

УДК 519

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ПЕРЕТОКУ НА УЧАСТНИКОВ ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ДЕЛОВЫХ ИГР

А.Ю. Горбунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Объединённый институт высоких температур РАН

*В докладе приведен анализ последних шагов деловых игр на основе теоретически предсказанных равновесий для рынка совершенной конкуренции и равновесий Нэша для олигополии на рынке генерирующих компаний. Рассматривались рынки с ограничением по максимальному перетоку мощности и поведение участников при постепенном увеличении пропускной способности линии.*

Ключевые слова: управление перегрузками, максимально допустимый переток, оптовый рынок электроэнергии, деловые игры, экспериментальная экономика.

### 1. Введение

На данный момент в нашей стране действует рынок электроэнергии на сутки вперёд, где продаются (покупаются) лишние (недостающие) объёмы планового производства (потребления). Равновесная цена определяется посредством конкурентного отбора ценовых заявок производителей и потребителей электроэнергии с учётом необходимости перетоков электроэнергии. [3] Из-за наличия максимально допустимого перетока в каком-либо сечении цены в узлах могут значительно различаться. Такая ситуация может стать причиной для генераторов сообщать неправдивую информацию организаторам рынка электроэнергии с целью манипулирования. [4]. Задачей данной работы является исследование эффектов манипулирования рынком генераторами при неэластичном спросе в базовой модели олигополии Бертрана-Курно (манипулирование ценовой заявкой и заявкой о максимальной вырабатываемой мощности). [2]. К тому же проводились игры с различной пропускной способностью для двух рынков:

- отсутствие перетока между узлами;
- промежуточное (200 МВт) значение перетока;
- отсутствие ограничения по перетоку;

### 2. Теоретический анализ

#### 2.1. ПОСТАНОВКА

Рассматриваются два узла или два рынка с тремя игроками на каждом. Такая ситуация может интерпретироваться как две области с небольшим количеством генерирующих компаний, которые имеют большую рыночную силу, иными словами - олигополия. Потребление в первой области  $P_{dem1} = 600$  МВт, а во второй  $P_{dem2} = 700$  МВт. Каждый игрок владеет генератором в первом и втором узле как показано в таблице 1.

Таблица 1. Параметры генераторов

Генератор	Максимальная генерация	Цена	Рынок	Игрок
G1	400	3	1	1
G2	200	14	1	2
G3	200	15	1	3
G4	200	10	2	1
G5	500	4	2	2
G6	500	6	2	3

Стратегии участников подчиняются модели Бертрана-Курно:

- (1)  $0 \leq w_{ij} \leq w_{ij \max}$  ,  
 (2)  $0 \leq c_{ij} \leq 20$  .

$w_{ij}$  – заявка о максимальной вырабатываемой мощности  $j$ -го генератора ( $j = 1, 2$ ) для  $i$ -го игрока, которая меняется с дискретным шагом в 100 МВт;

$w_{ij \max}$  – максимальная генерация для  $j$ -го генератора  $i$ -го игрока, указанная в таблице 1;

$c_{ij}$  – ценовая заявка  $j$ -го генератора ( $j = 1, 2$ ) для  $i$ -го игрока.

Цена и объем выработки устанавливается по принципу аукциона – в первую очередь для поставки выбираются генераторы с наименьшими ценовыми заявками до тех пор, пока не достигается ограничение по перетоку между узлами:

(3)  $|P_{1-2}| \leq P_{1=2 \max}$  .

Далее загружается генератор с наименьшей ценой, который не увеличивает переток. Таким образом цена на каждом рынке равна ценовой заявке последнего загруженного генератора в данном узле.

Потребление неэластичное (не зависит от цены) и известно всем игрокам, причем потери в линии не учитываются:

(4)  $P_{ij} = P_{dem1} + P_{dem2}$  .

$P_{ij}$  – вырабатываемая мощность  $j$ -го ( $j = 1, 2$ ) генератора  $i$ -го игрока по итогам аукциона.

Каждый игрок максимизирует свою функцию полезности:

(5)  $u_i = (\pi_1 - c_{i1})P_{i1} + (\pi_2 - c_{i2})P_{i2}$  .

## 2.2. ВОЗМОЖНЫЕ РАВНОВЕСИЯ

При рынке совершенной конкуренции, где генераторы не имеют большой рыночной силы и не влияют на установление цены, игроки мотивированы подавать свои реальные заявки. [4]. Тогда цены для трех экспериментов:

Таблица 2. Цены при совершенной конкуренции

Пропускная способность	$\pi_1$	$\pi_2$
0	14	16
200	14	16
1000	6	6

Для олигополии рассматриваются равновесия Нэша. Существует множество различных равновесий, для которых цена на двух рынках будет одинаковой. В силу их однотипности не будем приводить их все. В таблице 3 указаны возможные цены в равновесных по Нэшу ситуациях, а в таблице 4 примеры равновесий при которых будут заданные цены.

Таблица 3. Цены в равновесиях Нэша при олигополии

Пропускная способность	$\pi_1$	$\pi_2$
0	19	9/19
200	13/19	9/19
1000	13/14	13/14

Таблица 4. Равновесия Нэша для перетока 200 МВт

Генератор	Максимальная генерация	Цена	Рынок	Игрок
G1	300	13	1	1
G2	200	14	1	2
G3	200	15/19	1	3
G4	200	10	2	1
G5	500/400	4	2	2
G6	500	9/19	2	3

### 3. Эксперименты

#### 3.1. ОПИСАНИЕ ДЕЛОВЫХ ИГР

Игра длится 10 шагов, на каждом шаге игрок подаёт заявку с ценой и максимальной генерацией. Игра заканчивается либо по истечении 10 шагов, либо при неизменных поданных заявках всех игроков. Выигрыш каждого игрока засчитывается только на последнем шаге.

Также каждый игрок обладает полной информацией о заявках остальных и об их истинных параметрах.

Для выявления эффектов, связанных со снятием ограничения, каждый игрок владел одинаковыми генераторами во всех экспериментах.

#### 3.2. ОТСУТСТВИЕ ПЕРЕТОКА МЕЖДУ УЗЛАМИ

В данной ситуации рынки не взаимодействуют и могут рассматриваться независимо друг от друга.

На рис. 1 продемонстрировано одно из возможных равновесий Нэша для первого рынка. Следует заметить, что такое равновесие может быть не единственным. В данном случае мы приводим одно из них.

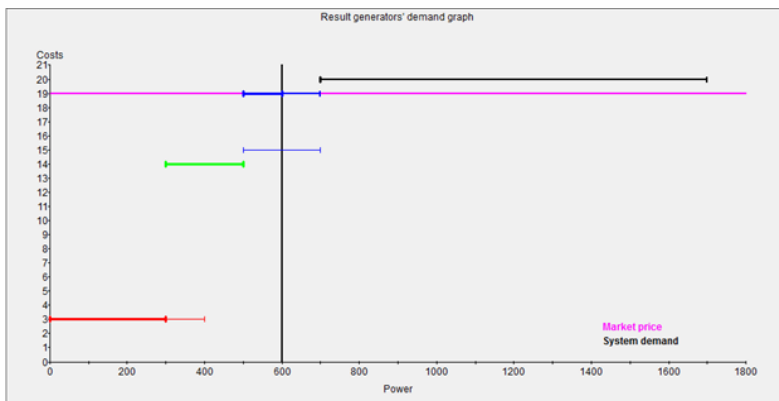


Рис. 1. Возможное равновесие Нэша для рынка 1 при нулевом перетоке

На рис. 2 изображено одно из возможных равновесий для второго рынка. Однако следует заметить, что в данном случае установившаяся на рынке цена не является максимально возможной, однако равновесие Нэша достигнуто.

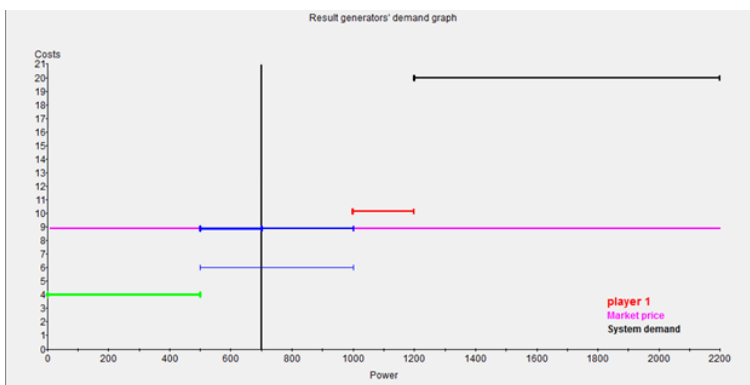


Рис. 2. Возможное равновесие Нэша для рынка 2 при нулевом перетоке

Результаты эксперимента могут меняться в зависимости от целей и стратегий игроков. Каким-то из групп так и не удалось прийти к соглашению ни на одном из двух играющих рынков, однако кто-то сумел добиться равновесия.

На рис. 3 представлен результат игры одной из групп на рынке 1. Данная ситуация соответствует предсказанному теоретически равновесию.

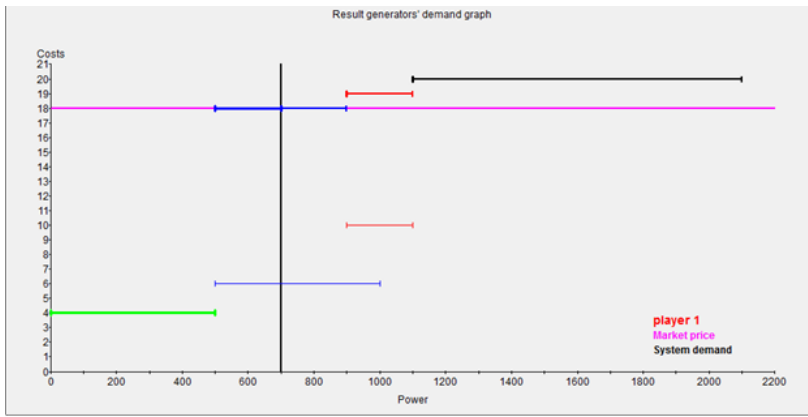


Рис. 3. Неравновесная ситуация на рынке 1 в отсутствие перетока

Таблица 5. Результаты эксперимента с нулевым перетоком

Группа	Цена на рынке 1	Цена на рынке 2
1	20	18
2	15	18
3	19	4
4	19	12

### 3.3. ОГРАНИЧЕННЫЙ ПЕРЕТОК МЕЖДУ УЗЛАМИ 200 МВт

Во втором эксперименте демонстрируется, как изменяется ситуация на рынках, если они начинают взаимодействовать друг с другом посредством линии с ограниченным перетоком. В данном случае рассматривается линия с пропускной способностью 200 МВт. Маргинальный генератор одного рынка может продавать на другой рынок электроэнергию по рыночной цене. На рис. 4 и рис. 5 представлено возможное равновесие по Нэшу. В такой ситуации на обоих рынках устанавливается одна и та же равновесная цена, а Синий игрок является маргинальным в обоих узлах.

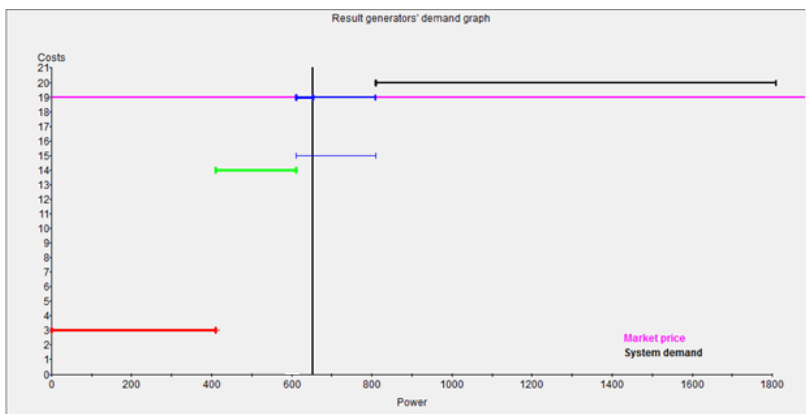


Рис. 4. Равновесие Нэша на рынке 1 при перетоке 200 МВт (теория)

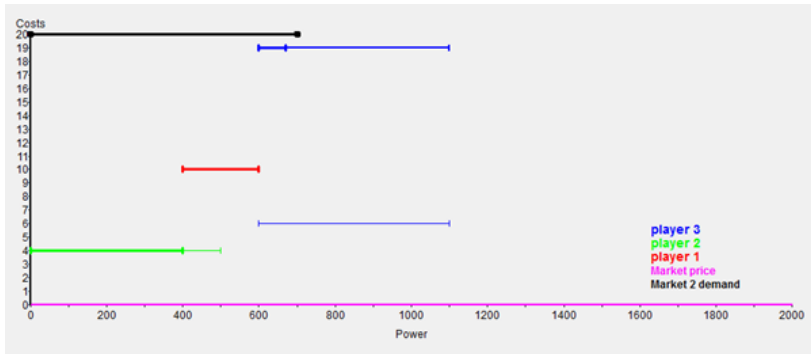


Рис. 5. Равновесие Нэша на рынке 2 при перетоке 200 МВт (теория)

В этом эксперименте каждый игрок владел тем же набором генераторов, что и в предыдущей игре. Ни в одной группе не было достигнуто равновесие. Интересно заметить, что во всех группах на обоих рынках установилась одинаковая цена, а переток между узлами почти отсутствовал.

Таблица 6. Результаты эксперимента с перетоком 200 МВт

Группа	Цена на рынке 1	Цена на рынке 2
1	15	15
2	18	18
3	17	17
4	10	10

### 3.4. НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ПЕРЕТОК МЕЖДУ УЗЛАМИ

Во последнем эксперименте рассматривается ситуация с неограниченным перетоком электроэнергии между рынками. Такая ситуация может быть интерпретирована как объединение рынков. Фактически, каждый игрок ведет игру двумя генераторами на одном едином рынке. Возможное равновесие представлено на рис. 6 (для удобства оба рынка изображены на одном графике).

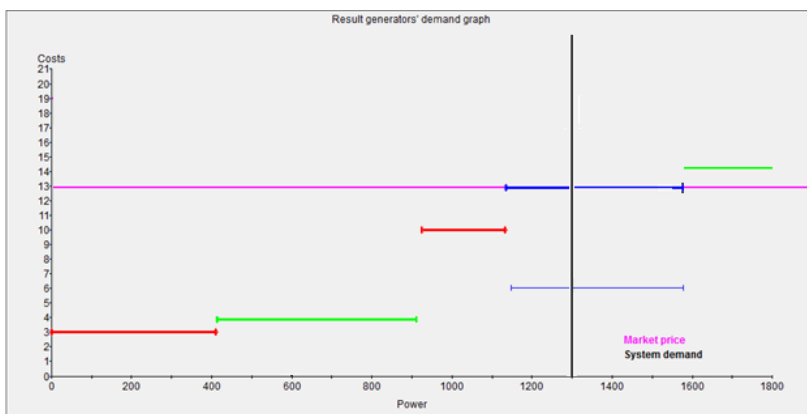


Рис. 6. Равновесие Нэша на обоих рынках при неограниченном перетоке (теория)

В данном эксперименте ни одной группе не удалось достигнуть равновесия Нэша в течение предоставленных 10 шагов. Возможно, это связано с большим числом степеней свободы для манипулирования ситуацией и недостаточным количеством шагов. Также могла сказаться некая психологическая игра между участниками.

Таблица 7. Результаты эксперимента с неограниченным перетоком

Группа	Цена на рынке 1	Цена на рынке 2
1	19	19
2	18	18

3	19	19
4	10	10

### 3.5. ВЫВОД

Из проведенных экспериментов можно заключить, что на основе построенной модели можно теоретически предсказать возможные исходы игр на рынках, взаимодействующих посредством линии с определенной пропускной способностью. Интересным результатом оказался факт перемешивания рынков при наличии ненулевого перетока между узлами. Иными словами, в обоих узлах устанавливалась одинаковая равновесная цена, причем каждая группа стремилась поднять эту цену настолько, насколько это было возможно.

Важно заметить, что большую роль играла рациональность игроков, так как каждый из них мог действовать, оценивая ситуацию на несколько шагов вперед, в то время как равновесие по Нэшу подразумевает анализ только последующего шага при неизменных стратегиях остальных участников.

## 4. Равновесие Нэша и Парето оптимум

### 4.1. СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ

Как известно, равновесие Нэша далеко не всегда является Парето оптимумом. Примером является широко известная дилемма двух заключенных. Мы провели анализ полученных теоретически равновесий по Нэшу на факт того, являются ли они Парето оптимальными. Рассмотрим уже знакомую равновесную ситуацию, показанную на рис. 6. Она не является Парето оптимальной.

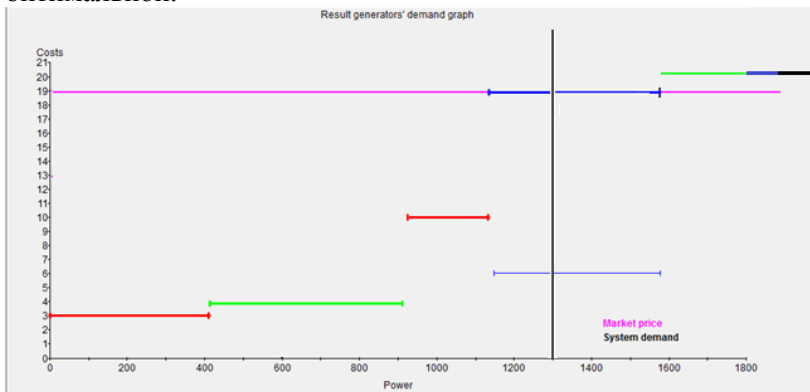


Рис. 7. Парето оптимум, но не равновесие по Нэшу

Однако если последним трем генераторам поднять ценовые заявки, то ситуация станет Парето оптимальной, при этом перестав быть равновесной по Нэшу, что можно увидеть на рис. 7.

## 5. Дальнейшие исследования

В ходе игр было замечено, что при обучении игроки относительно быстро находят и остаются в равновесиях Нэша. Однако при последующих похожих играх равновесные ситуации не достигаются. Предложение рассматривать Парето оптимальные ситуации как рациональное поведение игроков. Для проверки данной гипотезы в первую очередь планируются опросить участников об их стратегии.

Также существует возможность психологического манипулирования так как выигрыш игрока засчитывается только на последнем шаге. Чтобы проверить этот эффект планируются провести игру с изменённой функцией полезности, в которой выигрыш складывается на каждом шаге:

$$(6) \quad u_i = \sum_t (\pi_{1t} - c_{i1})P_{i1t} + (\pi_{2t} - c_{i2})P_{i2t}.$$

Другой особенностью является отсутствие, либо слишком малый (100 МВт) переток между узлами, хотя в равновесных ситуациях линия загружена полностью. Для выявления эффекта планируется провести эксперименты с другими параметрами игры, например, с меньшей

пропускной способностью – 50МВт или игру, где существует равновесие с отсутствием или небольшим ( $< 100$  МВт) перетоком.

#### **Литература.**

1. БУРКОВ. В.Н., КОРГИН Н.А., НОВИКОВ Д.А. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ: УЧЕБНИК / ПОД РЕД. Д.А. НОВИКОВА. - М.: КНИЖНЫЙ ДОМ "ЛИБРОКОМ", 2009 - 264
2. ЗОРКАЛЬЦЕВ В.И., АЙЗЕНБЕРГ В.И., Модели рынков несовершенной конкуренции: приложения в энергетике –Иркутск: ИСЭМ СО РАН.
3. Киреев С.В., Тюнин И.Б., *РЫНОК НА СУТКИ ВПЕРЕД: КОНЦЕПЦИЯ, ЦЕНООБРАЗОВАНИЕ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ*// АУДИТ И ФИНАНСОВЫЙ АНАЛИЗ – 2011.
4. KIRSHEN, D. S., STRVAC G. Fundamentals of Power Systems Economics - John Wiley & Sons - 2004
5. Kumar, A, Srivastava, S.C., Singh S.N. - Congestion management in competitive power market - Electric Power Systems Research, 2005
6. Overbye, T, Gross, G., Sauer, P., Laufenberg, M., Weber, J. *Market Power Evaluation in Power Systems with Congestion in Electric Power, 1999*