

Modele optymalizacyjne wspomagania decyzji wytwórców na rynku energii elektrycznej

mgr inż. Izabela Żółtowska

Promotor: prof. dr hab. inż. Eugeniusz Toczyłowski

Obrona rozprawy doktorskiej

5 grudnia 2006



Wytwórca na rynku energii

Zysk ze sprzedaży produkowanej energii

SPRZEDAŻ / ZAKUP ENERGII
PLANOWANEJ DO PRODUKCJI W DOBIE N
Doba ••• N-360 •• N-60 •• N-30 •••• N-1

HARMONOGRAMY
PRODUKCJI
Doba N



Wytwórca na rynku energii

Zysk ze sprzedaży produkowanej energii

SPRZEDAŻ / ZAKUP ENERGII
 PLANOWANEJ DO PRODUKCJI W DOBIE N
 Doba ••• N-360 •• N-60 •• N-30 •••• N-1

HARMONOGRAMY
 PRODUKCJI
 Doba N

RYNEK
 KONTRAKTOWY



RYNEK
 GIEŁDOWY

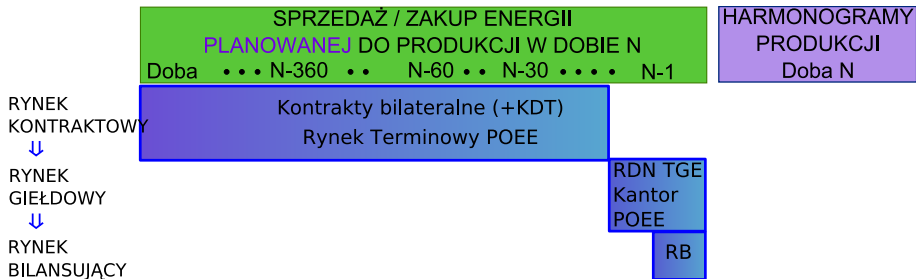


RYNEK
 BILANSUJĄCY



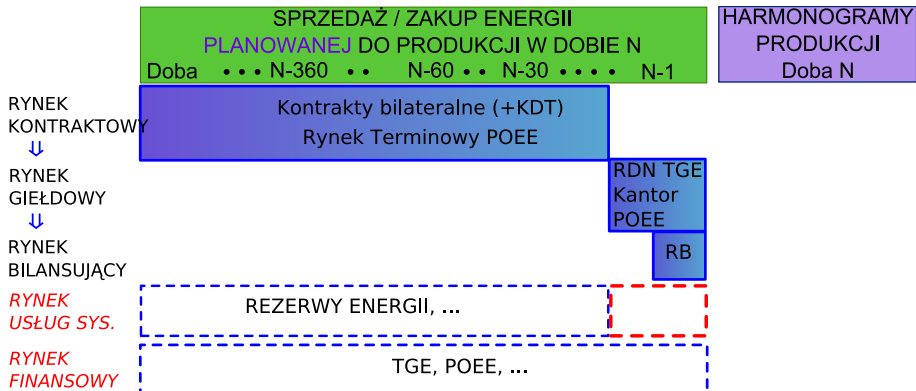
Wytwórca na rynku energii

Zysk ze sprzedaży produkowanej energii



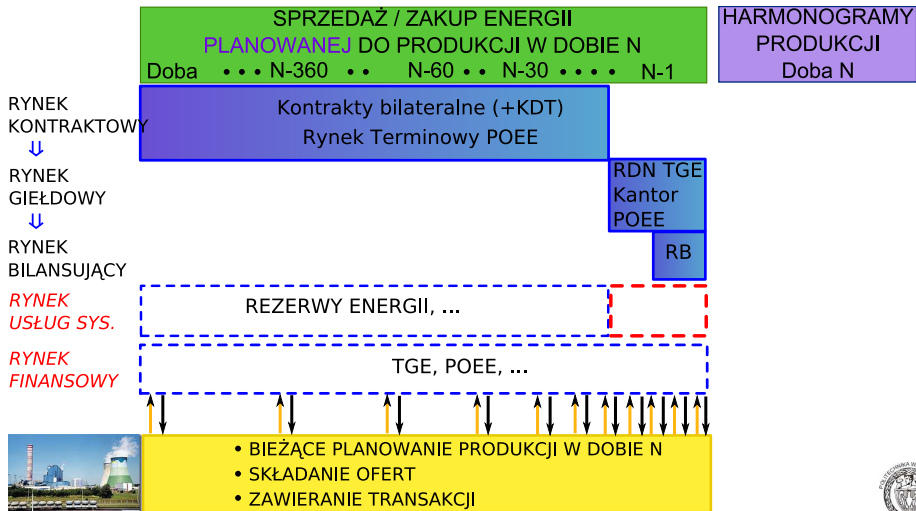
Wytwórca na rynku energii

Zysk ze sprzedaży produkowanej energii



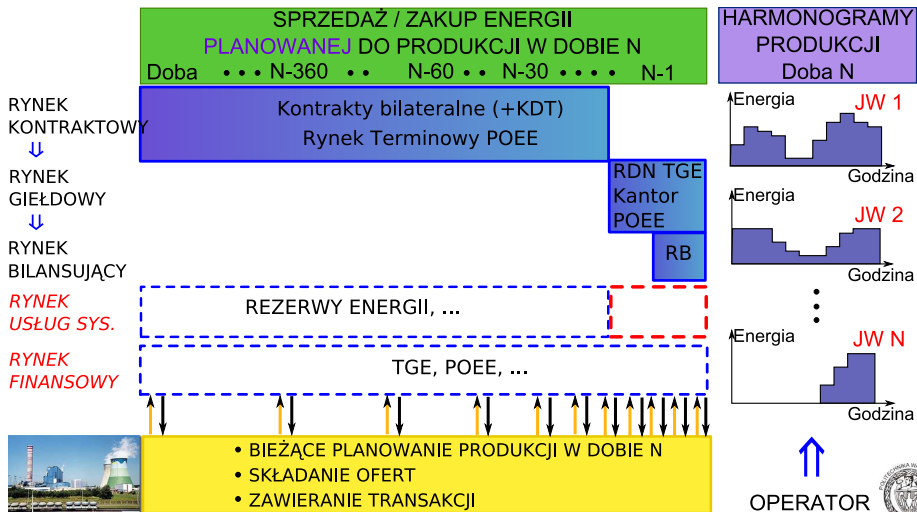
Wytwórca na rynku energii

Zysk ze sprzedaży produkowanej energii



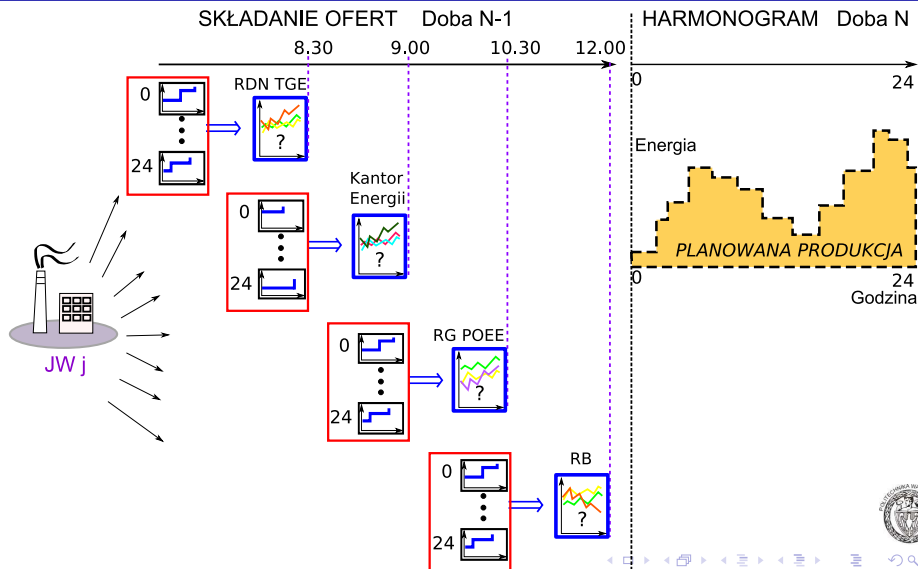
Wytwórca na rynku energii

Zysk ze sprzedaży produkowanej energii



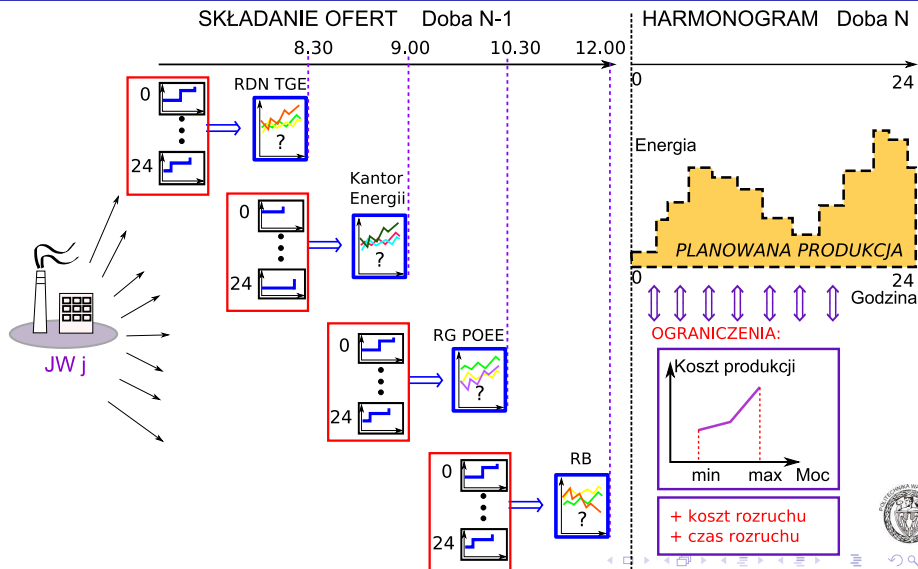
Rynki krótkoterminowe: problemy decyzyjne

Wielokrotne składanie ofert schodkowych



Rynki krótkoterminowe: problemy decyzyjne

Wielokrotne składanie ofert schodkowych

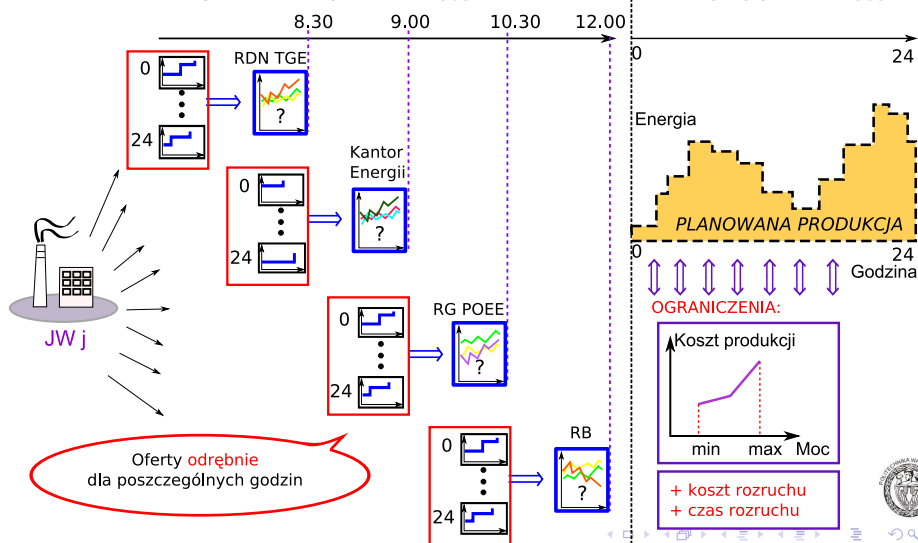


Rynki krótkoterminowe: problemy decyzyjne

Wielokrotne składanie ofert schodkowych

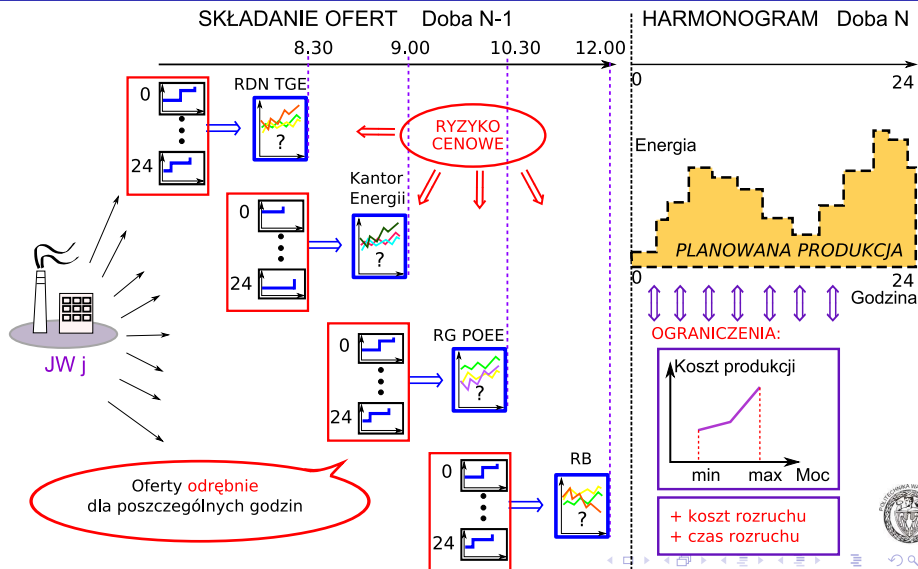
SKŁADANIE OFERT Doba N-1

HARMONOGRAM Doba N



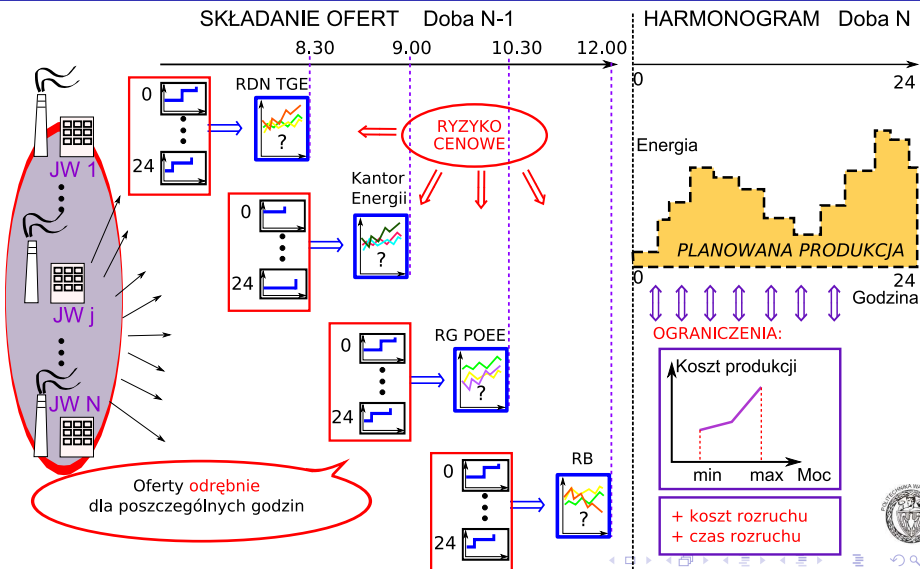
Rynki krótkoterminowe: problemy decyzyjne

Wielokrotne składanie ofert schodkowych



Rynki krótkoterminowe: problemy decyzyjne

Wielokrotne składanie ofert schodkowych



Cel rozprawy

Opracowanie modeli wspomagających decyzje wytwórcy na rynku energii, tak aby:

- **określać dopuszczalne technicznie plany pracy**
- określać oferty **na poszczególne** rynki, zapewniające pracę zgodną z planem
- uwzględniać możliwość składania **wspólnej oferty** przez grupę
- minimalizować kryteria **ryzyka zgodnie z preferencjami** wytwórcy
- stosować je **efektywnie** w odpowiednim systemie decyzyjnym

Stworzenie mechanizmu bilansowania ofert, który:

- uwzględnia **ograniczenia techniczne** jednostek ciepłych
- określa **ceny obrotu niedyskryminujące** żadnego z uczestników

Cel rozprawy

Opracowanie modeli wspomagających decyzje wytwórcy na rynku energii, tak aby:

- określać **dopuszczalne technicznie** plany pracy
- określać oferty na poszczególne rynki, zapewniające pracę zgodną z planem
- uwzględniać możliwość składania **wspólnej oferty** przez grupę
- minimalizować kryteria **ryzyka zgodnie z preferencjami** wytwórcy
- stosować je **efektywnie** w odpowiednim systemie decyzyjnym

Stworzenie mechanizmu bilansowania ofert, który:

- uwzględnia **ograniczenia techniczne** jednostek ciepłych
- określa **ceny obrotu niedyskryminujące** żadnego z uczestników

Cel rozprawy

Opracowanie modeli wspomagających decyzje wytwórcy na rynku energii, tak aby:

- określać **dopuszczalne technicznie** plany pracy
- określać oferty **na poszczególne** rynki, zapewniające pracę zgodną z planem
- **uwzględniać** możliwość składania **wspólnej oferty przez grupę**
- minimalizować kryteria **ryzyka zgodnie z preferencjami** wytwórcy
- stosować je **efektywnie** w odpowiednim systemie decyzyjnym

Stworzenie mechanizmu bilansowania ofert, który:

- uwzględnia **ograniczenia techniczne** jednostek ciepłych
- określa **ceny obrotu niedyskryminujące** żadnego z uczestników

Cel rozprawy

Opracowanie modeli wspomagających decyzje wytwórcy na rynku energii, tak aby:

- określać **dopuszczalne technicznie** plany pracy
- określać oferty **na poszczególne** rynki, zapewniające pracę zgodną z planem
- uwzględniać możliwość składania **wspólnej oferty** przez grupę
- **minimalizować kryteria ryzyka zgodnie z preferencjami wytwórcy**
- stosować je **efektywnie** w odpowiednim systemie decyzyjnym

Stworzenie mechanizmu bilansowania ofert, który:

- uwzględnia **ograniczenia techniczne** jednostek ciepłych
- określa **ceny obrotu niedyskryminujące** żadnego z uczestników

Cel rozprawy

Opracowanie modeli wspomagających decyzje wytwórcy na rynku energii, tak aby:

- określać **dopuszczalne technicznie** plany pracy
- określać oferty **na poszczególne** rynki, zapewniające pracę zgodną z planem
- uwzględniać możliwość składania **wspólnej oferty** przez grupę
- minimalizować kryteria **ryzyka zgodnie z preferencjami** wytwórcy
- **stosować je efektywnie w odpowiednim systemie decyzyjnym**

Stworzenie mechanizmu bilansowania ofert, który:

- uwzględnia **ograniczenia techniczne** jednostek ciepłych
- określa **ceny obrotu niedyskryminujące** żadnego z uczestników

Cel rozprawy

Opracowanie modeli wspomagających decyzje wytwórcy na rynku energii, tak aby:

- określać **dopuszczalne technicznie** plany pracy
- określać oferty **na poszczególne** rynki, zapewniające pracę zgodną z planem
- uwzględniać możliwość składania **wspólnej oferty** przez grupę
- minimalizować kryteria **ryzyka zgodnie z preferencjami** wytwórcy
- stosować je **efektywnie** w odpowiednim systemie decyzyjnym

Stworzenie mechanizmu bilansowania ofert, który:

- uwzględnia **ograniczenia techniczne** jednostek cieplnych
- określa **ceny obrotu niedyskryminujące** żadnego z uczestników

Stochastyczny model planowania produkcji

Uwzględniający zawieranie transakcji na poszczególnych rynkach

Ograniczenia techniczne jednostek: **zmienne binarne** v_{jh}, r_{jh}

$$P_j^{\min} v_{jh} \leq p_{jh} \leq P_j^{\max} v_{jh}$$

– zakres produkcji

$$K_{jh} \geq A_j^i p_{jh} + B_j^i v_{jh}$$

– koszt produkcji

$$v_{jh}, r_{jh} \in \{0/1\} \dots$$

– ograniczenia rozruchu

Powiązanie decyzji produkcyjnych i handlowych

- Zysk z_s przy danym scenariuszu s ceny sprzedaży
- Wpływ zawartych dotychczas kontraktów p_{jt}^k, p_{jt}^l



Stochastyczny model planowania produkcji

Uwzględniający zawieranie transakcji na poszczególnych rynkach

Ograniczenia techniczne jednostek: **zmienne binarne** v_{jh}, r_{jh}

$$P_j^{\min} v_{jh} \leq p_{jh} \leq P_j^{\max} v_{jh}$$

– zakres produkcji

$$K_{jh} \geq A_j^i p_{jh} + B_j^i v_{jh}$$

– koszt produkcji

$$v_{jh}, r_{jh} \in \{0/1\} \dots$$

– ograniczenia rozruchu

Powiązanie decyzji produkcyjnych i handlowych

- **Zysk z_s przy danym scenariuszu s ceny sprzedaży**
- Wpływ zawartych dotychczas kontraktów p_h^k, p_h^f
- Możliwość udziału w kolejnych segmentach rynku

$$z_s = \sum_h \{c_{sh} p_h - \sum_j (K_{jh} + S_j r_{jh})\}$$

$$\sum_j p_{jh} = p_h$$

– bilans energii



Stochastyczny model planowania produkcji

Uwzględniający zawieranie transakcji na poszczególnych rynkach

Ograniczenia techniczne jednostek: **zmienne binarne** v_{jh}, r_{jh}

$$P_j^{\min} v_{jh} \leq p_{jh} \leq P_j^{\max} v_{jh}$$

– zakres produkcji

$$K_{jh} \geq A_j^i p_{jh} + B_j^i v_{jh}$$

– koszt produkcji

$$v_{jh}, r_{jh} \in \{0/1\} \dots$$

– ograniczenia rozruchu

Powiązanie decyzji produkcyjnych i handlowych

- Zysk z_s przy danym scenariuszu s ceny sprzedaży
- **Wpływ zawartych dotychczas kontraktów** p_h^k, p_h^f
- Możliwość udziału w kolejnych segmentach rynku

$$z_s = \sum_h \{c_{sh} p_h - \sum_j (K_{jh} + S_j r_{jh}) + (c_h^f - c_{sh}) p_h^f\}$$

$$\sum_j p_{jh} = p_h + \sum_k p_h^k$$

– bilans energii

$$\sum_j P_j^{\min} v_{jh} \leq \sum_k p_h^k \leq \sum_j P_j^{\max} v_{jh}$$

– realizowalność transakcji



Stochastyczny model planowania produkcji

Uwzględniający zawieranie transakcji na poszczególnych rynkach

Ograniczenia techniczne jednostek: **zmienne binarne** v_{jh}, r_{jh}

$$P_j^{\min} v_{jh} \leq p_{jh} \leq P_j^{\max} v_{jh}$$

– zakres produkcji

$$K_{jh} \geq A_j^i p_{jh} + B_j^i v_{jh}$$

– koszt produkcji

$$v_{jh}, r_{jh} \in \{0/1\} \dots$$

– ograniczenia rozruchu

Powiązanie decyzji produkcyjnych i handlowych

- Zysk z_s przy danym scenariuszu s ceny sprzedaży
- Wpływ zawartych dotychczas kontraktów p_h^k, p_h^f
- **Możliwość udziału w kolejnych segmentach rynku**

$$z_s = \sum_h \{c_{sh} p_h - \sum_j (K_{jh} + S_j r_{jh}) + (c_h^f - c_{sh}) p_h^f + c_{sh}^2 p_h^2\}$$

$$\sum_j p_{jh} = p_h + \sum_k p_h^k + p_h^2$$

– bilans energii

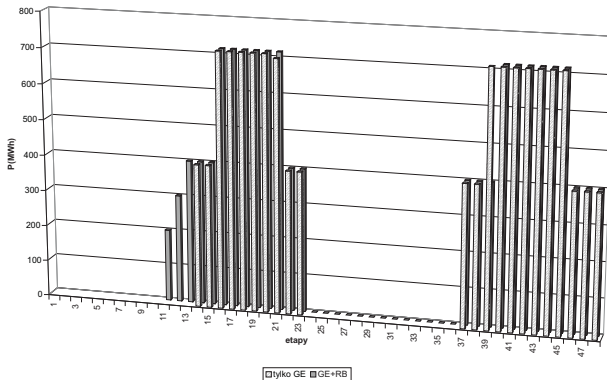
$$\sum_j P_j^{\min} v_{jh} \leq \sum_k p_h^k + p_h \leq \sum_j P_j^{\max} v_{jh}$$

– realizowalność transakcji



Cechy opracowanego modelu

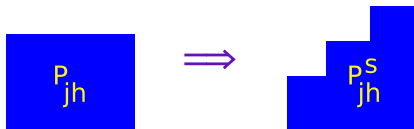
- Uzyskiwane **dopuszczalne technicznie** harmonogramy pozwalają na wykorzystanie możliwości osiągnięcia zysków na rynkach
- Dopasowanie do stopnia awersji do ryzyka wytwórcy
- Duża efektywność obliczeniowa



Wspomaganie działalności handlowej wytwórcy

Opracowane modele dla wytwórcy typu *price-taker*

- Model ciągły elastycznego obrotu dla ustalonego planu pracy
- Model zintegrowanego planowania pracy i obrotu
- Model elastycznego planu rozruchów i odstawień



Wspomaganie działalności handlowej wytwórcy

Opracowane modele dla wytwórcy typu *price-taker*

- Model ciągły elastycznego obrotu dla ustalonego planu pracy
- **Model zintegrowanego planowania pracy i obrotu**
- Model elastycznego planu rozruchów i odstawiń

Koncepcja

- 1 **Proste ciągłe podproblemy** wyznaczania zysku \hat{z}_s^{jh} z pracy j -tej jednostki w godzinie h , przy scenariuszu s :

$$\hat{z}_s^{jh} = \max_{p_{jh}} c_h^s p_{jh} - K_{jh}$$

przy ograniczeniach: $P_j^{\min} \leq p_{jh} \leq P_j^{\max}$, $K_{jh} \geq A_j^i p_{jh} + B_j^i$

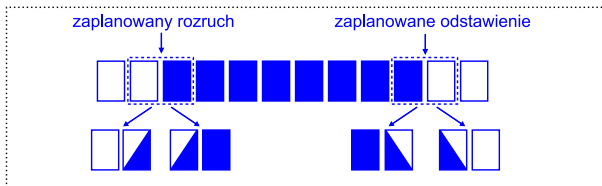
- 2 **Uproszczenie** sformułowania realizacji zysku z_s

$$z_s = \sum_h \sum_j \hat{z}_s^{jh} v_{jh} - S_j r_{jh} \quad \forall s$$

Wspomaganie działalności handlowej wytwórcy

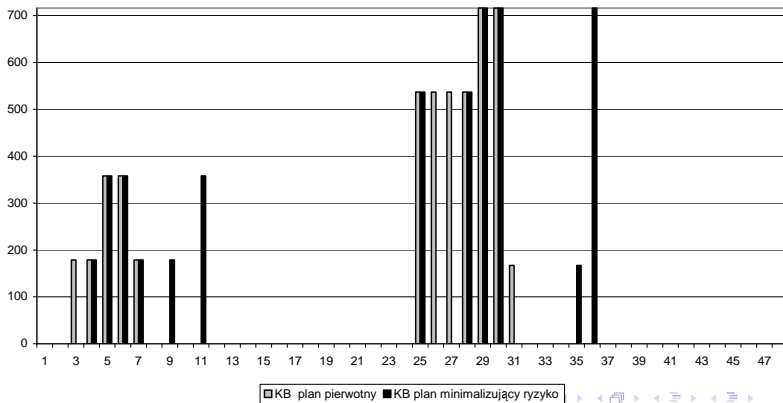
Opracowane modele dla wytwórcy typu *price-taker*

- Model ciągły elastycznego obrotu dla ustalonego planu pracy
- Model zintegrowanego planowania pracy i obrotu
- **Model elastycznego planu rozruchów i odstawiń**



Cechy opracowanych modeli

- Dokładne oszacowanie potencjalnych zysków, dzięki uwzględnieniu możliwości elastycznego dopasowania produkcji do ceny
- Dopasowanie do stopnia awersji do ryzyka wytwórcy
- Duża efektywność obliczeniowa

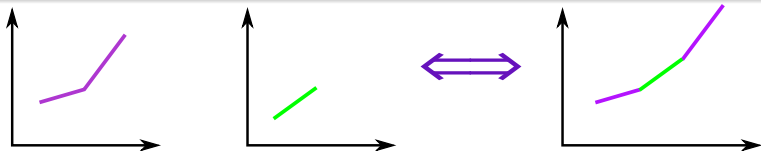


Model planowania zagregowanej generacji grupy jednostek

Plan w poszczególnych etapach h określa:

- **zagregowaną** wielkość wytwarzanej energii $p_h \Leftrightarrow p_{jh}$
- **zagregowany** koszt generacji $K_h(p_h) \Leftrightarrow K_{jh}$

$$K_h \geq A^k p_h + B^k(v_{1h}, \dots, v_{|J|h})$$



Model planowania zagregowanej generacji grupy jednostek

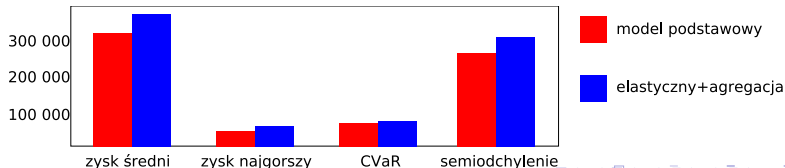
Plan w poszczególnych etapach h określa:

- **zagregowaną** wielkość wytwarzanej energii $p_h \Leftrightarrow p_{jh}$
- **zagregowany** koszt generacji $K_h(p_h) \Leftrightarrow K_{jh}$

$$K_h \geq A^k p_h + B^k(v_{1h}, \dots, v_{|J|h})$$

Efekt: **zmniejszenie** liczby zmiennych i ograniczeń

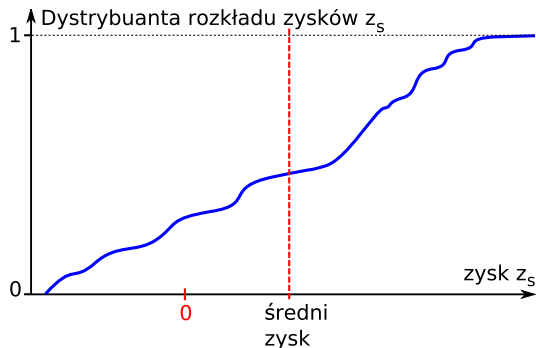
- modele dodatkowo uwzględniające **ryzyko kosztu awarii**
- modelowanie efektu zwiększenia elastyczności zagregowanej oferty



Uwzględnienie ryzyka przy wspomaganiu decyzji wytwórcy

Modele optymalizacji wielokryterialnej

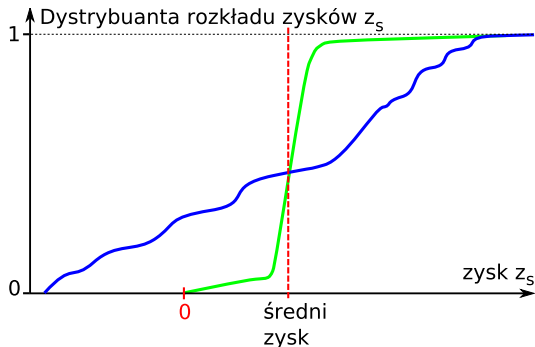
- **Najczęstsze podejście: maksymalizacja średniego zysku**
- Miary ryzyka wprowadzone w rozprawie do modeli
- Skalaryzacja metodą punktu odniesienia



Uwzględnienie ryzyka przy wspomaganiu decyzji wytwórcy

Modele optymalizacji wielokryterialnej

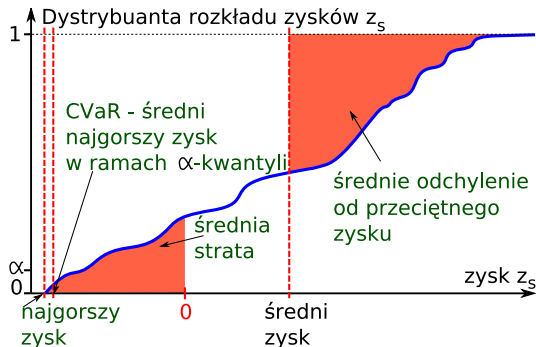
- Najczęstsze podejście: maksymalizacja średniego zysku
- Miary ryzyka wprowadzone w rozprawie do modeli
- Skalaryzacja metodą punktu odniesienia



Uwzględnienie ryzyka przy wspomaganiu decyzji wytwórcy

Modele optymalizacji wielokryterialnej

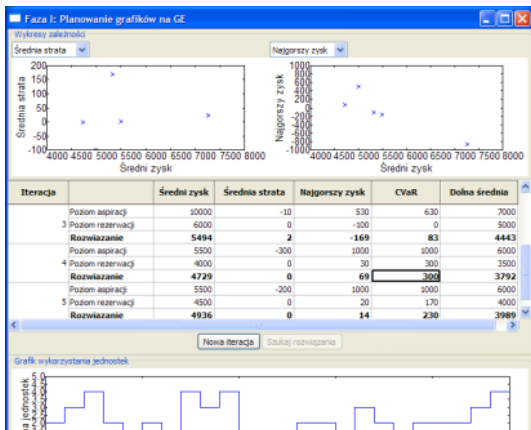
- Najczęstsze podejście: maksymalizacja średniego zysku
- **Miary ryzyka wprowadzone w rozprawie do modeli**
- Skalaryzacja metodą punktu odniesienia



Uwzględnienie ryzyka przy wspomaganiu decyzji wytwórcy

Modele optymalizacji wielokryterialnej

- Najczęstsze podejście: maksymalizacja średniego zysku
- Miary ryzyka wprowadzone w rozprawie do modeli
- **Skalaryzacja metodą punktu odniesienia**



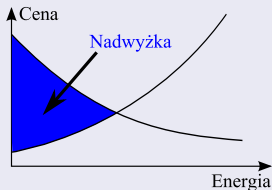
Cechy opracowanej koncepcji

- Możliwość **modelowania różnych preferencji** odnośnie ryzyka
- **Spełnienie aksjomatów** wspomagania decyzji w warunkach ryzyka
- **Elastyczne i intuicyjne** wyznaczanie rozwiązań **efektywnych**
- **Łatwość stosowania** w złożonych problemach decyzyjnych wytwórcy



Model wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Model rynku krótkoterminowego lokalnego typu *pool*

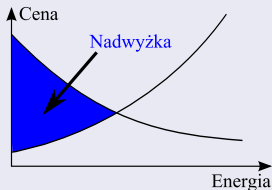


- **Cel:** maksymalizacja nadwyżki
- Bilansowanie ofert wytwórców i odbiorców
- poprzez rozwiązanie zadania typu *Unit Commitment*



Model wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

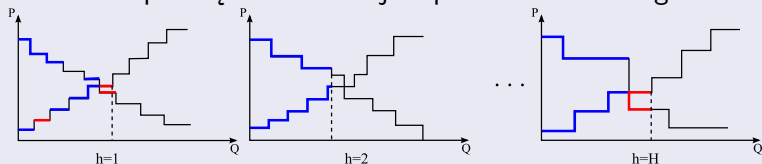
Model rynku krótkoterminowego lokalnego typu *pool*



- **Cel:** maksymalizacja nadwyżki
- Bilansowanie ofert wytwórców i odbiorców
- poprzez rozwiązanie zadania typu *Unit Commitment*

Problem z wyceną obrotu

Punkt przecięcia ofert nie jest punktem równowagi...



Model wyceny wieloetapowego obrotu

- Typ modelu: jednolite ceny kupna i sprzedaży plus rekompensaty dla ofert konkurencyjnych wycenianych ze stratą

Opracowana metoda wyznaczania kosztów rekompensat

- Wykorzystanie koncepcji programowania dynamicznego: odniesienie do optymalnych wieloetapowych zysków

Cechy opracowanego podejścia

- ceny nie są dyskryminujące dla żadnego z uczestników
- efektywny model programowania liniowego mieszanego

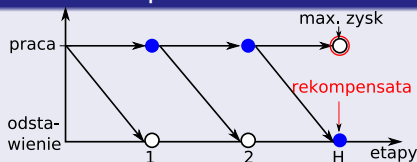


Model wyceny wieloetapowego obrotu

- Typ modelu: jednolite ceny kupna i sprzedaży plus rekompensaty dla ofert konkurencyjnych wycenianych ze stratą

Opracowana metoda wyznaczania kosztów rekompensat

- Wykorzystanie koncepcji programowania dynamicznego: odniesienie do optymalnych wieloetapowych zysków



Cechy opracowanego podejścia

- ceny nie są dyskryminujące dla żadnego z uczestników
- efektywny model programowania liniowego mieszanego

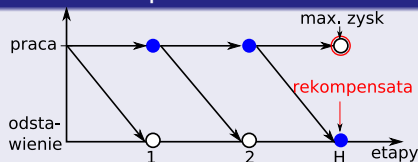


Model wyceny wieloetapowego obrotu

- Typ modelu: jednolite ceny kupna i sprzedaży plus rekompensaty dla ofert konkurencyjnych wycenianych ze stratą

Opracowana metoda wyznaczania kosztów rekompensat

- Wykorzystanie koncepcji programowania dynamicznego: odniesienie do optymalnych wieloetapowych zysków



Cechy opracowanego podejścia

- ceny nie są dyskryminujące dla żadnego z uczestników
- efektywny model programowania liniowego mieszanego



Podsumowanie wyników rozprawy

Opracowano modele pokrywające znaczny obszar działalności wytwórców na rynku energii:

- Modele planowania generacji poszczególnych jednostek
- Modele wspomaganie działalności handlowej wytwórcy
- Modele planowania generacji grupy jednostek
- Modele wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Cechy analizowanych modeli

- mają szeroką funkcjonalność dla wspomagania decyzji wytwórcy

Podsumowanie wyników rozprawy

Opracowano modele pokrywające znaczny obszar działalności wytwórców na rynku energii:

- Modele planowania generacji poszczególnych jednostek
- Modele wspomaganie działalności handlowej wytwórcy
- Modele planowania generacji grupy jednostek
- Modele wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Cechy analizowanych modeli

- mają szeroką funkcjonalność dla wspomaganie decyzji wytwórcy
 - odnoszą się do ryzyka ponoszonego przez wytwórcę
 - uwzględniają złożoność ograniczeń technicznych jednostek
 - są odpowiednie dla wielokrotnego procesu decyzyjnego
- są efektywnie rozwiązywane przy zastosowaniu pakietów optymalizacyjnych dla zadań MILP (np. Cplex)

Podsumowanie wyników rozprawy

Opracowano modele pokrywające znaczny obszar działalności wytwórców na rynku energii:

- Modele planowania generacji poszczególnych jednostek
- Modele wspomaganie działalności handlowej wytwórcy
- Modele planowania generacji grupy jednostek
- Modele wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Cechy analizowanych modeli

- mają szeroką **funkcjonalność** dla wspomaganie decyzji wytwórcy
 - odnoszą się do **ryzyka** ponoszonego przez wytwórcę
 - uwzględniają **złożoność ograniczeń** technicznych jednostek
 - są odpowiednie dla **wielokrotnego** procesu decyzyjnego
- są efektywnie rozwiązywane przy zastosowaniu pakietów optymalizacyjnych dla zadań MILP (np. Cplex)

Podsumowanie wyników rozprawy

Opracowano modele pokrywające znaczny obszar działalności wytwórców na rynku energii:

- Modele planowania generacji poszczególnych jednostek
- Modele wspomaganie działalności handlowej wytwórcy
- Modele planowania generacji grupy jednostek
- Modele wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Cechy analizowanych modeli

- mają szeroką **funkcjonalność** dla wspomaganie decyzji wytwórcy
 - odnoszą się do **ryzyka** ponoszonego przez wytwórcę
 - uwzględniają **złożoność ograniczeń** technicznych jednostek
 - są odpowiednie dla **wielokrotnego** procesu decyzyjnego
- są efektywnie rozwiązywane przy zastosowaniu pakietów optymalizacyjnych dla zadań MILP (np. Cplex)

Podsumowanie wyników rozprawy

Opracowano modele pokrywające znaczny obszar działalności wytwórców na rynku energii:

- Modele planowania generacji poszczególnych jednostek
- Modele wspomaganie działalności handlowej wytwórcy
- Modele planowania generacji grupy jednostek
- Modele wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Cechy analizowanych modeli

- mają szeroką **funkcjonalność** dla wspomaganie decyzji wytwórcy
 - odnoszą się do **ryzyka** ponoszonego przez wytwórcę
 - uwzględniają **złożoność ograniczeń** technicznych jednostek
 - są odpowiednie dla **wielokrotnego** procesu decyzyjnego
- są efektywnie rozwiązywane przy zastosowaniu pakietów optymalizacyjnych dla zadań MILP (np. Cplex)

Podsumowanie wyników rozprawy

Opracowano modele pokrywające znaczny obszar działalności wytwórców na rynku energii:

- Modele planowania generacji poszczególnych jednostek
- Modele wspomaganie działalności handlowej wytwórcy
- Modele planowania generacji grupy jednostek
- Modele wieloetapowego bilansowania ofert z ograniczeniami

Cechy analizowanych modeli

- mają szeroką **funkcjonalność** dla wspomaganie decyzji wytwórcy
 - odnoszą się do **ryzyka** ponoszonego przez wytwórcę
 - uwzględniają **złożoność ograniczeń** technicznych jednostek
 - są odpowiednie dla **wielokrotnego** procesu decyzyjnego
- są efektywnie rozwiązywane przy zastosowaniu pakietów optymalizacyjnych dla zadań MILP (np. Cplex)

Najważniejsze publikacje wyników rozprawy

- Czasopisma naukowe:

- Kaleta M., Ogryczak W., Toczyłowski E., Żółtowska I.: «On multiple criteria decision support for energy market participants» *Annals of Operations Research*, vol. 121, pp. 79–104. Kluwer, 2003.
- Żółtowska I., Toczyłowski E.: «Planowanie pracy grupy jednostek wytwórczych w oparciu o zagregowaną funkcję kosztów», *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, z. 145, str. 225–234, 2006.

- Konferencje międzynarodowe:

- Toczyłowski E., Żółtowska I.: «Social welfare distribution in multiperiod pool based energy market», *Proceedings of Mini-Euro Conference on ORMMES*. Coimbra, Portugal, 6–9 Sept. 2006.
- Żółtowska I., Toczyłowski E.: «Analiza modeli i metod wspomaganie decyzji w module harmonogramowania wytwarzania systemu EnAdviser», *Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej Aktualne Problemy w Elektroenergetyce*, str. 195–202, Jurata 2001.

