

Radosław PIĄSTKA*, Jarosław JAJCZYK*, Karol BEDNAREK*

CHARAKTERYSTYKA PROCESU KOMUNIKACJI PODCZAS ŁADOWANIA BATERII POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

W artykule przedstawiono metody ładowania baterii w pojazdach elektrycznych. Omówiono ładowanie przewodowe typu Plug-in, ładowanie z wykorzystaniem pantografu oraz ładowanie bezprzewodowe. W kolejnej części pracy przedstawiono architekturę systemu ładowania baterii pojazdu elektrycznego oraz scharakteryzowano sposób komunikacji pojazdu elektrycznego ze stacją ładującą. Szczególną uwagę zwrócono na omówienie zastosowania przewodu CP. Scharakteryzowano sygnał przesyłany przewodem CP począwszy od początku procesu ładowania (umieszczenia wtyczki kabla do ładowania w gnieździe pojazdu) poprzez proces ładowania aż do jego zakończenia. W analizie uwzględniono obowiązujące normy.

SŁOWA KLUCZOWE: ładowanie pojazdów elektrycznych, baterie w pojazdach elektrycznych, eksploatacja pojazdów elektrycznych.

1. WPROWADZENIE

Samochody spalinowe stanowią zdecydowaną większość eksploatowanych i sprzedawanych pojazdów. W dużych skupiskach miejskich znacząca ilość zanieczyszczeń, które mają negatywny wpływ na środowisko, jest wytwarzana przez pojazdy tego typu. Z tego względu niektóre miasta ograniczają ruch dla pojazdów spalinowych niespełniających odpowiednich norm [1]. Sytuacja taka sprzyja wzrostowi zapotrzebowania na zeroemisyjne pojazdy elektryczne.

Polityka transportowa wielu państw skupia się na coraz większej obecności pojazdów elektrycznych. Wraz ze wzrostem liczby pojazdów elektrycznych rozwijana musi być infrastruktura stacji ładowania baterii pojazdów tego typu (stacji ładujących musi być coraz więcej). Komisja Europejska zaleca średnio jedną stację ładowania prądem przemiennym (AC) na każde dziesięć zarejestrowanych pojazdów elektrycznych oraz jedną stację ładowania prądem stałym (DC) na każde sto pojazdów [2]. Istotnym problemem nadal jest czas ładowania baterii, dlatego rozwój powinien dotyczyć także mocy, z jaką może odbywać się ładowanie.

* Politechnika Poznańska

Zaletą wykorzystania silnika elektrycznego do napędu pojazdu jest duży moment obrotowy dostępny w całym zakresie prędkości. Atutem jest brak konieczności stosowania sprzęgła oraz skrzyni biegów ze zmiennym przełożeniem. Dodatkowo silnik elektryczny pozwala na rekuperację energii podczas hamowania. Sprawność takiego silnika wynosi około 90% w porównaniu do około 30% silnika spalinowego. Do zalet należy zaliczyć także komfort jazdy, dzięki brakowi hałasu i wibracji pochodzących od silnika spalinowego [3].

Samochody elektryczne nie są urządzeniami, które zaczęto używać w ostatnich czasach. Ich historia sięga lat 30. XIX wieku. W latach 1832–1839 powstało kilka prototypów pojazdów elektrycznych. Jednak to pojazdy napędzane silnikiem spalinowym zyskiwały większą popularność. Największą wadą samochodów elektrycznych był ograniczony zasięg. Ówczesne technologie nie umożliwiały zbudowania baterii pozwalających na znaczne jego wydłużenie, a stacji ładowania lub wymiany baterii nie budowano w takiej liczbie jak stacji paliwowych.

Powrót do koncepcji samochodów elektrycznych nastąpił w 2008. Wtedy firma Tesla zaprezentowała model Roadster, który miał świetne osiągi oraz zasięg wynoszący ponad 300 km na jednym ładowaniu. Od tego czasu można zauważyć stały wzrost sprzedaży pojazdów elektrycznych. Dotyczy to zarówno samochodów osobowych, jak i środków transportu publicznego, takich jak np. autobusy miejskie. Większość producentów zapowiada produkcję coraz większej liczby modeli pojazdów elektrycznych a nawet całkowite wyeliminowanie ze swojej oferty pojazdów napędzanych silnikiem spalinowym.

2. METODY ŁADOWANIA BATERII W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH

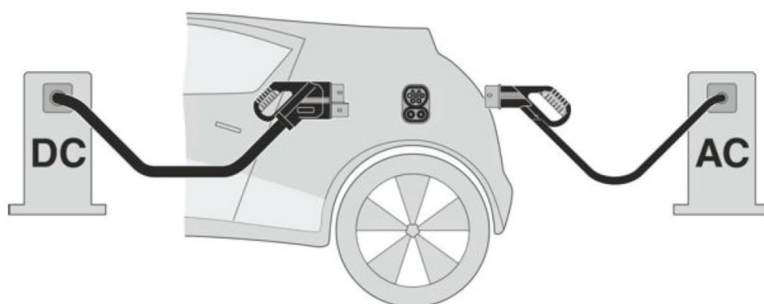
2.1. Ładowanie Plug-In

Ładowanie Plug-In jest najpopularniejszym rozwiązaniem ładowania baterii pojazdów elektrycznych. Wadą tego sposobu ładowania jest konieczność fizycznego, najczęściej manualnego, podłączenia przewodów ładujących do pojazdu. Ładowanie wtykowe może być realizowane prądem przemiennym oraz stałym. Do obu metod wykorzystywany jest inny wtyk stacji ładowania (rys. 1).

W przypadku ładowania prądem przemiennym konieczna jest jego zamiana na prąd stały, ponieważ baterie ładowane są zawsze prądem stałym. Odbywa się to przy użyciu ładowarki pokładowej instalowanej w pojeździe.

Ładowanie baterii trakcyjnych prądem stałym z wykorzystaniem zewnętrznej stacji ładowania pozwala na użycie większej mocy niż w przypadku ładowarki pokładowej. Oznacza to krótszy czas ładowania baterii pojazdu elektrycznego, który zależy od pojemności baterii, poziomu jej naładowania, dopuszczalnej mocy stacji ładowania i zastosowanego do ładowania kabla.

Dopuszczalna moc, jaką można przesłać kablem do ładowania oraz z jaką można ładować pojazd jest automatycznie wykrywana przez stację ładowania.



Rys. 1. Wizualizacja ładowania Plug-In CP [8]

Proces ładowania pojazdów elektrycznych jest opisany w normach IEC 61851 oraz IEC 62196. Na podstawie normy IEC 61851 rozróżnia się cztery tryby ładowania. Poszczególne tryby definiują maksymalny prąd i napięcie ładowania, stopień zabezpieczeń a także rodzaj prądu [17, 18].

2.2. Ładowanie za pomocą pantografu

Ładowarki pantografowe są wykorzystywane najczęściej do ładowania baterii elektrycznych autobusów miejskich. Umożliwiają szybkie ładowanie baterii, z mocą większą niż w przypadku ładowania wtykowego. Ładowanie za pomocą pantografu może być realizowane na przystankach, na pętlach autobusowych oraz w zajezdniach. Pantograf automatycznie łączy pojazd ze stacją ładującą. Stosowane są dwa rodzaje konstrukcji ładowarek pantografowych. Pantograf może być zamontowany na dachu pojazdu lub na infrastrukturze stacji ładującej i opuszczany na dach pojazdu (pantograf odwrócony) (rys. 2). Pantograf odwrócony przyłączany jest do szyn zamontowanych na dachu. Szyny służą do przekazywania energii elektrycznej ze stacji ładowania do pojazdu.

a)



b)

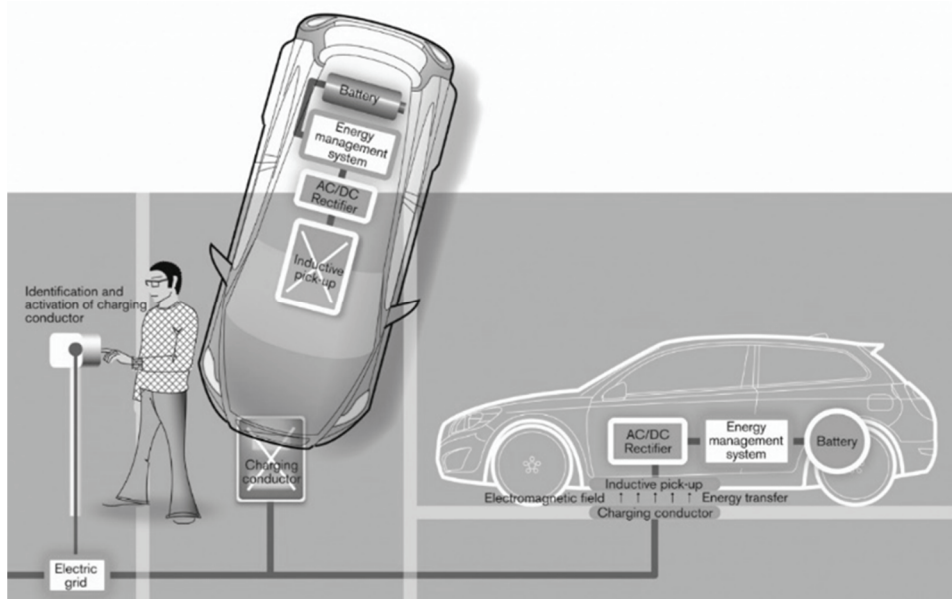


Rys. 2. Konstrukcje ładowarek pantografowych: a) pantograf odwrócony [14],
b) pantograf umieszczony na dachu autobusu [13]

2.3. Ładowanie bezprzewodowe

Bezprzewodowe ładowanie indukcyjne charakteryzuje się brakiem konieczności bezpośredniego połączenia galwanicznego stacji ładowania z pojazdem, czyli brakiem styków roboczych, które ulegają zużyciu podczas pracy. Stacja ładowania wykorzystująca to rozwiązanie nie zaburza architektury w miejscu jej położenia [4].

Układ ładowania składa się z dwóch członów. W nawierzchni jezdni umiejscowione jest uzwojenie pierwotne stacji ładującej. Napięcie o wysokiej częstotliwości zasilające uzwojenie pierwotne generowane jest w przekształtniku mocy. Uzwojenie wtórne znajduje się w podłodze pojazdu elektrycznego. W celu osiągnięcia jak największej sprawności bezprzewodowego przesyłu energii, uzwojenie wtórne jest opuszczane podczas ładowania. Sprawność w takich układach przekracza 90%. Ta metoda umożliwiła ładowanie baterii trakcyjnych w trakcie postoju na przystankach lub na specjalnych miejscach parkingowych [5].



Rys.3. Schemat indukcyjnego systemu ładowania baterii samochodów elektrycznych [15]

Wariantem ładowania bezprzewodowego jest wykorzystanie zjawiska rezonansu elektrycznego w obwodzie sprzężonych magnetycznie cewek pierwotnej i wtórnej. Zasada działania tego rozwiązania polega na zasilaniu uzwojenia pierwotnego prądem o takiej częstotliwości, aby wystąpił rezonans elektryczny. Za-

letą tej metody jest możliwość zwiększenia odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem energii. Nie jest również wymagana tak duża, jak w przypadku ładowania indukcyjnego, precyzja pozycjonowania cewek nadawczej i odbiorczej [6].

2.4. Ładowanie poprzez wymianę baterii

Na rynku pojazdów elektrycznych istnieją rozwiązania polegające na wymianie rozładowanych baterii. Wadą tej metody jest przede wszystkim duży koszt budowy stacji wymiany baterii oraz przestrzeń niezbędna do jej wybudowania. Zaletą jest czas wymiany baterii, który wynosi około 2 minuty. Dodatkowo ten sposób może pomóc wydłużyć czas życia baterii, dzięki profesjonalnej ich obsłudze. W Stanach Zjednoczonych w Kalifornii zbudowana została stacja, w której właściciele samochodów marki Tesla mogą wymienić rozładowaną baterię na naładowaną. W przyszłości stacja tego typu ma zostać zrobotyzowana, co wraz ze zapowiadanymi zmianami konstrukcyjnymi samochodów pozwoli wymienić baterię w jedną minutę. W Tokio także została zbudowana stacja wymiany baterii pojazdów elektrycznych. W testach użytkowania tej metody ładowania wzięła udział korporacja taksówkowa. Podobne rozwiązanie istnieje w Chinach, gdzie wybudowano demonstracyjną stację wymiany baterii [7].

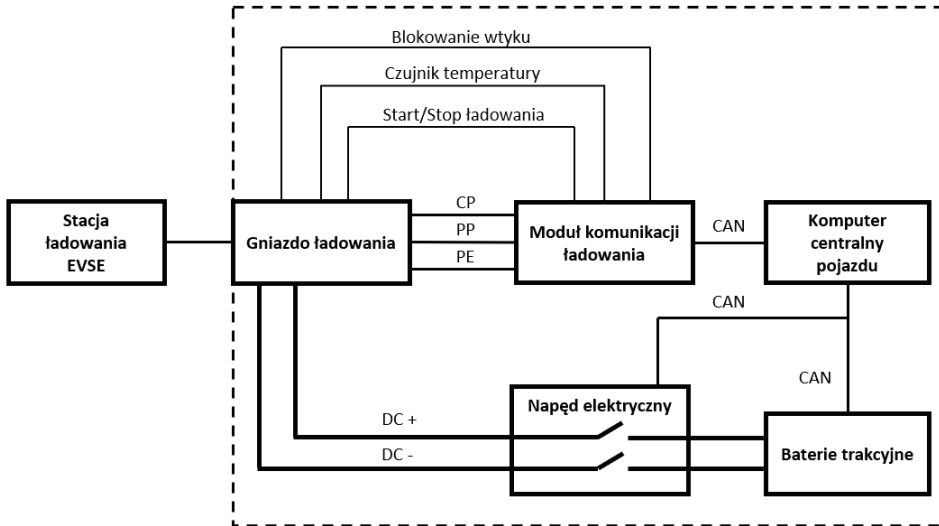
3. ARCHITEKTURA SYSTEMU ŁADOWANIA BATERII POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

Podczas sesji ładowania baterii układy zarządzające ładowaniem pojazdu elektrycznego komunikują się ze stacją ładowania. Informacje pomiędzy pojazdem a ładowarką przesyła moduł komunikacji ładowania. Komunikacja odbywa się za pomocą protokołu PLC (Power Line Communication). Moduł komunikacji ładowania musi wymieniać informacje także z komputerem centralnym pojazdu. Komunikacja komputera z modułem odbywa się przewodowo, za pomocą magistrali CAN.

W trakcie sesji ładowania z komputerem centralnym za pomocą magistrali CAN komunikuje się również system BMS (Battery Management System). Odpowiada on za utrzymanie ogniw bateryjnych w wyznaczonych przez producenta limitach temperatur i napięć. Pomiar napięcia i temperatury ogniw wykonywany jest przez specjalne moduły pomiarowe zamontowane w bateriach. Ogniwa mogą pracować w ściśle określonym zakresie napięcia podanym przez producenta. Praca w tym zakresie pozwala zapewnić bezpieczeństwo eksploatacji i trwałość akumulatora.

W procesie ładowania baterii uczestniczy również sterownik napędu elektrycznego. Przekazuje on informacje pomiędzy napędem elektrycznym a komputerem pojazdu. Komunikacja odbywa się przy użyciu magistrali CAN. Nadzorowane przez sterownik są parametry dynamiczne baterii oraz pobierany przez nie prąd.

Na rysunku 4 przedstawiono komponenty wchodzące w skład systemu do ładowania baterii pojazdu elektrycznego.



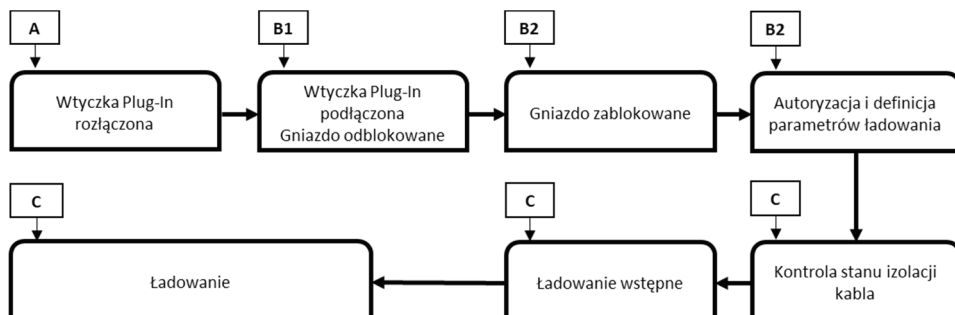
Rys. 4. Architektura systemu ładowania baterii trakcyjnych

Obecnie w krajach europejskich najczęściej stosowane przez producentów pojazdów elektrycznych jest gniazdo ładowania w standardzie CCS Combo 2. Posiada ono styki związane z przesyłaniem energii oraz styki komunikacyjne. Podczas ładowania baterii pojazdu wtyczka kabla jest blokowana przez siłownik blokady w gnieździe ładującym. Uniemożliwia to odłączenie wtyczki podczas ładowania. W celu zapewnienia bezpieczeństwa podczas ładowania, gniazdo ładujące wyposażone jest w czujniki umożliwiające pomiar temperatury styków roboczych. Po detekcji przez sterownik ładowania przekroczenia dopuszczalnej wartości temperatury następuje ograniczenie prądu ładowania lub całkowite przerwanie procesu ładowania.

4. SEKWENCJA SESJI ŁADOWANIA BATERII TRAKCYJNYCH

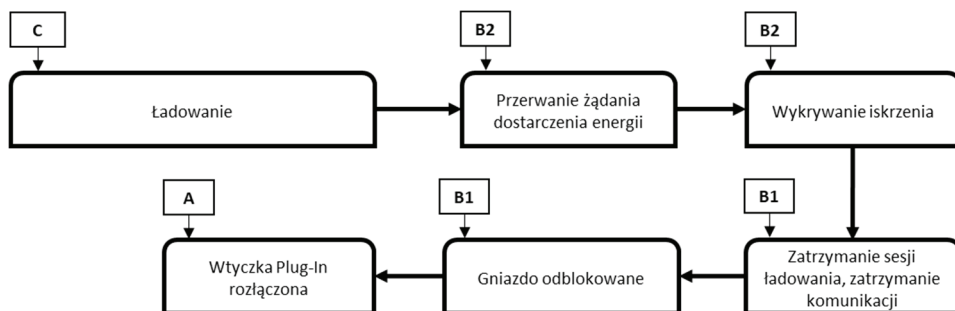
Ładowanie baterii pojazdu elektrycznego przebiega według określonej sekwencji. Kolejne kroki mogą być wykonane po spełnieniu wcześniejszych warunków. Podczas ładowania prądem stałym sekwencja jest dużo bardziej złożona niż w przypadku ładowania prądem przemiennym. Wynika to z zastosowania zaawansowanych procedur sterujących i zabezpieczających. Na rysunku 5 przedstawiono algorytm rozpoczęcia sesji ładowania, natomiast na rysunku 6 algorytm zakończenia sesji ładowania. Rysunki przedstawiają także zmianę stanów sygnału

CP. Proces ładowania rozpoczyna się po podłączeniu wtyczki stacji ładowania do gniazda pojazdu elektrycznego (sygnał CP przechodzi ze stanu A do B1).



Rys. 5. Algorytm rozpoczęcia procesu ładowania baterii

Po zablokowaniu wtyku ładowania w gnieździe odbywa się autoryzacja pojazdu elektrycznego przez stację (B2). Jest to wymagane do sprawdzenia, czy ładowanie baterii może zostać przeprowadzone. W kolejnej fazie następuje przesłanie do ładowarki parametrów ładowania. Następnie odbywa się fizyczna kontrola stanu izolacji kabla (C). Test zostaje wykonany przez stację ładowania. Potem następuje faza wstępnego ładowania, podczas której napięcie jest stopniowo zwiększane. Po przejściu do kolejnego kroku sekwencji przesyłane jest żądanie dostarczenia pełniej mocy i rozpoczyna się ładowanie baterii trakcyjnych.



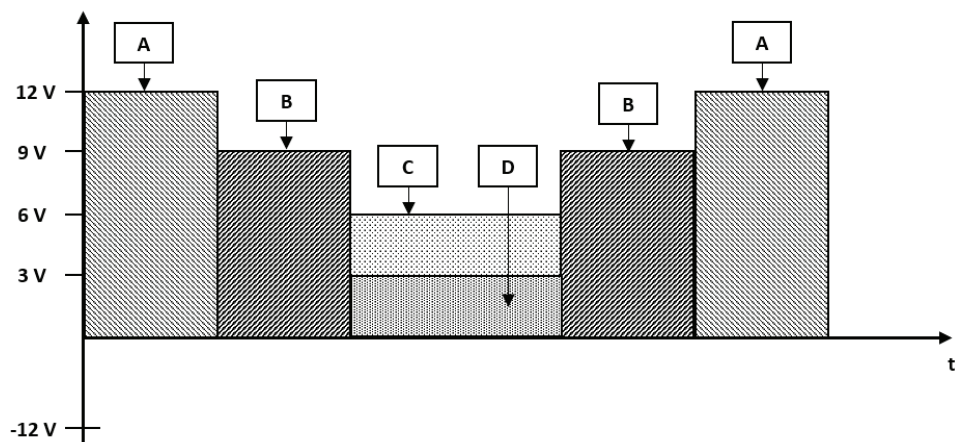
Rys. 6. Algorytm zakończenia procesu ładowania baterii

Po zakończeniu ładowania, przed rozłączeniem przewodu ładującego, automatycznie odbywa się wykrywanie iskrzenia (B2). Następnie, następuje zatrzymanie sesji ładowania a komunikacja zostaje przerwana (B1). Skutkuje to odblokowaniem gniazda (B1) i wtyczka kabla stacji ładowania znajdującego się w gnieździe pojazdu może zostać rozłączona (A).

5. ANALIZA PROCESU KOMUNIKACJI PODCZAS ŁADOWANIA BATERII POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

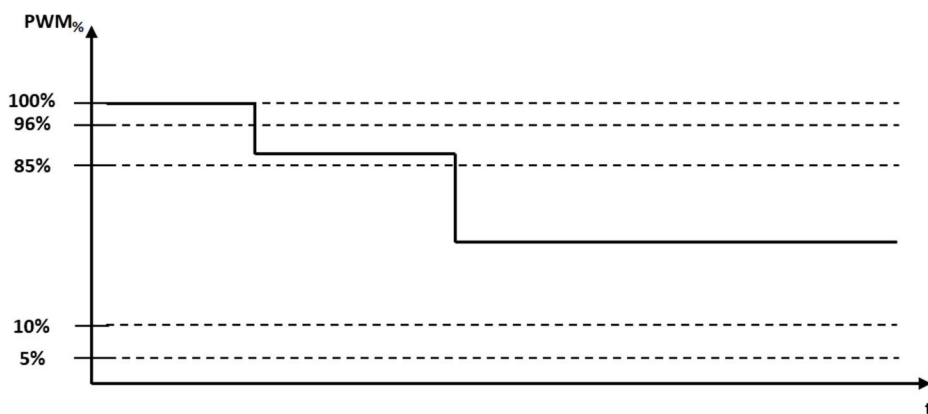
W standardzie CCS Combo 2 do przekazywania informacji pomiędzy stacją ładowania a modulem komunikacji ładowania wykorzystywane są trzy styki sterujące, znajdujące się w złączu ładującym. Funkcję sterującą realizują styki PP (Proximity Plug) i CP (Control Pilot) oraz styk PE pełniący rolę ochronną dla zasilania i rolę uziemienia dla styków sterujących. Sterowanie odbywa się poprzez komunikację linią energetyczną (PLC).

Do przekazywania informacji podczas komunikacji i przesyłania instrukcji sterujących wykorzystuje się przewód sterujący CP, którym przesyłany jest sygnał o zmiennej amplitudzie i współczynniku wypełnienia (modulacja szerokości impulsu – PWM). Częstotliwość sygnału jest stała i wynosi 1 kHz. Podczas procesu ładowania następuje ustalona sekwencja zmian amplitudy i współczynnika wypełnienia sygnału. Kolejnym stanom w sekwencji odpowiada odpowiednia wartość napięcia (rys. 7). Stan D (3 V) oznacza konieczność chłodzenia baterii podczas ładowania.



Rys. 7. Wartości napięć zawartych w sygnale CP [19]

Szerokość impulsu sygnału PWM odpowiada dopuszczalnej wartości prądu ładowania (rys. 8). Wartości te zostały zdefiniowane w normie IEC 61581-1. Zgodnie z normą istnieją trzy predefiniowane wartości wypełnienia impulsu sygnału w przewodzie CP. Są to wartości wyrażone w procentach (PWM_%): 0% dla stanu F, 100% dla stanów A1, B1, C1, D1 oraz 5% dla komunikacji cyfrowej. Współczynnik wypełnienia w przedziale od 10% do 96% odpowiada wartością prądu ładowania w zakresie od 6 A do 80 A.



Rys. 8. Szerokość impulsu zawarta w sygnale CP [19]

W zakresie od 10% do 85% wartości procentowe przeliczane są na wartości prądu w amperach zgodnie z zależnością $PWM\% \cdot 0,6 \text{ A}$, natomiast w zakresie od 85% do 96% zgodnie z zależnością $(PWM\% - 64\%) \cdot 2,5 \text{ A}$. Współczynnik modulacji PWM przeliczony na wartość prądu w amperach oznacza maksymalny prąd, jaki może zostać dostarczony podczas procesu ładowania pojazdu.

W początkowej fazie, gdy wtyk stacji ładowania nie jest podłączony, przewód sterujący CP znajduje się w stanie A (nie ma modulacji szerokości impulsu PWM, ponadto napięcie referencyjne pomiędzy przewodem CP a uziemieniem wynosi 12 V). Stan B1 zostaje osiągnięty po podłączeniu wtyku stacji ładowania do pojazdu. Napięcie pomiędzy przewodem CP a uziemieniem spada do 9 V. Po przejściu do stanu B2 w przypadku ładowania prądem DC wypełnienie sygnału PWM wynosi 5%, a amplituda sygnału się nie zmienia. Wtyk stacji ładowania zostaje zablokowany w gnieździe. Po przejściu do stanu C pojazd jest gotowy do ładowania baterii trakcyjnych. Napięcie pomiędzy przewodem CP a uziemieniem wynosi 6 V. Stan D podczas którego napięcie wynosi 3 V, zarezerwowany jest dla ładowania z chłodzeniem.

Funkcją styku PP jest wykrywanie złącza stacji ładowania w gnieździe pojazdu. Służy on również do określenia dopuszczalnej obciążalności prądowej styku złącza ładującego. Wykorzystany jest do tego rezystor wzorcowy (R_c) zainstalowany w kablu zasilającym. Ustandaryzowane wartości rezystancji opisane w normie IEC 61851-1 determinują dopuszczalny prąd ładowania. W tabeli 1 zestawiono wartości rezystancji rezystora wzorcowego i odpowiadające im obciążalności prądowe [9,10,11,16].

Tabela 1. Zestawienie wartości rezystancji rezystora wzorcowego R_c .

R_c	Zakres tolerancji	Wartość dopuszczalnego prądu roboczego
[Ω]	[Ω]	[A]
–	< 75	Błąd
100	75 ... 150	63 (70)
220	150 ... 330	32
680	330 ... 1000	20
680	1000 ... 2200	13
–	> 2200	0

6. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono metody ładowania baterii w pojazdach elektrycznych. Szczególną uwagę zwrócono na strukturę układów wchodzących w skład systemu ładowania prądem stałym z wykorzystaniem standardu CCS Combo 2. Scharakteryzowano najważniejsze elementy zapewniające poprawność i bezpieczeństwo eksploatacji ładowarki i pojazdu elektrycznego. W drugiej części pracy omówiono algorytm komunikacji stacji ładowania z pojazdem elektrycznym oraz sposób jej realizacji. Zamieszczone informacje pozwalają na zapoznanie się z procedurą procesu ładowania.

Przedstawione w artykule dane o poziomach napięcia i współczynnikach wypełnienia sygnału modulowanego (PWM) występującego w przewodzie CP z jednej strony pozwalają na zapoznanie się z przebiegiem procesu ładowania akumulatorów w pojeździe elektrycznym, z drugiej strony dostarczają informacji, które mogą być przydatne w procesie diagnozowania ewentualnych usterek.

LITERATURA

- [1] Dobrzycki A., Filipiak M., Jajczyk J., Zasilanie układów ładowania akumulatorów autobusów elektrycznych, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering 92 (2017), 25–35.
- [2] Bieliński K., Młodzikowski P., Wybrane wyniki badań przebiegu procesu ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10/2019.
- [3] Fic B., Samochody elektryczne, Wydawnictwo i Handel książkami „KaBe”, Krosno 2019.
- [4] Bi Z., Song L., Kleine R., Chris Ch., Keoleian G.A., Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system, Applied Energy, 146 (2015), 11–19.
- [5] Dobrzycki A., Filipiak M., Jajczyk J., Zasilanie układów ładowania akumulatorów autobusów elektrycznych, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 92 (2017), 25–35.

- [6] Merkisz J., Pielecha I., Układy elektryczne pojazdów hybrydowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
- [7] Zajkowski K., Seroka K., Przegląd możliwych sposobów ładowania akumulatorów w pojazdach z napędem elektrycznym, *Autobusy*, (7–8) 2017.
- [8] <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/pl>, [dostęp 27.12.2019].
- [9] Design Guide for Combined Charging System, dostępne na http://tesla.o.auroraobjects.eu/Design_Guide_Combined_Charging_System_V3_1_1.pdf, [dostęp 03.01.2020].
- [10] <https://elhu.pl/charging.html>, [dostęp 03.01.2020].
- [11] Kralewski A., Komunikacja pojazdów elektrycznych z EVSE, na przykładzie sterownika Phoenix Contact, dostępne na <https://evertiq.pl/nanews/27444>, [dostęp 03.01.2020].
- [12] Nota katalogowa firmy Phoenix Contact, [dostęp 18.12.2019].
- [13] <https://sozosfera.pl/zielona-energia/nowe-autobusy-elektryczne-w-krakowie>, [dostęp 21.02.2020].
- [14] <https://nowiny24.pl/elektrobusy-mpk-beda-jezdzyly-w-rzeszowie-na-razie-tylko-w-godzinach-szczytu/ga/13685294/zd/32390154>, [dostęp 21.02.2020].
- [15] <https://gazeo.pl/samochody-hybrydowe-elektryczne/samochody-elektryczne/Bezprzewodowe-ladowanie-wg-Volvo,artykul,7284.html>, [dostęp 21.02.2020].
- [16] Lipiński T., Badanie bezpieczeństwa stacji i przewodów ładowania pojazdów elektrycznych (EVSE) cz. II, dostępne na <https://www.merserwis.pl/m-blog/item/325-badanie-stacji-evse-elektromobilnosc.html>, [dostęp 23.02.2020].
- [17] <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/pl>, [dostęp 29.02.2020].
- [18] <https://www.udt.gov.pl/systemy-ladowania>, [dostęp 29.02.2020].
- [19] E-Mobility – It’s all about the Charging, dostępne na https://assets.vector.com/cms/content/events/2019/VU/VU_C19_Files/021_Workshop_E-Mobility.pdf, [dostęp 29.02.2020].

CHARACTERISTICS OF THE COMMUNICATION PROCESS WHEN CHARGING AN ELECTRIC VEHICLE BATTERY

The article presents the methods of charging batteries in electric vehicles. Plug-in wired charging, pantograph charging and wireless charging are discussed. The next part of the work presents the architecture of the electric vehicle battery charging system and characterizes the way the electric vehicle communicates with the charging station. Particular attention was paid to discussing the use of the CP cable. The signal sent via the CP cable is characterized from the beginning of the charging process (placing the charging cable plug in the vehicle socket) through the charging process to its end. The analysis included existing standards.

(Received: 17.02.2020, revised: 03.04.2020)