

Гл. ас. д-р Виктор Аврамов\*

## МОДЕЛИРАНЕ НА КОНКУРЕНЦИЯТА НА БОРСОВИЯ ПАЗАР НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Моделирана е конкуренцията на борсовия пазар на електрическа енергия с използване на моделите на Курно и на равновесие на функции на предлагане (supply function equilibrium). Дискутирани са основните отличителни характеристики на пазарите на електрическа енергия. Моделите са приложени към пазар с участието на четири производителя (АЕЦ и три въглищни централи). Формулирана е специфична функция на търсенето, която добре описва особеностите на пазара, и са оценени пределните разходи на производителите. Разгледани са три сценария, които демонстрират приложимостта на използваните модели и хвърлят светлина върху ефектите от променящата се пазарна среда върху цените и пазарната структура. Не са обхванати загубите за пренос и разпределение и ограниченията на капацитета на производителите.<sup>1</sup>

JEL: D21; D22; D43; C72

*Ключови думи:* борсов пазар на електрическа енергия; моделиране на конкуренцията; модел на Курно; равновесие на функции на предлагане

При повечето потребителски стоки съществува възможност за физическо съхранение, която играе важна роля за балансиране на разликите между търсенето и предлагането в реално време. Съхранението може да компенсира внезапни или циклични скокове на търсенето, без да е нужно увеличаване на производството или внезапно прекъсване на доставките поради аварийност или друга техническа причина. За разлика от тях електрическата енергия не може да се съхранява. Същевременно пазарите на електроенергия се отличават с циклична вариация на търсенето, което в различни времеви интервали – денонощни, седмични и годишни, варира в зависимост от измененията на метеорологичните условия и поведението на потребителните, детерминирано от социални и икономически фактори, свързани с часа на денонощието и с календарния ден. Например потреблението има характерни пикове в сутрешните и вечерните часове на работните дни, както и в неделя вечер; то нараства значително през

---

\* Нов български университет, департамент „Администрация и управление“, vavramov@nbu.bg

<sup>1</sup> Assist. Prof. Victor Avramov, PhD. MODELING THE COMPETITION ON THE ELECTRICITY STOCK MARKET. *Summary:* A model of competition on the electricity stock market is constructed using Cournot's competition model and the supply function equilibrium (SFE) model. The main distinctive features of the electricity markets are discussed. The models are then applied to a market with the participation of four manufacturers (a nuclear power plant (NPP) and three coal plants). A specific demand function which gives a good description of the market characteristics is formulated and an estimation is made to determine the marginal costs for producers. Three scenarios are presented in order to demonstrate the applicability of the models used and to shed light on the effects of the changing market environment on prices and market structure. The transmission and distribution losses and the capacity constraints of the manufacturers are not covered. *Keywords:* stock electricity market; modeling the competition; Cournot's model; supply function equilibrium.

студените дни, за да се компенсират ниските външни температури, и по-слабо в горещите, за да се неутрализират високите.

Подобна комбинация от циклични вариации и невъзможност за съхранение обуславя специфичните икономическите характеристики на пазара на електрическа енергия:

*1. Равенство между търсенето и предлагането в реално време.* Нуждата от балансиране в реално време предполага, че при значителни разлики между търсенето и предлагането е възможно потреблението за част от клиентите да бъде принудително прекъснато. В резултат от по-малките отклонения се влошават услугите, които са обвързани с този вид енергия. Електроуреди, зависещи от честотата на тока, започват да работят субоптимално – като часовници, които изостават или избързват, или пък се повреждат при резки промени на напрежението. Такива ефекти са нежелани и за индустриалните производители, чието оборудване е силно чувствително към промените на напрежението. За всички типове потребители загубите на полезност са най-големи при прекъсване на захранването поради ограничено предлагане.

*2. Ограничено измерване в реално време.* Измерването на потреблението в реално време не обхваща всички потребители и не ги излага на въздействието на цените при всяко тяхно изменение във времето. Ето защо една от най-съществените задачи на управлението на сектора е това измерване да се подобри, тъй като критично важно следствие от ограничеността му е, че еластичността на търсенето на пазарите на електрическа енергия става много ниска. Често в практиката се приема, че тя клони към нула. Причината е именно в това, че повечето потребители не могат да реагират на промените в пазарната цена, тъй като не я знаят, и ефектите на нейната постоянна промяна не се разпростират върху тях.

*3. Липса на стриктни договорености.* На пазарите на електрическа енергия не съществуват практически способи за ограничаване на клиенти, които са надхвърлили лимита на своето потребление. С други думи, всеки потребител е свободен да консумира неопределено количество енергия във всеки момент без предварителен договор с доставчик или оператор. Балансирането на пазара в реално време е роля на оператора на мрежата, който може да ограничава потреблението за определени клиенти, но не може да наблюдава в реално време дали множество индивидуални потребители извличат енергия от мрежата с или без договор за това.

### **Аналитично моделиране на конкуренцията**

#### *Стандартни модели*

Моделирането на конкуренцията на пазара на електрическа енергия може да се извърши с модифициране на стандартните теоретични модели. За пълнота изложението тук започва от самото начало. Един производител продава електрическа енергия на пазара винаги когато неговите пределните разходи са по-ниски от пазарната цена. Приемаме допускането, че на пазара

съществуват множество производители, които нямат пазарна сила. Нека функцията на търсенето е  $Q = D(p)$ , а обратната функция на търсене –  $p = p(Q)$ . Краткосрочните приходи за всеки времеви интервал са просто  $R(Q) = pQ$ , а печалбата е

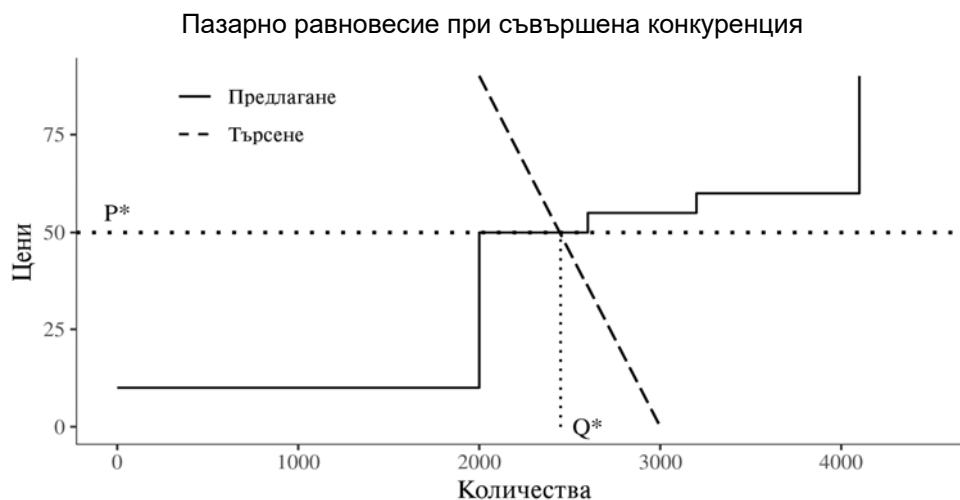
$$(1) \quad \Pi(Q) = R(Q) - c(Q).$$

Максималната краткосрочна печалба е

$$(2) \quad \frac{\delta \Pi}{\delta Q}(Q^*) = \frac{\delta R}{\delta Q}(Q^*) - \frac{\delta c}{\delta Q}(Q^*) = MR(Q) - MC(Q).$$

Необходимото условие за максимизиране на печалбата от първи ред е пределните приходи и пределните разходи да бъдат равни:  $MR(Q) = MC(Q)$ . Достатъчно условие е разходите на производителите да бъдат изпъкнали, въпреки че в практиката невинаги това е така.<sup>2</sup> Приемаме, че на пазара съществуват производители с нетен капацитет 2000, 600, 600 и 1200 MW в определен времеви интервал, които предоставят произведени количества на цена, равна на пределните разходи – съответно 10, 50, 55 и 60 лв./MWh. Загубите за пренос и разпределение, както и ограниченията при преноса се игнорират. Ако обратната функция на търсенето  $p(Q)$  има форма като показаната на фиг. 1, то пазарното равновесие е при цена 50 лв./MWh и количество 2450 MW, отбелязани като  $(P^*)$  и  $(Q^*)$ . Тази постановка репрезентира пазарното равновесие при съвършена конкуренция.

Фигура 1



На монополен пазар монополистът ще използва кривата на търсенето, за да определи количествата, които предоставя на пазара така, че да максими-

<sup>2</sup> За момента игнорираме този въпрос, като по-нататък е разгледан метод за моделирането им.

зира печалбата си. На пазара на електрическа енергия, поради специфичните му характеристики, монополистът не може директно да определи количеството, което максимизира печалбата му, но може да използва ценовата чувствителност на потребителите и да направи ценово предложение, което да е близко до оптималното за него количество  $Q^*$ . Във всеки времеви интервал неговата печалба е

$$(3) \quad \Pi(Q) = p(Q)Q - c(Q),$$

която е максимална при

$$(4) \quad \frac{\delta p}{\delta Q}(Q^*)Q^* + p(Q^*) - \frac{\delta c}{\delta Q}(Q^*) = 0.$$

Съвършената конкуренция и монополът са двете граници, между които се намират всички възможни пазарни резултати. От основните модели на несъвършена конкуренция – на Курно (Cournot), на Стакелберг (Stackelberg) и на Бертран (Bertrand), по-близък до реалностите на пазарите на електроенергия е този на Курно.

В основата си моделът на Курно приема, че на пазара съществуват  $n$  фирми, които имат пълна информация за характеристиките на търсенето и за пазарното поведение на останалите участници. Това поведение се отличава със следното: Всеки производител  $i$  избира какво количество  $Q_i$  да предостави на пазара, знаейки, че всички други участници  $j \neq i$  предоставят количества  $\sum_{j \neq i} Q_j$ . Постигането на пазарно равновесие се състои в намиране на вектор на количествата  $(Q_1^*, Q_2^*, Q_3^*, \dots, Q_n^*)$ , всяко от които е резултат от максимизиращия печалбата индивидуален избор на отделния производител. Равновесната цена е функция от количествата на всички производители  $p(\sum Q_j)$  и пазарното търсене трябва да е равно на сумата на количествата на производителите  $D = \sum Q_j$ , за да се изпълни изискването за баланс в реално време.

Нека времевите интервали се дефинират като един час, както е на Българската енергийна борса. За всеки часови интервал печалбата за производител  $i$  е

$$(5) \quad \Pi_i(Q_i, Q_{j \neq i}) = p(\sum Q_j)Q_i - c_i(Q_i),$$

която се максимизира при

$$(6) \quad \frac{\delta p}{\delta Q}(\sum Q_j^*)Q_i^* + p^*(\sum Q_j) - \frac{\delta c_i}{\delta Q_i}(Q_i^*) = 0.$$

#### Формулиране на функцията на търсене

Изложеното стандартно представяне на конкуренцията трябва да се адаптира към пазарите на електрическа енергия. Адаптирането, което се разглежда тук, е базирано на Klempereger и Mayer (1989) и на Baldick et al. (2004).

Първо е дефинирано търсенето като функция от цената и времето. Общата ѝ формулировка е следната:

$$(7) \quad \forall p \in \mathbb{R}_+, D(p, t) = N(t) - \gamma p, \text{ където:}$$

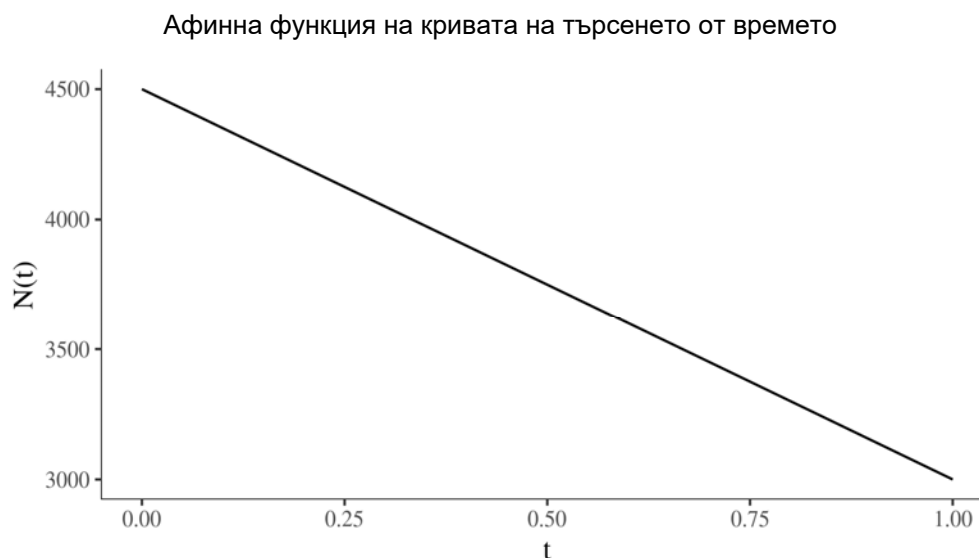
$N(t)$  е функцията на кривата на продължителността на търсенето;

$p$  – цената;

$t$  – времевият интервал (например един час от денонощието).  $t$  може да се нормализира, така че да бъде в интервала  $[0, 1]$ .

На всяка положителна цена съответства функция на търсенето от цената и от времето. Когато  $N$  се дефинира като афинна, ненарастваща функция, нейният максимум (максималното търсене) трябва да бъде при  $t = 0$ , а минимумът – при  $t = 1$  (вж. фиг. 2). В допълнение  $N(t)$  може да репрезентира разпределението на вероятността на стойностите на потреблението във времето.  $\gamma$  е наклонът на функцията на търсенето от цената  $\frac{\delta D}{\delta p}$ , като  $D(p, t)$  е линейна спрямо  $\gamma$ .

Фигура 2



Времеви интервали могат да се определят като часове в годината. В случая за „базов“ период се използва цялата 2018 г., от която данните за потреблението и цените на борсовия пазар „ден напред“ за всеки час се разглеждат поотделно. Така моделът приема, че пазарните участници взимат решения с използване на знание за предишни периоди за разпределението на търсенето във времето и за наклона на търсенето от цената.

Началната точка на търсенето, което не се влияе от цената при  $t = 0, N_0$ , се оценява с помощта на кубична регресия, както е при Green (1996) и други автори. Оценките за  $N(t)$  са систематизирани в табл. 1.

Таблица 1

Оценки на базовото търсене и на наклона на функцията на търсенето от цената

Час	$N_0$	$\gamma$
12:30 AM	909.833	3.8287
3:30 AM	905.14	4.8593
7:30 AM	1018.79	1.8548
8:30 AM	1065.022	1.5227
1:30 PM	1059.07	1.9938
3:30 PM	989.17	1.9199
6:30 PM	919.439	1.4722
7:30 PM	900.39	1.2725
10:30 PM	896.21	1.9031

Получените стойности за  $N_0$  и  $\gamma$  са основата на функцията на търсенето  $D(p, t)$ , използвана за моделиране на пазарната конкуренция тук. Допуска се, че производителите на пазара взимат стратегически решения за поведението си, като разпределението на  $N$  във всеки часови интервал и съответната стойност на  $\gamma$  са известни.

#### Моделиране на разходите на производителите

За оценка на разходите за производството трябва да се направи разграничение между тези, зависещи от обема на производство, и фиксираните разходи като заплати, външни услуги и др., които не зависят от него. Подобно разграничаване е сходно с компонентите на цената, които използват и регулаторите – „променливи“ и „условно-постоянни“. Приема се, че функциите на разходите описват себестойността на цялото производствено портфолио на всеки пазарен участник.

За всеки производител общите вариращи разходи за производство са репрезентирани с квадратна функция от вида

$$(8) \quad \forall i, c_i(Q_i) = a_i Q_i + \frac{1}{2} b_i Q_i^2$$

и по този начин пределните разходи са

$$(9) \quad \frac{\delta c_i}{\delta Q_i}(Q_i) = a_i + b_i Q_i.$$

Функцията на общите разходи е стриктно вдлъбната, пределните разходи се повишават с увеличаване на производството,  $a_i \geq 0$  и е различно за всеки производител, което позволява подреждането на  $a_i$  по нарастване за всички производители  $i$ . По този начин  $a_i$  е пресечната точка на функцията на пределните разходи в оста  $p$ , а  $b_i$  е нейният наклон.

За основа на практическата оценка на пределните разходи могат да послужат данни от счетоводните отчети на производителите. За илюстрация по-нататък ще разгледаме система от четири дружества, представляващи

„базови“ мощности, от които едното е АЕЦ, а останалите три са конвенционални термични централи. Данните от счетоводните отчети на дружествата за всяка календарна година са систематизирани в табл. 2.

Таблица 2

Оценка на пределните разходи на производителите по данни от счетоводните им отчети, лв./MWh

Година	Производител 1	Производител 2	Производител 3	Производител 4
2018	-	72.30	73.45	71.67
2017	9.60	50.58	50.13	50.94
2016	10.46	45.27	47.40	48.57
2015	10.21	48.21	52.33	50.18
2014	10.94	42.27	47.15	44.73
2013	10.67	38.79	43.85	41.89
2012	10.28	50.15	56.15	54.25

Оценката на разходите за Производител 1 (АЕЦ) е направена, като сумите на разходите за гориво и  $OM_i$  са разделени на нетното производство. Те не включват разходите за преработване на използваното гориво. Оценката на пределните разходи за конвенционалните производители е получена, като са използвани данни за цената на горивото, термичната ефикасност, разходите за поддръжка, емисионният фактор и цената на емисиите. Тези данни са налични в счетоводните отчети на изследваните дружества и в отчетите на дружеството-доставчик на гориво. Краткосрочните пределни разходи са

$$(10) \quad \forall i, SRMC_i = \frac{cp_i}{E_i} + OM_i + eF_i + ep_i, \text{ където:}$$

$cp_i$  е цената на горивото в лв./MWh;

$E_i$  – термичната ефикасност, получена като съотношение на входящата и изходящата енергия (нетно производство използвано гориво в MWh);

$OM_i$  – разходите за материали по данните от счетоводните отчети на дружествата;

$eF_i$  – емисионният фактор:  $\frac{\text{нетни емисии } CO_2(t.)}{\text{нетна произведена енергия (MWh)}}$ ;

$ep_i$  – цената на емисиите.

Посочените оценки са базата за определянето на съответните коефициенти  $a_i$  и  $b_i$  за всеки производител. За термичните централи  $a_i = SRMC_i$ , а  $b_i = \frac{1}{SRMC_i}$ . Така се изработват линейни оценки на изпъкналите функции на общите вариращи разходи за производство. Ако  $Q_i = \max\{Q_i\}$ , тогава за термичните централи себестойността при пълно натоварване ще бъде равна на  $a_i + b_i Q_i^{max}$ . За АЕЦ, следвайки същите аргументи,  $a_i = 30$ , а  $b_i = \frac{1}{SRMC_i}$ , както при останалите производители. Тези параметри за 2017 и 2018 г. са систематизирани в табл. 3.

Таблица 3

Параметри за пазарното моделиране, базирано на разходите на производителите

Производител	$a_i^{2017}$	$a_i^{2018}$	$b_i^{2017}$	$b_i^{2018}$	$\frac{\delta c_i^{17}}{\delta Q_i}(Q_i^{max})$	$\frac{\delta c_i^{18}}{\delta Q_i}(Q_i^{max})$
1	30	30	0.10417	0.10417	9.6	9.6
2	50.58	72.30	0.01977	0.01383	62.44	80.6
3	50.13	73.45	0.01995	0.01362	82.45	95.5
4	50.94	71.67	0.01963	0.01395	68.77	84.34

**Емпирично моделиране на пазарната конкуренция**

Задачата на моделирането е да намери равновесието на Неш като комбинация от стратегии, в които стратегията на всеки пазарен участник  $i - s_i^*$ , е най-добър отговор на оптималните стратегии на останалите участници  $s_{j \neq i}^*$ . Формално, стратегическите променливи за всеки пазарен участник  $i = 1, \dots, n$  са множеството от всички възможни стратегии -  $s_i \in S_i$ . Дадена комбинация от стратегии  $\{s_i^*\}_{i=1}^n$  е равновесие на Неш, когато е изпълнено условието

$$(11) \quad \Pi_i(s_i^*, s_{j \neq i}^*) \geq \Pi_i(s_i, s_{j \neq i}^*).$$

Избирайки стратегия  $s_i^*$ , пазарен участник  $i$  няма интерес да я променя, ако всички останали са предпочели оптималните си стратегии  $s_{j \neq i}^*$ , защото  $s_i^*$  му носи най-голяма или равна по величина печалба.

Моделите, използвани тук, се базират на разгледаните стандартни модели на конкуренцията. Пазарното търсене се дефинира като в уравнение (6) и пазарното търсене и предлагане са равни във всеки времеви интервал:  $\sum Q_i = D(p, t)$ . Използвайки това, обратната функция на търсенето  $p(Q)$  може да се дефинира като

$$(12) \quad p(\sum Q_i) = \frac{N - \sum Q_j}{\gamma},$$

Печалбата за всеки производител, подобно на уравнение (5), е:

$$(13) \quad \Pi_i(Q_i, Q_{j \neq i}) = p(\sum Q_k)Q_i - c_i(Q_i).$$

Тя е максимална при

$$(14) \quad p(Q_i^* + \sum Q_{j \neq i}) - Q_i^* \frac{\delta p}{\delta Q_i}(Q_i^* + \sum Q_{j \neq i}) - \frac{\delta c_i}{\delta Q_i}(Q_i^*) = 0,$$

което се опростява до

$$(15) \quad p(Q_i^* + \sum Q_{j \neq i}) - Q_i^* \left( b_i + \frac{1}{\gamma} \right) - a_i = 0.$$

Равновесната цена за всеки времеви интервал е

$$(16) \quad p^* = \frac{N + \sum \frac{a_i}{b_i + \frac{1}{\gamma}}}{\gamma + \sum \frac{1}{b_i + \frac{1}{\gamma}}}$$

и равновесните количества са



$$(17) \quad Q_i^* = \frac{p^* - a_i}{b_i + \frac{1}{\gamma}}$$

Използвайки уравнения (13) - (15), печалбата за всеки производител е

$$(18) \quad p^* - \frac{\delta c_i}{\delta Q_i}(Q_i^*) = \frac{p^* - a_i}{b_i \gamma + 1}$$

Това е моделът на равновесие на Курно, адаптиран към дефинициите на търсенето и на разходите на производителите. Основната стратегическа променлива за производителите са количествата, които те решават да предоставят на пазара.

Нека разширим този модел със следното допускане: пазарните правила изискват производителите да специфицират пазарно предложение за цени и количества. Това е идентично на двойките цени/количества, които всеки производител определя за всеки интервал на деня на доставка на енергийната борса. Baldick et al. (2004) дефинират пазарното предложение по следния начин:

$$(19) \quad \forall i, q_i(p) = \beta(p - \alpha).$$

Пазарното предложение представлява афинна функция, в която  $\beta$  е наклонът ѝ, а  $p$  – пазарната цена. При съвършена конкуренция за всеки производител  $\alpha = a_i$ ,  $\beta = \frac{1}{b_i}$ .

За разлика от модела на Курно, където стратегическата променлива са пазарните количества, тук стратегически променливи са параметрите  $\alpha$  и  $\beta$ . Когато пазарната цена е  $p$ , всеки производител е готов да достави  $s_i(p)$  (ненамаляваща функция на предлагане).

Равенството на търсенето и предлагането във всеки времеви интервал може да се дефинира по следния начин:

$$(20) \quad Q_{it} = N(t) - \gamma p_t - \sum_{j \neq i} s_j(p).$$

Количеството, което всеки производител предоставя на пазара, е функция на пазарната цена и зависи от функциите на останалите участници на пазара. Печалбата отново е разликата между приходите и разходите за всяка цена във всеки времеви период:

$$(21) \quad \Pi_{it}(p_t) = Q_{it} p_t - c_i(Q_{it})$$

или, замествайки с уравнение (20):

$$(22) \quad \Pi_{it}(p_t) = (N(t) - \gamma p_t - \sum_{j \neq i} s_j(p)) p_t - c_i(N(t) - \gamma p_t - \sum_{j \neq i} s_j(p))$$

Тя се максимизира при

$$(23) \quad \left( N(t) - \gamma p_t - \sum_{j \neq i} s_j(p) \right) + \left( -\gamma - \sum_{j \neq i} \frac{\delta s_j}{\delta p_t}(p_t) \right) - \frac{\delta c_i}{\delta Q_i}(N(t) - \gamma p_t - \sum_{j \neq i} s_j(p)) \left( -\gamma - \sum_{j \neq i} \frac{\delta s_j}{\delta p_t}(p_t) \right)$$

Замествайки отново с уравнение (20) в уравнение (21), за всеки времеви интервал се получава

$$(24) \quad Q_{it} = (p_t - \frac{\delta c_i}{\delta Q_i}(Q_{it}))(\gamma + \sum_{j \neq i} \frac{\delta s_j}{\delta p_t}(p_t)).$$

Замествайки с уравнения (9) и (19) в (24):

$$(25) \quad \forall i, \beta_i(p - \alpha_i) = (p - a_i - b_i \beta_i(p - \alpha_i))(\gamma + \sum_{j \neq i} \beta_j).$$

Следвайки Baldick et al. (2004), коефициентите на степените на  $p$  могат да бъдат изравнени и уравнение (25) се свежда до:

$$(26) \quad \forall i, \beta_i = (1 - b_i \beta_i)(\gamma + \sum_{j \neq i} \beta_j).$$

Изравнявайки степените на константите, от уравнение (25) се получава:

$$(27) \quad \forall i, -\alpha_i \beta_i = -(-a_i - b_i \beta_i \alpha_i)(\gamma + \sum_{j \neq i} \beta_j).$$

Уравнения (26) и (27) трябва да бъдат удовлетворени с положителни стойности за  $\beta_i$  за всеки производител  $i$ , за да може да съществува пазарно равновесие. Замествайки с (26) в (27), при положителни стойности на  $\beta_i$  при пазарно равновесие  $\alpha_i = a_i$ .

В Rudkevich et al. (1998) е демонстрирано, че една система от уравнения от вида (26) има само едно положително решение за неизвестните  $\beta_i$ . Пазарната равновесна цена за всеки времеви интервал, всяко търсене и всеки наклон на функцията на търсенето е

$$(27) \quad \forall t, p(t) = \frac{N(t) + \sum a_i \beta_i}{\sum \beta_i + \gamma}.$$

#### Монополен пазар

Производителят с най-ниска стойност на  $a_i$  е водещ производител (пазарен лидер). Той е единственият участник, който предоставя количества на пазара при  $a_2 > p > a_1$ . От уравнение (26) следва, че неговата функция на предлагане е

$$(27) \quad \beta_i = \frac{1}{1 + b_1 \gamma}.$$

Водещият производител може да предложи всякаква пазарна цена до достигането на  $a_2$ , когато следващият участник може да навлезе на пазара. При липсата на конкуренция той може да има пазарно поведение на Курно-монополист, предоставяйки функция с константен наклон. Тогава пазарната цена се получава, модифицирайки уравнение (16):

$$(28) \quad p^* = \frac{N + \sum \frac{a_1}{b_1 + \gamma}}{\gamma + \sum \frac{1}{b_1 + \gamma}},$$

и количеството, модифицирайки уравнение (17):

$$(29) \quad Q_i^* = \frac{p^* - a_1}{b_1 + \frac{1}{\gamma}}.$$

### Олигополен пазар

Когато цените надминат  $p > a_2$ , Производител 2 навлиза на пазара и пазарното равновесие съответства на решението на уравнение за двама участници. Аналогично, когато на пазара се включат трима или повече производители, се търси решение на система от уравнения от вида на уравнение (26).

Да допуснем, че цените на борсовия пазар са над 50 лв./MWh, което предполага участието на четирите пазарни участника едновременно, с пазарните им характеристики за 2017 г., описани в табл. 3. Отново игнорираме загубите за пренос и разпределение, ограниченията при преноса и на капацитета на производителите. Табл. 4 представя резултатите на моделирането на пазарно равновесие чрез функции на предлагане. Ефектът от по-малките пределни разходи за 2017 г. е, че цените се задържат на ниски нива и в нито един от интервалите не превишават 56 лв./MWh.

Данните от табл. 4 показват как значително по-ниските пределни разходи на Производител 1 му позволяват да доминира на пазара с количествата си. Тази доминация е по-силно изразена при висока чувствителност на потреблението от цената. Количествата на останалите производители са доста близки до тези на Производител 1 единствено в интервалите 08-09 часа и 13-14 часа – през останалото време те са между 7 и 52% по-малки. Най-големите разлики са в ранните часове на денонощието.

Таблица 4

Пазарни резултати при равновесие на функции на предлагане по оценка на пределните разходи на въглищните производители за 2017 г.

$t$	$p$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\Sigma Q$
12:30 AM	55.35	220.88	159.15	158.34	159.56	697.93
3:30 AM	54.70	215.69	141.33	140.60	141.69	639.31
7:30 AM	57.66	240.19	224.06	222.96	224.62	911.83
8:30 AM	58.36	246.06	243.57	242.37	244.17	976.16
1:30 PM	57.98	243.02	233.67	232.52	234.25	943.46
3:30 PM	57.32	237.24	214.14	213.08	214.67	879.12
6:30 PM	56.90	237.24	200.93	199.94	201.43	835.67
7:30 PM	56.83	232.70	198.62	197.64	199.11	828.07
10:30 PM	56.39	229.11	186.75	185.83	187.21	788.90

Равновесните цени и количества при конкуренция по модела на Курно силно контрастират с представените резултати (вж. табл. 5). Разликите в цените са между 42 и над 220%. Високите цени заличават ценовото предимство на пазарния лидер и количествата, които той предоставя, се доближават до тези на останалите производители. Очаквано, максималните разлики между предоставяните количества са в часовете с висока ценова чувствителност.

Таблица 5

Пазарни резултати при равновесие по модела на Курно и оценка на пределните разходи на производителите за 2017 г.

$t$	$p$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\Sigma Q$
12:30 AM	88.48	160.14	136.99	136.90	137.04	571.07
3:30 AM	77.94	154.75	123.91	123.80	123.96	526.41
7:30 AM	151.96	189.63	182.45	182.38	182.48	736.94
8:30 AM	182.37	200.29	195.69	195.63	195.63	787.24
1:30 PM	149.18	196.81	190.27	190.20	190.31	767.59
3:30 PM	144.95	183.96	175.65	175.59	175.68	710.88
6:30 PM	166.51	166.51	166.68	166.64	166.71	666.54
7:30 PM	183.05	171.99	165.16	165.12	165.18	667.46
10:30 PM	135.53	167.65	156.89	156.83	156.92	638.29

Нека сега допуснем, че пределните разходи на въглищните централи са като тези за 2018 г. в табл. 3. Когато те нараснат до 71-72 лв./MWh, или с между 44 и 46%, равновесната цена се покачва. Табл. 6, където са представени резултатите на моделирането на конкуренцията чрез функции на предлагане, съдържа интервали, в които някои от конвенционалните производители предоставят минимални количества. Това са интервалите с най-висока ценова чувствителност и в тях тези производители могат да реализират значително по-малко електрическа енергия. Заради повишената себестойност на електроенергията им съществено се засилва пазарното доминиране на Производител 1, а в часовете с по-висока ценова чувствителност намалява общото количество на пазара.

Таблица 6

Пазарни резултати при равновесие на функции на предлагане по оценка на пределните разходи на въглищните производители за 2018 г.

$t$	$p$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\Sigma Q$
12:30 AM	74.21	395.17	90.65	49.89	90.02	625.72
3:30 AM	73.60	390.19	66.33	25.10	65.87	547.49
7:30 AM	76.17	411.83	168.81	129.20	167.67	877.51
8:30 AM	76.72	416.61	190.74	151.38	189.46	948.19
1:30 PM	76.39	413.85	177.90	138.31	176.70	906.77
3:30 PM	75.91	409.51	158.23	118.53	157.17	843.44
6:30 PM	75.65	406.99	147.24	107.60	146.25	808.07
7:30 PM	75.62	406.68	146.01	106.43	145.04	804.16
10:30 PM	75.21	403.33	130.17	90.28	129.29	753.07

При Курно-конкуренция с оценката на разходите за 2018 г. пазарните цени са с между 7 и 18% по високи, отколкото при по-ниските разходи през 2017 г. (вж. табл. 7).

Таблица 7

Пазарни резултати при равновесие по модела на Курно и оценка на пределните разходи на въглищните производители за 2018 г.

$t$	$p$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\Sigma Q$
12:30 AM	101.91	196.92	108.78	105.22	108.70	519.64
3:30 AM	91.51	198.54	88.83	84.36	88.75	460.48
7:30 AM	165.01	209.92	168.21	166.46	168.15	712.73
8:30 AM	195.33	217.32	183.92	182.49	183.87	767.60
1:30 PM	161.59	217.31	173.84	171.97	173.77	736.89
3:30 PM	158.03	204.90	160.91	159.10	160.85	685.76
6:30 PM	179.56	190.95	155.20	153.80	155.15	655.09
7:30 PM	196.08	186.64	186.64	153.95	155.13	682.35
10:30 PM	148.68	188.54	142.19	140.39	142.14	613.26

За илюстрация може да бъде разгледан още един сценарий. Ако се допусне, че цените на квотите за емисии нараснат до 27 EUR/тон, или със 76% спрямо тези в оценките за разходите за 2018 г., тогава разходите на производители 2, 3 и 4 ще се увеличат, както следва:  $a_i = \{99, 102, 97\}$ ;  $b_i = \{0.01, 0.01, 0.01\}$ . Моделирането на конкуренцията разкрива ефектите на покачването на цените за квотите върху пазара.

Резултатите при равновесието на функции на предлагане съдържат часови интервали, в които някои от конвенционалните производители предоставят отрицателни количества. Тъй като в моделите това формално не се допуска, трябва да се приеме, че тяхната функция на предлагане за тези интервали е равна на нула –  $q_i(p) = \beta(p - \alpha) = 0$ , като просто при отрицателните количества наклонът на функцията на предлагане  $\beta_i = 0$ . По този начин всеки производител  $i$ , за който  $p(t) > \alpha_i$ , не участва на пазара във времеви интервал  $t$  (табл. 8).

Таблица 8

Пазарни резултати при нарастване на цените на емисиите до 27 EUR/тон и равновесие на функциите на предлагане

$t$	$p$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\Sigma Q$
12:30 AM	91.49	559.54	0.00	0.00	0.00	559.54
3:30 AM	84.38	495.12	0.00	0.00	0.00	495.12
7:30 AM	99.82	634.53	44.99	0.00	154.11	833.64
8:30 AM	101.41	648.77	21.88	0.00	239.96	910.61
1:30 PM	100.04	636.57	56.91	0.00	166.12	859.61
3:30 PM	99.84	634.72	7.65	0.00	155.12	797.48
6:30 PM	99.32	629.76	17.31	0.00	126.15	773.22
7:30 PM	99.33	629.75	17.77	0.00	126.47	774.00
10:30 PM	98.57	623.12	0.00	0.00	85.51	708.63

Заради повишената себестойност на производители 2, 3 и 4 в този сценарий се засилва пазарното доминиране на Производител 1, а Производител 3

заради най-високите си разходи е извън пазара за всички времеви периоди. Цените са средно с между 15 и 32% по-високи от тези с производствени разходи по оценката за 2018 г. Количеството намалява с 4-10%, най-значително в часовете с по-голяма ценова чувствителност.

При конкуренцията по модела на Курно цената нараства с между 8 и 18%, а количествата спадат с 3-18% (вж. табл. 9). Пазарното доминиране на Производител 1 е по-слабо, отколкото при равновесието на функции на предлагане, но то е най-силно при висока ценова чувствителност. При този модел и при високите цени, които той предвижда, всички производители реализират дори минимални количества.

Таблица 9

Пазарни резултати при нарастване на цените на емисиите до 27 EUR/тон и конкуренция по модела на Курно

$t$	$p$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$\Sigma Q$
12:30 AM	118.60	242.62	72.27	72.27	79.65	466.81
3:30 AM	108.37	252.97	43.41	29.50	52.68	682.62
7:30 AM	181.24	235.16	149.76	144.30	153.40	743.04
8:30 AM	211.46	238.53	168.67	164.17	171.67	704.50
1:30 PM	177.84	244.13	154.11	148.24	158.02	654.54
3:30 PM	174.29	230.92	141.83	136.18	145.60	631.26
6:30 PM	195.75	211.61	140.37	136.01	143.27	773.22
7:30 PM	212.23	204.78	142.27	138.50	144.78	630.33
10:30 PM	164.98	214.44	123.22	117.62	126.96	582.24

\*

Основният извод от представеното изследване е, че пазарните резултати са детерминирани от броя и от поведението на пазарните участници, от техните пазарни стратегии, от пределните им разходи и характеристиките на технологиите за производство, както и от времевите интервали, в които се осъществява потреблението. Както диктува теорията, пазарните цени и количества са силно чувствителни на броя производители и техните пределни разходи.

От особен интерес за проучването на либерализирания пазар на електрическа енергия са резултатите от моделирането на олигополния пазар и анализът на сценарии, демонстриран тук чрез моделиране на ефектите на нарастване на цените на квотите за емисии. Ако един производител има пониски пределни разходи (Производител 1), той естествено има пазарна доминация във всички времеви интервали. Неговото доминиране обаче е силно изразено в часовете с висока ценова чувствителност на потреблението (в малките часове на денонощието, когато потреблението е най-ниско). Това се демонстрира от резултатите в табл. 6 и 7, които моделират равновесията във функции на предлагане при различни пределни разходи. Всички производители

с по-високи пределни разходи предлагат по-малки количества на пазара от Производител 1 в различните времеви интервали.

Типът конкуренция има голямо значение за пазарните резултати. Когато тя се моделира като „Курно“, цените нарастват значително. Освен това количествата, които всички производители предоставят, са близки, но тези на Производител 1 винаги са по-големи. Запазва се тенденцията разликите между тях да са най-сериозни в часовете с висока ценова чувствителност (малките часове на денонощието). Равновесието от функции на предлагане е близко до конкурентното предлагане. Една възможна интерпретация на това е пазарното доминиране на един от производителите (Производител 1), който има значително по-ниски пределни разходи. Признак на неговата пазарна доминация е, че разликите в предоставяните количества в часовете интервали спрямо тези на останалите производители намаляват с понижаването на степента на конкуренция, чийто предел може да се дефинира като Курно-граница. На тази граница максималните цени са близки до монополните и предоставяните количества се изравняват.

Важно е да се отбележи, че моделите са просто инструменти за мислене, както всички останали инструменти на този свят. Те са полезни тогава, когато се използват за това, за което са предназначени. Моделирането на пазарната структура е един управленски инструмент, който информира тези, които трябва да взимат стратегически решения за сектора. След като бъдат зададени едни или други въпроси и използваните модели отговорят на тях, е нужно получените отговори да се обмислят разумно. За съжаление историята на българския енергиен сектор демонстрира, че това се случва рядко. Представеното изследване е опит тази тенденция да бъде преодоляна.

*Използвана литература:*

Green, R. and D. Newbery, (1992). Competition in the British Electricity Spot Market. *Journal of Political Economy*, Vol. 100, N 51 (100), p. 929-953.

Green, R. (1996). Increasing Competition in the British Electricity Spot Market. *Journal of Industrial Economics* 44(2), p. 205-216.

Klemperer, P. and M. Meyer (1989). Supply Function Equilibria in Oligopoly under Uncertainty. *Econometrica*, Vol. 57, N 6, p. 1243-1277.

Baldick, R., R. Grant, and E. Kahn (2004). Theory and Application of Linear Supply Function Equilibrium in Electricity Markets. *Journal of Regulatory Economics* 25 (2), p. 143-167.

Rudkevich, A., M. Duckworth and R. Rosen (1998). Modeling Electricity Pricing in a Deregulated Generation Industry: the Potential for Oligopoly Pricing in a Poolco. *The Energy Journal*, 19(3), p. 19-48.

12.09.2019 г.