

Mariusz Kaleta*, Kamil Smolira*, Eugeniusz Toczyłowski*

Optymalizacja struktury procesów rynkowych

1. Wprowadzenie

Większość złożonych, rozproszonych systemów rynkowych, takich jak rynki energii bądź rynki usług telekomunikacyjnych, charakteryzuje się skomplikowaną strukturą procesów bilansowania, które powiązane są ze sobą różnorodnymi zależnościami. Poszczególne procesy często różnią się znacząco częstotliwością działania i horyzontem planowania oraz mogą być realizowane przez różne podmioty działające na rynku. Powoduje to znaczną komplikację zagadnienia projektowania struktury czasowej takich rynków, które musi obejmować wiele cyklicznie powtarzanych procesów takich jak: modelowanie, optymalizacja, analiza i symulacja [1, 2]. Jednym z istotnych elementów tego łańcucha projektowego jest model optymalizacyjny generujący propozycje harmonogramów procesów rynkowych na podstawie wymagań i preferencji określonych przez projektanta.

W pracy została przedstawiona propozycja wielokryterialnego modelu optymalizacji struktury procesów rynkowych w postaci dyskretno-ciągłego zadania programowania mieszanego. Rozważono zarówno możliwości elastycznego modelowania wymagań dotyczących procesów oraz występujących pomiędzy nimi zależności, jak i możliwości ich wygodnego określania i zmian przez projektanta. Przeanalizowano również kryteria oceny możliwe do wykorzystania w analizowanym problemie, opierając się na przykładzie rynku energii elektrycznej.

1.1. Procesy rynkowe

Poszczególne procesy odbywające się w ramach rozproszonych systemów rynkowych są zazwyczaj bardzo zróżnicowane. Obejmują one procesy ofertowe, procesy bilansowania poszczególnych segmentów rynku oraz publikacji różnorodnych danych. Segmenty rynku mogą się między sobą znacząco różnić pod względem stosowanych mechanizmów (giełda, handel bilateralny, bilansowanie z uwzględnieniem aspektów technicznych), horyzontu

* Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska

planowania (od kilku godzin do kilku miesięcy), wyprzedzenia względem czasu rzeczywistej dostawy lub odbioru towarów oraz obejmowanego obszaru rynku. Mogą być one również prowadzone przez różne podmioty rynkowe.

Z punktu widzenia zadania harmonogramowania można częściowo zaniedbać tę różnorodność. Procesy mogą być traktowane jak „czarne skrzynki” przetwarzające dane opisywane wyłącznie przez *horyzont trwania* – czas, w jakim dany proces ma miejsce, oraz *horyzont planowania* – okres, jakiego dotyczą przetwarzane przez niego dane (okres fizycznej dostawy/odbioru towarów), co w pełni wystarcza do ich umiejscowienia w czasie. Różnorodność procesów rynkowych może zostać zamodelowana poprzez zdefiniowanie odpowiednich ograniczeń dotyczących pojedynczych procesów i ich grup, a także poprzez określenie właściwych kryteriów optymalizacji.

2. Zagadnienie optymalizacji procesów rynkowych

Ponieważ cała złożoność i specyfika procesów rynkowych musi zostać zamodelowana w postaci ograniczeń, potrzebny jest taki sposób ich definiowania, który będzie wystarczająco elastyczny tak, aby możliwe było wykorzystanie zaproponowanego modelu w różnorodnych dziedzinach. Istotne jest również, aby wprowadzanie ograniczeń było dogodne dla decydenta i umożliwiało określanie w prosty sposób wszystkich istotnych zależności pomiędzy procesami.

Większość wymagań i zależności dotyczących procesów rynkowych można zapisać za pomocą tzw. *relacji poprzedzania*, oznaczanej dalej jako $r(\cdot)$, która określa minimalny i maksymalny odstęp pomiędzy początkiem bądź końcem horyzontu trwania lub planowania dla wybranych par procesów. Relacja ta jest dość uniwersalna i można ją stosować zarówno dla określenia wymagań dotyczących pojedynczego procesu (np. dopuszczalny czas trwania procesu), jak i do określania zależności pomiędzy różnymi procesami uwzględniając kolejność przepływu danych i wymagane odstępy czasowe pomiędzy ich przetwarzaniem. Jest ona jednocześnie prosta koncepcyjnie, ponieważ opiera się na określeniu dopuszczalnego zakresu różnicy dwóch wartości.

2.1. Model matematyczny

Zbiory:

- P – zbiór potencjalnych procesów na rynku,
- S – zbiór segmentów wyróżnionych na rynku,
- P_s – zbiór procesów należących do segmentu s ,
- R – zbiór par zmiennych będących w relacji poprzedzania,
- K – zbiór par procesów komplementarnych,
- W – zbiór par procesów wymuszonych.

Zmienne decyzyjne określają lokalizację procesów i ich horyzontów planowania w czasie:

t_i^p / t_i^k – początek / koniec horyzontu trwania procesu i ,

p_i^p / p_i^k – początek / koniec horyzontu planowania procesu i ,

v_i – zmienna binarna przyjmująca wartość 1, gdy proces i jest wykorzystywany, 0 w p.p.

Parametry:

L_{xy} / U_{xy} – dolna i górna granica relacji $r(x, y)$,

$L_i^{t,p} / U_i^{t,p}$ – dolne i górne ograniczenie horyzontu trwania/planowania procesu i ,

M – duża liczba.

Ograniczenia podstawowej wersji modelu można zapisać w następujący sposób:

$$-(2 - v_i - v_j)M + L_{xy} \leq x - y \leq U_{xy} + (2 - v_i - v_j)M \quad \forall (x, y) \in R \quad (1)$$

$$v_i = v_j \quad \forall (i, j) \in K \quad (2)$$

$$v_i \leq v_j \quad \forall (i, j) \in W \quad (3)$$

$$L_i^{t,p} v_i \leq t_i^p, t_i^k, p_i^p, p_i^k \leq U_i^{t,p} v_i \quad \forall i \in P \quad (4)$$

Ograniczenie (1) reprezentuje wszystkie relacje poprzedzania występującym w modelu. Symbole x i y odpowiadają wszystkim parom zmiennych $t_i^p, t_i^k, p_i^p, p_i^k$, które są powiązane jakąś relacją. Ze względu na to, że część procesów nie jest wykorzystana, do ograniczenia dodane są człony $(2 - v_i - v_j)M$, które je relaksują w przypadku, gdy dane procesy nie są aktywne ($v_i = 0$). Ograniczenie (2) pozwala na wymuszenie komplementarności określonych par procesów (mogą występować tylko razem), zaś ograniczenie (3) na określenie par procesów, z których wystąpienie jednego wymusza wystąpienie drugiego. Ograniczenie (4) określa dopuszczalne granice horyzontów trwania i planowania wszystkich procesów oraz ustala na zero wszystkie zmienne opisujące niewykorzystane procesy.

W wielu przypadkach do podstawowych ograniczeń (1)–(4) potrzebne jest dodanie ograniczeń wymuszających pokrycie określonego okresu czasu przez horyzont planowania całego segmentu rynku. Można do tego wykorzystać np. ograniczenia (5)–(7).

$$s_s \leq p_i^p + (1 - v_i)M \quad \forall s \in S, i \in P_s \quad (5)$$

$$k_s \geq p_i^k - (1 - v_i)M \quad \forall s \in S, i \in P_s \quad (6)$$

$$k_s - s_s \geq h_s - 1 \quad \forall s \in S \quad (7)$$

Ograniczenia (5) i (6) określają początek – s_s oraz koniec – k_s horyzontu planowania segmentu s na podstawie początków i końców horyzontów planowania wszystkich należących do niego procesów – P_s . Ograniczenie (7) wymusza, aby różnica pomiędzy nimi była nie mniejsza niż minimalny horyzont planowania danego segmentu rynku – h_s . Ograniczenia (5) i (6) pozwalają na ustalenie zmiennych s_s i k_s odpowiednio poniżej bądź powyżej rzeczywistego początku lub końca horyzontu planowania, i ze względu na złożoną postać funkcji celu w niektórych przypadkach może to rzeczywiście mieć miejsce. W takiej sytuacji konieczne byłoby dodanie dodatkowych ograniczeń wymuszających ściśle ustalenie wartości zmiennych s_s i k_s oraz dodatkowych zmiennych binarnych, ale w dużej liczbie przypadków wystarczające okazuje się dodanie prostszego ograniczenia (8).

$$\sum_{i \in P_s} (p_i^k - p_i^s + v_i) \geq h_s \quad \forall_{s \in S} \quad (8)$$

Jeżeli horyzonty procesów planowania należących do jednego segmentu nie zachodziłyby na siebie, to ograniczenia (5)–(8) w każdej sytuacji zapewniałyby pokrycie założonego horyzontu planowania oraz jednocześnie jego ciągłość. Ponieważ jednak w wielu przypadkach horyzonty planowania kolejnych procesów mogą nachodzić na siebie, tworząc tzw. *zakładki*, ciągłość musi zostać zapewniona w inny sposób, np. przy pomocy odpowiednich relacji poprzedzania.

Kryteria oceny

Rozważny problem jest zadaniem wielokryterialnym z dużą liczbą potencjalnych kryteriów. Dodatkowo znaczna ich część, tylko w przybliżony sposób określa rzeczywiste miary jakości harmonogramu, takie jak np. bezpieczeństwo, bądź koszty bilansowania, których faktyczne wartości mogą zostać wyznaczone jedynie w drodze symulacji, bądź analizy działającego systemu rynkowego [1, 2].

Część z kryteriów jest uniwersalna i może znaleźć zastosowanie na różnorodnych systemach rynkowych, ale niektóre z nich są specyficzne i charakterystyczne dla określonej dziedziny gospodarki. Poniżej zostały przedstawione kryteria możliwe do zastosowania na rynku energii elektrycznej.

Czas trwania procesów (T). Pozwala na maksymalizację czasu trwania najkrótszego z wykorzystanych procesów. Można go wyznaczać osobno dla różnych kategorii procesów, np. bilansowania lub przetwarzania danych. Maksymalizacja w przypadku procesów bilansowania umożliwia zwiększenie marginesu bezpieczeństwa dla czasu rozwiązywania zadania bilansowania, zaś dla procesów ofertowych wpływa na poprawę jakości ofert zgłaszanych przez uczestników.

$$T \leq t_i^k - t_i^p + 1 + (1 - v_i)M \quad \forall_{i \in P_s} \quad (9)$$

Liczba procesów (Lp). W zależności od tego czy jest maksymalizowana, czy minimalizowana odpowiada za częstotliwość procesów bilansowania, a co za tym idzie, bezpieczeństwo systemu rynkowego, albo za prostotę harmonogramu.

$$Lp = \sum_{i \in P} v_i \quad (10)$$

Symetria horyzontu trwania / planowania (St/Sp): Określa różnicę w czasie trwania pomiędzy najkrótszymi i najdłuższymi procesami w danym segmencie rynku. Symetria zapewnia, że jakość harmonogramu jest jednakowa dla wszystkich obejmowanych przez niego etapów. Symetryczne procesy są też zazwyczaj preferowane przez uczestników rynku.

$$St = \sum_{s \in S} (lg_s - sh_s) \quad (11)$$

$$lg_s \geq t_i^k - t_i^p + v_i \quad \forall_{s \in S, i \in P_s} \quad (12)$$

$$sh_s \leq t_i^k - t_i^p + 1 + (1 - v_i)M \quad \forall_{s \in S, i \in P_s} \quad (13)$$

gdzie lg_s / sh_s – najdłuższy i najkrótszy proces w segmencie s .

Symetria rozłożenia procesów (S). Dąży do możliwie równomiernego rozłożenia procesów z danej grupy (np. segmentu rynku) w ramach całego okresu harmonogramowania (np. doby), co również zapewnia stałą jakość harmonogramu dla poszczególnych etapów. Zazwyczaj stoi w sprzeczności z kryterium unikania procesów w niepożądanych okresach.

$$S \geq t_j^k - (t_i^k - PC_{ij}) \quad \forall_{(i,j) \in G} \quad (14)$$

gdzie:

G – zbiór par procesów, pomiędzy którymi badamy odstęp,
 PC_{ij} – dla pary składającej się z pierwszego i ostatniego procesu – założony cykl powtarzania danego segmentu (np. 24 h); 0 w p.p. Pozwala na uwzględnienie symetrii pomiędzy pierwszym procesem z danego cyklu i ostatnim z cyklu poprzedniego.

Odstęp od czasu rzeczywistego (Or): Pozwala na minimalizację największego odstępu wybranych procesów od czasu rzeczywistego, rozumianego jako horyzont planowania danego procesu. W przypadku procesów rynku czasu rzeczywistego oraz rynku dnia bieżącego odpowiada to za bezpieczeństwo bilansowania i jakość uzyskiwanych programów (ich dostosowanie do aktualnej sytuacji).

$$Or \geq \sum_{i \in B} (p_i^p - t_i^k) \quad (15)$$

gdzie B – zbiór procesów, które powinny mieć miejsce blisko czasu rzeczywistego.

Odstęp pomiędzy procesami „sąsiednimi” (Os): Pozwala na minimalizację największego odstępu w czasie pomiędzy procesami, dla których powinien on być możliwie krótki. Pozwala np. na umiejscowienie procesów ofertowych możliwie blisko odpowiadających im procesów bilansowania.

$$Os \geq \sum_{(i,j) \in N} (t_j^p - t_i^k - 1) \quad (16)$$

gdzie N – zbiór procesów sąsiednich.

Liczba procesów w niepożądanych okresach (Kr): Umożliwia redukcję wystąpień procesów w godzinach niepożądanych, np. nocnych, oraz synchronizację z innymi platformami obrotu.

$$Kr = \sum_{i \in U, c \in C_i} k_{ic} z_{ic} \quad (17)$$

$$-(1 - z_{ic})M + L_{ic}^c \leq t_i^k \leq U_{ic}^c + (1 - z_{ic})M \quad \forall_{i \in U, c \in C_i} \quad (18)$$

$$\sum_{c \in C_i} z_{ic} = v_i \quad \forall_{i \in U} \quad (19)$$

gdzie:

- U – zbiór procesów, dla których określono niekorzystne przedziały czasowe,
- C_i – zbiór przedziałów czasowych wyznaczonych dla procesu i ,
- L_{ic}^c/U_{ic}^c – górne i dolne ograniczenie przedziału c , dla procesu i ,
- k_{ic} – kara za zakończenie procesu i w przedziale c ,
- z_{ic} – zmienna binarna równa 1, gdy proces i kończy się w przedziale c , 0 w p.p.

Długość horyzontu planowania (Hp): Pozwala na maksymalizację najkrótszego horyzontu planowania w danej grupie procesów (np. segmencie). Odpowiada zwiększeniu bezpieczeństwa, gdyż procesy o dłuższym horyzoncie planowania dają przeważnie lepsze wyniki. Kryterium to zazwyczaj koliduje z kryterium minimalizacji odstępu od czasu rzeczywistego dla segmentów następnych.

$$Hp \leq p_i^k - p_i^p + 1 + (1 - v_i)M \quad \forall_{i \in P_S} \quad (20)$$

Większość z przedstawionych powyżej kryteriów jest nieporównywalna. Nawet pomimo to, że część ich jest wyrażona w tych samych jednostkach (np. liczba etapów elementarnych), to nie istnieje bezpośrednia metoda porównania ich wartości. Z tego powodu, oraz ze względu na interaktywny sposób wykorzystania narzędzi wspomagania decyzji przez projektanta, najlepszą metodą modelowania preferencji decydenta wydaje się metoda punktu

odniesienia [3, 4]. Umożliwi ona wprowadzenie preferencji projektanta w sposób naturalny, bez potrzeby ich przekształcania do określonej postaci matematycznej oraz na ich intuicyjne zmiany na podstawie analizy uzyskiwanych wyników.

3. Określanie wymagań i preferencji

Sformułowanie modelu w postaci (1)–(8), jest bardzo ogólne i wykorzystanie go wymaga uprzedniego dostosowania do rozważanego przypadku. W tym celu należy określić procesy, które potencjalnie mogą mieć miejsce na rynku (zbiór P), horyzont czasowy, dla jakiego przeprowadzane jest harmonogramowanie ($L_i^{t,P}, U_i^{t,P}$), zbiory procesów komplementarnych i wymuszonych (K, W) oraz przede wszystkim relacje poprzedzania, bez których nie będą odzwierciedlane żadne zależności i ograniczenia występujące w rzeczywistości, a procesy będą mogły być ułożone niemal dowolnie. Wymaga to włożenia dość dużego wysiłku przez projektanta, ale jest to wysiłek jednorazowy. Po wstępnym dostosowaniu modelu do rozważanego przypadku dalsze badania procesów wymagają drobnych zmian parametrów bądź relacji pomiędzy procesami i mogą być dokonywane dość łatwo.

W celu uszczegółowienia modelu istotne jest też określenie właściwych kryteriów optymalizacji. Można w tym celu wykorzystać kryteria zaproponowane w podpunkcie „Kryteria oceny”, z których większość odzwierciedla wymagania typowe dla dużej części systemów rynkowych. W niektórych przypadkach może zaistnieć potrzeba wprowadzenia do modelu dodatkowych kryteriów, specyficznych dla danej dziedziny. Może to również wymagać pewnego nakładu pracy, ale ponownie jak w przypadku wstępnego definiowania relacji jest procesem jednorazowym.

3.1. Praca z modelem

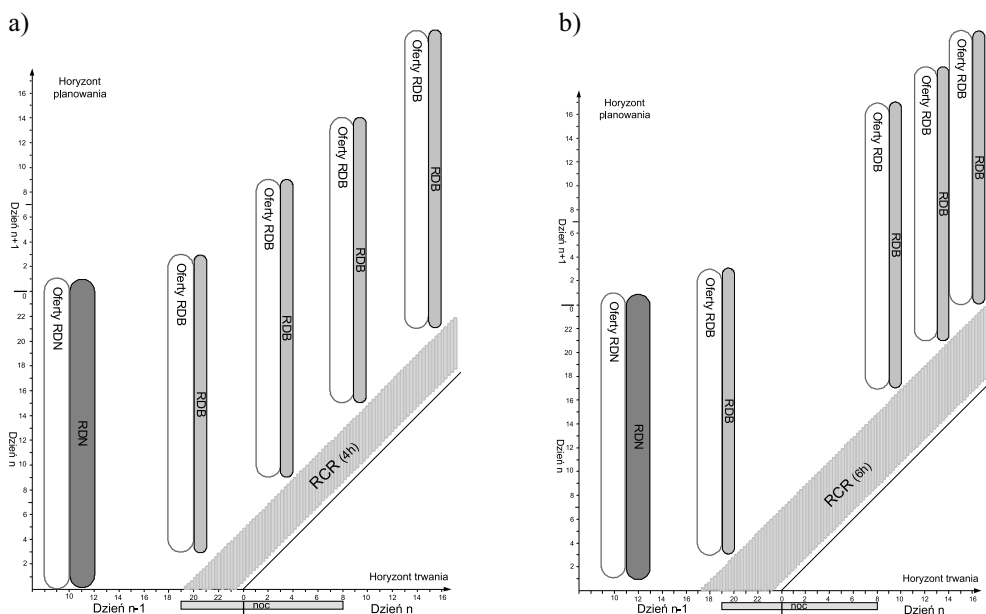
Po wstępnym dostosowaniu modelu do rozważanego przypadku dalsza praca projektanta polega głównie na przeglądzie rozwiązań Pareto-optymalnych [5] uzyskiwanych dla różnych punktów odniesienia, które odzwierciedlają jego model preferencji [3]. Podczas przeglądu rozwiązań Pareto-optymalnych projektant może również zamieniać granice obowiązujących relacji poprzedzania (L^{xy}/U^{xy}), bądź ograniczać możliwy horyzont trwania i planowania konkretnych procesów ($L_i^{t,P}, U_i^{t,P}$). W skrajnych przypadkach może to nawet prowadzić, do sztywnego umiejscowienia danego procesu w czasie. W początkowej fazie pracy z modelem na podstawie analizy uzyskiwanych wyników projektant może także dojść do wniosku, że istnieje potrzeba dodania bądź modyfikacji części z kryteriów bądź relacji. Zmiany te można potraktować jako weryfikację i korektę wstępnego dostrojenia modelu.

Przykładowe zastosowanie

Przedstawiony model został wykorzystany do optymalizacji struktury procesów rynku energii elektrycznej składającego się segmentów rynku dnia następnego (RDN), rynku dnia

bieżącego (RDB) oraz rynku czasu rzeczywistego (RCR) [6]. Wykorzystano wszystkie kryteria optymalizacji przedstawione w podpunkcie „Kryteria oceny”, przy czym najkrótszy czas trwania procesów (T) wyznaczano osobno dla procesów bilansowania i procesów ofertowych, symetrię rozłożenia procesów (S) oraz odstęp od czasu rzeczywistego (Or) wyznaczono tylko dla segmentu RDB, zaś długość horyzontu planowania (Hp) dla segmentów RDB i RCR. Jako okresy niepożądane dla wszystkich procesów ofertowych określono godziny nocne.

Przykładowe zależności i warunki określone przy pomocy relacji poprzedzania to: dopuszczalny czas trwania procesów, kolejność segmentów rynku, kolejność procesów w ramach segmentu, zakończenie procesów ofertowych przed procesami bilansowania, nie nachodzenie procesów z kolejnych dni na siebie – $r(t^k, t^p)$; dopuszczalna długość i kolejność horyzontów planowania – $r(p^k, p^p)$, $r(p^p, p^p)$; zgodność horyzontów planowania procesów ofertowych i odpowiadających im procesów bilansowania – $r(p^p, p^p)$, $r(p^k, p^k)$; dopuszczalny odstęp procesów od czasu rzeczywistego – $r(p^p, t^k)$.



Rys. 1. Przykładowe harmonogramy uzyskane podczas optymalizacji: a) symetryczne procesy RDB; b) brak procesów ofertowych kończących się w godzinach nocnych

Rysunek 1 przedstawia przykładowe harmonogramy procesów uzyskane przy powyższych założeniach dla różnych punktów odniesienia, kładących różnicowany nacisk na symetrię procesów oraz unikanie procesów ofertowych w godzinach nocnych. Harmonogramy przedstawione są na tzw. płaszczyźnie czasowej, gdzie oś pozioma oznacza czas, w którym procesy mają miejsce, a pionowa, ich horyzont planowania, zaś procesy są repre-

zentowane jako prostokąty [1]. Jak widać, zmieniając swoje preferencje wyrażane za pomocą punktu odniesienia, projektant może uzyskać dość zróżnicowane wyniki, np. zupełnie symetryczny RDB, bądź harmonogram bez procesów ofertowych kończących się w nocy, z których może wybrać rozwiązanie najbardziej mu odpowiadające. Odpowiednio zmieniając punkt odniesienia można również uzyskać wyniki pośrednie – prawie symetryczne i z małą liczbą procesów w godzinach nocnych.

4. Podsumowanie

Zaprezentowana w pracy ogólna postać modelu optymalizacji procesów rynkowych oraz jego konkretyzacja na przykładzie krótkoterminowych rynków energii elektrycznej wskazuje, że możliwe jest stworzenie narzędzi wspomagających pracę projektanta procesów rynkowych poprzez generację propozycji harmonogramów zgodnych z narzuconymi wymaganiami oraz Pareto-optymalnych względem określonych kryteriów. Narzędzia takie mogą znacznie ułatwić pracę projektanta. Należy jednak zaznaczyć, że są one tylko jednym z elementów łańcucha projektowego, a uzyskane wyniki wymagają weryfikacji poprzez analizę i symulację oraz często poprawek bądź ponownej optymalizacji. Ponadto wykorzystanie modelu wymaga dużo pracy związanej z jego początkowym dostrojeniem. Zastosowanie go ma więc sens tylko w przypadku złożonych projektów oraz takich, które będą wielokrotnie modyfikowane.

Literatura

- [1] Kaleta M., Smolira K., Toczyłowski E., *Wspomaganie projektowania struktury czasowej procesów rynku energii elektrycznej*. REE 2009 I (III), 55.
- [2] Kaleta M., Smolira K., Toczyłowski E., *Możliwości usprawnienia struktury procesów rynku bilansującego energii*. REE 2009 II (IV), 116.
- [3] Ogryczak W., *Wielokryterialna optymalizacja liniowa i dyskretna: modele preferencji i zastosowania do wspomagania decyzji*. Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 1997.
- [4] Wierzbicki A.P., *Reference point approaches*. Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications, Kluwer Academic Publishers, Boston 1999, 9–39.
- [5] Steuer R.E., *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. John Wiley and Sons, New York 1986.
- [6] Stoft S., *Power System Economics*. Wiley-IEEE Press, 2002.