

Mgr inż. Paweł Bralewski, dr inż. Łukasz Szablowski, prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda, dr inż. Wojciech Bujalski, prof. PW,  
Instytut Techniki Ciepłej, Zakład Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Warszawska

# Perspektywy rozwoju elektromobilności w Polsce z punktu widzenia Krajowego Systemu Elektroenergetycznego

W artykule przedstawiono temat rozwoju sektora pojazdów elektrycznych i jego możliwych skutków w kontekście obciążenia systemu elektroenergetycznego w Polsce. Celem artykułu jest oszacowanie wzrostu zapotrzebowania na moc wynikającego z ładowania samochodów elektrycznych. W pierwszej kolejności opisano obowiązujący stan prawny, który stanowi ramy dla dalszych zmian w sektorze pojazdów elektrycznych. W dalszej części artykułu przeprowadzono analizę ilościową wpływu ładowania pojazdów elektrycznych na obciążenie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Zaprezentowane zostały dane wejściowe oraz założenia przyjęte do symulacji. Opisano konstrukcję modelu obliczeniowego z uwzględnieniem różnic pomiędzy analizowanymi scenariuszami. Następnie przedstawiono i omówiono uzyskane wyniki dla Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.

## ■ Uwarunkowania prawne i polityczne

W 2014 roku wydany został dokument dotyczący rozwoju alternatywnych paliw dla transportu - Dyrektywa 2014/94/UE [3] w większej mierze niż poprzednie akty, dotyka tematu pojazdów elektrycznych, wskazując nowe zalecenia i cele w zakresie elektromobilności. Państwa członkowskie zostały zobowiązane m.in. do przedstawienia Krajowych Ram Polityki w zakresie poruszanych przez Dyrektywę obszarów do 16 listopada 2016 r.

W obliczu zobowiązań, nałożonych w ramach Dyrektywy 2014/94/UE, pol-

skie Ministerstwo Energii przedstawiło 20 września 2016 r. Pakiet na Rzecz Czystego Transportu [5], w którego skład wchodzi:

- Krajowe ramy polityki rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych [7],
- Plan Rozwoju Elektromobilności [4],
- Fundusz Niskoemisyjnego Transportu.

Krajowe ramy polityki rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych odpowiadają wymaganiom Dyrektywy w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych. Przeprowadzono w nich ocenę obecnego stanu infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych (jak również tych zasilanych innymi paliwami alterna-

tywnymi) oraz zaproponowano szereg zmian dotyczących instrumentów podatkowych, przepisów technicznych. Z punktu widzenia tej pracy najważniejsza będzie jednak analiza wprowadzenia głównego celu krajowego, który obejmuje istnienie:

- 50000 pojazdów elektrycznych w 2020 r.,
- 6000 punktów ładowania o normalnej mocy i 400 punktów ładowania o dużej mocy w 2020 r.,
- 1000000 pojazdów elektrycznych w 2025 r.

Ramy prawne dla rozwoju elektromobilności zostały ustanowione w Projekcie ustawy o elektromobilno-

ści i paliwach alternatywnych [6] opublikowanym przez Ministra Energii 27 kwietnia 2017 r.

Samochody elektryczne dzieli się na samochody zasilane wyłącznie baterią (Battery Electric Vehicle, dalej: BEV) oraz pojazdy hybrydowe (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, dalej: PHEV oraz Hybrid Electric Vehicles, dalej: HEV). Układy hybrydowe zostały bowiem zaprojektowane z myślą o jeździe miejskiej, charakteryzującej się niewielkimi dziennymi przebiegami oraz możliwością codziennego ładowania pojazdu. Samochody typu PHEV różnią się jednak od HEV możliwością ładowania tych pierwszych z sieci elektrycznej. Zatem to właśnie na nich i na pojazdach BEV skupiona zostanie uwaga w ramach tego artykułu.

### ■ Opis modelu matematycznego

- Budowa modelu symulującego obciążenie systemu elektroenergetycznego

W celu dokładniejszego zbadania możliwego wpływu samochodów elektrycznych na obciążenie sieci elektroenergetycznej, w ramach artykułu

zaprogramowany został model symulujący dodatkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną, pochodzące z ładowania pojazdów elektrycznych.

Do osiągnięcia tego celu, niezbędne było zasilenie modelu wieloma danymi statystycznymi pochodzącymi z opracowań polskich, niemieckich i brytyjskich urzędów statystycznych i jednostek badawczych (można przypuszczać, że kultura samochodowa w tych krajach nie różni się znacząco od polskiej).

Do budowy modelu wykorzystano następujące wejściowe dane:

- zapotrzebowania na moc w krajowym systemie elektroenergetycznym od 2010 do 2016 roku, publikowane przez PSE [2] (wyróżniono cztery podstawowe okresy: letni dzień roboczy, letni dzień wolny, zimowy dzień roboczy i zimowy dzień wolny)
- liczba podróży w ciągu dnia [10]
- godzina rozpoczęcia podróży [8]
- długość trwania podróży [10]
- dostępność ładowarek [9]
- krzywa wstępnego naładowania baterii - w celu utrzymania maksymalnej żywotności baterii litowo-jonowych założono, że pre-

ferowanym stanem naładowania baterii będzie zakres SOC pomiędzy 60% a 90%

- rozkład samochodów elektrycznych PHEV i BEV - w celu przeprowadzenia badań na realnych danych, wykorzystano po pięć najpopularniejszych modeli samochodów PHEV i BEV w Europie [1]
- cena energii elektrycznej - w scenariuszu rozwojowym (dane pozyskano ze strony TGE, pobierając za pomocą web scrapingu historyczne ceny energii elektrycznej na Rynku Dnia Następnego ze strony giełdy) Założenia przyjęte w modelu:
  - 1 milion pojazdów elektrycznych typu PHEV lub BEV
  - udział samochodów BEV: 0%, 50% i 100%
  - 95% sprawności cyklu ładowanie-rozładowanie dla baterii litowo-jonowej
  - 10% strat przesyłowych energii elektrycznej.

Przygotowano dwa modele symulujące wpływ ładowania baterii pojazdów elektrycznych na obciążenie systemu elektroenergetycznego: podstawowy i rozwojowy (definicje w opisane w podrozdziałach 2.2 i 2.3).



## Algorytm symulacji podstawowej

Symulacja podstawowa zakłada utrzymanie status quo w zakresie współpracy odbiorcy energii elektrycznej z siecią, czego efektem jest m.in. brak zachęt do ładowania pojazdów elektrycznych w dobowych dolinach zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym.

W przypadku stanu 0 oznaczającego podróż pojazdu algorytm wykonuje następujące działania:

$$dQ_i = Q_{i+1} - Q_i = -q \cdot s \quad (1)$$

gdzie:

$dQ$  – zmiana wartości energii zgromadzonej w baterii pomiędzy końcem a początkiem okna czasowego

$Q$  - energia zgromadzona w baterii [kWh]

$q$  - jednostkowe zużycie energii [kWh/km]

$s$  - droga przebyta przez samochód w oknie czasowym (w modelu przyjęto 10 km/15 min)

$$SOC_{i+1} = \frac{Q_{i+1}}{Q_{max}} \quad (2)$$

gdzie:

$SOC$  - poziom naładowania baterii [%]

$Q_{max}$  - maksymalna ilość możliwej do zmagazynowanej energii

W przypadku gdy w danym oknie czasowym algorytm zwracał wartość  $SOC$  poniżej 20%, podróż ulegała wymuszonemu zakończeniu. Zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami minimalna wartość  $SOC$ , jaką powinny osiągać baterie została ustalona w wysokości 20%. Końcowy stan naładowania  $SOC$  w tym oknie czasowym wynosi 20%.

Dla stanu 1, odpowiadającego trwającemu przynajmniej 2 godziny postojowi z możliwością wolnego ładowania lub postojowi poniżej 2 godzin w przypadku gdy stan naładowania baterii jest niższy niż 50% wykonywano następujące czynności:

$$SOC_{i+1} = f\left(SOC_i, \frac{15 \text{ min}}{T_{max}^{Pslow}}\right) \quad (3)$$

gdzie:  $T_{max}^{Pslow}$  - czas wolnego łado-

wania baterii od  $SOC=0\%$  do  $SOC=100\%$ .

Wartość  $SOC_{i+1}$  była wyznaczana w oparciu o wygenerowany profil ładowania baterii. Znając wartość  $SOC_i$  stosunek długości 15-minutowego interwału do czasu pełnego ładowania baterii.

$$Q_{i+1} = SOC_{i+1} \cdot Q_{max} \quad (4)$$

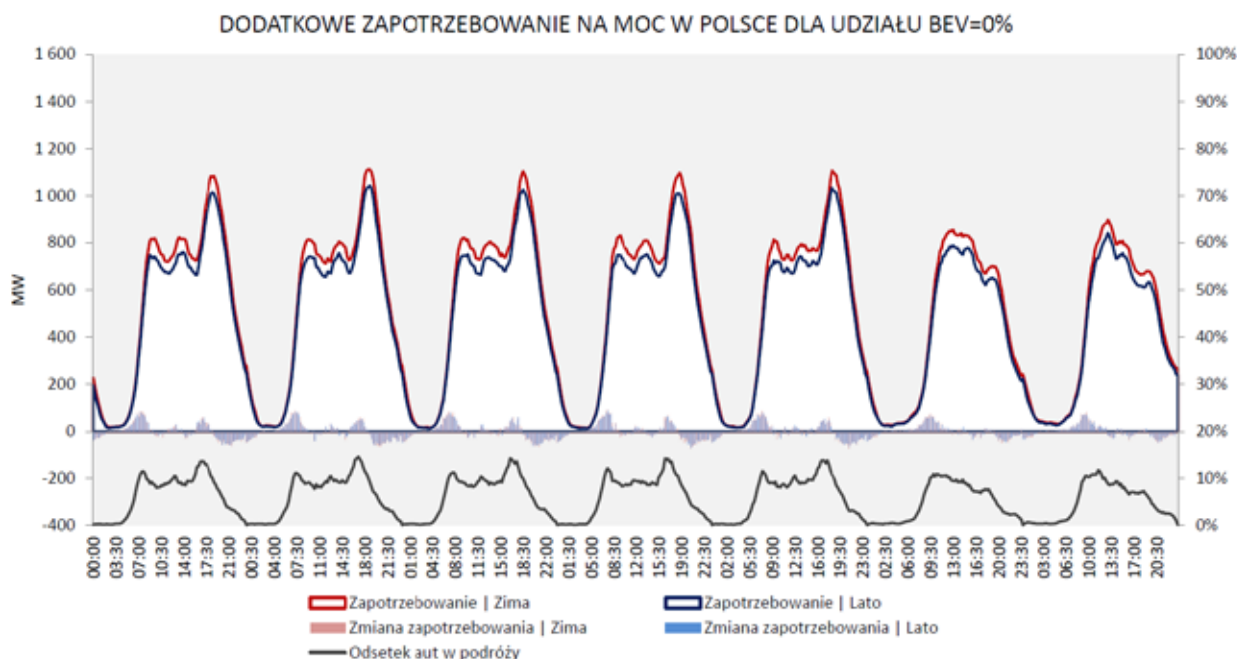
$$dQ_i = Q_{i+1} - Q_i \quad (5)$$

W przypadku osiągnięcia 90% maksymalnego naładowania baterii, algorytm wymusza zakończenie ładowania.

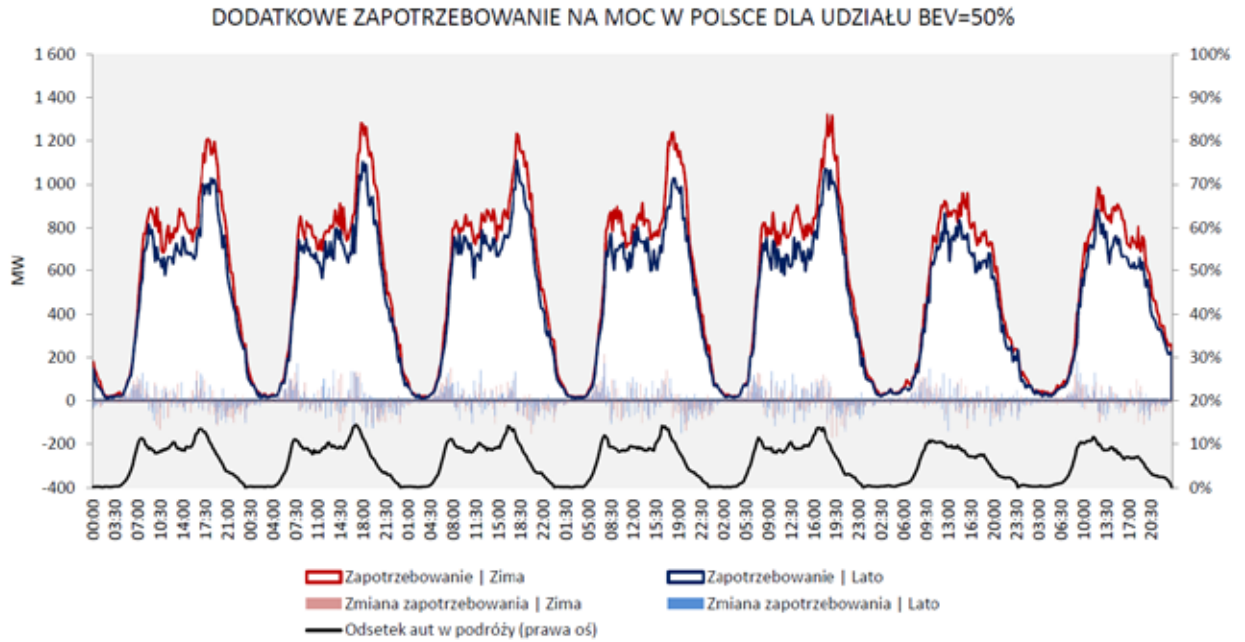
Dla stanu 2, odpowiadającego trwającemu przynajmniej 2 godziny postojowi z możliwością szybkiego ładowania lub postojowi poniżej 2 godzin w przypadku gdy stan naładowania baterii jest niższy niż 50% wykonywano działania analogiczne do poprzedniego przypadku:

$$SOC_{i+1} = f\left(SOC_i, \frac{15 \text{ min}}{T_{max}^{Pfast}}\right) \quad (6)$$

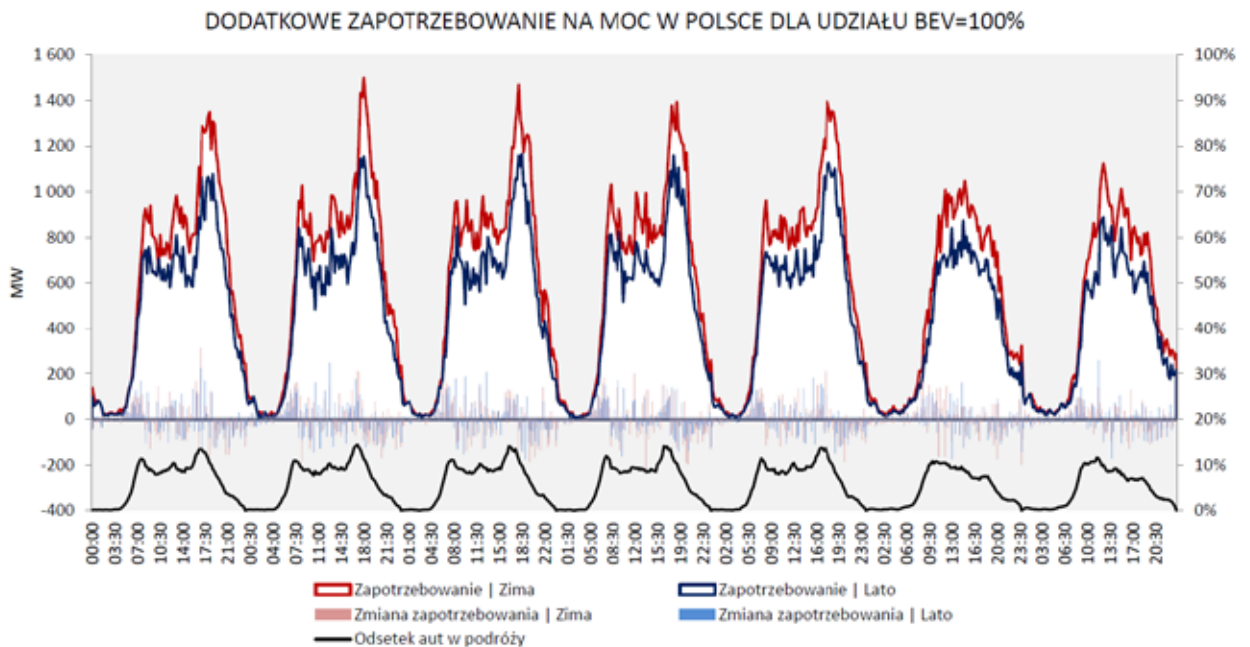
gdzie:  $T_{max}^{Pfast}$  - czas szybkiego ładowania baterii od  $SOC=0\%$  do  $SOC=100\%$ .



Rys. 1. Rozkład czasowy zapotrzebowania na moc w KSE wywołanego ładowaniem pojazdów elektrycznych dla modelu podstawowego - udział BEV 0%



Rys. 2. Rozkład czasowy zapotrzebowania na moc w KSE wywołanego ładowaniem pojazdów elektrycznych dla modelu podstawowego - udział BEV 50%



Rys. 3. Rozkład czasowy zapotrzebowania na moc w KSE wywołanego ładowaniem pojazdów elektrycznych dla modelu podstawowego - udział BEV 100%

Wartość  $SOC_{i+1}$  była wyznaczana w oparciu o wygenerowany profil ładowania baterii. Znając wartość  $SOC_i$  i stosunek długości 15-minutowego interwału do czasu pełnego ładowania baterii, można określić stan naładowania na koniec 15-minutowego okna pętli.

$$Q_{i+1} = SOC_{i+1} \cdot Q_{max} \quad (7)$$

$$dQ_i = Q_{i+1} - Q_i \quad (8)$$

W przypadku osiągnięcia 90% maksymalnego naładowania baterii algorytm wymusza zakończenie ładowania.

W przypadku, gdy postój trwał poniżej 2 godzin i SOC wynosiło ponad 50%, nie były wykonywane żadne obliczenia a omawianym wielkościom przypisywano następujące wartości:

$$SOC_{i+1} = SOC_i \quad (9)$$

$$Q_{i+1} = Q_i \quad (10)$$

$$dQ_i = 0 \quad (11)$$

Dla każdego z powyższych przypadków zmiana wartości energii zgromadzonej w baterii pomiędzy końcem a początkiem i-tego okna czasowego  $dQ_i$  została przeliczona na wartość dodatkowego zapotrzebowania na moc  $P_i$ ,

gdzie:  $n_{max}$  – liczba samochodów dla danego przypadku.

$$P_i = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} dQ_i}{\frac{1}{4}h} \quad (12)$$

gdzie:  $n_{max}$  – liczba samochodów dla danego przypadku.

#### 2.1 Algorytm symulacji rozwojowej

W symulacji dla scenariusza zakładającego aktywne uczestnictwo w kształtowaniu współpracy pomiędzy operatorem systemu elektroenergetycznego a pojazdami elektrycznymi, założono wprowadzenie taryf dynamicznych zależnych od cen energii elektrycznej. Wykorzystano do tego celu średnie ceny energii elektrycznej na Rynku Dnia Następnego TGE. Użytkownicy, mając świadomość całkowitego czasu ładowania EV, a jednocześnie pragnąc utrzymać poziom bezpiecznego naładowania pojazdu, który pozwoli na zaplanowaną jazdę w dowolnej chwili postoju, mogą

chcieć ładować baterię do tego minimalnego poziomu zapewniającego komfort w chwili rozpoczęcia postoju. Z tego powodu, w modelu przyjęto, że do czasu osiągnięcia przynajmniej 50% naładowania baterii zmienne ceny energii elektrycznej nie mają wpływu na przebieg ładowania. Po osiągnięciu SOC w wysokości 50% następuje faza ładowania „świadomego”.

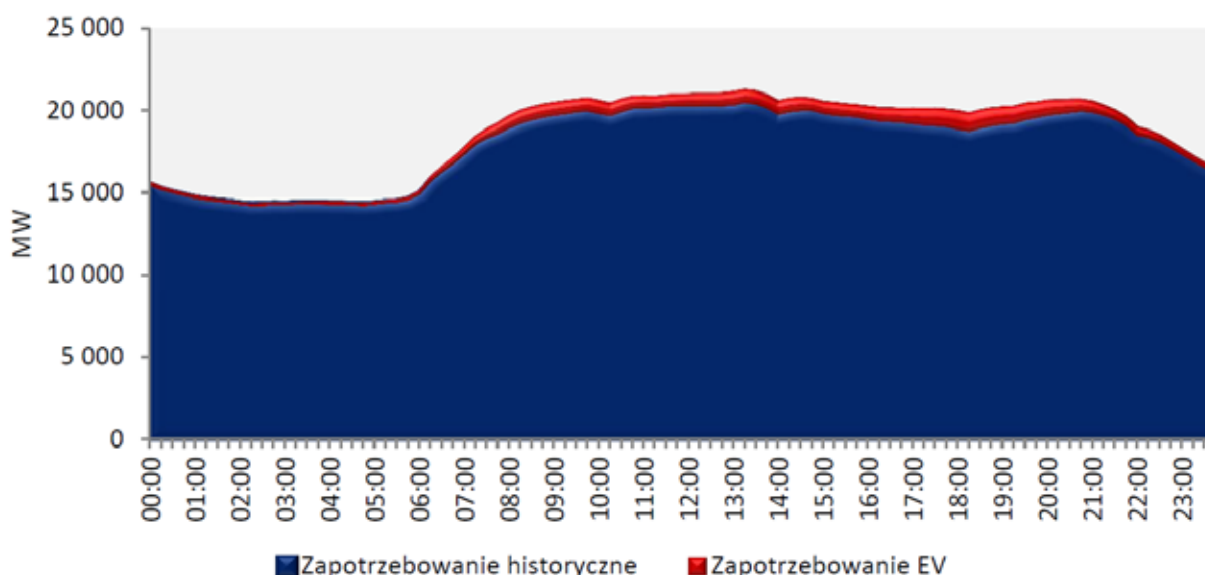
Należy również pamiętać, że każde ładowanie ma wpływ na cenę energii elektrycznej w danym oknie czasowym w następujący sposób:

$$dT_i = 0.000132 \frac{PLN}{kWh} \cdot dQ_i \quad (13)$$

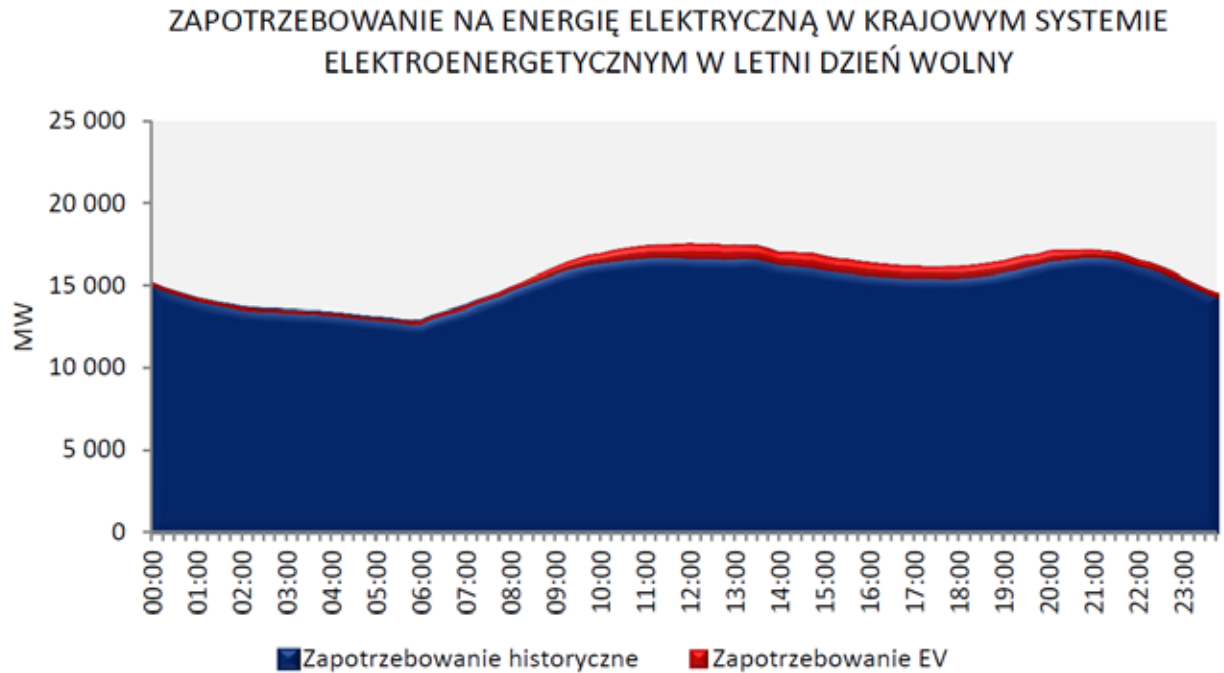
gdzie:  $dT_i$  – zmiana ceny energii elektrycznej w i-tym oknie czasowym

Dla każdego z powyższych przypadków zmiana wartości energii zgromadzonej w baterii pomiędzy końcem a początkiem i-tego okna czasowego  $dQ_i$  została przeliczona na wartość dodatkowego zapotrzebowania na moc  $P_i$ .

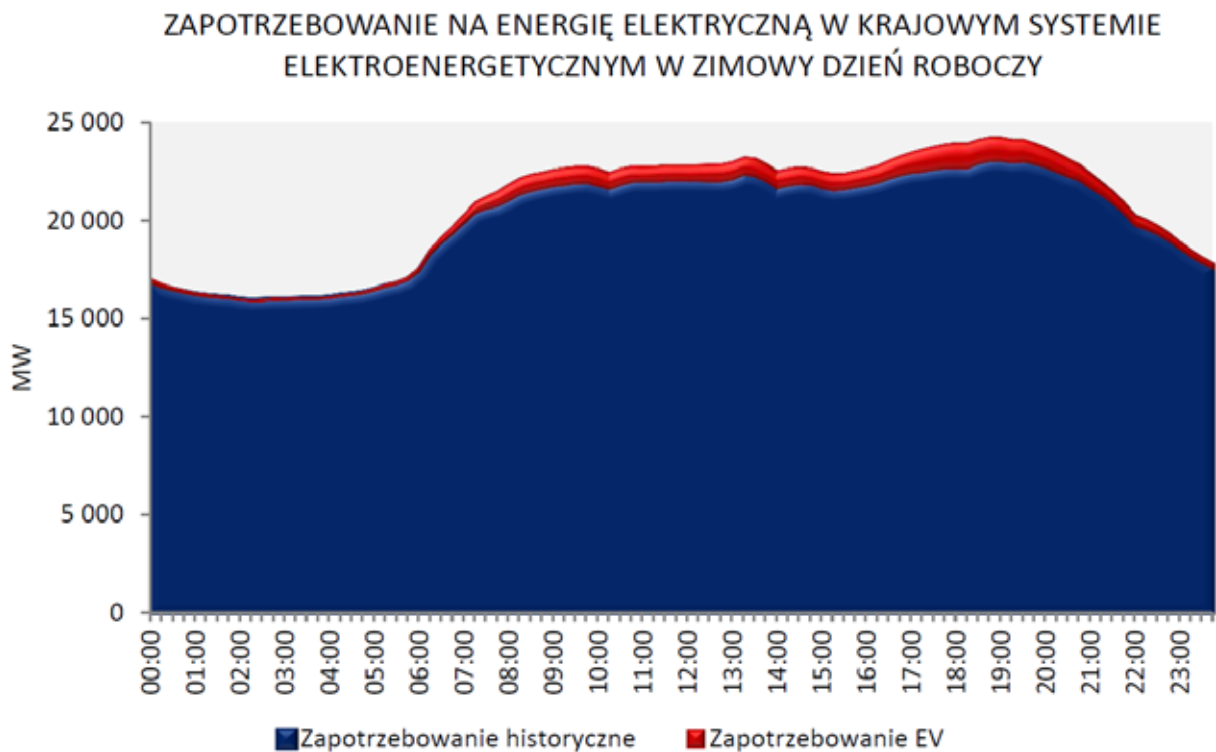
### ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ W KRAJOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM W LETNIM DNIU ROBOCZY



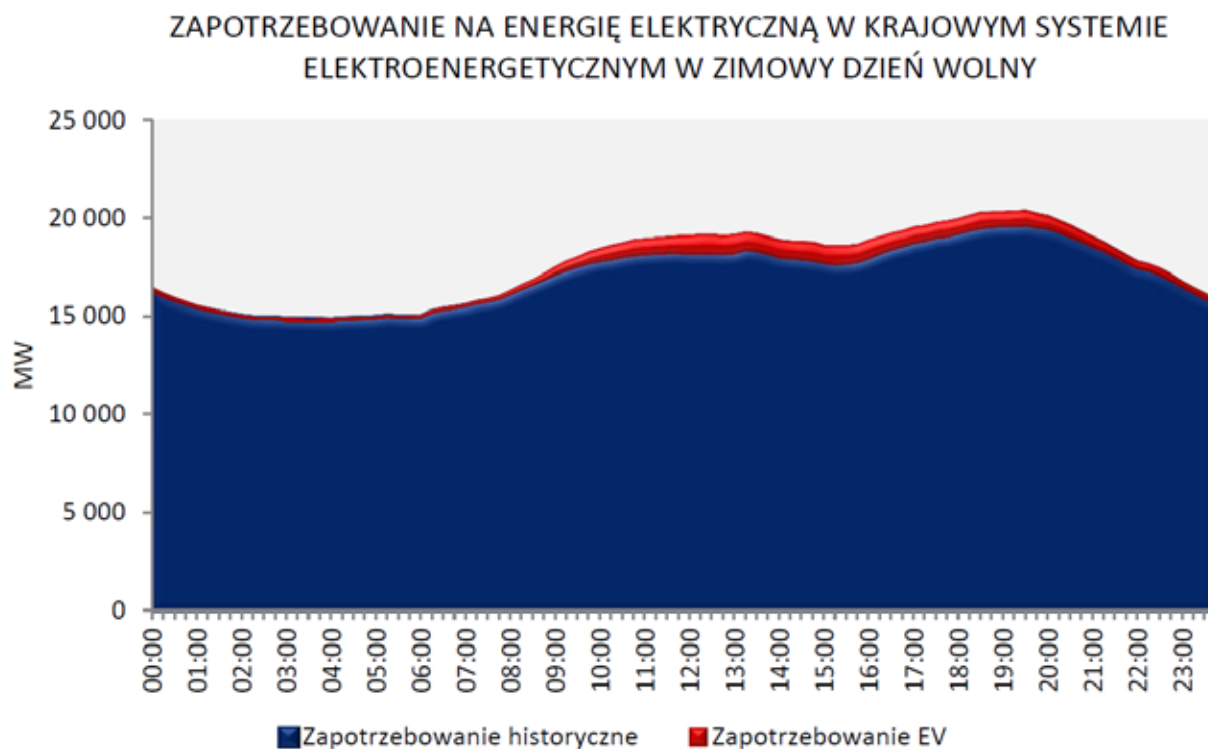
Rys. 4. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla letniego dnia roboczego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu podstawowym



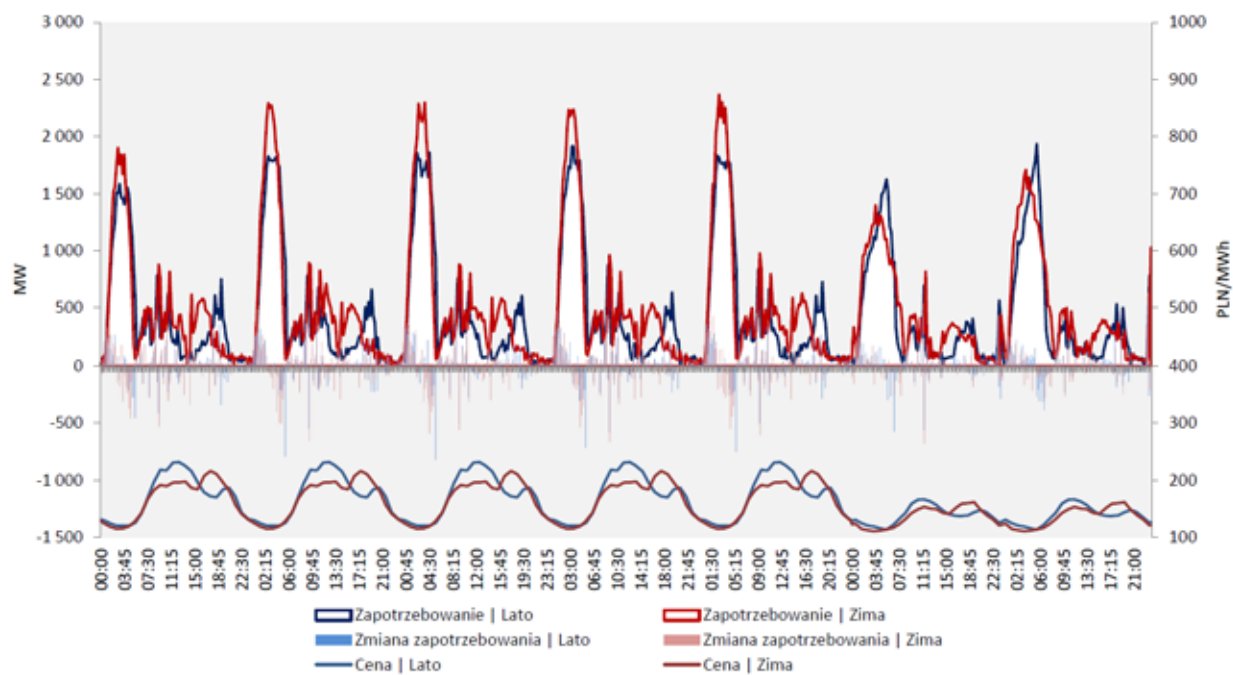
Rys. 5. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla letniego dnia wolnego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu podstawowym



Rys. 6. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla zimowego dnia roboczego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu podstawowym



Rys. 7. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla zimowego dnia wolnego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu podstawowym



Rys. 8. Rozkład czasowy zapotrzebowania na moc w KSE wywołanego ładowaniem pojazdów elektrycznych dla modelu rozwojowego - udział BEV 0%



Pozostałe wzory i założenia są podobne jak dla symulacji podstawowej.

## Wyniki

### Model podstawowy systemu krajowego

Obliczenia przeprowadzono dla trzech poziomów udziału samochodów BEV w rynku samochodów elektrycznych, dla okresu 7 dni, rozpoczynając od poniedziałku. Wyniki zostały zaprezentowane graficznie na rysunkach 1, 2 i 3.

Krzywa zapotrzebowania na moc okazuje się być nieznacznie przesunięta w czasie względem krzywej podróży. Zapotrzebowanie w sezonie zimowym przewyższa wartości występujące latem z uwagi na wyższą konsumpcję jednostkową energii samochodów elektrycznych zimą. Dni wolne charakteryzują się wyraźnie niższym dodatkowym zapotrzebowaniem, co jest efektem niższej liczby podróży w te dni.

Średnie zapotrzebowanie na moc wynikające z ładowania samochodów

elektrycznych wynosi 548 MW w dni powszednie i 431 MW w dni wolne. Dodatkowe zapotrzebowanie na moc nie jest jednak rozłożone równomiernie. Dla zerowego udziału BEV (100% udziału samochodów PHEV) wśród samochodów elektrycznych maksymalne zapotrzebowanie ładowarek na moc osiąga około 1 100 MW zimą i 1 000 MW latem, natomiast dla stuprocentowego udziału BEV rośnie do 1 500 MW zimą i niecałych 1 200 MW latem.

Wyniki przedstawione na rysunkach 4 i 5 pokazują udział mocy pobieranej przez ładowarki w całym zapotrzebowaniu krajowym w okresie letnim. Widoczne jest, że odpowiadają one za znikomą część całkowitego poboru - stanowi on maksymalnie 5,6% w dzień powszedni i 5,1% w dzień wolny. Sytuacja w okresie zimowym została przedstawiona na rysunkach 6 i 7. Jest ona analogiczna do sytuacji w trakcie lata.

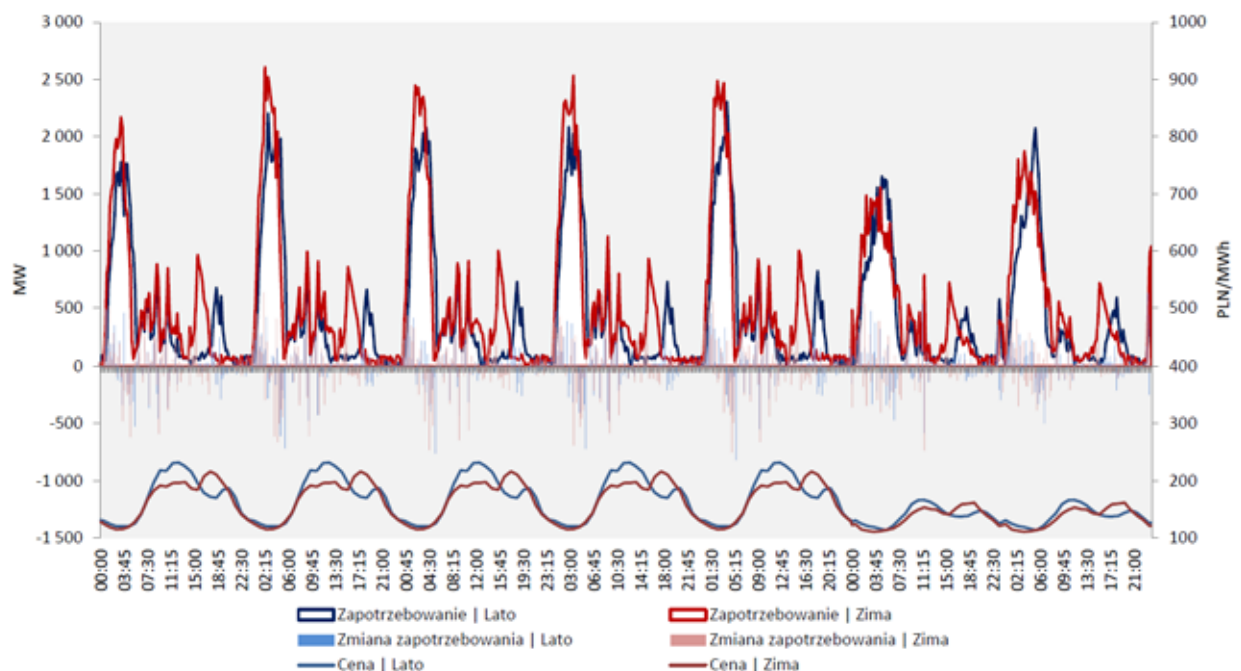
W celach porównawczych oszacowano również, wynikające z modelu obliczeniowego, dodatkowe zapotrzebo-

wanie na energię elektryczną w skali roku. Tak oszacowane dodatkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną w Polsce dla 1 miliona samochodów elektrycznych w użytku wyniosłoby 4,41 TWh w porównaniu do 4,3 TWh prognozowanych w ministerialnym Planie Rozwoju Elektromobilności.

### Model rozwojowy systemu krajowego

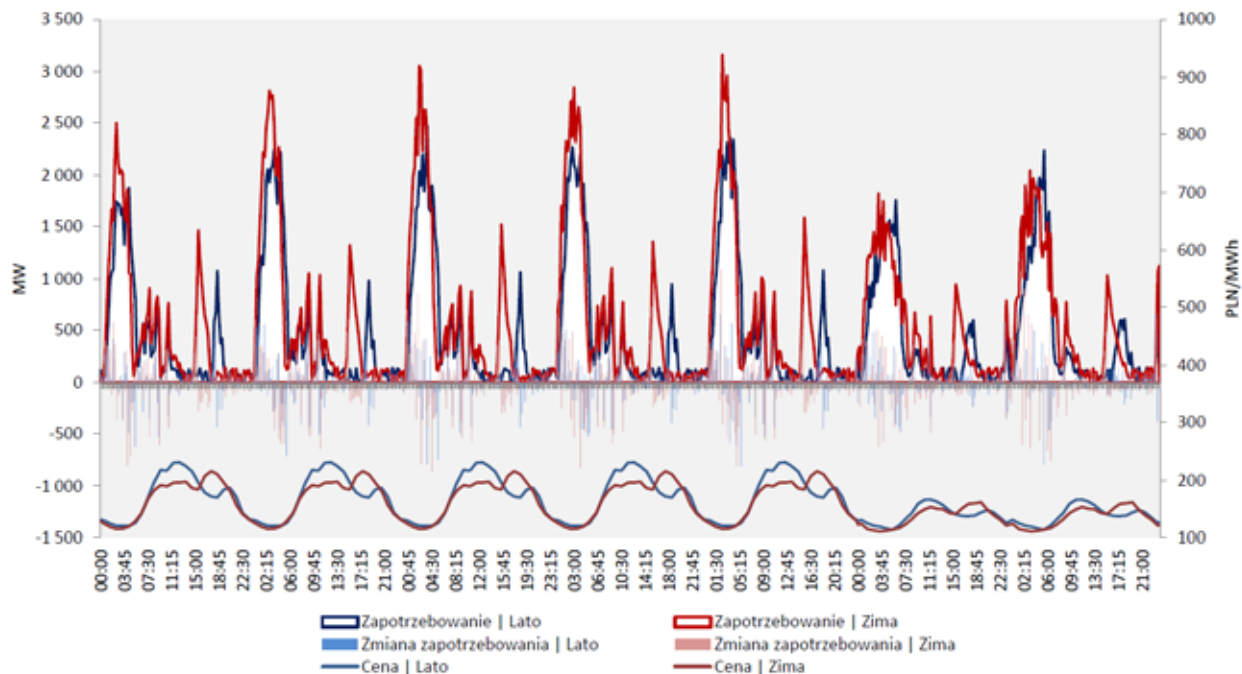
Wyniki w tym przypadku różnią się diametralnie pod względem jakościowym w porównaniu do rezultatów modelu podstawowego.

Przed wszystkim nastąpiło zwiększenie maksymalnego zapotrzebowania na moc wywołanego przez ładowarki baterii EV. W porównaniu do modelu podstawowego wzrosło ono dwukrotnie, a co ważniejsze, uległo przesunięciu na godziny nocne, kiedy ceny energii elektrycznej są najniższe. Dla celów porównawczych, na każdym z poniższych wykresów zamieszczono przebiegi cen energii elektrycznej w momencie startu modelu.



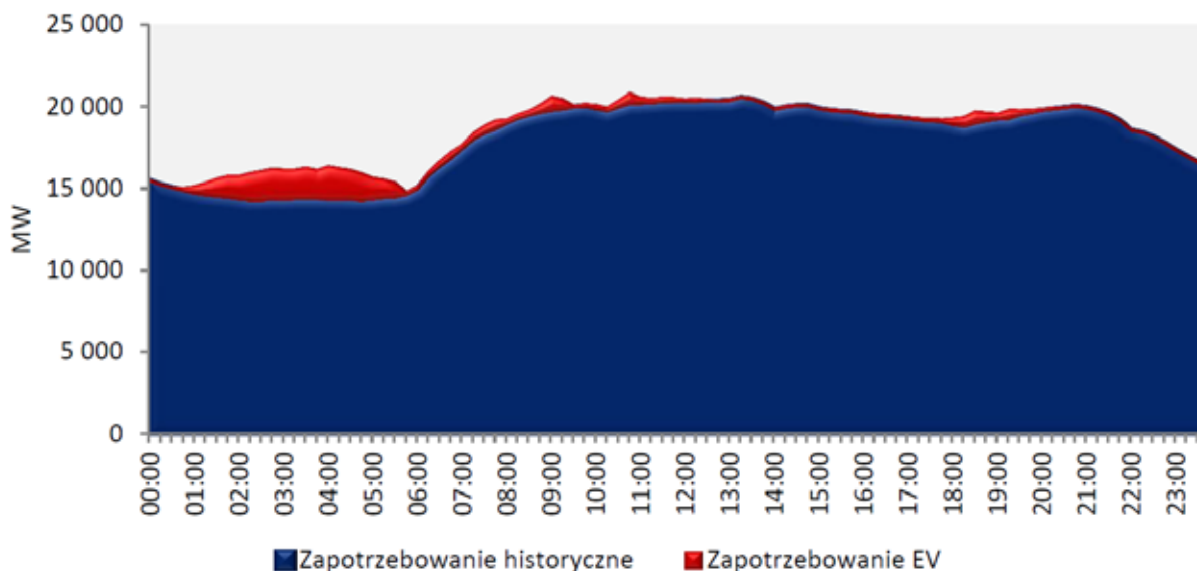
Rys. 9. Rozkład czasowy zapotrzebowania na moc w KSE wywołanego ładowaniem pojazdów elektrycznych dla modelu rozwojowego - udział BEV 50%



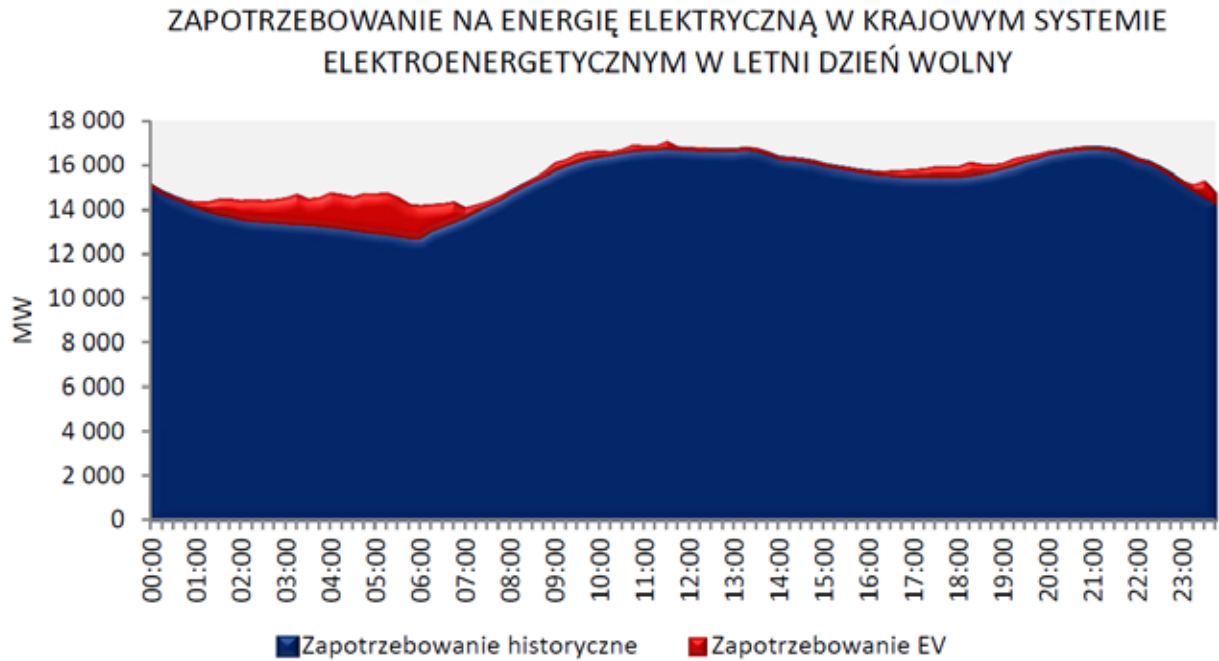


Rys. 10. Rozkład czasowy zapotrzebowania na moc w KSE wywołanego ładowaniem pojazdów elektrycznych dla modelu rozwojowego - udział BEV 100%

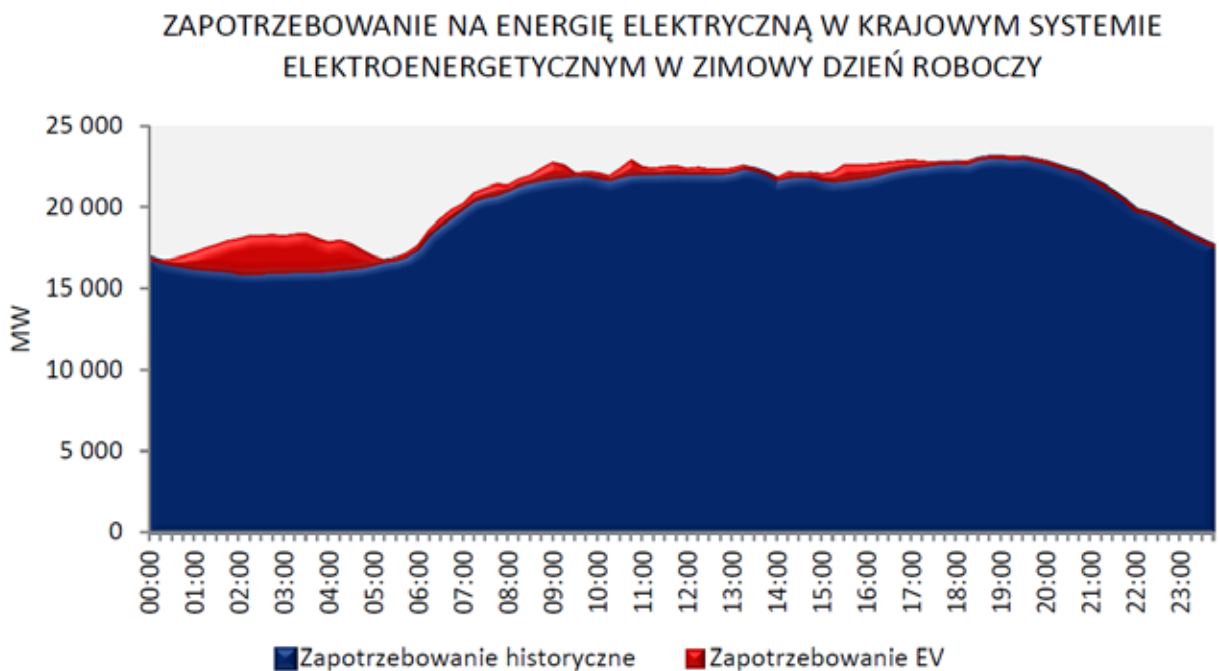
### ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ W KRAJOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM W LETNI DZIEŃ ROBOCZY



Rys. 11. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla letniego dnia roboczego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu rozwojowym

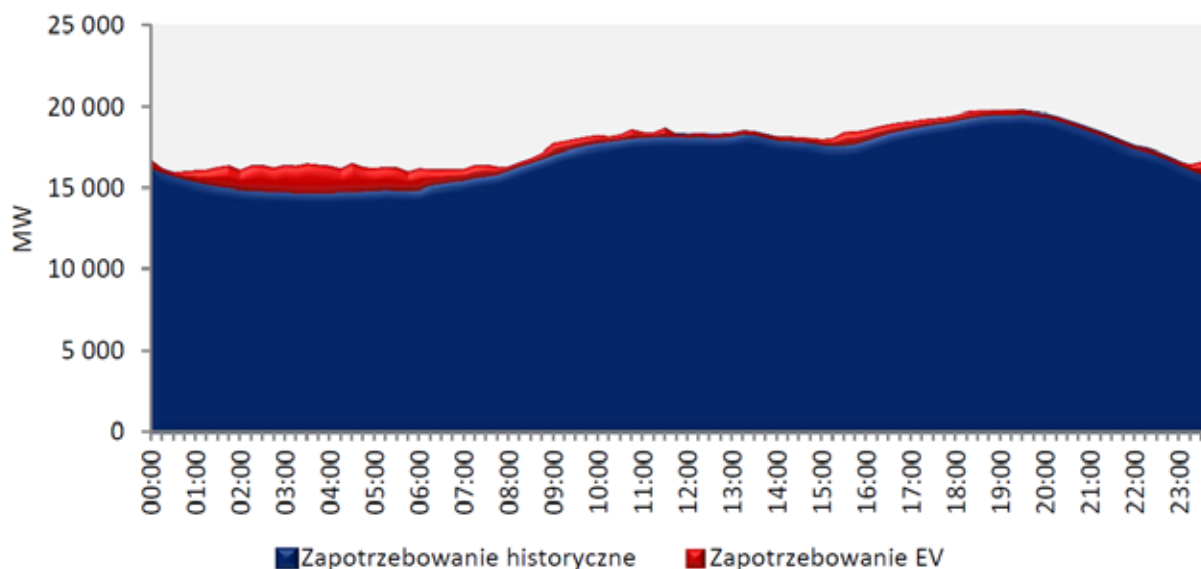


Rys. 12. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla letniego dnia wolnego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu rozwojowym



Rys. 13. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla zimowego dnia roboczego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu rozwojowym

### ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ W KRAJOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM W ZIMOWY DZIEŃ WOLNY



Rys. 14. Dobowy wykres zapotrzebowania na moc w Polsce dla zimowego dnia wolnego z uwzględnieniem ładowania samochodów elektrycznych w modelu rozwojowym

Można na nich zauważyć wyraźnie, że szczyty poboru energii elektrycznej przesunęły się na godziny o najniższych cenach energii elektrycznej. Z kolei w ciągu dnia, kiedy ceny są wyższe, średnie obciążenie jest znacząco niższe, przy czym występują fluktuacje poboru mocy, które przyczyniają się do niekorzystnych warunków pracy dla źródeł wytwórczych.

W modelu rozwojowym tempo zmian zapotrzebowania na moc EV wyraźnie wzrosło w porównaniu do modelu podstawowego.

Wyniki modelu rozwojowego dają wysoce pożądaną zmianę jakościową w porównaniu do modelu zakładającego status quo w zakresie nierównomierności poboru energii.

#### Wnioski

W wyniku przeprowadzonej analizy można wyciągnąć następujące wnioski:

Rozwój sektora elektromobilności spowoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną.

Oczekuje się, że rozwój elektromobilności w scenariuszu podstawowym

będzie miał negatywny wpływ na krajowy system elektroenergetyczny, ponieważ powiększy się różnica między szczytowym i pozaszczytowym popytem na energię elektryczną.

Dynamiczne ceny energii elektrycznej na potrzeby ładowania pojazdów elektrycznych mogą mieć pozytywny wpływ, dając zachętę do ładowania pojazdów poza godzinami szczytu.

Im większy udział samochodów BEV w całkowitej liczbie pojazdów elektrycznych, tym wyższe zapotrzebowanie szczytowe i bardziej zmienne zużycie energii. Dla Krajowego Systemu Energetycznego PHEV stwarzają mniejsze zagrożenie niż BEV.

□

#### Literatura

- [1] Komisja Europejska, Bruksela, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych (2014).
- [2] Ministerstwo Energii, Warszawa, Pakiet na Rzecz Czystego Transportu (2016).
- [3] Ministerstwo Energii, Warszawa, Krajowe ramy polityki rozwoju infrastruktury pa-

liw alternatywnych (2016).

[4] Ministerstwo Energii, Warszawa, Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce (2016).

[5] Ministerstwo Energii, Warszawa, Projekt ustawy o elektromobilności i paliwach alternatywnych (2016).

[6] <http://www.pse.pl/index.php?did=2870>, Stan z dnia: 26.09.2017

[7] G. Pasaoglu, D. Fiorello, A. Martino, G. Scarcella, A. Alemanno, A. Zubaryeva, C. Thiel, Driving and parking patterns of european car drivers-a mobility survey, Luxembourg: European Commission Joint Research Centre.

[8] D. Dallinger, M. Wietschel, Grid integration of intermittent renewable energy sources using price-responsive plug-in electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (5) (2012) 3370–3382.

[9] D. Stillwell, C. Pini, J. Cummings, A. Fazil, National Travel Survey: England 2016, Department for Transport of United Kingdom, 2017.

[10] <http://www.eafo.eu/europe>, Stan z dnia: 21.09.2017