

Urszula Motowidlak

Uniwersytet Łódzki

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2777-9451>

Joanna Górniak

Uniwersytet Łódzki

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0345-6428>

Czynniki krytyczne rozwoju elektromobilności z perspektywy zrównoważonych i rezylientnych systemów mobilności

Streszczenie

Celem artykułu jest identyfikacja czynników krytycznych warunkujących rozwój ekosystemu elektromobilności w kontekście zrównoważonych, innowacyjnych i rezylientnych systemów mobilności. Artykuł poświęcono badaniu relacji zachodzących między rozwojem systemu elektromobilności a możliwościami kreowania zrównoważonego i odpornego na zakłócenia łańcucha wartości tego systemu. W artykule dokonano przeglądu zasadniczych strategii rozwoju mobilności, zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu i pakietu „Fit for 55”. Ukazano aktualny stan rozwoju rynku pojazdów elektrycznych (EV), który implikuje szereg wyzwań w kontekście kreowania zrównoważonej i rezylientnej mobilności.

Przeгляд literatury przedmiotu oraz wyniki badań pilotażowych potwierdziły znaczenie czynników krytycznych. Zdaniem respondentów podjęcie aktywnych działań w zakresie zwiększenia poziomu zrównoważenia i rezylientności systemu należy w pierwszej kolejności skoncentrować na dalszym

rozwoju infrastruktury ładowania oraz kreowaniu łańcucha wartości baterii do pojazdów EV, czyli *engineering resilience*.

Słowa kluczowe: mobilność, elektromobilność, zrównoważone i rezylienne systemy mobilności
Kody klasyfikacji JEL: Q50, R44, R42

1. Wprowadzenie

Wydarzenia ostatnich kilkunastu miesięcy jednoznacznie potwierdziły, że nieprzewidywalność i niestabilność stają się codziennością w zarządzaniu transportem i logistyką. Systemy transportowe i logistyczne stanęły w obliczu olbrzymich zakłóceń wynikających z agresji Rosji na Ukrainę, pandemii COVID-19, eskalacji napięć handlowych i cyberataków na dużą skalę. Rekordowe ceny ropy naftowej na świecie, w połączeniu z niezrównoważonym zużyciem energii przez transport, degradacją środowiska i zmianą klimatu, to czynniki potwierdzające konieczność odejścia od strategii „Business as Usual” w odniesieniu m.in. do rozwoju transportu.

Analitycy z Banku Światowego oceniają, że transport odpowiada za ok. 64% światowego zużycia ropy naftowej, 27% całkowitego zużycia energii i 23% światowej emisji CO₂ związanej z energią [World Bank]. W Unii Europejskiej (UE), zgodnie z danymi Europejskiej Agencji Środowiska (ang. European Environment Agency, EEA), zużycie energii w transporcie w 2020 r. było o około 30% wyższe niż w 1990 r. Surowce ropopochodne zaspokajały ok. 93% potrzeb energetycznych transportu, przy czym największe zapotrzebowanie zgłaszała transport samochodowy. W 2020 r. odpowiedzialny był za 72% całkowitych potrzeb paliwowych transportu. Jednocześnie w okresie 1990–2020, w związku z coraz większym zapotrzebowaniem na przewozy osób i ładunków, emisje pochodzące z transportu wzrosły o ponad 18%, z uwzględnieniem międzynarodowego transportu lotniczego. W 2020 r. transport odpowiadał za 28% całkowitej emisji CO₂ w UE, z czego 73% pochodziło z transportu samochodowego. Odnotowany w pierwszym półroczu 2020 r. spadek emisji spowodowany pandemią COVID-19 był tylko tymczasowy. Prognozy wskazują, że bez wdrożenia dodatkowych środków na rzecz rozwoju niskoemisyjnego transportu, emisje z transportu w 2030 r. mogą wzrosnąć o ok. 10% powyżej poziomów z 1990 r. [Greenhouse Gas].

Coraz większa świadomość funkcjonowania systemów transportowych w warunkach zakłóceń zmienia percepcję podejścia do rozwoju ekosystemu elektromobilności. Postrzegany jest jako szansa na przyspieszenie rozwoju transportu zeroemisyjnego, może także sprzyjać budowaniu rezyliennych systemów mobilności, wpisując się w założenia strategii „Building Back Better”. Strategia ta znalazła poparcie wśród uczestników Światowego Forum Ekonomicznego w 2021 r., w kontekście trwałego i odpornego (ang. *resilience*) ożywienia gospodarczego. Za priorytet uznano inwestowanie w innowacyjną i odporną infrastrukturę oraz wprowadzanie ulepszeń w wymiarze społecznym i środowiskowym. Szacunki pokazują

bowiem, że około 70% przyszłego wzrostu emisji CO₂ będzie pochodziło z infrastruktury, która jeszcze nie została zbudowana [Global Infrastructure, 2022]. Przyszłe inwestycje związane z rozwojem infrastruktury transportu powinny więc koncentrować się na działaniach ograniczających zużycie węgla, przejściu od paliw kopalnych do odnawialnych źródeł energii oraz na promowaniu przyjaznych dla środowiska środków transportu.

Celem artykułu jest identyfikacja czynników krytycznych warunkujących rozwój ekosystemu elektromobilności w kontekście zrównoważonych, innowacyjnych i rezylientnych systemów mobilności. Koncentracja badań na poszukiwaniu związków między rozwojem systemu elektromobilności a możliwościami kreowania zrównoważonego i odpornego na zakłócenia łańcucha wartości tego systemu zdeterminowała hipotezę badawczą, która brzmi: istnieje możliwość identyfikacji i wartościowania działań podejmowanych na rzecz rozwoju elektromobilności, zgodnie z założeniami zrównoważonego i innowacyjnego systemu mobilności.

Dostosowanie działań w systemie elektromobilności do idei zrównoważonej i rezylientnej gospodarki jest wyzwaniem, ale też stwarza nowe możliwości biznesowe. Przedsiębiorstwa już dostrzegają potencjał ekonomiczny związany z łańcuchem wartości elektryfikacji pojazdów. W długoterminowej wizji gospodarki neutralnej dla klimatu do 2050 r. stwierdzono jednoznacznie, że elektromobilność będzie jedną z istotnych ścieżek technologicznych prowadzących do neutralności emisyjnej oraz budowy innowacyjnych i odpornych na zakłócenia systemów mobilności [Europejski Zielony Ład, 2019, s. 4].

2. Strategie rozwoju zrównoważonych, innowacyjnych i rezylientnych systemów mobilności

Kierunki rozwoju zrównoważonego i innowacyjnego transportu wpisują się w realizację celów obecnie obowiązujących dokumentów strategicznych, które stanowi Agenda ONZ 2030 [Przekształćmy nasz świat, 2015] oraz przyjęte porozumienie paryskie w sprawie zmiany klimatu [The Paris Agreement, 2015]. Nasilające się zmiany klimatyczne i środowiskowe skłoniły UE do podjęcia pilnych i ambitnych działań w ramach Europejskiego Zielonego Ładu.

W przyjętym w grudniu 2019 r. komunikacie zobowiązano się do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r., włączając „zieloną transformację” do kluczowych programów przekrojowych oraz polityk sektorowych [Europejski Zielony Ład, 2019, s. 5]. Społeczeństwo i gospodarka o zerowej emisji netto nie będą jednak możliwe bez zrównoważonego i innowacyjnego oraz odpornego na zakłócenia systemu transportu. Szacuje się, że osiągnięcie neutralności klimatycznej będzie wymagało ograniczenia do 2050 r. o 90% emisji pochodzących z transportu. Za jeden ze strategicznych elementów przejścia do „czystej”, bezpiecznej i inteligentnej sieci transportu uznano rozwój infrastruktury. Podkreślono znaczenie całościowego podejścia do planowania infrastruktury w kontekście rozwoju spójnej multimodalnej sieci, z uwzględnieniem wymiaru lokalnego oraz potrzebę odpowiedniego rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych.

Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności („EUSSTM”), z 9 grudnia 2020 r., zawiera konkretne cele pośrednie w dążeniu do inteligentnej i zrównoważonej przyszłości transportu. Dotyczą one trzech głównych obszarów działań, w ramach których rozwój poszczególnych elementów infrastruktury traktowany jest priorytetowo. Aby osiągnąć systemową zmianę w zakresie zerowego poziomu emisji CO₂ z transportu, należy [Strategia na rzecz, 2020, s. 3]:

- uczynić wszystkie rodzaje transportu bardziej zrównoważonymi,
- zadbać o szeroką dostępność zrównoważonych rozwiązań alternatywnych w systemie transportu multimodalnego,
- wdrożyć odpowiednie zachęty wspierające transformację.

W strategii określono łącznie 82 inicjatywy w 10 kluczowych obszarach i konkretne działania służące znacznemu ograniczeniu obecnej zależności od paliw kopalnych, większemu wykorzystaniu zrównoważonych rodzajów transportu oraz internalizacji kosztów zewnętrznych, w szczególności za dostęp do infrastruktury i poprzez mechanizmy ustalania opłat za emisję CO₂. Z ogłoszonych inicjatyw i towarzyszących im zadań szczegółowych wynika, że wszystkie rodzaje transportu muszą stać się bardziej zrównoważone, z szeroko dostępnymi ekologicznymi alternatywami i odpowiednimi instrumentami, które będą wspierać przyspieszenie procesu obniżenia emisyjności systemu mobilności. W odniesieniu do infrastruktury transportu za priorytetowe uznano rozwój przystępnych cenowo rozwiązań alternatywnych w celu zwiększenia popytu na pojazdy bezemisyjne, wykorzystanie technologii cyfrowych wspierających funkcjonowanie zintegrowanej, multimodalnej sieci transportowej umożliwiającej przewóz osób i transport ładunków oraz „zielone” finansowanie w celu zwiększenia odporności infrastruktury transportu.

W lipcu 2021 r. Komisja Europejska przedstawiła pakiet propozycji dla UE „Gotowi na 55” [2021, s. 1–19] (ang. „Fit for 55”), mających na celu zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych (ang. *Greenhouse Gases*, GHG) o co najmniej 55% do 2030 r. w porównaniu z poziomami z 1990 r. oraz osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. Propozycje Komisji obejmują bardziej rygorystyczne przepisy w celu ograniczenia emisji, ze szczególnym naciskiem na sektor transportu, wskazując na konieczność realizacji niezbędnych inwestycji infrastrukturalnych. Kluczowym priorytetem w zakresie ograniczania emisji będzie dalszy rozwój paliw alternatywnych i stosownej infrastruktury. Ocena obecnych przepisów przyjętej w 2014 r. dyrektywy wykazała bowiem, że rynek infrastruktury paliw alternatywnych w UE nadal znajduje się w dość wczesnej fazie rozwoju. Zwrócono uwagę na:

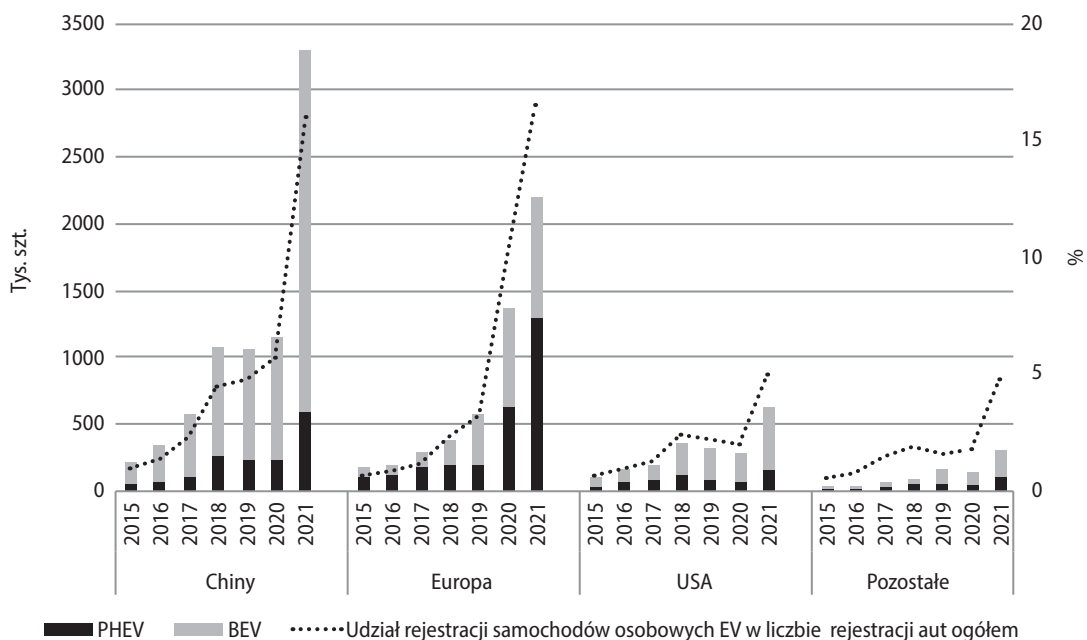
- brak kompletnej sieci infrastruktury umożliwiającej bezproblemowe podróżowanie po całej UE,
- potrzebę dalszych wspólnych specyfikacji technicznych w celu zapewnienia interoperacyjności w świetle powstających technologii,
- brak pełnych informacji dla użytkowników, jednolitych i łatwych w użyciu metod płatności oraz pełnej przejrzystości cen w całej Unii.

Zasadniczy cel UE, jakim było zapewnienie spójnego rozwoju rynku pojazdów zasilanych paliwami alternatywnymi, nie został osiągnięty.

3. Rozwój rynku pojazdów elektrycznych

Występująca w ostatnich latach wysoka dynamika rozwoju rynku sprzedaży pojazdów EV nie słabnie. Rozwój elektryfikacji transportu został skoncentrowany na segmencie samochodów osobowych. Zwiększone wsparcie polityczne dla EV w ramach pakietów ożywienia gospodarczego przyczyniło się do wzrostu sprzedaży, zwłaszcza w drugiej połowie 2020 r. w Europie. Wzrost ten nastąpił pomimo kryzysu COVID-19, który spowodował 22-procentowy spadek sprzedaży europejskiego rynku samochodowego w stosunku do 2019 r. W rezultacie rynek EV w Europie odnotował najwyższy wzrost w 2020 r., a sprzedając 1,4 mln sztuk, Europa stała się liderem, wyprzedzając Chiny (rysunek 1). W kolejnym roku wydatki publiczne na dotacje i zachęty dla pojazdów EV wzrosły niemal dwukrotnie w stosunku do 2020 r. i wynosiły prawie 30 mld USD. Jednocześnie coraz więcej krajów zobowiązało się do stopniowego wycofywania silników spalinowych lub wyznaczyło ambitne cele dotyczące elektryfikacji pojazdów na nadchodzące dziesięciolecia, co spowodowało dalszy wzrost sprzedaży pojazdów EV. W 2021 r. ich sprzedaż podwoiła się w stosunku do 2020 r., osiągając poziom 6,6 mln szt. EV. W analizowanym roku sprzedano najwięcej pojazdów EV w Chinach (3,3 mln). Sprzedaż w Europie wykazywała dalszy duży wzrost (o 65% w stosunku do 2020 r.) i wyniosła 2,3 mln, zaś w USA wzrosła do 630 tys. W 2022 r. utrzymał się duży wzrost globalnej sprzedaży samochodów EV, z 2 mln sprzedanymi w pierwszym kwartale, co stanowi wzrost o 75% w porównaniu z tym samym okresem roku poprzedniego [Global EV, 2022, s. 17].

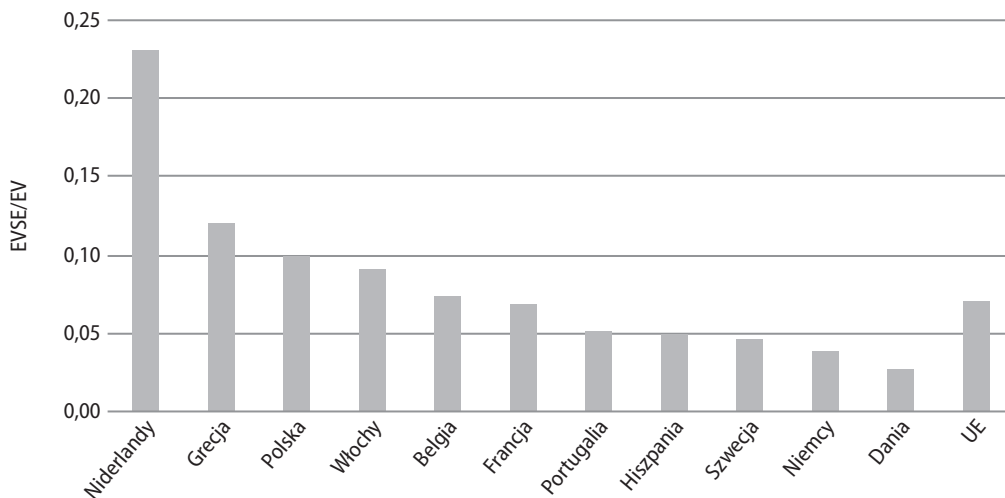
Rysunek 1. Sprzedaż samochodów osobowych EV (BEV i PHEV) (w tys. szt.) i udział w liczbie rejestracji aut ogółem w wybranych regionach świata (w %)



Źródło: opracowano na podstawie [Global EV, 2022, s. 15].

Państwa członkowskie UE w większości nie spełniły jednak zalecanych celów dotyczących wystarczającej liczby publicznie dostępnych punktów ładowania rozmieszczonych tak, aby osiągnąć odpowiednie pokrycie infrastrukturą w celu umożliwienia użytkowania EV co najmniej w aglomeracjach miejskich/podmiejskich i innych obszarach gęsto zaludnionych. Zgodnie z dyrektywą z 2014 r. w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych [Dyrektywa 2014/94/UE, art. 4], średnia liczba publicznie dostępnych punktów ładowania (ang. *Electric Vehicle Supply Equipment*, EVSE) w 2020 r. powinna odpowiadać co najmniej jednemu punktowi ładowania na 10 pojazdów EV, co stanowi współczynnik 0,1. Wartość tego współczynnika w UE na koniec 2020 r. wyniosła 0,09, zaś w 2021 r. 0,07, czyli poniżej rekomendacji. Istniały jednocześnie duże rozbieżności między krajami Unii (rysunek 2). W Niderlandach i Grecji wartości tego współczynnika wynosiły odpowiednio 0,23 i 0,12, przy czym w publicznie dostępnych punktach ładowania dominowały ładowarki powolne. Natomiast w państwach słabo zaludnionych wskaźniki te były najniższe, np. Danii – 0,03, zaś w Szwecji – 0,05. Większość właścicieli pojazdów EV może bowiem w dużej mierze korzystać z ładowania w prywatnych domach. Ponadto sieci publiczne w tych państwach cechują się wyższym odsetkiem ładowarek szybkich (17% w Danii i 19% w Szwecji). Największe rynki EV w UE, tj. Francja i Niemcy, nie spełniają zaleceń dotyczących dostępności ładowarek publicznych.

Rysunek 2. Stosunek publicznie dostępnych punktów ładowania do liczby pojazdów EV w wybranych państwach członkowskich Unii Europejskiej w 2021 r. (EVSE/EV)



Źródło: opracowanie własne na podstawie [Global EV, 2022, s. 51].

Opublikowana w 2021 r. nowelizacja dyrektywy w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych ma stymulować stosowanie zrównoważonych paliw we wszystkich rodzajach transportu [Wniosek w sprawie rozwoju, 2021]. Zintensyfikowaniu wdrażania i wykorzystania paliw odnawialnych i niskoemisyjnych musi towarzyszyć utworzenie kompleksowej sieci infrastruktury ładowania i tankowania opartej na sprawiedliwym geograficznie roz-

kładzie, aby w pełni umożliwić powszechne wykorzystywanie pojazdów niskoemisyjnych i bezemisyjnych we wszystkich rodzajach transportu. Cele szczegółowe rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych obejmują:

- zapewnienie minimalnej infrastruktury wspierającej wymagany poziom upowszechnienia pojazdów napędzanych paliwami alternatywnymi we wszystkich rodzajach transportu i we wszystkich państwach członkowskich, aby osiągnąć cele UE w zakresie klimatu,
- zagwarantowanie pełnej interoperacyjności infrastruktury, w tym z uwzględnieniem infrastruktury transgranicznej,
- dostarczenie kompletnych informacji dla użytkowników i odpowiednich opcji płatności.

Wszyscy użytkownicy pojazdów napędzanych paliwami alternatywnymi (w tym statków i samolotów) muszą mieć możliwość łatwego poruszania się po terytorium UE dzięki kluczowej infrastrukturze, takiej jak autostrady, porty i lotniska.

4. Wyzwania w zakresie kształtowania innowacyjnych i rezyliентnych systemów elektromobilności

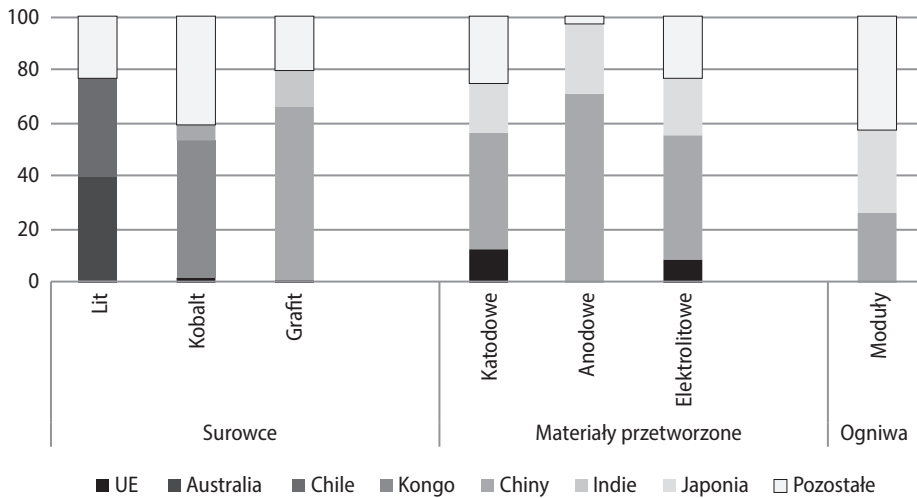
4.1. Łańcuch wartości baterii do pojazdów elektrycznych

Optymistyczne prognozy stałego wzrostu popytu na samochody elektryczne nie oznaczają, że elektryfikacja pojazdów nie mierzy się z szeregiem wyzwań. Z punktu widzenia założeń zrównoważonych i rezyliентnych systemów mobilności istotnymi obszarami są więc kwestie związane z ogniwami baterii.

W pojazdach z napędem elektrycznym najczęściej stosowane są ogniwa baterii litowo-jonowych, do produkcji których wykorzystywane są surowce krytyczne (lit, nikiel, kobalt, mangan i grafit). Proces rafinacji i przetwarzania niemal wszystkich tych surowców w standardzie wymaganym dla baterii realizowany jest obecnie w Chinach, co sprawia, że państwo to pełni dominującą funkcję w łańcuchu dostaw baterii (rysunek 3). Odpowiada za produkcję 3/4 wszystkich baterii litowo-jonowych oraz posiada 70% zdolności produkcyjnych katod i 85% zdolności produkcyjnych anod, stanowiących kluczowe składniki baterii. Podobna zależność dotyczy także łańcuchów wartości innych kluczowych materiałów wykorzystywanych w pojazdach EV, w szczególności metali ziem rzadkich do wytwarzania magnezów trwałych o dużej gęstości energii, które mają obecnie kluczowe znaczenie w procesie produkcji silników elektrycznych o największej gęstości mocy [UE – Chiny, 2019].

Dzisiejsze łańcuchy dostaw baterii skoncentrowane są więc głównie w Chinach. Europa odpowiada za ponad 1/4 światowej produkcji pojazdów EV, ale oprócz przetwarzania kobaltu na poziomie 20% jej udział w łańcuchu baterii jest nieznaczny. USA odgrywają jeszcze mniejszą rolę w globalnym łańcuchu dostaw baterii do pojazdów EV, z 10-procentową produkcją pojazdów i 7-procentowym udziałem w zakresie zdolności produkcyjnej baterii.

Rysunek 3. Stopień zależności od dostaw materiałów w poszczególnych etapach łańcucha wartości baterii do pojazdów elektrycznych (w %)



Źródło: opracowanie własne na podstawie [Lebedeva, Di Persio, Boon-Brett, 2017, s. 7–45].

Szybki wzrost sprzedaży pojazdów elektrycznych podczas pandemii przetestował odporność łańcuchów dostaw baterii, a wojna Rosji w Ukrainie jeszcze bardziej zaostrzyła wyzwanie. Wzrosły ceny surowców, takich jak kobalt, lit i nikiel. W maju 2022 r. ceny litu były ponad siedmiokrotnie wyższe niż na początku 2021 r. Inwazja Rosji na Ukrainę wywołała dalsze naciski, ponieważ Rosja dostarcza 20% światowego niklu o wysokiej czystości. Jeśli ceny metali w 2022 r. pozostaną tak wysokie, jak w pierwszym kwartale, akumulatory staną się o 15% droższe niż w 2021 r. [Global EV, 2022, s. 138]. Z prognoz wynika, że presja na dostawy materiałów krytycznych będzie rosła wraz z rozwojem elektryfikacji transportu samochodowego [Global Supply, 2022, s. 5–6]. W krótkim okresie potrzebne będą dodatkowe inwestycje, szczególnie w górnictwie, gdzie czas realizacji jest znacznie dłuższy niż w przypadku innych części łańcucha dostaw elektromobilności.

Dążąc do osiągnięcia założeń zrównoważonych, innowacyjnych i rezyliencyjnych systemów mobilności, przedsiębiorcy starają się opracować metody budowy ogniw baterii pozwalające ponownie je wykorzystać, poddać recyklingowi lub użyć w schemacie kaskadowym. Ważnymi etapami łańcucha baterii są więc: standaryzacja komponentów, projektowanie zakładające wydłużanie żywotności produktów oraz ułatwiające segregację, rozdzielanie lub ponowne wykorzystanie zużytych produktów i materiałów. Inteligentne funkcje programowe w chmurze nieustannie analizujące stan baterii inicjują odpowiednie działania, których celem jest zapobieganie lub spowolnienie procesu starzenia się ogniw. Dzięki tym działaniom możliwa jest redukcja zużycia baterii nawet o 20%. Usługi w chmurze przyczyniają się także do optymalizacji procesu ładowania baterii, co pozwala aktywnie chronić ją przed przyspieszoną degradacją.

Jednym ze sposobów ponownego wykorzystania baterii wycofanych z użytkowania w samochodach jest tzw. drugie życie, czyli ich wykorzystanie do mniej wymagających zastosowań, jak np. magazynowanie energii produkowanej za pomocą małych instalacji fotowoltaicznych czy jako domowe lub modułowe magazyny energii. Wielu czołowych producentów aut elektrycznych, m.in. Tesla, Nissan, BMW czy Mercedes, ma już w swojej ofercie komercyjne rozwiązania tego typu.

Kolejnym działaniem w ramach budowy łańcucha wartości baterii zgodnie z założeniami zrównoważonych i rezyliencyjnych systemów mobilności jest opracowanie technologii umożliwiającej wykorzystanie mniej zużytych modułów do budowy nowej, zastępczej baterii tego samego typu. Jednym z przykładów realizacji takiego przedsięwzięcia jest refabrykacja częściowo lub całkowicie zużytych baterii z pojazdów elektrycznych, realizowana od 2018 r. w Japonii przez spółkę 4R Energy Corporation. Zastępcze baterie litowo-jonowe przeznaczone są do samochodów elektrycznych Nissana Leaf pierwszej generacji [Sustainability Report, 2021, s. 36–38]. Ważnym etapem w cyklu życia baterii jest również proces recyklingu baterii mający na celu przede wszystkim odzysk cennych metali, między innymi kobaltu i niklu. Ich wydobycie wiąże się z wysokimi kosztami środowiskowymi i społecznymi, stąd efektywność recyklingu jest bardzo istotna. Wśród rozwijających się w ostatnich latach technik recyklingu baterii litowo-jonowych wymienia się technologie biologiczne, wykorzystujące działania mikroorganizmów do odzysku metali. Recykling baterii litowo-jonowych jest złożonym technologicznie procesem i nie w pełni jeszcze efektywnym. Stanowi jednocześnie bardzo atrakcyjny obszar dla nowych inwestycji. Wielkość globalnego rynku recyklingu baterii do pojazdów EV została wyceniona na 1,6 mld USD w 2021 r. i oczekuje się, że osiągnie około 19,3 mld USD do 2030 r. [Electric Vehicle Battery, 2022].

Rozwój elektromobilności pozwala także na obniżenie intensywności emisji CO₂ ogółem w cyklu życia pojazdu i baterii. Obecnie produkcja pojazdów z napędem elektrycznym wiąże się z większym zapotrzebowaniem na energię w stosunku do pojazdów z napędem konwencjonalnym i w konsekwencji z większym poziomem emisji CO₂. Wynika to przede wszystkim z dużej ilości energii elektrycznej zużywanej na wytwarzanie baterii litowo-jonowych napędzających pojazd. Badania przeprowadzone przez W. Helmersa, J. Dietza i M. Weissa wskazują na ogromny potencjał ograniczenia emisji CO₂ i dowodzą, że zwiększenie udziału energii pochodzącej z OZE do produkcji baterii litowo-jonowych pozytywnie wpływa na redukcję emisji w cyklu produkcyjnym [Helmers, Dietz, Weiss, 2020, s. 18]. W przypadku wykorzystania energii pochodzącej z wiatru ślad węglowy produkcji baterii jest znikomy i wynosi ok. 0,4% w całkowitej emisji zdominowanej przez dostarczenie mineralnych komponentów baterii. Natomiast produkcja w kraju o wysokim udziale energii pozyskiwanej z węgla, jakim są Chiny, odpowiada za wysoki poziom emisji CO₂. Realizacja strategicznego łańcucha wartości baterii w Europie może przynieść wymierne oszczędności w zakresie redukcji emisji CO₂ z powodu zwiększającego się udziału OZE w koszyku energetycznym.

4.2. Elektromobilność współdzielona

Zgodnie z obecnymi i prognozowanymi trendami rozwoju można stwierdzić, że usługi cyfrowe odegrają istotną rolę w upowszechnianiu koncepcji zrównoważonego i rezylientnego łańcucha elektromobilności. Modele biznesowe, które odchodzą od własności na rzecz korzystania, przyczyniają się do podniesienia wartości użytkowej pojazdów elektrycznych. Przedsiębiorstwa posiadające znaczne udziały w systemie elektromobilności i kontrolujące wiele etapów linearnego łańcucha wartości dostrzegły potencjał przedkładania idei dostępu ponad posiadanie. Podróż samochodem udostępnionym (ang. *car sharing*) czy wybór jazdy na żądanie (ang. *ride hailing*) są korzystne nie tylko w wymiarze ekonomicznymi i społecznym, lecz także środowiskowym. Sprzyjają m.in. ograniczeniu zapotrzebowania na surowce i energię niezbędne w procesie produkcji samochodów elektrycznych i baterii, redukują emisję CO₂ i zanieczyszczenia, a także sprzyjają efektywnemu gospodarowaniu przestrzenią miejską. Ponadto przesunięcie odpowiedzialności za jakość świadczonych usług mobilności z konsumenta na przedsiębiorstwa sprzyja innowacjom na rzecz poprawy żywotności środków transportu.

Usługi mobilności i przedsiębiorstwa zajmujące się udostępnianiem środków transportu, w tym elektrycznych, rozwijają się bardzo dynamicznie. Duży sukces w zakresie współdzielenia uzyskano głównie w wypadku elektrycznych hulajnóg oraz nieco mniejszy w odniesieniu do skuterów elektrycznych. Usługi w zakresie wspólnej mobilności stanowią mniej niż 5% całkowitej odległości przejechanej rocznie przez pojazdy osobowe, ale cechują się bardzo wysoką dynamiką wzrostu. Ponad miliard ludzi na całym świecie korzysta obecnie z jakiejś formy aplikacji mobilnej. Przewiduje się, że do 2040 r. udział wspólnych usług w zakresie mobilności wzrośnie do 19% całkowitej liczby kilometrów przejechanych przez pojazdy osobowe, powodując spadek popytu na samochody prywatne. Jednocześnie elektromobilność współdzielona będzie charakteryzowała się wyższą dynamiką wzrostu niż podróże prywatnymi samochodami elektrycznymi z uwagi na dostępność ekonomiczną. Obecnie pojazdy elektryczne stanowią 2,2% wspólnej floty mobilności. W 2040 r. ich udział w tej flocie ma wzrosnąć do 80% [Electric Vehicle, 2022, s. 4].

4.3. Synergia pojazdów EV i sieci elektroenergetycznej

Za przyszłościowe kierunki rozwoju elektromobilności z perspektywy zrównoważonych i rezylientnych systemów mobilności można uznać technologię dwukierunkowego przepływu energii „pojazd – sieć” (ang. *Vehicle to Grid, V2G*) oraz system inteligentnego ładowania pojazdów elektrycznych (ang. *Smart Charging*). Samochody EV dzięki potencjałowi technologii V2G i *Smart Charging* stwarzają ogromne możliwości w zakresie zwiększenia stabilizacji systemu elektroenergetycznego i poprawy jego efektywności, pełniąc jednocześnie funkcje transportowe [Motowidlak, Witkowski, Wiśniewski, 2018, s. 22–23]. Dwukierunko-

wy przepływ energii zwiększa więc możliwości aplikacyjne pojazdów EV, które stają się platformą ciągłego i optymalnego zarządzania przepływami energii elektrycznej. Zagadnienie to nabrało znaczenia wobec wzrostu udziału energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych, głównie z wiatru i Słońca w bilansie energetycznym wielu państw. Rozwój OZE jest aktualnie jednym z zasadniczych celów polityki energetycznej i klimatycznej państw członkowskich UE, a także wielu innych państw świata. Jednak dla sprawnego działania sieci stanowi on duże wyzwanie. Wykorzystanie OZE wpływa wprawdzie pozytywnie na stan środowiska, stanowiąc istotną alternatywę dla paliw kopalnych, ale jednocześnie zmienia funkcjonowanie sieci elektroenergetycznej, powodując konieczność rozwiązywania problemów związanych z bezpieczeństwem jej pracy oraz zapewnieniem wymaganej przez odbiorców niezawodności i jakości zasilania. W warunkach rozwoju OZE wagi nabiera także problem utrzymania przystępnych cen energii elektrycznej. Dostęp do baterii pojazdów EV, tj. do mobilnych źródeł energii dzięki technologii „pojazd – sieć”, stwarza nowe możliwości ich wykorzystania. W takiej konfiguracji mogą one stać się elementem stabilizującym pracę sieci i zwiększającym jej elastyczność. Sprzyjają jednocześnie integracji OZE z siecią elektroenergetyczną oraz mają korzystny wpływ na funkcjonowanie infrastruktury dostaw energii elektrycznej.

Scenariusz współpracy pojazdów EV z siecią kreuje nowe podejście do zarządzania energią i przybliża do urzeczywistnienia koncepcji inteligentnego miasta (ang. *Smart City*). Dwukierunkowy przepływ energii pozwala na jej „zakup” w okresach niskiego zapotrzebowania, a następnie na jej „sprzedaż” do sieci w godzinach obowiązywania wyższej taryfy. W praktyce właściciele pojazdów EV, podłączając je do sieci, stają się aktywnymi uczestnikami rynku energii elektrycznej i mogą uzyskiwać z tego tytułu dodatkowy dochód. *Smart Charging* oraz komunikacja dwukierunkowa, np. V2G, mają więc potencjał w zakresie rozwoju inteligentnego zarządzania energią, którego celem jest poprawa jakości zasilania i niezawodności dostaw energii elektrycznej. Należy jednak wziąć pod uwagę wiele aspektów, które będą miały znaczenie dla powodzenia tego procesu, w tym m.in.: zapewnienie komunikacji poprzez sieć IP z ładowanymi pojazdami, inwestycje w systemy i technologie informacyjne i komunikacyjne, implementacja systemów typu Demand Side Response (DSR) [Drożdż, Kuczkowski, 2018]. Pojawienie się na masową skalę nowej grupy odbiorców energii elektrycznej wymusi rozbudowę inteligentnej infrastruktury ładowania pojazdów EV oraz wpłynie na zmiany w sieci elektroenergetycznej w kierunku *Smart Grid*.

5. Znaczenie czynników krytycznych w zakresie rozwoju zrównoważonych i rezylientnych systemów elektromobilności

Rozwój rynku pojazdów EV w warunkach nasilających się zmian środowiskowych, uwarunkowań geopolitycznych oraz zakłóceń w globalnych łańcuchach dostaw wymaga podjęcia efektywnych działań zapobiegawczych i adaptacyjnych w łańcuchu wartości systemu elektromobilności. Wypracowane standardy konstrukcyjne, jak również rozbudowa stosownej

infrastruktury ładowania pojazdów EV mogą okazać się niewystarczające w kontekście wyzwań na rzecz wzmacniania rezyliencji i stopnia zrównoważenia. Skuteczność realizacji tych wyzwań nie jest możliwa bez uzyskania odpowiedniego poziomu świadomości w odniesieniu do istoty czynników krytycznych i konieczności podejmowania działań w łańcuchu wartości systemu elektromobilności. Waga tych czynników była implikacją ogólnej koncepcji badania.

Tabela 1. Zestaw zmiennych służących ocenie znaczenia czynników krytycznych w zakresie rozwoju zrównoważonych i rezyliencyjnych systemów elektromobilności

Symbol	Czynniki krytyczne
A ₁	Wsparcie ekonomiczno-polityczne
A ₂	Promowanie elektromobilności w gospodarkach rozwijających się i wschodzących
A ₃	Rozwój infrastruktury ładowania
A ₄	Odpowiednie regulacje prawne
A ₅	Postęp technologiczny w zakresie baterii
A ₆	Rozwój technologii odnawialnych źródeł energii
A ₇	Rozwój inteligentnej sieci elektroenergetycznej
A ₈	Rozwój technologii V2G
A ₉	Rozwój nowych technologii informacyjnych i materiałowych
A ₁₀	Wzrost świadomości w zakresie zakłóceń w łańcuchach dostaw i zmian środowiskowych
A ₁₁	Rozwój recyklingu i gospodarki o obiegu zamkniętym
A ₁₂	Nowe wzorce mobilności

Źródło: opracowanie własne.

Analiza literatury przedmiotu i działania wynikające z zakłóceń w łańcuchach dostaw pozwoliły na identyfikację zasadniczych czynników krytycznych z perspektywy rozwoju zrównoważonych i rezyliencyjnych systemów elektromobilności, które przedstawiono w tabeli 1. Istotność tych działań oceniono przez badanie ankietowe bezpośrednie, przeprowadzone w ramach wywiadu pogłębionego. Badanie przeprowadzono od marca do lipca 2022 r. W badaniu wzięło udział 23 menedżerów przedsiębiorstw działających w Polsce, odpowiedzialnych za zarządzanie flotą samochodową. Badanie miało charakter pilotażowy. Pozwoliło jednak w sposób szacunkowy dokonać oceny znaczenia poszczególnych czynników krytycznych. Wyniki tej oceny zostaną wykorzystane do uszczegółowienia kierunków dalszych badań.

Pytania i zasady udzielania odpowiedzi odwoływały się do stopnia akceptacji. W celu pomiaru intensywności „zgody” ze stwierdzeniami zastosowano pięciostopniową skalę Likerta: 5 – zdecydowanie tak; 4 – raczej tak; 3 – ani tak, ani nie; 2 – raczej nie; 1 – zdecydowanie nie. Zmienność odpowiedzi dotyczących poszczególnych pozycji skali, zawartych w pytaniu, oszacowana została na podstawie udziałów procentowych, a następnie miar zmienności (tabela 2).

Wyniki badania ankietowego menedżerów odpowiedzialnych za zarządzanie flotą pojazdów przedstawione w tabeli 2 wskazują na ogólną wysoką świadomość znaczenia czynników krytycznych w zakresie rozwoju zrównoważonych i rezyliencyjnych systemów elektromobilności. Wszystkie działania uznano za ważne. Zmienne postrzegane przez ankietowanych za bardzo ważne to: rozwój infrastruktury ładowania (A₃), postęp technologiczny w zakresie

baterii (A_5) oraz wsparcie ekonomiczno-polityczne (A_1). Wysoko oceniono również przyjęcie odpowiednich regulacji prawnych (A_4 , średnia 4,40 i odchylenie standardowe 0,71) oraz rozwój inteligentnej sieci elektroenergetycznej (A_7 , średnia 4,24 i odchylenie standardowe 0,96). W badaniu wystąpiły jednocześnie dwie zmienne, które uznano za ważne, ale o najmniejszym stopniu istotności. Są to A_9 (rozwój nowych technologii informacyjnych i materiałowych) oraz A_8 (rozwój technologii V2G).

Tabela 2. Charakterystyka zmienności odpowiedzi

Symbol	Pomiar intensywności zgody (w %)					Miary		
	5	4	3	2	1	Średnia	Wariancja	Odchylenie standardowe
A_1	55,2	39,1	4,1	1,2	0,4	4,48	0,45	0,67
A_2	35,1	44,2	14,5	6,1	0,1	4,08	0,74	0,86
A_3	80,2	11,9	1,4	0,3	6,2	4,61	1,03	1,02
A_4	49,8	44,1	2,8	3,1	0,2	4,40	0,51	0,71
A_5	69,2	22,7	5,8	2,1	0,2	4,59	0,52	0,72
A_6	33,1	28,2	35,8	2,1	0,8	3,91	0,84	0,91
A_7	48,5	36,8	7,9	3,9	2,9	4,24	0,92	0,96
A_8	15,6	24,7	48,5	11,2	0,0	3,45	0,78	0,88
A_9	18,6	32,0	37,3	11,8	0,3	3,57	0,87	0,93
A_{10}	28,1	35,8	26,2	9,8	0,1	3,82	0,91	0,95
A_{11}	22,3	39,1	27,2	7,2	4,2	3,68	1,06	1,03
A_{12}	22,8	47,2	17,3	12,3	0,4	4,48	0,45	0,67

Źródło: obliczenia własne.

Reasumując, należy powiedzieć, że rozwój zrównoważonego i odpornego na zakłócenia systemu elektromobilności wymaga podjęcia aktywnych działań. Zdaniem respondentów największe znaczenie mają działania dostosowawcze oparte na *engineering resilience*.

6. Podsumowanie

W warunkach rosnącej złożoności oraz zmienności otoczenia funkcjonowanie systemów mobilności wymaga identyfikowania i przewidywania potencjalnych zakłóceń, ale przede wszystkim umiejętności aktywnego nimi zarządzania. Kluczowym wyzwaniem w zakresie kształtowania zrównoważonej i rezylientnej elektromobilności jest opracowanie szczegółowej mapy łańcucha wartości, stanowiącej podstawę do dynamicznej konfiguracji złożonej struktury sieciowej, zorientowanej na przystosowywanie jej struktur, procesów i technologii do zmian oraz zagrożeń kryzysowych. Rośnie świadomość istoty czynników krytycznych warunkujących rozwój zrównoważonego, innowacyjnego i odpornego na zakłócenia systemu

elektromobilności. Dotyczą one oczekiwanego postępu w zakresie rozwoju infrastruktury ładowania, efektywnych technologii napędu elektrycznego oraz wdrożenia inteligentnych rozwiązań systemowych. Szczegółowa diagnoza tych czynników w turbulentnym otoczeniu wymaga dalszych, pogłębionych badań.

Bibliografia

1. Drożdż W., Kuczkowski R. [2018], *Wpływ rozwoju pojazdów elektrycznych na warunki pracy sieci Operatorów Systemu Dystrybucyjnego w Polsce*, w: *Elektromobilność w rozwoju miast*, red. W. Drożdż, Wydawnictwo Naukowe PWN.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, Dz.U. UE L 307/20.
3. *Electric Vehicle Battery Recycling Market Report 2022–2030* [2022], <https://www.marketdata-centre.com/electric-vehicle-battery-recycling-market-11862>, dostęp: 18.08.2022.
4. *Electric Vehicle Outlook* [2022], BloombergNEF.
5. Europejski Zielony Ład [2019], Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, COM (2019) 640, Bruksela.
6. *Global EV Outlook* [2022], IEA, Paris.
7. *Global Infrastructure Trends – PwC*, <https://www.pwc.com/gx/en/industries/capital-projects-infrastructure/publications/infrastructure-trends.html>, dostęp: 11.08.2022.
8. *Global Supply Chains of EV Batteries* [2022], IEA.
9. „Gotowi na 55”: osiągnięcie unijnego celu klimatycznego na 2030 r. w drodze do neutralności klimatycznej [2021], Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, COM(2021) 550, Bruksela.
10. *Greenhouse Gas Emissions from Transport in Europe*, <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport>, dostęp: 09.08.2022.
11. Helmers E., Dietz J., Weiss M. [2020], *Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions*, „Sustainability”, no. 12.
12. Lebedeva N., Di Persio F., Boon-Brett L. [2017], *Lithium Ion Battery Value Chain and Related Opportunities for Europe*, JRC Science Hub, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
13. Motowidlak U., Witkowski Ł., Wiśniewski J. [2018], *Pojazdy elektryczne jako element sieci elektroenergetycznych. Raport*, PSPA, Warszawa.
14. *Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030* [2015], Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne ONZ w dniu 25 września 2015 r., A/RES/70/1.
15. Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności – europejski transport na drodze ku przyszłości [2020], Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, COM (2020) 789, Bruksela.
16. *Sustainability Report* [2021], Nissan Motor Corporation.

17. *The Paris Agreement* [2015], Paris, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>, dostęp: 12.08.2022.
18. UE–Chiny – perspektywa strategiczna [2019], Wspólny Komunikat do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej i Rady, JOIN (2019) 5, Strasburg.
19. United Nations Conference on Climate Change COP 21 [2015], November 30 to December 11, Paris 2015.
20. Wniosek w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych i uchylające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady [2021], COM (2021) 559, Bruksela.
21. World Bank, *Transport: Overview*, <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/overview#1>, dostęp: 7.08.2022.

Critical factors for the development of electromobility from the perspective of sustainable and resilient mobility systems

Summary

The aim of the article is to identify the critical factors determining the development of the electromobility ecosystem in the context of sustainable, innovative and responsive mobility systems. The article is devoted to the study of the relationship between the development of the electromobility system and the possibilities of creating a sustainable and resistant to disturbance value chain of this system. The article reviews the basic strategies for the development of mobility in line with the assumptions of the European Green Deal and the „Fit for 55” package. The current state of development of the electric vehicle (EV) market is shown, which implies a number of challenges in the context of creating sustainable and resilient mobility.

A review of the literature on the subject and the results of preliminary research confirmed the importance of critical factors. According to the respondents, taking active measures to increase the level of sustainability and resilience of the system should, first of all, be focused on the further development of the charging infrastructure and creating a battery value chain for EVs, i.e., „engineering resilience”.

Keywords: mobility, electromobility, sustainable and responsive mobility systems
