

Zintegrowany system diagnostyki sieci kablowych (Mufinka) – projekt B+R



Politechnika
Śląska



Grzegorz Kopacz (TD S.A.)

Dominik Duda (Pol. Śl.)

Edward Siwy (IPC Sp. z o.o)

Piotr Baszczok (TD S.A.)

VI Konferencja PTPIREE
Linie i stacje elektroenergetyczne
8-9 października 2025 r., Wisła

Agenda

- Wprowadzenie i geneza
- Założenia projektowe
- Prace badawczo-naukowe
- Założenia systemowe
- Główne funkcjonalności systemu
- Podsumowanie

TAURON Dystrybucja (TD) eksploatuje około 64 000 stacji i 257 000 km linii, w tym prawie 50 000 relacji linii kablowych SN o łącznej długości 28 000 km i na tej części majątku skupia się Projekt.

Wprowadzenie



- Roczny wskaźnik awaryjności linii kablowych SN od wielu lat utrzymuje się na poziomie przekraczającym 6 uszkodzeń na 100 km
- Każdego roku wykonuje się około 9000 prac eksploatacyjnych takich jak lokalizacje uszkodzeń, próby napięciowe i badania, w tym prawie 3000 pomiarów diagnostycznych

Jak skutecznie zarządzać tak dużą grupą urządzeń i działań wykorzystując dostępne informacje?

Geneza projektu „MuflnKa”



- **2006-2012 r.** - wdrażane w oddziałach pomiarów diagnostycznych linii kablowych
- 2013 - Powołanie zespołów zadaniowych ds. opracowania „Koncepcji wdrożenia w TAURON Dystrybucja S.A. diagnostyki sieciowej (06.03.2013 r.) – **przygotowanie koncepcji ujednolicenia standardów badań oraz budowy systemu IT do gromadzenia i analizy danych z pomiarów diagnostycznych dla całego TD**
- 2014 - Powołanie zespołów zadaniowych ds. opracowania „Wdrożenie i monitorowanie realizacji diagnostyki sieciowej w TD (15.11.2013 r.)
- 2020 r. - weryfikacja potrzeb w zakresie „Zintegrowanego Systemu Diagnostyki Sieci Kablowych” – **brak na rynku systemu spełniającego nasze oczekiwania**
- 2021 r. prace przedprojektowe (uwzględniające powiązanie z innymi systemami TAURON Dystrybucja S.A.)
- **Luty 2022 r. uruchomienie projektu budowy prototypu systemu „MuflnKa”**

Opis projektu



CEL: opracowanie prototypu narzędzia (modułu/systemu) informatycznego **wspierającego zarządzanie liniami kablowymi SN w oparciu nie tylko o wyniki pomiarów i badań diagnostycznych, ale również informacje pochodzące z różnych źródeł/systemów**, w tym gromadzonych do tej pory w sposób archiwalny, m.in.:

- struktura budowy każdej relacji linii kablowych zawierająca typ i rok instalacji poszczególnych jej elementów składowych - system GIS (ZMS),
- rodzaje i przyczyny uszkodzeń linii kablowych - system Zarządzanie Pracą Brygad (ZPB)
- dane kosztowe – system ZPB,
- wpływ na SAIDI (CTP) poszczególnych awarii – system SCADA (AWAR),
- rodzaj pracy punktu neutralnego transformatora zasilającego i układ pracy sieci, obciążenie linii oraz inne – system ZMS,
- wyniki pomiarów (pomiar izolacji, próby napięciowe, $\tan \delta$, wnz, itp.) – archiwum/ZPB.

Opracowane w ramach projektu algorytmy powinny wykonywać wiele analiz, w tym przewidywanie uszkodzeń, co umożliwi podejmowanie działań wyprzedzających (predictive/prescriptive based management).

Oczekiwane korzyści

Przewidywane korzyści w wyniku wdrożenia wyników Projektu to obniżenie:

- ilości uszkodzeń linii kablowych SN,
- wskaźników SAIDI/SAIFI (CTP/CP),
- kosztów usuwania awarii,
- kosztów napraw i odtworzeń uszkodzonych linii kablowych.

Inne korzyści:

- poprawa zadowolenia klientów,
- poprawa efektywności wydatkowania środków eksploatacyjnych i inwestycyjnych wg faktycznego stanu technicznego.

Wyżej wymienione korzyści zostaną osiągnięte poprzez:

- optymalizację procesu zarządzania liniami kablowymi w organizacji,
- optymalizację okresu użytkowania linii kablowych w oparciu o zarządzanie ryzykiem awarii kabli i osprzętu kablowego,
- wdrożenie działań wyprzedzających zaistnienie awarii (predictive/prescriptive based management) z zachowaniem optymalnej równowagi techniczno-ekonomicznej,
- wsparcie procesu decyzyjnego w zakresie polityki inwestycyjnej.

Uzyskanie wskazanych efektów będzie wymagać modyfikacji procesów uwzględniającego rekomendacje i wnioski opracowane w ramach projektu.

Założenia projektowe

Założenia projektowe obejmowały:

- analiza awaryjności w poszczególnych typów kabli i rodzaju izolacji w funkcji wieku,
- opracowanie krzywych starzeniowych dla poszczególnych typów i rodzajów wszystkich elementów linii kablowych, w tym muf i głowic,
- opracowanie jednolitej metody oceny stanu technicznego pojedynczej relacji kablowej uwzględniającej krzywe starzeniowe i wyniki badań diagnostycznych,
- opracowanie algorytmu określającego przewidywany czas do uszkodzenia,
- opracowanie matrycy ryzyka dalszej eksploatacji uwzględniającej przewidywane uszkodzenie i wynikający z niego wpływ na wskaźniki SAIDI i SAIFI (CTP i CP) oraz koszty napraw,
- opracowanie modelu zarządzania całą populacją sieci kablowej SN w oparciu o ranking i współczynniki,
- Wdrożenie procedur eksploatacyjnych opartych na działaniach predykcyjnych i preskrypcyjnych.



Etap badawczo-naukowy

Etap badawczo- naukowy

Wykonanie prac w zakresie założeń, struktury i algorytmów narzędzia informatycznego.



Wydział Elektryczny
Katedra Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

Sprawozdanie z realizacji etapu 2 p.t. „Opracowanie założeń, algorytmów i struktury prototypu narzędzia”

projektu realizowanego w ramach:

Usługi badawczej w zakresie opracowania założeń, algorytmów i struktury
prototypu narzędzia informatycznego w ramach realizowanego projektu B+R:

Zintegrowany system diagnostyki sieci kablowych
(umowa nr UM/TD-CN/11763/01863/2022)

Zamawiający:
TAURON Dystrybucja S.A. z siedzibą w Krakowie
ul. Podgórska 25A, 31-035 Kraków

Wybrane zagadnienia: wskaźnik awaryjności odcinków kabli vs. sposób pracy punktu neutralnego

Dane majątkowe



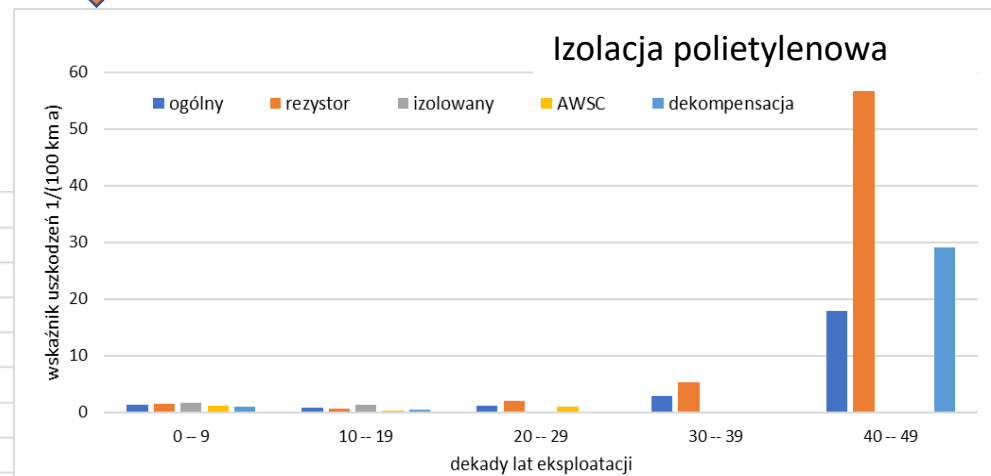
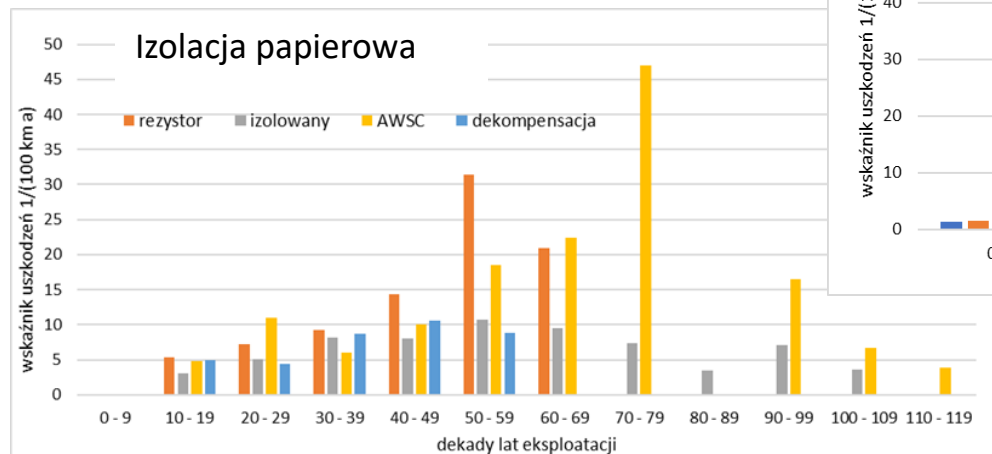
Dane o awaryjności



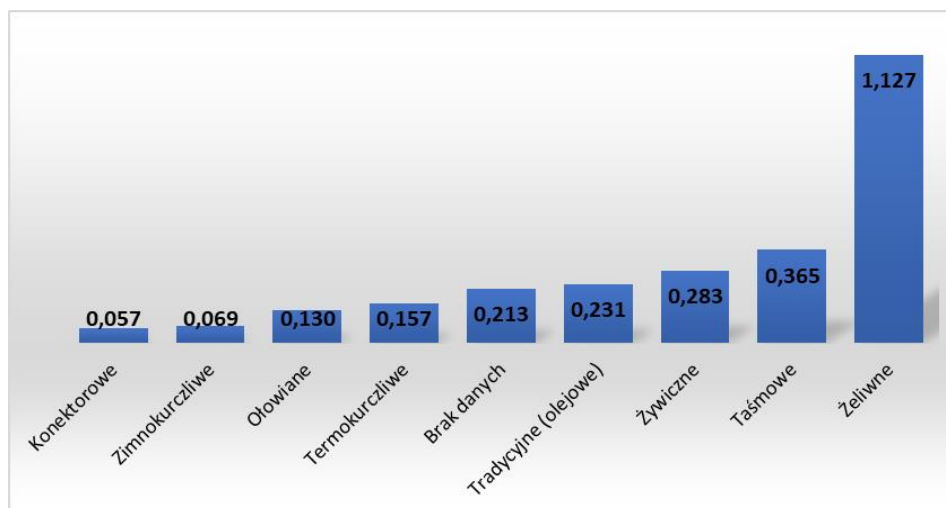
Wyznaczenie krzywej
starzeniowej



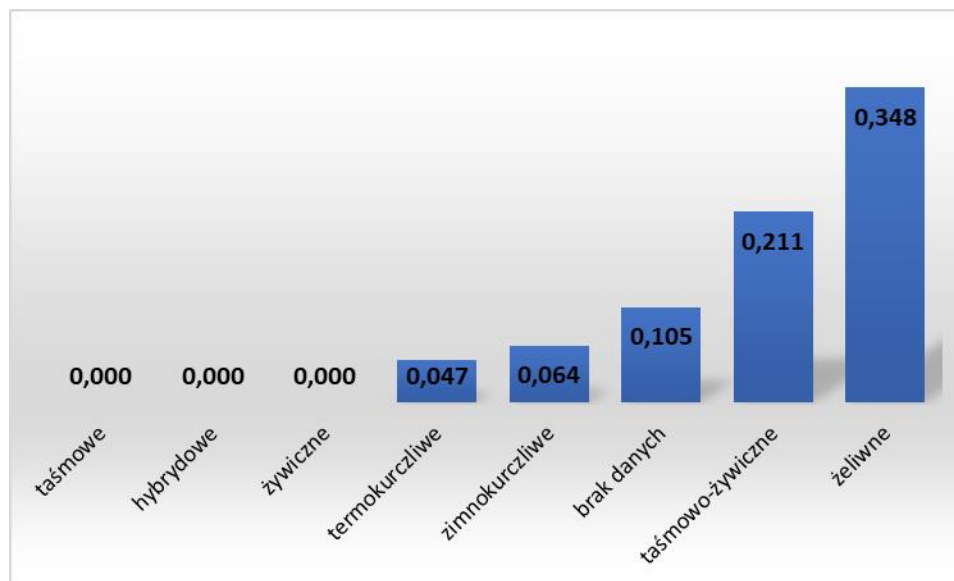
Wskaźniki uszkodzeń:
odcinków, muf, głowic



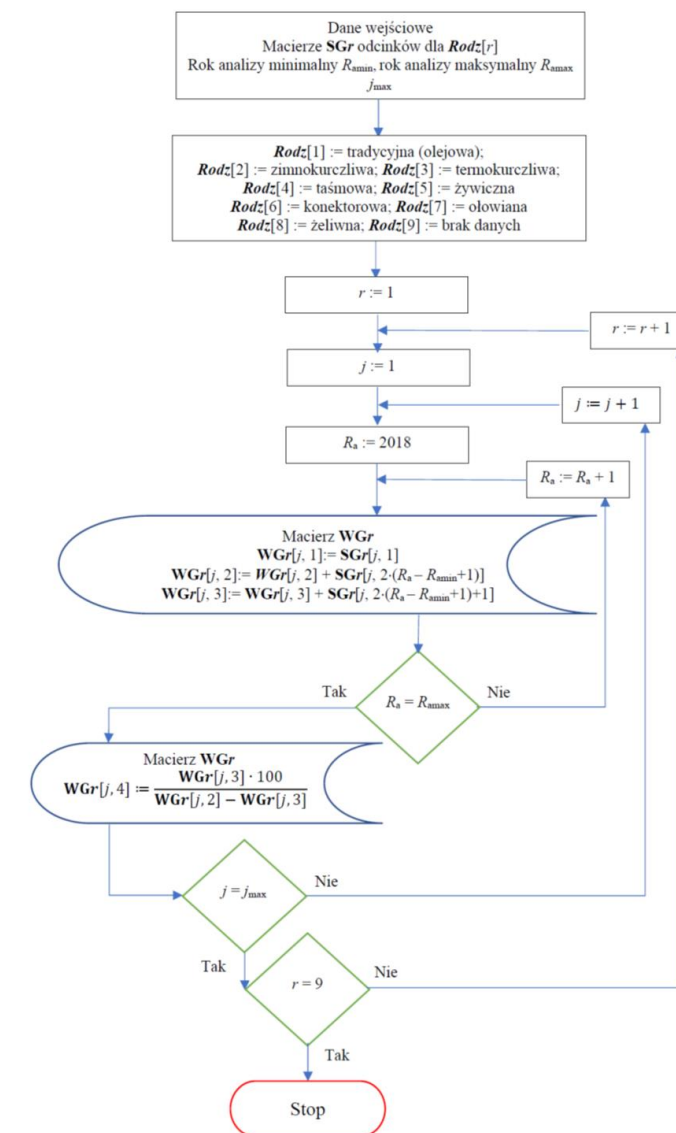
Wybrane zagadnienia: Charakterystyka poszczególnych relacji kablowych – wskaźnikowa odcinki+mufy+głowice



Wskaźniki uszkodzeń (1/(100 sztuk*a)) głowic kablowych SN w zależności od technologii wykonania

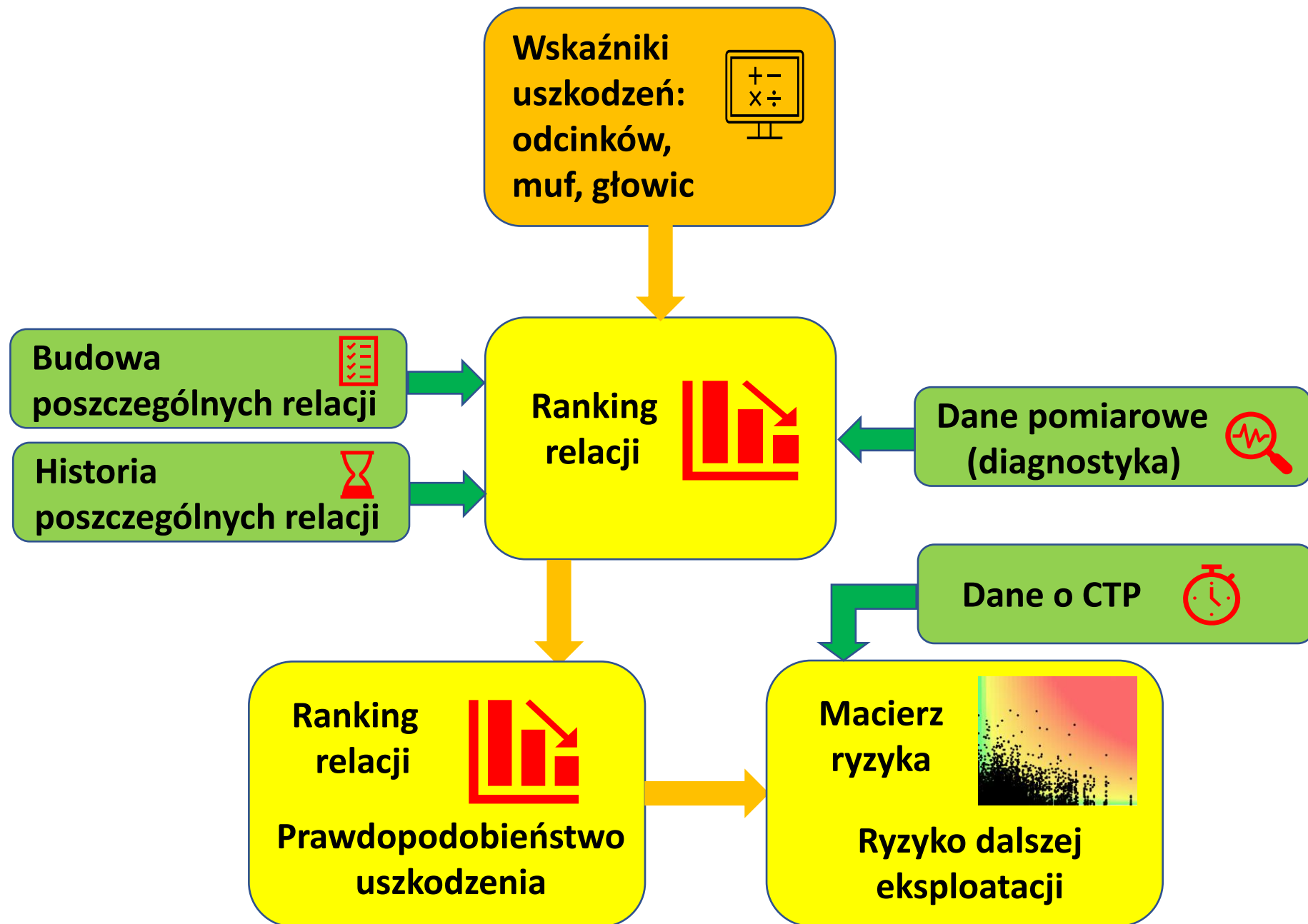


Wskaźniki uszkodzeń (1/(100 sztuk*a)) muf kablowych SN w zależności od technologii wykonania



Przykład algorytmu obliczania wskaźników uszkodzeń w kolejnych latach.

Wybrane zagadnienia: Szacowanie prawdopodobieństwa uszkodzenia relacji kablowej

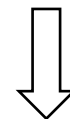


Metoda oparta na współczynnikach wagowych

Ranking relacji:

obliczenie wskaźnika (parametru) sumacyjnego

$$SR_i = SX_1 \cdot w_1 + SX_2 \cdot w_2 + SX_3 \cdot w_3 + SX_D \cdot w_D,$$



czas do uszkodzenia

Metoda regresyjna

$$X = \begin{bmatrix} 1 & SX_{1R1} & SX_{2R1} & SX_{3R1} & SX_{DR1} \\ 1 & SX_{1R2} & SX_{2R2} & SX_{3R2} & SX_{DR2} \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & SX_{1Rk} & SX_{2Rk} & SX_{3Rk} & SX_{DRk} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} t_{du1} \\ t_{du2} \\ \vdots \\ t_{duk} \end{bmatrix} \Rightarrow b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad \sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y})^2$$

rok n

$$\begin{bmatrix} 1 & SX_{1R1} & SX_{2R1} & SX_{3R1} & SX_{DR1} \\ 1 & SX_{1R2} & SX_{2R2} & SX_{3R2} & SX_{DR2} \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & SX_{1Rn} & SX_{2Rn} & SX_{3Rn} & SX_{DRn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \Rightarrow \hat{Y} = \begin{bmatrix} t_{progR1} \\ t_{progR2} \\ \vdots \\ t_{progRn} \end{bmatrix}$$

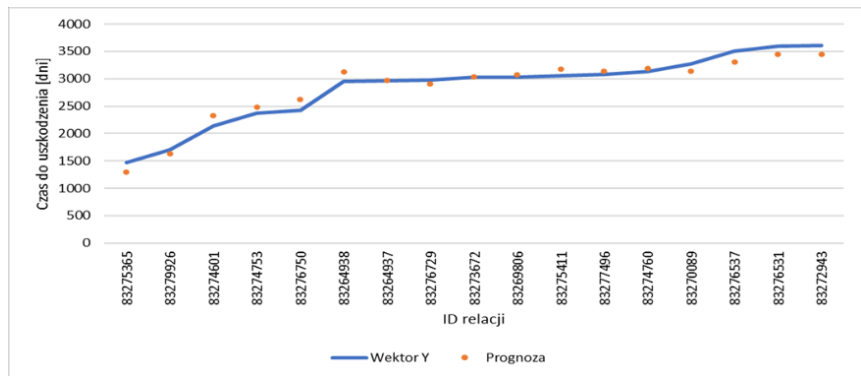
wektor prognozowanych
czasów do uszkodzenia

rok n + 1

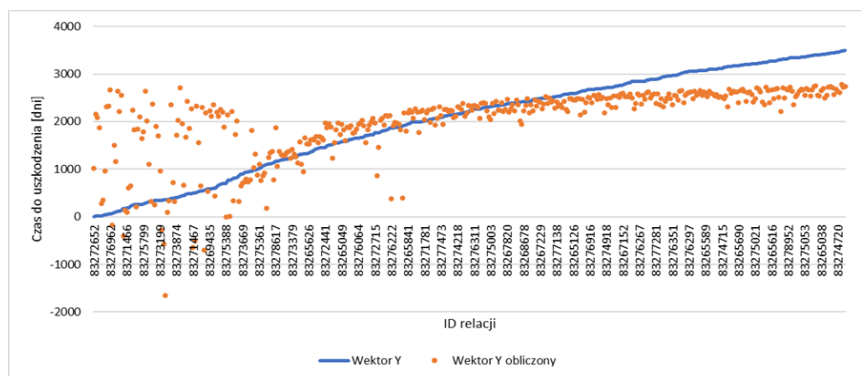
Wybrane zagadnienia:

Szacowanie
prawdopodobieństwa
uszkodzenia relacji kablowej
Połączone metody

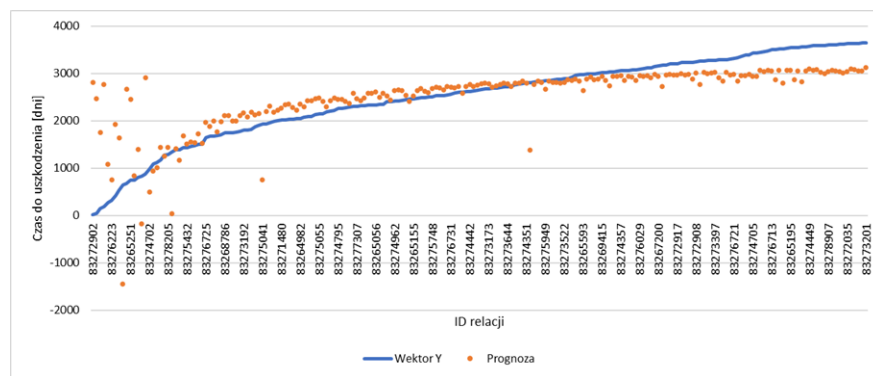
Wybrane zagadnienia: Szacowanie prawdopodobieństwa uszkodzenia relacji kablowej Wyniki kontrolne



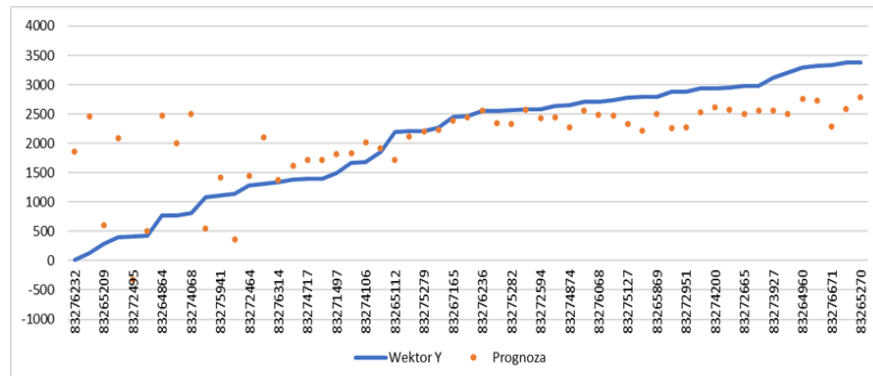
Porównanie wektora Y i prognoz odnośnie czasu do uszkodzenia wg metody regresyjnej dla relacji o izolacji XLPE, po ograniczeniu wartości wektora Y do 10 lat



Porównanie wektora Y i prognoz odnośnie czasu do uszkodzenia wg metody regresyjnej dla relacji, w których co najmniej 50% długości odcinków stanowi izolacja papierowa, po ograniczeniu wartości wektora Y do 10 lat



Porównanie wektora Y i prognoz odnośnie czasu do uszkodzenia wg metody regresyjnej dla relacji o izolacji papierowej (100% papier), po ograniczeniu wartości wektora Y do 10 lat



Porównanie wektora Y i prognoz odnośnie czasu do uszkodzenia wg metody regresyjnej dla relacji, w których izolacja papierowa występuje w mniej niż 50% długości odcinków, po ograniczeniu wartości wektora Y do 10 lat

Wybrane zagadnienia: Szacowanie prawdopodobieństwa uszkodzenia relacji kablowej Wyniki kontrolne

Wyniki trafności prognoz w oparciu o metodę wykorzystującą współczynniki wagowe

Perspektywa kolejnego uszkodzenia	Liczba relacji	Liczba uszkodzeń od 01.01.2022 do 12.06.2023	Trafność
do roku	3	1	33,3%
do 2 lat	62	25	40,3%
do 3 lat	103	32	31,1%
do 4 lat	144	25	17,4%
do 5 lat	122	28	23,0%

Wyniki trafności prognoz w oparciu o metodę regresyjną

Perspektywa kolejnego uszkodzenia	Liczba relacji	Liczba uszkodzeń od 01.01.2022 do 12.06.2023	Trafność
do roku	19	9	47,4%
do 2 lat	24	9	37,5%
do 3 lat	34	17	50,0%
do 4 lat	58	14	24,1%
do 5 lat	70	16	22,9%



Założenia systemowe

Założenia systemowe

1. Gromadzenie, integrowanie, walidacja i wizualizacja informacji obejmujących:

- dane techniczne budowy linii kablowych SN wraz z ich logiczną strukturą,
- dane o występujących uszkodzeniach linii kablowych, ich przyczynach oraz skutkach (wpływ na wskaźniki CTP i CP, koszty związane z ich naprawą),
- wyniki pomiarów i badań diagnostycznych.

2. Określenie:

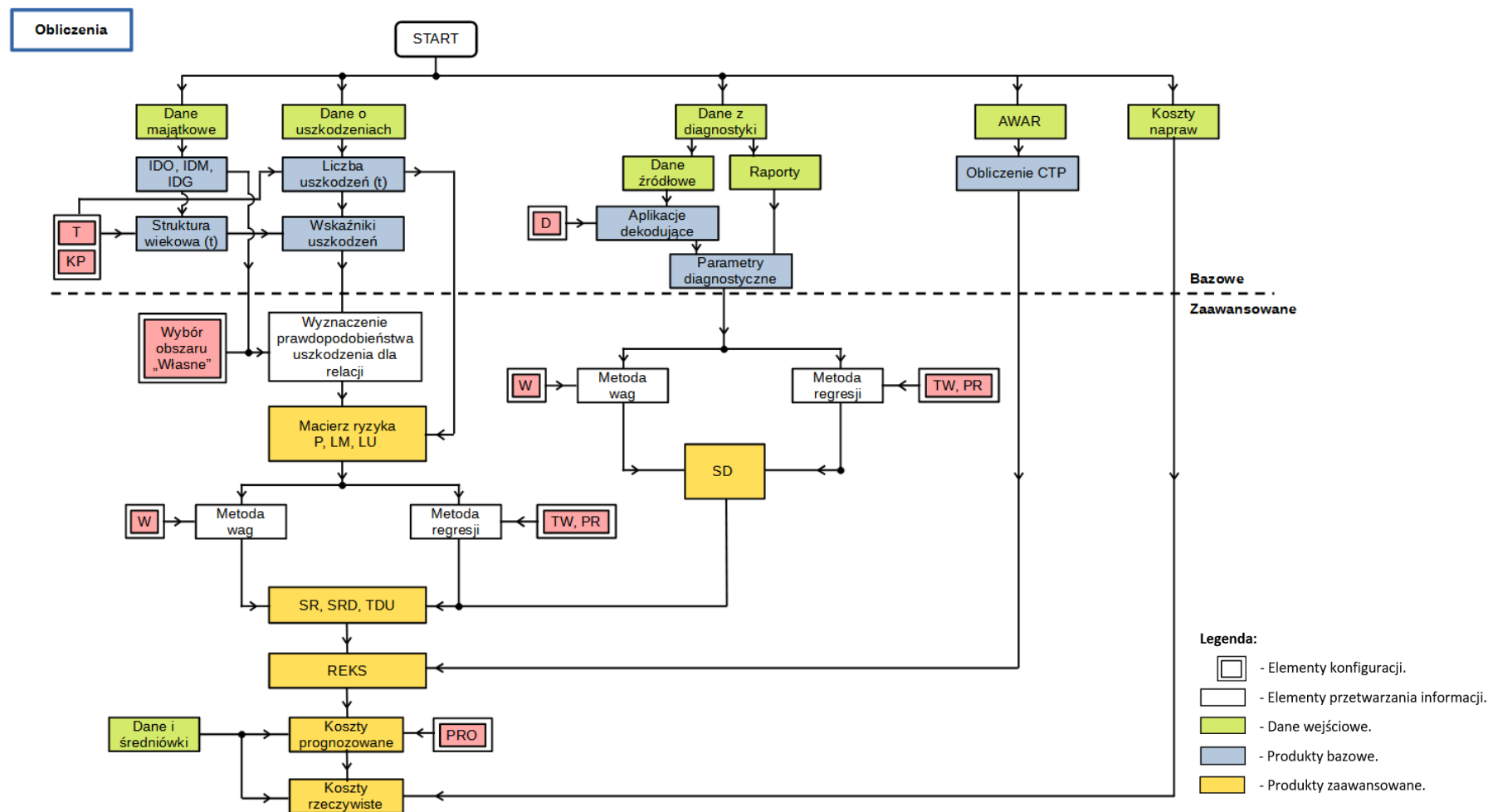
- wskaźników awaryjności poszczególnych grup kabli i elementów składowych,
- szacunkowego prawdopodobieństwa wystąpienia kolejnej awarii,
- ryzyka dalszej eksploatacji poszczególnych linii kablowych oraz zdefiniowanych grup wg rodzaju izolacji, wieku, ciągu itp. w ujęciu technicznym i finansowym.

3. Opracowanie mechanizmów dynamicznego grupowania, filtrowania i porównywania wszystkich danych wg potrzeb użytkownika.

4. Wdrożenie ścieżki obiegu informacji o stanie poszczególnych linii kablowych oraz rekomendacji między komórkami Serwisu i Zarządzania Majątkiem Sieciowym wraz ze statusami decyzji planowanych działań względem opisanych relacji.

5. Uruchomienie automatycznego przejścia z danej relacji w systemie Mufinka do jej graficznego przedstawienia na mapie ZMS lite (system GIS-owy).

Struktura systemu



IDO, IDG, IDM – Kolejno macierz danych majątkowych odcinków, głowic i muf.

T – Okres czasu przyjęty do analizy uszkodzeń – domyślnie 10 lat.

KP – Kryteria podziału – rodzaj izolacji/technologia, PPN, rodzaj sieci.

D – Współczynniki konfiguruje aplikację dekodującą (w tym domyślna długość mufy i głowicy oraz maksymalna dopuszczalna różnica długości).

W – Wagi przyjęte do oceny.

TW – Weryfikacyjny okres czasu w analizie regresji.

PR – Parametry regresji.

P – Parametry regresji.

PRO – Roczna procentowa zmiana prognozy kosztowej (%).

LM – Liczba muf.

LU – Liczba uszkodzeń.

SR – Sumaryczne ryzyko wynikające z analizy uszkodzeń.

SRD – Sumaryczne ryzyko wynikające z analizy uszkodzeń i diagnostyki.

TDU – Czas do uszkodzenia (1/SR lub 1/SRD).

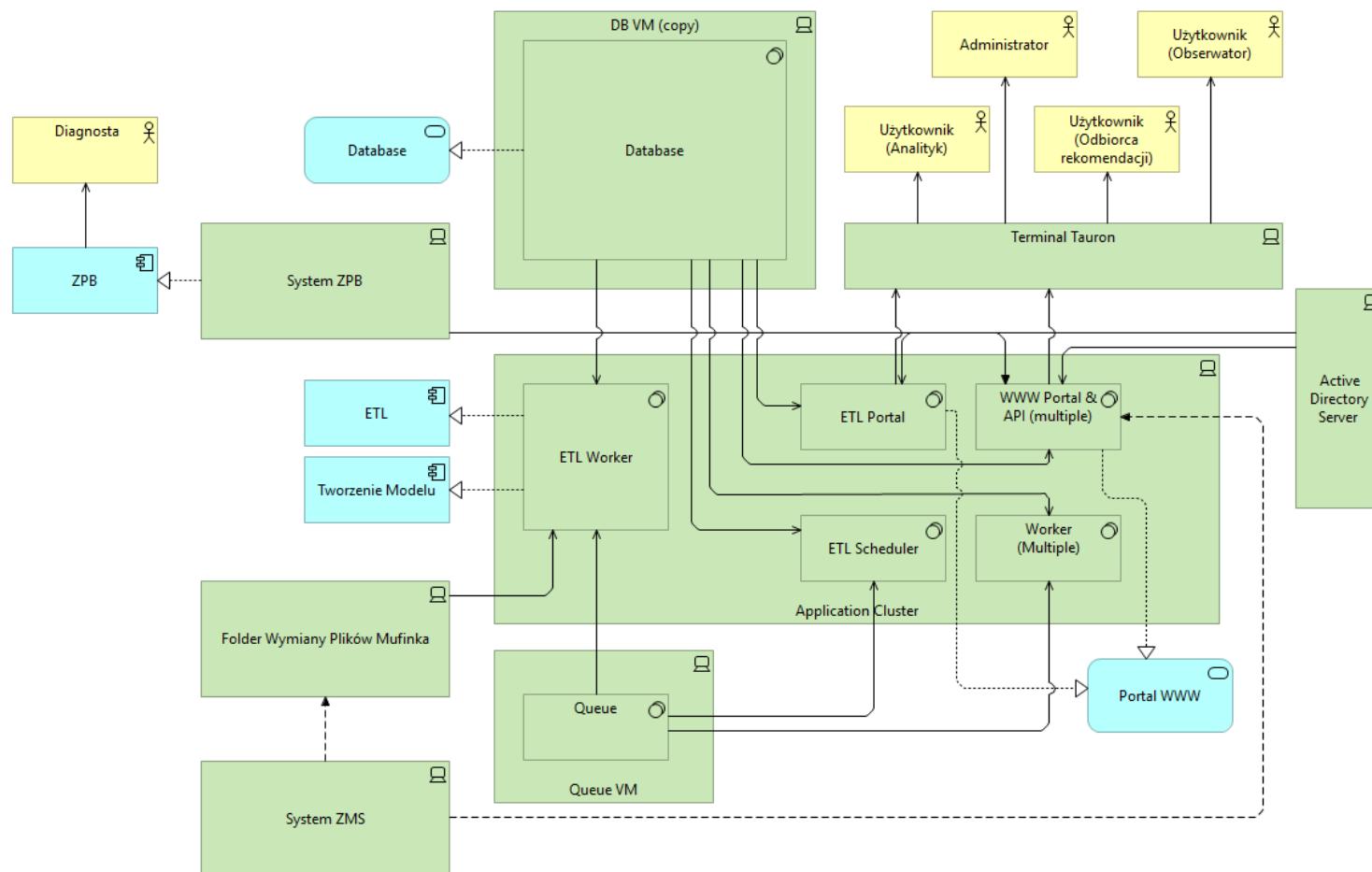
REKS – Ryzyko dalszej eksploatacji.

Architektura systemu

W ramach realizowanego projektu opracowano:

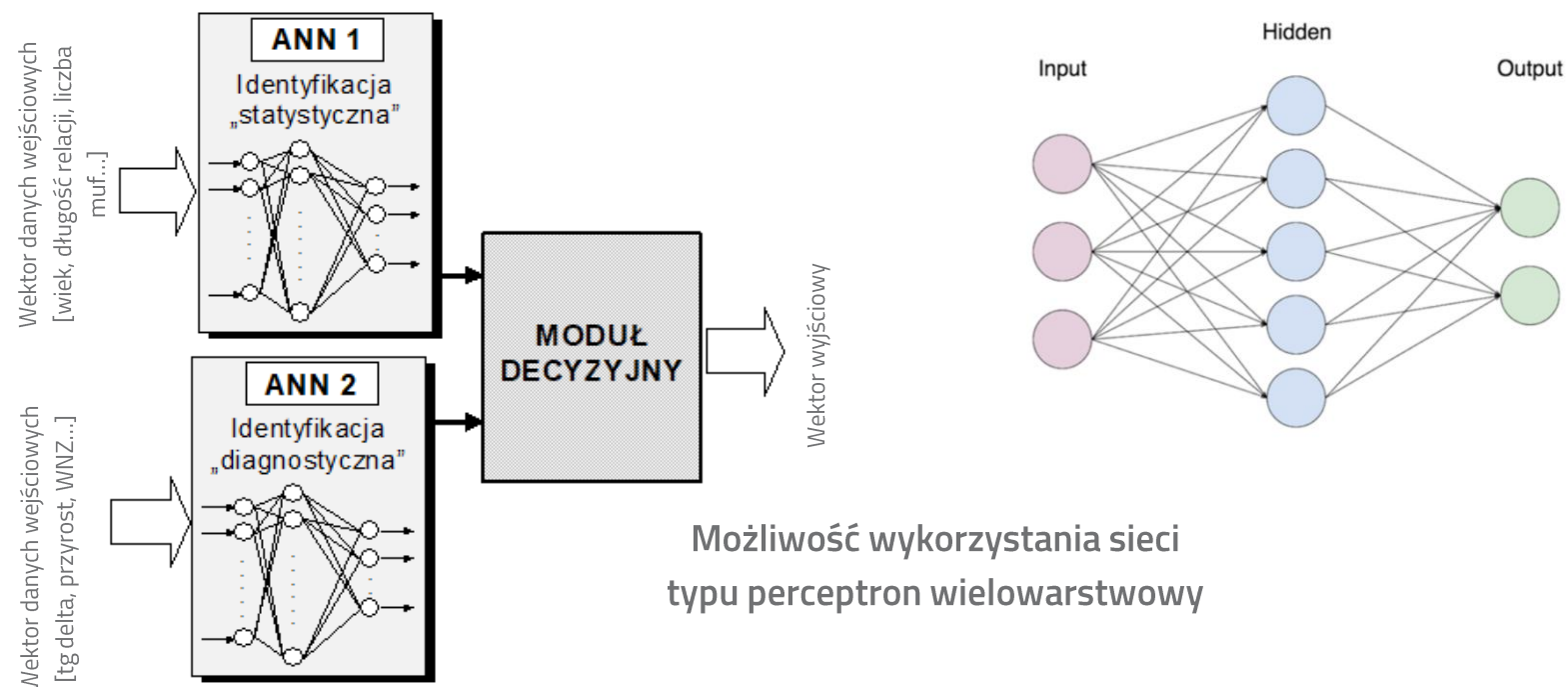
- architekturę biznesową
- architekturę aplikacyjną
- architekturę danych
- architekturę techniczną

Docelowa Architektura Techniczna



Rekomendacje dla dalszego rozwoju systemu

Jako przedmiot dalszych badań **rekomenduje się uwzględnienie metod z obszaru sztucznej inteligencji (AI)**. W środowiskach programowych dostępne są metody i modele, w oparciu o które można zrealizować narzędzia pozwalające na wypracowanie decyzji o stanie obiektu na podstawie gromadzonych danych różnego typu – w tym na przykład danych z pomiarów diagnostycznych. Przykładowo klasyfikator neuronowy może pracować w oparciu o dane pomiarowe zebrane wcześniej, jak również w aplikacjach on-line.

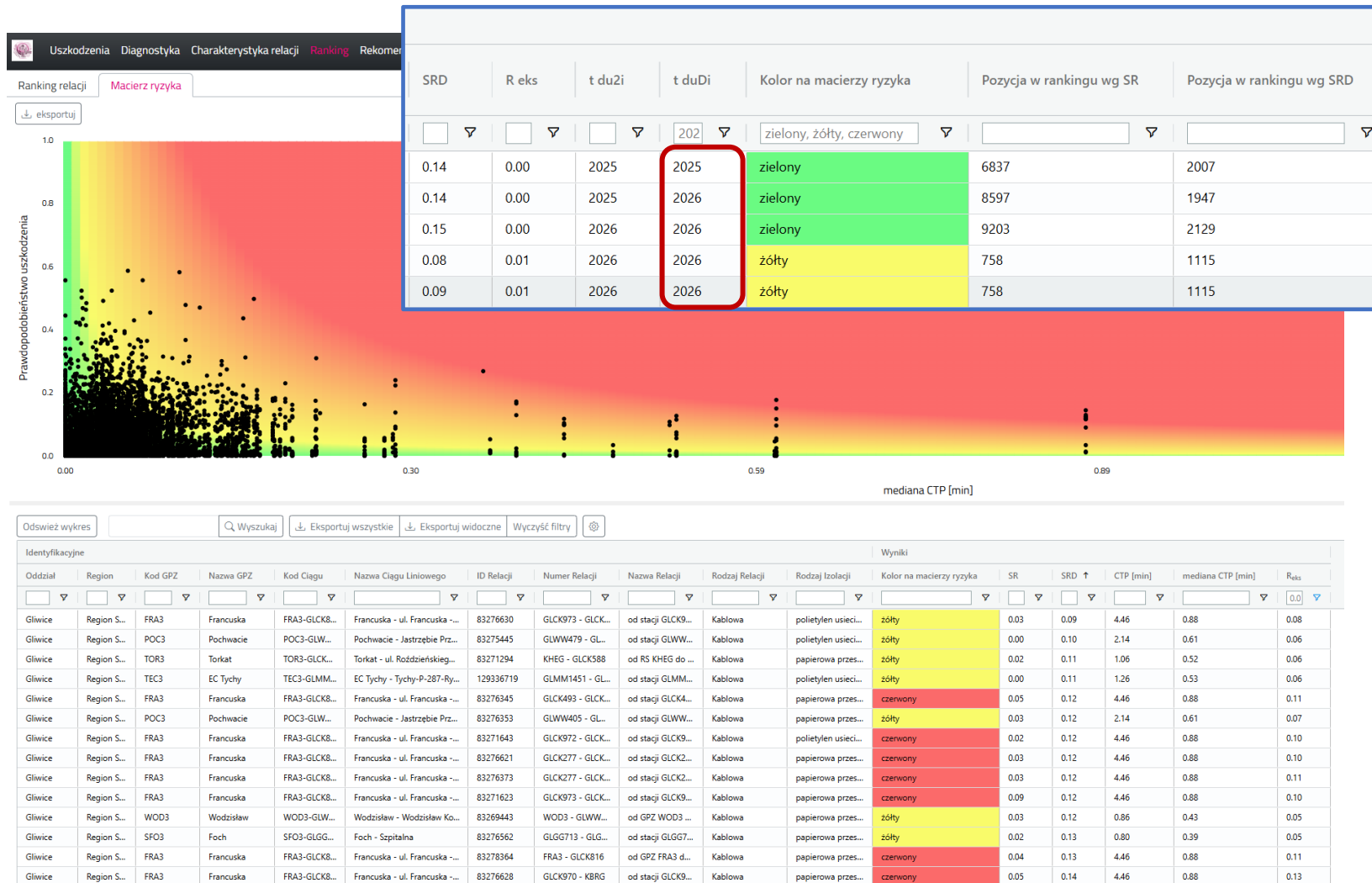


Istotną zaletą tzw. neuronowego podejścia w diagnostyce jest brak konieczności budowania modeli matematycznych diagnozowanych obiektów lub procesów.

Główne funkcjonalności systemu

Główne funkcjonalności systemu: Ranking relacji

Przewidywany rok wystąpienia uszkodzenia każdej relacji kablowej SN i skutki awarii określony jej wpływem na wskaźniki jakościowe CTP i CP (SAIDI, SAFI)



Dynamiczne wykresy rozkładu wyładowań niezupełnych na strukturze linii kablowej, analiza aktywności i intensywności dla poszczególnych progów napięciowych



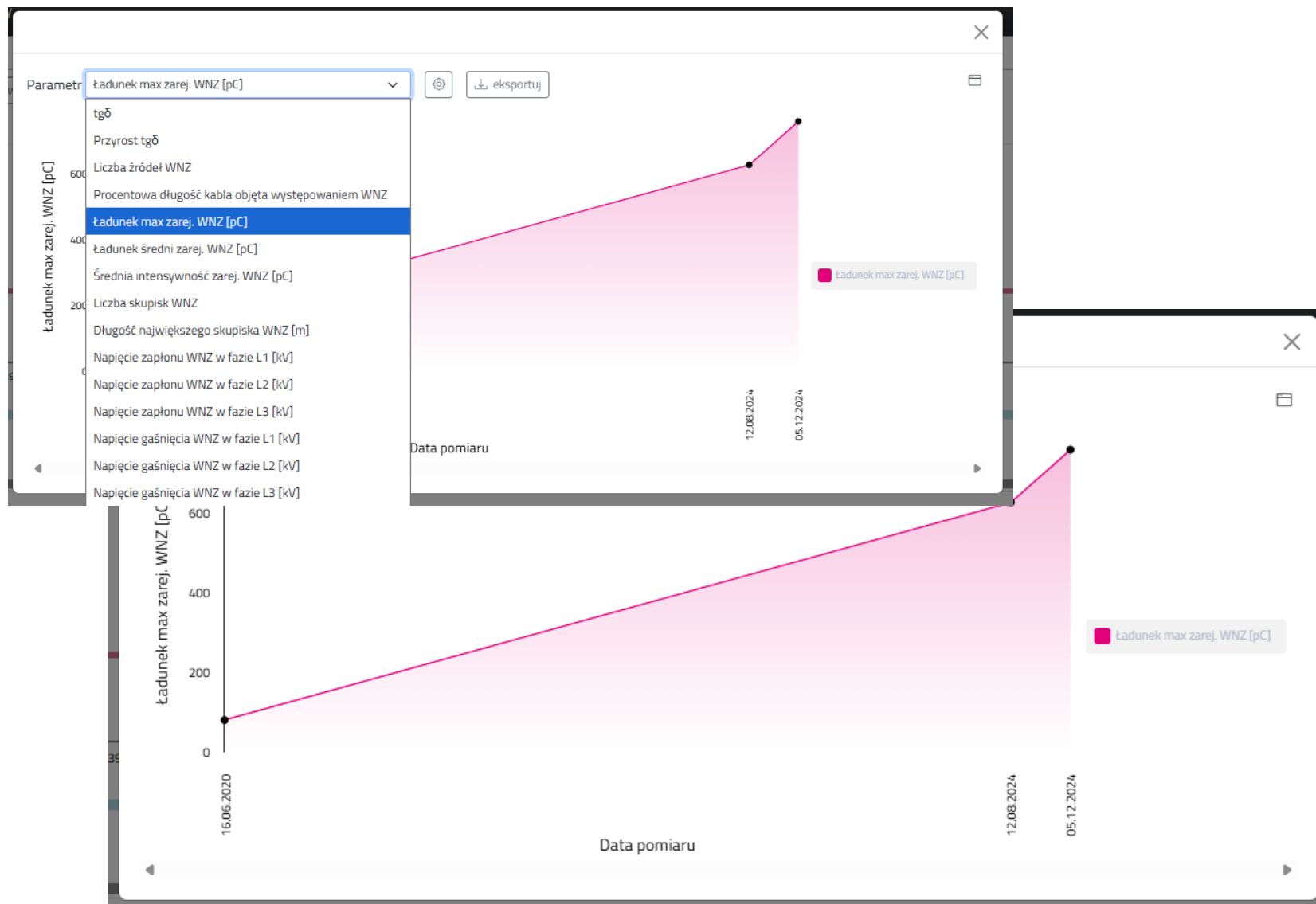
Ocena jednostkowa



	Numer porządkowy	Element	Numer unikalny elementu	Odległość od początku relacji ...	Rok budowy	Typ elementu	Izolacja	Konstrukcja elementu	Długość odcinka / domyślna d...
	1	Głowica	83256698	0	2024	CTS 630A 24kV 95-240/EGA		konektorowa	2.75
	2	Odcinek kablowy	132018054	0	2024	XRUHAKXS	polietylen uszczelniany		60.06
	3	Mufa	132018327	60.06	2024	CHMSV 24 kV 50-150		termokurczliwa	1.25
	4	Odcinek kablowy	132017866	60.06	2013	XRUHAKXS	polietylen uszczelniany		18.75
	5	Mufa	85288037	78.81	2011	Scotch		taśmowa	1.25
	6	Odcinek kablowy	132017866	78.81	2013	XRUHAKXS	polietylen uszczelniany		40.84
	7	Mufa	85293431	119.65	1951	Brak danych		brak danych	1.25
	8	Odcinek kablowy	85237503	119.65	1951	AKFPA	papierowa przesycona syciwem		22.87
	9	Mufa	132171884	142.52	2024	CHMP(H)SV 3-1 24kV 95-240 PL		termokurczliwa	1.25

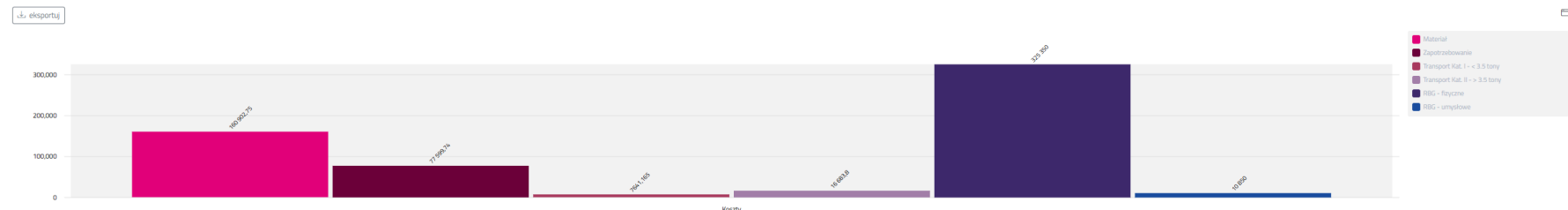
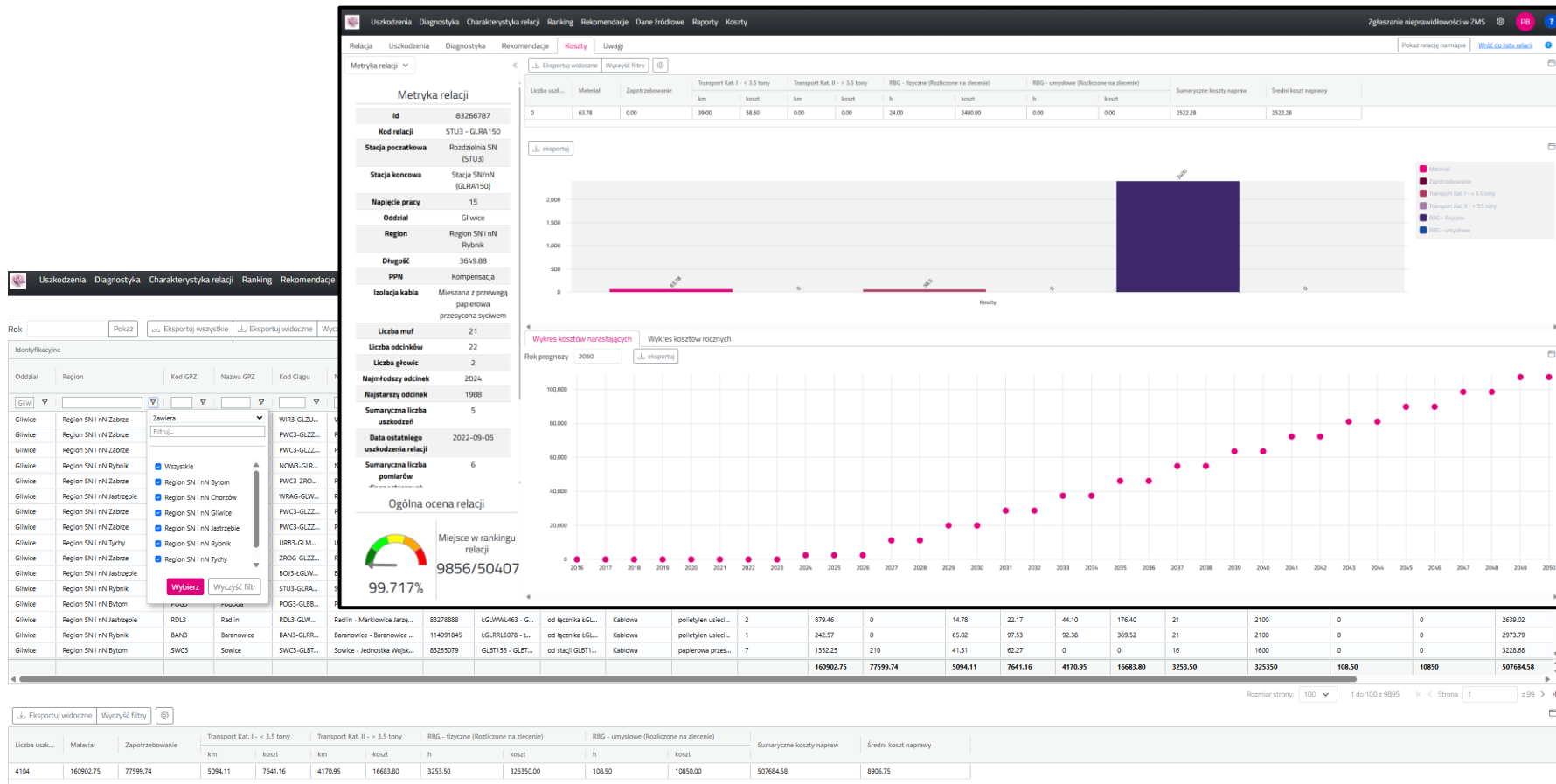
Analiza dynamiki zmian parametrów poszczególnych relacji kablowych lub określonych grup i populacji wg rodzaju izolacji, roku eksploatacji, rodzaju pracy punktu neutralnego itp.

Procesy starzeniowe



Monitorowanie bieżących kosztów eksploatacji poszczególnych relacji, szacowanie przyszłych w oparciu o przewidywane uszkodzenia.

Analiza kosztowa

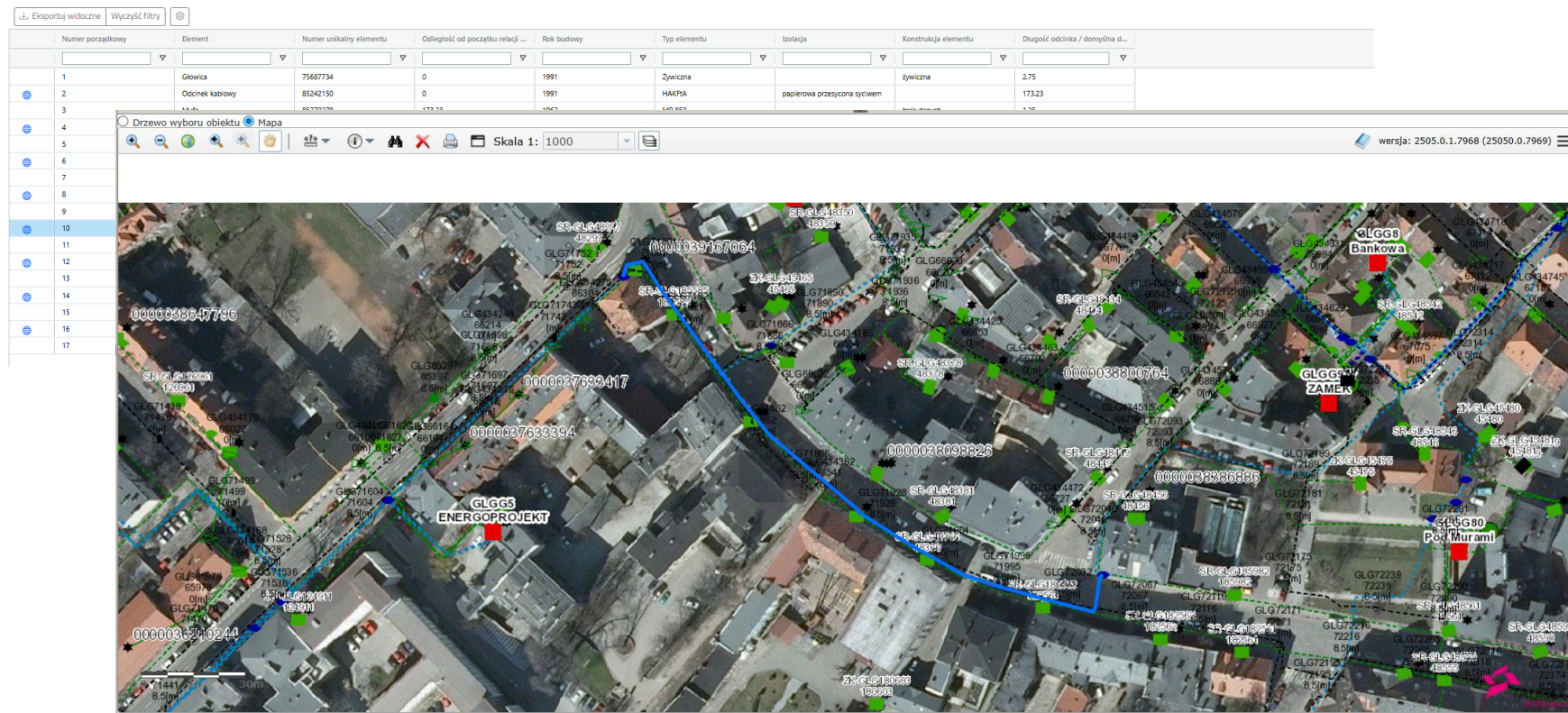
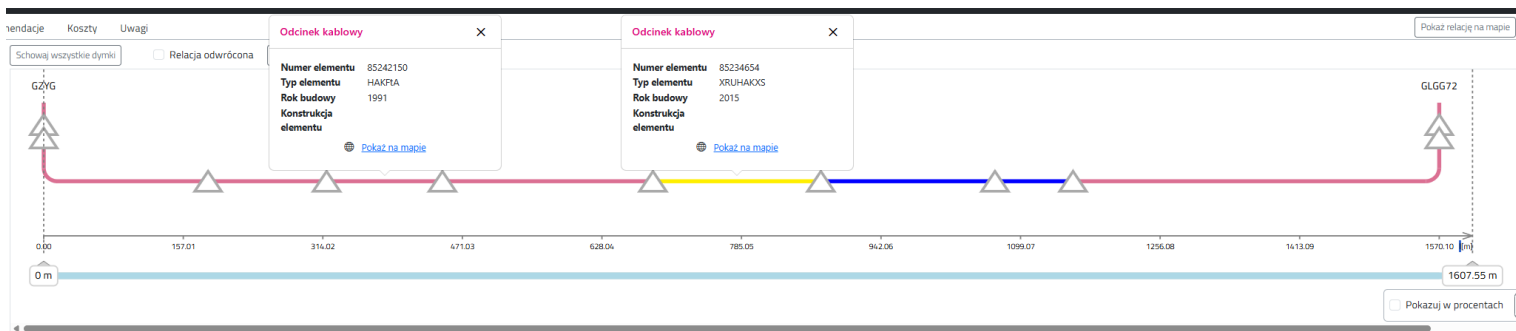


Rekomendacje eksploatacyjne

Generowanie rekomendacji podejmowania działań eksploatacyjnych dla pojedynczych relacji lub grup linii kablowych w celu poprawy stanu technicznego sieci dystrybucyjnej.
Monitorowanie stanu realizacji w formie „workflow”.



Automatyczne przechodzenie na mapy cyfrowe z wyselekcjonowanymi elementami linii kablowych.



Połączenie
Mufinki
z systemem
GIS-owym

Podsumowanie

- Wdrożenie systemu Muflnka wprowadziło zarządzanie liniami kablowymi SN na wyższy poziom oparty na wielopłaszczyznowych obliczeniach i analizach.
- Było to możliwe dzięki efektywnemu połączeniu sił:
 - doświadczenia i praktycznej wiedzy dystrybucji,
 - naukowej wiedzy politechniki,
 - innowacyjnej specjalizacji wykonawcy.
- Na obecnym etapie otwiera się przestrzeń do zaangażowania mechanizmów sztucznej inteligencji, które będą wspierać podejmowanie decyzji eksploatacyjnych.

Dziękujemy za uwagę