

Wybrane wyniki badań przebiegu procesu ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań przebiegu procesu ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych w kontekście efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej procesu. Wykonano szereg badań układu szybka ładowarki DC-pojazd elektryczny oraz rejestrację sygnałów wymiany informacji pomiędzy nimi z wykorzystaniem powszechnie dostępnego transceivera CAN. Pozwoliło to na ocenę prawidłowości przebiegu procesu dla różnych stanów naładowania baterii akumulatorów pojazdu elektrycznego Nissan Leaf.

Abstract. The article presents the results of research into the process of charging electric vehicle batteries in the context of energy, ecological and economic efficiency of the process. A series of tests of the DC-quick-charger system with a connected electrical vehicle were carried out including registration of data exchange between them using a commonly available CAN transceiver. This allowed to assess the correctness of the battery charging process for different state of charge (SOC) levels. **Selected results of investigations of the charging process of electric vehicle batteries.**

Słowa kluczowe: pojazdy elektryczne, szybkie ładowanie akumulatorów, efektywność energetyczna, CHAdeMO

Keywords: electric vehicles, fast charging of batteries, energy efficiency, CHAdeMO

Wstęp

Zakres badań związanych z elektromobilnością poszerza się, nie tylko ze względu na wzrost znaczenia pojazdów z napędem elektrycznym (PE) w transporcie cywilnym i wojskowym, ale również ze względu na innowacyjne wykorzystanie tych pojazdów w technologii V2G (ang. *Vehicle to Grid*), czyli technologii umożliwiającej dwukierunkowy przepływ energii między pojazdem elektrycznym a instalacją obiektu inteligentnego lub siecią elektroenergetyczną.

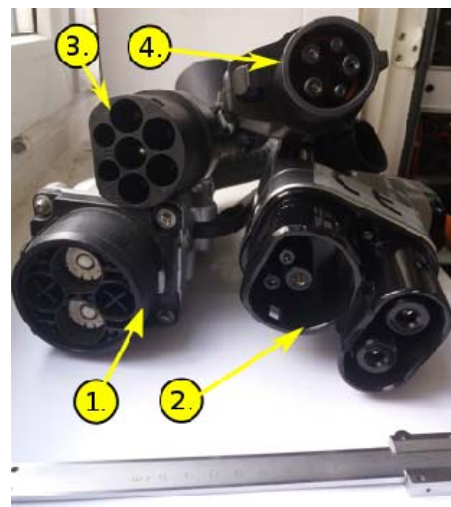
Istotnym warunkiem rozwoju PE jest także gotowość infrastruktury elektroenergetycznej do jednoczesnego ładowania wielu pojazdów, skupionych w jednym miejscu. Komisja Europejska rekomenduje średnio 1 stację ładowania AC na każde 10 zarejestrowanych pojazdów oraz 1 stację DC na każde 100 pojazdów. W wytycznych geograficznego rozmieszczenia stacji ładowania na trasach szybkiego przejazdu (autostrady, węzły komunikacyjne) przewiduje się stosowanie ładowarek szybkich DC o mocach powyżej 50 kW (ładowanie do 30 minut) i ultraszybkich do 350 kW (do 15 minut). W aglomeracjach miejskich (otoczenie handlowe, hotele, restauracje, galerie handlowe, centra biznesowe) mają dominować ładowarki wolne AC o mocach 22 kW z czasami ładowania dłuższymi niż 2 godziny a w miejscach zamieszkania i pracy przewiduje się instalowanie ładowarek o mocach od 6 – 11 kW i czasach ładowania dłuższych niż 6 godzin. W Europie najbardziej rozwiniętą strukturę ładowarek mają Norwegia i Holandia (180 ładowarek na 100 tys. Mieszkańców). Niemcy mieli w 2018 roku 135000 elektrycznych i hybrydowych samochodów, dla których udostępniono 13500 punktów ładowania [VDI-Nachrichten Nr 43, 2018].

Jeszcze innym czynnikiem wpływającym na rozwój elektromobilności jest obecna polityka energetyczna krajów UE w sprawie ograniczania emisji, głównie CO₂, powstającej przy produkcji energii elektrycznej, którą w dalszej kolejności zasilane są ładowarki pojazdów elektrycznych. Ustalane są nowe, niskie limity emisji CO₂ dla tzw. miksów energetycznych źródeł wytwórczych energii elektrycznej w krajowych systemach elektroenergetycznych (KSE).

Na rysunku 1 pokazano przykłady popularnych standardów stosowanych w ładowarkach do pojazdów elektrycznych. Każdy z wymienionych standardów posiada własne rozwiązania interfejsów elektrycznych (wtyków i

gniazd), co ogranicza możliwości wykorzystania dowolnej ładowarki przez każdy pojazd elektryczny lub wymusza instalację różnych typów gniazd w obudowie pojazdu i różnych wtyków w ładowarkach.

Wśród wielu standardów złączy, protokołów komunikacji oraz poziomów i rodzajów napięć najbardziej rozpowszechnionym w Europie na dzień dzisiejszy jest CHAdeMO [1].



Rys. 1. Przykłady popularnych standardów wtyków 1. IEC 62196 type 4 DC dla CHAdeMO prod. Yazaki, 2. Combined Charging System Combo 2 (CCS 2) prod. SETEC POWER, 3. IEC 62196 Type 2 „Mennekes” prod. Duosida, 4. 32A SAE J1772 AC prod. Duosida} [opracowanie własne]

Komunikacja pomiędzy stacją ładowania a pojazdem elektrycznym realizowana jest w standardzie CAN 2.0B i jest ona niekodowana w odróżnieniu od systemu CCS (ang. *Combined Charging System*). Organizacja CHAdeMO nie określa żadnych szczegółowych wymagań dla naliczania opłat i identyfikacji użytkownika poprzez komunikację CAN. Operatorzy stacji ładowania mają pozwolenie na implementację własnych algorytmów identyfikacji i naliczania opłat. Jeżeli do tych czynności konieczne jest dodanie własnych ramek z unikalnymi identyfikatorami CAN, konieczne jest uzyskanie wcześniejszej aprobaty organizacji CHAdeMO [2].

Organizacja CHAdeMO w połowie roku 2018 udostępniła wersję 2.0 tego standardu opisującego budowę ładowarek o mocy do 400 kW z przewodem ładowania chłodzonym cieczą lub opcjonalnie wyposażonym w pantograf [3].

Celem opracowania są badania procesu ładowania pojazdów elektrycznych (PE), z zastosowaniem szybkiej ładowarki DC współpracującej z kilkoma pojazdami elektrycznymi typu Nissan Leaf.

Dla osiągnięcia celu sformułowano problem badawczy i rozwojowy w postaci pytania: jakie są warunki techniczne ładowania i wartości: jednostkowego czasu ładowania t_{lj} , jednostkowego czasu przerwy t_{pj} i ich relacji $k=t_{lj}/t_{pj}$ w warunkach szybkiej ładowarki DC, pojazdu marki NISSAN i miks energetycznego krajowego systemu elektroenergetycznego, spełniające stany postulowane, tj. kryteria jakości produktu, efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej procesu oraz nieszkodliwości produktu i procesu ładowania [4]

Stany postulowane

Z aktualnego przeglądu badań i rozwoju ładowania pojazdów z napędem elektrycznym, wynika potrzeba poznania i podwyższania jakości energii elektrycznej w procesie ładowania. Równanie stanu jakości, efektywności i nieszkodliwości ładowania energii wg korzyści i nakładów ekologicznych, energetycznych i ekonomicznych można opisać ogólną zależnością w postaci:

$$(1) L(\overline{H}, \overline{E}, \overline{R}, \Theta, t) = P(\overline{s}, \overline{di}, \Theta, t_o),$$

gdzie: \overline{H} - charakterystyki ładowania jako wielkości wyjściowe (efektywność, nieszkodliwość, jakość procesu),
 \overline{E} - cechy elementów wewnętrznych: instalacji i konstrukcji ładowarek, \overline{R} - relacje, powiązania elementów (relacje elementów i czasów), Θ, t, t_o - czas i relacje,
 \overline{s} - sterowanie, ingerencja: ładowaniem, przerwą i relacjami, \overline{di} - zakłócenia.

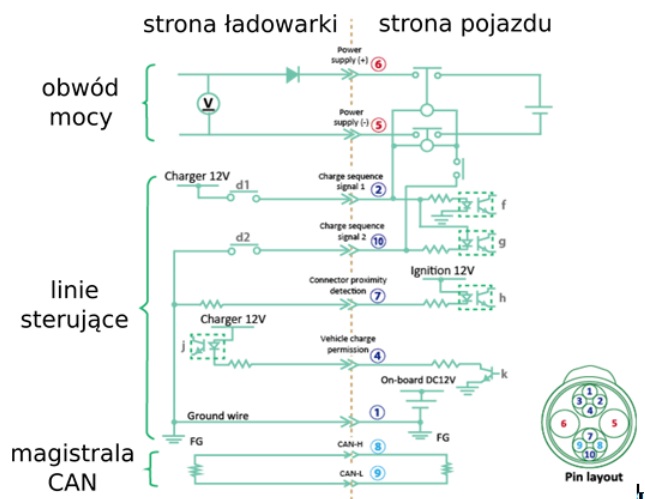
Lewa strona równania (1) opisuje właściwości procesu ładowania energii, jego cechy natury fizycznej. Właściwości te zależą od elementów uczestniczących w procesie E_1, E_2, \dots, E_m , powiązań (relacji) między tymi elementami R_1, R_2, \dots, R_n , oraz są funkcjami θ i t (czasu działania, zjawisk i procesu dynamicznego). Niewiadomymi są elementy zbioru charakterystyk (H) jakości produktu (energia ładowania), efektywności (energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej) procesów, nieszkodliwości produktu i procesu (następstwa w sieci, pojeździe i w środowisku naturalnym).

Prawa strona równania (1) jest opisem ingerencji wewnętrznej i zewnętrznej. Mogą one zależeć od: postaci oddziaływania, sterowania za pomocą sygnałów ze zbioru (wspomagane aktywnie), oddziaływania interakcyjnego

\overline{di} , wzajemnego oddziaływania elementów ładowarek, pojazdów, procesu technologicznego, środowiska.

Algorytm procesu ładowania według CHAdeMO

Użytkownik stacji rozpoczynając ładowanie z dedykowanej ładowarki podłącza wtyk IEC typ 2 do gniazda w samochodzie. Wyprowadzenia i znaczenie sygnałów w złączu pokazane jest na rysunku 2.



Rys. 2 Opis przeznaczenia i sposób połączenia pinów w złączu IC62196 type 2 [5]

Napięcie 12V podane z ładowarki blokuje możliwość uruchomienia samochodu w trakcie ładowania. Następnym krokiem jest polecenie inicjacji ładowania przez użytkownika stacji ładowania.

Po wydaniu przez użytkownika stacji polecenia ładowania następuje wysłanie do pojazdu polecenia inicjującego przekazywanie przez pojazd dopuszczalnych parametrów ładowania. Ładowarka sprawdza kompatybilność otrzymanych po magistrali CAN danych ze swoimi parametrami i w odpowiedzi przekazuje limity wartości natężenia prądu i napięcia ładowania. Następuje ponowne sprawdzenie zgodności tym razem po stronie pojazdu elektrycznego i to sterownik pojazdu podejmuje ostateczną decyzję o rozpoczęciu procesu ładowania, zezwalając na zamknięcie styków w obwodzie głównym po stronie baterii. Następnie przesyła, w odstępach co 100 ms zadane wartości prądu i napięcia oraz porównuje wartość zadaną i zmierzoną natężenia prądu otrzymaną przez komunikację z ładowarką. Zakończenie ładowania sygnalizowane jest przez pojazd w formie komunikatu błędu przesyłanego przez magistralę CAN lub przez trzy następujące po sobie wartości zadane prądu równe zero.

Plan i przebieg badań

Miejsce badań - laboratorium Instytutu Inżynierii Elektrycznej WTIIe Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Stanowisko badawcze, poza aparaturą pomiarową i obiektem badań, było wyposażone w pojazdy elektryczne typu Nissan Leaf.

Obiekt badań - ładowarka z interfejsem szybkiego ładowania prądem stałym typu SGTE Power EV Quick Charger ze złączem CHAdeMO prod. Yazaki DC 500V, 120A (standard IEC 62196 type 4, DC). Zdjęcia badanej ładowarki umiejscowionej w laboratorium i pojazdu Nissan Leaf pokazano na rysunku 3. Ładowarka zasilana była napięciem przemiennym trójfazowym nn z rozdzielnic zabudowanej w laboratorium badawczym.

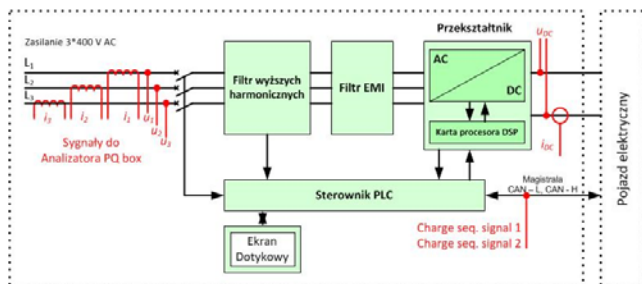
Celem badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie sformułowane w problemie badawczym.

Miarami oceny oddziaływań sposobów ładowania akumulatorów są parametry i wskaźniki jakości, efektywności i nieszkodliwości uwzględnione w części analitycznej opracowania wyników.



Rys.3. Zdjęcia badanej ładowarki w laboratorium badawczym oraz pojazdu elektrycznego [opracowanie własne]

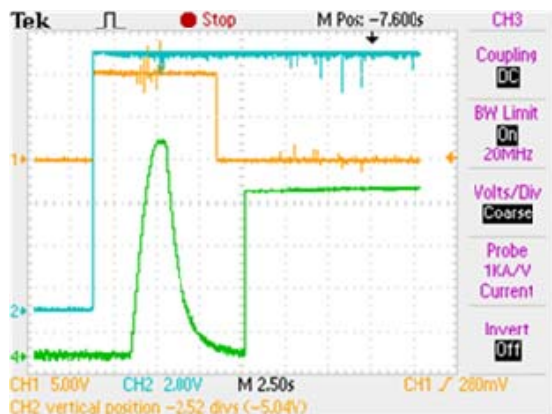
Na rysunku 4 pokazano schemat ideowy pokazujący miejsca pomiaru wybranych wielkości podczas badań na stanowisku. Mierzono wielkości elektryczne, przewidziane do ciągłej rejestracji podczas każdej próby badawczej. Wskaźnikami zmiennych stanów postulowanych były, m. in.: $(U(t), I(t), P(t), Q(t), E(t))$.



Rys.4. Schemat umiejscowienia punktów pomiarowych [opracowanie własne]

Prezentacja wybranych wyników

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano szereg informacji oraz odpowiedzi na pytanie problemowe. Na stanowisku badawczym (rys 3 i 4) zaplanowano badania procesu ładowania dla różnych początkowych poziomów naładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych (Nissan Leaf) podłączonych do ładowarki DC ze złączem CHAdeMO. Przewidziano ładowanie ciągłe i sekwencyjne, w których wskaźnik k był relacją ($k=t_{ij}/t_{pi}$) między czasem ładowania (t_{ij}) i przerwy (t_{pi}). Wykonano kilkadziesiąt prób badawczych. Oprócz parametrów elektrycznych rejestrowano również zmiany logiczne sygnałów używanych w komunikacji (CAN) między sterownikiem pojazdów a ładowarką. Należy podkreślić, że rolę nadrzędną w tej komunikacji pełni sterownik pojazdu i to on decyduje o rozpoczęciu i zakończeniu procesu ładowania na uzgodnionych warunkach.



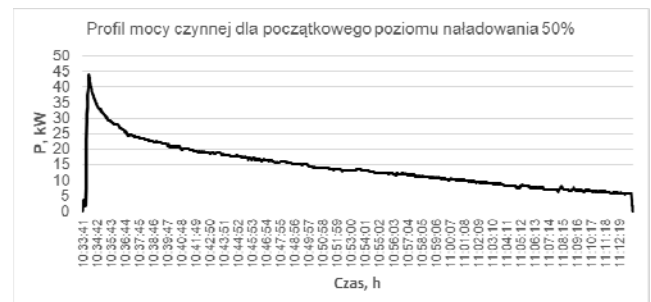
Rys.5. Przebiegi logiczne w komunikacji CAN w chwili uruchomienia procesu ładowania pojazdu elektrycznego; CH1 - charging sequence signal 1, CH2 - charging sequence signal 2, CH4 - napięcie na zaciskach wyjściowych obwodu mocy ładowarki (skala :100 V/div) [opracowanie własne]

Na rysunku 5 pokazano przebiegi poszczególnych sygnałów komunikacji CAN na etapie uzgodnień między ładowarką i sterownikiem pojazdu przed rozpoczęciem procesu ładowania. Po wydaniu polecenia rozpoczęcia ładowania i wymianie informacji pomiędzy stacją ładowania a pojazdem następuje podanie napięcia probierczego przy odłączonej baterii ładowanej celem sprawdzenia stanu izolacji [6].



Rys.6. Przebieg poboru mocy po stronie AC podczas ładowania pojazdu elektrycznego dla początkowego poziomu naładowania akumulatorów 6% [opracowanie własne]

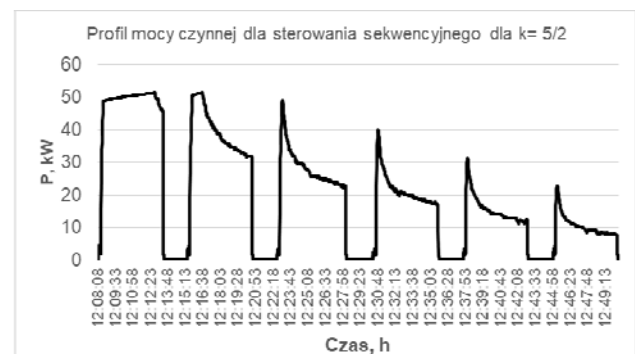
Na rysunku 6 pokazano przykładowy przebieg profilu mocy czynnej pobieranej przez ładowarkę (AC) podczas procesu ładowania akumulatora pojazdu elektrycznego (Leaf) dla początkowego stanu naładowania akumulatora 6%.



Rys.7. Przebieg poboru mocy po stronie AC podczas ładowania pojazdu elektrycznego dla początkowego poziomu naładowania akumulatorów 50% [opracowanie własne]

Na rysunku 7 pokazano przykładowy przebieg profilu mocy czynnej pobieranej przez ładowarkę (AC) podczas procesu ładowania akumulatora tego samego pojazdu elektrycznego (LEAF) dla początkowego stanu naładowania akumulatora na poziomie 50%.

Zarejestrowany w trakcie badań profil zmienności natężenia prądu po stronie DC wykazuje początkowe wartości prądu ładowania na poziomie 120 A, przy wartości napięcia DC blisko 400 V.



Rys. 8. Przebieg poboru mocy po stronie AC podczas ładowania pojazdu elektrycznego dla sekwencyjnego sterowania $t_{ij} = 5$ minut, $t_{pi} = 2$ minuty [opracowanie własne]

Zaplanowano i wykonano również szereg prób badawczych dla sekwencyjnego sposobu ładowania akumulatora pojazdu elektrycznego. Przeprowadzono je dla różnych czasów trwania ładowania t_{lj} i różnych czasów przerw t_{pj} pomiędzy kolejnym ładowaniem. Wykazano, że każdorazowe włączenie ładowania powoduje istotny wzrost wartości pobieranej mocy (rys. 8), która następnie w funkcji czasu systematycznie opada. Skutkiem każdorazowych wzrostów poboru mocy w sekwencyjnym sposobie ładowania jest zwiększenie zużycia energii elektrycznej w stosunku do sposobu ładowania ciągłego.

Na rysunku 8 pokazano przykładowy przebieg profilu mocy czynnej pobieranej przez ładowarkę (AC) podczas procesu ładowania akumulatora pojazdu elektrycznego (LEAF) w sposób sekwencyjny dla przypadku, gdy czas ładowania wynosił 5 minut, a czas przerwy 2 minuty. Początkowy poziom naładowania akumulatora dla tego przypadku wynosił 7%.

Czas efektywnego ładowania pojazdu w trybie ciągłym t_{ic} nie zależy od układu sterowania ładowarki. O czasie efektywnego ładowania decyduje system nadzoru ładowania znajdujący się w pojeździe. Przeprowadzone próby sekwencyjnego ładowania wykazują związek z efektywnością tego procesu. Dla wszystkich prób sekwencyjnego ładowania zarejestrowano zmienność wartości pozostałych wielkości elektrycznych tj.: mocy czynnej, biernej, pozornej, współczynnika mocy, wskaźnika zawartości harmonicznych THD, sprawności przetwarzania i inne.

W tabeli 1 zestawiono dane pomiarowe i wartości wskaźnika efektywnościowego uzyskane podczas wykonanych prób ładowania w trybie ciągłym dla różnego poziomu rozładowania baterii samochodów.

Dla każdej próby badawczej ładowania realizowanego w trybie ciągłym, proces ładowania zatrzymuje się automatycznie. Dla dwóch pierwszych prób po zatrzymaniu procesu ładowania uzyskano podobny poziom stanu naładowania akumulatorów pojazdów tj. dla 1 pojazdu proces zatrzymał się przy 91%, a dla pojazdu 2 przy 89%. Łączny czas trwania ładowania t_{ic} dla obu przypadków był zbliżony i wyniósł w zaokrągleniu odpowiednio 40 minut i 38 minut. Dla trzeciej i czwartej próby odpowiednio 43 minuty i 30 minut.

Tabela 1. Przykładowe wskaźniki oceny efektywności procesu ładowania [opracowanie własne]

Pojazd	Naładowanie		Czas całkowity t_{ic} minuty	Ilość energii E_{we} kWh	Ilość energii E_{wy} kWh	Sprawność η -
	początek	koniec				
	%	%				
1	50	91	40	9,2	8	0,87
2	50	89	38	9,4	8	0,85
1	6	90	43	14,7	13	0,88
2	6	87	30	14,4	13	0,90

Dla rozwoju elektromobilności ważne jest ograniczenie emisyjności źródeł energii elektrycznej, z których zasilane są ładowarki pojazdów elektrycznych. Rozwój polityki klimatycznej i energetycznej wg Komisji Europejskiej UE zmierza do wprowadzania niskich limitów emisji CO₂ z mikсів energetycznych źródeł wytwórczych energii elektrycznej krajowych systemów elektroenergetycznych członków UE. Aktualny wymagany limit emisyjności CO₂ dla mikсів energetycznych jest ustalony na poziomie 550 gCO₂/kWh. W tabeli 2 zestawiono dane emisyjności CO₂ dla wybranych krajów UE i technologii wytwarzania energii. Z danych tabeli 2 wynika, że ograniczenie emisyjności w sektorze wytwarzania (miks energetyczny) można uzyskać poprzez zwiększenie udziału OZE, gazu, atomu i zmniejszenie udziału węgla.

Tabela 2. Zestawienie emisyjności krajowych mikсів energetycznych i wybranych technologii wytwarzania energii w gCO₂/kWh i w gCO₂/km [opracowanie własne]

Lp.	Rodzaj źródła energii	Emisyjność	
		CO ₂	CO ₂
		gCO ₂ /kWh	gCO ₂ /km
1	Miks energetyczny - Niemcy	570	114
2	Miks energetyczny - Chiny	712	140
3	Miks energetyczny - Polska	755	151
4	Miks energetyczny - Norwegia	30	6
5	Miks energetyczny - Szwecja	70	14
6	Miks energetyczny - Francja	100	20
7	Elektrownie wiatrowe Offshore	4,7	0,9
8	Biogazownie	27	5,4
9	Elektrownie fotowoltaiczne	16	3,2
10	Pojazdy z silnikiem benzynowy	316	120
11	Pojazdy z silnikiem Diesla	291	105
12	Pojazdy z napędem hybrydowym	135 - 190	50 - 70

Podsumowanie

Charakter zmienności wartości mocy elektrycznej pobieranej przez ładowarkę dla sekwencyjnego ładowania magazynu energii w samochodzie jest istotnie różny od ładowania ciągłego. Liczba cykli ładowania podczas sekwencyjnego ładowania ma wpływ na większe zużycie energii ze źródła zasilania.

Im mniej jest przerw (zakłóceń mierzalnych) w procesie ładowania tym mniejsze jest zużycie energii, a sprawność η procesu ładowania osiąga najwyższą wartość. Zmiany sprawności η przetwarzania energii prądu przemiennego na energię prądu stałego ładowania pojazdu dla różnych wskaźników k przy sekwencyjnym ładowaniu osiągają wartości z przedziału od 85% do 93%. Uzyskane rezultaty pozwalają na szerszą analizę: jakości energii, udziału energii biernej, pojawiających się zakłóceń, a także innych parametrów związanych z jakością energii elektrycznej w relacji: ładowarka-zasilanie z sieci elektroenergetycznej.

Ważnym wnioskiem analizy w kontekście ekologicznym jest potrzeba zwiększenia udziału energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych wykorzystywanej w procesie ładowania pojazdów elektrycznych, aby poprawić efekt ekologiczny związany z eksploatacją pojazdów elektrycznych.

Autorzy: dr inż. Kazimierz Bieliński, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Instytut Inżynierii Elektrycznej, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, E-mail: Kazimierz.Bieliński@utp.edu.pl; mgr inż. Paweł Młodzikowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: pawel.mlodzikowski@e.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Lambert F., CHAdeMO is pushing for faster electric vehicle charging with new 400 kW protocol, <http://electrek.co/>, dostęp 2019-06-25.
- [2] IMAZU T., KAMISHIMA U., CHAdeMOTechnical WGMeeting, Stuttgart, 11 October 2017.
- [3] CHAdeMO Organization, <https://www.chademo.com/chademo-releases-the-latest-version-of-the-protocol-enabling-up-to-400kw/>, dostęp 2019-06-25.
- [4] Flizikowski J., Bieliński K., Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization, Wyd. IGI GLOBAL USA, 2013.
- [5] Aneqawa T., Safety design of CHAdeMO Quick Charging System, World Electric Vehicle Journal Vol. 4 (2010).
- [6] PN-EN 61851- 23 System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych - Część 23: Stacja ładowania pojazdów elektrycznych prądu stałego.