

## Zagadnienia jakości energii stacji ładowania pojazdów elektrycznych

**Streszczenie.** W artykule opisano aktualny stan elektromobilności, metody ładowania pojazdów elektrycznych oraz typowe problemy związane z jakością energii podczas ładowania. Przeanalizowano wyniki pomiarów harmonicznych prądu podczas ładowania samochodu BMW i3 z wykorzystaniem zasilanej trójfazowo stacji ładowania zintegrowanej z lampą uliczną LED. Zbadano harmoniczne prądu podczas pracy modułów AC oraz DC tej samej stacji ładowania w akredytowanym laboratorium EMC.

**Abstract.** The article describes the current state of electromobility, charging methods of electric vehicles and typical problems related to power quality during charging. The results of current harmonics measurements during slow charging of the BMW i3 using a three-phase charging station integrated with an LED street lamp were also analysed. Then, the current harmonics during the operation of AC and then DC modules of the same charging station were examined in an accredited EMC laboratory. **Aspects of power quality connected with EV charging stations.**

**Słowa kluczowe:** elektromobilność, stacja ładowania, jakość energii, harmoniczne prądu

**Keywords:** electromobility, charging station, power quality, current harmonics

### Wstęp

Duża zależność od importowanych paliw kopalnych i wahające się ceny ropy naftowej sprawiają, że konieczne jest poszukiwanie alternatyw dla tradycyjnych form transportu. Coraz większą rolę odgrywa elektromobilność, czyli pojazdy elektryczne (ang. electric vehicles, EV). Technologia, która otacza EV osiąga bezprecedensowy poziom złożoności. Wynika to z ciągłej potrzeby sięgania po większe zasięgi jazdy pojazdów, skrócenie czasu ładowania akumulatorów, poprawy efektywności energetycznej [1]. Działania te opierają się na inteligentnych systemach zarządzania energią, niższej produkcji kosztów i nowoczesnych technologiach w obszarze bezpieczeństwa i ochrony użytkowników pojazdów.

Zwiększająca się liczba EV, które podłączają się do sieci elektroenergetycznej, zazwyczaj w sposób losowy, pociąga za sobą wiele nowych wyzwań i komplikacji. Pierwsza i najważniejsza kwestia to zwiększone obciążenia z powodu podłączania pojazdów elektrycznych do sieci elektroenergetycznej w godzinach szczytu [2,3]. To jeszcze bardziej zwiększa różnicę między popytem a podażą. Indywidualne zachowania właścicieli samochodów elektrycznych są bardzo zróżnicowane. Ta przypadkowość utrudnia utrzymanie sieci elektroenergetycznej pod kontrolą oraz może powodować negatywny wpływ na całokształt pracy sieci elektroenergetycznej.

Niniejszy artykuł ma na celu scharakteryzowanie bieżącego stanu elektromobilności, zaprezentowanie typowych problemów dotyczących jakości energii podczas ładowania EV oraz analizę harmonicznych prądu podczas różnych trybów pracy trójfazowej dwukierunkowej stacji ładowania (rys. 1.) poprzez wstępne badania inżynierskie z autem oraz znormalizowane badania w akredytowanym laboratorium kompatybilności elektromagnetycznej (EMC).

### Bieżący stan elektromobilności

Według najnowszego raportu Global EV Outlook 2020 [4] liczba samochodów elektrycznych na świecie wzrosła do 7,2 miliona (1% udziałów w transporcie globalnym). Liderem elektromobilności pozostają Chiny (47% wszystkich samochodów elektrycznych).

Infrastruktura do ładowania pojazdów elektrycznych nadal się rozwija. W 2019 r. na całym świecie liczba punktów ładowania wzrosła o 40% w porównaniu z rokiem poprzednim z 5,2 mln do 7,3 mln punktów ładowania z czego około 6,5 mln stanowiły prywatne punkty ładowania. Na wielu rynkach pojazdów elektrycznych

preferowanymi miejscami ładowania są dom i miejsce pracy. Dostępność ładowania pojazdów elektrycznych w domu zależy od środowiska budowlanego i jest ściśle związana z gęstością zaludnienia, liczbą mieszkań z garażem lub miejscem parkingowym oraz lokalnymi wskaźnikami posiadania pojazdów elektrycznych. Ponieważ do ładowania pojazdu w domu wystarczy kompatybilne gniazdo elektryczne, przewód oraz odpowiednia wtyczka, trudno jest dokładnie oszacować liczbę prywatnych ładowarek. Wygoda, opłacalność oraz różne polityki wsparcia są czynnikami wpływającymi na powszechność prywatnych punktów ładowania.

Publicznie dostępne punkty ładowania stanowiły 12% (862 000) wszystkich punktów ładowania w 2019 r., z czego 598 000 (8%) to punkty wolnego ładowania, a 263 000 (4%) to punkty szybkiego ładowania. Tabela 1. przedstawia wybrane państwa z największą liczbą ogólnodostępnych wolnych i szybkich punktów ładowania w 2019 roku.

Tab. 1. Państwa z największą liczbą ogólnodostępnych wolnych i szybkich punktów ładowania w 2019 roku według [2]

Kraj	Liczba punktów ładowania
Chiny	515 908
Stany Zjednoczone	77 358
Nowa Zelandia	50 153
Niemcy	37 063
Japonia	30 394
Francja	29 701

W oparciu o licznik elektromobilności Polskiego Stowarzyszenia Paliw Alternatywnych (PSPA) oraz Polskiego Związku Towarzystwa Motoryzacyjnego, w dniu 23 sierpnia 2020 r. w Polsce było:

- 1194 punktów ładowania, w tym 804 typu AC i 390 typu DC,
- 12271 pojazdów elektrycznych (6837 akumulatorowych pojazdów elektrycznych i 5434 hybrydowych typu plug-in).

W 2020 roku w Polsce zarejestrowano ponad 50% EV więcej w porównaniu z rokiem poprzednim. Sytuacja związana z pandemią COVID-19 może przyczynić się do spowolnienia tego trendu. 16 czerwca 2020 r. Ministerstwo Klimatu oraz Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej ujawniły trzy programy („Zielony samochód”, „eVAN” i „Koliber”), które mają pomóc w walce z negatywnymi skutkami pandemii.



Rys. 1. Prototypowa stacja dwukierunkowego szybkiego transferu energii pomiędzy siecią elektroenergetyczną a pojazdem elektrycznym

### Wpływ ładowania na parametry jakości energii

Wpływ ładowania na sieć ogólnie opisuje się poprzez zmiany parametrów jakości energii w systemie elektroenergetycznym. Nieregularne zachowanie użytkowników pojazdów elektrycznych podczas ładowania będzie miało wiele szkodliwych skutków dla systemu, np. przepięcia w sieci dystrybucyjnej, asymetria faz, pogorszenie parametrów jakości energii, częstsze uszkodzenia linii elektroenergetycznych, szybsza degradacja transformatorów rozdzielczych, zwiększone odkształcenia i wyższy prąd zwarcia [5,6]. Poniżej omówiono wybrane możliwe skutki ładowania EV.

#### 1) Zmiany napięcia

Oczekuje się, że skala związana z połączeniem EV w obszarach mieszkalnych do sieci dystrybucyjnych wzrośnie w przyszłości, ale związany z nimi poziom penetracji i odpowiadające im punkty połączeń są nadal niejednoznaczne.

Ładowanie pojazdów elektrycznych może wpływać na problemy z napięciem w sieci (spadki i wahania napięcia). Wielu naukowców badało wpływ ładowania pojazdów elektrycznych na napięcie w systemie elektroenergetycznym. W [7] zastosowano symulację Monte Carlo, aby zbadać wpływ ładowania pojazdów elektrycznych na napięcie systemu z powodu losowości ładowania pojazdów elektrycznych. Wpływ ładowania może być znaczący [8] lub nieznaczący [9] w zależności od liczby pojazdów elektrycznych, charakterystyki sieci i cech ładowania pojazdów elektrycznych. W [9] wykazano, że wpływ mocy ładowania takich pojazdów na miejską sieć dystrybucyjną jest niewielki przy niskiej penetracji pojazdów elektrycznych. W przeciwieństwie do [8], badanie [9] wykazało, że przy 50% penetracji pojazdów elektrycznych, odchylenia napięcia sieci wykraczają poza standardowy poziom. W [10] wyniki wskazały, że sześć pojazdów elektrycznych z technologią szybkiego ładowania powoduje przekroczenie standardowego poziomu napięcia w sieci.

Nieskoordynowane ładowanie uwalnia właściciela od wszelkiego rodzaju ograniczeń, które zwiększają niebezpieczeństwo zwiększenia napięcia w węźle skutkującego szkodą dla sieci dystrybucyjnej. W [11] badano nieregularny i losowy proces ładowania hybrydowych samochodów elektrycznych oraz opracowano

ocenę stochastyczną w celu ustalenia odpowiedniej penetracji. Z przeprowadzonych badań wynika, że asymetria napięć jest największa w części dystrybucyjnej systemu. W [12] ze względu na niepewność co do szybkości ładowania i punktów przyłączenia pojazdów elektrycznych oceniono przy użyciu metody symulacji Monte Carlo wpływ ładowania / rozładowania pojazdów elektrycznych na asymetrię napięcia w sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia (nn) dla gospodarstw domowych. Wyniki wskazały, że EV nieznacznie wpływają na bilans napięć na początku linii zasilania (ang. feeder), chociaż mogą zwiększać współczynnik asymetrii napięcia na jej końcu.

Jeszcze jeden godny uwagi wkład w tę konkretną sprawę wnoszą Meyer i in. [13], którzy przedstawiają sposób ładowania akumulatora EV za pomocą pięciu różnych ładowarek i przedstawiają faktyczne dane pomiarowe asymetrii napięć w sieci dystrybucyjnej. Oprócz tego dokonano również arytmetycznego badania wpływu asymetrii napięć na system dystrybucyjny.

#### 2) Zniekształcenia harmoniczne

Typowa sieć dystrybucyjna ma podłączoną dużą liczbę różnych nieliniowych odbiorników będącymi źródłami zniekształceń harmonicznych. Są to odchylenia przebiegu prądu lub napięcia od idealnego kształtu sinusoidy. W przypadku obciążeń nieliniowych, którymi są także ładowarki EV, odkształcenia prądu są bardzo powszechne ze względu na występowanie elementów energoelektronicznych potrzebnych do konwersji energii np. z prądu przemiennego na prąd stały. Wprowadzenie tych prądów do systemu dystrybucyjnego może spowodować zniekształcenie napięcia zasilania i przeciążenie drogiego sprzętu służącego do dystrybucji energii elektrycznej [14]. Kim i in. [15] wykazali, że niska penetracja pojazdów elektrycznych i wolne ładowanie nieznacznie wpływają na parametry jakości energii sieci pod względem zniekształceń harmonicznych. Jednak według [16] wysoka penetracja pojazdów elektrycznych i szybkie ładowanie może skutkować znacznymi zniekształceniami harmonicznymi napięcia i prądu.

Większość badań dotyczących stacji ładowania koncentruje się tylko na harmonicznych prądu. Istnieje jednak bardzo ograniczona liczba badań, które analizują harmoniczne zarówno napięcia, jak i prądu podczas szybkiego ładowania przeprowadzanym w klastrze punktów ładowania podłączonych do tej samej linii zasilania [17].

#### 3) Odchylenia częstotliwości i straty mocy i energii

W systemach elektroenergetycznych wytwarzanie i obciążenie muszą być równe w czasie rzeczywistym. W przeciwnym razie częstotliwość sieci odbiega od wartości standardowej. Jeżeli na sieć nałożone zostanie duże obciążenie związane z ładowaniem EV, do utrzymania częstotliwości sieci w dozwolonym zakresie konieczne będzie wytwarzanie większej ilości energii [18, 19]. Również czas przyłączenia EV do sieci i jego odłączenia wiąże się z niepewnością.

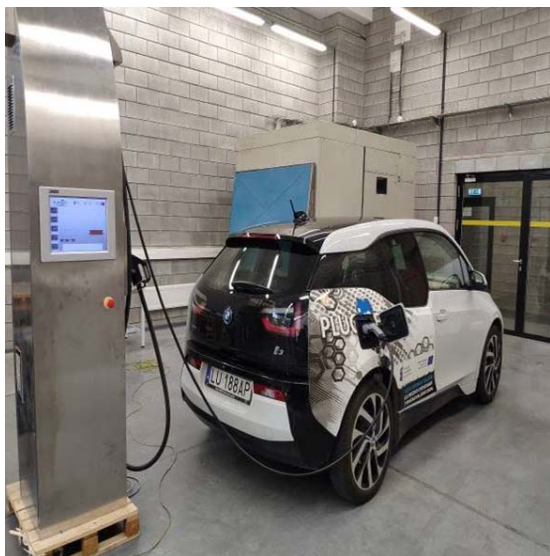
Integracja pojazdów elektrycznych z siecią elektryczną wpływa także na przepływ energii w sieci. Rosnące zapotrzebowanie powoduje większe straty mocy w całym systemie elektroenergetycznym. Istnieje wiele prac badawczych dotyczących wpływu integracji pojazdów elektrycznych na straty mocy. W [20] i [21] wykazano, że wysoka penetracja EV ładowanych nieskoordynowanie może negatywnie wpływać na straty mocy w systemach dystrybucyjnych. Masoum i in. [22] wskazali, że integracja EV z systemem elektroenergetycznym może zwiększyć straty mocy transformatora rozdzielczego nawet trzykrotnie w przypadku dużej liczby EV.

## Analiza harmonicznych prądu podczas pracy trójfazowej dwukierunkowej stacji ładowania

Przedmiotem badań była trójfazowa stacja dwukierunkowego szybkiego transferu energii pomiędzy siecią elektroenergetyczną a pojazdem elektrycznym zawierająca dwa moduły: AC oraz DC zintegrowana z lampą uliczną LED. Maksymalny roboczy prąd, który może transferować stacja wynosi 36 A. Pomiary były wykonywane podczas różnych charakterów prac stacji i zostały podzielone na dwie części: inżynierską oraz odbywające się w akredytowanym laboratorium EMC.

### a) badania inżynierskie

Do stacji ładowania został podłączony samochód BMW i3 (rys. 2.) o pojemności akumulatora wynoszącej 60 Ah (rzeczywisty zasięg tego EV to około 100 km).



Rys. 2. Powolne ładowanie BMW i3 z wykorzystaniem modułu AC prototypu dwukierunkowej stacji ładowania

Do pomiarów i analizy parametrów jakości energii elektrycznej wykorzystano analizator jakości energii Sonel PQM-700. Urządzenie to zapewnia użytkownikom kompleksowe możliwości pomiaru, analizy i rejestracji parametrów zgodnie z normą europejską EN 50160, które są w pełni zgodne z wymaganiami normy IEC 61000-4-30, według której można wyróżnić parametry jakości energii: wartość napięcia zasilania i natężenia prądu, częstotliwość zasilania, chwilowe wzrosty i spadki napięcia, przerwy w zasilaniu, napięcia przejściowe, asymetria napięcia i prądu zasilania, harmoniczne i interharmoniczne napięcia i prądu, napięcia sygnałów sieciowych oraz szybkie zmiany napięcia. Do testu użyto cęg pomiarowych C-5 umożliwiających pomiar prądu AC oraz DC. Ze względu na to, że wykonywane były również badania związane z kompatybilnością elektromagnetyczną (promieniowanie i emisja) stacji ładowania, była ona podłączona do zasilania poprzez trójfazową sieć sztuczną SMZ-6/50, 4x25 A. Na rysunku 3. przedstawiono stanowisko laboratoryjne do pomiarów parametrów jakości energii.

Początkowy stan naładowania akumulatora EV wynosił 30%. Napięcie znamionowe każdej z faz wynosiło 230 V, a częstotliwość napięcia zasilania 50 Hz. BMW i3 wyposażone jest w przyłącze CCS (ang. combined charging system), które jest połączeniem przyłącza prądu przemiennego i przyłącza prądu stałego. W niniejszym badaniu do wolnego ładowania (jednofazowego) EV zastosowano wtyczkę typu 2. Do pomiarów wykorzystano opcję odczytów bieżących. W badaniu skupiono się na pomiarach harmonicznych prądu.



Rys. 3. Widok stanowiska laboratoryjnego do pomiaru parametrów jakości energii

Rysunek 4. przedstawia przebiegi napięć i prądów fazowych oraz prądu w przewodzie neutralnym podczas zasilania stacji ładowania. Zauważalne jest, że prąd służący do ładowania samochodu elektrycznego jest pobierany z fazy pierwszej ( $I_1 \approx 14$  A;  $P_1 = 3,26$  kW;  $Q_1 = 295,5$  var;  $S_1 = 3,27$  kVA;). Prąd w fazie drugiej wynosi ok. 0,4 A. Z fazy trzeciej zasilana jest lampa LED. Przebiegi napięć i prądów mają charakter sinusoidalny. Najbardziej od sinusoidy odbiega przebieg prądu fazy trzeciej.

Analiza wpływu ładowania pojazdów elektrycznych na system elektroenergetyczny musi uwzględniać zniekształcenia harmoniczne, ponieważ mogą powodować przedwczesną eksploatację elementów systemu [23]. Standardowe stacje ładowania oraz ładowarki EV wyposażone są w przetwornice AC/DC, które bezpośrednio wpływają na parametry jakości energii. Zgodnie z poziomami emisji harmonicznych prądu zawartych w normie IEC 61000-3-2 [24] wartości były nieznacznie przekroczone (części tysięczne) dla dwudziestej piątej, dwudziestej siódmej, dwudziestej dziewiątej, trzydziestej trzeciej, trzydziestej piątej oraz trzydziestej dziewiątej harmonicznej prądu. Tak znikome przekroczenie może wynikać z klasy użytego analizatora (S). Rysunek 5. przedstawia widmo harmonicznych prądu podczas ładowania BMW i3.

### Bbadania w akredytowanym laboratorium EMC

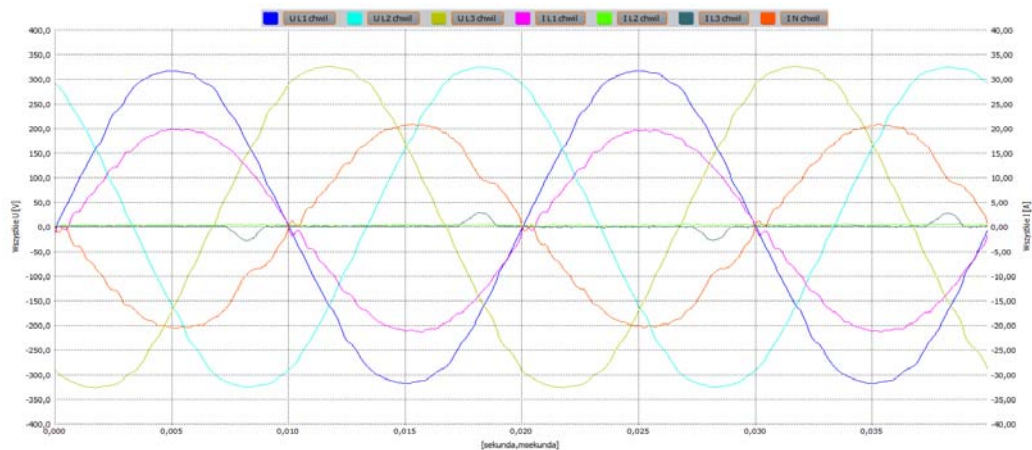
kolejną część badań pod kątem emisji harmonicznych prądu wykonano w akredytowanym laboratorium EMC podczas następujących trybów pracy stacji ładowania:

- stan jałowy,
- moduł AC – 20% mocy,
- moduł AC – 80% mocy,
- moduł DC – 20% mocy,
- moduł DC – 80% mocy.

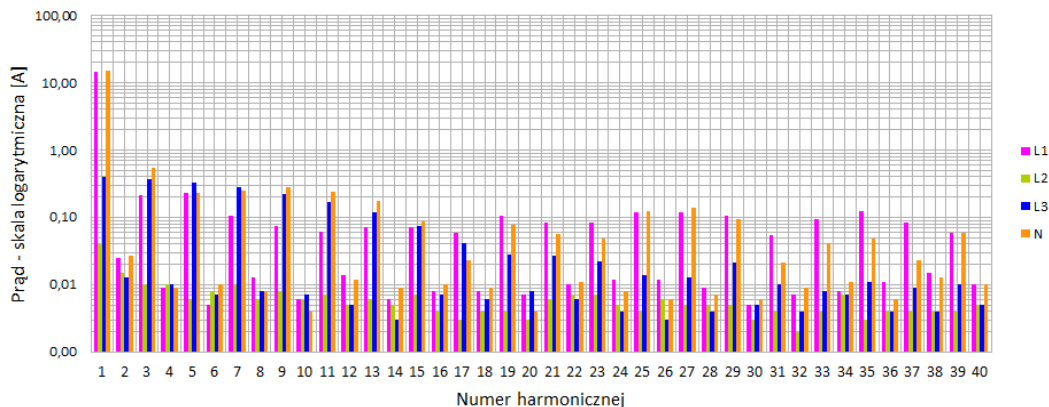
Zamiast samochodu elektrycznego do symulacji ładowania wykorzystano obciążenie o charakterze rezystancyjnym, które jednakowo obciążało każdą z faz.

Rysunki 6. i 7. przedstawiają widma harmonicznych prądu odpowiednio podczas testu modułu AC (20% mocy) oraz modułu DC (20% mocy). Wyniki zostały porównane z normą PN-EN IEC 61000-3-12 [25]. Nie stwierdzono przekroczenia poziomów emisji harmonicznych prądu.

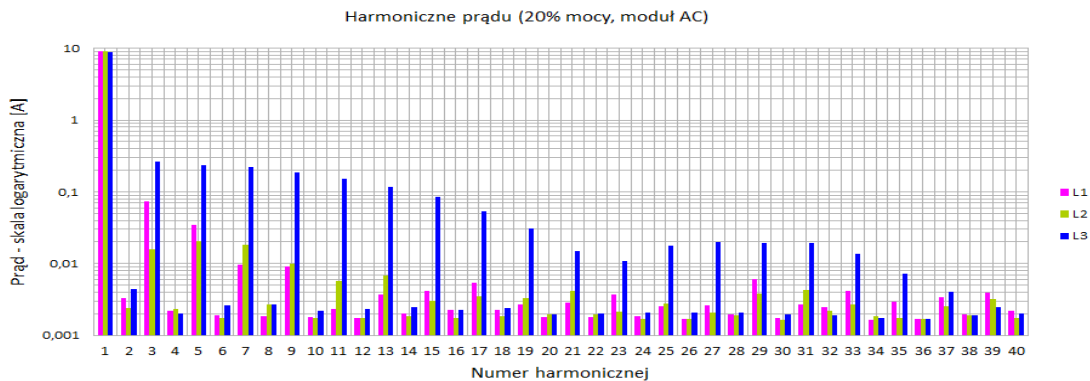




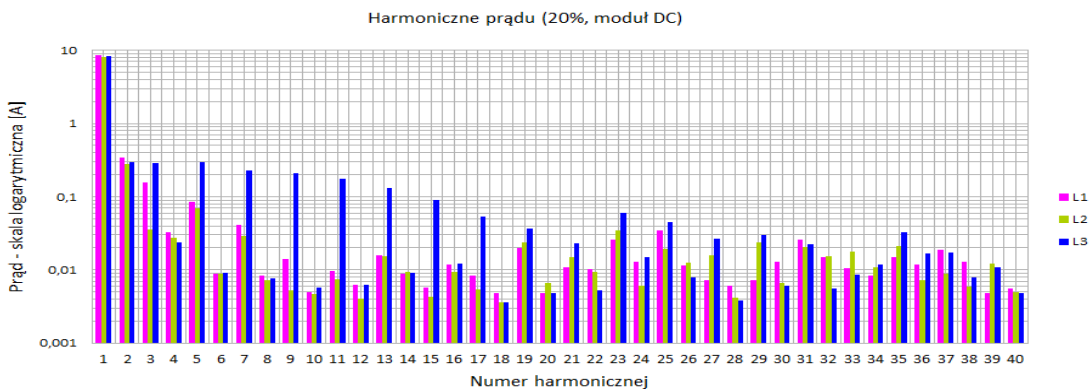
Rys. 4. Przebiegi napięć i prądów fazowych oraz prądu w przewodzie neutralnym



Rys. 5. Widmo harmonicznych prądu podczas ładowania BMW i3



Rys. 6. Widmo harmonicznych prądu – badanie modułu AC (20% mocy)



Rys. 7. Widmo harmonicznych prądu – badanie modułu DC (20% mocy)

## Poprawa parametrów jakości energii

W ostatnich latach pojawiło się kilka opracowań poruszających temat ograniczania negatywnego wpływu ładowania samochodów elektrycznych na sieć elektroenergetyczną. Jednym z proponowanych rozwiązań jest zaprojektowanie nowych topologii ładowarek EV, na przykład, prostowniki wyposażone w przetwornice typu front-end i back-end oraz modyfikacje w układach sterowania prostownikami (kontrola prądu zamiast kontroli napięcia) - poziom urządzenia. Innym pomysłem jest zastosowanie przełączników zaczełów, filtrów pasywnych lub aktywnych filtrów mocy, które są w stanie niwelować harmoniczne - poziom systemu elektroenergetycznego) [18, 26, 27, 28]. W celu utrzymania równowagi popytu i podaży oraz zmniejszenia strat w systemie elektroenergetycznym zaproponowano również metodę inteligentnego pomiaru [22]. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jest pomocne w zmniejszaniu negatywnego wpływu procesu ładowania pojazdów elektrycznych na system elektroenergetyczny. Wskazane jest również, aby tryb ładowania pojazdów elektrycznych był dopasowany do czasu postoju pojazdu elektrycznego, ponieważ może to zminimalizować obciążenie sieci [29]. Ograniczenie negatywnych skutków pojazdów elektrycznych można również przeprowadzić, gdy EV są ładowane poza godzinami szczytu [28].

Co więcej, dwukierunkowe ładowanie pojazdów elektrycznych i wdrożenie technologii Vehicle to Grid (V2G) również może przyczynić się do poprawy parametrów jakości energii. Rozwiązanie to oferuje systemowi elektroenergetycznemu wiele korzyści ze względu na możliwość wykorzystania energii zmagazynowanej w akumulatorach pojazdów elektrycznych, na przykład jako rezerwę wirującą na nagłe zmiany zapotrzebowania na energię. EV mogą być również używane do równoważenia obciążenia, redukcji harmonicznych, regulacji częstotliwości, regulacji napięcia, i kompensacji mocy biernej. Warto wspomnieć, że w konfiguracji V2G pojazd elektryczny musi być prawie stale podłączony do sieci, aby być częścią rynku usług pomocniczych. Najlepszym rozwiązaniem dla tej strategii wydają się publiczne parkingi z wieloma punktami ładowania (centra handlowe, szpitale, miejsca pracy, uczelnie, centra miast). Pojazdy elektryczne mogą również poprawić działanie systemu elektroenergetycznego pod względem niezawodności i zapotrzebowania oraz pomóc w przypadku przerw w systemie elektroenergetycznym. Ponieważ odnawialne źródła energii często nie odpowiadają zapotrzebowaniu na energię elektryczną, wykorzystanie pojazdów elektrycznych jako techniki magazynowania może również zwiększyć poziom integracji tych zasobów. Niestety pomimo tych wymienionych korzyści pojawia się po drugiej stronie ograniczenie producentów aut oraz ich użytkowników. Dotychczasowe seryjne produkcje mają ograniczniki, a warunki gwarancji aut oraz liczba cykli ładowania wpływająca na żywotność akumulatora pokładowego skutecznie powstrzymuje samych właścicieli EV od masowego udziału w wspieraniu energią system elektroenergetyczny.

## Wnioski

Jakość energii wpływa na działanie systemu elektroenergetycznego i milionów podłączonych do niego urządzeń elektrycznych. Wpływa więc pośrednio również na bezpieczeństwo ludzi. Powszechne wdrażanie elektromobilności wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną.

W artykule przedstawiono analizę parametrów jakości energii podczas wolnego ładowania (AC) BMW i3 za

pomocą prototypowej zasilanej trójfazowo stacji ładowania zintegrowanej z lampą uliczną LED. Pomiar wykonano z wykorzystaniem analizatora jakości energii. Wyniki pokazują znikomą emisję harmonicznych prądu i napięcia podczas ładowania, która nie wpływa znacząco na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego.

Ponadto przetestowano również funkcjonalność samego modułu AC badanej stacji ładowania, co stanowi ważne badanie, głównie dlatego, że stacja jest nadal w fazie rozwoju i jest jeszcze niedostępna komercyjnie.

Przedstawione wyniki mają na celu pomóc przedsiębiorstwom zajmującym się dystrybucją energii elektrycznej w zrozumieniu możliwego wpływu tych nowych obciążeń na ich sieci elektryczne, w celu przygotowania ich na ewentualne masowe wprowadzenie EV. Należy zauważyć, że analiza została oparta na jednym pojeździe elektrycznym, a modele różnych producentów mogą mieć różne konstrukcje prostownika pokładowego. Dlatego ważne jest, aby w przyszłości takie badania uwzględniały różne modele EV oraz różne stacje ładowania. Co więcej, większa penetracja EV może mieć większy wpływ na parametry jakości energii.

Oprócz samych pomiarów parametrów jakości energii istnieje potrzeba większej liczby badań odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej, ponieważ jest to często pomijany problem w pracach naukowych [30].

*Badania współfinansowane w ramach projektu międzysektorowych interdyscyplinarnych studiów doktoranckich INTERDOC PL - umowa nr POWR.03.02.00-00-1020/16A.*

*Autorzy: dr inż. Paweł A. Mazurek, mgr inż. Aleksander Chudy, Politechnika Lubelska, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergii, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, e-mail: p.mazurek@pollub.pl, a.chudy@pollub.pl.*

## LITERATURA

- [1] Chudy, A.; Mazurek, P. Electromobility – the Importance of Power Quality and Environmental Sustainability., *J. Ecol. Eng.*, 20 (2019), No. 10, 15-23
- [2] Kurzempa, A. Electromobility – what does it mean? *Atest*, 19 (2018), No. 6, 894-897
- [3] Krupa, K.; Kamiński, J. Analiza wpływu rozwoju elektromobilności na zużycie energii elektrycznej w Polsce. *Rynek Energii*, 12 (2017), 8-13
- [4] International Energy Agency. *Global EV Outlook 2020*, 2020
- [5] Rizvi, S. A. A.; Xin, A.; Masood, A.; Iqbal, S.; Jan, M. U.; Rehman, H. Electric Vehicles and their Impacts on Integration into Power Grid: A Review, *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*; IEEE, (2018), 1-6
- [6] Jarzyna, W.; Zieliński, D.; Gopakumar, K. An evaluation of the accuracy of inverter sync angle during the grid's disturbances, *Metrology and measurement systems*, 27 (2020), No. 2, 355-371
- [7] Wang, H.; Wen, F.; Huang, J.; Zhang, L.; Song, Q. Load characteristics of electric vehicles in charging and discharging states and impacts on distribution systems, *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012)*; Institution of Engineering and Technology, (2012), 144
- [8] Hui-ling, L.; Xiao-min, B.; Wen, T. Impacts of plug-in hybrid electric vehicles charging on distribution grid and smart charging, *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*; IEEE, (2012), 1-5
- [9] Rautiainen, A.; Mutanen, A.; Repo, S.; Jarventausta, P.; Tammi, A.; Ryymin, R.; Helin, J.; Unkuri, A.; Pekkinen, M. Case studies on impacts of plug-in vehicle charging load on the planning of urban electricity distribution networks, *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*; IEEE, (2013), 1-7

- [10]Yong, J. Y.; Ramachandaramurthy, V. K.; Tan, K. M.; Mithulananthan, N. Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64 (2015), 300-310
- [11]Shahnia, F.; A. Ghosh; G. Ledwich; F. Zare. Voltage unbalance sensitivity analysis of plug-in electric vehicles in distribution networks, *AUPEC 2011*, (2011), 1-6
- [12]Shahnia, F.; Ghosh, A.; Ledwich, G.; Zare, F. Predicting Voltage Unbalance Impacts of Plug-in Electric Vehicles Penetration in Residential Low-voltage Distribution Networks, *Electric Power Components and Systems*, 41(16) (2013) No. 16, 1594-1616
- [13]Meyer, J.; Hahle, S.; Schegner, P.; Wald, C. Impact of electrical car charging on unbalance in public low voltage grids, *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation; IEEE*, (2011), 1-6
- [14]Zhou, N.; Wang, J.; Wang, Q.; Wei, N. Measurement-Based Harmonic Modeling of an Electric Vehicle Charging Station Using a Three-Phase Uncontrolled Rectifier, *IEEE Trans. Smart Grid*, 6 (2015) No. 3, 1332-1340
- [15]Kim, K.; Song, C. S.; Byeon, G.; Jung, H.; Kim, H.; Jang, G. Power demand and total harmonic distortion analysis for an EV charging station concept utilizing a battery energy storage system. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 8 (2013), 1234-1242
- [16]Debbou, M.; Colet, F. Interleaved DC/DC charger for wireless power transfer. *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT); IEEE*, (2017), 1555-1560
- [17]Lucas, A. Fast charging diversity impact on total harmonic distortion due to phase cancellation effect: Fast charger's testing experimental results; Luxembourg, 2017
- [18]Ahmadi, A.; Tavakoli, A.; Jamborsalamati, P.; Rezaei, N.; Miveh, M. R.; Gandoman, F. H.; Heidari, A.; Nezhad, A. E. Power quality improvement in smart grids using electric vehicles: a review, *IET Electrical Systems in Transportation*, 9 (2019) No. 2, 53-64.
- [19]Miller, P.; Wancerz, M. Analiza pracy farmy wiatrowej w kontekście parametrów jakości energii elektrycznej, *Rynek Energii*, 3 (2017), 20-26.
- [20]Pillai, J. R.; Bak-Jensen, B. Impacts of electric vehicle loads on power distribution systems, *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference; IEEE*, (2010), 1-6.
- [21]Pieltain Fernandez, L.; Gomez San Roman, T.; Cossent, R.; Mateo Domingo, C.; Frias, P. Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks, *IEEE Trans. Power Syst.*, 26 (2011) No. 1, 206-213.
- [22]Masoum, M. A. S.; Deilami, S.; Islam, S. Mitigation of harmonics in smart grids with high penetration of plug-in electric vehicles, *IEEE PES General Meeting; IEEE*, (2010), 1-6
- [23]Gała, M. Assessment of the impact of the micro wind turbine on the power quality in the distribution network, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, (2019) No. 1, 35-38
- [24]PN-EN IEC 61000-3-2:2019-04. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 3-2: Poziomy dopuszczalne -- Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A)
- [25]PN-EN IEC 61000-3-12:2012-01. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 3-12: Poziomy dopuszczalne --Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym > 16 A i < lub = 75 A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia
- [26]Veera Venkata Subrahmanya Kumar Bhajana; Jarzyna, W.; Fatyga, K.; Zielinski, D.; Kwaceny, L. Performance of a SiC MOSFET based isolated dual active bridge dc-dc converter for electro-mobility applications, *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique*, 64 (2019), 383-390
- [27]Khalid, M. R.; Alam, M. S.; Sarwar, A.; Jamil Asghar, M. S. A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid, *eTransportation*, 1 (2019), 100006.
- [28]Martínez-Lao, J.; Montoya, F. G.; Montoya, M. G.; Manzano-Agugliaro, F. Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77 (2017), 970-983
- [29]Jörling, K.; Gartner, J.; Spöttle, M.; Drier, W.; Jerram, L.; Grizzel, L.; Staats, M.; Schimmel, M. Research for TRAN Committee: Charging infrastructure for electric road vehicles, Luxembourg, (2018)
- [30]Chudy, A.; Stryczewska, H. D. Electric vehicle charging – aspects of power quality and electromagnetic compatibility. *Journal of Automation, Electronics and Electrical Engineering*, 1 (2019), 17-22