

MECHANIZMY BILANSOWANIA OFERT NA LOKALNYM RYNKU ENERGII PRZY WYPUKŁYCH FUNKCJACH KOSZTÓW*

Piotr PAŁKA*, Eugeniusz TOCZYŁOWSKI**, Izabela ŻÓŁTOWSKA***

*Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, e-mail: P.Palka@elka.pw.edu.pl

**Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, e-mail: E.Toczyłowski@ia.pw.edu.pl

***Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, e-mail: I.Zoltowska@elka.pw.edu.pl

Abstract

Deregulacja sektora elektroenergetycznego powoduje, że obrót energią elektryczną jest prowadzony na rynkowych zasadach. Wytwórcy biorący udział w typowych segmentach rynku są zmuszeni składać oferty sprzedaży nie uwzględniające ograniczeń pracy ciepłych jednostek wytwórczych. W pracy omawiamy projekt procesu aukcyjnego, oparty na jednoetapowym mechanizmie bilansowania ofert wypukłych o ograniczonym zakresie elastyczności. Optymalizacja obrotu przy ograniczeniach odbywa się przy zastosowaniu modelu bilansowania ilościowego, który w sposób jawny i niedyskryminujący określa zasady wyboru ofert. Następnie, przy wykorzystaniu modelu bilansowania wartościowego są wyznaczane ceny rynkowe kupna i sprzedaży, zachowujące warunki sprawiedliwej konkurencji.

1 WSTĘP

W wielu krajach świata, w tym także w Polsce, elektroenergetyka wprowadza zmiany w organizacji i zasadach funkcjonowania na rzecz rynkowych rozwiązań opartych na konkurencji i deregulacji.

Nowe warunki działalności powodują zwiększenie ryzyka oraz odpowiedzialności uczestników rynku, a szczególnie wytwórców energii. Stąd potrzeba powstawania nowych modeli wspierających decyzje wytwórców, odpowiadających rynkowym wymaganiom. Zasadnicze znaczenie mają formy usług wspomagających obrót energią, umożliwiającących bilansowanie strony popytu i podaży. W pracy

prezentujemy oryginalne podejście do modelowania mechanizmu bilansowania, na bazie procesu ofertowego na lokalnym rynku energii. Pokazujemy, że w oparciu o parametryczny model obrotu rynkowego [4] jest możliwe stworzenie warunków sprawiedliwej konkurencji i poprawa efektywności ekonomicznej dla rynku, skupiającego ciepłe jednostki wytwórcze o wypukłych funkcjach kosztów. W proponowanym podejściu analizujemy niedyskryminujące zasady określania ceny zakupu i sprzedaży energii w pojedynczej sesji procesu ofertowego, koordynowanego przez operatora danego rynku.

W literaturze omówiono wiele rodzajów zasad i modeli organizacji rynków energii. Wśród funkcjonujących z powodzeniem rynków (angielski, hiszpański, kalifornijski, skandynawski), do najpopularniejszych należą rozwiązania, gdzie niezależny operator ustala raz w ciągu doby ceny

*Praca finansowana w ramach projektu 3T11C00527

równowagi w poszczególnych etapach kolejnej doby, na podstawie zgłaszanych przez jego aktywnych uczestników ofert zakupu i sprzedaży. Cena równowagi jest wyznaczana przez najwyższą, zaakceptowaną do realizacji ofertę sprzedaży [3]. Oferty uczestników mają postać funkcji monotonicznych, łatwo przekształcalnych do funkcji schodkowych.

Najprostszy mechanizm aukcyjny nie uwzględnia złożonych ograniczeń występujących po stronie wytwarzania, związanych np. z charakterystykami rozruchowymi i niemonotonicznymi kosztami generacji jednostek ciepłych. Wytwórcy muszą podejmować proces indywidualnego planowania swoich jednostek, tak aby odzwierciedlić te ograniczenia w ofertach schodkowych [2]. Jednakże nawet przy najlepszych chęciach składania szczyrych ofert, wytwórcy energii nie są w stanie skonstruować takich ofert schodkowych, które dokładnie odpowiadały rzeczywistym kosztom. Dlatego np. na rynku hiszpańskim wzbogacono prosty mechanizm obrotu giełdowego o dodatkowe możliwości składania tzw. ofert niepodzielnych (ang. *non-divisible quantity bids*) oraz wprowadzono warunek na minimalny akceptowalny poziom dziennych przychodów [1]. Badane są też iteracyjne mechanizmy aukcyjne np. na rynku kalifornijskim [5], czy hiszpańskim [1], które mają bardzo dobre właściwości, chociaż są ciągle zbyt złożone do rzeczywistej implementacji.

2 OBRÓT ENERGIĄ W UJĘCIU ILOŚCIOWYM

Podstawową funkcją operatora w zakresie bilansowania na danym rynku jest zagwarantowanie jak najlepszych warunków obrotu towarowego dla wszystkich uczestników rynku, prowadzących do bilansowania strony popytowej i podaźowej w ujęciu ilościowym i wartościowym. Bilansowanie ilościowe polega na ustaleniu, które z ofert kupna i sprzedaży będą zrealizowane w formie zawartych transakcji, a które z nich będą odrzucone oraz ustaleniu wolumenów sprzedaży i kupna. Podstawowym kryterium bilansowania ilościowego jest osiągnięcie w każdym etapie bilansu, przy maksymalizacji korzyści ekonomicznych wynikających z wymiany towarów i usług. Współcześnie podejmowanie właściwych decyzji przez operatora

rynku wymaga zatem komputerowego wspomaganie i stosowania złożonych algorytmów optymalizacyjnych. W rozważanych modelach bilansowania

uwzględniamy elastyczność popytu. Zakładamy, że w ramach pojedynczej sesji giełdowej kupujący zgłaszają oferty kupna $m \in B$, które zawierają cenę ofertową e_m oraz maksymalny wolumen energii do kupienia d_m^{\max} .

Po stronie wytwarzania aktywnymi uczestnikami rozważanego obszaru rynku energii są jednostki grafikowe elektrowni ciepłych, grupujące jednostki wytwórcze w postaci bloków ciepłych. Wszystkie jednostki (lub ich agregaty) zgłaszają oferty sprzedaży $l \in S$, które m.in. zawierają minimalny p_l^{\min} i maksymalny p_l^{\max} wolumen energii do sprzedaży. Taka postać oferty wymaga wprowadzenia zmiennej binarnej v_l , która przyjmuje wartość 1 wtedy, gdy oferta zostanie przyjęta do realizacji, a 0 w przeciwnym przypadku.

Powszechnie stosowane oferty sprzedaży w postaci *monotonicznie* narastających pasm cenowych nie pozwalają na dobre odzwierciedlenie rzeczywistych charakterystyk zmiennych kosztów wytwarzania, gdyż koszty mogą rosnąć przy *redukcji* mocy, jak na rys. 1. Odpowiednim modelem dla konstrukcji ofert sprzedaży jednostek wytwórczych jest przedziałami liniowy, wypukły model funkcji kosztów $K_l(p_l)$.

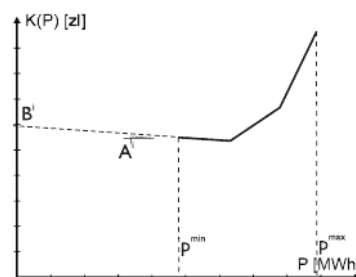


Figure 1: Przedziałami liniowa, wypukła funkcja $K_l(p)$ kosztów produkcji jednostki l : A_i jest nachyleniem a B_i jest kosztem stałej opłaty dla i -tej części liniowej krzywej kosztów

Bilansowanie ilościowe jest procesem optymalizacji obrotu towarowego i sprowadza się do maksymalizacji dobrobytu Q , czyli sumarycznej nadwyżki wartości energii kupowanej ponad wartość ofertową sprzedaży energii [4]. Problem ten jest formułowany w sposób formalny w postaci zadania

programowania matematycznego o prostej strukturze:

$$\hat{Q} = \max_{d,p} \left[Q = \sum_{m \in B} e_m d_m - \sum_{l \in S} K_l \right] \quad (1)$$

przy ograniczeniach

$$\sum_{m \in B} d_m \leq \sum_{l \in S} p_l \quad (2)$$

$$0 \leq d_m \leq d_m^{\max}, \quad m \in B \quad (3)$$

$$p_l^{\min} v_l \leq p_l \leq p_l^{\max} v_l, \quad v_l \in \{0, 1\}, l \in S \quad (4)$$

$$A_l^i p_l + B_l^i v_l \leq K_l, \quad i \in I_l, l \in S \quad (5)$$

Oznaczenia: p_l^{\min} – minimalny wolumen produkcji oferowany przez l -tego sprzedawcę; p_l^{\max} – maksymalny wolumen produkcji oferowany przez l -tego sprzedawcę; d_m^{\max} – maksymalny wolumen kupna oferowany przez m -tego kupującego; e_m – cena ofertowa oferowana przez m -tego kupującego; I_l – zbiór indeksów liniowych kawałków krzywej kosztów $K_l(p)$ kosztów jednostki l ; B_l^i – współczynnik przesunięcia i -tej liniowej części krzywej kosztów jednostki l .

W wyniku rozwiązania zadania optymalizacji określone są wartości zmiennych decyzyjnych, określających wielkości zawartych transakcji: d_m – wielkość zakupionego towaru według m -tej oferty kupna; p_l – wielkość sprzedanego towaru według l -tej oferty sprzedaży; K_l – całkowity koszt produkcji energii według l -tej oferty. Ponadto określany jest zbiór ofert sprzedaży przyjętych do realizacji (zmienna v_l).

Przyjęcie danej oferty do realizacji przez operatora oznacza zawarcie transakcji a zarazem zmianę aktualnej pozycji kontraktowej jednostki. Bieżącym wynikiem realizowanego procesu bilansowania jest programowanie jednostek wytwórczych, spełniające ograniczenia bilansowe dotyczące pokrycia zapotrzebowania na moc i ograniczenia techniczne jednostek. Prezentowany model bilansowania ilościowego, określający zasady wyboru ofert bilansujących, jest jawny i niedyskryminujący poszczególnych uczestników rynku.

3 OBRÓT ENERGIĄ W UJĘCIU WARTOŚCIOWYM

W procesie bilansowania ilościowego podjęto decyzje o wolumenach zawartych transakcji, w wyniku czego można określić osiągnięty poziom dobrobytu Q . Obecnie jesteśmy zainteresowani wyznaczeniem cen rynkowych kupna i sprzedaży oraz dokonaniem podziału uzyskanego dobrobytu Q pomiędzy oferty. Celem takiego procesu, nazywanego *bilansowaniem wartościowym* jest uzyskiwanie rozwiązań sprawiedliwych i satysfakcjonujących poszczególnych uczestników.

W warunkach doskonałej konkurencji cena rynkowa ustala się na takim poziomie, że transakcje zawierają wszyscy ci sprzedający, którzy oferują niższe ceny i kupujący oferujący wyższe ceny. Jednak efektywne bilansowanie stron popytu i podaży na rynku energii może wymagać przyjęcia ofert zakupu poniżej ceny rynkowej, lub ofert sprzedaży powyżej tej ceny. Co więcej, względy efektywnościowe mogą wymusić odrzucenie ofert niektórych konkurencyjnych uczestników. Takie przypadki mogą być wymuszone ograniczeniami istniejącymi na rynku.

Uwzględnienie omawianych ograniczeń implikuje powstawanie kosztów, tzw. kosztów usług systemowych. Zachowanie neutralności finansowej operatora jest możliwe tylko wtedy, gdy niezbędne koszty ogólne są pokrywane z osiągniętej nadwyżki Q . Tym samym jest uzasadnione różnicowanie cen zakupu π^K i sprzedaży π^S , tak że część ogólnego dobrobytu dana jako $D(\pi^K - \pi^S)$ (D oznacza sumaryczny wolumen obrotu) jest przeznaczona na pokrycie kosztów systemowych.

Koszty systemowe po stronie kupna
Przyjęte do realizacji przez operatora rynku oferty kupna, z cenami ofertowymi e_m poniżej rynkowej ceny kupna π^K , implikują powstanie kosztów bilansowania $R_{K,m}$, nazywanych *kosztami kupna wymuszonymi względami systemowymi*.

Z drugiej strony, dla zapewnienia indywidualnej sprawiedliwości konieczna jest wypłata rekompensaty dla konkurencyjnych ofert kupna, z ceną e_m powyżej rynkowej ceny kupna π^K , jeżeli nie zostały zrealizowane w całości. Odrzucenie (w całości lub części) konkurencyjnych ofert kupna implikuje powstanie kosztów rekompensat $R_{K,m}^0$,

nazywanych *rekompensatami korzyści utraconych ofert kupna*.

Zależności pomiędzy cenami ofertowymi e_m i ceną rynkową π^K można zamodelować przy pomocy zmiennych λ_m^+ i λ_m^- , tak że:

$$\lambda_m^+ - \lambda_m^- = e_m - \pi^K, \quad m \in B \quad (6)$$

Zmienna λ_m^+ przyjmuje wartości większe od zera, gdy $e_m > \pi^K$ i może być interpretowana jako nadwyżka cenowa oferty konkurencyjnej. Natomiast zmienna λ_m^- przyjmuje wartości większe od zera, gdy $e_m < \pi^K$ i jest interpretowana jako rynkowy niedobór cenowy oferty niekonkurencyjnej.

Wtedy koszt kupna wymuszonego względami systemowymi $R_{K,m} = \lambda_m^- d_m$, gdyż m -ta oferta kupna wymuszonego jest rozliczana po cenie e_m niższej od ceny π^K . Natomiast koszt rekompensaty za korzyści utracone jest w wysokości $R_{K,m}^0 = \lambda_m^+ (d_m^{\max} - d_m)$. Przy uwzględnieniu powyższych kosztów zakupu, sumaryczna rynkowa wartość sprawiedliwego zakupu Z , czyli wartość zobowiązań ze strony kupujących, pomniejszona o koszty systemowe zakupu jest równa:

$$Z = \sum_{m \in B} (\pi^K d_m - R_{K,m} - R_{K,m}^0) \quad (7)$$

Koszty systemowe po stronie sprzedaży

Analogicznie jak w przypadku strony zakupu, przyjęcie do realizacji niekonkurencyjnych ofert sprzedaży, z kosztami K_l przewyższającymi wartość sprzedaży po cenie rynkowej $\pi^S p_l$, powoduje powstawanie *kosztów sprzedaży wymuszonych względami systemowymi* $R_{S,l}$. Czyli $R_{S,l} = K_l - \pi^S p_l$ gdy $K_l \geq \pi^S p_l$. Koszt ten obliczamy zgodnie ze wzorem:

$$R_{S,l} \geq K_l - \pi^S p_l, \quad l \in S \quad (8)$$

$$R_{S,l} \geq 0, \quad l \in S \quad (9)$$

Dla zapewnienia indywidualnej sprawiedliwości konieczna jest też wypłata rekompensat dla odrzuconych ofert konkurencyjnych. Oferty po stronie sprzedaży są dane jako kawałkami liniowe krzywe kosztów, stąd w ogólnym przypadku oferta jest konkurencyjna, jeżeli *istnieje* taka wielkość sprzedaży, dla której koszty nie przekraczają przychodu.

Oczywiście, w ramach oferty może istnieć wiele punktów pracy spełniających ten warunek, przy

czym tylko w niektórych nadwyżka przychodu nad koszty, osiągnięta przy danej cenie sprzedaży będzie maksymalna. Proponowany w pracy model rozliczeń nie gwarantuje osiągnięcia maksymalnej możliwej wartości zysku jednostek konkurencyjnych, a jedynie przychód nie mniejszy od poniesionych kosztów.

Odrzucenie ofert konkurencyjnych powoduje powstawanie kosztów systemowych, nazywanych *rekompensatami korzyści utraconych ofert sprzedaży*. W pracy analizujemy następujące możliwości określenia konkurencyjności oferty odrzuconej:

Model **WAR1** zakłada, że l -ta oferta sprzedaży powinna zostać przyjęta do rozliczenia, jeśli rynkowa cena sprzedaży π^S jest wyższa od tzw. minimalnokosztowej ceny generacji c_l . Cena ta jest wyznaczana w ekonomicznym punkcie pracy jednostki p_l , jako stosunek wartości funkcji kosztu w tym punkcie $K(p_l)$ do wartości p_l (por. rys. 2):

$$c_l = \frac{K(p_l)}{p_l} \quad (10)$$

Wtedy wartość kosztów rekompensat $R_{S,l}^0$ wyz-

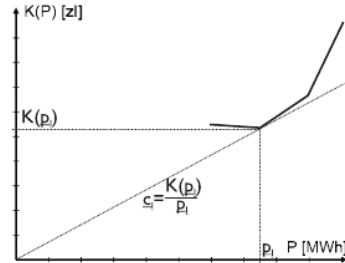


Figure 2: Sposób wyznaczania minimalnokosztowej ceny generacji – model **WAR1**

naczamy zgodnie ze wzorem:

$$R_{S,l}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S - c_l)p_l, \quad l \in S \quad (11)$$

$$R_{S,l}^0 \geq 0, \quad l \in S \quad (12)$$

Model **WAR2** zakłada, że l -ta oferta sprzedaży powinna zostać przyjęta do rozliczenia, jeśli rynkowa cena sprzedaży π^S jest wyższa od tzw. ceny średniej \bar{c}_l , wyznaczonej jako uśrednienie krzy-

wej kosztu generacji:

$$\bar{c}_l = \frac{1}{p_l^{max} - p_l^S} \left(\int_{p_l^S}^{p_l^{min}} C dP + \int_{p_l^{min}}^{p_l^{max}} K_l(P) dP \right) \quad (13)$$

W sformułowaniu pojawia się parametr p_l^S . Jest to początek przedziału całkowania stałej C . Obliczamy go w następujący sposób:

$$p_l^S = \min \{ p^S \cdot p_l^{max}, p_l^{min} \} \quad (14)$$

gdzie $p^S \in [0\%, 100\%]$ jest parametrem zadania; powinien być dobierany w taki sposób, aby zniechęcić oferentów do składania nieszczerých, spekulacyjnych ofert. W szczególności, można przyjąć, że dla ofert które są mniej konkurencyjne od innych, np. z powodu zbyt małej elastyczności, parametr p^S będzie wymuszał to, że stała C będzie całkowana na szerszym przedziale, co spowoduje wzrost ceny średniej, co da w wyniku obniżenie szansy na wypłatę rekompensaty dla tej oferty.

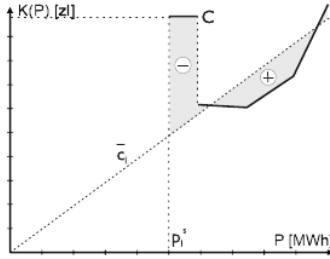


Figure 3: Sposób wyznaczania ceny średniej – model **WAR2**

Dla modelu **WAR2** wartość kosztów rekompensat $R_{S,l}^0$, wyznaczamy zgodnie ze wzorem:

$$R_{S,l}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S - \bar{c}_l)p_l^{max}, \quad l \in S \quad (15)$$

$$R_{S,l}^0 \geq 0, \quad l \in S \quad (16)$$

Model **WAR3** opiera się na założeniu, że wartość rekompensaty $R_{S,l}^0$, powinna być obliczana jako uśredniona potencjalna nadwyżka dochodu, wyznaczona przez wartość **bardziej** powierzchni, zawartej pomiędzy prostą rynkową wartości sprzedaży $P\pi^S$ oraz krzywej kosztów $K(P)$:

$$R_{S,l}^0 = \frac{1}{p_l^{max} - p_l^{min}} \int_{p_l^{min}}^{p_l^{max}} (P\pi^S - K(P))^+ dP \quad (17)$$

Oczywiście wyznaczenie dokładnej wartości kosztów rekompensat dla modeli liniowych jest niemożliwe. Dlatego opieramy się na przybliżeniu, które zakłada że, dzielimy obszar od p_l^{min} do p_l^{max} na I_l^{PR} odcinków, a następnie dla każdego takiego odcinka, przyjmujemy pewien punkt (w naszym przypadku przyjęliśmy środek odcinka), oznaczając go jako $p_l^j, j \in I_l^{PR}$. Obliczamy dla każdej oferty $l \in S$ wartość dodatniej różnicy $r_{l,j}^0$ pomiędzy wartością $p_l^j \pi^S$ a wartością krzywej kosztu w tym punkcie $K(p_l^j)$, (rys. 4):

$$r_{l,j}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S p_l^j - K(p_l^j)), \quad j \in I_l^{PR} \quad (18)$$

$$r_{l,j}^0 \geq 0, \quad j \in I_l^{PR} \quad (19)$$

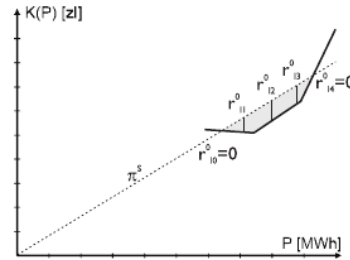


Figure 4: Sposób wyznaczania rekompensaty metodą **WAR3**

Wtedy wartość kosztów rekompensat $R_{S,l}^0$, wyznaczamy zgodnie ze wzorem:

$$R_{S,l}^0 = \frac{1}{|I_l^{PR}|} \sum_{j \in I_l^{PR}} r_{l,j}^0, \quad l \in S \quad (20)$$

Model **WAR4** zakłada, że wartość rekompensaty $R_{S,l}^0$ powinna być obliczana jako uśrednienie pewnych cząstkowych wartości rekompensat $r_{l,j}^0$, obliczanych w punktach $p_l^j, j \in I_l^S$:

$$r_{l,j}^0 = 0, \quad l \in S, j \in I_l^S, p_l^j \notin O_l^P \quad (21)$$

$$r_{l,j}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S p_l^j - K(p_l^j)), \quad (22)$$

$$l \in S, j \in I_l^S, p_l^j \in O_l^P$$

$$r_{l,j}^0 \geq 0, \quad l \in S, j \in I_l^S, p_l^j \in O_l^P \quad (23)$$

O_l^P oznacza zakres pracy jednostki l -tej. Wyznaczenie zbioru punktów p_l^j , oznacza wyznaczenie pewnych scenariuszy rozliczenia, które mogłyby

zajść dla danej oferty. Scenariusze, dla których obliczamy cząstkowe rekompensaty, powinny zostać dobrane w sposób zniechęcający uczestników do spekulacji. Przyjęliśmy, że punkty p_l^j powinny należeć do przedziału $[p_l^S, p_l^{max}]$ (por. wzór 14). Podobnie jak w przypadku modelu **WAR2**, można przyjąć, że dla ofert które są mniej konkurencyjne od innych, np. z powodu zbyt małej elastyczności, parametr p^S będzie wymuszał to, że większa ilość punktów p_l^j będzie leżała poza obszarem pracy jednostki l -tej, co spowoduje zmniejszenie potencjalnej rekompensaty.

Wartość $R_{S,l}^0$ obliczamy jako średnią arytmetyczną (wartość oczekiwaną) obliczonych nadwyżek (rys. 5):

$$R_{S,l}^0 = \frac{1}{|I_l^S|} \sum_{j \in I_l^S} r_{l,j}^0, \quad l \in S \quad (24)$$

Figure 5: Sposób wyznaczania rekompensaty metodą **WAR4**

Powyższe modele **WAR1**, **WAR2**, **WAR3** oraz **WAR4** wyznaczania rekompensat utraconych korzyści sprzedaży, określają różne sposoby oceny konkurencyjności danej odrzuconej oferty. Zauważmy, że najprostszy model **WAR1** praktycznie nie odnosi się do ograniczeń wprowadzanych na rynek przez daną ofertę. Co więcej, niejako *odcina* część oferty, w której koszty narastają niemonotonicznie. Z drugiej strony może być krzywdzący dla uczestnika w przypadku wystąpienia wysokich cen sprzedaży.

Wydaje się, że model **WAR3** powinien sobie lepiej radzić ze sprawiedliwą oceną konkurencyjności, przy czym również w niewielkim stopniu uwzględnia ograniczenia elastyczności oferty. Co więcej, istnieje ryzyko, że uczestnik będzie czerpał większe korzyści z wypłaty rekompensaty (średnia nadwyżka) dla odrzuconej oferty, niż z przyjęcia tej oferty. To może powodować powstawanie motywacji do zawyżenia kosztów oferty.

Rozwiązaniem tego problemu może być model **WAR4**, który zaniża wypłaty rekompensat dla uczestników mniej elastycznych. Niestety, model ten wprowadza tylko zaniżanie wypłacanych rekompensat (nie likwiduje w całości wypłaty rekompensaty dla spekulacyjnej oferty).

Z kolei model **WAR2** jest najbardziej restrykcyjny, oferty o najniższym zakresie elastyczności nie otrzymują rekompensaty w przypadku odrzucenia. Taki sposób modelowania rekompensat powinien zachęcać wytwórców do zwiększania elastyczności ofert poprzez np. agregację swoich jednostek wytwórczych [6]. Powinien również zniechęcać do prób osiągania korzyści, poprzez wprowadzanie niemożliwych do spełnienia ograniczeń (np. deklarowanie bardzo wysokiego, przewyższającego wielkość popytu poziomu minimalnej generacji). Jednak tak restrykcyjne ograniczenie konkurencyjności odrzuconej oferty może powodować niekorzystny, z punktu widzenia nabywców wzrost cen rynkowych.

Podsumowując, dla zadanej ceny rynkowej π^S definiujemy sumaryczną rynkową wartość sprawiedliwej sprzedaży K . Jest to należność jaką otrzymają wszyscy sprzedający, powiększona o koszty systemowe sprzedaży:

$$K = \sum_{l \in S} (\pi^S p_l + R_{S,l} + R_{S,l}^0) \quad (25)$$

Model bilansowania wartościowego W modelu bilansowania wartościowego szukamy najkorzystniejszych cen rynkowych π^S , π^K umożliwiających minimalizację systemowego kosztu sprawiedliwego bilansowania R danego jako $D(\pi^K - \pi^S)$ (D oznacza sumaryczny wolumen obrotu wyznaczony w fazie bilansowania ilościowego). Zadanie to sprowadza się do stosunkowo prostego problemu minimalizacji wypukłej funkcji jednej zmiennej:

$$\min [\pi^K - \pi^S] \quad (26)$$

przy ograniczeniach

$$Z - K = Q^0 \quad (27)$$

$$Z = \sum_{m \in B} (\pi^K d_m - R_{K,m} - R_{K,m}^0) \quad (28)$$

$$K = \sum_{l \in S} (\pi^S p_l + R_{S,l} + R_{S,l}^0) \quad (29)$$

$$\lambda_m^+ - \lambda_m^- = e_m - \pi^K, \quad m \in B \quad (30)$$

$$R_{K,m} = \lambda_m^- d_m, \quad m \in B \quad (31)$$

$$R_{K,m}^0 = \lambda^+ (d_m^{max} - d_m), \quad m \in B \quad (32)$$

$$R_{S,l} \geq K_l - \pi^S p_l, \quad l \in S \quad (33)$$

$$R_{S,l}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S - \tilde{c}_l) \tilde{p}_l, \quad l \in S \quad (34)$$

$$K, Z, \pi^S, \pi^K \geq 0 \quad (35)$$

$$\lambda_m^+, \lambda_m^-, R_{K,m}^0, R_{K,m} \geq 0, \quad m \in B \quad (36)$$

$$R_{S,l}^0, R_{S,l} \geq 0, \quad l \in S \quad (37)$$

Oznaczenia parametrów: p_l^{max} – maksymalny wolumen produkcji oferowany przez l -tego sprzedawcę; d_m^{max} – maksymalny wolumen kupna oferowany przez m -tego kupującego; e_m – cena ofertowa oferowana przez m -tego kupującego; d_m – ilość zakupionej energii według m -tej oferty; p_l – ilość sprzedanej energii według l -tej oferty; v_l – parametr binarny oznaczająca przyjęcie l -tej oferty sprzedaży do realizacji; K_l – wartość kosztu generacji p_l dla l -tej oferty; Q^0 – zadana wielkość nadwyżki dobrobytu operatora; α_l – parametr oznaczający jaka część kosztu korzyści utraconych powinna zostać wypłacona l -temu sprzedającemu; \tilde{c}_l – w zależności od wariantu modelu: 1. $\tilde{c}_l = \underline{c}_l$ cena minimalnokosztowa (por. wzór 11); 2. $\tilde{c}_l = \bar{c}_l$ cena średnia (por. wzór 15); \tilde{p}_l – w zależności od wariantu modelu: 1. $\tilde{p}_l = \underline{p}_l$ ekonomiczny punkt pracy (por. wzór 11); 2. $\tilde{p}_l = p_l^{max}$ maksymalna moc (por. wzór 15); p_l^j – j -ty punkt w którym obliczamy wartość nadwyżki rynkowego kosztu sprzedaży nad koszt ofertowy dla oferty l -tej (por. wzór 19); $|I_l^{PR}|$ – ilość punktów w których obliczamy nadwyżkę dla oferty l -tej (por. wzory 20); $r_{l,j}^0$ – j -ta wartość nadwyżki kosztu rynkowego nad koszt ofertowy dla l -tej oferty.

Oznaczenia zmiennych: π^S – rynkowa cena sprzedaży; π^K – rynkowa cena kupna; K – koszt sprzedaży na rynku; Z – wartość kupna na rynku; $R_{S,l}$ – koszt wymuszonej sprzedaży oferty l ; $R_{S,l}^0$ – koszt rekompensat korzyści utraconych sprzedaży oferty l ; $r_{l,j}^0$ – wartość dodatkowej nadwyżki rynkowego kosztu sprzedaży nad koszt ofertowy dla oferty l -tej, w punkcie p_l^j ; λ_m^- – niedobór cenowy m -tej oferty kupna; λ_m^+ – nadwyżka cenowa m -tej oferty kupna; $R_{K,m}$ – koszt wymuszonego zakupu dla oferty m ; $R_{K,m}^0$ – koszt rekompensat utraconych korzyści zakupu dla oferty m .

W sposobie modelowania rekompensat korzyści utraconych **WAR3** zmienia się definicja

ograniczenia (34), które jest zastępowane przez ograniczenia:

$$R_{S,l}^0 = \frac{1}{|I_l^{PR}|} \sum_{j \in I_l^{PR}} r_{l,j}^0, \quad l \in S \quad (38)$$

$$r_{l,j}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S p_l^j - K(p_l^j)), \quad l \in S, j \in I_l^{PR} \quad (39)$$

$$r_{l,j}^0 \geq 0, \quad l \in S, j \in I_l^{PR} \quad (40)$$

Dla modelu **WAR4** ograniczenie (34) należy zastąpić przez następujące ograniczenia:

$$R_{S,l}^0 = \frac{1}{|I_l^S|} \sum_{j \in I_l^S} r_{l,j}^0, \quad l \in S \quad (41)$$

$$r_{l,j}^0 = 0, \quad l \in S, j \in I_l^S, p_l^j \notin O_l^P \quad (42)$$

$$r_{l,j}^0 \geq (1 - v_l)(\pi^S p_l^j - K(p_l^j)), \quad l \in S, j \in I_l^S, p_l^j \in O_l^P \quad (43)$$

$$r_{l,j}^0 \geq 0, \quad l \in S, j \in I_l^S, p_l^j \in O_l^P \quad (44)$$

Sens powyższych ograniczeń został wyjaśniony we wcześniejszej części referatu, komentarza może wymagać jedynie ograniczenie (27). Jest ono definiowane w celu zapewnienia, że wartość rynkowa kupna powinna być nie mniejsza od rynkowych kosztów sprzedaży. Ewentualna nadwyżka wartości kupna nad wartością sprzedaży jest określana jako dobrobyt Q_0 . Wielkość Q_0 może być zadawana w zależności od potrzeb operatora, w szczególności może być np. przeznaczana na perspektywiczne cele nadrzędne. W szczególnym przypadku przyjmujemy $Q_0 = 0$.

4 WYNIKI EKSPERYMENTÓW

Przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe dla modeli bilansowania ilościowego i wartościowego, dla szeregu zestawów danych o realistycznych wymiarach, różniących się parametrami technicznymi i cenowymi jednostek, jak również ilością ofert oraz liczbą liniowych kawałków ofert. Opracowane modele optymalizacyjne są wystarczająco efektywne przy wykorzystaniu uniwersalnego pakietu CPLEX, rozwiązania optymalne są znajdowane

w stosunkowo krótkim czasie. Przykładowo, dla zbioru 100 ofert sprzedaży opisanych 16 odcinkami liniowymi i 35 ofert zakupu, bilansowanych w poszczególnych, niezależnych 12 etapach procesu ofertowego, zbiór rozwiązań jest wyznaczany w czasie około dwóch minut na komputerze PC z procesorem Pentium III.

Przedstawiamy szczegółowe wyniki eksperymentów przeprowadzanych dla 12 niezależnych procesów bilansowania ilościowego (tab. 1) i wartościowego (tab. 2). W każdym z 12 etapów przyjęto zróżnicowane wielkości popytu, testy przeprowadzono dla zróżnicowanych danych po stronie podaży (różnice w elastyczności i zdolnościach wytwórczych), dla różnych ilości ofert, oraz opisujących ich kawałków liniowych. Optymalne rozwiązanie zadania bilansowania ilościowego dla 12 etapów procesu ofertowego rynku lokalnego o dużym rozmiarze (250 ofert w pojedynczym etapie), nawet dla bardzo dokładnego opisu oferty (16 kawałków liniowych) jest wyznaczane w czasie nie przekraczającym pół godziny – por. tabela 1.

Sam proces znajdowania rozwiązania zadania bilansowania wartościowego jest bardzo efektywny. Na efektywność wpływa głównie brak zmiennych binarnych. Czas rozwiązywania nawet dla największego zbioru danych w modelu WAR3 nie przekracza pół minuty, w modelu WAR4 nie przekracza jednej minuty, a w pozostałych nawet kilku sekund – por. tabela 2. Pozwala to na testowanie różnych zasad modelowania konkurencyjności uczestników w prosty i efektywny sposób.

Table 1: Parametry opisujące rozwiązywanie zadań ilościowego bilansowania ofert, w 12 niezależnych etapach, gdzie S oznacza liczbę ofert sprzedaży, a I liczbę liniowych odcinków oferty sprzedaży

S	Parametry	zbiór odcink. lin. I		
		3	8	16
50	Zmienne	2004	2004	2004
	Ogranicz.	3216	6216	11016
	Zm. bin.	50	50	50
	Czas [s]	5	6	48
100	Zmienne	4008	4008	4008
	Ogranicz.	6420	12420	22020
	Zm. bin.	100	100	100
	Czas [s]	22	50	115
200	Zmienne	8004	8004	8004
	Ograniczenia	12816	24816	44016
	Zm. bin.	200	200	200
	Czas [s]	122	1834	1943

Table 2: Parametry opisujące rozwiązywanie zadań wartościowego bilansowania ofert, w 12 niezależnych etapach, gdzie S oznacza liczbę ofert sprzedaży

Modele WAR1 i WAR2			
S	Zmienne	Ograniczenia	Czas [s]
50	2064	1848	<1
100	4080	3660	2
200	8064	7248	6
Model WAR3			
S	Zmienne	Ograniczenia	Czas [s]
50	3604	3388	1
100	7250	6830	4
200	15474	14658	24
Model WAR4			
S	Zmienne	Ograniczenia	Czas [s]
50	5014	4798	1
100	11030	10610	10
200	20914	20098	44

5 PODSUMOWANIE

Przedstawiony w pracy mechanizm bilansowania ofert na lokalnym rynku energii ma na celu stworzenie wszystkim podmiotom tego rynku skutecznych warunków do efektywnego i konkurencyjnego działania. Zapewnienie prostoty funkcyj-

alnej rozwiązań widzianych przez uczestników rynku z ograniczeniami niekoniecznie oznacza prostotę wewnętrznych mechanizmów rynkowych, gdyż uzyskiwanie jasnych, klarownych i sprawiedliwych sygnałów ekonomicznych wymaga stosowania bardziej wyrafinowanych mechanizmów rynkowych. Możliwość dobrego odzwierciedlenia rzeczywistych charakterystyk kosztowych w konstrukcji ofert wypukłych, proponowanych w modelu, pozwala na uproszczenie procesów decyzyjnych uczestników rynku energii i maksymalizację rzeczywistego dobrobytu ekonomicznego w warunkach rynku lokalnego.

Wyniki uzyskane w tej pracy będą rozwijane w dalszych badaniach, w których rozważamy możliwości uwzględniania ograniczeń wieloetapowych, również poprzez mechanizm bilansowania np. ofert wielokładnikowych, blokowych czy zintegrowanych.

Abstract

AUCTION DESIGN IN LOCAL ENERGY MARKET WITH NONCONTINUOUS, CONVEX BIDS Deregulated competitive electric power market introduces new, auction-based mechanisms for trading energy. Generators are often forced to prepare daily offers, that could not consider their operational constraints. This paper proposes auction design in local energy market, that allows thermal generators to submit convex hourly bidding curves corresponding to their operating costs, i.e. minimum operating level and nonmonotonous prices. We introduce market clearing algorithm consisting of two steps: first the social welfare is optimized, based on the quantity balancing model. In this model all winning bids and corresponding quantities are clearly identified. Next, hourly market prices for buyers and sellers are set, based on the value balancing model. The results obtained are easily computed, and bring competition and fairness into the market consisting of thermal producers.

References

- [1] Contreras J., Candiles O., de la Fuente J.L. Gómez T. (2001) Auction Design in Day-

Ahead Electricity Markets. IEEE Transactions on Power Systems Vol. 16(3),pp. 409-417.

- [2] Hobbs B. F., Rothkopf M. H., O'Neill R. P., Chao H.-p, Eds. (2001) The Next Generation of Unit Commitment Models. Norwell, MA: Kluwer.
- [3] Sheblé G. B. (1999) Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation. Boston, MA: Kluwer.
- [4] Toczyłowski E. (2003) Optymalizacja procesów rynkowych przy ograniczeniach. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- [5] Wilson R. (2001) Activity Rules for an Iterative Double Auction. in Game Theory and Business Applications, Kluwer Academic Press.
- [6] Żółtowska I. (w przygotowaniu) Modele optymalizacyjne wspomaganie decyzji wytwórców na rynku energii elektrycznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.