

Franciszek BUCHTA  
IEiSU Politechniki Śląskiej  
Energoprojekt-Consulting SA

## CENY KRAŃCOWE ENERGII ELEKTRYCZNEJ W WĘZŁACH SIECI PRZESYŁOWEJ

**Streszczenie.** W artykule omówiono metodę wyznaczania cen krańcowych energii elektrycznej w węzłach sieciowych oraz wskazano na sposób ich wykorzystania do identyfikacji ograniczeń zdolności przesyłowych i określania efektów ekonomicznych wynikających z ich likwidacji. W tym zakresie krótko omówiono funkcje kryterialne doboru jednostek wytwórczych do produkcji z uwzględnieniem wymaganej rezerwy mocy oraz optymalnego rozplywu mocy, uwzględniającego ograniczenia zdolności przesyłowych. Sposób kształtowania się cen krańcowych w węzłach sieciowych w przypadku istnienia ograniczeń przesyłowych przedstawiono na przykładzie czterowęzłowej sieci modelowej. W artykule przedstawiono także niektóre wyniki analizy cen krańcowych w węzłach rzeczywistej krajowej sieci 400 i 220 kV. Artykuł zakończono najważniejszymi wnioskami.

## MARGINAL ENERGY PRICES IN TRANSMISSION NETWORK NODES

**Summary.** Methodology of marginal prices calculation in the nodes of transmission network as well as the way of their usage for identification of transmission capacity limitation and also for establishing economic effects arising from liquidation of transmission capacity limitation have been shortly presented in the paper. In this scope criterion function of building generators merit order with consideration on required power reserve and security constrained optimal power flow have been shortly described. The manner of marginal prices fluctuation has been presented on the four nodes model grid. Some results of marginal prices analysis in real national 400 and 220 kV network have been also shown. Main conclusions have been written at the end of the paper.

### 1. WPROWADZENIE

Rynek energii elektrycznej stwarza nowe wymagania dla planowania rozwoju sieci [1,2]. Podstawowym zadaniem planowania rozwoju i modernizacji sieci w warunkach rynkowych staje się likwidacja ograniczeń zdolności przesyłowej. Brak wystarczających zdolności przesyłowych powoduje konieczność utrzymywania generacji wymuszonej, która ogranicza

konkurencję na rynku i jest przyczyną zwiększenia kosztów zakupu energii elektrycznej przez odbiorców końcowych. Należy przy tym podkreślić, że likwidacja ograniczeń przesyłowych przynosi efekt dla odbiorców, ale także skutkuje zmianą rozkładu i poziomu przychodów dla wytwórców. Koszt ograniczeń przesyłowych musi zatem uwzględniać obydwa te elementy, a rozwój sieci musi przebiegać w sposób ekonomicznie uzasadniony i nie dyskryminujący żadnego uczestnika rynku.

Ceny krańcowe w węzłach sieci odzwierciedlają rzeczywiste rozłożenie kosztów w systemie elektroenergetycznym. Za ich pomocą można identyfikować ograniczenia zdolności przesyłowych oraz określać relacje (kierunki przesyłu), w których zwiększenie zdolności przesyłowych jest najbardziej ekonomicznie efektywne.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Podstawy teoretyczne określania cen krańcowych w węzłach sieciowych zostały szczegółowo opisane w pracy [3]. W tym miejscu ograniczono się do przedstawienia kryteriów poszczególnych zadań optymalizacyjnych.

Pierwszym krokiem w celu wyznaczenia cen krańcowych w węzłach sieciowych jest dobór jednostek wytwórczych do produkcji z uwzględnieniem wymaganej rezerwy. Funkcja kryterialna takiego doboru jest następująca:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^W \delta_{wn}(t) K_{wn} [P_{wn}(t), t], \quad (1)$$

Przy ograniczeniach:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^W P_{wn}(t) = \sum_{n=1}^N P_{on}(t) + \sum_{g=1}^G \Delta P_g(t), \quad t = 1, 2, 3, \dots, T, \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^W R_{wnj}(t) \geq R_j^{\text{wym}}(t), \quad (3)$$

gdzie:

- $\delta_{wn}(t)$  - status jednostki wytwórczej  $w$  w węźle  $n$  w przedziale  $t$ ; wartość 1 oznacza, że jednostka wytwórcza  $w$  została dobrana do produkcji, wartość 0 oznacza, że nie została dobrana do produkcji,
- $K_{wn} [P_{wn}(t), t]$  - koszt produkcji energii elektrycznej przez jednostkę wytwórczą  $w$  w węźle  $n$  obciążoną mocą czynną  $P_{wn}(t)$  w przedziale  $t$ ,
- $P_{on}(t)$  - Moc czynna pobierana w węźle  $n$  w przedziale  $t$ ,
- $\Delta P_g(t)$  - straty mocy czynnej w gałęzi  $g$  w przedziale  $t$ ,
- $R_{wnj}(t)$  - rezerwa mocy czynnej rodzaju  $j$  (np. rezerwa regulacyjna-interwencyjna, wirująca, zimna) w jednostce wytwórczej  $w$  w węźle  $n$  w przedziale  $t$ ,
- $R_j(t)$  - wymagana rezerwa mocy czynnej rodzaju  $j$  w przedziale  $t$ ,
- $T$  - liczba przedziałów czasowych w roku (tzw. snapshot'ów),
- $W$  - liczba jednostek wytwórczych,
- $N$  - liczba węzłów sieciowych,
- $G$  - liczba gałęzi w układzie sieciowym: linii i transformatorów.

Rozwiązanie zadania optymalizacyjnego doboru jednostek wytwórczych do produkcji z uwzględnieniem wymaganego marginesu mocy czynnej polega z jednej strony na maksymalizacji dochodu poszczególnych jednostek wytwórczych przy danych cenach krańcowych energii elektrycznej i rezerw mocy, z drugiej strony następuje zmiana cen krańcowych w taki sposób, aby nakłonić jednostki wytwórcze do pokrycia zapotrzebowania mocy i wymaganej w systemie elektroenergetycznym rezerwy mocy. Tak sformułowane zadanie jest rozwiązywane za pomocą algorytmu programowania dynamicznego, a sposób podejścia metodycznego został opisany w pracy [5].

W celu wyznaczenia cen krańcowych w węzłach sieciowych w poszczególnych przedziałach  $t$ , konieczne jest rozwiązanie zadania optymalnego rozplywu mocy OPF (Optimal Power Flow), uwzględniającego ograniczenia zdolności przesyłowych. Funkcję kryterialną OPF można przedstawić w następujący sposób:

$$\text{Min} \sum_n \left[ \sum_{w=1}^W k_{wn} (P_{wn}) - z_n (P_{on}) \right], \quad (4)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{n=1}^N \left( \sum_{w=1}^W P_{wn} - P_{on} \right) - \sum_{g=1}^G \Delta P_g = 0, \quad (5)$$

$$P_g \leq P_g^{\max}, \quad (6)$$

gdzie  $P_g^{\max}$  jest zdolnością przesyłową gałęzi  $g$ , określoną w MW.

Ograniczenia (5) i (6) należy, oczywiście, uzupełnić o równania opisujące metodę obliczania rozplywu mocy.

Rozwiązując zadanie OPF względem wektora zmiennych stanu systemu, obejmującego moduły i kąty napięć węzłowych oraz zmiennych sterujących, obejmujących moce czynne i bierne w węzłach sieciowych, otrzymuje się optymalny punkt pracy systemu. Ceny krańcowe w węzłach można wtedy obliczyć jako:

$$c_n = c_b \left( 1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{on}} \right) + \sum_g \lambda_g \frac{\partial P_g}{\partial P_{on}}, \quad (7)$$

gdzie:

- $c_n$  - cena krańcowa w węźle  $n$ ,
  - $c_b$  - cena krańcowa w węźle odniesienia,
  - $1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{on}}$  - współczynnik krańcowych strat mocy, definiowany poprzez zmianę wielkości produkcji niezbędną do pokrycia niewielkiej zmiany zapotrzebowania na moc w węźle  $n$ ,
  - $\frac{\partial P_g}{\partial P_{on}}$  - zmiana przepływu mocy w gałęzi  $g$  spowodowana zmianą zapotrzebowania na moc w węźle  $n$ , przy założeniu, że zmiana zapotrzebowania na moc jest pokrywana przez produkcję w węźle odniesienia,
  - $\lambda_g$  - współczynnik Lagrange'a dla gałęzi  $g$ ,
- $$\lambda_g \begin{cases} 0 & \text{gdy } P_g \leq P_g^{\max}, \\ > 0 & \text{gdy } P_g > P_g^{\max}. \end{cases}$$

Gdyby rozważyć teoretyczny przypadek braku strat energii i ograniczeń zdolności przesyłowych, to ceny krańcowe we wszystkich węzłach byłyby jednakowe. Straty energii w sieci powodują zróżnicowanie cen krańcowych o koszt strat energii w poszczególnych gałęziach. Jeśli wystąpią również ograniczenia zdolności przesyłowych, to zróżnicowanie cen krańcowych w węzłach będzie dalej się zwiększać. Korzystając z cen krańcowych w węzłach sieciowych można określić efekt systemowy ze zwiększenia zdolności przesyłowej uzyskanej np. poprzez wybudowanie nowej linii. Miarą takiego efektu może być zmniejszenie tzw. nadwyżki sieciowej lub nadwyżka rynkowa.

Nadwyżkę sieciową, określającą różnicę między płatnościami odbiorców i wypłatami dla wytwórców, można zapisać w postaci:

$$NS = PO - WW = \sum_{n=1}^N c_n \left( P_{on} - \sum_{w=1}^W P_{wn} \right) = \sum_{n=1}^N c_n P_n, \quad (8)$$

gdzie:

- $NS$  - nadwyżka sieciowa,
- $PO$  - płatności odbiorców,
- $WW$  - wypłaty dla wytwórców,
- $P_n$  - Moc w węźle  $n$  będąca różnicą mocy odbieranej i wytwarzanej w tym węźle.

Nadwyżka rynkowa wynika natomiast z sumarycznego efektu osiąganego przez uczestników rynku zarówno po stronie wytwórców, jak i odbiorców, a jej wartość można określić jako:

$$NR = \sum_{n=1}^N \left\{ P_{on} (c_n - c_n^R) + \sum_{w=1}^W \left[ P_{wn}^R (c_n^R - k_{wn}) - P_{wn} (c_n - k_{wn}) \right] \right\}, \quad (9)$$

gdzie:

- $c_n^R$  - cena krańcowa energii elektrycznej w węźle  $n$  po zrealizowaniu inwestycji  $R$  zwiększającej zdolność przesyłową sieci,
- $k_{wn}$  - jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej przez jednostkę wytwórczą  $w$  w węźle  $n$ ,
- $P_{wn}^R$  - moc wytwarzana przez jednostkę wytwórczą  $w$  w węźle  $n$  po zrealizowaniu inwestycji  $R$  zwiększającej zdolność przesyłową sieci.

Nadwyżka rynkowa w porównaniu do nadwyżki sieciowej uwzględnia dodatkowo efekt powstający po stronie wytwórczej, wynikający z podjęcia produkcji przez jednostki wytwórcze o mniejszym koszcie zmiennym. Wykorzystanie nadwyżki rynkowej w celu określania efektu podjęcia inwestycji sieciowej zwiększającej zdolność przesyłową sieci umożliwia zatem lepsze przygotowanie sieci dla uczestników rynku energii elektrycznej. Z tego powodu nadwyżka rynkowa powinna być uznana za preferowany estymator kosztu ograniczeń przesyłowych i wykorzystywana w kryterium optymalizacji rozwoju i modernizacji sieci.

### 3. WYNIKI ANALIZY

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono ceny krańcowe w węzłach modelowej sieci złożonej z czterech węzłów oznaczonych liczbami: 10, 20, 30 i 40, czterech linii pracujących na napięciu 220 kV i oznaczonych: 202, 203, 204 i 205 oraz pięciu jednostek wytwórczych oznaczonych: BEL 1010, RYB 1020, STW 1030, LAZ 1040 i POL 1050. Węzły 10, 20 i 30 zlokalizowane są na obszarze 1 - obszarze analizy, którym może być np. Polska, natomiast węzeł 40 leży na obszarze 2, którym może być zagranica. W węźle 40 znajduje się odbiór o

mocy (10+j0) MVA, a w węzłach 20 i 30 odbiory o mocy odpowiednio (750+j100) MVA oraz (10+j0) MVA. Węzeł 40 pełni w obszarze 2 rolę węzła bilansującego, zaś węzłem bilansującym w obszarze 1 jest węzeł 10.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki realizacji OPF wraz z cenami krańcowymi w poszczególnych węzłach i wielkościami produkcji jednostek wytwórczych, uzyskane w układzie sieciowym z ograniczeniem zdolności przesyłowej do 70 MVA w linii 10-30. Najtańszą z zamodelowanych jednostek wytwórczych jest BEL 1010 przyłączona do węzła 10, jednak jej produkcja, oznaczona na rysunku jako  $P_{disp}$ , nie może być maksymalna, gdyż spowodowałoby to przekroczenie ograniczenia zdolności przesyłowej w linii 10-30. Aby pokryć zapotrzebowanie odbiorców i nie powodować przekroczenia ograniczenia zdolności przesyłowej w linii 10-30 konieczne jest przejęcie produkcji przez jednostkę wytwórczą droższą ŁAZ 1040. Jej produkcja została ustawiona na poziomie maksymalnym. Pozostałe droższe jednostki wytwórcze zostały ustawione na poziomie ich mocy minimalnych z wyjątkiem POŁ 1050, której konieczne było obciążenie mocą o 2,3 MW większą od minimalnej w celu zbilansowania systemu. Ceny krańcowe w węzłach dają sygnały odbiorcom i wytwórcóm do zmiany poboru mocy i produkcji w taki sposób, aby ograniczenie zdolności przesyłowej w linii 10-30 nie było przekroczone i aby różnica płatności odbiorców i dochodu wytwórców była jak najmniejsza. Cena w węźle 10 jest zatem najmniejsza i zachęca do poboru mocy przez odbiorców i jednocześnie do zmniejszenia produkcji przez wytwórców. Największa cena jest w węźle 30, zatem zachęca do wzrostu produkcji i zmniejszenia poboru mocy czynnej przez odbiorców. Ukształtowane ceny krańcowe w poszczególnych węzłach pozwalają na uzyskanie dodatniego dochodu ze zwiększenia produkcji jedynie w przypadku wytwórcy ŁAZ 1040, drugiego w kolejności po BEL 1010 pod względem kosztu produkcji, dla pozostałych wytwórców zwiększenie produkcji byłoby nieopłacalne. Ceny zachęcają zatem do zwiększenia produkcji przez wytwórcę, który jest najtańszy i jednocześnie zwiększenie przez niego produkcji umożliwia zmniejszenie przepływu mocy w linii 10-30 z ograniczeniem zdolności przesyłowej.

Na rysunku 2 przedstawiono przypadek, w którym została wyłączona linia 10-20. Ponieważ w tym układzie sieciowym nie ma ograniczeń zdolności przesyłowej, ceny różnią się między sobą jedynie o koszt strat energii w poszczególnych pracujących liniach. Najtańsza jednostka wytwórcza BEL 1010 została obciążona w maksymalnym stopniu, zaś najdroższa STW 1030 – w minimalnym. Pozostałe jednostki wytwórcze pokrywają resztę zapotrzebowania mocy, przy czym jednostka wytwórcza RYB 1020, której koszt produkcji niewiele różni się od kosztu produkcji POŁ 1050 ze względu na jej usytuowanie, uwzględniając rozptył mocy, prowadzi do zwiększenia strat energii, została obciążona jedynie na jej minimalnym poziomie. Ponieważ w tym układzie sieciowym nie ma ograniczeń zdolności przesyłowych, ceny krańcowe w węzłach zachęcają do zwiększenia produkcji przez jednostkę wytwórczą najtańszą BEL 1010 i ten wytwórca jako jedyny uzyskuje dodatni dochód. Zwiększenie produkcji przez pozostałych wytwórców okazałoby się nieopłacalne.

W tabeli 1 przedstawiono nadwyżkę sieciową, dochód wytwórców oraz płatności odbiorców w następujących układach sieciowych: przedstawionym na rys. 1, lecz bez ograniczeń zdolności przesyłowej, przedstawionym na rys. 1, lecz z ograniczeniem zdolności przesyłowej do 70 MVA w linii 10-30 oraz przedstawionym na rys. 2, w którym, w porównaniu do poprzednich układów, nastąpiło wyłączenie linii 10-20. Najmniejsza wartość nadwyżki sieciowej i jednocześnie najmniejsze płatności odbiorców występują w przypadku pierwszego z tych układów, zatem ten układ sieciowy bez wyłączeń i bez ograniczeń zdolności przesyłowej jest najbardziej korzystny dla uczestników rynku, mimo tego że sumaryczny

dochód wytwórców jest w tym przypadku najbardziej ujemny. Różnica płatności odbiorców i dochodu wytwórców jest jednak w tym przypadku najmniejsza. Największa wartość nadwyżki sieciowej i jednocześnie największa różnica płatności odbiorców i dochodu wytwórców występuje w układzie z wyłączoną linią 10-20, zatem ten układ należy ocenić jako najmniej korzystny dla uczestników rynku. Należy przy tym zauważyć, że ograniczenie zdolności przesyłowej w linii może być niekiedy gorsze niż jej wyłączenie. Gdyby rozważyć bowiem układ z wyłączoną linią 10-30, w której występowało ograniczenie zdolności przesyłowej, to zaistniałaby możliwość zwiększenia produkcji przez najtańszą jednostkę wytwórczą BEL 1010, której produkcja, w przypadku włączonej linii 10-30 z ograniczeniem zdolności przesyłowej, musiała być ograniczona. W tak prostym układzie modelowym widać, że wyłączenie tej linii spowodowałoby znaczne pogorszenie ciągłości zasilania odbiorców, jednak w rzeczywistych układach sieciowych taki duży wpływ mógłby nie wystąpić. Rozważany przypadek ma większe znaczenie w analizie efektywności ekonomicznej rozwoju sieci. Nowy obiekt sieciowy może bowiem na tyle zmienić rozptył mocy, że jego pojawienie się w układzie sieciowym mogłoby doprowadzić do wystąpienia ograniczeń przesyłowych w innych istniejących elementach sieci i tym samym spowodować gorsze warunki korzystania z sieci dla uczestników rynku. Przypadki takie zostały zauważone w analizie wykonanej w pracy [4].

Tabela 1

Wpływ ograniczeń zdolności przesyłowej na nadwyżkę sieciową i płatności odbiorców w zł

Wielkość	Bez ograniczeń zdolności przesyłowych	Ograniczenie zdolności przesyłowej do 70 MVA w linii 10-30	Wyłączenie linii 10-30
Nadwyżka sieciowa	1 007	4 548	6 613
Płatności odbiorców	44 906	54 067	53 800
Dochód wytwórców	-5 363	-421	-4 512

Na rysunku 3 pokazano ceny krańcowe w węzłach rzeczywistej krajowej sieci 400 i 220 kV, uzyskane w pracy [4]. Dwie linie równoległe na tym rysunku pokazują zakres zmian cen w roku 2002, natomiast symbolem  $\blacklozenge$  oznaczono ceny w roku 2015 uzyskane w przypadku niepodejmowania żadnych inwestycji w układzie sieciowym. Liniami przerywanymi dokonano podziału na węzły sieci przesyłowej zgrupowane w poszczególnych obszarach eksploatowanych przez spółki regionalne PSE SA. Podział ten wskazuje stopień rozproszenia poziomu cen w tych obszarach. Rozproszenie to jest pewną charakterystyką obszarową sieci, a wynika ze stopnia rozwoju i wykorzystania sieci. Wyróżnione na tym rysunku obszary odpowiadają, licząc od lewej: PSE-Centrum, PSE-Wschód, PSE-Południe, PSE-Zachód, PSE-Północ.

Z rysunku 3 widać, że niepodejmowanie inwestycji sieciowych do 2015 r. spowodowałoby znaczne pogorszenie warunków działania podmiotów na rynku energii elektrycznej. Świadczy o tym rozrzut cen krańcowych w roku 2015, który jest znacznie większy od rozrzutu cen krańcowych w roku 2002. Zwiększenie rozrzutu cen krańcowych jest bowiem wynikiem ograniczeń zdolności przesyłowych, które narastają w miarę zbliżania się do roku 2015. W pracy [4] szczegółowo zidentyfikowano występujące ograniczenia zdolności przesyłowej oraz zaproponowano rozwój sieci, w wyniku którego rozrzut cen krańcowych w węzłach znacznie się zmniejszył.

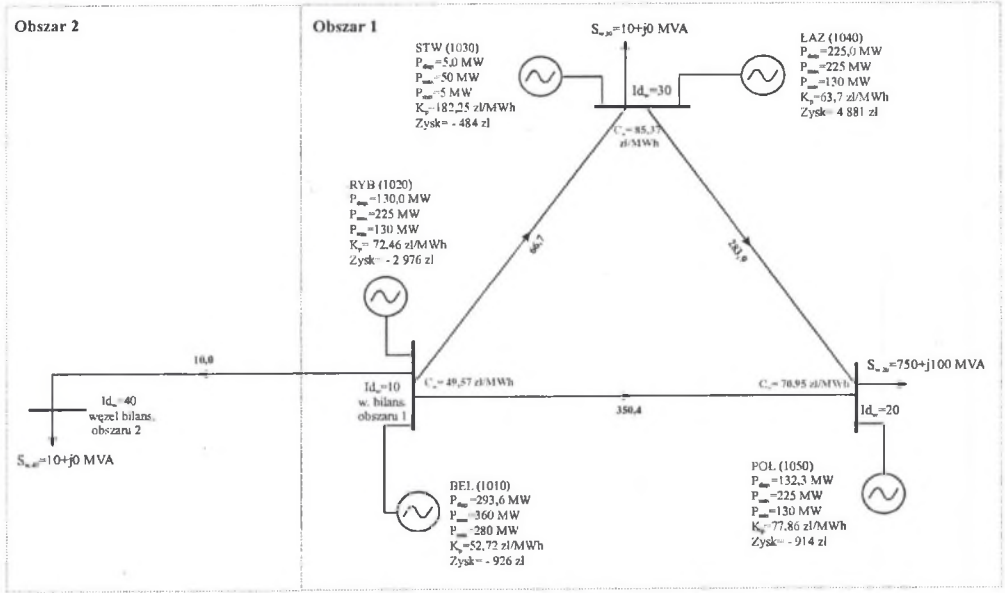
Skala na osi rzędnych na rys. 3 jest zagęszczona po to, aby pokazać różnice w rozrzutach cen w roku 2015 w porównaniu do roku 2002. Z tego powodu prawie poziomy przebieg cen krańcowych w roku 2002 na tym rysunku nie oznacza, że ograniczeń przesyłowych w tym

roku nie ma, w rzeczywistości są one niewielkie. Na rysunku 4 pokazano histogram cen krańcowych w węzłach krajowej sieci 400 i 220 kV w roku 2002. Kolorem czerwonym oznaczono przebieg dopasowanego rozkładu normalnego w oparciu o dwa estymatory: wartość średnią i odchylenie standardowe. Średnia cena krańcowa w analizowanych 190 węzłach sieci przesyłowej wyniosła 72,55 zł/MWh, natomiast odchylenie standardowe było stosunkowo niewielkie i wyniosło 2,50 zł/MWh. Przy tych parametrach współczynnik zmienności wynosi 3,4%, co oddaje wielkość zmiany cen krańcowych w poszczególnych węzłach wobec wartości przeciętnej. Rozstęp wyników ze względu na wartość największą i najmniejszą wynosi 11,81 zł/MWh, natomiast rozstęp kwartyłowy (tzw. odchylenie ćwiartkowe) wynosi 4,13 zł/MWh. Wielkości te świadczą o małym zróżnicowaniu cen krańcowych, co generalnie daje pozytywny obraz przygotowania krajowej sieci 400 i 220 kV do realizacji funkcji placu handlowego dla rynku energii elektrycznej w roku 2002.

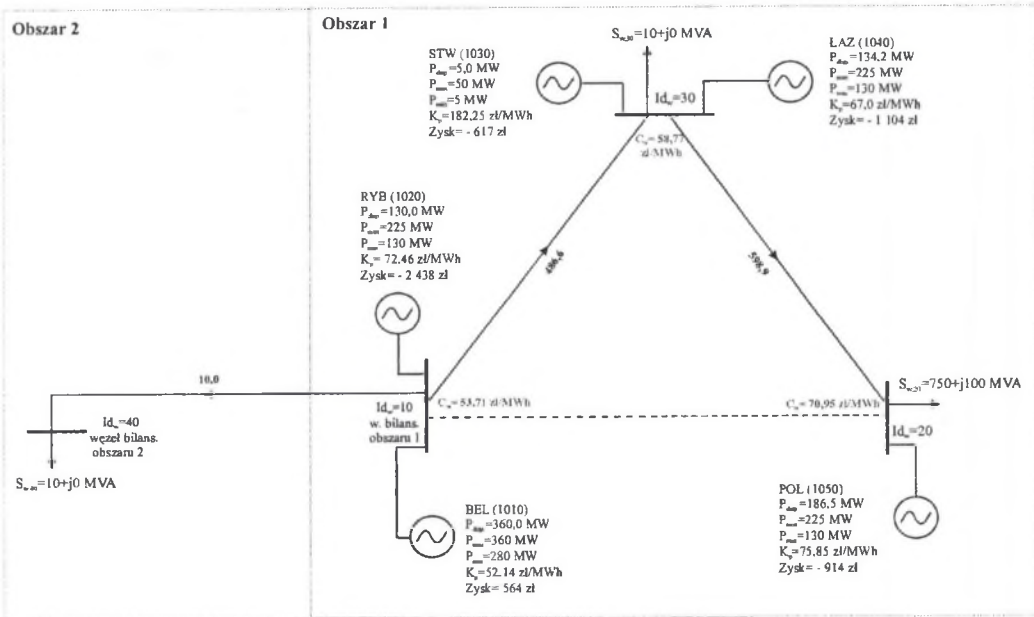
W celu identyfikacji gałęzi sieci 400 i 220 kV wymagających potencjalnych inwestycji poprawiających efektywność przesyłu obliczono w pracy [4] różnice cen krańcowych dla każdej pary węzłów poszczególnych gałęzi. Na rysunku 5 przedstawiono wartości modułów tak obliczonych różnic cen krańcowych. Wartość przeciętna różnic wynosi ok. 0,54 zł/MWh, natomiast odchylenie od tej wartości jest rzędu 0,76 zł/MWh. Wartości te odpowiadają kosztom jednostkowym strat energii w gałęziach sieci 400 i 220 kV, przy zróżnicowaniu wynikającym ze stopnia obciążenia i parametrów poszczególnych gałęzi. Widać, że większość obliczonych różnic cen krańcowych ma niewielkie wartości. Można jednak zidentyfikować kilka gałęzi o różnicy cen kilka razy większej niż przeciętna, np. rzędu 4 zł/MWh. Są to linie dość znacznie obciążane, stanowiące zarazem wyprowadzenie mocy z Elektrowni Bełchatów w kierunku aglomeracji łódzkiej, czy z Zespołu Elektrowni PAK w kierunku aglomeracji poznańskiej.

#### 4. WNIOSKI

1. Podstawowym zadaniem planowania rozwoju i modernizacji sieci w warunkach rynkowych staje się likwidacja ograniczeń zdolności przesyłowej. Brak wystarczających zdolności przesyłowych powoduje konieczność utrzymywania generacji wymuszonej, która ogranicza konkurencję na rynku i jest przyczyną zwiększenia kosztów zakupu energii elektrycznej przez odbiorców końcowych.
2. Ceny krańcowe w węzłach sieci odzwierciedlają rzeczywiste rozłożenie kosztów w systemie elektroenergetycznym. Za ich pomocą można identyfikować ograniczenia zdolności przesyłowych oraz określać relacje (kierunki przesyłu), w których zwiększenie zdolności przesyłowych jest najbardziej ekonomicznie efektywne.
3. Ceny krańcowe w węzłach dają silne sygnały odbiorcom i wytwórcom do zmiany poboru mocy i produkcji w taki sposób aby ograniczenia zdolności przesyłowej nie były przekroczone i aby różnica płać odbiorców i dochodu wytwórców była jak najmniejsza. Rozliczanie podmiotów na rynku wg cen krańcowych w węzłach sieciowych jest najbardziej efektywnym sposobem zarządzania ograniczeniami przesyłowymi i jednocześnie silnym bodźcem ekonomicznym do ich likwidacji.
4. Małe zróżnicowanie cen krańcowych w roku 2002 w krajowej sieci 400 i 220 kV wskazuje na generalnie pozytywny obraz przygotowania tej sieci do realizacji funkcji placu handlowego dla rynku energii elektrycznej w tym roku. Niepodejmowanie inwestycji sieciowych w następnych latach doprowadziłoby jednak do znacznego pogorszenia tego stanu poprzez występowanie coraz większych ograniczeń zdolności przesyłowych.

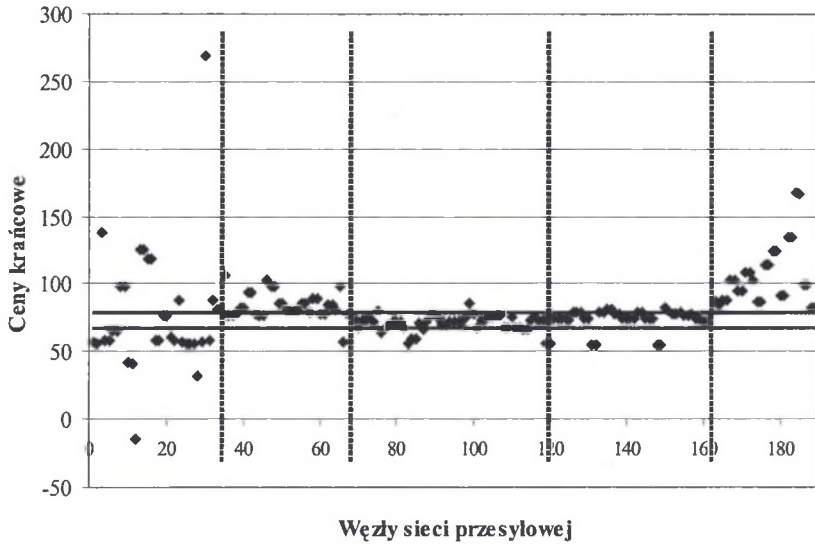


Rys. 1. Ceny krańcowe w układzie z ograniczeniem do 70 MVA zdolności przesyłowej w linii pomiędzy węzłami 10 i 30  
 Fig. 1. Marginal prices in the system with limitation of transmission capacity up to 70 MVA between bus 10 and 30



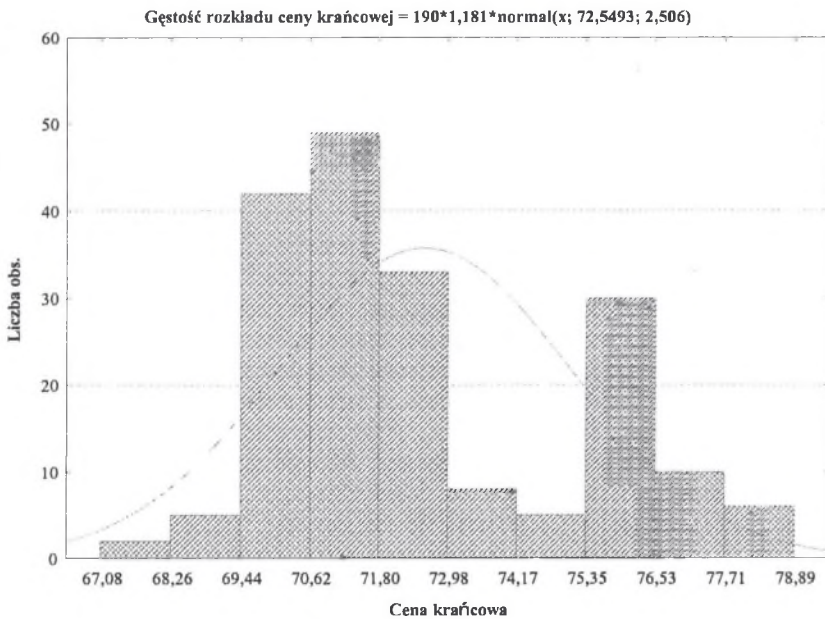
Rys. 2. Ceny krańcowe w układzie z wyłączoną linią pomiędzy węzłami 10 i 20  
 Fig. 2. Marginal prices in the system with switched off line between bus 10 and 20





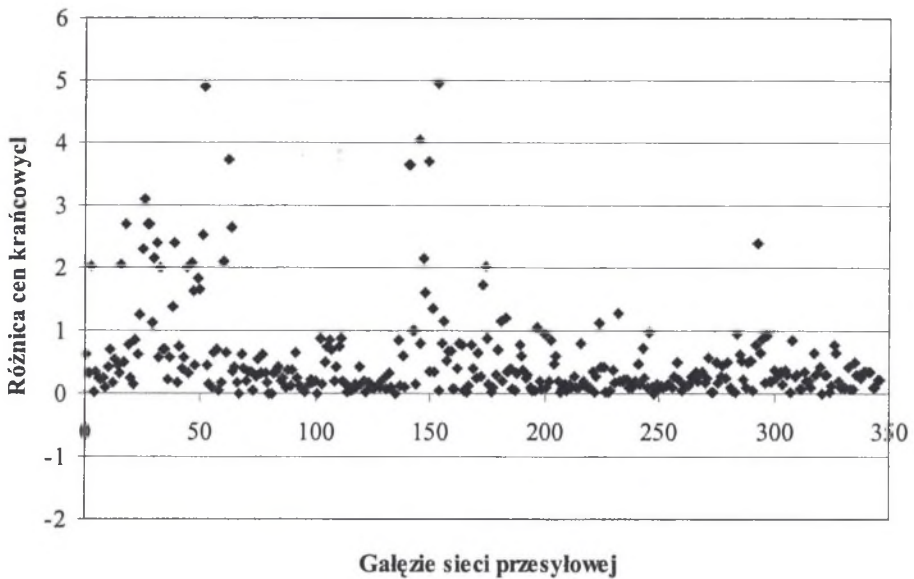
Rys. 3. Ceny krańcowe w węzłach krajowej sieci 400 i 220 kV:  
= przedział zmian cen w roku 2002, ◆ rok 2015

Fig. 3. Marginal prices in the nodes of national 400 i 220 kV grid:  
= range of prices variation in the year 2002, ◆ year 2015



Rys. 4. Histogram cen krańcowych w węzłach krajowej sieci 400 i 220 kV w roku 2002

Fig. 4. Distribution function of marginal prices in nodes of national 400 and 220 kV network for the year 2002



Rys. 5. Różnice cen krańcowych w węzłach krajowej sieci 400 i 220 kV w roku 2002  
 Fig. 5. Differences of marginal prices in nodes of national 400 and 220 kV network for the year 2002

## LITERATURA

1. Buchta F., Lubicki W., Tomasik G.: *O wymaganiach dla metodyki planowania rozwoju sieci zamkniętej*. Konferencja Naukowa PE'2002. Częstochowa-Złoty Potok, 18-20 września 2002.
2. Buchta F., Lubicki W., Przygodzki M., Tomasik G.: *Uwzględnienie uwarunkowań rynkowych w metodyce planowania rozwoju sieci funkcjonalnie przesyłowej*. Konferencja Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE'2003, Jurata 2003.
3. *Methodology for Economic Assessment of Transmission Plans Within Unbundled Power Markets developed for Polish Power Grid Company*. Final Report. EPRI. Madison-Warsaw 2002 (praca nie publikowana).
4. *Program rozwoju i modernizacji sieci przesyłowej. Etap I, II i III*. Energoprojekt-Consulting S.A., Warszawa 2001 do 2002 (praca nie publikowana).
5. Rajaraman R., Kirsch L. D., Alvarado F. L., Clark C.: *Optimal Self-Commitment Under Uncertain Energy and Reserve Prices, Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models* (eds. B. F. Hobbs at al.), *Int'l Series in Operations Research and Management Science*, vol. 36, Kluwer Academic Publishers, Boston, April 2001.

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 września 2003 r.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jacek Malko