

Jerzy Szkutnik

Akademia Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa

e-mail: jszkutnik@ans.edu.pl

ORCID: 0000-0002-0066-4013

DOI: 10.71433/2025.87.1.01

PERSPEKTYWY I KIERUNKI ROZWOJU TRANSPORTU BEZEMISYJNEGO

© 2025 Jerzy Szkutnik

Praca opublikowana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe (CC-BY 4.0).

Skrócona treść licencji na <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Cytuj jako: Szkutnik, J. (2025). Perspektywy i kierunki rozwoju transportu bezemisyjnego. W: B. Detyna (red.), *Branża TSL. Strategie – trendy – perspektywy. Seria: Logistyka. Współczesne Wyzwania*, t. 15 (s. 7–15). Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa.

Streszczenie

Przedmiot i cel pracy: Rozdział zawiera prezentację rozwiązań o charakterze techniczno-organizacyjnym w sektorze energetycznym o wyjątkowo aktualnym aspekcie ekologicznym.

Materiały i metody: Rozdział stanowi kompendium wiedzy nt. pakietu rozwiązań dla sektora energetycznego i transportu przy wdrażaniu elektromobilności w Polsce.

Wyniki: Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz techniczno-ekonometrycznych uznano za uzasadnione wdrażanie proponowanych przez autora rozwiązań jako modelowych możliwości zwiększania wpływu aspektów ekologicznych na funkcjonowanie sektora transportu publicznego i towarowego w Polsce w najbliższej przyszłości.

Wnioski: Konieczne są dalsze badania, zmierzające do zainicjowania dynamicznych zmian i zmniejszenia negatywnego wpływu sektora transportowego na środowisko.

Słowa kluczowe: analiza lokalizacyjna, optymalizacja logistyczna, sieć skojarzona, stacje ładowcze

1. Wprowadzenie

Transport jest tak istotną częścią gospodarki światowej, że można go uznać za czynnik kreujący wiele zjawisk i procesów zależnych od społeczeństwa i środowiska naturalnego. Ma on charakter infrastrukturalny oraz sieciowy i jest kształtowany w procesie jego historycznego rozwoju. Znajomość ogólnych trendów dotyczących społeczeństwa i gospodarki jest potrzebna, by wyprzedzać ich skutki dla funkcjo-

nowania transportu poprzez rozwój infrastruktury oraz tworzenia coraz bardziej szerokiej oferty usługowej uwarunkowanej otoczeniem. Takim megatrendem jest globalizacja, w ujęciu ekonomicznym oznaczająca „proces zbliżania rosnącej współzależności gospodarek narodowych, który wyraża się we wzroście obrotów handlowych, przepływie kapitału, usług, a także wymiany siły roboczej i wiedzy pomiędzy krajami” (Wojewódzka-Król i Załoga, 2022, s. 12). Proces ten przebiega w światowej gospodarce na różnych poziomach, mamy wszak do czynienia z globalizacją rynków i globalizacją sektorów. Globalizacja wprowadza także nowe wymiary w konkurencji i konkurencyjności. Jest ponadto postrzegana jako podstawa mobilności społeczeństwa, a transport jest tym czynnikiem, który umożliwia realizację tej mobilności. Konieczne będą zatem radykalne zmiany w transporcie, obejmujące przede wszystkim infrastrukturę, środki transportu oraz współpracę między gałęziami i środkami transportu, zaś kierunki tych zmian będą kreowane także przy udziale sztucznej inteligencji. Wyzwania, przed którymi staje transport unijny, to przede wszystkim coraz większa przepustowość infrastruktury oraz efektywność systemu transportowego, której najważniejsze przymioty stanowią:

- niezawodność,
- fakt, że jest zielona – zmniejszenie oddziaływania środowiskowego ruchu pojazdów,
- to, że jest bezpieczna i inteligentna – optymalizacja ruchu, monitoring ruchu,
- fakt, że jest „ludzka” – co oznacza wielofunkcyjność wykorzystania przestrzeni zajętej przez infrastrukturę.

Ponadto istniejące ogólne założenia obowiązującej polityki transportowej Unii Europejskiej zakładają redukcję powodowanej przez transport emisji gazów cieplarnianych o 60% w 2050 r. w stosunku do 1990 r. W poszczególnych segmentach obejmują one takie elementy, jak (Wojewódzka-Król i Załoga, 2022, s. 603):

- misja – utworzenie jednolitego europejskiego obszaru transportowego, opartego na konkurencyjnym i zasobooszczędnym systemie transportowym,
- wizja – wzrost udziału transportu w tworzeniu PKB, wspieranie mobilności, obniżenie poziomu emisji gazów cieplarnianych,
- strategia – rozwój i wprowadzenie nowych paliw oraz systemów napędowych, optymalizacja multimodalnych łańcuchów transportowych, wzrost efektywności wykorzystania środków transportu i infrastruktury.

Unia Europejska nakreśliła także obszary strategii na rzecz inteligentnej i zrównoważonej mobilności. Zaliczono do nich następujące przedsięwzięcia:

1. Wykorzystanie pojazdów bezemisyjnych, paliw odnawialnych i niskoemisyjnych oraz rozbudowa związanej z nimi infrastruktury, wprowadzenie nowej normy Euro 7.
2. Tworzenie bezemisyjnych lotnisk i portów.
3. Bardziej zrównoważoną i „zdrowszą” mobilność między miastami i w miastach – promocję kolei i transportu publicznego.
4. Ekologizację transportu towarowego.

5. Ustalenie opłat za emisję gazów cieplarnianych i zapewnienie lepszych zachęt dla użytkowników.
6. Urzeczywistnienie zautomatyzowanej multimodalnej mobilności.
7. Zastosowanie innowacji, a także danych i sztucznej inteligencji na rzecz inteligentniejszej mobilności.
8. Wzmocnienie jednolitego rynku – finansowanie infrastruktury.
9. Uczciwą i sprawiedliwą mobilność – oznaczającą dostępność cenową i przestrzenną.
10. Poprawę bezpieczeństwa i ochronę transportu.

Właściwe dobrane narzędzia ekonomiczne pozwolą na rozwój najbardziej efektywnych gałęzi z punktu widzenia użytkownika transportu, a konieczność spełnienia przez transport norm środowiskowych doprowadzi do osiągnięcia celu, jakim jest dekarbonizacja gospodarki unijnej.

2. Cel pracy i metodyka badawcza

Celem głównym niniejszego rozdziału jest prezentacja oryginalnych rozwiązań autora dotyczących sektora elektroenergetycznego, które odnoszą się do wdrożenia kompleksowej procedury budowy stacji ładowczych OPLSł (Optymalizacyjna Procedura Lokalizacji Stacji Ładowczych) do samochodów elektrycznych w aspektach zarówno technicznych, jak i organizacyjnych wskazanych w pracy (Szkutnik, 2023). Postawiony cel pozostaje w bezpośredniej relacji z celami przedsiębiorstw energetycznych, instytucji odpowiedzialnych za rozwój infrastruktury drogowej i energetycznej, umożliwiającej płynny ruch samochodów elektrycznych na głównych drogach tranzytowych w Polsce. Rozwój mobilności w oparciu o napędy elektryczne jest jednym z priorytetów europejskiego Zielonego Ładu, które powinny współtworzyć warunki do zrównoważonego rozwoju kraju, zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, oszczędnego i racjonalnego użytkowania paliw i energii, rozwoju konkurencji, uwzględniania wymogów ochrony środowiska, a zatem powinny służyć podejmowaniu działań nakierowanych na skuteczną eliminację źródeł zanieczyszczenia. Wszystkie te aspekty uwzględniono przy opracowaniu rozwiązania OPLSł.

Celem komplementarnym względem celu głównego rozdziału jest zaprezentowane, w jaki sposób opisane rozwiązania powodują zmniejszenie negatywnego wpływu sektora transportowego na klimat. Do realizacji powyższych celów zastosowano podstawowe metodologie badawcze, tzn. analizę i syntezę, oraz narzędzia z zakresu badań statystycznych, głównie korelacji w zakresie identyfikacji istotnych czynników wpływających na ostateczny efekt. Wykorzystano także autorskie metodologie: sieci logistycznej oraz sieci skojarzonej. Pierwsza z nich daje możliwość wykorzystania w tym obszarze spojrzenia logistycznego. Jego najważniejsze elementy podano w dalszej części tekstu, zaś szersze omówienie tej metodologii zawarto w (Szkutnik, 2011).

Podstawą analiz jest geograficzny schemat sieci z zaznaczonymi głównymi punktami dostawy (zakupu) oraz odbioru (sprzedaży) dla referencyjnej spółki dystrybucyjnej. Przyjęte założenie stanowi, że punkty zasilania zewnętrznego znajdują się na przecięciu z linii zasilającej i granicy danej spółki. Punkty wewnętrzne zasilania (stacje NN/110 kV) oraz punkty odbioru są zdefiniowane współrzędnymi geograficznymi lokalizacji stacji. Danymi komplementarnymi są informacje o energiach dostarczanych do punktów odbiorczych, które także są zdefiniowane współrzędnymi, jak punkty zasilania. Analizy i badania przeprowadzono, wykorzystując autorską metodologię (Szkutnik, 2011), która opiera się na teorii logistycznej konfiguracji sieci logistycznej i została opracowana na potrzeby oceny sprawności sieci dystrybucyjnej energii elektrycznej. Metodologia ta daje także dodatkową możliwość rozmieszczenia punktów zasilania stacji ładowczych dla samochodów elektrycznych. Jest to problem logistyczny, podobnie jak rozłożenie źródeł wytwórczych w stosunku do centrów odbioru i konsumpcji energii elektrycznej. Ocenie będą podlegały następujące elementy sieci rozdzielczej:

- punkty zasilające sieci 110 kV,
- sieć (linie) 110 kV.

Zaproponowana metodologia wprowadza szereg charakterystyk, które pozwalają na ocenę pracy sieci. Pierwszą z nich jest zredukowany punkt zakupu i sprzedaży oraz punkt równowagi logistycznej energii elektrycznej spółki dystrybucyjnej. Wyznaczenie zredukowanego punktu zakupu energii elektrycznej spółki dystrybucyjnej (zredukowanego centrum zakupu) przeprowadza się na podstawie następujących zależności:

$$x_{cz} = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{zi} \cdot x_{zi})}{\sum_{i=1}^N E_{zi}}, \quad (1)$$

$$y_{cz} = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{iz} \cdot y_{zi})}{\sum_{i=1}^N E_{zi}} \quad (2)$$

gdzie: x_{zi} , y_{zi} – punkty zakupu energii elektrycznej w spółce dystrybucyjnej,
 E_{iz} – energia wprowadzona do spółki dystrybucyjnej [MWh], N – liczba punktów zasilających

Określenie zredukowanego punktu sprzedaży energii elektrycznej spółki dystrybucyjnej (zredukowanego centrum sprzedaży) przeprowadza się na podstawie następujących zależności:

$$x_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^M (E_{si} \cdot x_{si})}{\sum_{i=1}^M E_{si}} \quad (3)$$

$$y_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^M (E_{si} \cdot y_{si})}{\sum_{i=1}^M E_{ss}} \quad (4)$$

gdzie: x_{si} , y_{si} – punkty sprzedaży energii elektrycznej w spółce dystrybucyjnej, E_{si} – energia w punktach sprzedaży spółki dystrybucyjnej (stacje 110/SN, [MWh]), M – liczba punktów odbiorczych.

Określa się także odległość pomiędzy zredukowanym punktem zakupu a zredukowanym punktem sprzedaży na podstawie wzoru:

$$l_{zs} = \sqrt{(x_{cz} - x_{cs})^2 + (y_{cz} - y_{cs})^2} \quad (5)$$

gdzie: l_{zs} – odległość wypadkowa pomiędzy centrami zakupu i sprzedaży, x_{cz} , y_{cz} – współrzędne zredukowanego centrum zakupu energii elektrycznej, x_{cs} , y_{cs} – współrzędne zredukowanego centrum sprzedaży energii elektrycznej.

Do oceny logistycznej dystrybucji energii elektrycznej proponuje się wskaźnik dopasowania logistycznego dystrybucji, który wyraża się wzorem:

$$w_{ald} = 1 - \frac{l_{zs}}{L_{WZ}} \quad (6)$$

gdzie: w_{ald} – wskaźnik dopasowania logistycznego dystrybucji, l_{zs} – odległość wypadkowa pomiędzy centrami zakupu i sprzedaży, L_{WZ} – wskaźnik dopasowania punktów zakupu i sprzedaży energii elektrycznej.

Uzupełnieniem badań jest metodologia tzw. sieci skojarzonej (Szkutnik i Wróbel, 2012), polegająca na równoczesnej analizie dwóch sieci. W przypadku poszukiwania optymalnej lokalizacji stacji ładowczych skojarzenie dotyczy sieci głównych dróg oraz sieci energetycznej (rys. 1).

Do analiz wybrano wstępnie 28 lokalizacji (przy autostradach i drogach szybkiego ruchu) przyszłych stacji szybko ładowczych dużej mocy, umożliwiających uzupełnienie baterii samochodów (ciągników siodłowych) w ciągu maksymalnie 30 minut, oraz określono współrzędne geograficzne każdego z nich. Aby tak się stało, stacje muszą być zasilane ze stacji energetycznych 110 KV/SN poprzez linie napowietrzne średniego napięcia o dużym przekroju 150 mm² umożliwiającym przesłanie zakładanej mocy. Dla każdego z 28 punktów dobrano najbliższą stację zasilającą, ustalając współrzędne geograficzne, założono także, że każda z linii zasilających będzie przenosić w ciągu roku tę samą ilość energii elektrycznej. Na podstawie zależności (1-6) określono ostatecznie stopień skojarzenia sieci drogowej oraz energetycznej. Wynosi on:

$$w_{ald} = 0,973.$$



Rys. 1. Sieć skojarzona – sieć energetyczna – płaszczyzna górna, sieć drogowa – płaszczyzna dolna

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. Wycinek sieci – sieć energetyczna i drogowa

Źródło: opracowanie własne.

Wynik ten świadczy o tym, że skojarzenie tych sieci jest praktycznie bardzo wysokie, zatem można przyjąć, że zaproponowane lokalizacje stacji ładowczych są właściwe (maksymalna wartość wskaźnika w_{dl} wynosi 1). Wskaźnik ten także wskazuje, że koszty uruchomienia stacji ładowczej będą związane jedynie z jej wyposażeniem, dla mniejszych wartości tego wskaźnika koszty będą odpowiednio powiększone z powodu wybudowania koniecznej linii elektroenergetycznej zasilającej stację ładowczą.

Rysunek 2 przedstawia wycinek sieci drogowej i energetycznej w otoczeniu autostrady A1. Naniesiono na nim proponowane lokalizacje stacji ładowczych.

3. Praca systemu elektroenergetycznego jako wsparcie przy nowym modelu mobilności

Dzisiejszy model transportu jest realizowany głównie w oparciu o pojazdy, których silniki są zasilane paliwami płynnymi (benzyna, olej napędowy). Przewidywane zmiany w tym zakresie zakładają dynamiczny rozwój transportu ludzi oraz towarów z wykorzystaniem napędów elektrycznych. Do zrealizowania tego celu konieczna jest budowa bardzo dużej sieci stacji ładowczych, zlokalizowanych przy głównych drogach – autostradach, drogach szybkiego ruchu, drogach wojewódzkie. Autor rozdziału proponuje innowacyjne rozwiązanie w tym zakresie, oparte na wykorzystaniu dodatkowo systemu GIS (Pokorski i Zagórski, 2018), pozwalające na kompleksową i wielopłaszczyznową analizę, a także opracowanie wskazówek zapewniających najlepsze rozwiązania.

4. Propozycje rozwiązań

Punktem wyjścia do prezentacji rozwiązań jest zaproponowana przez autora koncepcja sieci skojarzonej (Szkutnik i Wróbel, 2012). Ponadto każda z lokalizacji będzie poddana kompleksowej procedurze budowy stacji ładowczych OPLSł przy zachowaniu zasad efektywności energetycznej (Soroczynski i Szkutnik, 2016; Szkutnik, 2008, 2009, 2011). Należy tu wyszczególnić następujące etapy (Szkutnik, 2023):

- etap określenia zdolności przesyłowej w punkcie (sieć 110 kV lub sieć systemowa 220/400 KV) – ustalenie maksymalnej mocy, która może być dodatkowo pobrana w rozpatrywanym punkcie sieci,
- etap wyboru rozwiązania stacji ładowczej, wybór napięcia (stałe, zmienne, stacja integralnie połączona lub nie z magazynem energii),
- opracowanie kosztorysu,
- wybór wykonawcy w trakcie przetargu.

Proponowana procedura będzie realizowana w ramach zarządzania procesowego w sposób efektywny, zapewniając skuteczne wykonanie zakładanych przedsięwzięć. Procedury te powinny być przeprowadzane dla każdego punktu osobno, a ostateczna lokalizacja będzie wynikać z minimum kosztów dla sieci skojarzonych (energetyczna i transportowa).

Wszystkie opisane zadania powinny być współbieżne z koncepcją przyszłościowych rozwiązań w obszarze logistyki.

Powyższe propozycje mieszczą się w katalogu zmian w transporcie obejmujących infrastrukturę, środki transportu, współpracę między gałęziami i środkami transportu, przy znacznym wsparciu sztucznej inteligencji, co jest uwarunkowane przede wszystkim zmianami klimatycznymi. Uwzględniają ponadto istniejące ogólne założenia obowiązującej polityki transportowej Unii Europejskiej.

Dla zapewnienia osiągnięcia zamierzonych celów autor proponuje nową strategię funkcjonowania branży TSL. Aktualny podział tej branży na trzy segmenty musi pozostać bez większych zmian, ponieważ został ukształtowany na przestrzeni kilkunastu lat. Przeobrażenia powinny dotyczyć sposobu zarządzania transportem. Wiodącym – nadrzędnym – elementem, jak dotychczas, będzie logistyka, ale wyposażona w nowe narzędzie opracowane w celu spełnienia wszystkich wytycznych Unii europejskiej na nadchodzące dekady. Będzie nim zintegrowany system realizacji dostaw – *Integrated Delivery Execution System* (IDES), z głównymi funkcjonalnymi elementami, które stanowić będą: bezpieczeństwo, ekologia, niezawodność – *Safety, Ecology, Reliability* (SER). IDES_{SER}[®] będzie wspomagał logistyków we wszelkich planowanych przedsięwzięciach transportowych przy jednoczesnym zagwarantowaniu właściwego spedytora oraz środka transportu. Proponowany system będzie uwzględniał poziom *Ecology Logistics* (elektromobilność, napędy wodorowe), poziom *Smart Logistics* (autonomiczne samochody) oraz wskaźniki bezpieczeństwa i niezawodności floty poszczególnych spedytorów, a także będzie wybierał tych, którzy pozostawiają najmniejszy ślad węglowy. Rozwiązanie będzie zatem stymulatorem wprowadzania do transportu jednostek o znikomej emisyjności CO₂ (Szkutnik, 2024).

5. Podsumowanie

Innowacyjne rozwiązania infrastruktury elektroenergetycznej, umożliwiające rozwój elektromobilności w Polsce, muszą zawierać najnowsze trendy z zakresu *Smart Grids* – a więc sieci inteligentnych – tzw. sieci hybrydowych (Szkutnik i Malinowski, 2019).

Według autora zastosowanie magazynów energii elektrycznej będzie istotne z wielu powodów. Najważniejszym jest to, że baterie akumulatorów umożliwią gromadzenie energii w okresach, kiedy występuje jej nadmiar w systemie, z możliwością wykorzystania w okresie jej niedoboru. Magazyny mogą stanowić także dodatkowe źródło w czasie awarii lub nagłych wzrostów obciążenia. Należy także stwierdzić, że zastosowanie dużych magazynów energii może okazać się rozwiązaniem alternatywnym dla budowania nowych elektrowni (Soroczyński i Szkutnik, 2016). To przeświadczenie zaczyna być już realizowane w polskiej i europejskiej elektroenergetyce.

Warto również zaznaczyć, że niniejszy rozdział jest równocześnie prezentacją potencjału badawczego Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa w jej współ-

pracy z otoczeniem gospodarczym i samorządami w Aglomeracji Wałbrzyskiej oraz w skali całego kraju przy realizacji projektów energetycznych o wiodącym aspekcie ochrony klimatu i środowiska.

Bibliografia

- Pokorski, G. i Zaskórski, P. (2018). Systemy informacji geoprzestrzennej w zarządzaniu procesami biznesowymi. *Nowoczesne Systemy Zarządzania. Instytut Organizacji i Zarządzania*, 13(2), 107–128.
- Soroczyński, B. i Szkutnik, J. (2016). Wpływ magazynów energii elektrycznej na pracę sektora energetycznego. *Rynek Energii*, (2), 63–67.
- Szkutnik, J. (2008). The energy efficiency as the necessary element of the planning in the sector of the electrical energy. W: *Proceedings of the 9th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2008* (s. 397–400). EPE.
- Szkutnik, J. (2023). Systemy informacji geograficznej jako istotne wsparcie rozwojowych procesów w logistyce. W: B. Detyna (red.), *Společne i techniczne wyzwania logistyki. Seria: Logistyka. Współczesne Wyzwania*, t. 14 (s. 143–150). Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa.
- Szkutnik, J. (2011). *Perspektywy i kierunki rozwoju systemu elektroenergetycznego. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- Szkutnik, J. (red). (2009). *Efektywność w sektorze dystrybucji energii elektrycznej, aspekty ekonomiczne*. Wydawnictwo Tekst Sp. z o.o.
- Szkutnik, J. i Malinowski, A. (2019). Hybrid low-voltage networks as the element of the lifting of the efficiency and the independence in the distribution of electricity. *Przegląd Elektrotechniczny*, (3), 16–18.
- Szkutnik, J. i Wróbel, J. (2012). Stopień skojarzenia sieci gazowych i elektroenergetycznych w Polsce. *Rynek Energii*, (3), 52–55.
- Wojewódzka-Król, K. i Załoga, E. (red). (2022). *Transport – tendencje zmian*. PWN.

Prospectus and Directions for the Development of Emission Free Transport

Abstract

Object and purpose of the work: The chapter contains a presentation of the author's solutions of a technical and organizational nature in the energy sector with an extremely current ecological aspect.

Materials and methods: The chapter is a compendium of knowledge on the package of solutions for the energy and transport sector in the implementation of electromobility in Poland.

Results: On the basis of the conducted research, technical and econometric analyzes, the implementation of the solutions proposed by the author was indicated as justified model possibilities of increasing the impact of ecological aspects on the functioning of the public and freight transport sector in Poland in the near future .

Conclusions: Further research in this area is necessary, aiming at dynamic changes, reducing the negative impact of the transport sector on the environment.

Keywords: geoinformatics, technical geography, location analysis, logistic optimization, cost reduction, charging stations