

Elektromobilność – integracja pojazdów elektrycznych z infrastrukturą sieci elektroenergetycznej

Streszczenie. W pracy przedstawiono pogłębioną, techniczno-ekonomiczną analizę integracji pojazdów elektrycznych z rozwijającym się systemem elektroenergetycznym zawierającym coraz więcej odnawialnych źródeł energii. Omówione zostały podzespoły pojazdów elektrycznych i ich optymalna współpraca również z infrastrukturą stacji ładowania. Opisano wymagania i możliwości techniczne jak i protokoły komunikacyjne pozwalające na optymalną implementację procesu ładowania i rozładowania pojedynczych bądź zgrupowanych we floty pojazdów. Wyszczególnione i scharakteryzowane zostały aktualne projekty badawcze prowadzone na terenie Europy z zakresu V4G (Vehicles for Grid) ze szczególnym uwzględnieniem zalet i wad istniejących i planowanych rozwiązań systemowych.

Abstract. The paper deals with a technical and economic analyze related to the integration electric vehicles in to the today and future power systems with renewable energy sources. The electrical vehicle components as well as the optimal interactions also with the charging station infrastructure are discussed. Technical requirements and communication protocols that allow for the proper charging and discharging processes implementation of individual or grouped vehicle fleets are described in detail. Current research projects carried out in Europe in the field of V4G (Vehicles for Grid) are listed, regarding to the advantages and disadvantages of existing and further systems.

(Electromobility - integration of electric vehicles with the power grid infrastructure).

Słowa kluczowe: elektromobilność, stacje ładowania pojazdów, V2G, odnawialne źródła energii, smart grid, magazyny energii,

Keywords: e-mobility, charging infrastructures, V2G, RES, smart grid, energy storages,

Wstęp

Transformację energetyczną ostatnich lat, której poddaje się również system elektroenergetyczny, cechuje przede wszystkim realizowana z powodzeniem integracja znacznej liczby odnawialnych źródeł energii do sieci. Źródła te są w zasadzie instalowane na poziomie sieci dystrybucyjnej, co wiąże się z jej zwiększoną eksploatacją wynikającą ze znaczących dwukierunkowych przepływów mocy [1]. Główny wpływ na ten nowy stan mają, szczególnie w sieciach niskiego napięcia, systemy fotowoltaiczne, których udział w wytworzonej energii wzrasta z roku na rok [2]. W słoneczne południe ilość energii wyprodukowanej w lokalnych systemach PV przewyższa często zapotrzebowanie na nią w danej sekcji sieci. W takim przypadku mogą występować przeciążenia, dla których kable, transformatory, rozdzielnice oraz automatyka zabezpieczeniowa nie były w przeszłości zaprojektowane. Sytuacje te mogą również przyczynić się do lokalnego występowania wahań napięć oraz niesymetrii faz, które mogą skutkować wzrostem strat sieciowych, obniżeniem jakości energii i w efekcie również niezawodności zasilania [2].

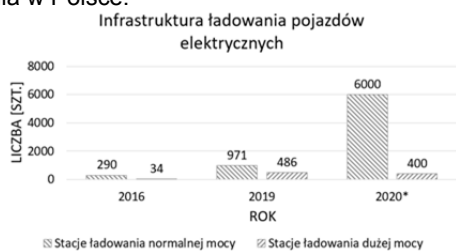
W wyniku zmian klimatycznych [3], i oczekiwanych w związku z tym restrykcji w użytkowania samochodów spalinowych, w najbliższych latach spodziewany jest znaczny wzrost liczby pojazdów elektrycznych [3] ładowanych głównie z sieci niskiego napięcia. Wynikające z tego procesu dodatkowe, chwilowe i w zasadzie niekontrolowane obciążenia sieci stanowiąc będą główny (ze względu na znaczną moc ładowania pojedynczego pojazdu elektrycznego) lokalny odbiór energii elektrycznej co wiąże się pilną koniecznością uwzględnienia powyższego

wplanowaniu dostaw energii. W zasadzie celowe, a w przyszłości konieczne, będzie inteligentne zarządzanie procesem ładowania elektroaut uwzględniające dotychczasową dopuszczalną obciążalność sieci elektroenergetycznej, zwłaszcza niskiego napięcia. Kontrolowane ładowanie pojazdów elektrycznych stworzy też nowe możliwości, które mogą pozwolić na wykorzystanie pojazdu elektrycznego nie tylko jako środka transportu, ale również, poprzez wykorzystanie jego baterii jako zasobnika energii, do wsparcia w regulacji pracy systemu elektroenergetycznego [4, 5]. Dla celów obliczeniowych powstały modele matematyczne samochodów elektrycznych [6], które pozwalają symulowanie ich wpływu na sieć np. podczas procesu ładowania.

Optymalizacja lokalizacji stacji ładowania w terenie i kontroli procesów ładowania może pomóc w zapewnieniu stabilności napięcia w sieci, właściwej jakości energii oraz zmniejszeniu strat sieciowych [7]. Przekształtniki energoelektroniczne zainstalowane w pojazdach elektrycznych i w stacjach ładowania muszą zostać odpowiednio dostosowane do powyższych zadań [3]. Ponadto konieczne jest opracowanie nowych rozwiązań technologicznych w zakresie osprzętu i oprogramowania, dzięki którym będzie możliwe wdrożenie dwukierunkowego pokładowego systemu ładowania oraz systemu komunikacyjnego, pozwalającego na bezpośrednią integrację pojazdów z systemami wytwarzania energii odnawialnej. Wykorzystanie elektromobilności, jako lokalnego zasilania prowadzić będzie, jak wykazują wyniki licznych studiów i rozwiązań pilotowych [1], do znacznej poprawy efektywności energetycznej i zmniejszenia emisji

CO₂ w sektorze transportu drogowego, co znacznie przyczyni się do ochrony środowiska naturalnego. Rosnące wykorzystanie i rozpowszechnianie pojazdów elektrycznych zasilanych energią odnawialną przy zapewnieniu wykorzystania ich do nowych, wspomnianych wyżej usług sieciowych, pozwoli na znaczne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, pyłu zawieszonego i hałasu środowiskowego, zwłaszcza hałasu ulicznego w aglomeracjach miejskich [8].

Czynnikiem mającym istotny wpływ na rozwój elektromobilności jest liczba punktów ładowania. Wzrost liczby stacji w Polsce z rozróżnieniem dostępnej mocy został przedstawiony na rys. 1 [9]. Wartości liczbowe w roku 2020 wyznaczają planowany wzrost liczby punktów ładowania w Polsce.



Rys.1. Liczba stacji ładowania pojazdów elektrycznych w Polsce [9];

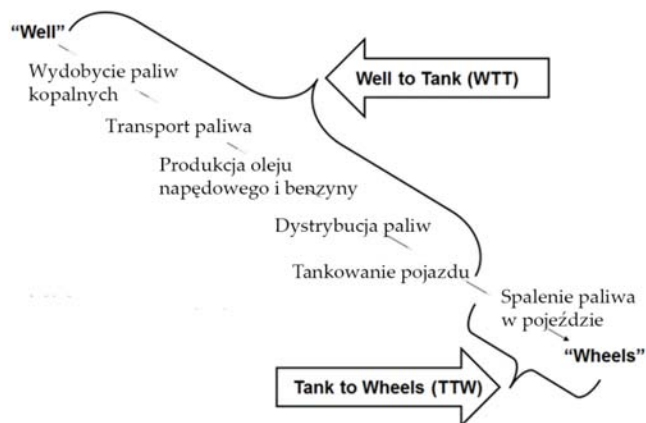
Moc normalna ładowania (3,5 kW); ładowanie dużej mocy (> 50 kW)

Pojazdy elektryczne a efektywności energetyczna i ochrona środowiska

Rynek elektromobilności jest segmentem szybko rozwijającym się w ostatnich latach, który wymaga obecnie kreowania nowych rozwiązań i produktów. Uregulowania na poziomie UE faworyzują już dziś i będą faworyzować jeszcze bardziej w przyszłości napędy elektryczne kosztem silników spalinowych [10].

Na podstawie krzywej Hubberta [11] produkcja paliw kopalnych osiągnęła maksymalny poziom w roku 2004. Od tego momentu przemysł rozpoczął proces przejścia ze starych, wysokoemisyjnych procesów energetycznych na nowe technologie, w przypadku napędu samochodów na silniki elektryczne.

W celu określenia wydajności energetycznej pojazdów, przeprowadza się tzw. analizę wydajności procesu użytkowania pojazdu WTW (well-to-wheel). Analiza ta polega na ocenie wpływu paliw kopalnych na środowisko. Ponadto wykorzystywana jest również do oceny emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia pojazdu. Analiza WTW obejmuje: pozyskiwanie pierwotnych źródeł energii, jego produkcję, magazynowanie i ostatecznie jego zużycie. Proces ten został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat ideowy analizy wydajności procesu użytkowania pojazdu WTW [12]

Z wykorzystaniem tej oceny możliwe jest porównanie konwencjonalnych pojazdów spalinowych i elektroaut. Wyniki takiego porównania zawarte są w tabeli 1

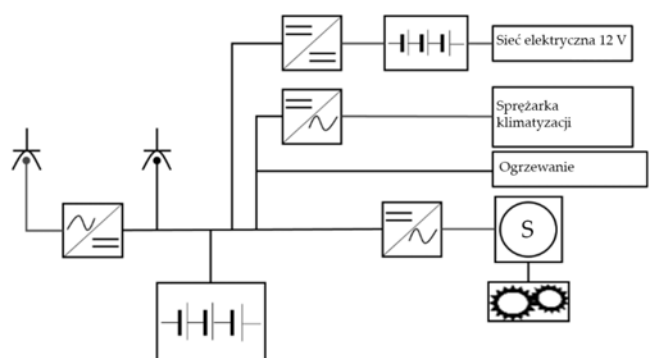
Tabela 1 WTW wskaźniki z uwzględnieniem różnego typu paliw pojazdów [13]

Paliwo	Gazy cieplarniane [gCO ₂ /km]	Oszczędność paliwa [km/l]	Zużycie energii [kJ/km]
Benzyna	296	9,95	3917
Biodiesel	217	11,94	4010
Energia elektryczna z OZE	211	36,01	2633
CNG	252	9,45	3910
Metanol (M90)	291	10,64	4659
Etanol (E85)	227	10,64	6315
H ₂	157	22,88	2435

Z powyższej analizy wynika, że pojazdy z napędem elektrycznym zdecydowanie mniej zanieczyszczają środowisko. Jednocześnie, ze względu na stan technologiczny rozwoju elektromobilności, koszt związany z zakupem i użytkowaniem jest nieznacznie wyższy w porównaniu z kosztem związanym z tradycyjnym pojazdem spalinowym [14]. Czynnikiem ten w decydujący sposób wpływa na rozwój rynku pojazdów elektrycznych.

Komponenty pojazdu elektrycznego

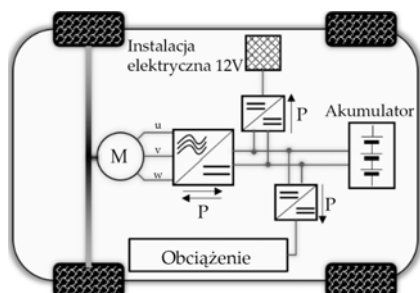
Centralnymi elementami pojazdu elektrycznego są: napęd, akumulator i inne odbiorniki energii. Napęd w postaci silnika elektrycznego (najczęściej trwale wzbudzonej maszyny synchronicznej) jest najbardziej energochłonnym obciążeniem i zazwyczaj posiada własny, oddzielny układ (sieć) zasilania. Akumulator, który jest zasobnikiem energii pojazdu, zasilają odbiorniki na różnych poziomach napięcia poprzez odpowiednio zwymiarowane przetworniki. Odbiorniki o niskim zużyciu energii oraz te, które służą zapewnieniu bezpieczeństwa w trakcie jazdy, takie jak oświetlenie (światła mijania, kierunkowskazy, światła hamowania itp.) są zasilane przez sieć 12 V DC. Ogrzewanie i klimatyzacja sterowane elektrycznie są zasilane wyższym napięciem stałym lub bezpośrednio z akumulatora. Na rysunku 3 przedstawiony został uproszczony schemat układu zasilania dla pojazdu elektrycznego.



Rys. 3. Układ zasilania energią elektryczną systemów samochodu elektrycznego [15]

Obecnie dominującymi instalacjami elektrycznymi w pojazdach są sieci 12 V DC [3]. Ze względu na rosnącą liczbę odbiorników energii elektrycznej podłączanych do systemu zasilania celowe jest, ze względu na straty, zwiększenie wartości tego napięcia. W tym celu wprowadzana jest nowoczesna technologia 48 V DC [3]. Do zasilania napędu elektrycznego w nowoczesnych

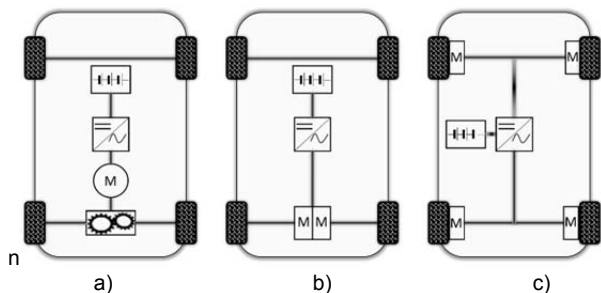
elektroautach wykorzystywana jest instalacja o napięciu znamionowym od 90 V do 800 V [3]. Na rysunku 4 została przedstawiona dystrybucja mocy w pojeździe elektrycznym.



Rys. 4. Dystrybucja mocy (wysokiego i niskiego napięcia) w pojeździe elektrycznym [16].

Widać wyraźnie rosnącą rolę przekształtników energii elektrycznej, których zastosowanie jest obecnie celowe i możliwe gdyż stały się one, w ostatnich latach, zarówno dostatecznie niezawodne jak i cenowo opłacalne.

Rozmieszczenie i zasilanie układu napędowego pojazdów elektrycznych może być zrealizowane według różnych koncepcji, które zostały przedstawione na rysunku 5. Układ na rysunku 5a jest układem analogicznym do rozwiązania powszechnie stosowanego w pojazdach z silnikiem spalinowym. Napęd elektryczny jest umieszczony centralnie i przekazuje moc na jedną oś. Układ na rysunku 5b to układ tandemowy. W tym przypadku dwa silniki elektryczne działają na jednej osi, umieszczone w pobliżu kół, co oznacza, że mechanizm różnicowy może zostać wyeliminowany. Rysunek 5c przedstawia napęd elektryczny zintegrowany z piastami kół. Dzięki odpowiedniemu, skoordynowanemu systemowi sterowania można zrezygnować z przekładni i mechanizmu różnicowego. Spośród przedstawionych trzech koncepcji rozmieszczenia napędu w pojeździe, najpopularniejszym rozwiązaniem jest napęd centralny z napędem na przednie lub tylne koła [17].



Rys. 5. Koncepcje projektowe dotyczące rozmieszczenia napędu w pojazdach elektrycznych [18]: a) układ centralny, b) układ tandemowy, c) napęd zintegrowany z piastami kół

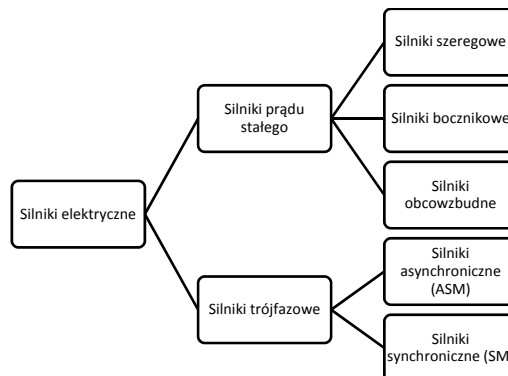
Silniki elektryczne mają znaczącą przewagę nad silnikami spalinowymi, ze względu na:

- lepszą efektywność energetyczną (wyższa sprawność),
- krzywą charakterystyczną, która odpowiada wymaganiom dynamiki jazdy w pojeździe,
- brak skrzyni biegów,
- wyższą gęstość mocy,
- znacznie mniej skomplikowaną budowę.

Rysunek 6 przedstawia klasyfikację używanych w napędach pojazdów silników elektrycznych.

Zastosowanie znajdują zarówno silniki zasilane prądem stałym i prądem zmiennym trójfazowym. W grupie maszyn trójfazowych różni się silniki pracujące z prędkością synchroniczną i asynchroniczną. W grupie maszyn prądu stałego podział zależy od układu wzbudzenia.

Kolejnym elementem układu strukturalnego pojazdu jest układ ogniwo elektrochemicznych zapewniających źródło zasilania. Wymagania wobec akumulatorów są zróżnicowane (bezpieczeństwo, pojemność, żywotność) [19,20]. Z tego powodu przy wyborze technologii i wymiarowaniu zasobnika ważne jest znalezienie optymalnego rozwiązania ze względu na powyższe kryteria [21]. Ponadto musi zostać również uwzględniona relacja pomiędzy pojemnością akumulatora a mocą znamionową pojazdu.



Rys. 6. Schemat blokowy maszyn elektrycznych wirujących wykorzystywanych w pojazdach

W tabeli 2 zostały przedstawione wybrane technologie systemów bateryjnych wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym. Obecnie najpopularniejszym rozwiązaniem wykorzystywanym przy produkcji akumulatorów jest technologia litowo-jonowa, która to stosowana jest powszechnie także w urządzeniach przenośnych, takich jak smartfony, aparaty fotograficzne, laptopy itp. Szybki rozwój tej technologii, w ostatnich 10 latach, przyczynił się w znacznym stopniu do ponad dwukrotnego obniżenia kosztów wytwarzania akumulatorów litowych co spowodowało zwiększenie zainteresowania produkcją pojazdów elektrycznych wyposażonych w tą technologię.

Dopuszczalna temperatura pracy ogniwo li-ion wynosi 45°C co oznacza, że akumulatory te muszą być chłodzone podczas pracy z dużym obciążeniem. Niemniej jednak akumulatory te posiadają szereg zalet, do których należy:

- wysoka gęstość energii ponad 100 Wh/kg,
- wysoka gęstość mocy ponad 1000 W/kg,
- niski poziom samorozładowania,
- długa żywotność wynosząca ponad 2000 pełnych cykli,
- szeroki zakres temperatur.

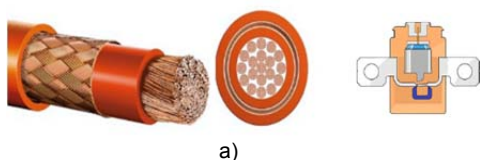
Tabela 2. Właściwości technologii bateryjnych [22,23]

Typ	Gęstość energii w Wh/kg	Gęstość mocy w W/kg	Cykle	η_{wa}	Zakres temperatur	Koszt w €/kWh
Pb	20 – 50	100 – 300	200 – 1500	0,8 – 0,9	-40°C – 60°C	100 – 150
NiCd	25 – 80	200 – 600	1000 – 4000	0,57 – 0,7	-20°C – 60°C	250
NiMH	55 – 85	600 – 750	> 2000	0,7	0°C – 50°C	300 – 350
Li-Ion	90 – 160	1350	2000	0,9 – 0,95	< 45°C	300 – 600
Li-Poly	100 – 144	Ca. 300	300 – 1000	0,9 – 0,95	> 20°C	300
NaNiCl (Zebra)	80 – 120	90 – 160	600 – 3700	0,91	280°C – 330°C	< 250

Ze względu na wysoką gęstość energii i dużą wrażliwość w przypadku mechanicznego, elektrycznego lub termicznego przeciążenia akumulatorów litowych, które prowadzą do niekontrolowanego wzrostu temperatury,

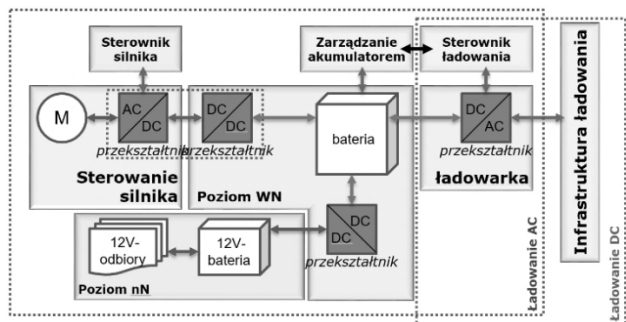
obszar bezpiecznej eksploatacji stanowi dla producentów poważne wyzwanie. Norma EN 50272 określa ogólne wymagania dotyczące bezpieczeństwa w zakresie eksploatacji systemów akumulatorowych [24]. W drugim wydaniu normy ISO 6469 zdefiniowany został kolejny standard, który określa wszystkie wymagania bezpieczeństwa dotyczące przechowywania akumulatorów wtórnych w pojazdach elektrycznych, niezależnie od składu chemicznego ogniwa lub obszaru zastosowania [24]. Ponadto w normie zostały zawarte wymagania dla akumulatora w odniesieniu do izolacji, wydzielenia się ciepła i wyłączenia zwarcia.

Norma DIN ISO 6722 określa podstawowe wymagania dotyczące połączeń elektrycznych w pojazdach i zawiera informacje o kablach jednożyłowych (rys. 7) zastosowanych w instalacjach pojazdu elek. w zakresie napięć od 60 V do 600 V [25]. Wymiary, metody badań i wymagania zależne od materiału zestawiono w poszczególnych częściach normy oraz opisano w nich przekroje kabli jak i wymagania izolacyjne. Ponadto normy ISO 19642 [26] i ISO 14572 [27] rozszerzają poziom napięcia do 1500 V DC oraz stosują głębszy podział na kable jednożyłowe i wielożyłowe oraz kable ekranowane i nieekranowane.



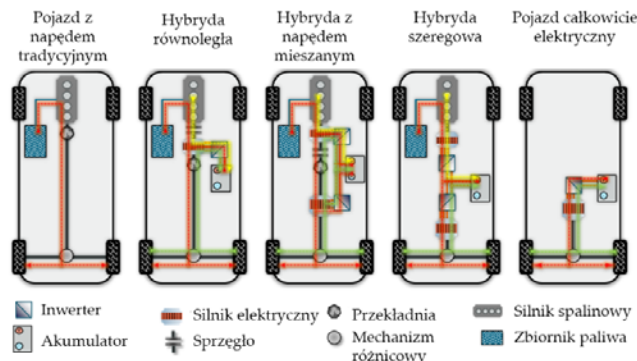
Rys. 7. Kabel wykorzystywany w pojazdach elektrycznych; a) przekrój kabla ekranowanego, b) schemat BSD (Battery Service Disconnect)

Integracja akumulatora z układem elektrycznym pojazdu stanowi szczególne wyzwanie nie tylko w konstrukcji pojazdu, ale także w planowaniu i projektowaniu instalacji elektrycznej oraz zabezpieczeniu instalacji w przypadku wystąpienia zwarcia. Przerwywanie zwarcia prądu stałego, które wiąże się z wymuszonym gaszeniem łuku elektrycznego zostało ściśle określone w normie ISO 10924-5 [28]. W normie tej zostały również sprecyzowane wymagania odnośnie wyłączników stosowanych w pojazdach elektrycznych oraz przedstawiony został proces projektowania i obliczania wartości prądów i dopuszczalnych parametrów m.in. temperatury w przypadku wystąpienia zwarcia. Współpraca wymienionych systemów i komponentów pozwala na realizację układu napędowego, którego schemat został przedstawiony na rysunku 8.



Rys. 8. Układ blokowy reprezentujący układ połączeń pojazdu elek.

Silnik elektryczny, akumulator oraz przekształtnik tworzy układ, który nie tylko pozwala wyeliminować silnik spalinowy ale również może uzupełniać go funkcjonalnie. Mówimy wtedy o układach hybrydowych. Układy te zostały przedstawione na rysunku 9.



Rys. 9. Układy połączeń napędu spalinowego z z napędem elektrycznym w różnych konfiguracjach

W przypadku pojazdów hybrydowych dąży się do uzyskania syntezy zalet napędu spalinowego i elektrycznego. Dąży się do połączenia efektu cichej i „czystej” jazdy, na obszarach o wzmożonym ruchu drogowym z możliwością uzupełniania niedoborów energii i wydłużeniem zasięgu jazdy. Ze stosowanych obecnie rozwiązań w pojazdach hybrydowych (rys. 9) najpopularniejszy jest układ hybrydy szeregowej.

Stacje ładowania pojazdów elektrycznych AC i DC

Rozwój rynku w wyniku technicznej i ekonomicznej akceptacji technologii pojazdów elektrycznych będzie istotnym czynnikiem decydującym o sukcesie lub porażce elektromobilności na świecie. Odpowiednia infrastruktura stacji ładowania, umożliwiająca wygodne pobieranie opłat oraz skrócenie czasu ładowania pojazdu, są niezbędnymi czynnikami warunkującymi odnoszenie sukcesu przez elektroauta na rynku osobowych jak i ciężarowych. W tym celu należy zapewnić podobne jak w przypadku pojazdów spalinowych odpowiednie funkcjonalności dla całej infrastruktury składającą się na pojęcie elektromobilności. Kluczowym jest tu dostępność stacji ładowania oraz rodzaj zastosowanej technologii. Z punktu widzenia użytkowników pojazdów priorytetem jest zwiększenie ich liczby i zastosowanie technologii szybkiego ładowania (>50 kW), co w zasadniczy sposób uatrakcyjni elektromobilność w Polsce.

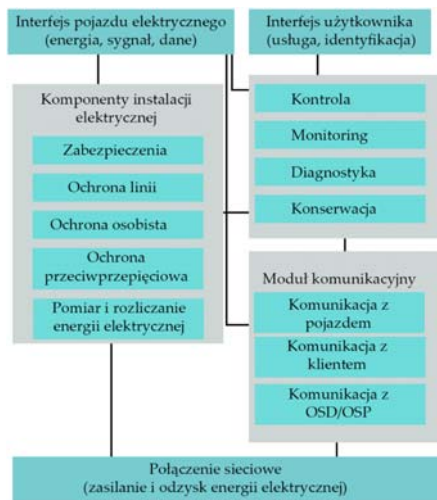
Stacje ładowania pojazdów elektrycznych powinny być dobrze widoczne i łatwo dostępne. Wiąże się to z:

- widocznością wizualną,
- odpowiednim oświetleniem stacji,
- właściwymi wymiarami, pasującymi do wymiarów samochodu osobowego (w tym SUV'a),
- pełnym wyposażeniem w postaci przewodów i kabli oraz uchwytów poprawiających bezpieczeństwo oraz zwiększającą estetykę.
- intuicyjną i prostą obsługą z wyszczególnioną informacją o opłatach,
- zapewnieniem systemu wsparcia i obsługi klienta,
- stworzeniem marki / opracowaniu strategii marketingowej / lokowaniem produktu.

Element systemu w postaci stacji ładującej nie tylko ma za zadanie dostarczenie lub odbieranie energii, ale także przesyła dane i informacje związane z procesem ładowania, takie jak taryfa energii elektrycznej i dostępne opcje płatności. Ponadto jako łącznik infrastrukturalny między siecią elektroenergetyczną i pojazdem, każda stacja musi zawierać elementy pozwalające na bezpieczną eksploatację urządzeń w zakresie wymiany energii i informacji (rys. 10).

Elementami instalacji elektrycznej wchodzących w skład stacji ładowania pojazdów elektrycznych są zabezpieczenia w tym przełączniki, wyłączniki jak i urządzenia

odpowiedzialne za ochronę linii kablowych. Układy te również mają na celu zapewnienie odpowiedniego bezpieczeństwa przy eksploatacji urządzeń przez użytkowników samochodów elektrycznych. Podobnie jak w przypadku innych instalacji elektrycznych powinna zostać zainstalowana ochrona przeciwprzepięciowa oraz instalacja pomiarowa złożona z mierników energii elektrycznej.



Rys. 10. Komponenty i interfejsy komunikacyjne dla stacji ładowania pojazdów elek. [29]

Ponadto w celu zachowania zdolności przejrzystej kontroli procesów zachodzących podczas ładowania pojazdu, wymagana jest odpowiednia technika pomiarowa, która w sposób niezawodny i ciągle pozwoli na rejestrację niezbędnych parametrów elektrycznych (prąd, napięcie, częstotliwość, moc, energia).

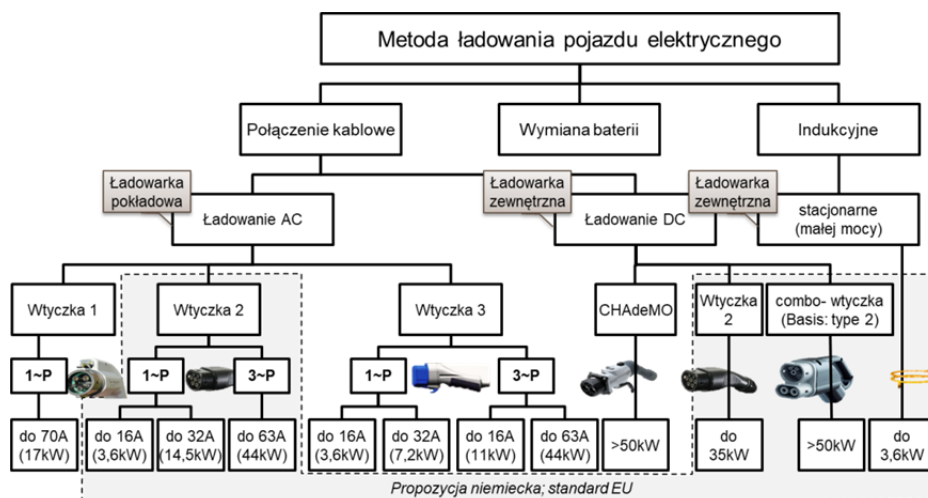
Jednocześnie należy zwrócić uwagę na elementy stacji ładowania, które z jednej strony połączone są z pojazdem, a z drugiej strony z siecią elektroenergetyczną. W związku z tym konieczne jest zapewnienie możliwości monitorowania procesów jak i kontroli, i ochrony urządzeń, a także bieżącej analizy stanu technicznego stacji. Funkcje te przejmują tak zwane moduły centralne, które mają dostęp do informacji o współpracujących podzespołach [30]. Część tych informacji jest udostępniana użytkownikowi stacji za pośrednictwem interfejsów komunikacyjnych. Moduł komunikacyjny wykorzystywany jest również do przesyłania danych i informacji związanych z procesem ładowania lub rozładowywania, do operatora sieci

dystrybucyjnej i przesyłowej w celu możliwości świadczenia usług systemowych (np. zmiana krzywej ładowania związana z obciążeniem sieci elektroenergetycznej, opcje taryfowe).

Tabela 3. Porównanie stacji ładowania pojazdów typu AC i DC

	Stacja ładowania AC	Stacja ładowania DC
Opis ogólny	Stacje ładowania AC wymagają znacznie niższych kosztów instalacyjnych. Moc ładowania zależy od przekształtnika zainstalowanego w pojeździe elektrycznym i ewentualnie jest ograniczona specyfikacją stacji ładującej. Obecnie najbardziej rozpowszechniony standard.	Stacje ładowania prądem stałym różnią się wydajnością energetyczną. Przekształtnik AC/DC jest zainstalowany w stacji, a ładowanie odbywa się przy odpowiednim napięciu akumulatora pojazdu elektrycznego i z wykorzystaniem prądu stałego. Oprócz wyższych kosztów zakupu i instalacji, należy uwzględnić również koszty konserwacji i okres eksploatacji. Ponadto pojazdy elektryczne muszą być również wyposażone w ten standard ładowania. Zaletą takiego systemu jest zmniejszenie wagi pojazdu elektrycznego (jeden konwerter DC/DC)
Moc ładowania	11 kW lub 22 kW 400 V, prąd trójfazowy rzadko do 43 kW	od 50 do 200 kW
Szybkość ładowania względem zasięgu	ok. 50-100 km w ciągu godziny (według specyfikacji przekształtnika w samochodzie elektrycznym 11 kW lub 22 kW)	ponad 200 km, które można doładować w ciągu jednej godziny

W zależności od technologii przyłączenia pojazdu do sieci zasilającej wyróżnia się systemy ładowania przewodowego i bezprzewodowego (indukcyjnego) oraz systemy polegające na wymianie baterii akumulatorów. W przypadku ładowania przewodowego można również rozróżnić układy wykorzystujące prąd stały lub prąd przemienny o granicznej wartości prądu ładowania w zależności od dostępnej mocy ładowania. Podział technologii został przedstawiony na rysunku 11.

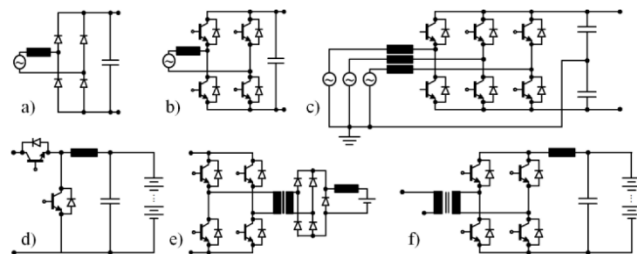


Rys. 11. Technologie ładowania i dostępne złącza zasilania pojazdów elektrycznych [3, 31]

Ładowanie indukcyjne jest jedną z metod ładowania pojazdu elektrycznego, która zapewnia kierowcy największy komfort użytkowania pojazdu, eliminując konieczność stosowania przewodu zasilającego. Niestety ze względu na wysokie wymagania techniczne dotyczące przesyłania energii (głównie wymagana mała odległość pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem oraz konieczność bardzo dokładnego pozycjonowania tych układów) i z tym związane dochowanie wysokich standardów kompatybilności elektromagnetycznej – system ten nie jest jeszcze wykorzystywany na masową skalę. Nie mniej jednak można znaleźć przypadki jego zastosowania dla aut osobowych klasy premium (np. BMW serii 5 lub 7) [32], gdzie stanowi on element wyposażenia dodatkowego. Obecnie najczęstszym rozwiązaniem wykorzystywanym na świecie jest system ładowania wykorzystujący przewodowy transfer energii, dla którego rozróżnia się dwie technologie ładowania: stacje ładowania AC i stacje ładowania DC (stacje szybkiego ładowania). Porównanie stacji AC i DC zestawiono w tab. 3.

Pokładowe i zewnętrzne stacje ładowania pojazdów elektrycznych

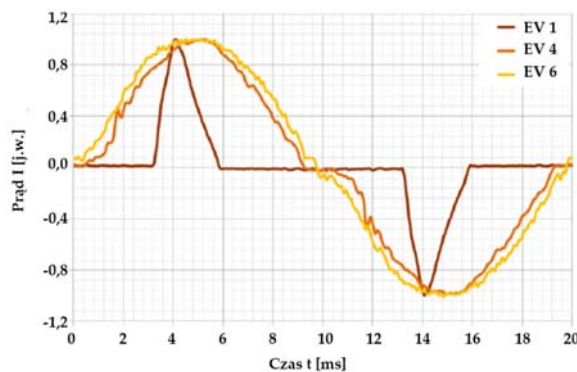
Ogólne wymagania dotyczące systemu ładowania zależą od przypadku zastosowania. Z punktu widzenia sieci ładowarka powinna być trójfazowa i nie powodować asymetrii faz, mieć korekcję współczynnika mocy, która nie emituje dużo harmonicznych oraz mieć możliwość dwukierunkowego przepływu energii w celu świadczenia usług systemowych, takich jak stabilizacja napięcia, kompensacja mocy biernej i zmiana kierunku przepływu mocy. Wymagania producenta pojazdu to niska waga, cena i duża niezawodność funkcjonalna. Zasadniczo użytkownik pojazdu jest zainteresowany nieskomplikowanym, solidnym systemem o wysokiej wydajności. Topologia ładowarki jest zwykle kombinacją obwodu prądu AC/DC a), b) lub c) i obwodu DC/DC d), e) lub f), jak pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Topologie elektroenergetyczne stosowane w typowych obwodach stacji ładowania; a) Prostownik wejściowy B2U, b) Mostek H B2C, c) Pełny mostek B6C, d) Dwukierunkowy przetwornik DC/DC, e) Przetwornik DC/DC z transformatorem wysokiej częstotliwości, f) Dwukierunkowy Konwerter DC/DC z transformatorem wysokiej częstotliwości

Jednym z najprostszych obwodów przetwornika AC/DC jest prostownik B2U. Zasilacz prądu przemiennego jest połączony czterema diodami zwrótnymi z pojemnością, która jest ładowana z każdą połową fali napięcia. Przebieg dla tego obwodu został przedstawiony na rysunku 13 (EV1). Przebieg ten nie ma kształtu sinusoidy i zawiera wysokie prądy o nieparzystych harmonicznych. Spadek napięcia w sieciowej impedancji przekształtnika ma negatywny wpływ na jakość energii. Najlepszym rozwiązaniem są przetworniki AC/DC, takie jak mostek H lub obwód pełnego mostka B6C, które obsługują PFC (korekcja współczynnika mocy) i mogą przyjmować kształt prądu sinusoidalnego (EV 4 i EV 6 – rysunek 13). Ładowanie pokładowe wykorzystuje przekształtnik AC/DC zamontowany w układzie energoelektronicznym pojazdu, natomiast przy ładowaniu zewnętrznym przekształtnik ten należy do infrastruktury

stacji ładowania. Ponadto w pojeździe elektrycznym zainstalowane są dwa dodatkowe przekształtniki umożliwiające sterowanie silnikiem oraz gwarantujące zasilanie pokładowe 12 V DC.



Rys. 13. Zarejestrowany przebieg prądu EV 1, EV 4 i EV 6

Termin „przewodzące systemy ładowania” obejmuje wszystkie urządzenia do ładowania przewodowego pojazdów elektrycznych i podlega ściślej standardyzacji. Protokół IEC 61851 jest najważniejszy w tym obszarze [33]. Dzięki stworzeniu tego szeregu norm, składającego się obecnie z 24 rozdziałów, możliwe było ujednoczenie opisu wszystkich sygnałów w urządzeniach przeznaczonych do ładowania pojazdów elektrycznych. Protokół ten rozróżnia cztery, następujących po sobie tryby ładowania, których specyfikacje zostały podsumowane w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie trybów ładowania pojazdów elektrycznych

Tryb ładowania 1	Ładowanie prądem przemiennym o natężeniu do 16 A
	Połączenie jedno- lub trójfazowe przez standardowe gniazdo (Standard, CEE)
	Wyłączniki nadmiarowo prądowe i wyłączniki różnicowoprądowe zalecane w obwodzie instalacji
Tryb ładowania 2	Komunikacja dwukierunkowa nie są możliwa, nie jest wymagana
	Ładowanie prądem przemiennym o natężeniu do 32 A,
	Połączenie jedno- lub trójfazowe przez standardowe gniazdo (Schuko, CEE)
	Urządzenie sterujące i zabezpieczające (IC-CPD): Kabel ładujący zawiera styk /kontakt pilot i proximity (CP i PP)
Tryb ładowania 3	Brak informacji wymaganych do dwukierunkowej wymiany energii
	Komunikacja pomiędzy SVCC i EVCC za pośrednictwem kontaktu/styku CP
	Ładowanie prądem przemiennym o natężeniu do 63 A
	Połączenie jedno- lub trójfazowe poprzez specjalne gniazdo ładowania
	Kabel ładujący z wtyczką zgodną z IEC 62196-2
Tryb ładowania 4	Urządzenie zabezpieczające jako integralna część stacji ładowania (brak IC-CPD)
	Złącze do bezobsługowego ładowania w miejscach publicznych
	Komunikacja pomiędzy EVSE i EVCC za pośrednictwem kontaktu/styku CP
	Dozwolona dwukierunkowa wymiana energii
Tryb ładowania 4	Ładowanie prądem stałym w specjalnych stacjach ładowania
	Napięcie i prąd ładowania zależne od systemu i jest uregulowane w oddzielnej normie
	Kabel zasilający składa się z części silnopądowej i sterującej
	Wymagane są złożone urządzenia ochronne prądu stałego (np. monitorowanie izolacji)

Złącza zasilania i implementacja procesu ładowania pojazdów elektrycznych

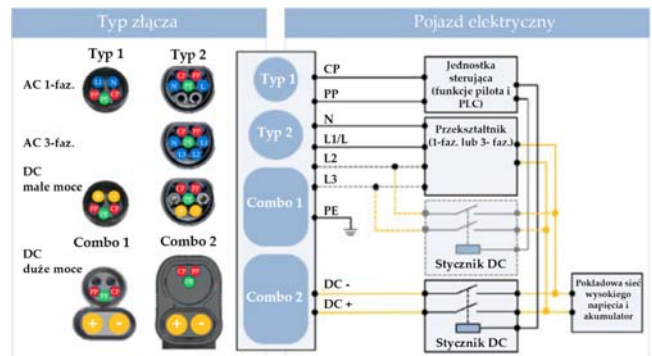
Po podłączeniu pojazdu do stacji można rozpocząć proces ładowania. Zazwyczaj proces ten rozpoczyna się automatycznie w trybie ładowania 1 (patrz tabela 3). Tryby ładowania 2 i 3 wymagają dodatkowej komunikacji w celu uaktywnienia wymaganych dodatkowych środków bezpieczeństwa. Podstawowa komunikacja jest realizowana za pomocą dwóch dodatkowych styków (CP i PP) w złączach ładujących (patrz rys. 14, pokazane na czerwono), które zapewniają następujące funkcje:

- sprawdzanie prawidłowego podłączenia pojazdu,
- sprawdzanie ciągłości przewodu ochronnego,
- włączenie i wyłączenie systemu,
- implementacja funkcji opcjonalnych zgodnie z IEC 61851: Określenie prądu ładowania,
- ewentualny wymóg wentylacji w obszarze ładowania,
- pomiar i regulacja prądu obciążenia,
- zablokowanie i odblokowywanie złącza,
- kontrola przepływu prądu w obu kierunkach.

Specyfikacja złączy zasilania pojazdów elektrycznych w Europie jest opisana w normie EN 62196-1:2012. Wymagania w niej zawarte obejmują regulacje dotyczące bezpieczeństwa, zasilania i połączenia komunikacyjnego. W trakcie normalizacji zdefiniowano też różne warianty złączy zasilania. Na rysunku 14 przedstawiono dwa rodzaje złączy zasilających i ich różnice w zależności od zastosowanego systemu ładowania. Złącze typu 2 to system, który będzie wykorzystywany w nowoczesnych układach ładowania w Europie. W przyszłości przewiduje się wykorzystanie jednego złącza zarówno przy ładowaniu prądem przemiennym, jak również przy ładowaniu prądem stałym.

Styk znajdujący się w gnieździe ładowania i oznaczony symbolem PP (rys 14), sygnalizuje kontrolerowi maksymalną obciążalność prądową systemu, tym samym eliminując ryzyko jego przeciążenia. Informacje są dostarczane poprzez rezystor R_{PP1} , który jest zainstalowany na stałe między stykiem PP a przewodem ochronnym (PE)

w złączu (rys. 16). Przewidziane normą kodowanie obciążalności złączy podane jest w tabeli 5.

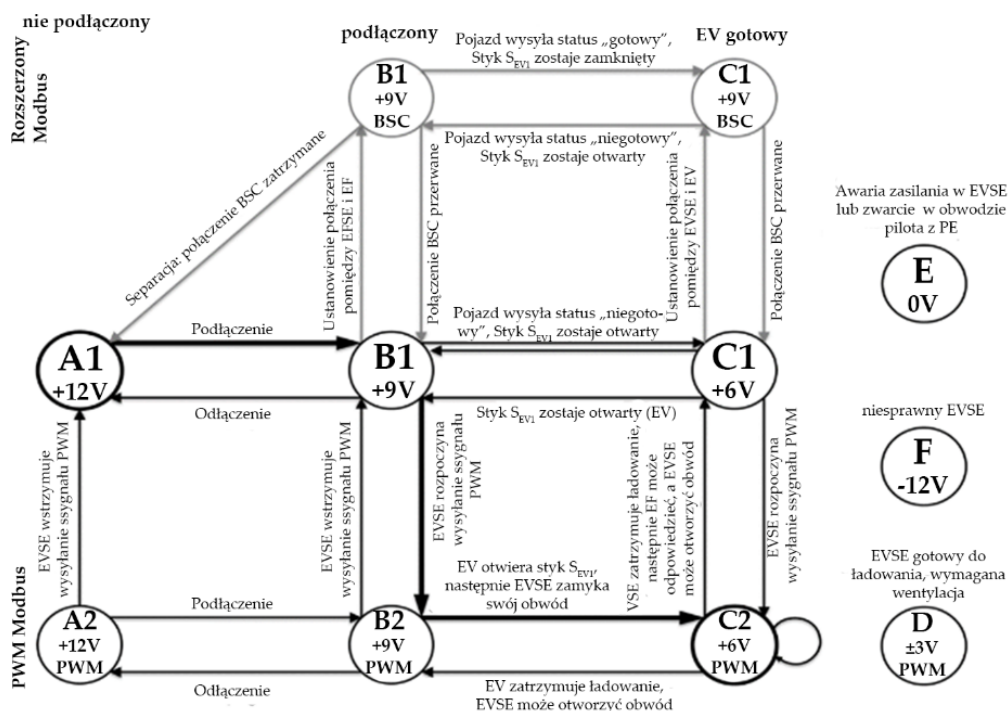


Rys. 14. Elektryczny układ połączeń dla wykorzystywanych obecnie złączy pojazdu z stacją ładowania [34]

Tab. 5. Kodowanie obciążalności prądowej złączy

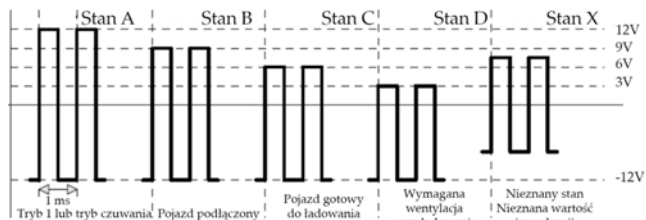
Obciążalność prądowa linii	Wartość rezystancji w złączu
13 A	1,5 kΩ (± 3%) 0,5 W
20 A	680 Ω (± 3%) 0,5 W
32 A	220 Ω (± 3%) 0,5 W
63 A (3-fazowa) / 70 A (1-fazowa)	100 Ω (± 3%) 0,5 W

Drugi dodatkowy styk, który jest częścią obwodu pilotowego określany jest jako styk pilotowy lub styk kontrolny (CP). Obwód ten służy do określania aktualnego stanu systemu (patrz rys. 15) oraz do inicjalizacji procesów ładowania i ograniczenia prądu [17]. Po stronie stacji ładującej – kontroler ładowania dla urządzeń zasilających (SECC) złożony jest z oscylatora (o maksymalnym poziomie napięcia ± 12 V między stykami CP i PE), rezystora wewnętrznego R_{CS} i przełącznika S_{CS1} . Gdy pojazd jest podłączony, obwód jest uzupełniany przez drugi rezystor R_{SB} , do którego trzeci rezystor R_{SC} można podłączyć równolegle za pomocą przełącznika S_{EV1} .



Rys. 15. Wykres możliwych stanów we wdrażaniu uwierzytelnienia IEC 61851, zgodnie z [33]

W stanie początkowym (stan A1) oscylator jest wyłączony i zapewnia stały poziom napięcia 12 V między stykami CP a PE. Po uruchomieniu procesu ładowania między pojazdem a stacją ładowania napięcie na stykach gniazda ładowania spada do 9 V (stan B1), wynika to z dzielnika napięcia między R_{CS} i R_{SB} . SECC następnie aktywuje oscylator, który wysyła prostokątny sygnał impulsowy o częstotliwości 1 kHz (stan B2), który został przedstawiony na rysunku 16. Szerokość impulsu (modulacja PWM) jest zmienna i koduje maksymalny możliwy do uzyskania prąd ładowania zgodnie z poziomami pokazanymi w tabeli 6.



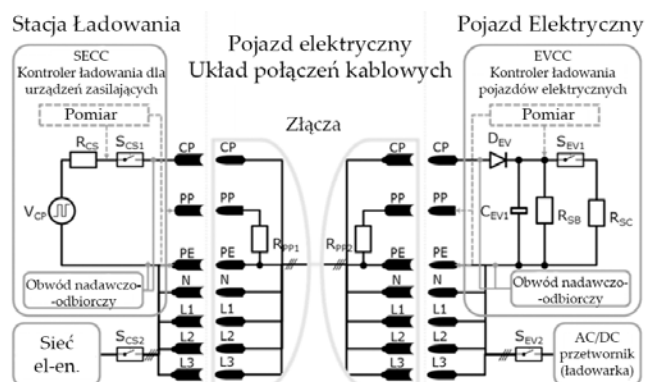
Rys. 16. Przebieg sygnału PWM wykorzystywanego w procesie komunikacji

Tabela 6. Kodowanie prądu ładowania na podstawie modulacji PWM

Współczynnik wyjściowy a	Maksymalny dopuszczalny prąd ładowania pojazdu*
$97\% > a < 3\%$ $7\% < a < 8\%$	Ładowanie jest zabronione
$3\% \leq a \leq 7\%$	Poziom wyjściowy 5% oznacza komunikację cyfrową (patrz ISO/IEC 15118), Jeśli nie zostanie nawiązana komunikacja cyfrowa, ładowanie jest zabronione.
$8\% \leq a < 10\%$	6 A
$10\% \leq a \leq 85\%$	Prąd ładowania = $(\% a) \times 0.6$ A
$85\% < a \leq 96\%$	Prąd ładowania = $(\% a - 64) \times 2.5$ A
$96\% < a \leq 97\%$	80 A

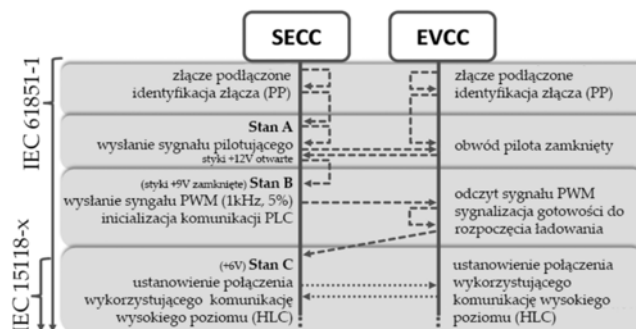
*Jeżeli używana jest ładowarka trójfazowa, wskazywany jest prąd na jedną fazę.

Kontroler ładowania pojazdu (EVCC) odbiera sygnał PWM i ustawia prąd ładowania – o ile nie jest on dalej regulowany przez układ ładowania jako wartość graniczna w ładowarce. Gdy tylko pojazd zasygnalizuje swoją gotowość do ładowania poprzez zamknięcie przełącznika S_{EV1} i zmianę stanu na C2, rozpoczyna się proces ładowania. Sprężenie zwrotne do SECC następuje poprzez spadek poziomu napięcia do 6 V dzięki regulacji dzielnika napięcia pomiędzy SECC i EVCC. Rys. 17 przedstawia szczegółowy schemat połączeń między pojazdem a stacją ładowania oraz budowę obwodu pilotowego.



Rys. 17. Schemat układu połączeń dla stacji ładowania i pojazdu elektrycznego z uwzględnieniem schematu obwodu przewodu pilotowego, patrz [35]

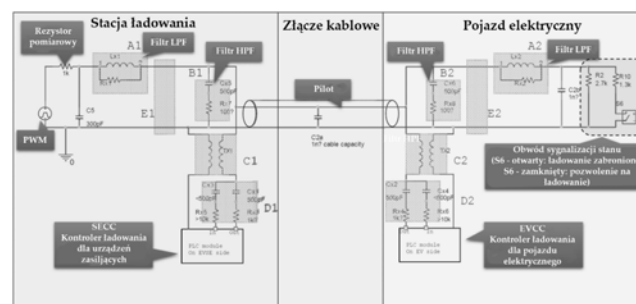
Dokładniejsza kontrola ładowania może być realizowana poprzez wykorzystanie ścieżki A1-B1-B1_{BSC}-C1_{BSC} zgodnie z rysunkiem 15. Jeśli stacja ładująca jest wyposażona w odpowiedni osprzęt, to przy przejściu systemu w stan B1 (patrz rys. 15, na dole) następuje nawiązanie połączenia za pomocą interfejsu komunikacyjnego Baseband Serial Communication (BSC). Jeżeli pojazd odpowie na sygnał wywoławczy tego interfejsu, to zostaje włączona dwukierunkowa wymiana danych i w ten sposób mapowane są podstawowe funkcje. Interfejs ten zapewnia jednak tylko podstawową kontrolę i prostą wymianę informacji. Kolejnym etapem w rozbudowie stacji ładowania jest dodatkowy interfejs ICT, który realizuje komunikację wysokiego poziomu (HLC – przedstawioną na rysunku 18) z wykorzystaniem interfejsu Power Line Communication (PLC) [36].



Rys. 18. Proces inicjalizacji komunikacji wysokiego poziomu [37]

Stosowane w komunikacji protokoły to protokół internetowy (IP) w połączeniu z protokołem kontroli transmisji (TCP) lub alternatywnie protokół UDP (User Datagram Protocol). HLC jest objęty międzynarodową normą ISO/IEC 15118 i stanowi podstawę „inteligentnego ładowania” [37]. Część 1 normy ISO 15118 obejmuje ogólne informacje dotyczące użytkowania i przypadków wykorzystania. W drugiej części omówiono niezbędne protokoły sieciowe i aplikacyjne oraz warstwy modelu referencyjnego – Open System Interconnection (OSI), na których oparte są funkcje standardu.

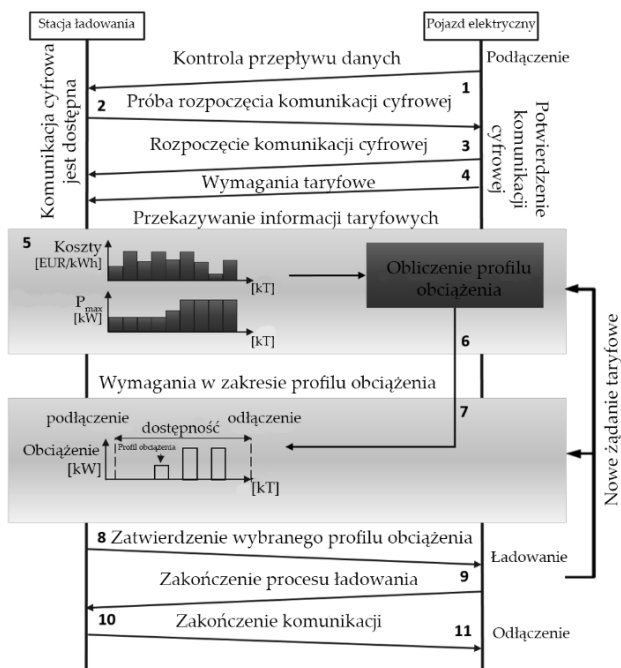
Zmiana stanu systemu na B2 (rys. 15), powoduje ustawienie przez układ SECC modulacji PWM na poziomie 5%, co aktywuje sterownik PLC w pojeździe elektrycznym. Odpowiedni sygnał przesyłany zostaje za pomocą złącza komunikacyjnego (pokazanego na rys. 19) Sygnał ten jest przetworzony na sygnał cyfrowy, a następnie wysyłany w pakiecie odpowiednich protokołów. Należy zwrócić uwagę, że ładowanie zgodnie z normą ISO/IEC 15118 jest możliwe tylko w trybie ładowania 3, w tym HLC nie może naruszać podstawowej funkcjonalności zgodnie z normą IEC 61851.



Rys. 19. Podstawowy obwód do modulowania sygnału sterownika PLC na sygnał przewodu pilotowego, patrz [38]

Celem tej normy jest też umożliwienie rozleglejszej integracji pojazdów elektrycznych z infrastrukturą zasilania elektrycznego poprzez dostarczenie nie tylko pomiarowej ale i przetworzonej informacji na temat planowanego okresu ładowania oraz stanu bieżącego lub docelowego stanu naładowania. Z wykorzystaniem tych informacji pojazd może służyć jako tymczasowy energetyczny magazyn buforowy. Może, poprzez własne zasilanie odciążać sieć dystrybucyjną lub wspomóc sieć w przypadku niekontrolowanych zmian w rozplywie mocy, np. stabilizacja napięcia w węźle sieci.

Innym ważnym aspektem jest wzrost przyjazności technologii ładowania pojazdu dla użytkownika. Dzięki automatycznej identyfikacji pojazdu i możliwości elektronicznego systemu rozliczania i księgowania kosztów energii, standard ten toruje drogę do rozwiązania typu „plug&play”, w którym rola użytkownika ogranicza się do ustanowienia fizycznego połączenia pojazdu z punktem ładowania. W tym względzie należy jednak najpierw ustanowić ramy prawne i określić zakres ochrony danych. Na rysunku 20 przedstawiono proces inteligentnego ładowania wymagany dla rozszerzonych funkcji sieci elektroenergetycznej na przykładzie planu pobierania opłat uzależnionego od taryfy w celu zminimalizowania kosztów ładowania.

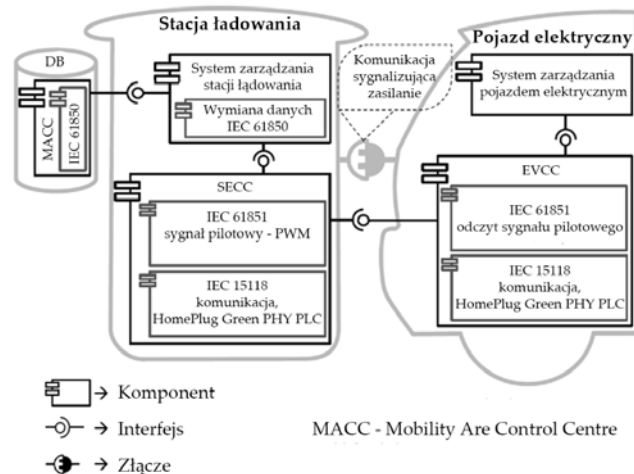


Rys. 20. Algorytm inteligentnego ładowania zgodnie z ISO/IEC 15118, patrz [39]

Metody wymiany informacji między stacją ładowania a pojazdem

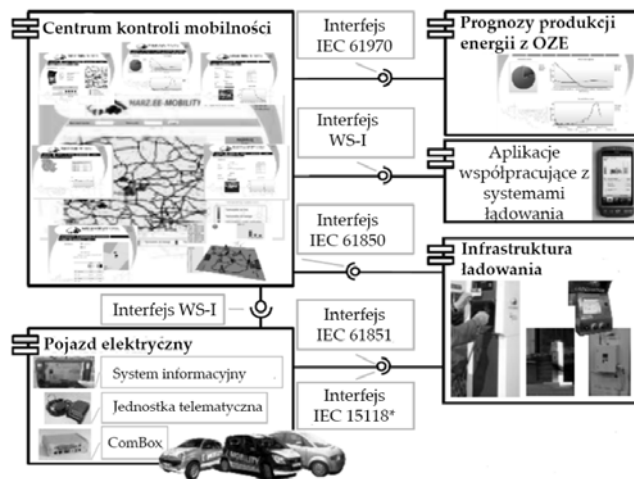
W stacji ładowania można wyróżnić trzy interfejsy (zasilający, sygnalizujący i komunikacyjny – patrz rys. 17) pozwalające na poprawne funkcjonowanie układu. Ładowany pojazd ma możliwość wysłania meldunku o swoim statusie np. poprzez zmianę wartości napięcia w obwodzie pilota realizowaną poprzez zmianę napięcia/wartości rezystancji (przełączenie $SEV1$ na rysunku 17). Do zrealizowania procesu kontrolowanego ładowania potrzebne są także informacje o konfiguracji pojazdu, w tym aktualny stan akumulatora jak również profil ładowania użytkownika. Z tego względu niezbędny jest rozszerzony interfejs komunikacyjny. Przepisy zawierające szczegóły tego interfejsu zostaną znormalizowane w standardach IEC 15118-x. Obecnie w przypadku ładowania pojazdu w trybie

1, obowiązują tylko standard IEC 61850, który nie wspiera kontrolowanego ładowania. Rysunek 21 przedstawia proponowaną infrastrukturę stacji ładowania przystosowaną do kontrolowanego ładowania.



Rys. 21. Schemat połączeń komunikacyjnych między stacją ładowania a pojazdem elektrycznym [37]

Pomimo stosowania wyżej wymienionych norm konieczna jest również optymalizacja procesu ładowania pojazdów elektrycznych, przy której wykorzystać można nadrzędną, inteligentną infrastrukturę ładowania, której działanie zależy od nadrzędnego systemu zarządzania, które sprowadza się do monitorowania, koordynowania i nawigacji odpowiednich flot pojazdów. Przykładem jest centrum kontroli mobilności MACC (z ang. Mobility Area Control Center) przedstawione na rysunku 22. Składa się ono z jednostki zawierającej bazę danych, w której informacje o topologii sieci (generacje OZE, obciążenie, jej prognozowanie) oraz informacje o flocie pojazdów są jednocześnie przetwarzane i analizowane.



Rys. 22. Schemat blokowy integracji pojazdów elektrycznych z siecią [37]

Integracja stacji ładowania pojazdów z siecią elektroenergetyczną

Integracja technologii ładowania z istniejącą infrastrukturą elektryczną jest często pomijana podczas prowadzonych prac nad elektromobilnością. Ważną kwestią, jest dostępna moc przyłączeniowa oraz możliwości jej dynamicznej regulacji. Obecne przyłącza budynków i obiektów zostały zaprojektowane dla konkretnych wartości mocy na podstawie planów przyłączeniowych bez uwzględnienia obciążeń wynikających z ładowania

pojazdów elektrycznych. Konsekwentnie więc, jeśli punkt przyłączeniowy nie jest zaprojektowany do odbioru dużej mocy, jaki reprezentować mogą elektroauta to nawet krótkotrwałe zwiększone obciążenie może spowodować przeciążenie linii i zadziałanie zabezpieczeń.

W przypadku wykorzystania stacji ładowania AC w wersji podstawowej (tab. 3) to jej instalacja prowadzi do konieczności podwojenia mocy przyłączeniowej w sektorze prywatnym. Znaczący wzrost wymaganej mocy przyłączeniowej w wyniku instalacji punktów ładowania pojazdów można również zaobserwować w sektorze komercyjnym. Z tego względu należy ustalić, czy istniejące przyłącza są w stanie pokryć dodatkowe zapotrzebowanie oraz czy mogą one zostać zmodernizowane, co wiązałoby się z pokryciem jednorazowych kosztów przez operatora sieci. Niemniej jednak wzrost pojazdów elektrycznych prędzej czy później będzie wymagał dostosowania sieci elektroenergetycznej do potrzeb elektromobilności. W tym celu zostały określone wymagania dotyczące infrastruktury i mocy ładowania. Na rysunku 23 został przedstawiony prosty model fazowy, pozwalający na wsparcie procesu decyzyjnego dotyczącego wyboru technologii.



Rys. 23. Model fazowy dla modelu decyzyjnego w obszarze infrastruktury ładowania

Ustalenie oczekiwanego rozmiaru floty pojazdów pozwala na określenie maksymalnej liczby punktów ładowania przy założeniu, że pojazdy mają być ładowane w tym samym czasie. W praktyce liczba punktów ładowania może być ograniczona poprzez wykorzystanie analizy oczekiwanych profili użytkownika pojazdów elektrycznych (uwzględnienie niejednoczesność procesów ładowania).

Na podstawie profili użytkownika i liczby pojazdów można określić niezbędne godziny ładowania. Analiza (algorytm) ta powinna opierać się na zasadzie „tak długo, jak to możliwe, tak krótko, jak to konieczne”. Projektowanie infrastruktury ładowania nie powinno prowadzić do jej przewymiarowania co w konsekwencji mogłoby powodować powstawanie dodatkowego zapotrzebowania w szczytach obciążeń i przez to dodatkowych kosztów, które musiałyby ponieść operator sieci.

Wybór rodzaju stacji ładowania zależy w dużej mierze od czasu ładowania. Im krótszy czas ładowania, tym większa wymagana dostępna moc. Na podstawie znanej pojemności akumulatora pojazdu można ustalić oczekiwane obciążenie i odpowiednio dobrać typ stacji [40]. Zakłada się, że średnia pojemność akumulatora wynosi 18 kWh dla zasięgu 100 km, a czas ładowania wznoszący 1 h wymaga mocy ładowania równej 18 kW na pojazd. Dodatkowo należy uwzględnić straty energii podczas procesu ładowania, które zazwyczaj wynoszą ok. 10%. Przy wyborze stacji ładowania decydującą rolę odgrywają również ograniczenia techniczne istniejącej infrastruktury oraz moc przyłączeniowa.

Koszt budowy stacji ładowania różni się w zależności od lokalizacji i funkcjonalności. Na całkowity koszt stacji składają się koszty stałe: w tym: budowa i instalacja, opłaty przyłączeniowe oraz koszty zmienne: opłaty za energię, konserwacja i utrzymanie, obsługa klienta i fakturowanie, utylizacja, marketing. Podstawowe koszty budowy zostały wyszczególnione w tabeli 7.

Tabela 7. Podstawowe składowe całkowitego kosztu budowy stacji ładowania

Koszt	Opis
Budowa, instalacja	Sporządzenie i zatwierdzenie umów dotyczące użytkownika (właściciel gruntu, OSD itp.), opracowanie planu, wykonanie prac w celu rozszerzenia lub modernizacji przyłączy do sieci elektrycznej, wykonanie fundamentów lub mocowania ściennego, zapewnienie miejsca postojowego, zadanie w przypadku ładowarek zewnętrznych
Wybór technologii	Ładowarka AC typu 2: Koszt tej infrastruktury może wynosić ok. 500 EUR, jeśli zostaną umieszczone w prywatnych obiektach i przeznaczone dla jednego użytkownika lub zamkniętej grupy użytkowników. Jeśli są one publiczne - co w przypadku gmin byłoby wymagała bardziej powszechne - stacja ładowania będzie wymagała solidniejszej konstrukcji i najprawdopodobniej będzie musiała mieć zdolność rozpoznawania i rozliczania każdego użytkownika pojazdu elektrycznego. Z tego względu punkt ładowania musi być zdolny do komunikacji z systemem informatycznym operatora punktu ładowania. W takim przypadku koszt jednostki wynosi ponad 1500 EUR. Ceny te nie obejmują kosztów instalacji. Szybka ładowarka DC: Pomimo znacznego spadku kosztów w ostatnich latach cena ładowarki DC utrzymuje się na wysokim poziomie i kosztuje ponad 25 000 EUR. Sprzęt o dużej mocy, wiąże się również z wyższymi kosztami podłączenia ładowarki do sieci, a nawet modernizacji punktu podłączenia. Może to zwiększyć koszty instalacji do 40 000 EUR. Ponadto wysokie zapotrzebowanie na moc, przekłada się na wyższe opłaty w ciągu miesiąca od OSD. Są to koszty stałe, płacone co miesiąc, niezależnie od czasu eksploatacji stacji. Koszt przyłączeniowy stanowią główną część kosztów operacyjnych i należy go dokładnie rozważyć wraz z kosztami energii i konserwacji urządzeń.
Opłaty za energię	W przypadku ładowania pojazdu w domu i w miejscach pracy – koszt zakupu energii jest największym, a czasem jedynym kosztem zmiennym. Niemniej jednak stanowi jedynie ułamek ostatecznej kwoty. Ładowanie w domu lub w pracy może kosztować ok. 2 EUR/100 km, podczas gdy koszt ładowania w publicznych punktach ładowania jest odpowiednio wyższy ze względu na dodatkowe opłaty (np. wydzierżawienie terenu).
Opłaty przyłączeniowe	Opłata uiszczana na rzecz OSD na podstawie mocy przyłączeniowej. Jej wysokość zależy od poziomu napięcia oraz własności transformatora. Będąc kosztem stałym, opłaty te mają największy wpływ na cenę końcową.
Konserwacja i utrzymanie	Jak w przypadku każdej maszyny, stacja ładowania wymaga również sporadycznej konserwacji związanej obsługą sprzętu IT i urządzeń.
Obsługa użytkownika i fakturowanie	Koszty obejmują ustalanie cen, tworzenie systemu fakturowania dla każdego użytkownika, utrzymywanie tego systemu i jego bezpieczeństwa oraz wsparcia technologicznego, w przypadku pojawienia się problemów technicznych. Niezbędna jest również obsługa użytkowników w czasie rzeczywistym. Udzielanie odpowiedzi na rutynowe pytania dzwoniących użytkowników przez wykwalifikowany zespół.

Planowany rozwój infrastruktury elektroenergetycznej i rozwój usług systemowych oferowanych przez pojazdy elektryczne

Obecnie system elektroenergetyczny podlega szczególnej rozbudwie. Pojawiają się nowe rozproszone źródła energii, które w Polsce pokrywają już ponad 10% zużycia (w niektórych krajach Europy np. Danii, OZE pokrywają już 60% całkowitego zużycia energii). W systemie energetycznym wyróżnić możemy nowych aktorów, którzy zaczynają przyjmować nowe role w procesie produkcji, magazynowania, przesyłu i dostaw energii. Wymagana jest od nich nowa, znacznie większa elastyczność (techniczna i rynkowa) pozwalająca na zapewnienie niezawodności funkcjonowania systemu. Sytuacja ta oznacza, że małe obiekty energetyczne takie jak pojazdy elektryczne mogą również, w pewnym sensie na nowo, zdefiniować swoją rolę w systemie el-en z uwzględnieniem usług, które będą mogły być świadczone dla sieci elektroenergetycznych w przyszłości. Tabela 8 przedstawia zestaw usług sieciowych świadczonych przez pojazdy elektryczne wraz z możliwymi rozwiązaniami wdrożeniowymi.

Tabela 8. Realizowane usługi sieciowe wraz z rozwiązaniami do wdrożenia w ramach rozbudowy sieci el-en.

	Pojazd elektryczny	Infrastruktura ładowania	Operacyjne centrum kontroli
Zastosowanie	Integracja	Lokalne	Centralne
Bilansowanie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Stabilizacja napięcia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Poprawa jakości energii	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stabilizacja częstotliwości	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Taryfy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zapewnienie mocy zwarciowej	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

– planowane projekty

Obecnie prowadzonych jest szereg projektów badawczych w zakresie elektromobilności. Projekty te finansowane lub kofinansowane są często ze środków publicznych w ramach rozwoju elektromobilności w Europie i obejmują zróżnicowane tematy badawcze. Dotyczą one m.in. tematów związanych z rozwojem koncepcji car-sharingu, przyjaznych dla użytkownika platform mobilności, testowaniem flot pojazdów elektrycznych dla gmin oraz autobusów elektrycznych dla transportu publicznego.

Jednym z przykładowych projektów opierających się na rozbudowie sieci elektroenergetycznej i infrastruktury elektromobilności jest projekt „Mobility4GridServices” [41]. Koncentruje się on na opracowaniu nowego podejścia obejmującego wiele systemów, które umożliwią pojazdom elektrycznym i związanej z nimi infrastrukturze ładowania zapewnienie nowych usług sieciowych. Nacisk kładziony jest na rozwój i testowanie obecnych i przyszłych koncepcji usług V4G (Vehicle for Grid) w strukturach dostaw energii na terenach wiejskich w celu zapewnienia wymaganej jakości i niezawodności zasilania przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. W ramach projektu pojazdy elektryczne mają zostać zmodernizowane dla różnych usług sieciowych (parametryzacja faz, stabilizacja napięcia i częstotliwości, zapewnienie wymaganej jakości zasilania, dostarczanie mocy zwarciowej, sprzężenie z taryfami). Naukowy cel projektu E-Mobility4GridServices polega na opracowaniu dwukierunkowych strategii opłat, które umożliwiają świadczenie nowych usług sieciowych.

Technicznym celem jest tutaj rozwój nowej infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych w celu praktycznego wykorzystania informacji zwrotnych, a tym samym ulepszenie i optymalizacja procesu.

„Virt-BilanzKKW” [42]. Ten niemiecki projekt badawczy dotyczy integracji kogeneracji z wirtualnymi układami bilansującymi w celu wydajnego dostarczania energii i wykorzystania nośników energii odnawialnej do ładowania pojazdów elektrycznych. W szczególności opracowano strategię pobierania opłat, które służą zrekompensowaniu błędów prognoz w kryzysie bilansowym. W testach energia potrzebna do ładowania została dostarczona przez elektrociepłownię.

„sun2car@GAP” [43]. W ramach tego projektu energia fotowoltaiczna wytwarzana w domach prywatnych jest wykorzystywana bezpośrednio do ładowania pojazdów elektrycznych. W tym celu opracowano i przetestowano innowacyjne rozwiązanie oparte na zmiennych stawkach ładowania, które zmniejszają obciążenie sieci. Strategie ładowania zostały przetestowane w domu składającym się z układu fotowoltaicznego, systemu magazynowania i pojazdu elektrycznego.

„eAutarke Zukunft: Lösungen in Smart Grid-Strukturen” [44]. W ramach projektu system car-sharing został przetestowany we flocie pojazdów użytkowych. Pojazdy są ładowane w zależności od: dostępnej energii pochodzącej z OZE, priorytetów ładowania i przy uwzględnieniu obciążenia sieci. Opracowane strategie zostały poddane analizie w teście terenowym: wspólne korzystanie z samochodu, we flocie pojazdów oraz w samowystarczalnym energetycznie gospodarstwie domowym.

„Demand response - das Auto als aktiver Speicher und virtuelles Kraftwerk” [45]. W ramach projektu wykorzystano pojazdy elektryczne do magazynowania energii w celu ustabilizowania pracy systemu. Produkcja energii jest sprawdzana przez pojazdy elektryczne w celu zbuforowania nadwyżki energii i uwolnienia jej w okresach szczytowego obciążenia. Pojazdy elektryczne reprezentują kontrolowane obciążenie w wirtualnej elektrowni. Projekt pozwolił na przetestowanie usługi systemowej w terenie w ramach inteligentnej strategii ładowania.

„Tanken im Smart Grid - Netzentlastung durch intelligentes Laden” [46]. Projekt „Tanken im Smart Grid” analizuje integrację samochodowego magazynowania energii ze źródłem energii elektrycznej w zdecentralizowanych systemach. Inteligentne sterowanie procesem ładowania powinno odciążać sieć energetyczną i wspierać wykorzystanie energii odnawialnej. Technicznie opracowano tutaj produkt do zoptymalizowanej sieci, zależnej od lokalizacji i technologii ładowania pokładowego w pojazdach elektrycznych. Strategie ładowania są zoptymalizowane dla zestawu akumulatorów w pojeździe.

„A9-DC-Ladung” [47]. W ramach tego projektu Siemens wraz z E.ON i BMW zbudował osiem stacji szybkiego ładowania DC z nową wtyczką combo i stacją ładowania AC, aby umożliwić wygodne podróżowanie na duże odległości wzdłuż autostrady A9. W tym celu instalowane zostało centrum do zarządzania operacyjnego.

Smart Grid Integration (SGI)” [50]. W ramach tego projektu badane są nowe, inteligentne koncepcje i strategie, które umożliwiają kontrolowane ładowanie akumulatorów pojazdów elektrycznych przez operatorów sieci dystrybucyjnych, bez uszczerbku dla wydobytych użytkowników pojazdów elektrycznych. W perspektywie długoterminowej, w oparciu o te badania, należy zapewnić bezpieczne i opłacalne dostawy energii do pojazdów elektrycznych, przy jak największym możliwym wykorzystaniu energii elektrycznej z lokalnych (odnawialnych) źródeł energii.

Wnioski

W pracy przedstawiono aktualny stan i perspektywy rozwoju elektromobilności w aspekcie obecnych, ekologicznych wyzwań społecznych. Zwrócono uwagę na zwiększającą się rolę OZE w miksie energii elektrycznej co podnosi ekologiczną atrakcyjność aut elektrycznych. Opisano elementy pojazdu elektrycznego, ich współdziałanie oraz wpływ procesu ładowania na zwiększone obciążenie sieci elektroenergetycznej. Przedstawiono aktualne technologie wykorzystywane w procesach ładowania i rozładowywania pojazdów elektrycznych oraz zwrócono uwagę na problematykę wyboru właściwej technologii ładowania pojazdów. Wskazano na aktualne trendy w zakresie budowy złączy wykorzystywanych w procesie ładowania oraz zaproponowano system ICT dla stacji ładującej i pojazdu elektrycznego. Opisano proces ładowania przy wykorzystaniu komunikacji wysokiego poziomu z wykorzystaniem centrum kontroli mobilności MACC. Omówiono metody zarządzania energią pojazdu elektrycznego pozwalające na poprawę jakości zasilania. Ponadto omówiono projekty badawcze, wymuszające rozbudowę aktualnej sieci elektroenergetycznej o infrastrukturę stacji ładowania w ramach usług systemowych.

Na podstawie zebranych informacji, inteligentna integracja pojazdów elektrycznych z systemem elektroenergetycznym, szczególnie wykorzystującym w znacznym stopniu OZE, może być korzystna zarówno dla bardziej ekologicznego poruszania się i transportu, ale również dla stabilizacji dynamiki generacji energii z przyłączonych źródeł odnawialnych. Ewentualne dodatkowe koszty modernizacji sieci, związane z elektromobilnością, wymagają poszukiwania rozwiązań pozwalających na inteligentne zarządzanie procesami ładowania co w skutecznym sposób pozwoli na uniknięcie tákowych. Pojazdy elektryczne mogą zostać wyposażone w odpowiednie systemy komunikacyjne pozwalające na zwiększenie ich funkcjonalności i świadczenie usług systemowych. O aktualności proponowanych rozwiązań świadczą liczne projekty realizowane w Europie, które potwierdzają w pełni możliwość ich implementacji w przyszłości.

Autorzy: Prof. Dr.-Ing. Przemysław Komarnicki, University of Applied Sciences, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg, Germany, e-mail: przemyslaw.komarnicki@h2.de; Dr.-Ing. Christoph Wenge, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Sandtorstraße 22, 39106 Magdeburg, Germany, e-mail: christoph.wenge@iff.fraunhofer.de; mgr inż. Robert Pietracho, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Poland, robert.pietracho@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Styczynski Z.A., Stötzer M., Müller G., Komarnicki P., Belmans R., Driesen J., Hansen A.B., Pecas Lopes J., Hatzigiorgiou N. Challenges and barriers of integrating e-cars into a grid with high amount of renewable generation, 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, 26-31 August, 2012.
- [2] Buchholz B.M., Styczynski Z.A., Smart Grid, Springer-Verlag GmbH Germany, 2020.
- [3] Komarnicki P., Haubrock J., Styczynski Z.A., Elektromobilität und Sektorenkopplung, Springer Verlag, 2017.
- [4] Stötzer M., Styczynski Z.A., Hansch K., Naumann A., Komarnicki P., Concept and potential of electric vehicle fleet management for ancillary service provision 2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech., Grenoble, France, 16-20 June, 2013
- [5] Alemany J.M., Arendarski B., Lombardi P., Komarnicki P., Accentuating the renewable energy exploitation: Evaluation of

- flexibility options, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 102 (2018), 131-151.
- [6] Wenge C., Arendarski B., Haensch K., Naumann A., Komarnicki P., Electric vehicle simulation models for power system applications IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, California USA, 22-26 July, 2012.
 - [7] Wenge C., Winkler T., Stötzer M., Komarnicki P., Power quality measurements of electric vehicles in the low voltage power grid, 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, 17-19 October, 2011, 679-683.
 - [8] Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce „Energia do przyszłości” Agencja Środowiska, 2014.
 - [9] Sprawozdanie z realizacji Krajowych ram polityki rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, Ministerstwo Energii, Warszawa, Sierpień 2019, [dostęp: 05.02.2020]
 - [10] How EU Member States roll-out electric-mobility: Electric Charging Infrastructure in 2020 and beyond. Platform elektromobility EU (online: www.transportenvironment.org/publications), [dostęp: 17.02.2020].
 - [11] Maggio G., Cacciola G., A variant of the Hubbert curve for world oil production forecasts, *Energy Policy*, 37 (2009), nr. 11, 4761-4770.
 - [12] Well-to-Wheels Analyses. Komisja Europejska, 2016 (online: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw>), [dostęp: 05.02.2020].
 - [13] L. Gao, Well-to-Wheels Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Alternative Fuels, *International Journal of Applied Science and Technology*, 1 (2011), nr. 6, 1-8.
 - [14] Żebrowski K., Detka T., Małek K., Analiza porównawcza danych raportów dotyczących emisji CO2 oraz całkowitych kosztów posiadania (TCO) pojazdu elektrycznego w odniesieniu do pojazdu z napędem konwencjonalnym, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, 119 (2018), nr. 3, 161-170.
 - [15] Ottensmann A., Technische Anforderungsanalyse an Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge am Beispiel einer ambulanten Pflegeflotte. Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science an der Fern Universität Hagen, Fakultät für Mathematik und Informatik, Lehrgebiet elektrische Energietechnik, Prof. Dr.-Ing. D. Hackstein, 2013.
 - [16] Schugt M., Tybel M., Absicherung elektrischer Antriebskomponenten in (H)EVs. Fachartikel, (online: www.all-electronics.de/absicherung-elektrischer-antriebskomponenten-in-hevs/), [dostęp: 17.02.2020].
 - [17] Hofer K., Elektrotraktion: Elektrische Antriebe in Fahrzeugen. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2006.
 - [18] Ottensmann A., Technische Anforderungsanalyse an Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge am Beispiel einer ambulanten Pflegeflotte. Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science an der Fern Universität Hagen, Fakultät für Mathematik und Informatik, Lehrgebiet elektrische Energietechnik, Prof. Dr.-Ing. D. Hackstein, 2013.
 - [19] Kasprzyk L., Domeracka A., Burzynski, D., Modelling of lithium-ion batteries operation and life in electric vehicles, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr. 12, 158-161.
 - [20] Kasprzyk L., Wybrane zagadnienia modelowania trwałości akumulatorów litowo-jonowych w pojazdach elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr. 3, 70-73
 - [21] Komarnicki P., Lombardi P., Styczynski Z.A., Electric Energy Storage Systems – Flexibility Options for Smart Grids, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-53275-1.
 - [22] Braess H.H., Seiffert U., Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6th ed. Verlag Vieweg & Teubner Wiesbaden, 2011.
 - [23] Hennings W., Linssen J., Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. Advances in Systems Analyses 1. Jülich: Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, 2012.
 - [24] Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen. Deutsches Institut für Normung, DIN EN 50272, 2011.
 - [25] Straßenfahrzeuge – 60 V und 600 V einadrige Niederspannungsleitungen – Teil 1: Maße, Prüfverfahren und weitere Anforderungen für Kupferkabel. Deutsches Institut für Normung, DIN ISO 6722, 2011.

- [26] Road vehicles – Automotive cables. International Organization for Standardization, ISO 19642, 2014.
- [27] Straßenfahrzeuge – Runde, beschichtete, 60 V und 600 V geschirmte und ungeschirmte einzel- oder mehradrige Kabel – Prüfungen und Anforderungen für normale und Hochleistungs-Kabel International Organization for Standardization, ISO 14572, 2014.
- [28] Straßenfahrzeuge – Schutzschalter – Teil 5: Schutzschalter mit Schrauben, Nennspannung von 450 V. International Organization for Standardization, ISO 10924-5, 2016.
- [29] Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland, Statusbericht und Handlungsempfehlungen. Nationale Plattform Elektromobilität, 2015, Berlin.
- [30] Winkler T., Komarnicki P., Mueller G., Heideck G., Heuer M., Styczynski Z.A., Electric vehicle charging stations in Magdeburg, 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, Michigan USA, 7-11 September, 2009, 60-65.
- [31] Zajkowski K., Seroka K., Przegląd możliwych sposobów ładowania akumulatorów w pojazdach z napędem elektrycznym, *Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 18 (2017), nr. 7-8, 483-486.
- [32] BMW wireless (online: www.qmerit.com/bmw/wireless) [dostęp: 16.02.2020]
- [33] International Organization for Standardization, ISO 17840, Road vehicles – Information for first and second responders, 2015.
- [34] Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), "The German Standardization Roadmap for Electromobility – Version 2", Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2012, (online: <https://www.vda.de/en/services/Publications/the-german-standardization-roadmap-for-electromobility---vers.-2.html>), [dostęp: 17.02.2020].
- [35] Wenge C., Komarnicki P., Styczynski Z.A., Mobile Storage and optimal charging Strategies. Magdeburger Forum zur Elektrotechnik (MaFo), 2013, ISBN 978-3-940961-95-2.
- [36] Wenge C., Komarnicki P., Styczynski Z.A., Models and boundaries of data exchange between electric-vehicle and charging-point. Example of a practical realisation, 4th International Symposium: Modern Electric Power Systems, 20-22 September 2010,
- [37] Wenge C., Komarnicki P., Styczynski Z.A., Mobility System and Charging Strategies, The power grid of the future. Proceedings No 2 in the scope of Mega Grant Baikal, 2 (2013), ISBN: 978-3-940961-95-2
- [38] Road vehicles – Vehicle to grid communication interface. International Organization for Standardization und International Electrotechnical Commission, ISO/IEC 15118, 2013.
- [39] Agsten M., Iffland M., Schlegel M., Westermann D., Utilizing battery Electric and Plug-in Hybrids for smart grid operation techniques, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan USA, 24-28 July, 2011.
- [40] Harighi T., Padmanaban S., Bayindir R., Hossain E., Holm-Nielsen J.B., Electric Vehicle Charge Stations Location Analysis and Determination – Ankara (Turkey) Case Study, *Energies*, 12 (2019), 3472
- [41] E-Mobility4GridService, (online: www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/konvergente-infrastrukturen/e-mobility4gridservice.html), [dostęp: 13.02.2020]
- [42] Holger J., Carsten S., Volkswagen Kraftwerk GmbH, Virtuelles Bilanzkreis-Kraftwerk - Virt-Bilanz-KKW : gemeinsamer Abschlussbericht der Verbundpartner : Potenzialanalyse eines Verbundbetriebes von Blockheizkraftwerken zur Ausregelung von Bilanzkreisabweichungen, verursacht durch eine zunehmende Durchdringung von Elektromobilität und Erneuerbaren Energien: Berichtszeitraum: 01.01.2013-30.06.2016, (<https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A88359448X/>), [dostęp: 17.02.2020]
- [43] Kugler M., Frank C., Osswald S., Lienkamp M., Miramontes M., Kinigadner J., sun2car@GAP Abschlussbericht - Untersuchung des Kundenannahmeverhaltens zur Integration von Erneuerbarer Energie in Elektrofahrzeuge innerhalb der e-GAP Modellkommune Garmisch-Partenkirchen, Technische Universität München, Februar, 2016
- [44] eAutarke Zukunft: Lösungen in Smart-Grid-Strukturen Empirische. Evaluation und Optimierung von Elektromobilität in unterschiedlichen Lebens- und Arbeitsbereichen, Universität Hildesheim 2016 (online: http://www.transportation-design.org/cms/front_content.php?idcat=18&idart=416), [dostęp: 13.02.2020]
- [45] Röhrig M., Demand Response - das Auto als aktiver Speicher und virtuelles Kraftwerk: Abschlussbericht: Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2015. (online: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A870921525/>), [dostęp: 17.02.2020]
- [46] Tanken im Smart Grid. Netzentlastung durch intelligentes Laden, Technische University Clausthal, Institute for Electrical Energy Engineering and Energy Systems (online: <http://pivot.o.de/>), [dostęp: 17.02.2020]
- [47] Ramirez L., Dinter A., Lenski G., Lammert H., Vierheilig N., Ebertsch S., Förderprojekt Technik, Umsetzbarkeit, Akzeptanz der DC-Ladung auf der Kernachse A9 (München-Nürnberg-Leipzig) - A9-DC-Ladung: Schlussbericht für die Technische Informationsbibliothek, (online: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A864389841/>), [dostęp: 17.02.2020]
- [48] „e-Mobilität“ - Energieautarke Elektromobilität im Smart-Micro-Grid, Technische Universität München 2014, (online: <https://www.ar.tum.de/aktuell/news-singleview/article/e-mobilitaet-energieautarke-elektromobilitaet-im-smart-micro-grid/>), [dostęp: 17.02.2020].
- [49] Haupt H., Bäuml G., Bärwaldt G., Nannen H., Kammerlocher M. Das Forschungsprojekt "INEES" – Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen (The 'INEES' research project – intelligent grid integration of electric vehicles to provide system services). In: Liebl J. (eds) Grid Integration of Electric Mobility. Proceedings, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017
- [50] Dauer D., Kießling A., Krimmling T., Lierzer S., Schäfer C., Zimmermann D., Bridging IT GmbH, Verbundprojekt: Smart Grid Integration (SGI): Schlussbericht: im Spitzencluster Elektromobilität Süd-West "road to global market," Mannheim, 2016. (online: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A880205059/>), [dostęp: 17.02.2020]