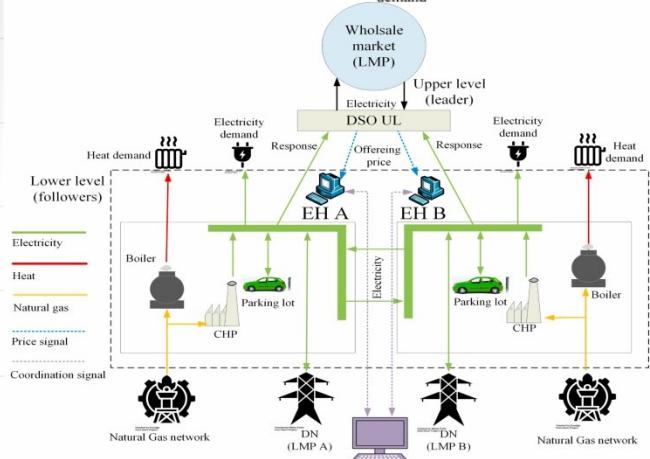
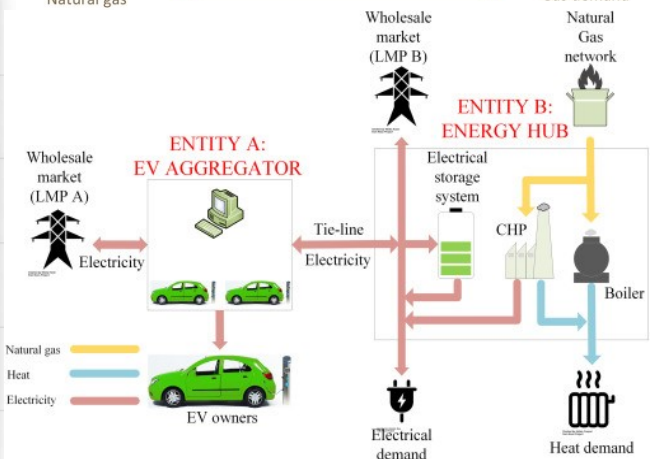
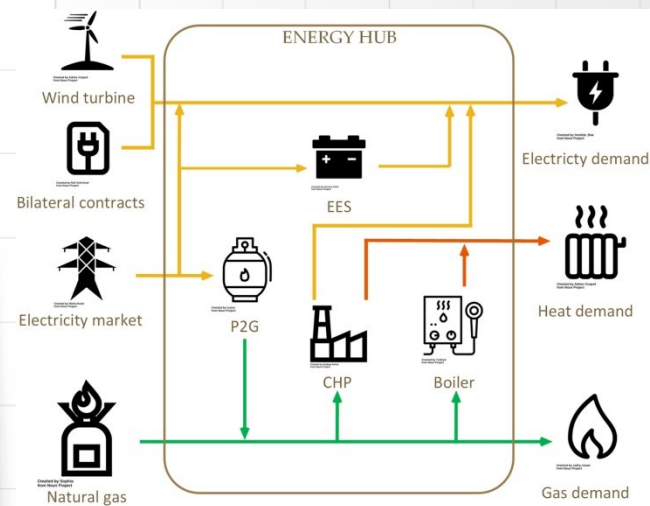




Politechnika  
Wroclawska



# Hybrydowy odporny model optymalizacyjny do planowania wielonośnikowych hubów energetycznych

Zbigniew Leonowicz

Politechnika Wroclawska, Wydział  
Elektryczny, Katedra Podstaw  
Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Budynek D-1

Plac Grunwaldzki 13, Wrocław

<https://kpee.pwr.edu.pl/>



# Laboratoria Badawcze

- Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów
- Laboratorium Systemów Monitorowania Jakości Energii Elektrycznej
- Laboratorium Badania Dielektryków i Elektrostatyki
- Laboratorium Metrologii Elektrycznej, Sensorów i Wzorcowania Przyrządów Elektrycznych
- Laboratorium Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej
- **Międzykatedralne Laboratorium Systemów Energetyki Odnawialnej**

# Elektroenergetyczne Systemy Wielonośnikowe

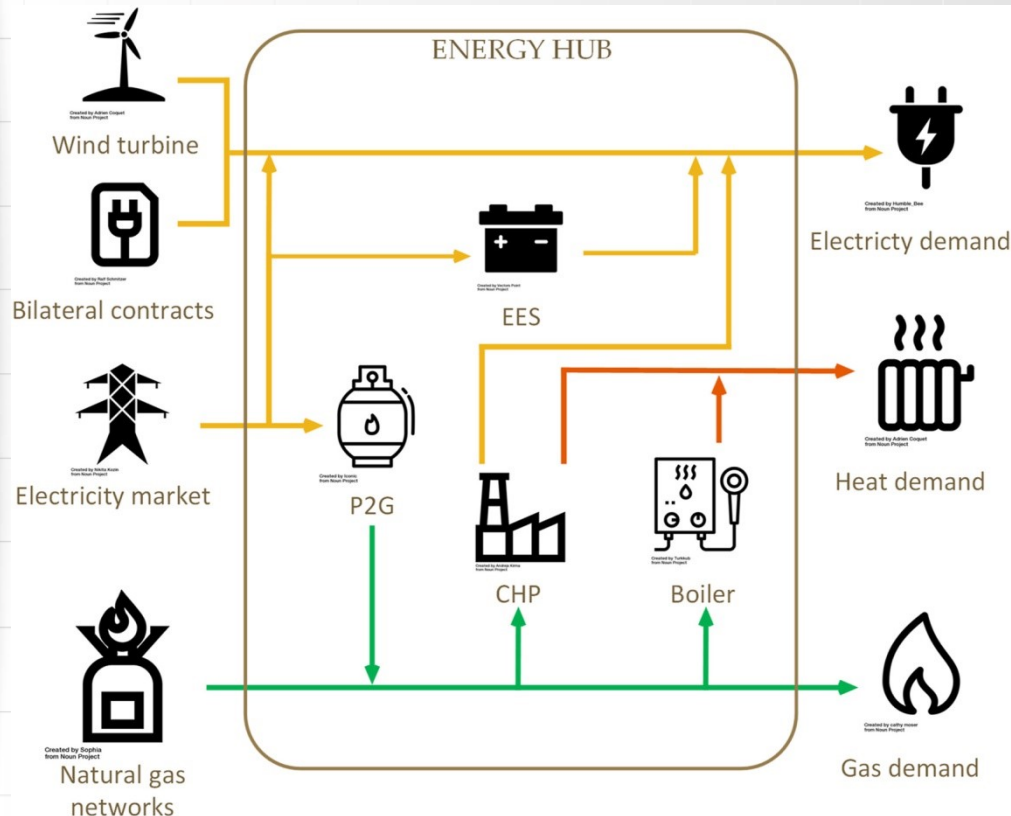
- 1) A. Najafi, M. Pourakbari-Kasmaei, M. Jasinski, M. Lehtonen and Z. Leonowicz: "Medium-Term Hybrid IGDT-Robust Optimization Model for Optimal Self Scheduling of Multi-carrier Energy Systems": **Energy: IF=7,147**, Citescore=11,5, **200 p.** <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121661>, 8 cyt.
- 2) A. Najafi, M. Pourakbari-K., M. Jasinski, M. Lehtonen and Z. Leonowicz: A Hybrid Decentralized Stochastic-Robust Model for Optimal Coordination of EV Aggregator and Energy Hub Entities, Article number 117708, **Applied Energy**, **IF=9,746**, Citescore=14,1, **200 p.** <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117708>, 4 cyt.
- 3) A. Najafi, M. Jasiński, Z. Leonowicz: "A hybrid distributed framework for optimal coordination of electric vehicle aggregators problem, **Energy: IF=7,147**, Citescore=11,5, **200 p.** , 2022, No.123674, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123674>.
- 4) A. Najafi, M. Pourakbari-Kasmaei, M. Jasinski, J. Contreras, M. Lehtonen, Z. Leonowicz: "The role of EV based peer-to-peer transactive energy hubs in distribution network optimization", **Applied Energy** 319 (2022) 119267, **IF=9,746**, Citescore=14,1, **200 p.** <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119267>

# Motywacja

- Kwestie ekonomiczne i środowiskowe motywują do przejścia od konwencjonalnych systemów energetycznych do zrestrukturyzowanych systemów energetycznych z redukcją zużycia paliw kopalnych,
- Tradycyjne systemy zmieniają się w systemy wielonośnikowe,
- Systemy multienergetyczne przynoszą korzyści, tj. niższą emisję dwutlenku węgla, wysoką wydajność i możliwość łączenia z innymi rodzajami energii lub obszarami,
- System wieloenergetyczny to system energetyczny utworzony przez połączenie wielu elementów w całość, czyli integrację wytwarzanie energii, przesyłu, magazynowania i zużycia energii elektrycznej, ciepła, gazu ziemnego i innych rodzajów energii.

# Hub energetyczny

## Wprowadzenie

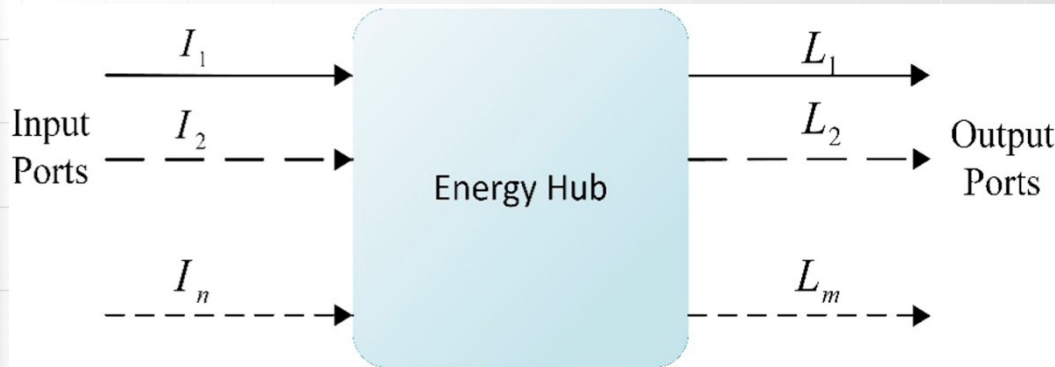


- 2002 projekt VoFEN ETH Zurich (Vision of Future Energy Networks)\*
- Przejście w kierunku systemów multienergetycznych, aby czerpać korzyści z synergii różnych nośników energii.
- Rozwój struktur niehierarchicznych
- Zintegrowane i połączone systemy

\*IEEE Power Energy Mag, 5 (2007)

# Hub energetyczny

## Struktura



$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_m \end{bmatrix}$$

Koncepcja HE została zdefiniowana jako interfejs między konsumentami, producentami, urządzeniami magazynującymi i urządzeniami transmisyjnymi na różne sposoby: bezpośrednio lub poprzez urządzenia do konwersji, obsługujące jeden lub kilka nośników

- Macierzowy model koncepcji HE komunikacji różnych nośników energii na wejściu i wyjściu za pośrednictwem macierzy sprzężeń. Każdy z elementów macierzy reprezentuje cechy wewnętrzne EH, w tym współczynniki połączeń i transformacji nośników energii

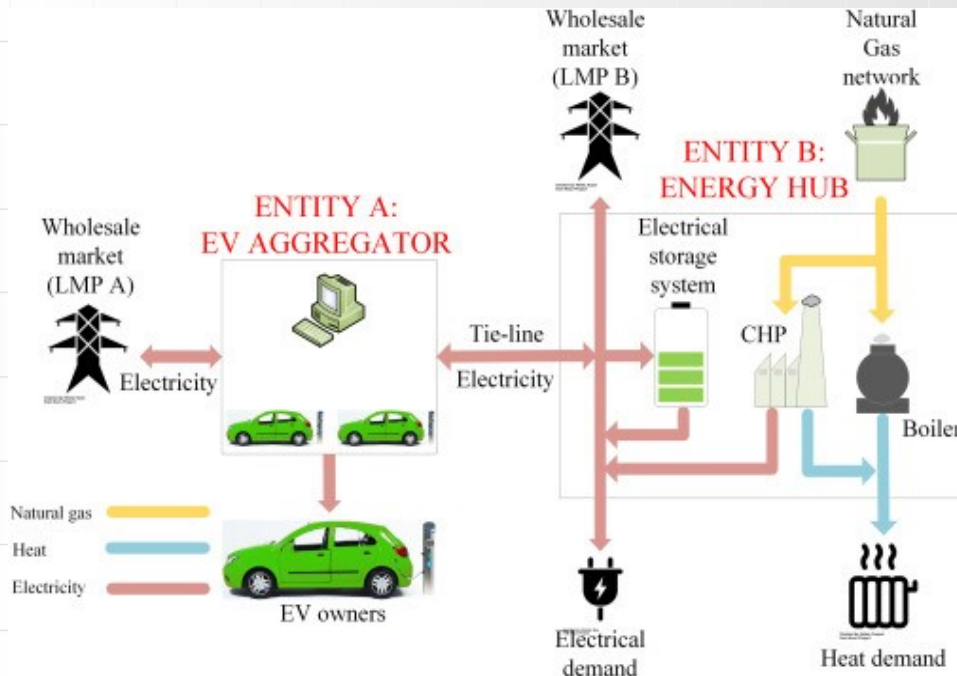


# Historia i rozwój koncepcji

- 2005 Optymalny rozptyw mocy w HE
- 2007 Linearyzacja nieliniowego problemu optymalizacji
- 2009 Modelowanie niezawodności
- 2010 Modelowanie matematyczne HE
- 2012 Optymalizacja struktur HE
- 2014 Optymalizacja wielokryterialna w HE
- 2015 Optymalne planowanie HE
- 2016 Modelowanie z uwzględnieniem niepewności
- 2010 Aspekty ekonomiczne funkcjonowania HE
- 2021 Decentralizacja

# HE i agregator pojazdów elektrycznych (EVAGG)

[2, 3]



- LMP Locational Marginal Prices Lokalne ceny krańcowe określają cenę energii elektrycznej w czasie rzeczywistym w danym miejscu sieci
- Fundamentalne znaczenie dla transakcji na konkurencyjnym hurtowym rynku energii

- 2020-21 współpraca HE i EV
- Proponujemy jako pierwsi zdecentralizowany model współpracy EH+EV w [2],
- Operatorzy EH i EV są niezależni
- Posiadają tylko informacje o przepływie energii elektrycznej
- Decyzje podejmują zgodnie z własnymi celami i informacjami o przepływie energii i podlegają LMP

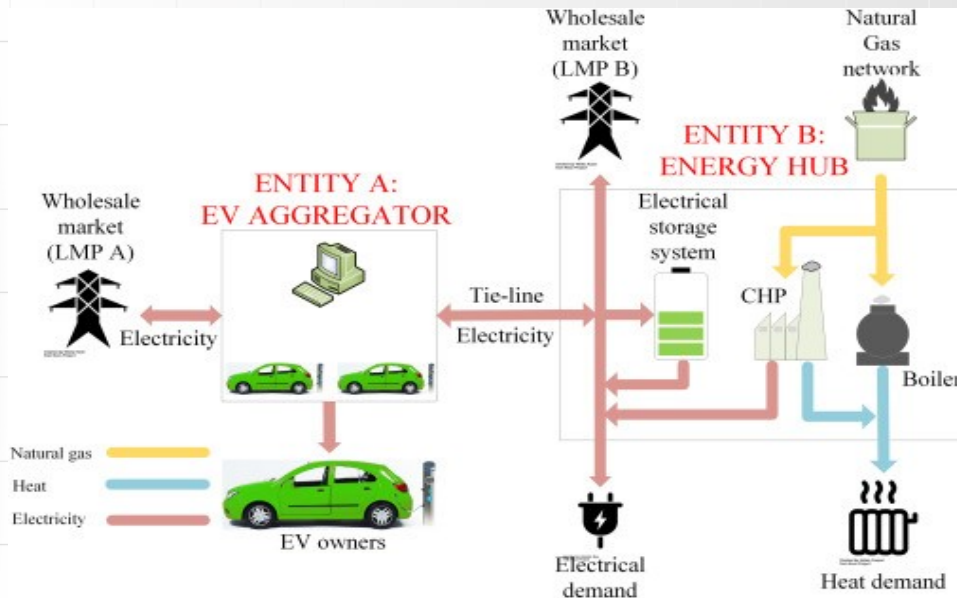


# Co proponujemy

- Ramy zdecentralizowanego działania HE i EV celu koordynowania wymiany energii elektrycznej między podmiotami. Zaproponowany model umożliwia zachowanie prywatności
- Zaproponowano model budżetu niepewności do zarządzania odpornością modelu na wahania cen, przy czym możliwe są zarówno ujemne, jak i dodatnie odchylenia od LMP
- Zaproponowanie hybrydowego modelu RO (optymalizacja odporna) -SP (programowanie stochastyczne) w celu uwzględnienia niepewności użytkowania pojazdów elektrycznych

# Opis systemu

[2]



Istnieje jeden hurtowy rynek energii elektrycznej z dwoma różnymi cenami obszarowymi z LMP-A i LMP-B

1. Operator EV wchodzi w interakcje z rynkiem hurtowym w LMP-A i sprzedaje energię elektryczną właścicielom pojazdów elektrycznych wg. ustalonej taryfy, a także handluje energią elektryczną z operatorem HE po zakontraktowanej cenie.

- HE to duży konsument, który stara się minimalizować swój całkowity koszt. W tym celu EH współdziała z rynkiem hurtowym w LMP-B, kupuje gaz ziemny z sieci gazowej i handluje energią elektryczną z operatorem EV. Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej (CHP) do zaspokojenia zapotrzebowania na ciepło, są zasilane gazem ziemnym, podczas gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną EH jest zaspokajane poprzez zakup energii elektrycznej z rynku hurtowego, wytwarzanie energii elektrycznej za pośrednictwem CHP, rozładowywanie systemu magazynowania EH a także poprzez zakup energii elektrycznej od podmiotu EVAGG

# Model operatora EV

[2]

- Operator EV ma na celu zminimalizowanie kosztów (lub maksymalizację zysku) poprzez interakcję z rynkiem hurtowym i EH, a także sprzedaż energii elektrycznej właścicielom pojazdów elektrycznych,
- Transakcje z rynkiem hurtowym są obarczone niepewnością,
- Stan naładowania pojazdu elektrycznego jest ograniczony jego dolną i górną granicą a każdy EV wyjeżdża z parkingu w pełni naładowany,
- Energia wykorzystywana do ładowania parkingu pochodzi z energii elektrycznej zakupionej na rynku hurtowym i EH,
- Energia z parkingu EV może być wykorzystana poprzez sprzedaż energii elektrycznej właścicielom pojazdów elektrycznych, rynkowi hurtowemu i operatorowi EH,
- Dodatkowe ograniczenia dotyczą jednoczesności ładowania, zdolności transmisji energii, etc.
- 13 równań

# Model operatora EV

[2]

$$\min \sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{m=1}^M N_{EV} \mu_m \left\{ \sum_{t=1}^T \pi_t^{con} \left( p_{tsm}^{EH-AGG} - p_{tsm}^{AGG-EH} \right) - \pi^{s-EV} p_{tsm}^{s-EH} + \right. \\ \left. \max_{\phi_{\pi_{wm-a}}} \sum_{t=1}^T \pi_t^{wm-a} \left( p_{tsm}^{AG,b-g} - p_{tsm}^{AG,s-g} \right) \right\} \quad (1)$$

$$E_{tsm}^{EV} = E_{t-1,sm}^{EV} + \eta_{ch}^{EV} p_{tsm}^{ch,EV} - \frac{p_{tsm}^{dch,EV}}{\eta_{dch}^{EV}} \quad (2)$$

$$E_{\min}^{EV,m} \leq E_{tsm}^{EV} \leq E_{\max}^{EV,m} \quad (3)$$

$$p_{tsm}^{s-EV} = E_{\max}^{EV,m} \quad \forall t = DT \quad (4)$$

$$p_{tsm}^{ch,EV} = p_{tsm}^{AG,b-g} + p_{tsm}^{EH-AGG} \quad (5)$$

$$p_{tsm}^{dch,EV} = p_{tsm}^{s-EV} + p_{tsm}^{AG,s-g} + p_{tsm}^{AGG-EH} \quad (6)$$

$$E_{tsm}^{EV} = E_{ini,sm}^{EV} \quad \forall t = AT \quad (7)$$

$$p_{\min}^{ch,m} \cdot u_{tsm}^{ch,EV} \leq p_{tsm}^{ch,EV} \leq p_{\max}^{ch,m} \cdot u_{tsm}^{ch,EV} \quad \forall t \in [AT - DT] \quad (8)$$

$$p_{\min}^{dch,m} \cdot u_{tsm}^{dch,EV} \leq p_{tsm}^{dch,EV} \leq p_{\max}^{dch,m} \cdot u_{tsm}^{dch,EV} \quad \forall t \in [AT - DT] \quad (9)$$

$$u_{tsm}^{ch,EV} + u_{tsm}^{dch,EV} \leq 1 \quad \forall t \in [AT - DT] \quad (10)$$

$$p_{tsm}^{AGG-EH} \leq L^{max} z_{tsm}^{AGG-EH} \quad (11)$$

$$p_{tsm}^{EH-AGG} \leq L^{max} z_{tsm}^{EH-AGG} \quad (12)$$

$$z_{tsm}^{AGG-EH} + z_{tsm}^{EH-AGG} \leq 1 \quad (13)$$

# Model operatora HE

[2]

- EH jest dużym konsumentem, który dąży do zminimalizowania swoich kosztów poprzez sprzedaż / zakup z / na rynek hurtowy w LMP-B, zakup gazu ziemnego z sieci gazowej i interakcję z operatorem EV,
- Bierzemy pod uwagę bilans energii elektrycznej i cieplnej,
- Gaz wchodzący do EH zasila elektrociepłownię i kotły,
- Opisujemy zamianę gazu na ciepło przez kocioł i konwersję gazu na energię elektryczną i ciepłą przez kogenerację,
- Stan naładowania baterii, szybkość ładowania energii elektrycznej do EHSS i odprowadzanie energii z EHSS są ograniczone,
- Zakupiona energia elektryczna z rynku hurtowego może być przechowywana w baterii lub bezpośrednio przekazywana do HE.
- Energia wymieniana z operatorem EV jest ograniczona poprzez moc linii przesyłowej,
- Energia elektryczna może być sprzedawana i kupowana w tym samym czasie.
- 16 równań

# Model operatora HE

[2]

$$\min \sum_{s=1}^S \rho_s \left\{ \sum_{t=1}^T \pi_t^{gas} g_{ts} + \max_{\phi_{\pi_{wml-b}}} \sum_{t=1}^T \pi_t^{wml-b} \left( p_{ts}^{EH,b-g} - p_{ts}^{EH,s-g} \right) \right\} \quad (14)$$

$$p_{ts}^{wml} + p_{ts}^{CHP} + p_t^{dch,EH} + \sum_{m=1}^M N_{EV} \mu_m p_{tsm}^{AGG-EH} = ED_t + \sum_{m=1}^M N_{EV} \mu_m p_{tsm}^{EH-AGG} + p_{ts}^{EH,s-g} \quad (15)$$

$$h_{ts}^b + h_{ts}^{CHP} = HD_t \quad (16)$$

$$g_{ts} = g_{ts}^{CHP} + g_{ts}^b \quad (17)$$

$$h_{ts}^b = \eta^b g_{ts}^b \quad (18)$$

$$p_{ts}^{CHP} = \eta^{e,CHP} g_{ts}^{CHP} \quad (19)$$

$$h_{ts}^{CHP} = \eta^{h,CHP} g_{ts}^{CHP} \quad (20)$$

$$E_{ts}^{EH} = E_{t-1,s}^{EH} + \eta_{ch}^{EH} p_{ts}^{ST} - \frac{p_{ts}^{dch,EH}}{\eta_{dch}^{EH}} \quad (21)$$

$$E_{\min}^{EH} \leq E_{ts}^{EH} \leq E_{\max}^{EH} \quad (22)$$

$$p_{ts}^{ST} \leq p_{\max}^{ch,EH} a_{ts}^{ch,EH} \quad (23)$$

$$p_{ts}^{dch,EH} \leq p_{\max}^{dch,EH} a_{ts}^{dch,EH} \quad (24)$$

$$a_{ts}^{ch,EH} + a_{ts}^{dch,EH} \leq 1 \quad (25)$$

$$p_{ts}^{EH,b-g} = p_{ts}^{ST} + p_{ts}^{wml} \quad (26)$$

$$p_{tsm}^{AGG-EH} \leq L^{max} v_{tsm}^{AGG-EH} \quad (27)$$

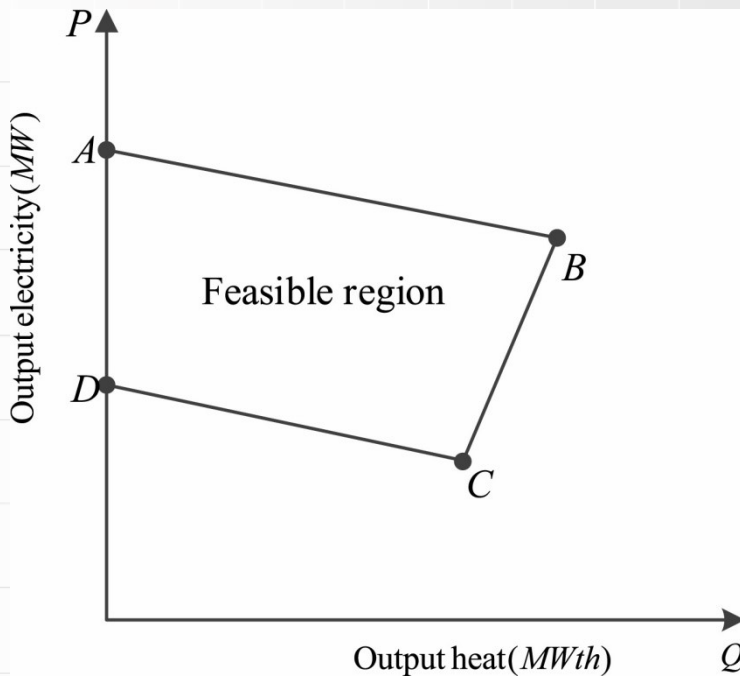
$$p_{tsm}^{EH-AGG} \leq L^{max} v_{tsm}^{EH-AGG} \quad (28)$$

$$v_{tsm}^{AGG-EH} + v_{tsm}^{EH-AGG} \leq 1 \quad (29)$$

# Model kogeneracji CHP

[2]

- Elektrociepłownia jest modelowana na podstawie możliwego regionu działania (FOR). Produkty elektryczne i termiczne kogeneracji są wzajemnie zależne, a ich zależność opisana jest przez zamknięty region, który jest nazwany FOR. Rys. 2 przedstawia FOR, gdzie zmienne  $P, Q$  oznaczają obszar produkcji elektrycznej i termicznej.



# Model niepewności rynku hurtowego

[2]

- Operator EV współdziała z rynkiem hurtowym w LMP-B, natomiast EH wymienia energię elektryczną z rynkiem hurtowym w LMP-A,
- Podmioty starają się zmaksymalizować odchylenie LMP od wartości oczekiwanej,
- Funkcja celu realizuje maksymalizację odchylenia LMP , które może być dodatnie lub ujemne, a całkowita wielkość niepewności jest ograniczona przez budżet niepewności.
- Dwa równania są nieliniowe ze względu na obecność funkcji wartości bezwzględnej.

$$|\phi_{\pi t}^a| \leq \Delta_{\max}^{AG} \bar{\pi}_t^{wm-a} \quad : \underline{\varphi}_t^a \leq 0, \bar{\varphi}_t^a \geq 0, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

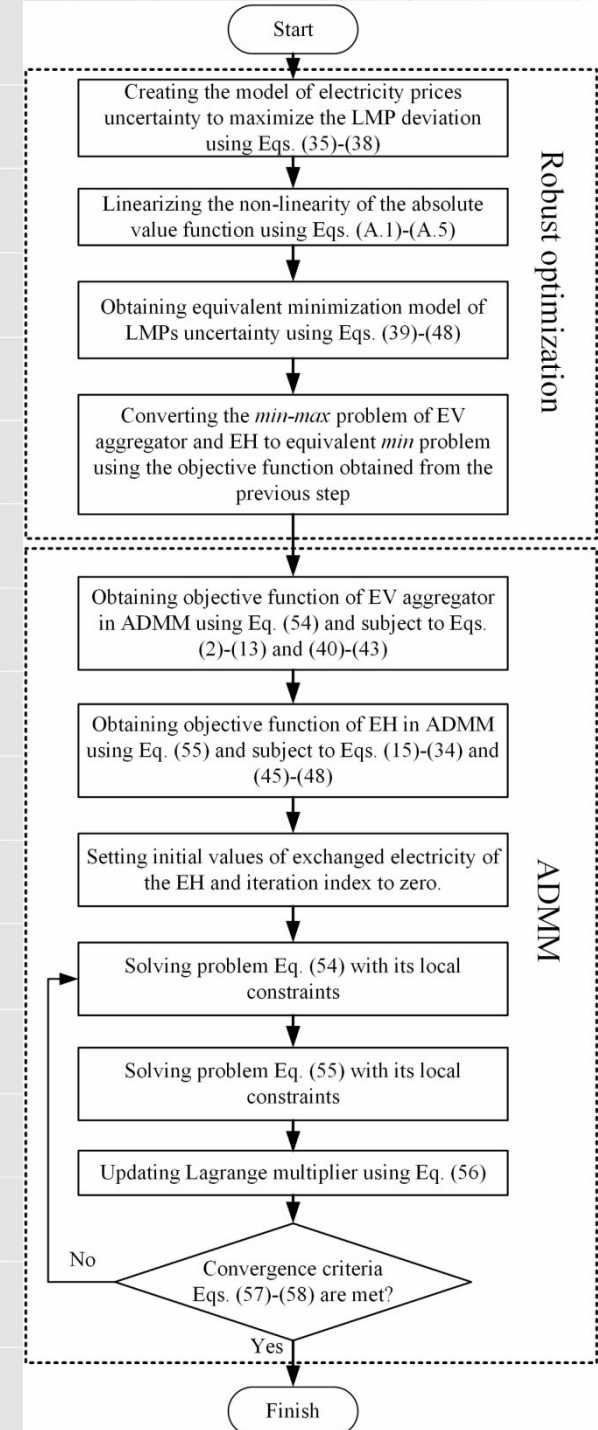
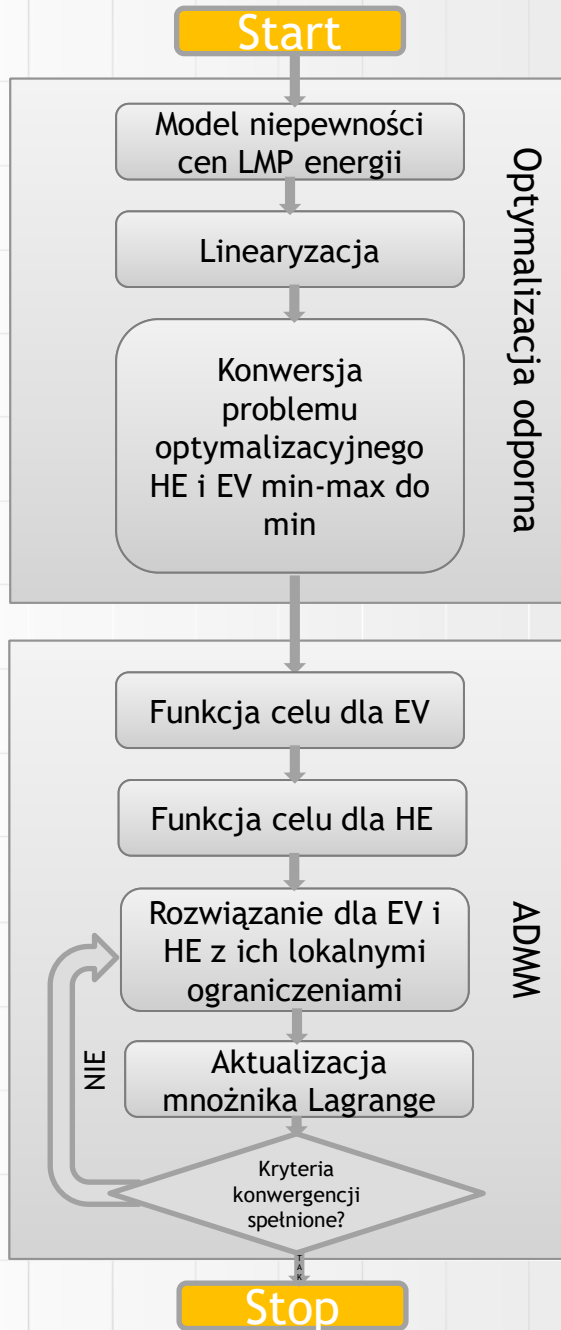
$$\sum_{t=1}^T |\phi_{\pi t}^a| \leq \Gamma^p \quad : \underline{\omega}^a \geq 0, \sigma_t^a \in \mathbf{R}, \quad \forall t = 1, \dots, T$$



# Rozwiązanie za pomocą ADMM

[2]

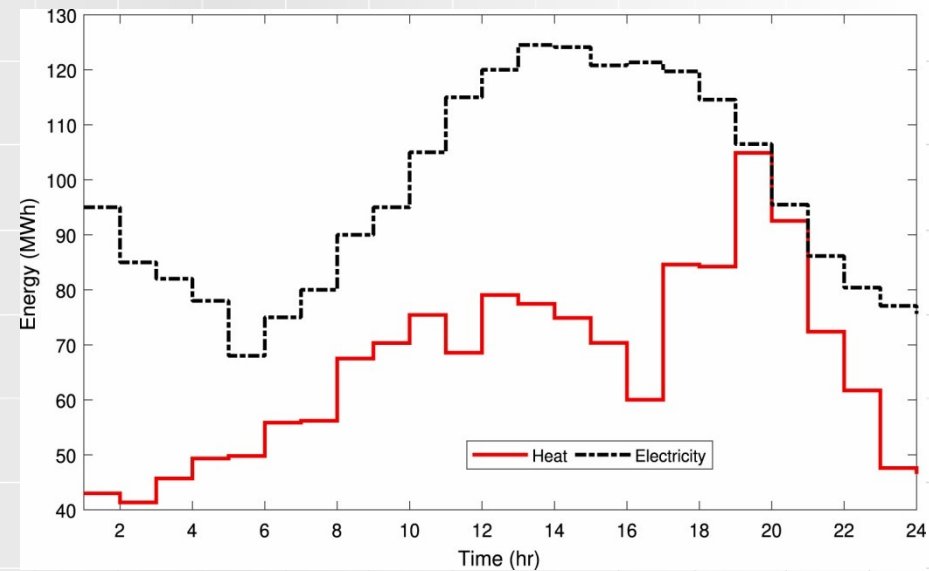
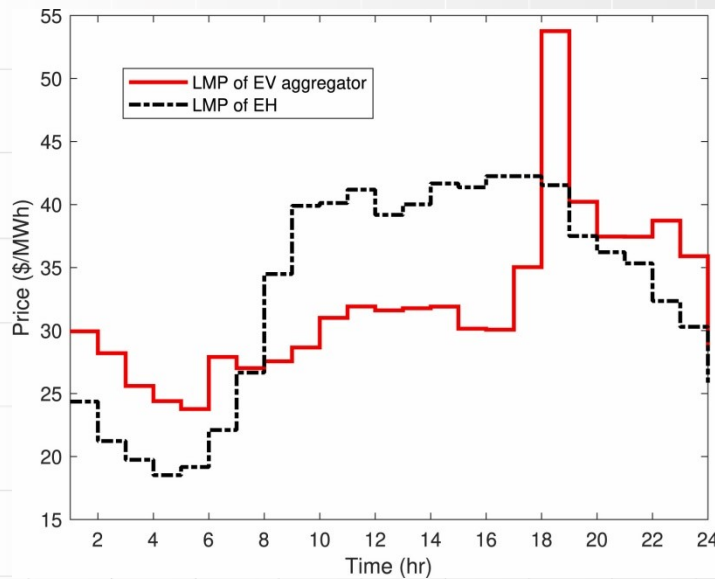
- Rozszerzone metody Lagrange'a są klasą algorytmów do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych z ograniczeniami.
- Zastępują problem optymalizacji z ograniczeniami sumą problemów bez ograniczeń i dodają składową kary do funkcji celu; różnica polega na tym, że w rozszerzonej metodzie Lagrange'a dodaje jeszcze jeden składnik, podobny do mnożnika Lagrange'a.
- Wariant standardowej rozszerzonej metody Lagrange'a, który wykorzystuje częściowe aktualizacje (podobny do metody Gaussa-Seidela do rozwiązywania równań liniowych) znany jest jako metoda naprzemiennych mnożników lub **ADMM**,
- Algorytm ADMM jest wykorzystywany do zagadnień optymalizacji, gdy kilka podmiotów ma za zadanie optymalnie zarządzać swoimi systemami przy minimalnej wymianie informacji pomiędzy nimi.



# Symulacje

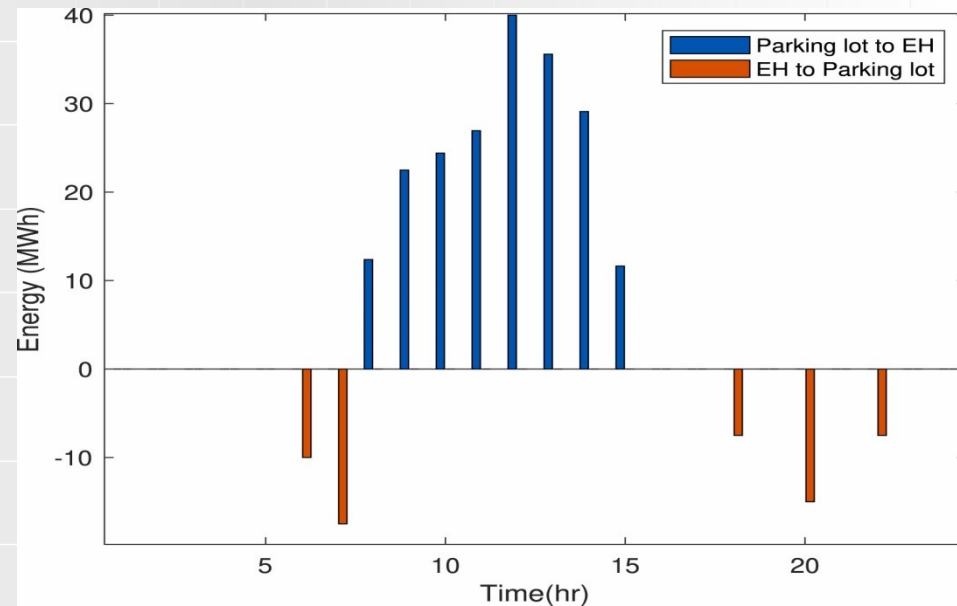
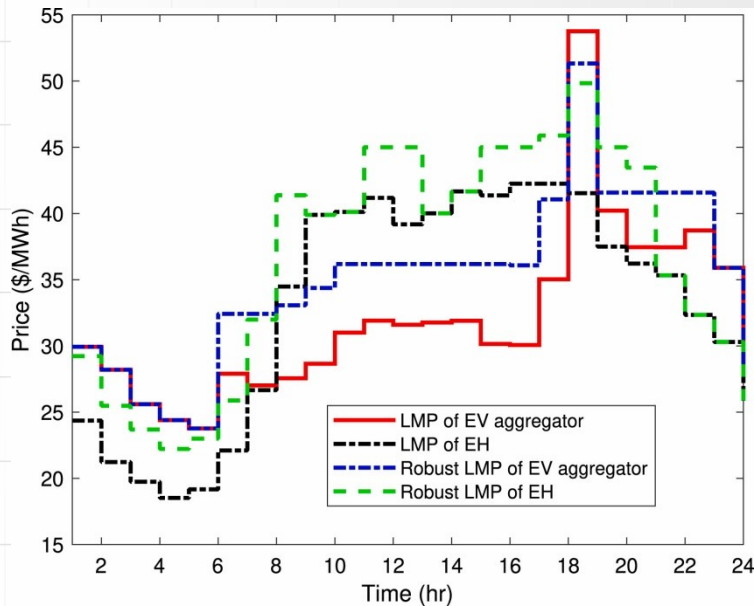
[2]

- Wygenerowano 20 scenariuszy czasu przyjazdu, czasu odjazdu i początkowego stanu naładowania dla 5. różnych kategorii pojazdów elektrycznych,
- Całkowita liczba pojazdów elektrycznych wynosi 2000, podczas gdy ich liczba zmienia się na parkingu i zależy od czasu przyjazdu AT i czasu wyjazdu DT pojazdów elektrycznych,
- Ponieważ AT i DT różnią się w różnych scenariuszach, liczba pojazdów elektrycznych podłączonych do parkingu zmienia się w czasie,



# Wyniki 1

[2]



- Porównanie cen LMP

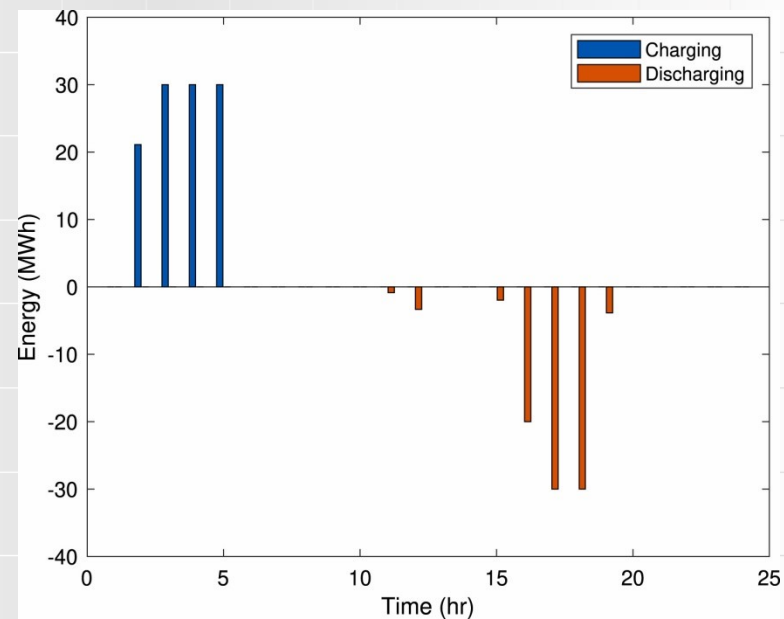
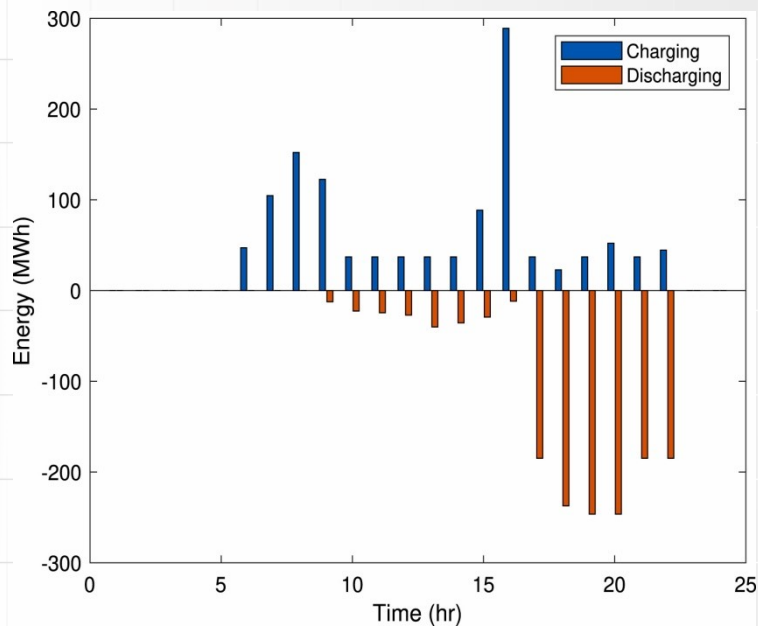
LMP często wzrasta, aby osiągnąć najgorszy przypadek realizacji LMP, w którym energia elektryczna jest kupowana wyłącznie z rynku hurtowego

- Wymiana energii pomiędzy EV a EH

Dzieje się tak, ponieważ, zgodnie z rys. w przedziale od 8:00 do 15:00 h, sam HE potrzebuje energii elektrycznej do zaspokojenia swojego zapotrzebowania na energię elektryczną. Z drugiej strony HE preferuje sprzedaż energii elektrycznej dla EV w godzinach 6:00, 7:00, 18:00, 20:00, 22:00 gdy ten oferuje wyższe ceny w porównaniu z rynkiem hurtowym

# Wyniki 2

[2]



- Magazynowanie energii w akumulatorach EV

Znaczna część rozładowania następuje, gdy pojazdy elektryczne odjeżdżają z parkingu, w odstępie od godziny 17:00 do 22:00, a druga część odbywa się, gdy energia elektryczna jest sprzedawana do HE (przedział 8-16).

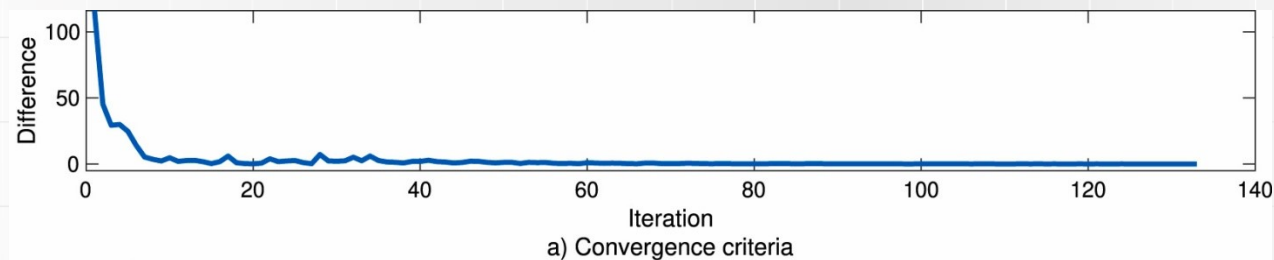
- Magazynowanie energii w HE

Bateria HE pobiera energię poza szczytem EH LMP i rozładowuje w szczytowym przedziale LMP, gdzie cena energii elektrycznej jest wyższa.

# Wyniki

## Co jest istotne?

- Analiza wyników algorytmu ADMM wskazuje na osiągnięcie małej tolerancji co świadczy o optymalnej koordynacji między podmiotami.



- Proponowane podejście zmierza do realizacji najgorszego przypadku LMP na rynku hurtowym, a jeśli model jest odporny na najgorsze warunki, to będzie także odporny na inne realizacje LMP.

Zwykle nabywca (sprzedawca) energii ma tendencję do kupowania (sprzedawania) wymaganej energii po niskiej (wysokiej) cenie. W najgorszym przypadku problem rozwiązuje się dla możliwie najwyższego (najniższego) LMP, gdy energia elektryczna jest kupowana (sprzedawana). Oznacza to, że gdy istnieje rozwiązanie matematyczne dla najwyższego (najniższego) LMP dla zakupu (sprzedaży) energii elektrycznej, to rozwiązanie na pewno będzie istniało dla niższych (wyższych) cen

# Podsumowanie

[2]

- Zaproponowano hybrydową rozproszoną, odporną strukturę programowania optymalizacyjno-stochastycznego w celu przebadania współpracy dwóch niezależnych podmiotów operatora parkingu pojazdów elektrycznych hubu energetycznego,
- Metoda mnożników naprzemiennych (ADMM) została wykorzystana do koordynacji wymiany energii elektrycznej między podmiotami z uwzględnieniem kwestii prywatności.
- Niepewność operatora parkingu obejmuje czasy przyjazdu i odjazdu pojazdów elektrycznych, a także ich stanu naładowania, gdy przybywają na parking,
- Ponadto podmioty wchodzi w interakcje z rynkami hurtowymi o niepewnych cenach krańcowych (LMP). Opracowany model uwzględnia niepewność pojazdów elektrycznych poprzez programowanie stochastyczne i maksymalizuje odchylenie LMP przy użyciu odpornego podejścia optymalizacyjnego, a następnie stosuje się metodę ADMM do rozwiązania problemu optymalizacyjnego,
- Analiza wrażliwości budżetu niepewności LMP pokazuje, że model jest odporny w stosunku do różnych wielkości niepewności, chociaż koszt HE wzrasta, a zysk EV zmniejsza się gdy zwiększymy budżet niepewności,
- Wreszcie, analiza wyników algorytmu ADMM pokazuje osiągnięcie niewielkiego błędu optymalizacji co wskazuje na odpowiednią koordynację między podmiotami.