

## ANALIZA WPŁYWU ŁADOWANIA POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH NA DYNAMIKĘ ZMIAN DOBOWEGO OBCIĄŻENIA SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Wiktorja STAHL<sup>1</sup>, Paweł BUĆKO<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 607 614 293 e-mail: wiktoria.stahl@pg.edu.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347 17 81 e-mail: pawel.bucko@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule dokonano analizy możliwego wpływu ładowania samochodów elektrycznych na dynamikę zmian obciążenia dobowego systemu elektroenergetycznego. Oceniono możliwe zmiany kształtu wykresu dobowego, w przypadku gdyby 5% użytkowanych samochodów zastąpić samochodami elektrycznymi. Analizie zostały poddane dwa warianty współpracy samochodów z systemem: G2V (proste ładowanie samochodów) oraz V2G (wykorzystanie możliwości oddawania energii do sieci). W artykule zaprezentowano wpływ samochodów na tzw. gradienty obciążeń, czyli szybkość narastania lub spadku obciążenia na granicach stref czasowych.

**Słowa kluczowe:** V2G, G2V, gradient obciążenia.

### 1. WPŁYW POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH NA DOBOWE KRZYWE OBCIĄŻENIA

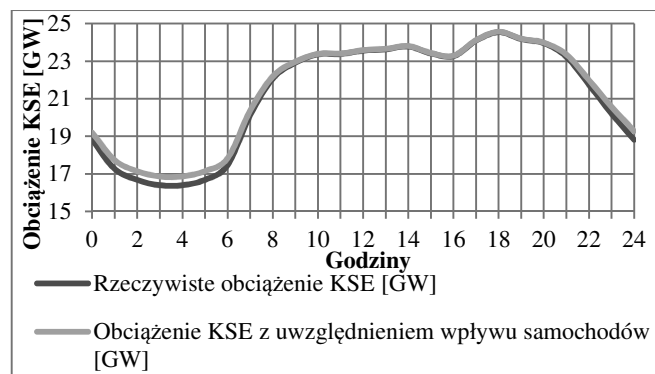
Duża ilość ładowanych samochodów elektrycznych może w sposób znaczący wpłynąć na zmianę kształtu krzywej obciążenia dobowego. W artykule przedstawiono możliwy wpływ ładowania samochodów na gradienty obciążeń w cyklach dobowych. Samochody mogą współpracować z systemem w rozwiązaniu G2V (ang. *Grid-to-Vehicle*) oraz V2G (ang. *Vehicle-to-Grid*). Rozwiązania te dotyczą zarządzania ładowaniem oraz rozładowywaniem baterii pojazdów elektrycznych.

Scenariusz G2V zakłada jednokierunkowy przepływ energii między systemem, a baterią samochodu. W związku z tym, dotyczy on jedynie procesu jej ładowania. Ładowanie byłoby rozłożone w czasie i odbywałoby się głównie w okresie doliny nocnej. Efektem takiego zarządzania ładowaniem dużej ilości pojazdów byłoby zwiększenie obciążenia systemu w czasie występowania niskich obciążeń [1, 2, 3].

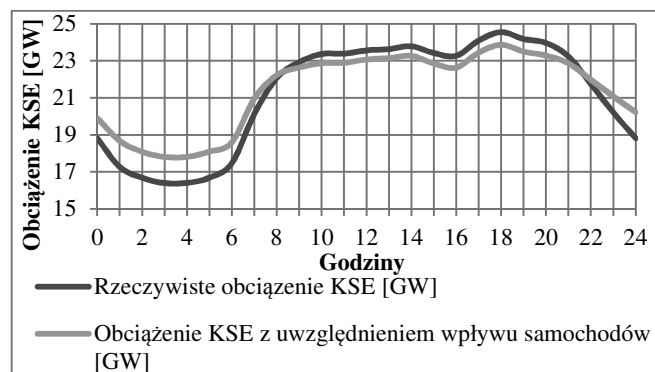
Rozwiązanie V2G dotyczy dwukierunkowej wymiany energii między systemem elektroenergetycznym, a baterią samochodu elektrycznego. Samochody nie tylko pobierałyby energię z systemu na potrzeby ładowania, ale także oddawałyby ją w okresie szczytowych obciążeń. Zarówno ładowanie jak i rozładowywanie baterii pojazdów zostałyby odpowiednio rozłożone w czasie. W wyniku oddawania części zmagazynowanej energii, doszłoby do obniżenia wartości obciążeń szczytowych. Jednocześnie samochody wykazywałyby większe zapotrzebowanie na moc wynikające z większego stopnia rozładowania ich baterii [1, 2, 3, 4, 5].

Założenia i sposób tworzenia krzywych oraz zmiany wartości obciążeń jakie byłyby skutkiem wykorzystania samochodów elektrycznych w systemie elektroenergetycznym zostały przedstawione w [6]. Na potrzeby obliczeń założono, że samochody elektryczne stanowią 5% ogółu zarejestrowanych samochodów w Polsce (ok. 1 084 tys.). Wykresy porównywane są z wykresem bazowym – rzeczywistym uśrednionym zapotrzebowaniem z roku 2016.

Przykładowe krzywe uwzględniające wpływ rozwiązania G2V oraz V2G widoczne są na rysunku 1 oraz na rysunku 2. Na obu wykresach zaobserwować można zmiany, jakie zaszły w krzywych obciążenia dobowego po zastosowaniu wybranego rozwiązania G2V lub V2G.



Rys 1. Obciążenie systemu elektroenergetycznego w średni dzień roboczy stycznia 2016 roku. Wariant G2V [6]



Rys 2. Obciążenie systemu elektroenergetycznego w średni dzień roboczy stycznia 2016 roku. Wariant V2G [6]

## 2. ANALIZA GRADIENTÓW OBCIĄŻEŃ KRZYWYCH OBCIĄŻENIA DOBOWEGO

Samochody elektryczne, w zależności od wybranego rozwiązania, mogą na różne sposoby wpływać na kształt krzywej obciążenia dobowego. W niniejszym artykule rozważaniom poddano krzywe obciążenia dobowego średniego dnia roboczego stycznia 2016 roku. Porównano krzywą przedstawiającą rzeczywiste obciążenie KSE oraz krzywe uwzględniające potencjalny wpływ samochodów elektrycznych – w wariantach G2V oraz V2G. Krzywe te różnią się nie tylko wartościami obciążeń, ale także sposobem ich narastania lub zmniejszania się.

Na przedstawionych krzywych (rys. 1 i rys. 2) wyodrębnić można dwa okresy czasu, w czasie których dochodzi do dużych zmian obciążenia. Pierwszym z nich jest wzrost obciążenia z doliny nocnej do szczytu porannego. Drugim jest spadek obciążenia przy przejściu ze szczytu wieczornego do doliny nocnej. Dynamika zmian obciążenia w ciągu doby w wymienionych wcześniej okresach czasu, została zbadana poprzez obliczenie tzw. gradientów obciążeń. Gradienty pokazują wielkość zmiany obciążenia systemu elektroenergetycznego w rozpatrywanym okresie czasu. Zostały one obliczone dwoma sposobami. Pierwszym z nich jest uzyskanie gradientu z obliczenia pochodnej równania linii trendu. Linie trendu uzyskano przy pomocy programu Microsoft Office Excel. Gradienty obciążeń zostały również przedstawione jako stosunek przyrostu obciążenia do czasu w jakim ten przyrost nastąpił (1). Wartości obliczone tym sposobem zostały zestawione w tabelach w kolumnach podpisanych jako  $\Delta P/\Delta t$ . Obliczone wartości gradientów odnoszą się do tego samego okresu czasu, dla którego wyznaczono gradienty pierwszym sposobem obliczeniowym.

$$\nabla = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{P_k - P_p}{t_k - t_p} \quad (1)$$

gdzie:  $\nabla$  - gradient obciążenia w [GW/h],  $P_k$  - obciążenie na końcu rozpatrywanego okresu czasu w [GW],  $P_p$  - obciążenie jakie wystąpiło na początku rozpatrywanego okresu czasu w [GW],  $t_k$  - godzina wystąpienia końcowego obciążenia,  $t_p$  - godzina wystąpienia początkowego obciążenia.

W celu analizy zmian w wartościach gradientów, dokonano stosownych obliczeń zarówno dotyczących krzywej przedstawiającej rzeczywiste obciążenie systemu elektroenergetycznego, jak i krzywych uwzględniających wpływ samochodów elektrycznych dla obu wariantów – V2G oraz G2V. Wyniki przedstawiono w podpunktach 2.1 oraz 2.2 niniejszego artykułu.

### 2.1. Gradienty narastania obciążenia z doliny nocnej do szczytu porannego

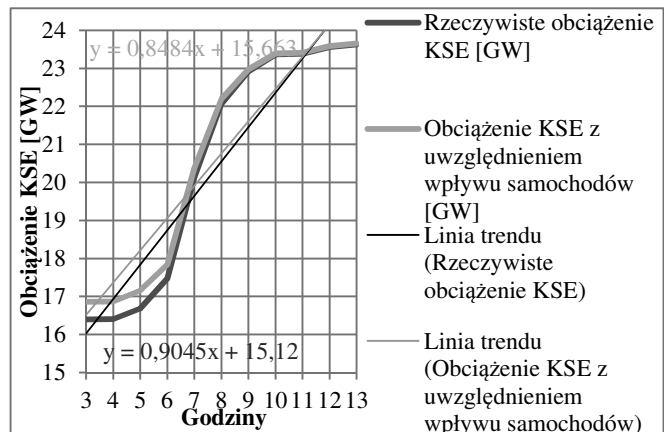
Gradienty dotyczące okresu narastania obciążenia w godzinach porannych obliczono dla dwóch przedziałów czasowych – od godziny, w której wystąpiło najniższe obciążenie w dolinie nocnej (godzina 3:00) do godziny, w której wystąpiło najwyższe obciążenie w czasie porannym (godzina 13:00) oraz w okresie największego skoku obciążenia (godziny 6:00 – 9:00).

Fragmety krzywej wraz z zaznaczonymi liniami trendu i ich równaniami dla przedziału czasu od 3:00 do

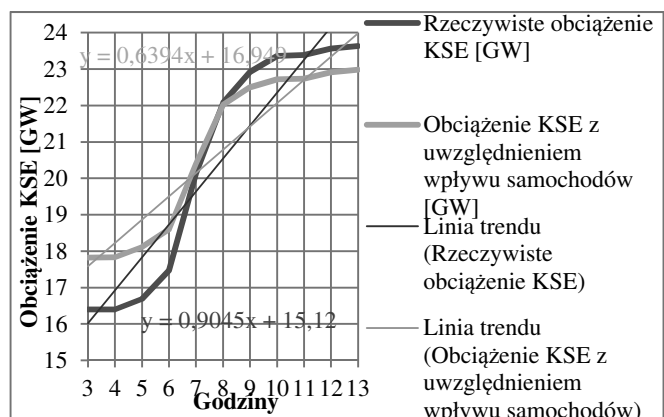
13:00 przedstawia rysunek 3 oraz rysunek 4. Wartości gradientów dla tego okresu przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Wartości gradientów dla okresu narastania obciążenia z doliny nocnej do szczytu porannego w godzinach 3:00 – 13:00

	d/dy [GW/h]	$\Delta P/\Delta t$ [GW/h]
Rzeczywiste obciążenie	0,90	0,72
G2V	0,85	0,68
V2G	0,64	0,52



Rys. 3. Gradient dla okresu narastania obciążenia w godzinach 3:00 – 13:00. Wariant G2V



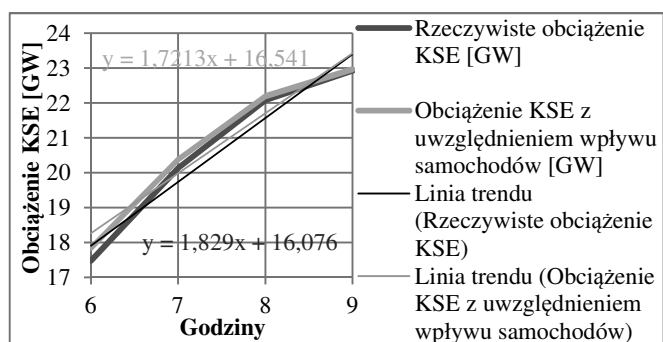
Rys. 4. Gradient dla okresu narastania obciążenia w godzinach 3:00 – 13:00. Wariant V2G

Gradienty dla okresu narastania obciążenia, obrazują jak gwałtownie zmienia się obciążenie systemu w godzinach porannych. W przypadku rzeczywistego obciążenia KSE dla zakresu czasu od 3:00 do 13:00, w ciągu 10 godzin obciążenie wzrośnie od ok. 16,4 GW do ok. 23,6 GW. W wariantach G2V większość samochodów ładuje się w godzinach nocnych, więc obciążenie w tym czasie zwiększa się. W związku z tym najniższe obciążenie, które również wystąpi o godzinie 3:00, wynosi ok. 16,9 GW. Skutkiem wzrostu obciążenia jest mniejsza wartość gradientu. Obciążenie narasta z wartości większej niż w przypadku rzeczywistym, stąd mniejsza gwałtowność zmian. Największe zmiany w kształcie krzywej obciążenia dobowego można zaobserwować w przypadku rozwiązania V2G. Zgodnie z tym rozwiązaniem, samochody elektryczne oddają część energii zmagazynowanej w bateriach w okresie szczytowych obciążeń. Powoduje to rozładowanie baterii pojazdu w większym stopniu, co skutkuje zwiększonym, w stosunku do G2V, zapotrzebowaniem na energię w okresie nocnym. Efektem jest nie tylko zwiększenie się wartości

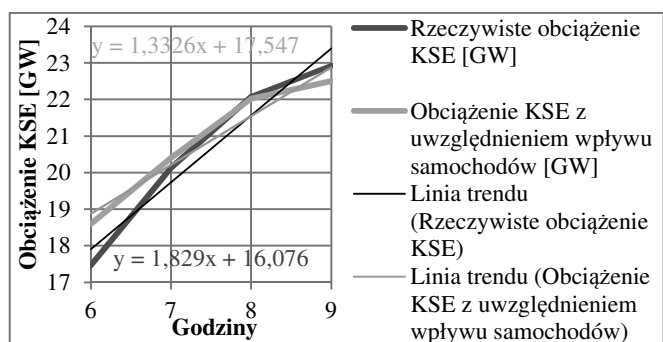
najniższego obciążenia (ok. 17,8 GW o godzinie 3:00) ale również zmniejszeniem się wartości najwyższego obciążenia (ok. 23 GW o godzinie 13:00). Dlatego też w przypadku rozwiązania V2G obciążenie narasta w sposób najmniej gwałtowny i gradienty osiągają najniższe wartości, w porównaniu z poprzednimi przypadkami. Wynika stąd, że wariant V2G jest najbardziej korzystny dla systemu elektroenergetycznego, gdyż w tym samym przedziale czasu występuje mniejszy skok obciążenia. Pokrycie małego wzrostu zapotrzebowania jest mniej obciążające dla systemu.

Wartości gradientów dla okresu 3:00 – 13:00 różnią się w zależności od metody obliczeniowej. Aczkolwiek niezależnie od różnic, dla obu metod zaobserwować można najmniejsze wartości gradientów dla wariantu V2G. Natomiast gradienty charakteryzujące wariant G2V są zbliżone do wartości obliczonych dla krzywej przedstawiającej rzeczywiste obciążenie KSE.

W przypadku narastania obciążenia, poddano analizie również okres bezpośredniego wzrostu zapotrzebowania, który przypada na godziny od 6:00 do 9:00. Jest to okres, w którym system elektroenergetyczny w krótkim czasie musi pokryć duży wzrost zapotrzebowania na moc. Wartości gradientów dla przedziału czasu 6:00 – 9:00 zawiera tablica 2. Analizowane fragmenty krzywych przedstawia rysunek 5 oraz rysunek 6.



Rys 5. Gradient dla okresu narastania obciążenia w godzinach 6:00 – 9:00. Wariant G2V



Rys 6. Gradient dla okresu narastania obciążenia w godzinach 6:00 – 9:00. Wariant V2G

Tablica 2. Wartości gradientów dla okresu narastania obciążenia z doliny nocnej do szczytu porannego w godzinach 6:00 – 9:00

	d/dy [GW/h]	$\Delta P/\Delta t$ [GW/h]
Rzeczywiste obciążenie	1,83	1,82
G2V	1,73	1,70
V2G	1,38	1,30

W tym przypadku, niezależnie od metody obliczeniowej, otrzymano podobne wartości gradientów. Ze

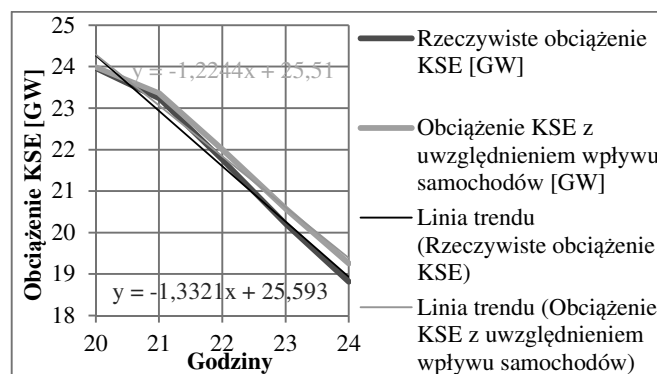
względu na mniejszy zakres czasu, można dokładniej określić dynamikę zmian obciążenia. Wpłynęło to również na zwiększenie wartości gradientów w każdym przypadku, w porównaniu z poprzednimi obliczeniami. Ponadto, na podstawie wyników zawartych w tablicy 2, można dojść do podobnych wniosków jak w przypadku gradientów obliczonych dla większego okresu czasu. Najniższe wartości gradientów również dotyczą wariantu V2G, co potwierdza jego korzystny wpływ na zmianę dynamiki obciążeń.

## 2.2. Gradienty spadku obciążenia ze szczytu wieczornego do doliny nocnej

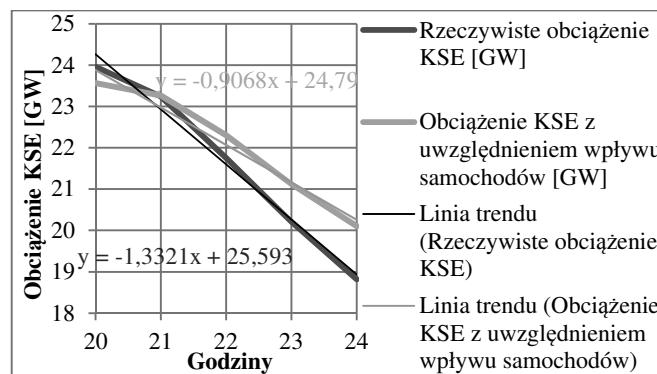
Na potrzeby analizy wpływu ładowania samochodów elektrycznych na zmianę krzywej obciążenia dobowego, rozważaniom poddano także okres największego spadku obciążenia. W przypadku dobowej krzywej obciążenia przedstawiającej średni dzień roboczy, występuje on podczas spadku obciążeń ze szczytu wieczornego do doliny nocnej. Spadek ten przypada na godziny 20:00 – 24:00. Wartości gradientów dla tego okresu zostały zaprezentowane w tabeli 3. Natomiast fragmenty krzywych oraz linie trendu przedstawia rysunek 7 oraz rysunek 8.

Tablica 3. Wartości gradientów dla okresu spadku obciążenia ze szczytu porannego do doliny nocnej w godzinach 20:00 – 24:00

	d/dy [GW/h]	$\Delta P/\Delta t$ [GW/h]
Rzeczywiste obciążenie	-1,33	-1,30
G2V	-1,22	-1,20
V2G	-0,90	-0,87



Rys 7. Gradient dla okresu spadku obciążenia w godzinach 20:00 – 24:00. Wariant G2V



Rys 8. Gradient dla okresu spadku obciążenia w godzinach 20:00 – 24:00. Wariant V2G

Wartości ujemne gradientów odzwierciedlają spadek zapotrzebowania na moc. Największą dynamikę spadku obciążenia systemu zaobserwowano dla krzywej, która nie

uwzględnia wpływu samochodów elektrycznych. Natomiast zarówno dla krzywej w wariacie G2V oraz V2G dynamika zmian obciążenia jest mniejsza. Szczególnie korzystnymi wartościami gradientów, podobnie jak w przypadku okresu wzrostu zapotrzebowania, odznacza się krzywa uwzględniająca wpływ samochodów elektrycznych w wariacie V2G. W przypadku krzywej dotyczącej rzeczywistego obciążenia KSE, obciążenie systemu spadnie z wartości ok. 23,9 GW do ok. 18,8 GW w ciągu czterech godzin. Natomiast w wariacie uwzględniającym rozwiązanie V2G obciążenie systemu spadnie z wartości ok. 23,6 GW do ok. 20,1 GW. Praca systemu elektroenergetycznego zostałaby dostosowana do mniej gwałtownego spadku zapotrzebowania, co również byłoby pozytywnym efektem.

### 3. WNIOSKI

Odpowiednie zarządzanie procesami ładowania (a także rozładowywania w przypadku rozwiązania V2G) baterii samochodów elektrycznych, może wpłynąć na zmianę kształtu krzywej obciążenia dobowego. Po uwzględnieniu wpływu samochodów elektrycznych, zmiany zaszły nie tylko w wartościach obciążeń, ale też w dynamice ich wzrostu lub spadku. W przypadku krzywej przedstawiającej rzeczywiste obciążenie systemu, wartości gradientów były największe. Świadczy to o dużej dynamice zmian obciążenia. W związku z tym, w krótkim czasie system musiał dostosować się do gwałtownie rosnącego lub zmniejszającego się (w zależności od pory dnia) obciążenia. Stan ten ulega poprawie w przypadku zastosowania rozwiązania G2V. Samochody elektryczne pobierając energię w czasie doliny nocnej, spowodowały zwiększenie się wartości najniższych obciążeń. Wynika stąd, że obciążenie systemu narasta z wyższego poziomu, niż w przypadku krzywej rzeczywistej. Podobnie w przypadku spadku, obciążenie zmniejsza się również w sposób mniej gwałtowny. Najbardziej korzystne dla systemu elektroenergetycznego okazało się rozwiązanie V2G. Samochody wspierające ten scenariusz, w czasie doliny nocnej wykazują większe zapotrzebowanie na moc, zwiększając obciążenie systemu w tym czasie. Dodatkowo, oddając część energii zgromadzonej w swoich bateriach,

pozwalają na zmniejszenie wartości obciążeń szczytowych. Wiąże się z tym najmniejsze wartości gradientów zarówno w okresie przejścia z doliny nocnej do szczytu porannego, jak i w czasie spadku obciążenia ze szczytu wieczornego do doliny nocnej. Zmniejszenie dynamiki zmian obciążenia jest pożądane z punktu widzenia prowadzenia ruchu źródeł wytwórczych oraz ma istotny wpływ na koszty wytwarzania energii elektrycznej.

Oba sposoby współpracy samochodów elektrycznych z systemem istotnie łagodzą gradienty obciążeń. Szczególnie wykorzystywanie możliwości rozładowywania samochodów i oddawania energii do systemu (V2G) pozwala na uzyskanie istotnych efektów. Wdrożenie rozwiązania G2V oraz V2G może być wymagające zarówno pod względem technologicznym jak i ekonomicznym. Jednakże ze względu na liczne zalety jakie mają do zaoferowania te rozwiązania, być może będą miały swoją szansę w przyszłości.

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Morgan T.: Smart grid and electric vehicles: made for each other?, Discussion Paper nr. 02, International Transport Forum, Wielka Brytania, 2012
2. Damiano A., Gatto G. i inni: Vehicle-to-Grid Technology: State of the Art and Future Scenarios, Journal of Energy and Power Engineering, David Publishing Company, nr. 8, 2014.
3. Monteiro V., Goncalves H., i inni: Batteries Charging Systems for Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, W: Carmo J., Ribeiro J.: New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering, wydawnictwo InTech, Rijeka, 2012.
4. Zhenpo W., Shuo W.: "Grid Power Peak Shaving and Valley Filling Using V2G Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, vol, 28, nr. 3, 2013.
5. Strona Internetowa Uniwersytetu Delaware dot. V2G [dostęp: 14.01.2019] - [www1.udel.edu/V2G](http://www1.udel.edu/V2G)
6. Stahl W.: Rozwiązania V2G I G2V jako sposoby wykorzystania samochodów elektrycznych do zmiany kształtu krzywej obciążenia dobowego system elektroenergetycznego, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2018, nr. 61, s.69 – 72, ISSN 2353-1290.

## ANALYSIS OF IMPACT OF CHARGING ELECTRIC CARS ON DYNAMICS OF LOAD CHANGES OF THE POWER SYSTEM

In this article there were presented an analysis of the impact of charging electric cars on daily load curve of the power system. There were shown three variants of daily load curve – a curve of actual load, curve that takes into account impact of electric cars by G2V scenario and curve that takes into account impact of electric cars by V2G strategy. As part of analysis, there were calculated and presented values of load gradients. Load gradient is a factor that indicates the dynamics of load changes. There were also shown parts of curves, that were analysed. On graphs there were applied trend lines and its equations. Load gradients were calculated in both ways – as a derivative of trend line equation and as the ratio of load increase to the time in which it lasted. Low values of gradients shows that, the increases (or decreases) of power demand were not sudden and proceeded in a sustainable manner. High values of gradients were not desirable, because it means that power demand increases (or decreases) in sudden and quick way in short time. It is easier for power system to cover power demand that not changes suddenly.

Depending on the chosen strategy, there were different values of gradients. Based on calculations, the best for power system is V2G variant. V2G solution guarantees a higher demand during night valley and reduction of peak demands. That means power increases from night valley to morning peak and decreases from evening peak to night valley more fluently. This is shown by low gradients values.

**Keywords:** V2G, G2V, load gradient.