



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA

I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Koncepcja i weryfikacja elastycznej architektury nadzorczo-sterującej dla autobusów elektrycznych

Concept and verification of a flexible supervisory and control architecture for electric buses

Autor: mgr inż. Michał Piotr Sierszyński

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Czop, prof. AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki

Kraków, 2023

Streszczenie

W rozprawie zaprezentowano opracowanie nowatorskiej metodyki projektowania oraz walidacji architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych przy wykorzystaniu interdyscyplinarnego podejścia opierającego się na połączeniu wiedzy z zakresu inżynierii elektrycznej, systemów sterowania oraz metod wspomaganie decyzji. Za pomocą stworzonej metodyki opracowano i wdrożono elastyczną architekturę nadzorczo-sterującą w autobusach Urbino electric firmy Solaris. Stanowiło to praktyczną aplikację wyników badań. Przedmiotowe rozwiązanie zostało poddane procesowi dwuetapowej walidacji eksperymentalnej, która umożliwiła zweryfikowanie jego parametrów oraz wykazanie przewagi nad powszechnie stosowanymi rozwiązaniami architektury.

Zaproponowana przez autora rozprawy metodyka, do której tworzenia dane wejściowe uzyskano na podstawie analiz prawa, norm oraz rozpoznania potrzeb technicznych i biznesowych, zakłada użycie metod wspomaganie decyzji w wyborze rozwiązań do implementacji. Zakres wsparcia metod dotyczy między innymi agregacji urządzeń nadzorczo-sterujących w topologii architektury, jak również optymalnego pod względem kosztów oraz długości okablowania strukturalnego ich rozmieszczenia w autobusie. Powstałe rozwiązania poddano dwuetapowej ocenie rankingowej. Stworzono zbiór konfiguracji dopuszczalnych architektury, z którego uwzględniając ograniczenia wyłoniono zbiór niezdominowanych rozwiązań problemu (front Pareto). Wybór rozwiązania do implementacji wsparto analizami wykonanymi przy użyciu deterministycznych metod optymalizacji (zastępczego kryterium zbiorczego oraz kryterium globalnego). Pierwszą część walidacji rozwiązania oparto na wielokryterialnych metodach oceny porównawczej nowo opracowanego rozwiązania oraz współcześnie wykorzystywanych typów architektury. W ramach badań przeprowadzono scenariuszową analizę wrażliwości, która pozwoliła na zidentyfikowanie wpływu zmienności kosztów urządzeń oraz długości okablowania na trwałość implementacyjną wybranego rozwiązania. Druga część walidacji polegała na testach zaimplementowanej w autobusie Urbino electric architektury w zakresie wynikowych obciążeń komunikacyjnych na poszczególnych magistralach oraz ich kształtu.

Rozprawa jest niezwykle istotnym wkładem w badania oraz komercjalizację rozwiązań projektowych i wdrożeniowych dotyczących architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych. Poprzez systematyzację wiedzy z zakresu przepisów prawa, norm oraz rekomendacji projektowych stowarzyszeń związanych z komunikacją miejską, identyfikuje formalno-prawne ograniczenia oraz wymagane testy walidacyjne dla autobusów elektrycznych. Działania opisane przez autora w rozprawie prowadzą w konsekwencji do poprawy jakości produktu, jakim jest autobus elektryczny i uzyskania homologacji niezbędnej do wprowadzenia go na rynek. Rozwiązanie specyficznych problemów technicznych, związanych z implementacją zasad bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz cybernetycznego w ramach projektowanej architektury, stanowi kluczowy aspekt pracy. Wprowadzenie deterministycznych metod wspomaganie decyzji w zakresie tworzenia architektury nadzorczo-sterującej jest rozwiązaniem innowacyjnym. Takie metody oparte są na wykorzystaniu ścisłych algorytmów matematycznych, co pozwala na uzyskanie precyzyjnych i powtarzalnych wyników, a tym samym zwiększenie efektywności podejmowania decyzji.

1. Motywacja

Ograniczenia przestrzeni i wzrost gęstości zaludnienia w miastach wymagają rozwiązań poprawiających mobilność mieszkańców. Autobusy elektryczne, emitujące mniej substancji szkodliwych, hałasu i wibracji, stanowią krok w kierunku rozwiązania tego problemu. Obserwowany przyrost liczby urządzeń nadzorczo-sterujących, będący skutkiem zmian prawnych oraz zwiększających się wymagań co do bezpieczeństwa i komfortu podróżowania, powoduje problemy podczas projektowania, implementacji oraz operacyjne

magistrali komunikacyjnych miejskich autobusów elektrycznych. Jak wynika z analizy literaturowej aktualnie stosowana metodyka projektowania architektury nadzorczo-sterującej autobusów elektrycznych nie uwzględnia czynników związanych z rozwojem technologii. Implementacja nowej, zindywidualizowanej metodyki projektowania i walidacji architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych, opartej na interdyscyplinarnym podejściu, łączącym inżynierię elektryczną, systemy sterowania i metody wspomaganie decyzji stanowi rozwiązanie problemu. Metodyka uwzględniająca analizę prawa, norm i potrzeb technicznych oraz biznesowych, umożliwi komercyjną implementację stworzonych rozwiązań.

2. Cele i teza rozprawy

Cel główny: Celem głównym rozprawy jest opracowanie metodyki projektowania elastycznej architektury nadzorczo-sterującej dla autobusów elektrycznych oraz wdrożenie zaproponowanego rozwiązania (metodyki oraz architektury) w firmie Solaris.

Cele szczegółowe:

1. Sformułowanie procedur postępowania wchodzących w skład metodyki projektowania elastycznej architektury nadzorczo-sterującej
2. Opracowanie notacji strukturyzującej modelowanie architektury nadzorczo-sterującej, stanowiącej platformę komunikacyjną interesariuszy uczestniczących w jej projektowaniu i ocenie.
3. Określenie przestrzeni rozwiązań optymalnych architektury dla zdefiniowanych kryteriów i ograniczeń optymalizacyjnych.
4. Przeprowadzenie wdrożenia pilotażowego opracowanej metodyki podczas projektowania architektury dla autobusu elektrycznego w celu oceny przydatności i potwierdzenia jej użyteczności.
5. Wdrożenie zaprojektowanej architektury w autobusie elektrycznym oraz przeprowadzenie eksperymentu weryfikacyjnego.

Tezy rozprawy: Teza 1: Sformułowana w rozprawie **metodyka** umożliwi **zaprojektowanie elastycznej** architektury nadzorczo-sterującej dla autobusów elektrycznych, **optymalnej** z punktu widzenia kryteriów ekonomicznych i technicznych, z uwzględnieniem **ograniczeń optymalizacyjnych**, na które składają się **normatywne wymagania formalne** oraz **preferencje** producenta i nabywcy **autobusu elektrycznego**.

Teza 2: Zastosowane w rozprawie ilościowe i jakościowe **metody** badawcze umożliwiają **walidację elastycznej** architektury nadzorczo-sterującej zaprojektowanej zgodnie ze sformułowaną w rozprawie metodyką **projektowania**.

3. Najważniejsze osiągnięcia pracy

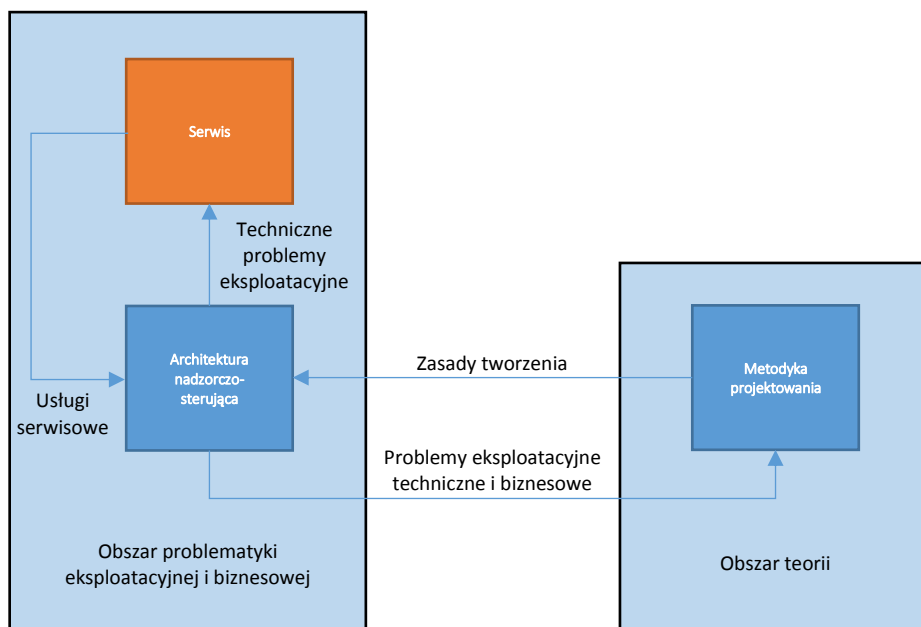
Autor zaproponował koncepcję metodyki opracowania, wdrażania oraz walidacji architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych. Metodyka projektowania została zaprezentowana przez autora rozprawy i obejmowała:

- kształtowanie układu połączeń sieci komunikacyjnej,
- zaprojektowanie i zamodelowanie struktury zachodzących w niej procesów komunikacyjnych,
- wybór elementów strukturalnych oraz dobór interfejsów,
- rozmieszczenie komponentów w pojeździe,
- optymalizację ekonomiczną rozwiązania.

Realizacja celów szczegółowych:

Cel 1. Sformułowanie procedur postępowania wchodzących w skład metodyki projektowania elastycznej architektury nadzorczo-sterującej

Autor bazując na koncepcji przedstawionej na rysunku 1 opracował oryginalne procedury postępowania jako integralną część swojej metodyki.



Rys. 1. Koncepcja tworzenia metodyki projektowania nowej elastycznej architektury nadzorczo-sterującej

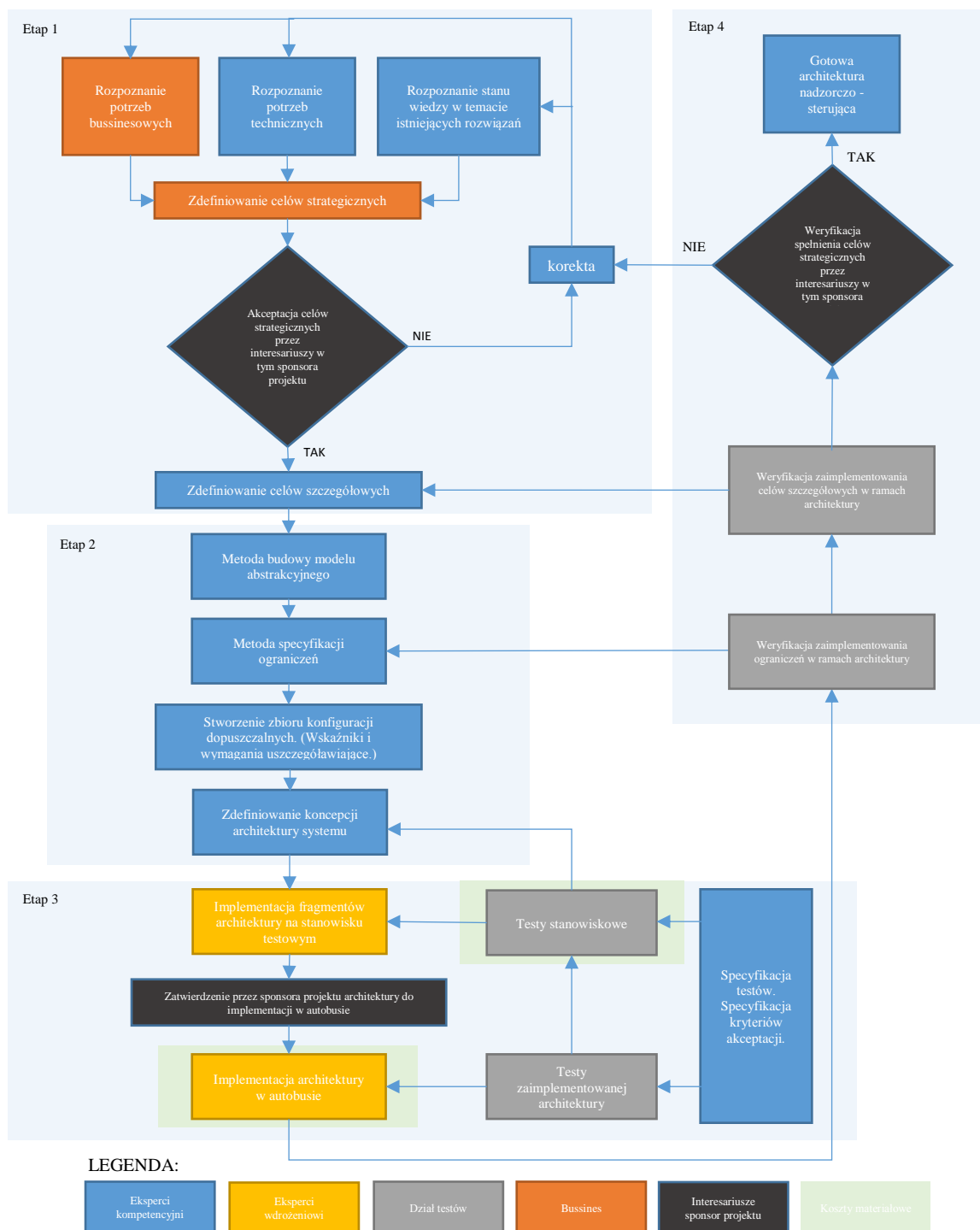
Zaproponowaną metodykę podzielił na cztery etapy:

Pierwszy etap metodyki to zdefiniowanie celów szczegółowych. Autor zaproponował sposób definiowania celów z wykorzystaniem metod wspomaganie procesów decyzyjnych, bazując na rozpoznaniu potrzeb biznesowych, technicznych oraz stanu wiedzy w temacie istniejących rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej. Takie podejście zwiększa szanse na merytorycznie poprawne wybory.

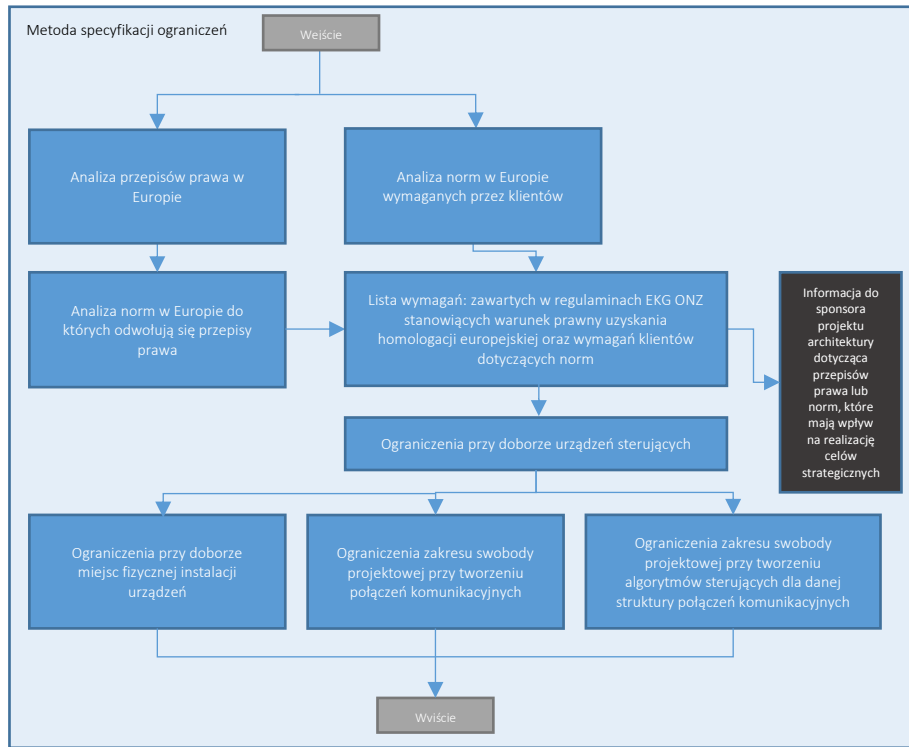
Autor w **drugim etapie** wskazał, jak ze zbioru rozwiązań równie dobrych z punktu widzenia analizowanych kryteriów oceny, bazując na deterministycznych metodach optymalizacji wielokryterialnej wybrać architekturę do implementacji. Na potrzeby realizacji etapu opracowano autorską notację strukturyzującą modelowanie architektury za pomocą macierzy oraz grafów. Autor zaproponował koncepcję i opracował metodę budowy modelu architektury, na podstawie której zdefiniował zbiór konfiguracji dopuszczalnych – macierz M_{ZKD} . W celu wsparcia decydentów w klasyfikacji (rozdziale) urządzeń nadzorczo-sterujących do odpowiednich linii magistrali komunikacyjnych opracowywanej architektury, autor przygotował skrypt w środowisku MATLAB służący do wspomaganie decyzji, bazujący na algorytmach nadzorowanych leniwych. Moduł nauczone autorskim zbiorem referencyjnym. Podczas klasyfikacji urządzeń do odpowiednich linii magistrali wykorzystuje on metody k-najbliższych sąsiadów oraz drzew klasyfikacyjnych. W ramach metody wskazano również przypadek braku zbioru referencyjnego, w którym należy użyć klasyfikatorów nienadzorowanych oraz klasteryzacji. **Trzeci etap** obejmuje implementację, uruchomienie oraz podstawowe testy zaprojektowanej architektury. Kluczowe aspekty w tej fazie to poprawny projekt okablowania strukturalnego, mocowań urządzeń nadzorczo-sterujących, koncepcji instalacji oraz właściwa konfiguracja i oprogramowanie.

Ostatnim, **czwartym etapem** procesu projektowania architektury nadzorczo-sterującej jest weryfikacja zaimplementowanego rozwiązania na zgodność z obowiązującym prawem, celami: głównym oraz szczegółowymi, jak również weryfikacja poprawności zaimplementowania uzyskanych w ramach etapów wcześniejszych ograniczeń. W etapie czwartym autor zaproponował metodykę badań architektury, dzięki której następuje potwierdzenie słuszności wybranej koncepcji architektury nadzorczo-sterującej.

Procedury zostały opisane przez autora rozprawy w formie schematów procesów projektowania przedstawionych na rysunkach 2 oraz 3.



Rys. 2. Model procesu projektowania architektury nadzorczo-sterującej



Rys. 3. Metoda specyfikacji ograniczeń

Cel 2. Opracowanie notacji strukturyzującej modelowanie architektury nadzorczo-sterującej, stanowiącej platformę komunikacyjną interesariuszy uczestniczących w jej projektowaniu i ocenie.

Autor rozprawy opracował i wdrożył notację strukturyzującą modelowanie architektury nadzorczo-sterującej w formie macierzy wraz z techniką wizualizacji rozwiązań za pomocą grafów. Notacja zakłada stworzenie zbioru konfiguracji dopuszczalnych architektury w formie macierzy:

$$M_{ZKD} = \begin{bmatrix} M_{KD,1} \\ \vdots \\ M_{KD,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{KD,(n)} = [M_{KDN,n} M_{MODA,n} M_{RODA,n} M_{KA,n} M_{KUDA,n} M_{KUDA2,n} M_{CSDA,n}] \quad (2)$$

gdzie: $M_{KD,(1...n)}$ – konfiguracje architektury, $M_{KDN,n}$ – numer macierzy konfiguracji architektury, $M_{MODA,n}$ – obciążenie maksymalne linii CAN w procentach występujące w danej architekturze, $M_{RODA,n}$ – zakres obciążeń CAN w danej architekturze, $M_{KA,n}$ – koszt okablowania strukturalnego danej konfiguracji architektury, $M_{KUDA,n}$ – sumaryczny koszt urządzeń dodatkowych niezbędnych w architekturze do podniesienia bezpieczeństwa (IDS), $M_{KUDA2,n}$ – sumaryczny koszt urządzeń dodatkowych niezbędnych w architekturze do realizacji danego jej typu (np. kontroler domeny), $M_{CSDA,n}$ – poziom bezpieczeństwa cybernetycznego dla danej architektury. Poszczególne architektury dopuszczalne autor rozprawy przedstawił jako macierze składające się z konfiguracji poszczególnych linii.

$$M_{KD,(1...n)} = \begin{bmatrix} M_{Li,1} & M_{KLi,1} & M_{OL,1} & M_{K,1} & M_{KUD,1} & M_{KUD2,1} & M_{CS,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{Li,n} & M_{KLi,n} & M_{OL,n} & M_{K,n} & M_{KUD,n} & M_{KUD2,n} & M_{CS,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie: $M_{Li,(1...n)}$ – numer rozpatrywanej linii CAN, $M_{KLi,(1...n)}$ – numer macierzy konfiguracji linii, $M_{OL,(1...n)}$ – obciążenie danej linii, $M_{K,(1...n)}$ – koszt okablowania strukturalnego danej linii,

$M_{KUD(1...n)}$ – koszt urządzeń dodatkowych w danej linii niezbędnych w architekturze do podniesienia bezpieczeństwa, $M_{KUD2(1...n)}$ – koszt urządzeń dodatkowych w danej linii niezbędnych w architekturze do realizacji danego jej typu, $M_{CS(1...n)}$ – poziom bezpieczeństwa cybernetycznego dla danej linii. Macierz konfiguracji linii $M_{KL,(1...n)}$ zawiera informacje dotyczące charakterystyki danej linii oraz urządzeń wchodzących w jej skład.

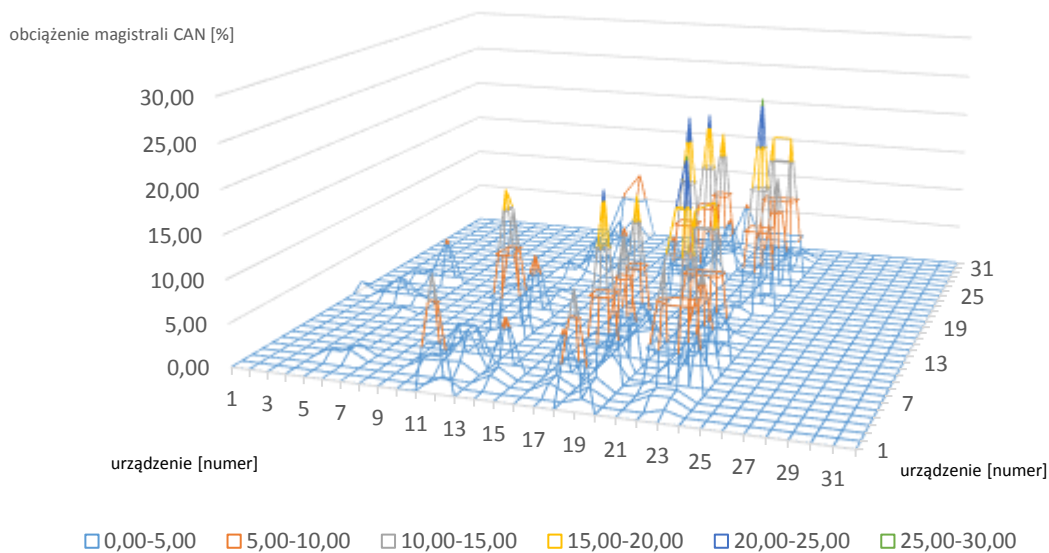
$$M_{KL,(1...n)} = \begin{bmatrix} U_{i,1} & M_{U,1} \\ \vdots & \vdots \\ U_{i,n} & M_{U,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie: $U_{i,(1...n)}$ – identyfikator urządzenia, $M_{U,(1...n)}$ – macierz charakteryzująca poszczególne urządzenie nadzorczo-sterujące, która zawiera informacje o przypisaniu do pozycji w autobusie (i -ty wiersz macierzy $M_{POZYCJONOWANIA}$), sumie obciążeń magistrali generowanych przez urządzenie, wyliczonej jako suma maksymalnych obciążeń komunikacyjnych dla danego urządzenia (dane z i -tego wiersza macierzy $M_{KORELACJI}$) oraz prędkości i rodzaju magistrali, której obsługa jest zaimplementowana w urządzeniu i będzie wykorzystywana w danej linii. Bazując na informacjach od producentów urządzeń nadzorczo-sterujących oraz danych z przeprowadzonych testów, autor rozprawy wskazał wzajemne korelacje pomiędzy poszczególnymi urządzeniami.

$$M_{KORELACJI} = [a_{i,j}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & a_{1,n} \\ \vdots & a_{i,j} & \vdots \\ a_{n,1} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

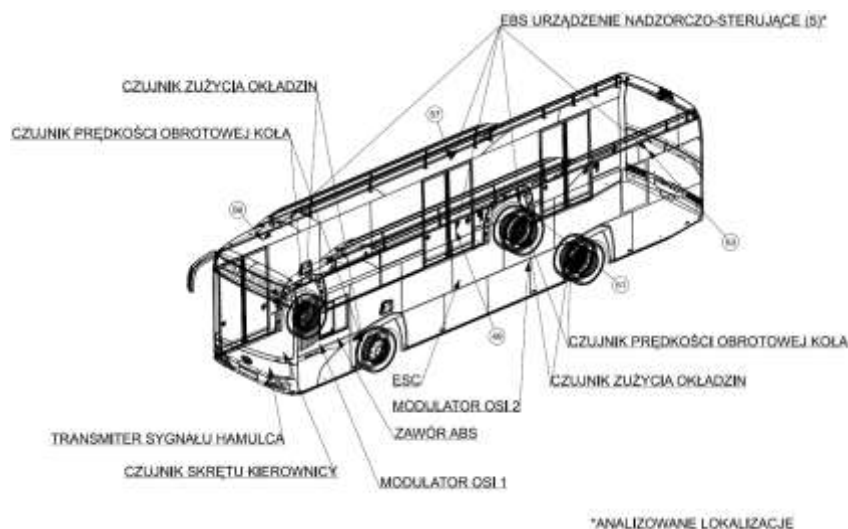
gdzie $a_{i,j}$ – suma wszystkich maksymalnych obciążeń komunikacyjnych generowanych pomiędzy danymi urządzeniami.

Graficzna reprezentacja fragmentu macierzy dla rozpatrywanych urządzeń została zaprezentowana na rysunku 4.



Rys. 4. Obciążenie magistrali CAN generowane przy maksymalnej transmisji danych pomiędzy poszczególnymi urządzeniami przy prędkości transmisji 250 kb/s

Miejsce preferowanej zabudowy musi być skonfrontowane z rzeczywistymi jej możliwościami. Dobór miejsca montażu autor rozprawy zaprezentował na podstawie układu nadzorczo-sterującego elektronicznego systemu hamulcowego EBS.



Rys. 5. Podstawowe komponenty wymagające okablowania elektrycznego systemu EBS

W analizach wskazano stałe miejsca instalacji komponentów, które nie ulegają zmianie podczas przeprowadzania optymalizacji. Na rysunku 5 wskazano natomiast rozpatrywane 5 możliwych do instalacji miejsc dla elektronicznego układu nadzorczo-sterującego EBS. W analizowanym przypadku cel, to minimalizacja sumy długości okablowania dla poszczególnych możliwych do implementacji pozycji montażu EBS. W tym przypadku użyto deterministycznej metody optymalizacji bazującej na funkcji użyteczności. Jako kryterium do minimalizacji uznano sumę długości okablowania dla każdej zaproponowanej pozycji EBS.

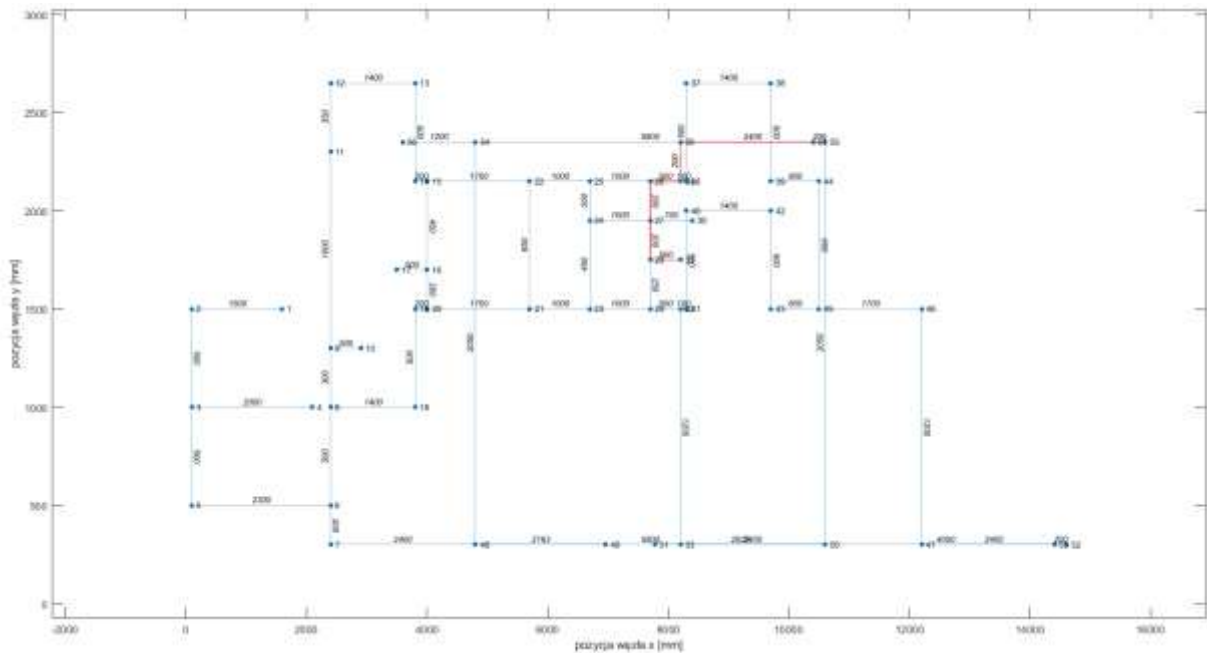
$$U_{i,extr}(k_1) = U_{1,extr}(k_1) + U_{2,extr}(k_1) + \dots + U_{n,extr}(k_1) \quad (6)$$

We wzorze $U_{m,extr}$ stanowi optymalną pod względem długości okablowania (k_1) ścieżkę pomiędzy wybraną i -tą lokalizacją elektronicznego układu nadzorczo-sterującego EBS a n -tym komponentem systemu. Finalna lokalizacja EBS zostanie wybrana na podstawie kryterium globalnego:

$$\min_{k_1} U_i(k_1) \quad (7)$$

Funkcja użyteczności nadaje się również do optymalizacji zadań wielokryterialnych. Jeżeli w rozpatrywanym przypadku wzięte zostaną pod uwagę dodatkowe aspekty związane ze zmiennym w zależności od miejsca instalacji kosztem okablowania, łącz, kosztem roboczogodziny instalacji w podwoziu (użycie dodatkowego sprzętu, podnośników, kanałów, urządzeń wspierających) oraz wewnątrz pojazdu, które są różne, pojawi się możliwość optymalizacji rozwiązania ze względu na dodatkowe kryteria.

W ramach zadania zdefiniowano w modelu pojazdu „trasy kablowe” jak również miejsca dla nich charakterystyczne (początek i koniec każdego z odcinków). Odczytano pozycję każdego z punktów w układzie współrzędnych (x,y,z) z modelu pojazdu przygotowanego w oprogramowaniu Siemens NX. Współrzędne przeniesiono w postaci macierzy do oprogramowania MATLAB. Przygotowane rozwiązanie w formie siatki zrzutowano z przesunięciem uwzględniającym różnicę w oddaleniu poszczególnych warstw siatki „tras kablowych” (z_2-z_1 , długość połączeń pomiędzy warstwami) w postaci płaskiego grafu nieskierowanego. Ze względu na addytywną postać analizowanej funkcji użyteczności względem kryterium, optymalizację ścieżki połączeń dla każdego z urządzeń przeprowadzono osobno. Następnie wyniki dla każdej i -tej lokalizacji układu elektronicznego nadzorczo-sterującego EBS zostały zsumowane zgodnie ze wzorem 6. Przykładowe wyniki analizy przedstawiono na rysunku 6.



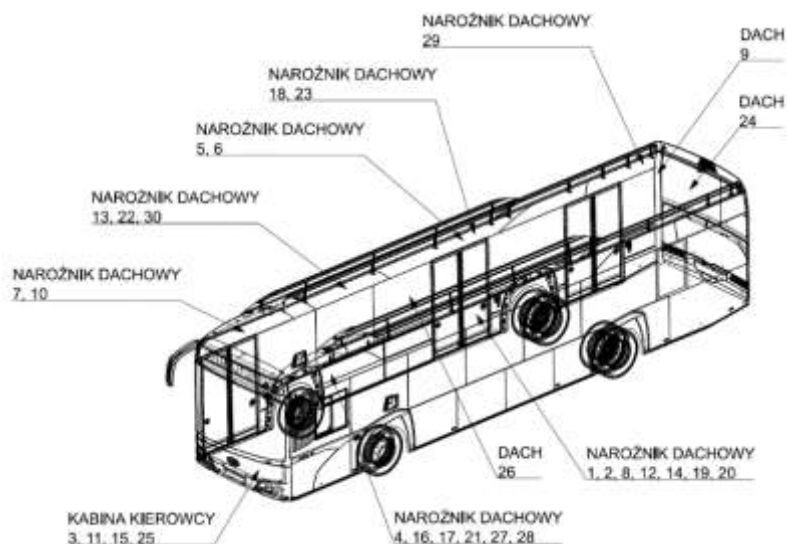
Rys. 6. Wyznaczona minimalna długość okablowania pomiędzy pozycją 57 (EBS) a 31 (ESC)

Wyniki analizy dla poszczególnych proponowanych miejsc lokalizacji EBS (49, 51, 53, 56, 57) zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki optymalizacji długości połączeń dla poszczególnych i -tych lokalizacji elektroniki EBS

numer urządzenia	numer wierzchołka	numer urządzenia	numer wierzchołka	numer urządzenia	numer wierzchołka	numer urządzenia	numer wierzchołka	numer urządzenia	numer wierzchołka
1	49	1	51	1	53	1	56	1	57
3	31	3	31	3	31	3	31	3	31
minCableLength	11813	minCableLength	7672	minCableLength	9050	minCableLength	11000	minCableLength	4200
1	49	1	51	1	53	1	56	1	57
4	17	4	17	4	17	4	17	4	17
minCableLength	8063	minCableLength	11322	minCableLength	12700	minCableLength	9150	minCableLength	7950
1	49	1	51	1	53	1	56	1	57
5	1	5	1	5	1	5	1	5	1
minCableLength	9563	minCableLength	16022	minCableLength	17400	minCableLength	10650	minCableLength	15050
1	49	1	51	1	53	1	56	1	57
6	4	6	4	6	4	6	4	6	4
minCableLength	9563	minCableLength	16022	minCableLength	17400	minCableLength	10650	minCableLength	15050
1	49	1	51	1	53	1	56	1	57
7	10	7	10	7	10	7	10	7	10
minCableLength	6063	minCableLength	12522	minCableLength	13900	minCableLength	7150	minCableLength	10550
1	49	1	51	1	53	1	56	1	57
8	30	8	30	8	30	8	30	8	30
minCableLength	12213	minCableLength	8072	minCableLength	9450	minCableLength	11000	minCableLength	4200
SUMA	57278	SUMA	71632	SUMA	79900	SUMA	59600	SUMA	57000
minCableLength		minCableLength		minCableLength		minCableLength		minCableLength	

Najniższą długość okablowania osiągnięto w przypadku zlokalizowania sterownika EBS w wierzchołku 57, który odpowiada lokalizacji w platformie środkowej autobusu po prawej stronie. W ramach przedstawionego procesu wyznaczono miejsca lokalizacji poszczególnych pozostałych urządzeń nadzorczo-sterujących. Dane zapisano w macierzy $M_{POZYCJONOWANIA}$. Na rysunku 7 pokazano wybrane miejsca instalacji poszczególnych urządzeń nadzorczo-sterujących w autobusie solo.

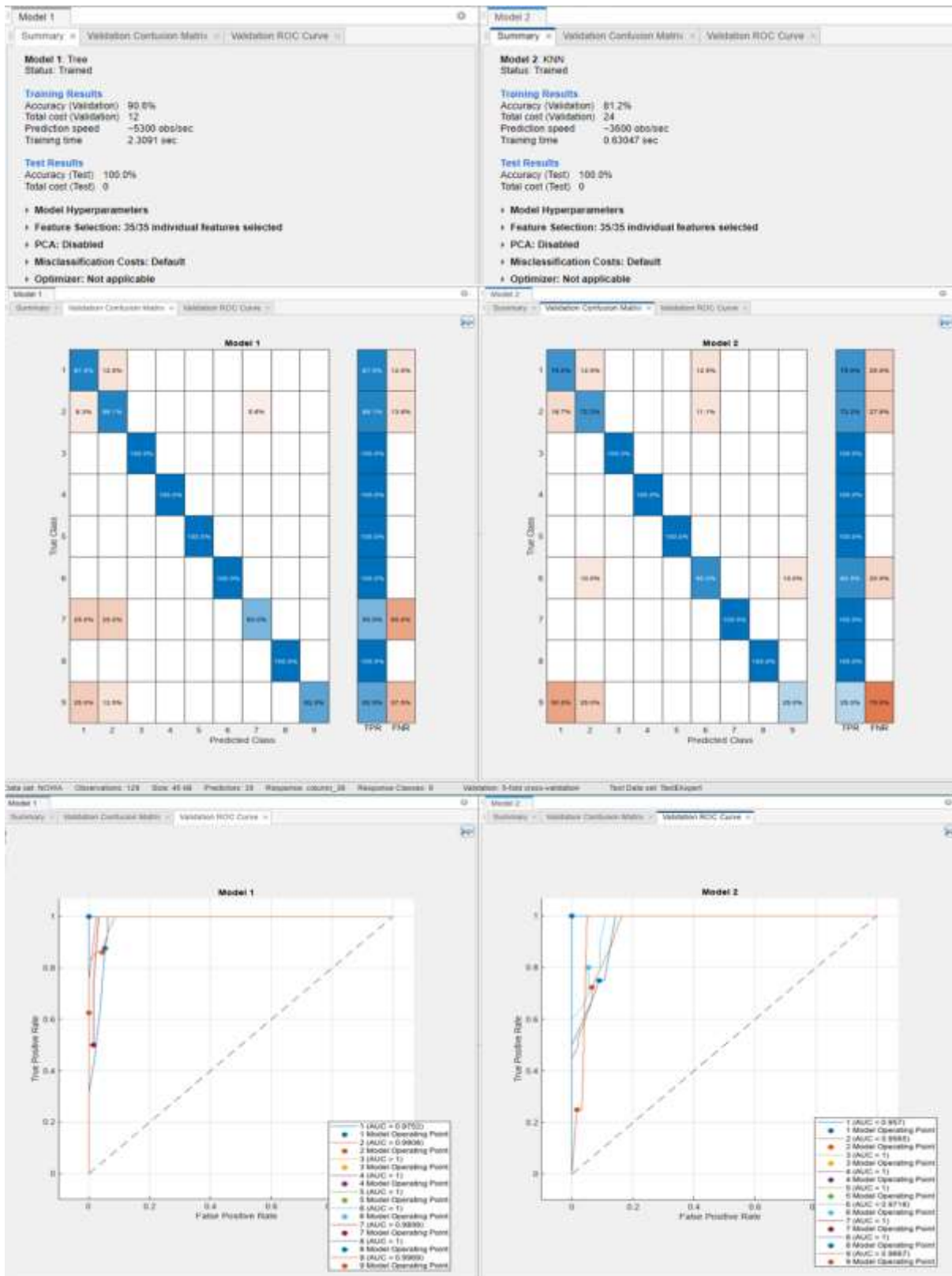


Rys. 7. Wybrane miejsca instalacji poszczególnych urządzeń nadzorczo-sterujących w autobusie solo

Podczas tworzenia architektury nadzorczo-sterującej należy wziąć pod uwagę wiele czynników i ograniczeń opisanych w niniejszej rozprawie. W odpowiedniej klasyfikacji może pomóc system wspomaganie podejmowania decyzji. Aby go stworzyć należy wypracować dla każdego z analizowanych przypadków ograniczenia odpowiednie klasyfikatory. Podczas analiz autor rozprawy użył do klasyfikacji metody k najbliższych sąsiadów. W ramach działań wytypowano jeszcze jedną metodę klasyfikacji związaną z drzewami klasyfikacyjnymi. Wykorzystano ją również do wyznaczania przynależności obiektów do klas. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą powyższych metod przedstawiono na rysunku 8. W obu przypadkach polepszenie jakości wyników klasyfikacji można uzyskać przy zwiększaniu liczebnym i większej różnorodności przypadków uczących. Z wykorzystaniem dwóch powyższych modeli klasyfikatorów przeprowadzono eksperyment walidacyjny polegający na klasyfikacji wcześniej nie wykorzystywanego układu elektronicznego systemu wsparcia kierowcy przed kolizją CMS, którego główna komunikacja odbywa się z układem elektronicznym układu hamulcowego EBS. Pełna macierz korelacji dla CMS jest następująca:

$$M_{\text{KORELACJI CMS= CMS}} = [0 \ 0 \ 0.25 \ 0 \ 15 \ 12 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.25 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.25 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 500]$$

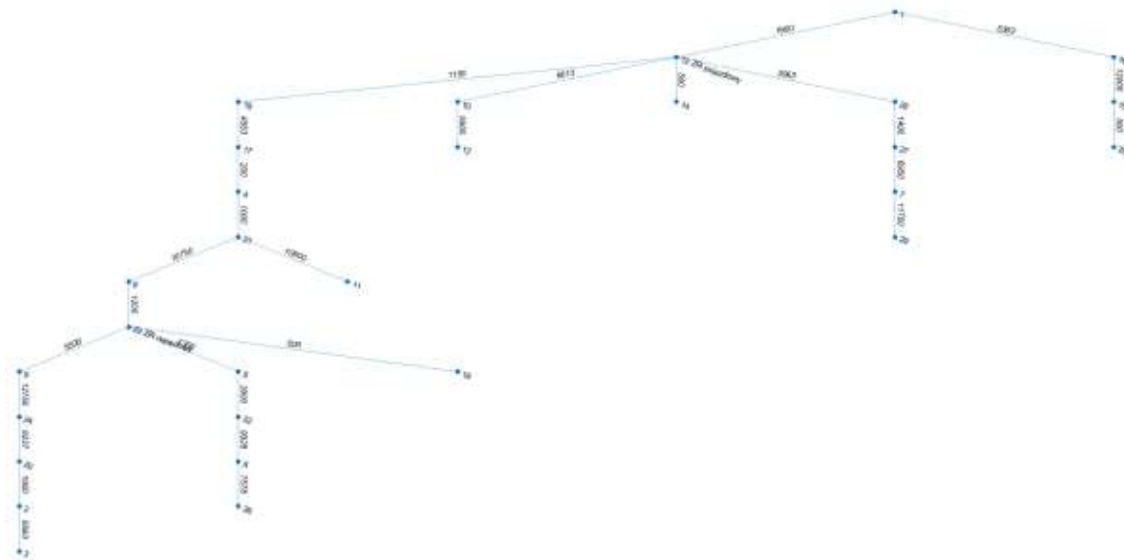
Przeprowadzono klasyfikację, a jej wynikiem było uzyskanie wektora, w którym znajdują się informacje na temat przypisania elementu (obserwacji) do danej kategorii. W obu przypadkach otrzymując wskazanie dodania urządzenia do 5 linii magistrali. Niezależnie poproszono ekspertów o przypisanie urządzenia do jednej z linii. Urządzenie zostało przypisane przez nich również do 5 linii magistrali. Wdrożenie metod klasyfikacyjnych wykorzystujące uczenie nadzorowane jest korzystne z punktu widzenia pracodawcy. Przy użyciu takich metod wiedza ekspercka zostaje w przedsiębiorstwie, nawet gdy eksperci zmieniają swoje miejsce pracy. Osoby z mniejszym doświadczeniem mogą skorzystać z rozwiązań i wiedzy pozostawionej przez swoich poprzedników przy rozbudowie architektury o kolejne urządzenia.



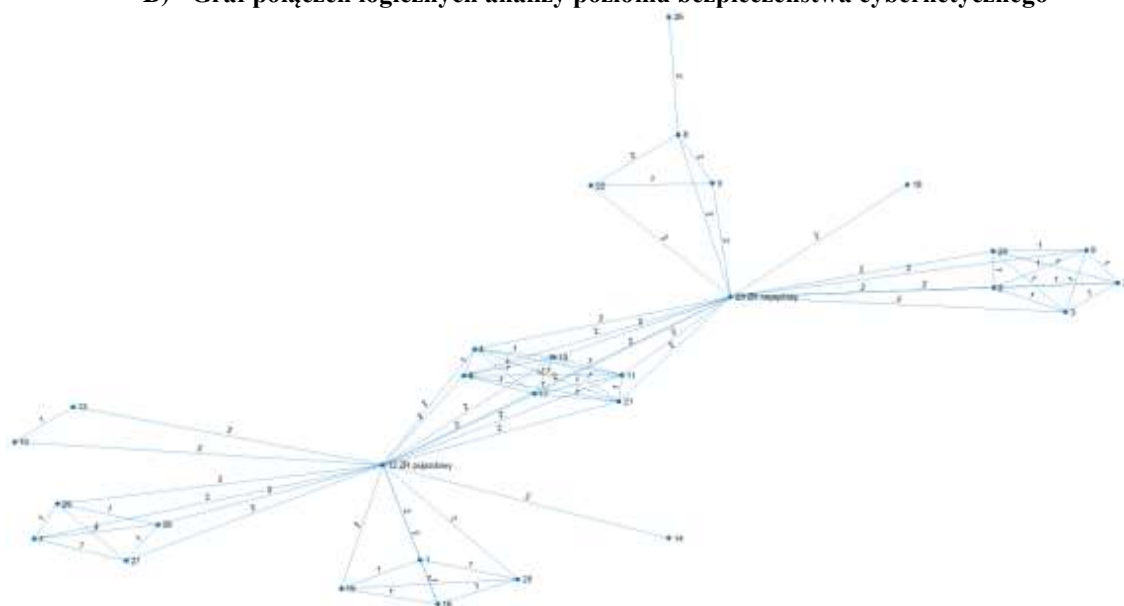
Rys. 8. Porównanie wyników nauki klasyfikatorów najbliższych sąsiadów oraz drzew klasyfikacyjnych

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe grafy reprezentacji architektury.

A) Graf reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury



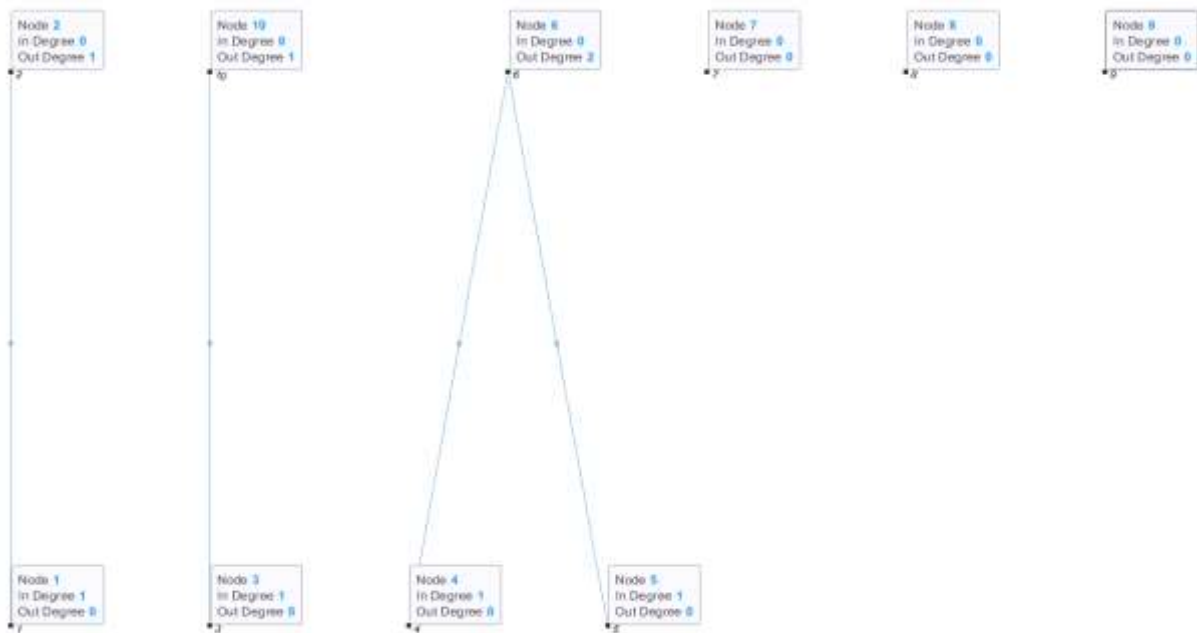
B) Graf połączeń logicznych analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego



Rys. 9. Przykładowe grafy reprezentacji architektury MKDN = 1

Cel 3. Określenie przestrzeni rozwiązań optymalnych architektury dla zdefiniowanych kryteriów i ograniczeń optymalizacyjnych.

Analizując zbiór rozwiązań dopuszczalnych zapisany w macierzy M_{ZKD} , możliwe będzie przeprowadzenie z uwzględnieniem wektora zmiennych decyzyjnych M_{KDv} klasyfikacji rozwiązań w celu wybrania rozwiązań optymalnych. Jako kryterium porównawcze przyjęto, że architektura o numerze konfiguracji $M_{KDN,n}$ wskazuje przewagę nad konfiguracją architektury $M_{KDN,m}$, gdy ta przewaga istnieje dla przynajmniej dla jednego kryterium a dla pozostałych kryteriów jest przynajmniej nie gorsza. Na rysunku 10 przedstawiono diagram Hassego dla analizowanych rozwiązań M_{ZKD} (tabela 2) pozwalający na identyfikację kandydatów na rozwiązanie optymalne.



Rys. 10. Diagram Hassego dla rozwiązań dopuszczalnych architektury z macierzy M_{ZKD}

Tabela. 2. Zredukowana macierz konfiguracji dopuszczalnych M_{KD} - rozwiązania optymalne

M_{KDN}	M_{ODA}	M_{RODA}	M_{KA}	M_{KUDA}	M_{KUDA2}	M_{CSDA}
1	0,4091	0,3715	512,01	0	650	3406
3	0,4984	0,4196	454,19	0	650	3538
4	0,4091	0,3715	515,5	400	650	5350
5	0,4984	0,4196	480,01	400	650	4960
7	0,6725	0,5937	537,17	0	650	3574
8	0,3979	0,3603	596,47	800	650	6440
9	0,3979	0,3603	592,98	400	650	4402

Aby uzyskać rozwiązanie optymalne w sensie Pareto ustalono kryteria związane z funkcją jakości architektury oraz jej kosztem uwzględniając funkcje ograniczeń technicznych. W analizowanym przypadku zadanie optymalizacji polegać będzie na znalezieniu takiej architektury, która zapewni uzyskanie jak najniższej wartości obciążenia maksymalnego linii komunikacyjnych występujących w architekturze przy zachowaniu równomierności obciążenia poszczególnych linii. Przy czym koszt okablowania w tej architekturze ma być jak najniższy, a poziom bezpieczeństwa dla danej architektury jak najwyższy. Ponieważ algorytm optymalizacji będzie poszukiwał minimum funkcji, a w powyższym zadaniu chodzi o maksymalizację poziomu bezpieczeństwa, to funkcja zostanie przedstawiona w odwrotnej formie jako poziom odporności na zagrożenia związane z bezpieczeństwem użytkowania. Na rysunku 11 przedstawiono przejście z przestrzeni parametrów do przestrzeni kryteriów. Na rysunku 12 zilustrowano poszukiwanie rozwiązań niezdominowanych. Przyjęto następującą postać funkcji celu:

$$f_1(x_i) = \frac{x_{MKA,i}}{\text{MAX}(x_{MKA(1..n)})} + \frac{x_{MKUDA,i}}{\text{MAX}(x_{MKUDA(1..n)})} \quad (8)$$

$$f_2(x_i) = \frac{f_p(x_i)}{\text{MAX}(f_p(x_{(1..n)}))} \quad (9)$$

gdzie $f_p(x_i)$ oznacza:

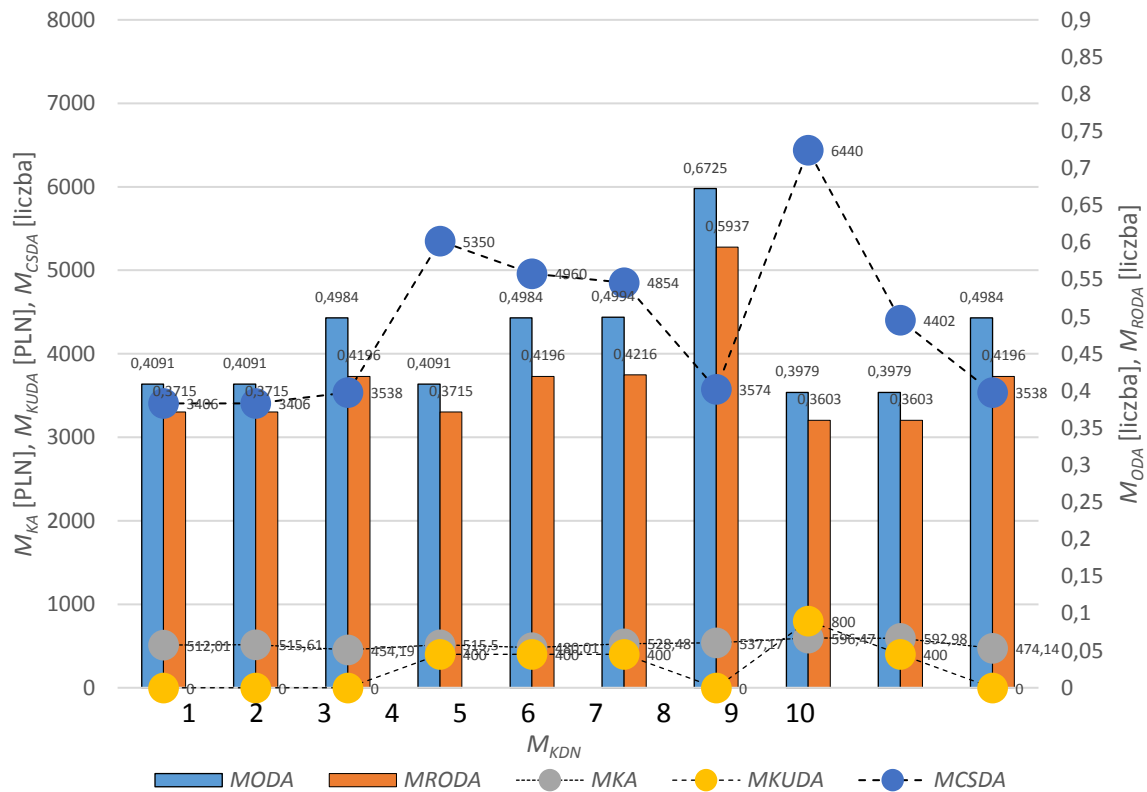
$$f_p(x_i) = \frac{x_{MODA,i}}{MAX(x_{MODA(1...n)})} + \frac{x_{MRODA,i}}{MAX(x_{MRODA,i})} + \left(1 - \frac{x_{MKUDA,i}}{MAX(x_{MKUDA(1...n)})}\right) + \dots$$

$$\dots + \left(1 - \frac{x_{MCSDA,i}}{MAX(x_{MCSDA(1...n)})}\right)$$
(10)

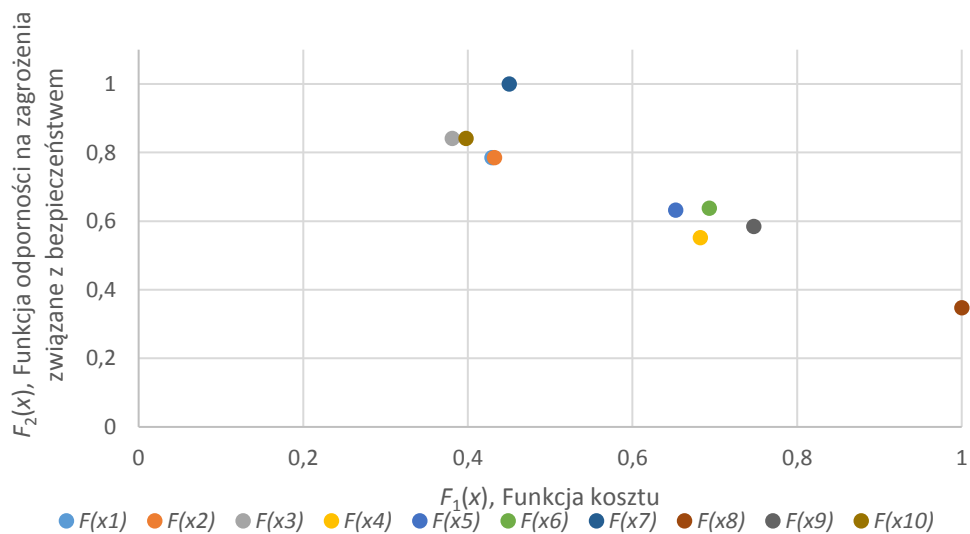
gdzie: n liczba rozwiązań dopuszczalnych z macierzy M_{ZKD} .

Wymienione funkcje $f_1(x)$ oraz $f_2(x)$, są przeciwstawne i stanowią kryteria zadania optymalizacji wielokryterialnej. Wyniki przeprowadzonej przez autora analizy ze wskazaniem rozwiązań niezdominowanych przedstawiono w tabeli 3.

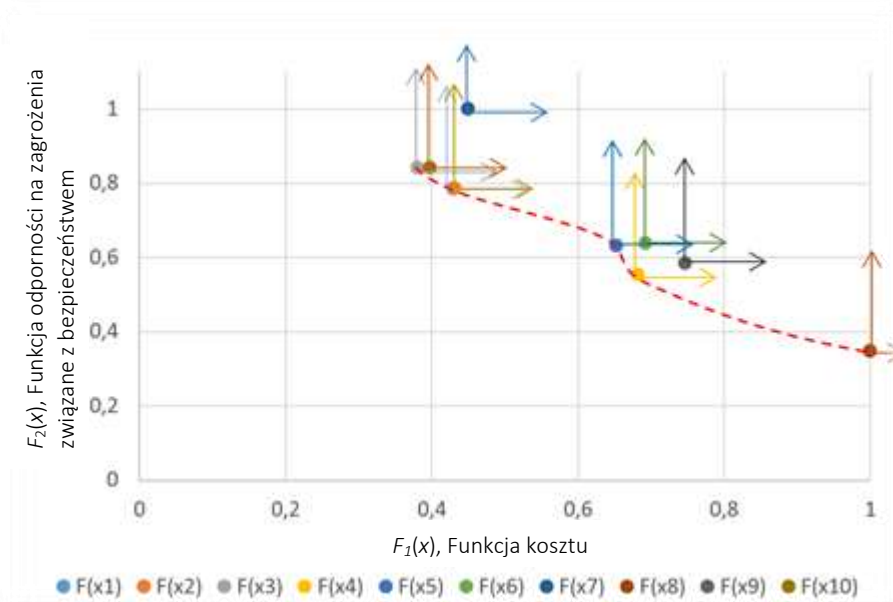
A) Przestrzeń parametrów



B) Przestrzeń kryteriów



Rys 11. Przejście z przestrzeni parametrów do przestrzeni kryteriów dla zbioru konfiguracji dopuszczalnych architektury



Rys. 12. Poszukiwanie rozwiązań niezdominowanych – front Pareto

Tabela 3. Wartości funkcji F wraz z wynikiem obliczeń frontu Pareto

M_{KDN}	$F_1(x)$	$F_2(x)$	Architektura niezdominowana
1	0,4290	0,7852	TAK
2	0,4322	0,7852	NIE
3	0,3807	0,8413	TAK
4	0,6821	0,5524	TAK
5	0,6523	0,6321	TAK
6	0,6930	0,6383	NIE
7	0,4502	1	NIE
8	1	0,3479	TAK
9	0,7470	0,5849	NIE
10	0,3974	0,8413	NIE

Weryfikacja za pomocą diagramu Hassego, jak również analiza frontu Pareto pozwala na redukcję możliwych wyborów wersji architektury w sposób optymalny. Autor rozprawy przeprowadził analizę wyników uzyskanych w obu przypadkach w celu porównania ich między sobą. Rozwiązania zebrano w tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie rozwiązań optymalnych

M_{KDN}	M_{ODA}	M_{RODA}	M_{KA}	M_{KUDA}	M_{KUDA2}	M_{CSDA}	Przyrost poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego na jednostkowy koszt dodatkowy poniesiony na jego realizację	Rozwiązania optymalne	
								Diagram Hassego	Front Pareto
1	0,4091	0,3715	512,01	0	650	3406	5,240	TAK	TAK
3	0,4984	0,4196	454,19	0	650	3538	5,443	TAK	TAK
4	0,4091	0,3715	515,5	400	650	5350	5,095	TAK	TAK
5	0,4984	0,4196	480,01	400	650	4960	4,724	TAK	TAK
7	0,6725	0,5937	537,17	0	650	3574	5,498	TAK	NIE
8	0,3979	0,3603	596,47	800	650	6440	4,441	TAK	TAK
9	0,3979	0,3603	592,98	400	650	4402	4,192	TAK	NIE

Przeprowadzona analiza wskazała, iż konfiguracje $M_{KDN}=7$ oraz $M_{KDN}=9$ są w analizowanych parametrach ekstremalnie niekorzystne. W związku z powyższym wskazano na metodę frontu Pareto jako korzystniejsze narzędzie w zakresie zawężania zbioru rozwiązań dopuszczalnych.

Cel 4. Przeprowadzenie wdrożenia pilotażowego opracowanej metodyki podczas projektowania architektury dla autobusu elektrycznego w celu oceny przydatności i potwierdzenia jej użyteczności.

Przeprowadzenie analizy celów doprowadziło do wskazania pożądanego wektora zmiennych decyzyjnych M_{KDV} , dla którego wszystkie składniki będące najistotniejszymi parametrami charakteryzującymi architekturę osiągną wybrane ekstremum (minimum lub maksimum) przy uwzględnieniu zdefiniowanych dla nich ograniczeń.

$$M_{KDV} = [\min(M_{MODA,v}) \min(M_{RODA,v}) \min(M_{KA,v}) \min(M_{KUDA,v}) \max(M_{CSDA,v})] \quad (11)$$

Wybór rozwiązania do implementacji wykonano bazując na dwóch metodach: znormalizowanego kryterium zbiorczego oraz kryterium globalnego. W tabeli 5 wskazano uszeregowany wynik kryterium zbiorczego.

Tabela 5. Uszeregowany wynik zastępczego kryterium zbiorczego.

M_{KDN}	Wynik kryterium zbiorczego	Czy zainstalowano IDS?
1	1,5635	Nie
3	1,6599	Nie
4	1,7675	Tak
5	1,9824	Tak
9	2,0091	Tak
8	2,1985	Tak
7	2,3456	Nie

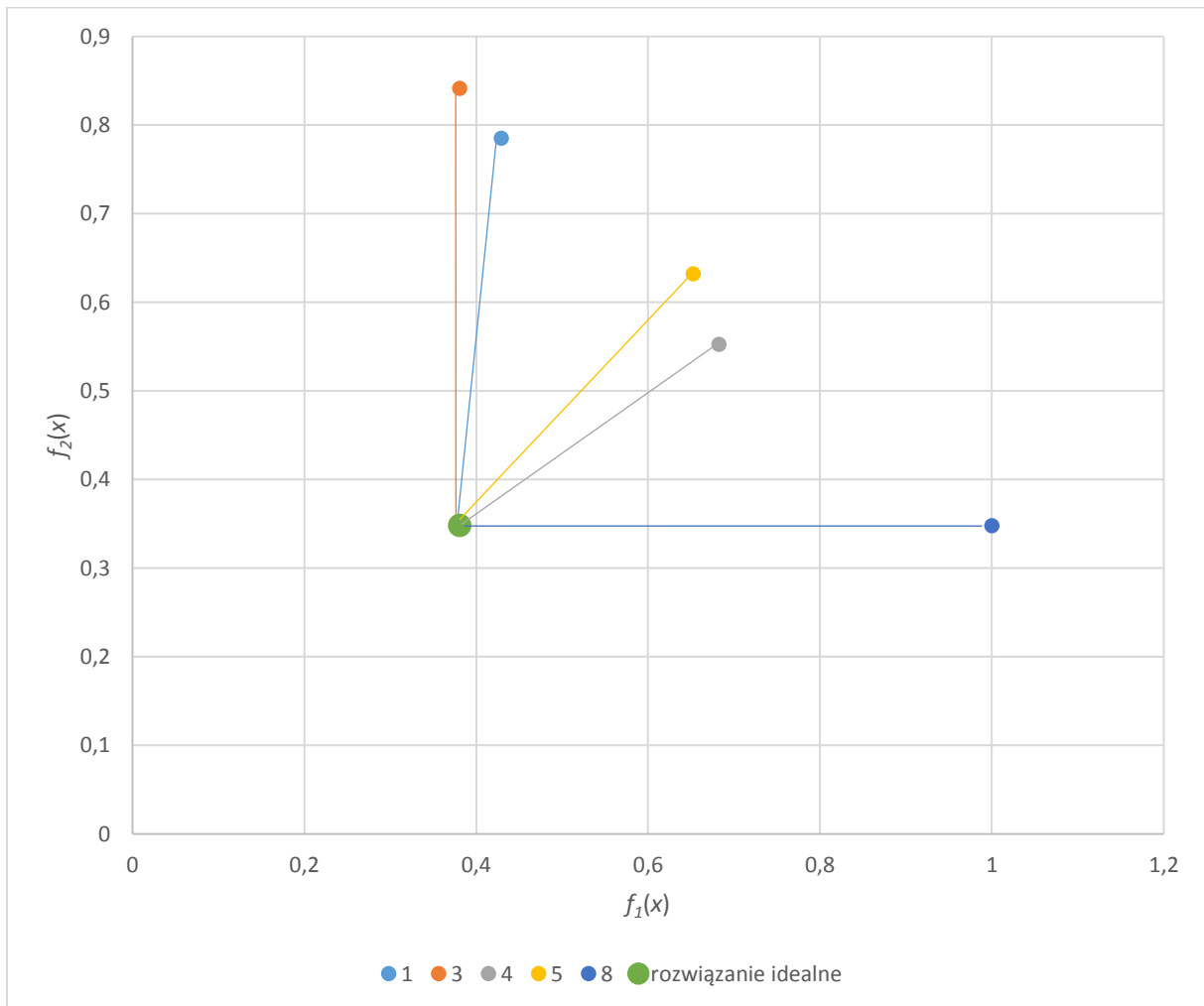
Alternatywną metodą wyboru architektury do implementacji jest wybór rozwiązania z optymalnych uzyskanych za pomocą frontu Pareto. Ze względu na konieczność znalezienia najlepszego rozwiązania problemu w całym obszarze przeszukiwań, autor rozprawy wykorzystał kryterium globalne do jego wyłonienia. Bazując na rozwiązaniach ze zbioru Pareto wskazanych na rysunku 13 wyznaczono rozwiązanie idealne $k(a_i)$, spełniające warunek minimum dla każdego kryterium $k_j(a_i)$ rozpatrywanego niezależnie (tabela 6). Rozwiązanie idealne: $k_1^o(a_i) = 0,380731638$; $k_2^o(a_i) = 0,347905433$. Uszeregowany wynik optymalizacji przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 6. Obliczenia optymalizacji metodą kryterium globalnego

M_{KDN}	$\left[\frac{[k_1^*(a_i) - k_1^o(a_i)]^2}{k_1^o(a_i)} \right]$	$\left[\frac{[k_2^*(a_i) - k_2^o(a_i)]^2}{k_2^o(a_i)} \right]$	$\left\{ \sum_{j=1}^2 \left[\frac{[k_j^*(a_i) - k_j^o(a_i)]^2}{k_j^o(a_i)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$ (12)
1	0,016206194	1,580187323	1,263485
3	0	2,011691311	1,418341
4	0,62665913	0,345772659	0,98612
5	0,509052199	0,667389287	1,084639
8	2,645573622	0	1,626522

Tabela 7. Uszeregowany wynik optymalizacji metodą kryterium globalnego

M_{KDN}	Wynik kryterium globalnego
4	0,98612
5	1,084639
1	1,263485
3	1,418341
8	1,626522



Rys. 13. Zbiór rozwiązań Pareto optymalnych dla macierzy konfiguracji dopuszczalnych architektury M_{ZKD}

Nie wprowadzając dodatkowych ograniczeń i wyjaśnień można stwierdzić, iż metoda kryterium zbiorczego preferowała rozwiązania tańsze i mniej bezpieczne, natomiast metoda kryterium globalnego wskazała rozwiązania droższe ale bezpieczniejsze. Wybrano wersję architektury $M_{KDN} = 1$ do implementacji. Ostateczna decyzja miała miejsce przed wprowadzeniem nowych przepisów homologacyjnych, wymagających zastosowania urządzeń IDS. Bazowa wersja wybranej architektury w trakcie prac związanych z rozprawą doktorską została zaimplementowana i uruchomiona w pojeździe Urbino 15LE electric. Zaktualizowana wersja tej architektury oraz oprogramowania sterującego trafiła również do Urbino 9LE electric. W rozprawie postanowiono opisać wdrożenie architektury w 12-metrowym typie autobusu z uwagi na zmiany związane z przejściem na nowy model komputera pokładowego oraz napędowego. Dzięki tej implementacji zrealizowano cel strategiczny związany z przygotowaniem rozwiązania dla rodziny pojazdów Urbino oraz potwierdzono jego trwałość. Architektura została zaimplementowana w autobusie nE12 Demo PL 2022 numer VIN SUU24116ENB025074. Jest to aktualnie jedyny pojazd z nowymi sterownikami oraz na nowo napisanym oprogramowaniu do tychże sterowników. Na rysunku 14 przedstawiono autobus podczas procesu ładowania przez złącze PLUG-IN.

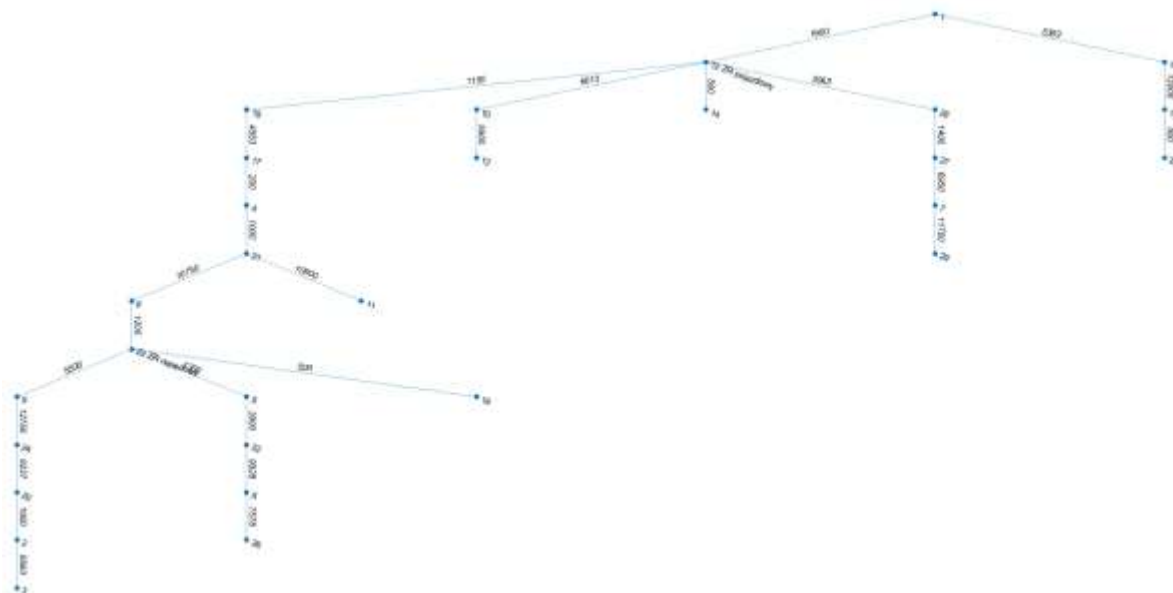


Rys. 14. Autobus nE12 Demo PL 2022

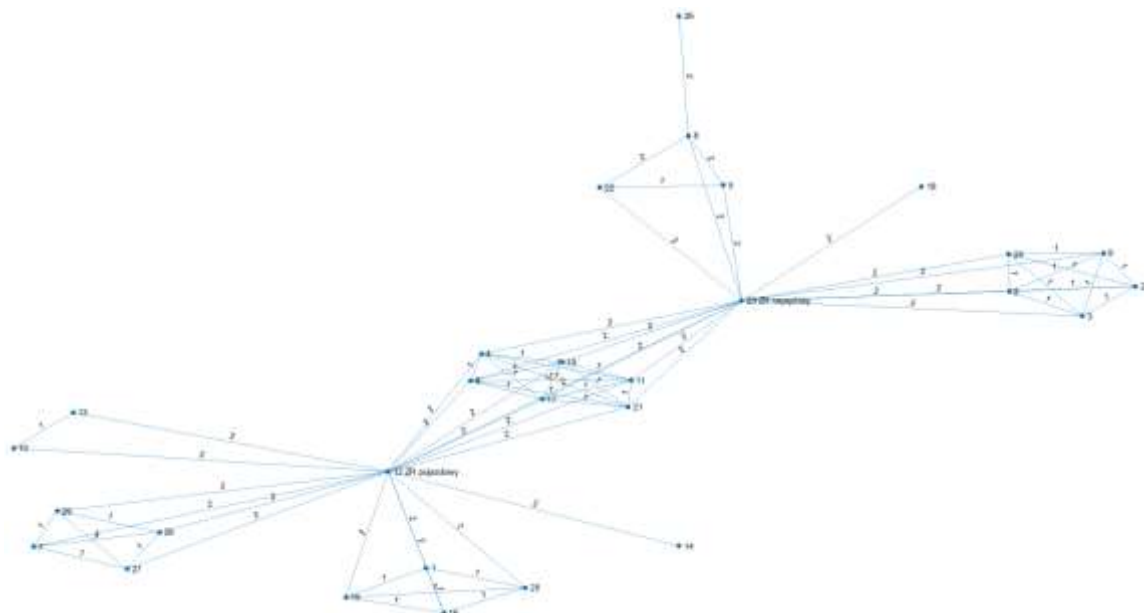
Autobus został wyposażony w bazową wersję architektury. Podstawowe parametry implementowanego rozwiązania autor przedstawił w tabeli numer 8, natomiast topologia połączeń fizycznych oraz logicznych związanych z analizą bezpieczeństwa zostały przedstawione na rysunku 15 oraz 16.

Tabela 8. Autobus nE12 Demo PL 2022/ Podstawowe parametry magistrali komunikacyjnych - wersja bazowa

Numer magistrali CAN	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Prędkość magistrali CAN [kb/s]	250	250	125	250	500	250	250	250	250
Maksymalne obciążenie magistrali CAN [%]	31,87	40,91	24,05	15,55	35,52	3,76	25,85	15,55	9,52
Długość okablowania w magistrali CAN [mm]	19763	29663	23113	500	15128	38950	500	7578	11513



Rys. 15. Autobus nE12 Demo PL 2022/ Graf reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury - wersja bazowa



Rys. 16. Autobus nE12 Demo PL 2022/ Graf połączeń logicznych analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego - wersja bazowa

Cel 5. Wdrożenie zaprojektowanej architektury w autobusie elektrycznym oraz przeprowadzenie eksperymentu weryfikacyjnego.

Autor potwierdził skuteczność opracowanej przez siebie metodyki, realizując zarówno wdrożenia pilotażowe podczas projektowania architektury dla autobusów elektrycznych długości 9 m oraz 15 m, jak również pełne wdrożenie w ramach projektu 12-metrowego autobusu elektrycznego. Udowodnił w ten sposób uniwersalność metody w zakresie rodziny autobusów Urbino. Bazowa architektura w opisywanych autobusach powstała z uwzględnieniem nadmiarowości komunikacyjnej, co pozwoliło na doposażenie ich w dodatkowe systemy. W rozprawie autor opisał wyłącznie implementację architektury w 12-metrowym autobusie elektrycznym, ze względu na pełne wdrożenie metodyki oraz użycie w nim najnowszych rozwiązań centralnych komputerów sterujących. Powstała koncepcja stała się standardem w firmie podczas tworzenia i implementacji rozwiązań dla nowych typów autobusów. W ujęciu poziomów gotowości technologicznej określono, iż w ramach działań wykonano przejście przez wszystkie poziomy skali do TRL 9 (Technology Readiness Level 9), a więc do wykorzystania wyników prac w warunkach rzeczywistych. Proces wdrożenia zaprojektowanej architektury jak również eksperyment walidacyjny opisano w rozdziałach 11 oraz 12.

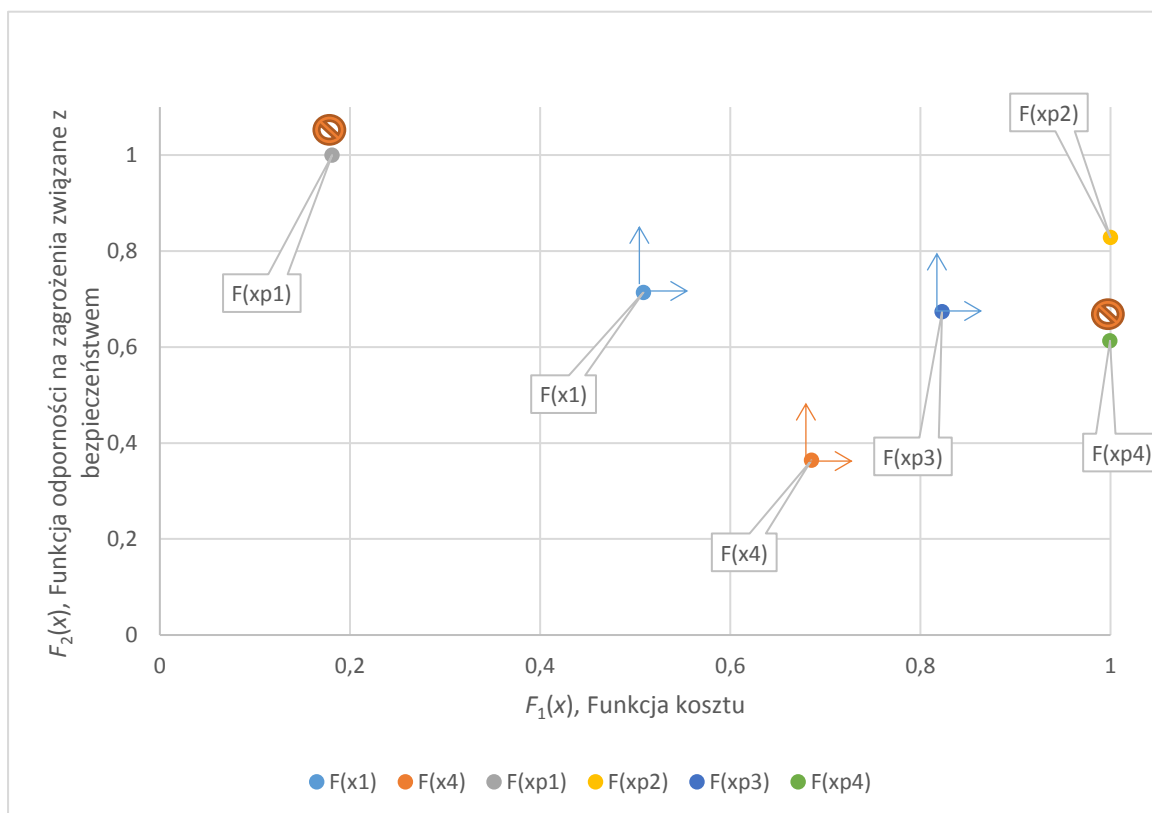
Weryfikację wykonano w dwóch etapach. Pierwszy etap stanowi porównanie zaimplementowanej w autobusie architektury $M_{KDN} = 1$ z rozwiązaniami istniejącymi. Drugi etap stanowi porównanie otrzymanych w ramach przeprowadzonych eksperymentów badawczych wyników z danymi na podstawie teoretycznych obliczeń realizowanych podczas tworzenia rozwiązania.

Aby móc przeprowadzić weryfikację stworzono architektury bazując na wytycznych dotyczących istniejących rozwiązań (tabela 9).

Tabela 9. Macierz konfiguracji porównawczych M_{ZKP}

M_{KPN}	M_{ODA}	M_{RODA}	M_{KA}	M_{KUDA}	M_{KUDA2}	M_{CSDA}
1	76,57%	67,05%	414,00zł	0	0	2488
2	63,92%	61,76%	334,16zł	0	1950	5168
3	54,11%	35,44%	429,37zł	0	1450	5480
4	54,11%	35,44%	432,86zł	0	1850	7030

Autor rozprawy porównał zapisane w macierzy konfiguracji porównawczych M_{ZKP} architektury z rozwiązaniem wskazanym do implementacji $M_{KDN} = 1$ oraz $M_{KDN} = 4$ rozwiązaniem wybranym w przypadku dostępności IDS. Ze względu na potrzebę oceny wielu kryteriów porównanie zostało wykonane w oparciu o metodę frontu Pareto (rys. 17) oraz wykorzystaniu kryterium globalnego. Zastosowano te same kryteria oraz ograniczenia, które zostały zatwierdzone przez interesariuszy i sponsora projektu.



Rys. 17. Analiza frontu Pareto

Tabela 10. Wyniki analizy porównawczej rozwiązań architektury $M_{KDN} = 1$, $M_{KDN} = 4$ oraz $M_{KPN}=3$.

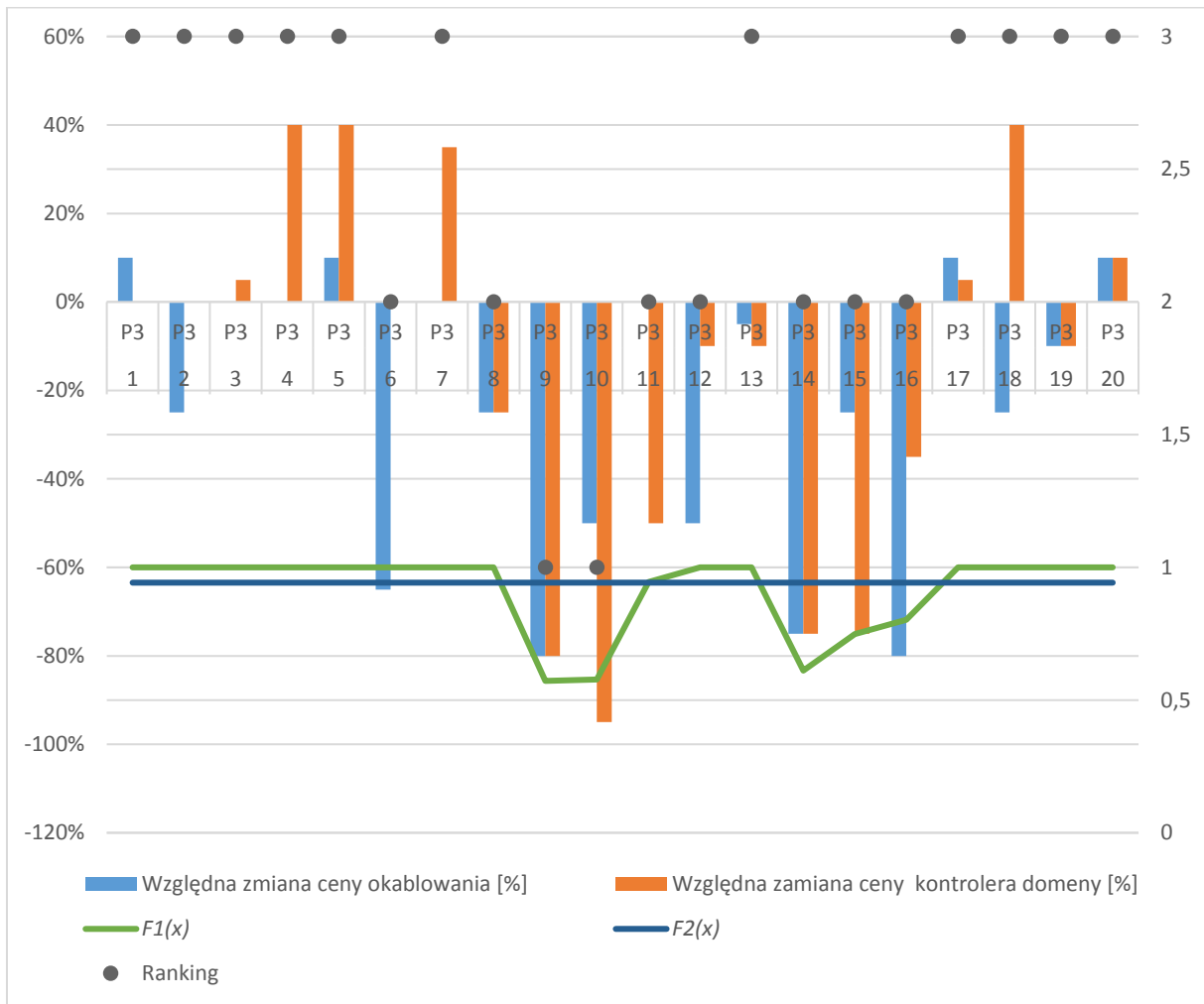
M_{KDN}	M_{ODA}	M_{RODA}	M_{KA}	M_{KUDA+} M_{KUDA2}	M_{CSDA}	Zgodnie ze wzorem (34)	Ranking wyniku kryterium globalnego
1	0,4091	0,3715	512,01	650	3406	0,6041797022653	2
4	0,4091	0,3715	515,5	1050	5350	0,536778468896446	1
P3	0,5411	0,3544	429,37	1450	5480	0,845413175523916	3

Z tabeli 10 wynika, iż najlepszym rozwiązaniem jest rozwiązanie $M_{KDN} = 4$ z IDS, a w przypadku braku dostępności IDS rozwiązanie $M_{KDN} = 1$. Rozwiązanie $M_{KPN} = 3$, jest rozwiązaniem najlepszym pod względem poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego, ale również jest rozwiązaniem najdroższym z analizowanych, przy czym maksymalne obciążenie magistrali w rozwiązaniu $M_{KPN} = 3$ jest wyższe ze względu na skoncentrowanie urządzeń na linii kontrolera domeny akcesoriów oraz kontrolera domeny napędu. Dodanie kolejnego kontrolera domeny spowodowałoby obniżenie obciążenia tych linii, jednak wpłynęło by również na podwyższenie kosztu architektury.

W celu określenia jaki wpływ mają poszczególne parametry architektury na jej wybór zaproponowano przeprowadzenie scenariuszowej analizy wrażliwości. Kluczowe fragmenty analizy wrażliwości zebrano w tabeli numer 11 oraz na rysunku 18.

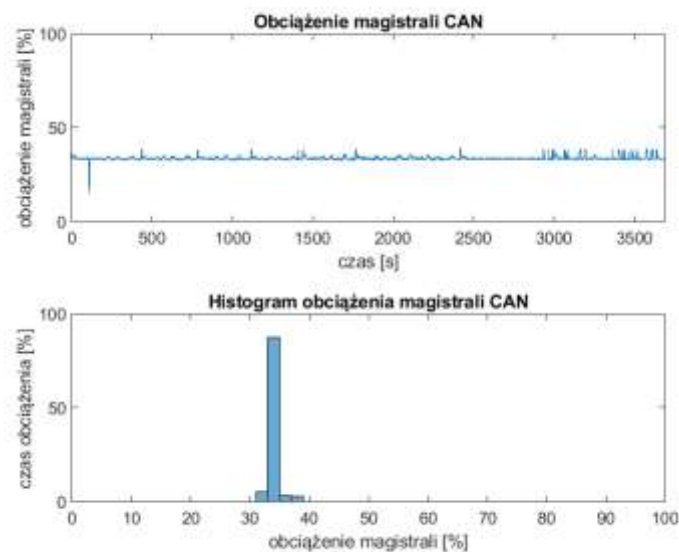
Tabela 11. Kluczowe fragmenty analizy wrażliwości

NO	MKDN	cena okablowania zmiana o %	cena kontrolera domeny zmiana o %	Zakres zmiany parametrów			F1(x)	F2(x)	kryterium globalne wynik	Ranking
				koszt IDS	koszt kontrolera domeny	długość okablowania strukturalnego				
1	1	10%	0%	0	650	146708	0,604	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,814	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1450	135333	1	0,9424	0,929176538	3
2	1	-25%	0%	0	650	146708	0,656	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,883	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1450	92272,5	1	0,9424	0,843122601	3
3	1	0%	5%	0	650	146708	0,605	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,816	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1490	123030	1	0,9424	0,927398186	3
4	1	0%	40%	0	650	146708	0,528	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,712	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1770	123030	1	0,9424	1,110060311	3
5	1	10%	40%	0	650	146708	0,518	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,698	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1770	135333	1	0,9424	1,139988635	3
6	1	-65%	0%	0	650	146708	0,726	1	0,761188599	3
	4			400	650	147708	0,978	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1450	43060,5	1	0,9424	0,759944833	2
7	1	0%	35%	0	650	146708	0,538	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,725	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1730	123030	1	0,9424	1,082569882	3
8	1	-25%	-25%	0	650	146708	0,739	1	0,761188599	3
	4			400	650	147708	0,996	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1250	92272,5	1	0,9424	0,748176642	2
9	1	-80%	-80%	0	0	650	0,742	1	0,817102812	3
	4			400	400	650	1	0,5678	0,747453724	2
	P3			0	0	810	0,572	0,9424	0,65974362	1
10	1	-50%	-95%	0	650	146708	0,742	1	0,812594631	3
	4			400	650	147708	1	0,5678	0,730432066	2
	P3			0	690	61515	0,578	0,9424	0,65974362	1
11	1	0%	-50%	0	650	146708	0,742	1	0,761188599	3
	4			400	650	147708	1	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1050	123030	0,945	0,9424	0,714040998	2
12	1	-50%	-10%	0	650	146708	0,733	1	0,761188599	3
	4			400	650	147708	0,988	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1370	61515	1	0,9424	0,753374632	2
13	1	-5%	-10%	0	650	146708	0,654	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,881	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1370	116878,5	1	0,9424	0,84627987	3
14	1	-75%	-75%	0	650	146708	0,742	1	0,790640488	3
	4			400	650	147708	1	0,5678	0,635253923	1
	P3			0	850	30757,5	0,612	0,9424	0,65974362	2
15	1	-25%	-75%	0	650	146708	0,742	1	0,761188599	3
	4			400	650	147708	1	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	850	92272,5	0,749	0,9424	0,659799982	2
16	1	-80%	-35%	0	650	146708	0,742	1	0,761188599	3
	4			400	650	147708	1	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1170	24606	0,802	0,9424	0,664670402	2
17	1	10%	5%	0	650	146708	0,592	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,798	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1490	135333	1	0,9424	0,95372953	3
18	1	-25%	40%	0	650	146708	0,555	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,748	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1770	92272,5	1	0,9424	1,037222481	3
19	1	-10%	-10%	0	650	146708	0,662	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,891	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1370	110727	1	0,9424	0,834832882	3
20	1	10%	10%	0	650	146708	0,58	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,782	0,5678	0,347234533	1
	P3			0	1530	135333	1	0,9424	0,978877364	3



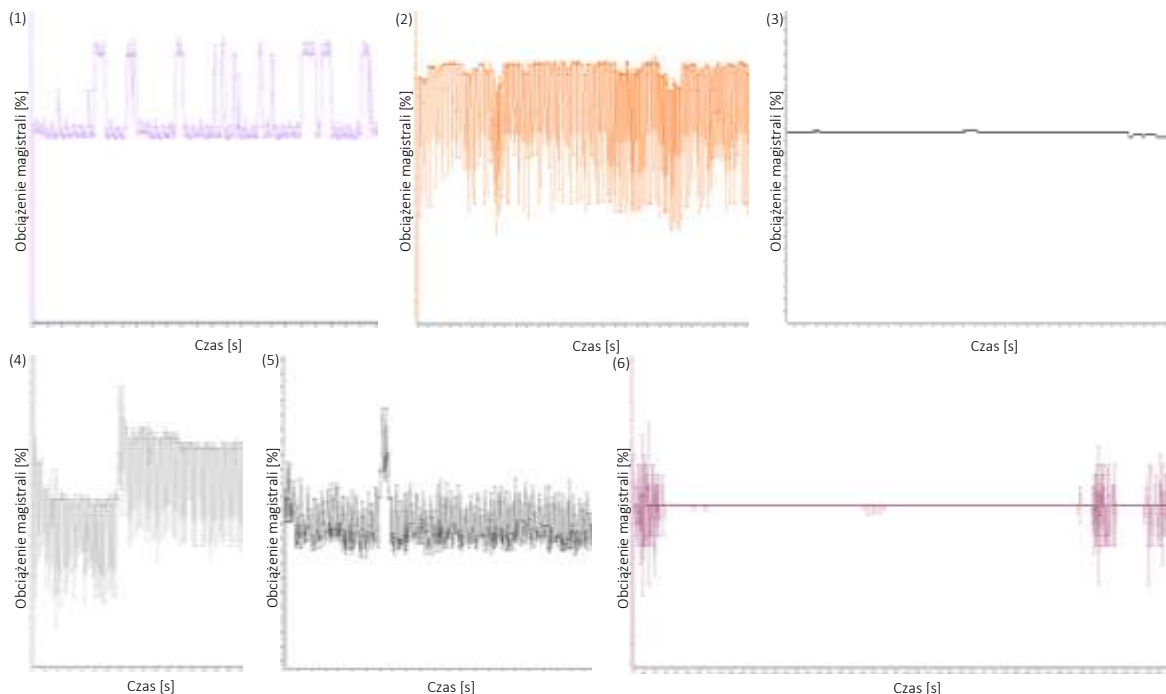
Rys. 18. Analiza wrażliwości – kluczowe fragmenty

W celu weryfikacji zaimplementowanego rozwiązania przeprowadzono szereg jazd testowych zarówno w warunkach miejskich jak i na obszarze zamkniętym. Analizie poddano zarejestrowane podczas jazd obciążenia występujące na poszczególnych magistralach CAN w pojeździe. Na rysunku 19 przedstawiono przykład reprezentatywny.



Rys. 19. Magistrala ICAN linia 5. Obciążenie bazowe 35,5%

Po wykonaniu powyższych analiz stwierdzono, że obciążenia w rzeczywistych systemach realizują trzy typy asymetrii rozkładu, gdzie na osi odciętych (x) zaprezentowane jest obciążenie danej magistrali wyrażone w procentach, a na osi rzędnych (y) procent czasu w jakim występuje dane obciążenie. Za pomocą takich typów asymetrii można oszacować zwiększanie obciążeń na poszczególnych magistralach nie znając jeszcze typów urządzeń o które zostaną one w przyszłości rozbudowane. Na rysunku 20 pokazano przykładowe przebiegi obciążeń w czasie.



Rys. 20. Przykładowe zarejestrowane przebiegi obciążeń na magistralach komunikacyjnych w autobusach

Tabela 12. Obciążenie magistrali dane statystyczne

Numer magistrali	Wartość maksymalna obciążenia [%]	Wartość minimalna obciążenia [%]	Wartość średnia obciążenia [%]	Wariancja [% ²]	Odchylenie standardowe [%]	Wartość mediany obciążenia [%]	Wartość średniej modalnej obciążenia [%]
1	30,78	27,68	30,02	0,0589	0,2426	30,01	29,93
2	44,09	11,68	41,21	0,7530	0,8678	41,21	41,16
3	25,18	24,46	24,75	0,0081	0,0900	24,79	24,79
4	18,44	17,09	17,57	0,0034	0,0585	17,57	17,57
5	39,47	15,02	33,81	1,1603	1,0772	33,53	33,43
6	3,70	3,44	3,56	0,0001	0,0119	3,56	3,56
7	26,72	25,42	25,73	0,0442	0,2103	25,68	25,64
8	16,88	16,44	16,68	0,0006	0,0247	16,69	16,69
9	9,38	8,62	9,11	0,0485	0,2202	9,24	9,25

Z powyższych obliczeń zaprezentowanych w tabeli 12 wynika, iż magistrale o numerach 1,2,5 oraz 7 wykazują asymetrię prawostronną przy wartości wskaźnika skośności odpowiednio 0,0852; 0,0504; 0,3807; 0,0893. Magistrala o numerze 9 wykazuje asymetrię lewostronną o wskaźniku skośności -0,1423, natomiast magistrale numer 3, 4, 6 oraz 8 zaokrąglając wyniki do jednego miejsca znaczącego po przecinku można przybliżyć jako symetryczne. W taki sposób należy więc symulować zwiększenie obciążenia dla tych poszczególnych magistral, wykonując symulacje związane z dodawaniem nowych sterowników.

4. Wnioski i podsumowanie

Na podstawie badań i analiz przeprowadzonych przez autora podczas projektowania i wdrażania metodyki oraz implementacji architektury nadzorczo-sterującej wyciągnięto następujące wnioski:

- Dowiedziono, że indywidualne podejście do projektowania architektury nadzorczo-sterującej wymaga większych nakładów pracy i czasu, ale przynosi lepsze rezultaty niż podejście bazujące na gotowych rozwiązaniach architektury, takich jak architektura strefowa czy domenowa, stosowanych w branży autobusów elektrycznych.
- Uzyskano potwierdzenie, że podejście indywidualne łączy zalety gotowych rozwiązań architektury, ponieważ grupuje obszary związane ze sobą logicznie, jednocześnie minimalizując długość okablowania. Poprawia to jakość transmisji oraz zmniejsza koszty i wagę zaimplementowanego rozwiązania.
- Ustalono, że najważniejsze przy projektowaniu architektury jest uwzględnienie ograniczeń wynikających z przepisów prawa oraz norm w nich zawartych. Bez spełnienia tego warunku autobus nie otrzyma homologacji i nie będzie możliwe wprowadzenie go na rynek.
- Zwrócono uwagę, że bezpieczeństwo funkcjonalne oraz cybernetyczne jest kluczowe dla systemów autobusów elektrycznych. Należy uwzględnić standardy, takie jak ISO 21434 oraz ISO 26262 podczas projektowania, aby zidentyfikować słabe punkty w architekturze systemu. Analiza zagrożeń i ocena ryzyka w fazie projektowania umożliwi zastosowanie odpowiednich środków łagodzących.
- Wykazano, że punkty podłączenia zewnętrznych urządzeń diagnostycznych są potencjalnym źródłem ataków hackerskich i stanowią punkty krytyczne dla bezpieczeństwa cybernetycznego pojazdu.
- Udowodniono również, że ważnym aspektem podczas wykonywania analizy bezpieczeństwa funkcjonalnego w autobusie elektrycznym jest określenie poziomu bezpieczeństwa ASIL, czasów reakcji urządzeń oraz dopuszczalnego czasu przesyłu informacji między nimi. Wartości te wpływają bezpośrednio na topologię fizyczną oraz logiczną tworzonej architektury oraz dobór komponentów.
- Wykazano, że największym ryzykiem w zakresie bezpieczeństwa funkcjonalnego mogą być przerwy w transmisji danych w magistrali w zakresie urządzeń odpowiedzialnych za napęd pojazdu.
- Wskazano, iż na bezpieczeństwo pracy autobusu wpływa również obciążenie magistrali komunikacyjnych, które można zmniejszyć poprzez właściwe rozmieszczenie urządzeń nadzorczo-sterujących oraz wprowadzenie magistrali o wyższej prędkości przesyłu (np. 500 kb/s).
- Potwierdzono, że systemy HMI spełniają kluczową rolę w sterowaniu autobusem. Określono, że powinny one być łatwe w obsłudze, przekazując kierowcy tylko niezbędne informacje. Analiza wyników badania wskazuje również na potrzebę stosowania rozwiązań informacyjnych dla kierowcy, takich jak systemy dźwiękowe czy haptyczne, które nie zmniejszają koncentracji na drodze.
- Wskazano, że dobierając komponenty i urządzenia sterujące związane z HMI, należy uwzględnić zarówno aspekt komunikacyjny, jak i fizyczne rozmieszczenie urządzeń, kontrolki i wskaźników w kabinie kierowcy oraz sposób i normy zgodnie z którymi powinny być oznaczone.
- Zaobserwowano, że stałe interfejsy komunikacyjne ułatwiają utrzymanie architektury
- Wykazano, że weryfikacja przeprowadzona za pomocą diagramu Hassego, czy też przygotowanie frontu Pareto, pozwala na redukcję możliwych wyborów wersji architektury w sposób optymalny.

- Udowodniono, że podejście Pareto przynosi większe efekty w ograniczaniu liczby architektur w przestrzeni rozwiązań optymalnych niż analizy przeprowadzane za pomocą diagramu Hassego.
- Wykazano, że metoda kryterium zbiorczego preferowała rozwiązania tańsze i mniej bezpieczne, natomiast metoda kryterium globalnego wskazała rozwiązania droższe, ale bezpieczniejsze.
- Architektura kontrolera domeny z bramą uzyskała najwyższy wśród wszystkich analizowanych wynik poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego, jednakże koszty jej budowy z uwzględnieniem kosztów implementacji wszystkich urządzeń niezbędnych do jej realizacji są jednymi z najwyższych (zaraz po architekturze strefowej rozproszonej).
- W ramach przeprowadzonej scenariuszowej analizy wrażliwości określającej wpływ parametrów architektury na jej wybór jako rozwiązania do implementacji, wykryto większą wrażliwość wyborów dokonanych za pomocą kryterium globalnego na wahania cen urządzeń niż na fizyczne skracanie i redukcję kosztów związanych z okablowaniem strukturalnym.

Do najważniejszych osiągnięć autora rozprawy zaliczyć należy:

- Opracowanie metodyki opartej o 3 główne stopnie weryfikacji: symulacje, testy stanowiskowe oraz weryfikacja w warunkach eksploatacyjnych.
- Wykonaną analizę ograniczeń wynikającą z założeń bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz bezpieczeństwa cybernetycznego.
- Opracowanie oryginalnego modelu parametrycznego architektury nadzorczo-sterującej będącego jej reprezentacją w procesie optymalizacji.
- Wprowadzenie metod wspomagania decyzji do procesu wyboru umiejscowienia urządzeń nadzorczo-sterujących w architekturze.
- Stworzenie zbioru referencyjnego do nauki klasyfikatora umożliwiające gromadzenie wiedzy w ramach przedsiębiorstwa i wykorzystanie jej przez mniej doświadczonych pracowników wspomagających się systemem klasyfikującym działającym zgodnie z wskazaniami ekspertów.
- Przeprowadzenie badania dotyczącego technik wyboru rozwiązań optymalnych, porównującego metodę Diagramu Hassego z podejściem znanym jako rozwiązanie optymalne w sensie Pareto.
- Opracowanie autorskiej metody notacji strukturyzującej modelowanie architektury za pomocą macierzy wraz z techniką wizualizacji za pomocą grafów.
- Zaproponowanie autorskiej wielowariantowej metody lokalizacji urządzeń nadzorczo-sterujących w autobusie, opartej o analizę najkrótszych tras kablowych odwzorowujących przestrzeń dostępną dla okablowania za pomocą grafu.
- Opracowanie i budowę stanowiska badawczego do weryfikacji obciążeń magistrali komunikacyjnych generowanych przez urządzenia nadzorczo-sterujące oraz interfejsu wizualnego HMI.

Przedstawiona rozprawa ma kluczowe znaczenie w zakresie badań stosowanych i komercjalizacji rozwiązań projektowych oraz wdrożeniowych architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych. Usystematyzowano w niej wiedzę z zakresu przepisów prawa i norm, w szczególności tych niezbędnych do uzyskania homologacji oraz dopuszczenia autobusów elektrycznych do ruchu drogowego. Wzięto pod uwagę również rekomendacje projektowe pochodzące na przykład od stowarzyszeń i związków takich jak IPxPT czy VDV. Zaproponowana metodyka projektowania architektury uwzględnia wymagania dotyczące bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz cybernetycznego, co stanowi aktualnie rekomendowane

podejście do projektowania architektury nadzorczo-sterującej. Rozprawa wskazuje również na skuteczną metodykę badań, która pozwala na zweryfikowanie oraz walidację powstałych rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej. **Opracowana architektura, metodyki jej budowy oraz badań, zostały wdrożone w przedsiębiorstwie Solaris Bus & Coach sp. z o.o.**

5. Zestawienie wybranych osiągnięć naukowych

Zestawienie wybranych osiągnięć naukowych afiliowanych AGH		
Czasopisma	5 (liczba pkt. MEiN: 220)	15
Materiały konferencyjne, konferencje - prelegent	9	
Pozostałe publikacje	1	
Zestawienie wybranych osiągnięć naukowych nieposiadających afiliacji AGH		
Czasopisma	4	22
Rozdziały w książkach, monografie	3	
Materiały konferencyjne, konferencje - prelegent	13	
Pozostałe publikacje	2	
Udział w pracach dydaktyczno-organizacyjnych		
1. Uczestnictwo w pracach komisji konkursowej na najlepszą pracę magisterską obronioną na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej 2011r.		2
2. Ocena prac dyplomowych konkursu INNEO 2009 realizowanego w ramach Priorytetu VIII Regionalnych kadr gospodarki, Działania 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałania 8.2.1 Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw PO KL. Celem powyższego konkursu było kształtowanie przedsiębiorczych i innowacyjnych postaw studentów, absolwentów, doktorantów oraz pracowników naukowych wielkopolskich uczelni wyższych oraz przekonanie ich do zakładania własnej działalności opartej na wiedzy.		
Pozostałe		
Certyfikaty	Certyfikat KNX oraz status "Partner KNX" uzyskany w Certyfikowanym Centrum Szkoleniowym działającym na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej w Instytucie Informatyki, Automatyki i Robotyki 2010 rok	1
Patenty	Patent o numerze 224554: "Konstrukcja złącza do ładowania akumulatorów pojazdu, zwłaszcza autobusu elektrycznego."	1
Udział w projektach dofinansowanych ze źródeł krajowych oraz Komisji Europejskiej		20