

1. Michał POŁECKI¹, 2. Łukasz ROKICKI¹, 3. Dariusz BACZYŃSKI¹ 4. Tomasz RODZIEWICZ²,
5. Andrzej SZYP², 6. Marek RAFALSKI²

Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki (1), TAURON Dystrybucja S.A. (2)
ORCID: 1. 0000-0002-8605-6501; 2. 0000-0003-3539-708X; 3. 0000-0001-9052-9159
4.0000-0002-5905-1289, 5 0000-0001-6295-0624, 6 0009-0005-0015-4338

doi:10.15199/48.2024.08.01

Optimalizacja lokalizacji i przyłączenia punktu ładowania autobusów elektrycznych do miejskiej sieci elektroenergetycznej za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji

Streszczenie: Aktualnie wiele spółek dystrybucyjnych w Polsce stoi przed wyzwaniem przyłączenia wielu stacji ładowania pojazdów elektrycznych do własnej sieci elektroenergetycznej. Szczególne znaczenie może mieć przyłączenie infrastruktury ładowania drogowego transportu publicznego. Zadanie to składa się z wyboru optymalnej lokalizacji i parametrów stacji ładowania dostosowanej do trasy autobusów miejskich oraz optymalnego podłączenia stacji do istniejącej infrastruktury elektroenergetycznej. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pracy badawczo-rozwojowej wykonanej przez Politechnikę Warszawską we współpracy z TAURON Dystrybucja S.A.

Abstract. Currently, many distribution system operators in Poland are facing the challenge of connecting numerous electric vehicle charging stations to their own power grid. The connection of infrastructure for charging public transportation, especially buses, may be of particular importance. Such task involves selecting the optimal location and parameters for charging stations tailored to the routes of city buses, as well as optimally connecting the stations to existing power infrastructure. This article presents the results of research and development work conducted by the Warsaw University of Technology in collaboration with TAURON Dystrybucja S.A. (**Optimal localization and connection of electric city bus charging station to urban power grid using artificial intelligence**).

Słowa kluczowe: optymalizacja, sieci miejskie, elektromobilność, autobusy elektryczne.

Keywords: optimization, urban distribution grids, electromobility, electric buses.

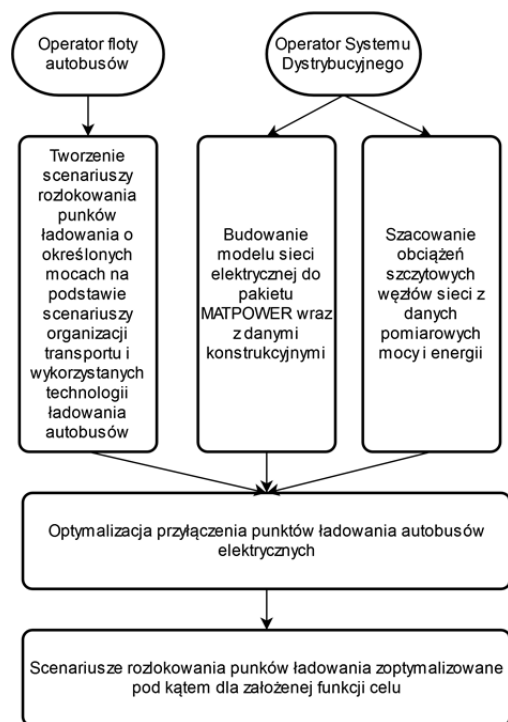
Wprowadzenie

Zadanie optymalizacji lokalizacji oraz sposobu przyłączenia punktów ładowania autobusów elektrycznych do miejskiej sieci elektroenergetycznej jest złożone. Złożoność polega na wielu dopuszczalnych kombinacjach rozwiązań przy jednoczesnym występowaniu ograniczeń technicznych takich jak: ograniczenia dopuszczalnego obciążenia elementów sieci i dopuszczalne poziomy napięć węzłowych. Przyłączenie wielu punktów ładowania jest zadaniem kombinatorycznym, którego rozmiar rośnie wykładniczo wraz z liczbą ładowarek. Jednym ze sposobów rozwiązania tego typu zagadnień jest stosowanie algorytmów sztucznej inteligencji.

Udział autobusów elektrycznych we flocie transportu publicznego systematycznie rośnie, co stanowi wyzwanie dla OSD, które muszą zapewnić możliwość ładowania pojazdów [1]. Zgodnie z [2] do 2028 30% pojazdów we flocie transportu publicznego na terenie jednostek samorządu terytorialnego o liczbie mieszkańców większej niż 50000 będzie musiało być elektryczne.

W [3] opisano szereg problemów związanych z punktami ładowania autobusów i proponowane metody rozwiązania problemów. Autorzy [4] zwracają uwagę na duże znaczenie obliczeń rozptylowych podczas przyłączania stacji ładowania autobusów by uniknąć kosztowych inwestycji sieciowych lub w magazyny energii.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pracy badawczo-rozwojowej wykonywanych dla TAURON Dystrybucja S.A. przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej polegającej na wykonaniu oprogramowaniu do optymalizacji lokalizacji i sposobu przyłączenia punktów ładowania autobusów elektrycznych.



Rys. 1 Przedstawienie głównych elementów składających się na proces optymalizacji przyłączenia infrastruktury ładowania do sieci SN

Przegląd wykonywanych zadań

Zadanie optymalizacji lokalizacji punktów przyłączenia autobusów miejskich, musiały poprzedzić analizy profili zapotrzebowania na energię po stronie stacji SN/nN oraz wyznaczenie profili zapotrzebowania na energię punktów ładowania autobusów elektrycznych. Kolejnym etapem przygotowawczym była budowa modelu sieci na podstawie danych z systemu SCADA oraz GIS. Po wykonaniu opisanych czynności można było przeprowadzić właściwy proces optymalizacji. Działania przedstawiono na rys. 1. W kolejnych częściach artykułu przedstawiono opis wykonanych podzadań.

Określenie profilu poboru energii dla punktów ładowania

Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną punktów ładowania szacowane zostało na podstawie rozkładów jazdy autobusów. Obliczenia prowadzone były z wykorzystaniem rozkładów jazdy autobusów dla dnia roboczego w ciągu roku szkolnego.

Przyjęto się założenie, że ładowarki szybkie instalowane będą na przystankach końcowych linii autobusowych, z możliwością obsługi kilku linii, jeśli przystanek końcowy będzie wspólny dla wielu linii. Jako przystanek końcowy rozumie się przystanek, na którym postój autobusu trwa średnio kilka minut.

Algorytm wyznaczania zapotrzebowania na moc i energię elektryczną punktów ładowania składa się z następujących elementów:

1. Pierwszym krokiem jest przeprowadzenie analizy kursów, wynikiem tej analizy jest przyporządkowanie autobusów do kursów oraz określenie czasów postojów na przystankach końcowych. Jako przystanki końcowe rozumie się przystanki, w których są zlokalizowane punkty szybkiego ładowania.
2. Następnie dla każdego autobusu wyznaczane jest zużycie energii do momentu dotarcia do przystanku końcowego, co pozwala określić ewentualną konieczność doładowania akumulatora przy scenariuszu drugim bądź wolumen doładowania akumulatora w przypadku scenariusza pierwszego.
 - a. W przypadku scenariusza pełnego doładowywania, wyznaczany jest czas ładowania tak, by nie przekroczyć całkowitej pojemności akumulatora oraz również nie przekroczyć dopuszczalnego czasu ładowania (czasu postoju na przystanku końcowym)
 - b. Dla drugiego scenariusza ładowanie nastąpi dopiero po osiągnięciu stanu naładowania akumulatora poniżej założonego poziomu.
3. Dla każdego autobusu, przy jego postoju na przystanku końcowym, wyszukiwana jest wolna ładowarka. Jeśli wszystkie ładowarki na przystanku końcowym są zajęte, ładowanie się nie odbywa. Po wyznaczeniu czasów ładowania, generowane są 24-godzinowe profile dla punktów ładowania, z dokładnością do 1 minuty.
- 4.

Szacowanie obciążeń sieci

Ogólną ideę sposobu szacowania zapotrzebowania szczytowego rocznego w węzłach sieci przedstawiono na rysunku

Rys. 2. Danymi pomiarowymi są w tym przypadku odczyty z liczników bilansujących stacji SN/nN. Nieodzownym elementem wstępnym przetwarzania danych jest przeprowadzenie walidacji danych i wyeliminowanie błędów, gdyż wpływają one istotnie na określenie mocy szczytowych poszczególnych stacji jak i na postać zależności estymacyjnej.

Przeprowadzone analizy obciążeń prowadzi do następujących wniosków:

- w przypadku posiadania danych z liczników

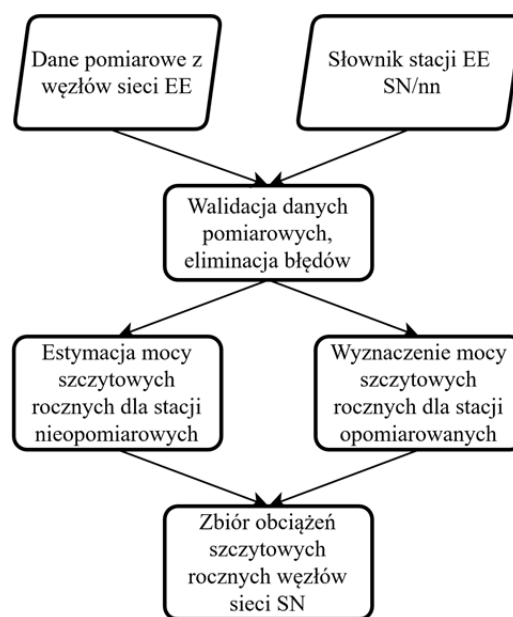
bilansujących w stacjach SN/nN bardzo istotna jest weryfikacja poprawności danych pomiarowych; błędne wartości są najczęściej większe od poprawnych wartości maksymalnych co deformuje obraz obciążeń maksymalnych stacji;

- w przypadku posiadania danych z systemu SCADA (w polach liniowych bądź transformatorowych) bardzo istotne jest precyzyjne określenie stanu przełączeń w sieci dla chwili czasowej lub okresów, w których chcemy przeprowadzić szacowanie obciążeń jak również istotna jest informacja o wszystkich punktach poboru energii elektrycznej w sieci;

- dla danych z systemu SCADA bardzo przydatne, oprócz danych o prądach w polach, są także dane o napięciu i współczynniku mocy;

- w przypadku, gdy sieć SN jest gęsta z możliwością częstego przełączania poszczególnych ciągów lub ich części pomiędzy GPZ-tami i innymi ciągami należy rozważyć inny sposób oceny wystarczalności przepustowości sieci niż tylko opieranie się na analizach rozpiętych mocy w układzie normalnym.

Ważną częścią prowadzonych analiz było określenie metody detekcji i korekty błędów pomiarowych. W ramach pracy testowano wiele metod naprawczych i najlepsze wyniki miała metoda bazująca na prostym filtrze wykorzystującym wiedzę o pożądanych własnościach szeregu czasowego; jako wartość odstającą uznaje się taką, która jest większa od obu sąsiednich wartości o założony wielkość względną dobraną eksperymentalnie.



Rys. 2. Schemat szacowania obciążeń stacji SN/nN

Budowa modelu sieci elektroenergetycznej

Budowa modelu sieci jest niezbędna z punktu widzenia niniejszego zadania. Obliczenia rozpyłkowo wykonywano w pakiecie MatPower. Dane do wykonania modelu były pobrane z systemu SCADA. Ponadto wykorzystano bazę danych systemu GIS, w której opisano przebiegi tras linii elektrycznych.

Modele zapisane w systemie SCADA zawierają bardzo dużo informacji o sieci elektroenergetycznej. Tylko niewielka część ich jest potrzebna do wykonania modelu sieci. Szczególnie istotne jest określenie konfiguracji w jakiej pracuje sieć oraz jej maksymalne uproszczenie – agregacja nieistotnych ze względów analitycznych połączeń. Dla przykładu każde pole liniowe wyposażone w zestaw odłącznik – rozłącznik – odłącznik składa się z węzłów i

łuków nieistotnych z punktu widzenia wyznaczania obciążeń linii i transformatorów. Ograniczenie liczby węzłów sieci i ich wtórna numeracja było także konieczne z powodu stosowania pakietu MatPower. Tworzenie modelu i numeracja węzłów musi być, rzecz jasna, skojarzona z nazwami węzłów, których używa OSD. Minimalizacja liczby węzłów ogranicza ich liczbę w modelu kilkukrotnie co pozytywnie wpływa na szybkość działania metod optymalizacyjnych.

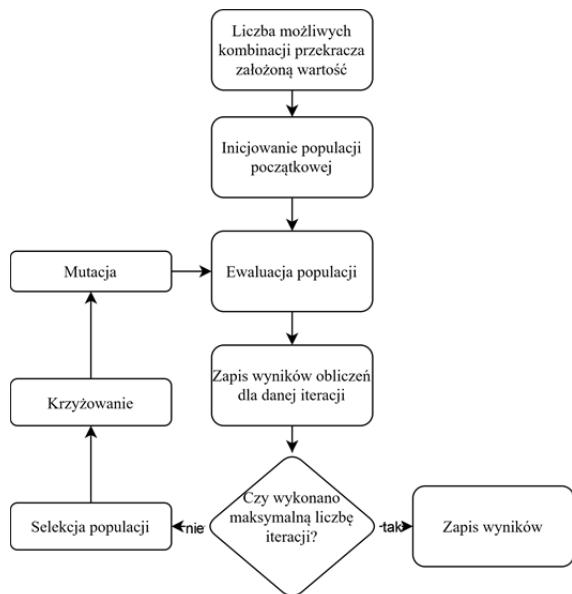
Każda linia elektroenergetyczna w systemie GIS jest opisana danymi geodezyjnymi, które są niezbędne do **Optymalizacja przyłączenie punktów ładowania**

Opracowany mechanizm optymalizacji bazuje na algorytmie przeglądu zupełnego przestrzeni rozwiązań w przypadku prostych problemów oraz na algorytmie ewolucyjnym w przypadku bardziej złożonych. Wybranie algorytmu ewolucyjnego było podyktowane tym, że przestrzeń rozwiązań była duża a ten rodzaj algorytmu sprawdza się w takich zadaniach najlepiej [5].

Algorytm ewolucyjny to algorytm heurystyczny, w którym poszukiwanie najlepszego rozwiązania polega na wykonywaniu iteracyjnie: ewaluacji, selekcji, krzyżowania i mutacji.

Wybranie konkretnych wartości parametrów działania algorytmu ewolucyjnego zostało przeprowadzone w procesie strojenia. Polegał on na przebadaniu wielu kombinacji prawdopodobieństwa krzyżowania i mutacji oraz pozostałych parametrów dla różnych wielkości zadań optymalizacyjnych.

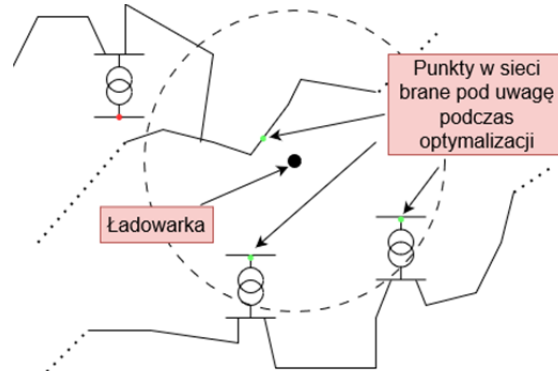
Schemat działania algorytmu ewolucyjnego przedstawiono na rysunku Rys. 3.



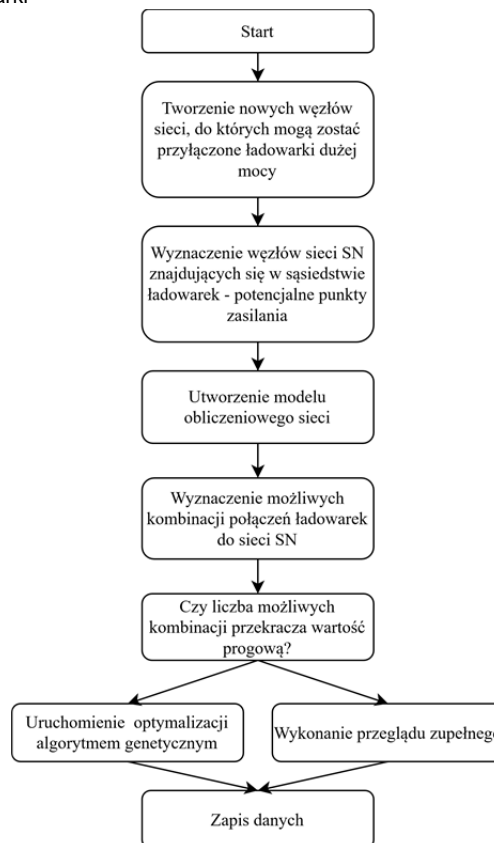
Rys. 3. Schemat działania algorytmu ewolucyjnego

Na uwagę zasługuje możliwość tworzenia nowych węzłów w analizowanej sieci. Na rysunku 4 przedstawiono przykład jakie węzły sieci mogą zostać wybrane do procesu optymalizacji. Są to dwie stacje SN/nN oraz jedna wcinka w linię SN (jeśli moc ładowarki jest większa od założonej wartości). Inne linie i stacje SN/nN nie będą brane pod uwagę jako dopuszczalne rozwiązanie.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy zastosowanego algorytmu optymalizacyjnego. Zasady przydzielania rodzajów punktów zasilających przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Przedstawienie potencjalnych punktów podłączenia ładowarki



Rys. 5. Schemat blokowy działania algorytmu optymalizacyjnego

Tabela 1. Możliwe sposoby przyłączenia ładowarek w zależności od ich mocy znamionowej i rodzaju punktu zasilającego

Rodzaj punktu zasilającego	Moc znamionowa ładowarki	
	Mniejsza od wartości progowej	Większa od wartości progowej
GPZ i/lub RS	Brak możliwości przyłączenia	Przyłączenie do węzła SN w stacji SN/nN
Stacja SN/nN	Przyłączenie do węzła nN w stacji SN/nN	Przyłączenie do węzła SN w stacji SN/nN
Istniejący węzeł SN	Brak możliwości przyłączenia	Przyłączenie do węzła SN z wykorzystaniem złącza SN
Nowoutworzony węzeł SN (wcinka w linię SN)	Brak możliwości przyłączenia	Przyłączenie do węzła SN z wykorzystaniem złącza SN

Najważniejsze parametry opisujące zadanie optymalizacyjne zarówno przeglądu zupełnego jak i algorytmu ewolucyjnego to:

- maksymalna odległość ładowarki od węzła zasilającego, (parametr ten wykorzystywany jest do określenia liczby potencjalnych rozwiązań w metodzie przeglądu zupełnego oraz przy tworzeniu wcinek w linię SN);
- parametr warunkujący możliwość przyłączenia ładowarek do sieci nN oraz możliwość zrealizowania wcinki w linię SN. Parametr określa maksymalną moc znamionową ładowarki, jaka może być zasilana z rozdzielniczy nN w stacji SN/nN. Ładowarki o mocach wyższych od wartości parametru będą zasilane z istniejących węzłów SN w modelu sieci, lub z wcinek (dodatkowych węzłów) w liniach SN. Dla ładowarek o mocach mniejszych lub równych wartości parametru nie przewiduje się tworzenia wcinek, w zamian za to dopuszcza się ich przyłączenie do węzłów nN w stacjach SN/nN;
- maksymalna dopuszczalna długość linii nN zasilającej ładowarkę.

Celem

$$(1) \quad Eval = \frac{k_{max} - sum_{koszt}}{Pen_U \cdot Pen_S \cdot Pen_{LAD}}$$

gdzie: sum_{koszt} – suma nakładów inwestycyjnych poniesionych na podłączenie ładowarek do sieci, k_{max} – odpowiednio dobrana liczba dodatnia spełniająca warunek $k_{max} > sum_{koszt} \cdot Pen_U \cdot Pen_S \cdot Pen_{LAD}$ funkcje karne są opisane poniżej

Tak sformułowana postać funkcji ewaluacji osiąga maksymalną wartość, gdy wartość funkcji celu jest najniższa, czyli nakłady inwestycyjne są minimalizowane. Wykonanie powyższego działania było konieczne, ze względu na sposób działania algorytmu ewolucyjnego, polegający na maksymalizacji wartości funkcji przystosowania.

W przypadku gdy węzeł o danym numerze istnieje w modelu sieci i jego odległość od ładowarki nie przekracza wartości granicznej skrypt wykonuje obliczenia rozptylowe i na ich podstawie sprawdza, czy nie zostały przekroczone warunki ograniczające. Przekroczenie co najmniej jednego z ograniczeń skutkuje obliczeniem odpowiedniej funkcji karnej, zmniejszającej wartość funkcji ewaluacji:

Dla ograniczenia dopuszczalnych poziomów napięć węzłowych:

$$(2) \quad Pen_U = \sum_{i=1}^{N_{U_{min}}} \left[a_U \cdot \left(\frac{U_{min_i}}{U_i + \varepsilon} \right)^{b_U} \right] + \sum_{j=1}^{N_{U_{max}}} \left[a_U \cdot \left(\frac{U_j}{U_{max_j}} \right)^{b_U} \right]$$

gdzie: $N_{U_{min}}$ – liczba węzłów, dla których zanotowano przekroczenie minimalnego poziomu napięcia, $N_{U_{max}}$ – liczba węzłów, dla których zanotowano przekroczenie maksymalnego poziomu napięcia, U_{min_i} – minimalny poziom napięcia dla i -tego węzła, U_{max_j} – maksymalny poziom napięcia dla j -tego węzła, U_i , U_j – aktualny poziom napięcia dla i -tego, j -tego węzła, a_U , b_U – nieujemne współczynniki czułości funkcji karnej.

Dla ograniczenia dopuszczalnych obciążeń gałęzi sieci mocą pozorną:

$$(3) \quad Pen_S = \sum_{i=1}^{N_S} \left[a_S \cdot \left(\frac{S_i}{S_{max_i}} \right)^{b_S} \right]$$

gdzie: N_S – liczba gałęzi, dla których zarejestrowano przekroczenie dopuszczalnej obciążalności mocą pozorną, S_{max_i} – dopuszczalne obciążenie i -tej gałęzi mocą pozorną,

S_i – aktualne obciążenie i -tej gałęzi mocą pozorną, a_S , b_S – nieujemne współczynniki czułości funkcji karnej. dla ograniczenia – sprawdzenia poprawności przyłączenia ładowarki do wcinki w linii SN

$$(4) \quad Pen_{LAD} = 1 + N_{LAD} \cdot 0,1$$

gdzie: N_{LAD} – liczba ładowarek błędnie podłączonych do wcinek w liniach SN.

Opracowany algorytm optymalizacyjny umożliwił wyznaczenie rozwiązania charakteryzującego się minimalnymi kosztami związanymi z budową linii kablowych zasilających punkty ładowania autobusów elektrycznych przyłączonych do analizowanych sieci dystrybucyjnych.

Dla zadań o większym stopniu skomplikowania (większej liczbie potencjalnych rozwiązań) użycie metody przeglądu zupełnego rozwiązań wiąże się z koniecznością przeprowadzenia długotrwałych obliczeń.

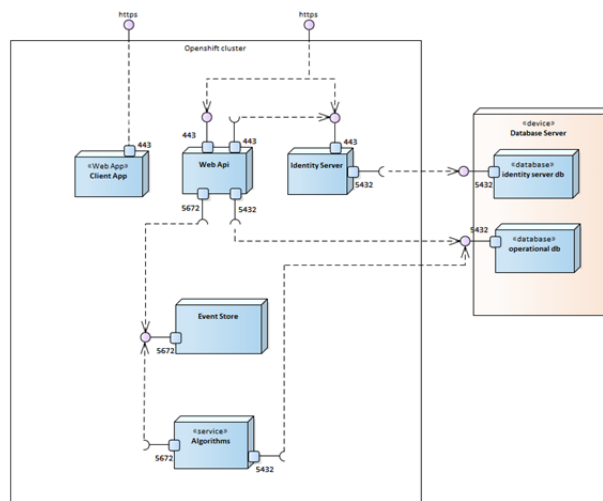
Użycie algorytmu ewolucyjnego do rozwiązania sformułowanego zadania optymalizacyjnego skutkowało uzyskaniem w kolejnych próbach różnych wyników obliczeń (wybrane zostały różne węzły zasilające).

Budowa i testowanie prototypu

Wyżej opisane wyniki badań, zostały ramach prac rozwojowych wykorzystane do wytworzenia i przetestowania prototypu systemu informatycznego wspomagającego podejmowanie decyzji w zakresie doboru technologii ładowania autobusów elektrycznych oraz lokalizacji i parametrów infrastruktury ładowania. Pozwała ono na prowadzenie wielowariantowych, zautomatyzowanych analiz. Ich rezultatem są takie scenariusze docelowego procesu przyłączeniowego, które będą optymalne zarówno dla OSD jak i właściciela lub operatora infrastruktury ładowania drogowego transportu publicznego.

W pracach rozwojowych zrealizowano zadania:

- Przygotowanie zestawów danych źródłowych, założeń do mechanizmów importu oraz zestawów danych dla scenariuszy użycia
- Wytworzenie prototypu zgodnie z założeniami z badań przemysłowych
- Weryfikacja poprawności implementacji algorytmów w środowisku prototypu
- Zasilenie prototypu danymi i przeprowadzenie i udokumentowanie modelowej analizy
- Testy funkcjonalne prototypu i mechanizmów importu i walidacji danych oraz weryfikacja modelowej analizy pod kątem funkcjonalnym i technicznym



Rys. 4. Uproszczona architektura techniczna Prototypu

Wnioski

Problem optymalizacyjny będący przedmiotem rozważań niniejszej pracy należy do problemów o dużej przestrzeni rozwiązań. Szczególnie w przypadku gdy rozważane są praktyczne przypadki optymalizacyjne (wielu punktów ładowania) wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji pozwala na uzyskanie dobrych rozwiązań w akceptowalnym czasie. Uzyskane rozwiązania są pozytywnie oceniane przez ekspertów na co dzień zajmujących się prowadzeniem rozwoju sieci. Rozważać można także inne niż przedstawione w pracy funkcje celu biorące pod uwagę koszty po stronie operatora komunikacji miejskiej lub czynniki tzw. dobra społecznego. Można także, przy okazji optymalizacji lokalizacji punktów ładowania, realizować inne, ważne ze względu na działanie sieci elektroenergetycznej priorytety. Wśród nich coraz częściej wskazywane są np. ograniczenia strat sieciowych, ograniczenia przekroczeń napięć, stabilizowanie krzywej zapotrzebowania na energię elektryczną w poszczególnych częściach sieci, maksymalizację wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych na poziomie sieci dystrybucyjnej.

Przedstawione w niniejszym artykule rozwiązanie to jedynie część możliwości, które można za pomocą przedstawionego podejścia realizować. Najważniejszą zaletą podejścia jest integracja danych o sieci, jej strukturze i stanie (estymacja obciążeń) oraz model pozwalający wykorzystać metody sztucznej inteligencji do optymalizacji. Zakres merytoryczny danych może być rozszerzany co pozwala na realizację także innych celów. Oprócz prowadzenia optymalizacji rozwoju sieci wskazać można także optymalizację lokalizacji zasobników energii zgodnie z dowolnym, założonym przez OSD celem oraz typowanie obszarów sieciowych dla zakupu usług elastyczności [6].

Artykuł bazował na wynikach projektu „Opracowanie narzędzia wspomagającego podejmowanie decyzji w zakresie doboru technologii ładowania autobusów elektrycznych oraz lokalizacji infrastruktury ładowania”, który był współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014-2020, Działanie: 1.2 Badania, rozwój i innowacje w przedsiębiorstwach.

Autorzy: mgr inż. Michał Polecki, dr inż. Łukasz Rokicki, dr hab. inż. Dariusz Baczyński, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska, E-mail: michal.polecki@pw.edu.pl, lukasz.rokicki@pw.edu.pl, dariusz.baczynski@pw.edu.pl; mgr inż. Tomasz Rodziewicz, mgr inż. Andrzej Szymp, mgr inż. Marek Rafalski, TAURON Dystrybucja S.A. E-mail: tomasz.rodziewicz@tauron-dystrybucja.pl, andrzej.szym@tauron-dystrybucja.pl, marek.rafalnski@tauron-dystrybucja.pl

LITERATURA

- [1] Wyszomirski O., Wolek M., Jagiełło A., Koniak M., Bartomiejczyk M., Grzelec K. i Gromadzki M., „Elektromobilność w transporcie publicznym praktyczne aspekty wdrażania,” Polski Fundusz Rozwoju, Warszawa, 2018
- [2] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych, Warszawa (2018)
- [3] Kłós M., Zagrajek K., Biczel P., i Sosnowski Ł., „Problematyka przyłączenia do sieci dystrybucyjnej stacji ładowania autobusów elektrycznych,” Przegląd Elektrotechniczny, pp. 177-181, Styczeń 2019
- [4] BICZEL P., BRODZICKI M., i SOSNOWSKI Ł., „Obciążenie rozdzielczej sieci elektroenergetycznej ładowarkami autobusów,” w X Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2018, 2018.
- [5] Kostrzewa D. i Josiński H.Ś., "Planowanie procesu scalania danych rozproszonych za pomocą algorytmu ewolucyjnego." *Bazy danych. Rozwój metod i technologii* 1.
- [6] Wawrzyniak K., Walkowiak S., i Cetnarski R., "Elastyczność w sieci OSD jako kluczowy komponent transformacji energetycznej." *Energetyka Rozproszona* 5-6 (2021): 75-90.
- [7] Marzecki J., Saganek D., Modelowanie obciążeń szczytowych większych stacji transformatorowych SN/nN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), n.12, 239-242
- [8] Zimmerman, R.D., i Murillo-Sánchez C.E., "Matpower 6.0 user's manual." *Power Systems Engineering Research Center* 9 (2016).
- [9] Parol M., et al. "Effective approach to distributed optimal operation control in rural low voltage microgrids." *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* 68.4 (2020).