

**Zeszyty Naukowe***Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk*

rok 2018, nr 104, s. 69–84

DOI: 10.24425/124366

Uroś RADOVIĆ¹

Wpływ samochodów elektrycznych na polski system elektroenergetyczny, emisję CO₂ oraz inne zanieczyszczenia powietrza

Streszczenie: Samochody elektryczne (SE) są obecnie uważane za jeden z najlepszych sposobów obniżenia emisji zanieczyszczeń powietrza w transporcie drogowym, w tym CO₂ i hałasu w miastach. Mogą również w wydajny sposób przyczynić się do zmniejszenia zależności transportu drogowego od importu ropy naftowej. Niemniej jednak zapotrzebowanie na energię elektryczną dużej ilości SE w drogowym transporcie nie jest bez znaczenia i ma wpływ na system elektroenergetyczny. W artykule przeanalizowano potencjalny wpływ SE na popyt, podaż, strukturę i koszty wytwarzania energii elektrycznej oraz emisję CO₂ i zanieczyszczeń powietrza w wyniku wprowadzenia na polskie drogi 1 mln SE do 2025 r. oraz potrojenia tej liczby do 2035 r. Do obliczeń wykorzystano model konkurencyjnego rynku energii elektrycznej ORCED. Wyniki analizy wskazują, że niezależnie od strategii ładowania, popyt SE powoduje niewielki wzrost ogólnego zapotrzebowania na energię elektryczną w Polsce i w konsekwencji również niewielki wzrost kosztów wytwarzania. Nawet duży wzrost SE w transporcie drogowym będzie powodował raczej umiarkowane zapotrzebowanie na dodatkowe moce wytwórcze, zakładając że przedsiębiorstwa energetyczne będą miały pewną kontrolę nad trybem ładowania aut. Wprowadzenie SE nie spowoduje obniżenia emisji CO₂ w stosunku do samochodów konwencjonalnych w 2025 r., wręcz przeciwnie – zwiększy je niezależnie od strategii ładowania, gdyż energia dla pokrycia popytu SE pochodzi prawie wyłącznie z elektrowni węglowych. W 2035 r. natomiast, wniosek zależy od scenariusza ładowania i możliwe jest obniżenie, jak i wzrost emisji. Pojazdy elektryczne spowodują wzrost emisji netto SO₂, przyczynią się natomiast do spadku emisji netto cząstek stałych oraz NO_x.

Słowa kluczowe: samochody elektryczne, system elektroenergetyczny, produkcja krańcowa, wskaźniki niezawodności, emisje, koszt wytwarzania

Effects of electric vehicles on the Polish power generation system, emissions of CO₂ and other air pollutants

Abstract: Electric cars (SE) are currently considered to be one of the best ways to reduce CO₂ and other air emissions in the transport sector as well as noise in cities. They can reduce the dependency of road transport on imported

¹ Agencja Rynku Energii SA, Warszawa; e-mail: urad@are.waw.pl

oil in a visible way. Nevertheless, the demand for electricity for a large amount of SE in road transport is not insignificant and has an impact on the power system. The article analyzes the potential impact of SE on the demand, supply, structure and costs of electricity generation as well as emissions as a result of introducing 1 million SEs by 2025 on Polish roads, and tripling this number by 2035. The competitive electricity market model ORCED was used for the calculations. The results of the analysis indicate that regardless of the charging strategy, the demand for SEs causes a slight increase in the overall electricity demand in Poland and consequently also a slight increase in power generating costs. Even a large increase in SEs in road transport will result in a rather moderate demand for additional generation capacity, assuming that power companies will have some control over the mode of charging cars. The introduction of SEs will not reduce CO₂ emissions compared to conventional cars in 2025, on the contrary will increase them regardless of the loading strategy. In 2035 however, the result depends on the charging scenario and both the increase or decrease of emissions is possible. Electric vehicles will increase SO₂ net emissions, but they will contribute to a decrease in the net emissions of particulates and NO_x.

Keywords: electric vehicles, electric energy system, reliability indices, marginal generation, emissions, generation costs

Wprowadzenie

Sektor transportu jest potężnym konsumentem energii, źródłem emisji CO₂ oraz zanieczyszczeń powietrza. Charakteryzujące się dużą efektywnością energetyczną oraz zerową lokalną emisją, samochody elektryczne (SE) są obecnie powszechnie uznawane za jedną z najlepszych alternatyw dla pojazdów spalinowych. Ponadto SE mogą pomóc w złagodzeniu zależności od importu ropy naftowej, jak również redukcji hałasu w miastach. Rządy wielu krajów wdrażyły stosowne polityki promujące rozwój pojazdów elektrycznych oraz wyznaczyły cele ilościowe na lata 2020–2030 (Lutsey 2015). W efekcie światowa flota pojazdów elektrycznych rozwija się obecnie bardzo dynamicznie – ponad 750 tys. sprzedaży na całym świecie w 2016 r., przy ogólnej liczbie SE przekraczającej 2 mln jednostek (OECD/IEA 2017). W Polsce Rządowy Plan Rozwoju Elektromobilności zakłada, że do 2025 r. po polskich drogach będzie jeździć 1 mln pojazdów elektrycznych (ME 2016). W efekcie, pomimo że rynek elektromobilności w Polsce znajduje się obecnie w fazie tworzenia, można się spodziewać, że w następnej dekadzie lub dwóch SE na pewno będą ważną częścią floty transportowej. Niemniej jednak SE mają wpływ na system elektroenergetyczny, gdyż generują dodatkowy popyt na energię elektryczną i w efekcie mogą powodować emisję na poziomie elektrowni w zależności od tego, jakie źródło energii elektrycznej zostało wykorzystane do ładowania. Ponadto z powodu szczególnego rozkładu czasowego i przestrzennego popytu na energię dla ładowania, przy dużym udziale w ogólnym popycie mogą powodować ograniczenia w systemie, wymagające wprowadzenia nowych mocy wytwórczych i/lub wzmocnienia niektórych linii lub podstacji w sieci dystrybucyjnej.

W artykule przeanalizowano potencjalny wpływ SE* na popyt, podaż, strukturę i koszty wytwarzania energii elektrycznej, oraz powiązane ze wzrostem penetracji SE w Polsce, zmiany poziomów emisji CO₂ i zanieczyszczeń powietrza w wyniku wprowadzenia na polskie drogi 1 mln osobowych samochodów elektrycznych do 2025 r. oraz potrojenia tej liczby do 2035 r. dla różnych strategii ładowania SE. Przyjęte założenia pozwalają na zbadanie

* Poprzez samochód elektryczny w niniejszej pracy rozumie się pojazd osobowy wyłącznie z silnikiem elektrycznym lub hybrydę typu *plug in*.

potencjalnych skutków rozwoju elektromobilności na Krajowy System Elektroenergetyczny (KSE) przy stosunkowo niewielkim 4,4% udziale w 2025 r., oraz przy znaczącym 12% udziale w 2035 r. w prognozowanej (Waśkiewicz i Pawlak 2017) ogólnej liczbie samochodów osobowych w Polsce. Do zbadania powyższych zagadnień użyto model konkurencyjnego rynku energii elektrycznej ORCED (*Oak Ridge Competitive Electricity Dispatch Model*) przystosowany do analiz polskiego rynku energii elektrycznej. Zrozumienie omawianych efektów na wczesnym etapie jest warunkiem podejmowania odpowiednich działań, które pozwolą lepiej zoptymalizować połączony system i uniknąć negatywnych konsekwencji.

Wielowymiarowej problematyce interakcji SE i systemu elektroenergetycznego poświęcono bardzo wiele badań w ciągu ostatnich 10–15 lat. W dogłębniej analizie opartej na impresywnej liście źródeł literaturowych Hacker i in. (2009) przedstawiły główne czynniki i zdefiniowały wyzwania wpływające na wprowadzenia SE na dużą skalę w Europie, omówiły najbardziej istotne potencjalne oddziaływania SE na środowisko oraz ich wpływ na rynek energii elektrycznej. Badania przeprowadzone w Stanach Zjednoczonych (Hadly i Tsvetkova 2008; Kinther-Meyer i in. 2010; Peterson i in. 2011) oraz nowsze testy europejskie (Kasten i in. 2015; RTE 2016; Element Energy and Artelys 2015; Schill i Gerbaulet 2015) są tematyką najbliższe niniejszej analizie. Niemniej jednak, trzeba jasno podkreślić, że wyzwania związane z integracją pojazdów elektrycznych w różnych krajach i regionach są odmienne, ponieważ miksy wytwórcze i infrastruktura sieci są bardzo zróżnicowane i ze względu na dużą liczbę parametrów/danych wejściowych w analizach, uzyskane wyniki mogą się różnić w szerokim zakresie w zależności od przyjętych warunków ramowych. Niestety, badań odnośnie wpływu SE na KSE jest niewiele. W swojej pracy magisterskiej Wachaczewski (2017) określa projekcje zapotrzebowania na moc i energię elektryczną w KSE do 2025 r. uwzględniając wprowadzenie 1 mln SE w tym okresie, w oparciu o wyniki uzyskane z własnego symulatora dobowego obciążenia sieci, obrazującego ładowanie akumulatorów samochodów elektrycznych przy różnych taryfach ładowania. Uwzględniając różnice w założeniach, wnioski odnośnie do zapotrzebowania na dodatkową moc w systemie dla ładowania SE są podobne do tych uzyskanych w niniejszej pracy. Przygotowany z inicjatywy polskiej Fundacji Promocji Pojazdów Elektrycznych i Europejskiej Fundacji Klimatycznej przez Cambridge Econometrics (2018) raport *Charging Poland* określa ilościowe skutki gospodarcze i środowiskowe w horyzoncie do 2050 wynikające z stopniowego przejścia od ropy w transporcie na pojazdy elektryczne. Badanie to udowadnia, że wprowadzenie SE przyniesie znaczne korzyści ekonomiczne oraz środowiskowe. W przeciwieństwie do niniejszej pracy, z przeprowadzonej analizy możliwych zmian w polskim miksie energetycznym wynika, że nawet w najbardziej intensywnym scenariuszu „węglowym”, pojazdy elektryczne emitują mniej CO₂ niż pojazdy spalinowe, niezależnie od rozpatrywanego roku analizy*.

Niniejszy artykuł, oparty na najnowszych projekcjach przyszłego miksu energetycznego, aktualnych parametrach systemu wytwórczego oraz prognozach cen paliw i uprawnień do emisji CO₂ uzupełnia wspomniane wyżej prace, gdyż różni się zakresem oraz dostarcza dodatkowe informacje odnośnie do wpływu SE na KSE. Potencjalnych efektów SE na sieć

* Aneks techniczny do raportu nie jest dostępny publicznie, więc trudno się odnieść do tego wniosku.

dystrybucyjną (Gerkenmeyer i in. 2010; EPRI 2012; Shafiee i in. 2013; NREL 2015) oraz potencjalnych możliwości magazynowania energii poprzez baterie samochodowe, które mogą pomóc w regulowaniu sieci energetycznej i wprowadzeniu do sieci większej ilości energii ze zmiennych źródeł odnawialnych (Loisel i in. 2014; Pratt 2015; SystemX 2017) nie badano w niniejszym artykule, gdyż wymagałoby to zastosowania innej metodyki i zbyt skomplikowanych narzędzi analitycznych.

1. Metodyka

1.1. Profili ładowania oraz popyt na energię elektryczną samochodów elektrycznych

Warunkiem określenia efektów pojazdów elektrycznych (SE) na system elektroenergetyczny jest znajomość profili ładowania akumulatorów aut, gdyż w zależności od poziomu mocy, czasu i długości trwania ładowania, może wystąpić wiele różnych wpływów na ograniczenia w sieci, zapotrzebowanie na moc, stosowane rodzaje paliw do produkcji energii elektrycznej oraz generowane emisje. Z punktu widzenia operatora systemu elektroenergetycznego proces ładowania powinien odbywać się w godzinach nocnych, kiedy występuje niewielkie zapotrzebowanie na moc i ceny są niskie. Z drugiej strony dla właścicieli pojazdów elektrycznych, przy braku odpowiednich zachęt do zmiany zachowania odnośnie do ładowania aut, preferowanym czasem ładowania jest okres bezpośrednio po powrocie z pracy lub w momencie występowania dostępności szybkiego ładowania. Przedsiębiorstwa energetyczne mogą wpłynąć na zachowanie swoich klientów na różne sposoby, łącznie z wprowadzeniem taryf preferujących ładowanie w nocy albo poprzez odpowiednie regulacje dotyczące ładowania aut. Technicznie można to zrobić stosując inteligentne ładowarki pozwalające na odpowiednie zaprogramowanie poboru energii biorące pod uwagę cenę energii elektrycznej i/lub zwyczajnie ładowania i użytkowania aut przez kierowców. Zasadniczo, poprzez inteligentne sterowanie możliwe jest osiągnięcie preferowanego profilu ładowania; między innymi proponowane są strategie „wypełnienia doliny” czasowej krzywej obciążenia w systemie, strategie dostosowujące profil ładowania SE do profilu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych itp. W niniejszej pracy do analizy przyjęto trzy różne strategii ładowania:

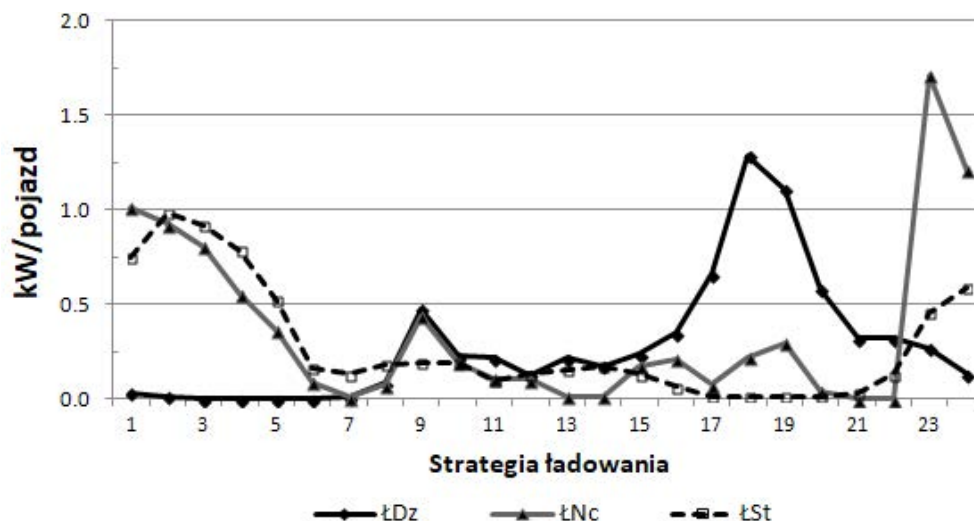
- Ładowanie dzienne „Ldz.”: Ładowanie nie jest ograniczone czasowo, ale występuje za każdym razem, gdy samochód jest zaparkowany i dostępna jest stacja ładująca; profile ładowania są ściśle skorelowane z trybem użytkowania samochodu. Popyt na energię do ładowania występuje przeważnie w ciągu dnia, a szczyt z reguły późnym popołudniem/wczesnym wieczorem, kiedy zazwyczaj występuje szczyt krajowego zapotrzebowania na moc w systemie.
- Ładowanie nocne „LNc””: Strategia ta podkreśla preferencję do ładowania w godzinach nocnych. Zakładając, że odbiorcy są gotowi do opóźnienia ładowania do godziny 22:00, aby wykorzystać niższą taryfę, szczyt popytu na rzecz ładowania SE występuje późnym wieczorem, poza godziną szczytowego popytu w systemie.

- Ładowanie sterowane „ŁSt”: Inteligentnym sterowaniem ładowanie SE odbija się w godzinach bardziej korzystnych dla systemu wytwórczego, gdyż nie tylko jest przesunięte w godziny doliny nocnego popytu w systemie, ale jest również bardziej równomiernie rozkładane.

Wobec braku danych rzeczywistych dotyczących schematów ładowania SE, profile obciążenia sieci na rzecz ładowania aut elektrycznych opracowano na podstawie badań zagranicznych. Profile odpowiadające strategiom „ŁDz” i „ŁNc” zaczerpnięto z wyników badań europejskiego Joint Research Center (Pasaoglu i in. 2013), przeprowadzonych w sześciu krajach europejskich, w tym w Polsce. W tych badaniach bardzo szczegółowe dane zawierające wzorce jazdy i parkowania samochodów konwencjonalnych reprezentatywnej grupy osób w każdym kraju, zostały wykorzystane do obliczenia indywidualnych profili ładowania różnych rodzajów SE, jak również zagregowanych profili obciążeń sieci w poszczególnych dniach tygodnia. Zagregowany profil obciążenia sieci dla scenariusza „ŁSt” opracowano na podstawie źródeł literaturowych (RTE 2016; Element Energy 2015).

Na rysunku 1 przykładowo pokazano zastosowany w obliczeniach modelowych uśredniony popyt energii elektrycznej dla ekwiwalentnego pojazdu elektrycznego w ciągu 24 h, dla wybranego dnia (poniedziałek) oraz różnych strategii ładowania.

Niniejsza analiza wykorzystuje uproszczenia w modelowaniu popytu SE, stosując sztywne harmonogramy ładowania dla wszystkich pojazdów w każdym scenariuszu. Ponieważ przyjęte profile zostały opracowane w oparciu o różniące się założenia, dla ujednoczenia zostały one odpowiednio proporcjonalnie przeskalowane, tak aby uśrednione roczne zużycie energii elektrycznej ekwiwalentnego pojazdu, łącznie ze stratami ładowania i w sieci, niezależnie od strategii ładowania i analizowanego roku wynosiło 2 MWh, czyli 0,2 kWh/km,



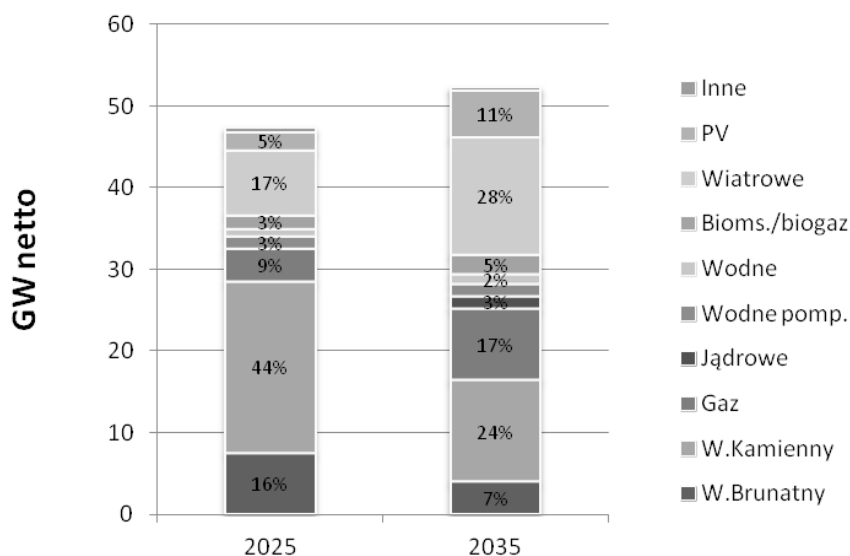
Rys. 1. Profil ładowania ekwiwalentnego pojazdu elektrycznego w ciągu 24 godzin (poniedziałek)

Fig. 1. Charging profile for the equivalent electric vehicle over 24 h (Monday)

przy zakładanym średniorocznym przebiegu pojazdu w wysokości 10 tys. km. Jest to wartość identyczna ze średnią ważoną stosowaną w modelach Międzynarodowej Agencji Energii dla niektórych krajów UE (IEA 2016). Przedstawione powyżej trzy strategie ładowania SE obejmują prawdopodobny zakres strategii obciążania systemu elektroenergetycznego, których można się spodziewać, gdy samochody elektryczne staną się bardziej powszechne.

1.2. Symulacja pracy systemu wytwórczego

Do symulowania popytu na energię elektryczną oraz pracy KSE w latach 2025 i 2035 użyty został model konkurencyjnego rynku energii elektrycznej ORCED (Hadly i Baek 2016). Dla przyjętej struktury mocy wytwórczych i danego roku, ORCED dopasowuje wielkość produkcji do zapotrzebowania i predefiniowanej wymiany netto zagranicą, zakładając brak ograniczeń w sieci przesyłowej. W analizie wykorzystana jest czasowa krzywa zapotrzebowania w systemie oparta na dostępnych danych PSE, które następnie są projektowane na lata przyszłe proporcjonalnie do wzrostu zapotrzebowania. Wybór oraz wielkość produkcji poszczególnych jednostek wytwórczych model określa w oparciu o „stos” jednostek ułożonych od najtańszej do najdroższej (*merit order*) pod kątem oferowanej ceny (generalnie, zmiennych kosztów wytwarzania). Przeprowadzając obliczenia bez poboru i z poborem energii elektrycznej przez pojazdy można określić ich wpływ na system elektroenergetyczny. Strukturę mocową systemu wytwórczego (rys. 2) w latach 2025 i 2035 oraz projekcje cen paliw i uprawnień do emisji CO₂ (są to wymagane dane wejściowe do modelu ORCED) przyjęto według opracowania ARE SA (ARE 2018).



Rys. 2. Prognozowana struktura mocowa w KSE w latach 2025 i 2035

Fig. 2. Projected generation capacity mix for the Polish Power System in 2025 and 2035

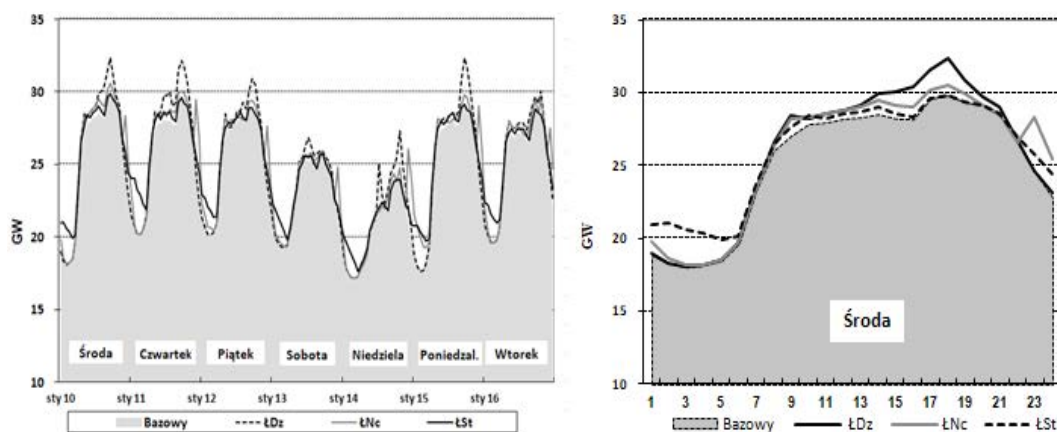
Przedstawiona powyżej struktura paliwowa mocy wytwórczych wskazuje, że w perspektywie najbliższych 15–20 lat należy spodziewać się znaczącego spadku udziału źródeł węglowych w krajowym bilansie mocy, przy wzroście udziału mocy źródeł odnawialnych, gazowych oraz uruchomienia pierwszego bloku jądrowego.

2. Wyniki obliczeń

2.1. Wpływ pojazdów elektrycznych na niezawodność systemu wytwórczego

Z perspektywy systemu elektroenergetycznego uśredniony popyt pojazdów elektrycznych ma mniejszą wagę niż wzrost obciążenia szczytowego, który może być dodatkowo wzmacniany przez SE. Dla przykładu, na rysunku 3 porównano zapotrzebowanie w KSE w scenariuszu bez poboru (scenariusz bazowy) i z poborem energii elektrycznej przez SE dla analizowanych profili ładowania, w tygodniu oraz dniu maksymalnego zapotrzebowania w 2035 r. Jak widać, strategia ładowania „ŁDz” zwiększa popyt w systemie w godzinach, kiedy ten jest już bardzo wysoki. W odróżnieniu stosowanie strategii ładowania „ŁNc” lub „ŁSt” w godzinach pozaszczytowych oznacza lepsze wykorzystanie mocy wytwórczych.

Model ORCED stosuje metodę probabilistyczną do obliczenia wskaźników niezawodności LOLE i LOEE systemu wytwórczego*. W tabeli 1 pokazano obliczone przy nie-



Rys. 3. Zapotrzebowanie w systemie w tygodniu oraz dniu maksymalnego popytu przy różnych strategiach ładowania samochodów elektrycznych w 2035 r.

Fig. 3. System electric load in the week and day of peak demand due to different charging strategies of electric vehicles in 2035

* LOLE (*Loss of Load Expectation*) – oczekiwany sumaryczny czas trwania deficytów mocy; LOEE (*Loss of Energy Expectation*) – oczekiwane sumaryczne niepokrycie zapotrzebowania.

TABELA 1. Wskaźniki niezawodności systemu elektroenergetycznego w scenariuszu bazowym (bez SE) oraz w scenariuszu z pojazdami elektrycznymi dla różnych strategii ładowania

TABLE 1. Electric power system reliability indices in the Base scenario (w/o EVs) and with electric vehicles for different charging strategies

	2025 r.				2035 r.			
	scenariusz bazowy (bez SE)	scenariusz z SE			scenariusz bazowy (bez SE)	scenariusz z SE		
		ŁDz	ŁNc	ŁSt		ŁDz	ŁNc	ŁSt
Moc szczytowa [GW]	27,00	27,85	27,25	27,01	29,81	32,44	30,57	29,85
LOLE [h/rok]	0,50	3,57	1,09	0,71	0,50	50,05	10,12	0,69
LOEE [GWh]	0,10	0,88	0,22	0,13	0,12	51,32	4,78	0,17
Deficyt mocy [GW]	0,00	0,56	0,22	0,0	0,0	2,74	1,16	0,08

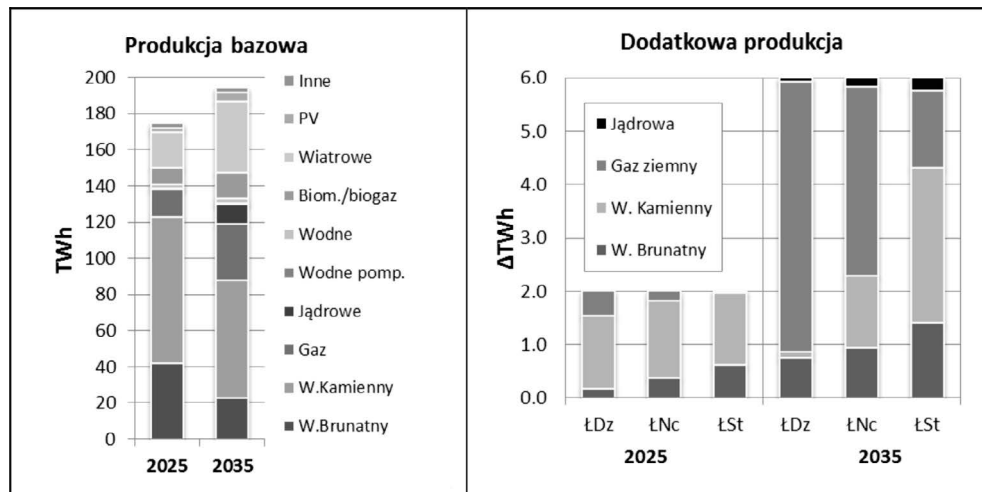
zmienionej strukturze systemu wytwórczego, roczne wskaźniki niezawodności systemu dla scenariusza bazowego oraz dla scenariuszy z pojazdami elektrycznymi w 2025 i 2035 r. We wszystkich scenariuszach z SE, jak można było się spodziewać, LOLE i LOEE są wyższe niż w scenariuszu bazowym. Przedstawiony w tabeli 1 „deficyt mocy” to dodatkowa moc potrzebna, by osiągnąć niezawodność (LOLE) jak w scenariuszu bez pojazdów elektrycznych. Największy deficyt mocy występuje przy scenariuszu niekontrolowanego ładowania dziennego „ŁDz” (0. 56 GW w 2025 r. oraz 2.74 GW w 2035 r.), gdyż dodatkowe zapotrzebowanie na moc występuje, kiedy popyt w systemie jest blisko dziennego szczytu. W scenariuszu ładowania sterowanego „ŁSt” nie istnieje potrzeba budowy dodatkowych mocy wytwórczych w systemie. Scenariusz ładowania nocnego „ŁNc” mieści się pomiędzy tymi dwoma przytoczonymi scenariuszami.

Kontrolowane w jakikolwiek sposób ładowanie pojazdów elektrycznych, np. poprzez zachęty cenowe – obniżoną taryfę nocną lub poprzez wprowadzenie systemu inteligentnego ładowania, może zapewnić, że obciążenia indukowane przez SE są zaplanowane głównie w okresach niższego ogólnego zapotrzebowania, co w dłuższej mierze złagodzi potrzebę zwiększenia zdolności produkcyjnych. Niemniej jednak jest wysoce prawdopodobnie, że określona dodatkowa moc będzie musiała być zbudowana w szczególności po 2030 r. W dalszych obliczeniach nie zakładano deficytu mocy w żadnym spośród rozpatrywanych scenariuszy. Przyjęto w uproszczeniu, że dodatkową moc zapewnią technologie gazowo-parowe (GTCC).

2.2. Produkcja krańcowa do ładowania pojazdów elektrycznych

Produkcja energii elektrycznej pokrywająca tylko dodatkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną do pokrycia popytu SE określany jest mianem „produkcja krańcowa”. Określa

ona, jak kosztowna oraz jak „czysta” będzie dodatkowa produkcja do ładowania przyszłej floty aut elektrycznych. Model ORCED oblicza wielkość produkcji każdej ze stosowanych technologii. Biorąc pod uwagę różnicę między scenariuszem bazowym a scenariuszami z SE, możemy wyodrębnić technologie, które będą wykorzystywane w krańcowym koszyku energii elektrycznej (rys. 4).



Rys. 4. Produkcja bazowa oraz produkcja krańcowa dla pokrycia popytu SE dla przyjętych strategii ładowania

Fig. 4. Base and marginal generation to meet additional EVs demand for different charging strategies

Jak widać, w 2025 r. kluczowy udział w generacji krańcowej mają technologie węglowe, a następnie gazowe. W 2035 r. natomiast sytuacja jest niemal odwrotna przy strategii ładowania dziennego, sterowanego przez odbiorców „ŁDz” oraz podczas ładowania w taryfie nocnej „ŁNc”. Należy zauważyć, że ładowanie sterowane „ŁSt” przesunięte w „dolinę nocną” ogólnego popytu w systemie, znacznie zwiększa wykorzystanie węgla kamiennego i brunatnego. Odnawialnego źródła nie brano pod uwagę jako źródła krańcowego, gdyż ich produkcja ma priorytet w odbiorze i jest w pełni wykorzystana. Energia jądrowa wykorzystana jest do pokrycia popytu SE, tylko wtedy, kiedy blok jądrowy nie pracuje pełną mocą.

2.3. Emisja CO₂ i zanieczyszczeń powietrza oraz zużycie paliw

W odróżnieniu od samochodów spalinowych, auta elektryczne oraz typu *plug-in* podczas jazdy na akumulatorze nie wytwarzają żadnych zanieczyszczeń. Niemniej jednak dostawy energii elektrycznej do pojazdów elektrycznych mogą powodować pewne emisje na poziomie elektrowni w zależności od tego, jakie źródło energii elektrycznej zostało wykorzystane do ładowania. W tabeli 2 porównano emisje CO₂, SO₂, NO_x oraz cząstek stałych (PM)

TABELA 2. Łączne emisje związane z ładowaniem pojazdów elektrycznych dla różnych strategii ładowania w porównaniu z odpowiednimi emisjami pojazdów spalinowych w latach 2025 i 2035

TABLE 2. Total emissions related to the charging of electric vehicles with different charging strategies compared to the corresponding emissions of internal combustion vehicles in 2025 and 2035

Emisje	2025					2035				
	samochody spalinowe		samochody elektryczne			samochody spalinowe		samochody elektryczne		
	z silnikiem		strategia ładowania			z silnikiem		strategia ładowania		
	benzn.	Diesla	ŁDz	ŁNc	ŁSt	benzn.	Diesla	ŁDz	ŁNc	ŁSt
CO ₂ [Mt]	1,426	1,297	1,664	1,852	1,977	3,775	3,537	2,681	3,479	4,568
SO ₂ [kt]	0,0	0,0	0,741	0,967	1,128	0,0	0,0	0,205	1,050	2,521
NO _x [kt]	1,00	8,000	0,838	0,984	1,069	1,800	18,000	0,349	1,215	2,326
PM [kt]	0,015	0,200	0,047	0,056	0,060	0,045	0,450	0,012	0,056	0,122

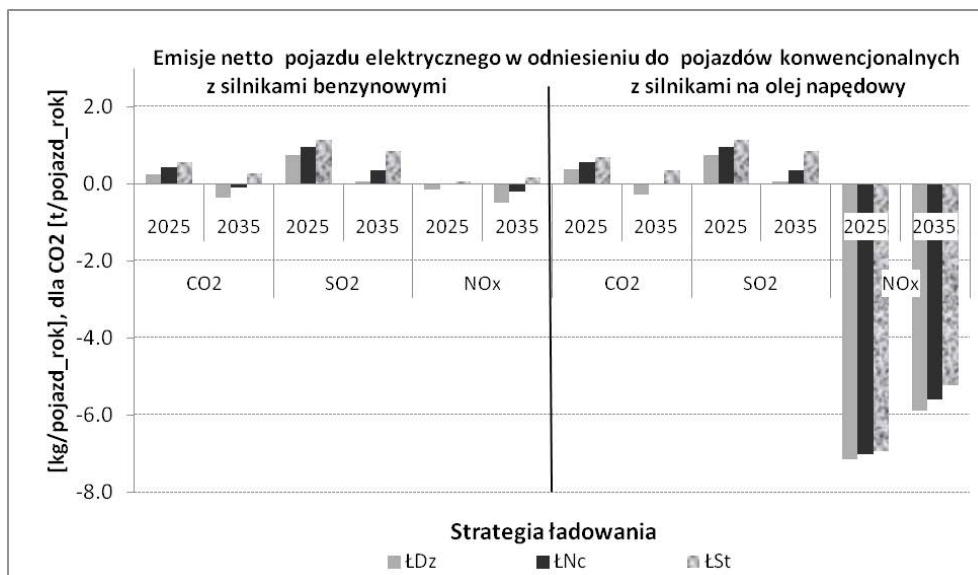
w wyniku ładowania SE z odpowiednimi emisjami pojazdów spalinowych przy zakładanym przebiegu 10 tys. km/rok dla wszystkich pojazdów.

Zastosowane w obliczeniach jednostkowe wskaźniki zużycia paliw i emisji dla pojazdów spalinowych:

	Jednostka	Samochody z silnikiem benzynowym		Samochody z silnikiem Diesla	
		2025	2035	2025	2035
Średnie zużycie paliwa	l/100 km	6,8	6	5,5	5
CO ₂	g/km	143	126	130	118
NO _x	g/km	0,1	0,06	0,8	0,6
PM	g/km	0,0015	0,0015	0,02	0,015

Emisje CO₂, jak również emisje zanieczyszczeń powietrza w wyniku ładowania SE zależą wyraźnie od zakładanego trybu ładowania pojazdów. Emisje te największe są dla scenariusza ładowania sterowanego „ŁSt”, które ma miejsce przeważnie w dolinie nocnej obciążenia w systemie, kiedy głównym źródłem krańcowym jest węgiel. Wbrew dość powszechnej opinii, że wzrost elektromobilności prowadzi do obniżenia emisji CO₂, przedstawione powyżej wyniki analizy porównawczej nie zawsze są korzystne dla pojazdów elektrycznych w warunkach polskich. Jest to efektem przewidywanego przyszłego miksu elektroenergetycznego, w którym nadal węgiel będzie źródłem dominującym – około 70% udział w produkcji energii elektrycznej w 2025 r. oraz 45% w 2035 roku.

Na rysunku 5 przedstawiono emisję netto przez ekwiwalentny pojazd elektryczny w ciągu roku, obliczone jako różnica emisji w wyniku ładowania pojazdu a emisji pojazdu spalinowego o identycznym przebiegu.



Rys. 5. Emisje roczne netto CO₂, SO₂ i NO_x pojazdu elektrycznego

Fig. 5. Net annual emissions of CO₂, SO₂ and NO_x per electric vehicle

Wprowadzenie SE nie spowoduje obniżenia emisji CO₂ w stosunku do samochodów konwencjonalnych w 2025 r., wręcz przeciwnie – zwiększy je niezależnie od strategii ładowania. W 2035 r. natomiast wniosek zależy od scenariusza ładowania i możliwe jest obniżenie, jak i wzrost emisji w stosunku do pojazdów spalinowych – średnio emisje są podobne. Pojazdy spalinowe nie emitują SO₂ i wprowadzenie SE spowoduje wzrost emisji, jakkolwiek nie jest on znaczący biorąc pod uwagę wymóg dostosowania się elektrowni do dyrektywy IED/BREF po 2021 r. SE natomiast przyczynią się do spadku emisji cząstek stałych oraz NO_x. Samochody spalinowe, w szczególności te z silnikiem diesla, są jednym z głównych źródeł emisji prekursorów ozonu – NO_x i lotnych związków organicznych. W efekcie, pomimo że SE przyczynią się do niewielkiego ogólnego spadku emisji PM, biorąc po uwagę że emisje z transportu drogowego występują przeważnie w miastach, wymiana samochodów spalinowych na elektryczne będzie miała bardzo korzystny wpływ na jakość powietrza w gęsto zaludnionych obszarach, co razem z obniżeniem hałasu środowiskowego wpłynie istotnie na zmniejszenie szkodliwych skutków dla zdrowia ludzi. Można zauważyć, że zastępowanie samochodów z silnikami wysokoprężnymi (Diesla) – pomimo nieco niższej emisji CO₂ niż w silnikach benzynowych – pojazdami elektrycznymi jest bezdyskusyjnie korzystniejsze, jeśli chodzi o emisje PM, a zwłaszcza NO_x. Należy również podkreślić, że jeśli samochody elektryczne będą wypierać lekkie ciężarówki lub samochody dostawcze i autobusy z floty, wszystkie emisje będą dalej obniżone z podanych powyżej wartości.

Zużycie paliw i koszty produkcji energii elektrycznej użytej do ładowania pojazdów elektrycznych w porównaniu z alternatywnym kosztem i zużyciem benzyny i oleju napędowego przez pojazdy spalinowe przy analogicznych założeniach jak wyżej przedstawiono

TABELA 3. Paliwa i koszty przewidywane dla różnych strategii ładowania SE w porównaniu z samochodami konwencjonalnymi
 TABLE 3. Fuels and costs predicted for EVs for different charging strategies versus conventional vehicles

Paliwo	2025						2035									
	samochody spalinowe			samochody elektryczne			samochody spalinowe			samochody elektryczne						
	z silnikiem			strategia ładowania			z silnikami			strategia ładowania						
	benzn.	diesla	ŁDz	LNc	ŁSt	benzn.	diesla	ŁDz	LNc	ŁSt	benzn.	diesla	ŁDz	LNc	ŁSt	
Benzyna [mln l]	680	-	-	-	-	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Olaj napędowy [mln l]	-	550	-	-	-	-	1500	-	-	-	-	-	-	-	-	
Węgiel brunatny [Mt]	-	-	0,220	0,466	0,783	-	-	0,919	1,132	1,713	-	-	0,919	1,132	1,713	
Węgiel kamienny [Mt]	-	-	0,659	0,693	0,642	-	-	0,267	0,669	1,292	-	-	0,267	0,669	1,292	
Gaz ziemny [mld m ³]	-	-	0,087	0,040	0,012	-	-	0,846	0,615	0,260	-	-	0,846	0,615	0,260	
Paliwa jądrowe [t 235U]	-	-	0,000	0,000	0,000	-	-	0,010	0,020	0,032	-	-	0,010	0,020	0,032	
Koszty																
Koszt paliw [mld. zł'2017]	2,164/ /4,056*	1,801/ /3,203*	0,454 (0,155)**	0,444 (0,173)**	0,433 (0,184)**	7,107/ /12,433*	6,094 10,192*	1,506 (0,380)**	1,571 (0,489)**	1,617 (0,650)**	-	-	1,506 (0,380)**	1,571 (0,489)**	1,617 (0,650)**	-
Koszt krańc. SE [zł'2017/kWh]	-	-	0,227	0,222	0,217	-	-	0,251	0,262	0,270	-	-	0,251	0,262	0,270	-
Wzrost kosztów wytwarzania energii elektrycznej [zł'2017/kWh]	-	-	2,58	2,42	2,56	-	-	7,54	7,87	8,09	-	-	7,54	7,87	8,09	-

* Koszt w rafinerii/koszt na rynku detalicznym.

** Koszt zakupu uprawnień do emisji CO₂ (zakładany koszt uprawnień: 22 Euro/t CO₂ w 2025 r., 35 Euro/t w 2035 r.).

w tabeli 3. Koszt dla pojazdów elektrycznych obliczono jako dodatkowy koszt zmienny wytwarzania energii elektrycznej: paliwo + koszt operacyjny + koszt CO₂. Koszt paliw dla pojazdów konwencjonalnych obliczono stosując prognozowane ceny paliw w 2025 i 2035 r. (tab. 3) w oparciu o obserwowane średnie ceny netto benzyny i oleju napędowego w rafinerii i na rynku detalicznym w 2017 r. (POPiHN 2018), a następnie obliczono wzrost cen stosując roczną stopę wzrostu ropy według (IEA 2017).

TABELA 4. Prognozowane ceny benzyny i oleju napędowego w 2025 i 2035 r.

TABLE 4. Forecast prices for gasoline and diesel in 2025 and 2035

Cena	2017	2025	2035
Ropa [\$'2016/bbl]	54	83	103
Cena w rafinerii [zł'2017/l]			
Benzyna	2,07	3,18	3,95
Olej napędowy	2,13	3,27	4,06
Cena detaliczna [zł'2017/l]*			
Benzyna	4,60	5,96	6,91
Olej napędowy	4,42	5,82	6,79

* Cenę detaliczną obliczono zwiększając cenę w rafinerii o akcyzę (23%) oraz opłatę paliwową.

Jak się okazuje, koszt benzyny/oleju napędowego w rafinerii wielokrotnie przewyższa koszt wytwarzania dodatkowej energii elektrycznej. Można z tego wnioskować, że znaczący wzrost udziału SE w transporcie drogowym przyczyni się również do zmniejszenia wysokiej zależności od importu ropy w kraju. Koszt krańcowy SE, obliczony przez dzielenie dodatkowego kosztu zmiennego przez produkcję krańcową wynosi około 0,22 zł/kWh w 2025 r., natomiast mieści się w przedziale 0,25–0,27 zł/kWh w 2035 r. W efekcie, nawet jeśli właściciel samochodu elektrycznego zapłaci kilkakrotnie wyższą cenę energii elektrycznej, będzie nadal bardziej opłacalne ładowanie akumulatora niż zakup benzyny czy oleju napędowego. Powyższe porównanie nie zawiera ewentualnych opłat czy prowizji związanych z usługą ładowania pojazdów elektrycznych oraz kosztów związanych z zużyciem akumulatora.

Biorąc pod uwagę niewielki procentowy wzrost ogólnego zapotrzebowania na energię elektryczną w wyniku wprowadzenia pojazdów elektrycznych (ok. 1,2% wzrost w 2025 oraz 3% w 2035 r.) również niewielki wzrost kosztów wytwarzania w systemie przy wszystkich scenariuszach ładowania SE (ok. 2,5 zł/MWh czyli 1% wzrost w 2025 r. oraz ok. 8 zł/MWh czyli ok. 2% wzrost w 2035 r.) nie jest zbyt zaskakujący.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przeanalizowano potencjalny wpływ samochodów elektrycznych na popyt, podaż, strukturę i koszty wytwarzania energii elektrycznej oraz emisje CO₂ i zanieczyszczeń powietrza w wyniku wprowadzenia na polskie drogi 1 mln SE do 2025 r. oraz potrojenia tej liczby do 2035 r. Wiązać się to będzie z wygenerowaniem dodatkowego popytu na energię elektryczną na poziomie 2 Th w 2025/6 TWh w 2035 r. Jest to stosunkowo niewielki wzrost ogólnego zapotrzebowania na energię elektryczną w Polsce, 1,2% w 2025 r. oraz 3% w 2035 r., efektem czego jest również niewielki wzrost kosztów wytwarzania, niezależnie od strategii ładowania aut. Kluczowy udział w pokryciu dodatkowego popytu w 2025 r. będą miały technologie węglowe, tylko w niewielkim stopniu źródła gazowe. W 2035 r. natomiast sytuacja jest niemal odwrotna, z wyjątkiem kiedy poprzez odpowiednie sterowanie ładowania jest przesunięty w „dolinę nocną” ogólnego popytu w systemie. Podczas gdy łączne zużycie energii zakładanej floty SE jest niewielkie, zmiany popytu ładowania w czasie są znaczące, a czasami dosyć wysokie. Nie mniej jednak nawet duży wzrost SE w transporcie drogowym będzie powodował umiarkowane zapotrzebowanie na dodatkowe moce wytwórcze, zakładając, że przedsiębiorstwa energetyczne będą miały pewną kontrolę nad trybem ładowania aut.

Wprowadzenie SE nie spowoduje obniżenia emisji CO₂ w stosunku do samochodów konwencjonalnych w 2025 r., wręcz przeciwnie – zwiększy ją niezależnie od strategii ładowania. W 2035 r. natomiast wniosek zależy od scenariusza ładowania i możliwe jest obniżenie, jak i wzrost emisji w stosunku do pojazdów spalinowych. Pojazdy spalinowe nie emitują SO₂ i wprowadzenie SE spowoduje wzrost emisji tego związku w elektrowniach, jakkolwiek nie jest on znaczący. SE przyczynią się natomiast do spadku emisji cząstek stałych oraz NO_x. Biorąc pod uwagę, że emisje z transportu drogowego występują przeważnie w miastach, wymiana samochodów spalinowych na elektryczne będzie miała bardzo korzystny wpływ na jakość powietrza w gęsto zaludnionych obszarach, co razem z obniżeniem hałasu środowiskowego wpłynie korzystnie na zdrowie ludzi. Ponieważ koszt w rafinerii użytej przez samochody spalinowe benzyny/oleju napędowego dla takiego samego przebiegu jak SE, wielokrotnie przewyższa odpowiedni koszt wytwarzania dodatkowej energii elektrycznej dla ładowania SE, znaczący wzrost udziału SE w transporcie drogowym może przyczynić się do zmniejszenia wysokiej zależności od importu ropy w kraju.

Pomimo że kilka ważnych zagadnień związanych z integracją SE z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym pozostało poza ramami niniejszej pracy – między innymi wpływ SE na sieć dystrybucyjną oraz przydatne możliwości magazynowania energii poprzez baterie samochodowe, które mogą pomóc w regulowaniu sieci energetycznej i rozwoju energii odnawialnej – przedstawione wyniki oferują ważny wstępny wgląd w potencjalne efekty wprowadzenia nowego popytu na energię elektryczną w transporcie na pracę systemu elektroenergetycznego w Polsce, koszty wytwarzania energii elektrycznej oraz emisję.

Literatura

- ARE SA 2018. *Prognoza cen energii elektrycznej w Polsce do 2040 r.* Warszawa: Agencja Rynku Energii SA.
- Cambridge Econometrics 2018. *Charging Poland*. Project coordinated by: Fundacja Promocji Pojazdów Elektrycznych and European Climate Foundation.
- Element Energy and Artelys 2015. *EV Grid Synergy Analysis: France*. Final report for the European Climate Foundation.
- Gerkensmeyer, C. i in. 2010. *Technical Challenges of Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Impacts to the US Power System: Distribution System Analysis*. Pacific Northwest National Laboratory.
- Hacker, F. i in. 2009. Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe – Critical Review of Literature. *ETC/ACC Technical Paper 4*.
- Hadly, S.W. i Baek, Y. 2016. *The Oak Ridge Competitive Electricity Dispatch Model – ORCED Ver. 9 Documentation*, ORNL/TM–2016/382.
- Hadly, S.W. i Tsvetkova, A. 2008. *Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation*, ORNL/TM–2007/150.
- IEA 2016. *Data Set in Annex to the Energy Technology Perspectives 2016*. Paris: International Energy Agency (IEA).
- Kasten, P. i in. 2016. *Electric mobility in Europe – Future impact on the emissions and the energy systems*. Berlin: Öko-Institut e.V.
- Kinther-Meyer, M. i in. 2010. *Impact Assessment of Plug-in Hybrid Vehicles on the U.S. Power Grid*. The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Shenzhen, China.
- Loisel, R. i in. 2014. Large-scale deployment of electric vehicles in Germany by 2030: an analysis of grid-to-vehicle and vehicle-to-grid concepts. *Energy Policy* 65, s. 432–43.
- Lutsey, N. 2015. Global climate change mitigation potential from a transition to electric vehicles. *The International Council on Clean Transportation*, Working paper 2015-5.
- ME 2016. *Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce – Energia dla przyszłości*. Warszawa: Ministerstwo Energii.
- NREL 2015. *Multi-Lab EV Smart Grid Integration Requirements Study*. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5400-63963.
- OECD/IEA 2017. *Global EV Outlook 2017 – Two million and counting*. Paris: International Energy Agency.
- Pasaoglu, G. i in. 2013. *Projections for Electric Vehicle Load Profiles in Europe – Based on Travel Survey Data*, European Commission JRC Scientific and Policy Reports, ISSN 1831-9424 (online).
- Peterson, S.B. i in. 2011. Net Air Emissions from Electric Vehicles: The Effect of Carbon Price and Charging Strategies. *Environ. Sci. Technol.* 45, s. 1972–1997.
- POPiHN 2018. *Przemysł i handel naftowy 2017*. Raport roczny 2017. Polska Organizacja Przemysłu i Handlu Naftowego.
- Pratt, R. 2015. *PEV/Grid Integration Study*. Pacific Northwest National Laboratory.
- RTE 2016. *The impact of electric vehicle development on peak demand and the load curve under different scenarios of EV integration and recharging options*. CEEM Conference Electric vehicles and the electricity system, Paris.
- Schill, W.P. i Gerbaulet, C. 2015. *Power System Impacts of Electric Vehicles in Germany: Charging with Coal or Renewables?*, DIW Berlin, Discussion papers 1442.
- Shafiee i in. 2013. Investigating the Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution System. *IEEE Transactions on Smart Grid* Vol. 4, No. 3, s. 1351–1360.
- SystemX 2017. *Les véhicules électriques au service du système électrique en 2050?* l'Institut de Recherche Technologique SystemX.
- Wachaczewski, P. 2017. *Długookresowa prognoza wpływu rozwoju elektromobilności na pobór energii i mocy w polskim systemie elektroenergetycznym*. Praca magisterska, Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska.
- Waśkiewicz, J. i Pawlak, P. 2017. *Prognozy eksperckie zmian aktywności sektora transportu drogowego*. Warszawa: Instytut Transportu Samochodowego.

