлению дуги, отрицательный в обратном направлении). Дуги представляют собой линии электропередач, представляющие торгово-транспортные коммуникации, по которым транспортно-сбытовые компании осуществляют транспорт потока (свойства ЭЭС позволяют полностью контролировать движение электроэнергии). Обозначим через y_v величину потока электроэнергии, идущего по дуге $v \in V$, направление дуги указывает на положительное направление потока. Объем транспорта y_v по дуге v зависит от разности цен между соединяющими пунктами, а также пропускной способности ЭЭС. R_v – вектор объемов ресурсов на дуге. Имеем

$$|y_v| \leq f_v(R_v), v \in V, \quad (3)$$

тогда затраты на дуге

$$\langle PR_v, R_v \rangle, v \in V. \quad (4)$$

В условиях равновесия объемы производства и потребления, ввоза-вывоза электроэнергии сбалансированы, поэтому

$$\sum \{y_v : v \in V^+(i)\} - \sum \{y_v : v \in V^-(i)\} + \eta_i - \xi_i = 0, i \in E. \quad (5)$$

Таким образом, модель рассредоточенного оптового рынка электроэнергии может быть представлена в виде уравнений (1)-(5).

Для отыскания равновесного состояния на представленной модели рассредоточенного рынка применим алгоритм поузловой увязки, который является более универсальным, чем метод Лагранжа. Сходимость этого метода была доказана для рассредоточенных рынков [4].

Для применения метода поузловой увязки необходимо выразить в балансовом соотношении все неизвестные через цены

$$\sum \{f_v(P_{h2(v)} - P_{h1(v)}) : v \in V^+(i)\} - \\ - \sum \{f_v(P_{h2(v)} - P_{h1(v)}) : v \in V^-(i)\} + \eta_i(P_i) - \xi_i(P_i) = 0, \quad i \in E. \quad (6)$$

По данным торгов от 31.07.2006 г. для представленной модели был произведен расчет, получены узловые равновесные цены. Полученные цены рассчитываются наиболее эффективными методами по сравнению с используемыми.

Библиографический список

1. Аболмасов, А. Конкурентный рынок или создание монополий: структурные проблемы российского оптового рынка электроэнергии / А. Аболмасов, Д. Колодин // Консорциум экономических исследований и образования. – Режим доступа: http://www.eerc.ru/Publications/workpapers/WP_02
2. Васин, А. Моделирование аукционов для оптового рынка электроэнергии. Вопросы экономической политики / А. Васин, П. Васина // Консорциум экономических исследований и образования. – Режим доступа http://www.eerc.ru/Publications/workpapers/WP_05-03e.pdf.
3. Коваленко, А.Г. О математическом моделировании рассредоточенного рынка / А.Г. Коваленко // Экономика и математические методы. –1999. – Т. 35. – № 3. – С. 108-115.
4. Меренков, А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.:Наука, 1985. – 278 с.

Статья принята в печать в окончательном варианте 15.12.2006 г.

A.G. Kovalenko, T.P. Rubcova

MODELING THE MARKET OF ELECTRICITY

The mathematical modal of balance search in two-sided auction of the wholesale electricity market is introduced in this article. The conception of the wholesale electricity market in terms of distributed markets is considered and the application of the distributed markets' theory methods is proposed for the investigated market balance search. The appliance of balance search methods on the basis of nodal correlation is effective in solving the problems of network set up with large quantity of nodal points to which the problem of balance search of the wholesale electricity market is referred. The appliance of these methods is considered by means of particular researches.