



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA

I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

ROZPRAWA DOKTORSKA

Koncepcja i weryfikacja elastycznej architektury nadzorczo-sterującej dla autobusów elektrycznych

Autor: mgr inż. Michał Piotr Sierszyński

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

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

Kraków, 2023



AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

FIELD OF SCIENCE: ENGINEERING AND TECHNOLOGY

SCIENTIFIC DISCIPLINE: AUTOMATION, ELECTRONICS, ELECTRICAL
ENGINEERING AND SPACE TECHNOLOGIES

DOCTORAL THESIS

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

Author: mgr inż. Michał Piotr Sierszyński

First supervisor: dr hab. inż. Piotr Czop, prof. AGH

Completed in: AGH University of Science and Technology in Kraków,
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Department of Robotics and
Mechatronics

Kraków, 2023

Podziękowania

Dziękuję Promotorowi Panu dr. hab. inż. Piotrowi Czopowi, prof. AGH za opiekę naukową oraz pomoc merytoryczną.

Dziękuję również Panu prof. dr. hab. inż. Tomaszowi Barszczowi za cenne uwagi oraz wsparcie w pierwszych latach studiów.

Dziękuję mojemu opiekunowi pomocniczemu – Panu dr. inż. Dariuszowi Michalakowi za wsparcie i umożliwienie szerokiego zakresu działań w ramach wdrożenia wypracowanego rozwiązania w przedsiębiorstwie.

Z pełnym sercem chciałbym wyrazić wdzięczność dla mojej rodziny za ich nieocenione wsparcie i wyrozumiałość w czasie, gdy realizowałem studia doktoranckie.

Szczególne podziękowania składam mojej żonie za jej poświęcenie, wkład w obowiązki domowe i rodzicielskie oraz mamie, która była moim niezastąpionym źródłem motywacji i dopingowała mnie przez całą moją drogę edukacyjną. Dzięki temu, udało mi się realizować swoje pasje i marzenia.

Streszczenie rozprawy doktorskiej pt. „Koncepcja i weryfikacja elastycznej architektury nadzorczo-sterującej dla autobusów elektrycznych”.

Michał Sierszyński

Obserwowany przyrost liczby urządzeń nadzorczo-sterujących, będący skutkiem zmian prawnych oraz zwiększających się wymagań co do bezpieczeństwa i komfortu podróżowania, powoduje problemy implementacyjne oraz operacyjne magistrali komunikacyjnych. Implementacja nowej, zindywidualizowanej metodyki projektowej ma na celu zapobieganie temu zjawisku.

Celem niniejszej rozprawy było opracowanie nowatorskiej metodyki projektowania oraz walidacji architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych. W ramach prowadzonych badań wykorzystano interdyscyplinarne podejście, opierające się na połączeniu wiedzy z zakresu inżynierii elektrycznej, systemów sterowania oraz metod wspomagania decyzji. Rezultatem prowadzonych prac jest stworzenie unikalnej metodyki, umożliwiającej efektywne projektowanie, testowanie oraz wdrażanie innowacyjnych, zindywidualizowanych rozwiązań w zakresie architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych.

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. Architektury uwzględniające specyficzne potrzeby, takie jak redukcja długości okablowania w rozwiązaniach strefowych lub dedykowane przyporządkowanie urządzeń w rozwiązaniach domenowych, powstały w oparciu o pojedyncze kryterium związane z kosztem implementacji lub kryterium funkcjonalnych powiązań.

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 wspomagania 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 wspomagania 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.

A summary of the doctoral dissertation entitled: “Concept and verification of a flexible supervisory and control architecture for electric buses”.

Michał Sierszyński

The observed increase in the number of supervisory and control devices, resulting from legal changes and those related to increasing the safety and comfort of travel, causes implementational and operational problems on the communication buses. The implementation of a new, individualized design methodology aims to prevent this phenomenon.

The aim of this dissertation was to develop an innovative methodology for designing and validating the supervisory and control architecture in electric buses. As part of the research, an interdisciplinary approach was used, based on a combination of knowledge in the field of electrical engineering, control systems and decision support methods. The result of the conducted work is the creation of a unique methodology that enables effective design, testing and implementation of innovative, individualized solutions in the field of supervisory and control architecture in electric buses.

Using the created methodology, a flexible supervisory and control architecture was developed and implemented in Solaris Urbino electric buses. This was a practical application of the research results. The solution to the matter of the thesis was subjected to a two-stage experimental validation process, which made it possible to verify its parameters and demonstrate its advantage over commonly used architectural solutions. Architectures that take into account specific needs, such as reducing the length of cabling in zone architecture or dedicated assignment of devices in domain solutions, were created based on a single criterion related to the cost of implementation or the criterion of functional links.

The methodology proposed by the author of the dissertation, the input data for which was obtained on the basis of law analyses, standards and recognition of technical and business needs, assumes the use of decision support methods in the selection of solutions for implementation. The scope of support for the methods concerns, among others, the aggregation of supervisory and control devices in the topology of the architecture, as well as the optimal arrangement in terms of costs and length of structured cabling in the bus. The resulting solutions were subjected to a two-stage ranking evaluation. A set of admissible architecture configurations was created, from which, taking into account the constraints, a set of non-dominated solutions to the problem

(Pareto front) was selected. The choice of solution for implementation was supported by analyzes performed using deterministic optimization methods (substitution collective criterion and global criterion). The first part of the solution validation was based on multi-criteria methods of comparative assessment of the newly developed solution and currently used types of architecture. As part of the research, a scenario sensitivity analysis was carried out, which allowed to identify the impact of the variability of device costs and the length of cabling on the implementation durability of the selected solution. The second part of the validation consisted in testing the architecture implemented in the Urbino electric bus in terms of the resultant communication traffic loads on individual mains as well as their shape.

The dissertation is an extremely important contribution to the research and commercialization of design and implementation solutions for the supervision and control architecture in electric buses. By systematizing knowledge in the field of law, standards and design recommendations of associations related to public transport, it identifies formal and legal restrictions and the required validation tests for electric buses. The actions described by the author in the dissertation lead to an improvement in the quality of the electric bus product and obtaining the approval necessary to introduce it to the market. Solving specific technical problems related to the implementation of functional and cyber security principles within the designed architecture is a key aspect of the work. The introduction of deterministic methods of decision support in the field of creating supervisory and control architecture is an innovative solution. Such methods are based on the use of strict mathematical algorithms, which allows for obtaining precise and repeatable results, and thus increasing the efficiency of decision-making.

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Uzasadnienie podjęcia tematu	1
1.2	Przegląd stanu wiedzy w zakresie rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej	5
1.3	Cele i teza rozprawy	12
2	Architektury nadzorczo-sterujące w pojazdach	13
2.1	Wprowadzenie	13
2.2	Wymiana danych pomiędzy urządzeniami zainstalowanymi w ramach architektury nadzorczo-sterującej	21
2.3	Diagnostyka magistrali	25
2.4	Topologia sieci wymiany danych używanych w pojazdach	29
2.5	Rozpoznanie potrzeb technicznych i biznesowych	32
2.5.1	Human-Machine Interface (HMI) jako interfejs architektury nadzorczo-sterującej	32
2.5.2	Technologia informacyjna dla transportu publicznego rozszerzająca architekturę komunikacyjną autobusów	40
3	Uwarunkowania normatywne i prawne	43
4	Przegląd metod optymalizacji	55
5	Koncepcja i założenia metodyki projektowania elastycznej architektury nadzorczo-sterującej	62
6	Metodyka projektowania: Definicja celów strategicznych i szczegółowych	71
7	Metodyka projektowania: Model matrycy komunikacyjnej korelacji	78
8	Metodyka projektowania: Ograniczenia	91
8.1	Ograniczenia wynikające z założeń functional safety	92
8.2	Ograniczenia wynikające z założeń bezpieczeństwa cybernetycznego	112
8.3	Ograniczenia techniczne i biznesowe	121
8.3.1	Tworzenie połączeń komunikacyjnych – ograniczenia sprzętowe	123
8.3.2	Ograniczenia związane lokalizacją urządzeń nadzorczo-sterujących w autobusie	129
8.3.3	Zakres swobody projektowej przy tworzeniu algorytmów sterujących	143
9	Metodyka projektowania: Zbiór konfiguracji dopuszczalnych	146
10	Metodyka projektowania: Wybór architektury	160
10.1	Sformułowanie celów dla optymalizacji	160
10.2	Przestrzeń rozwiązań optymalnych	166
10.3	Wybór architektury do implementacji	175
11	Metodyka projektowania: Implementacja architektury	179
12	Metodyka projektowania: Eksperyment walidacyjny	185

13	Podsumowanie i wnioski.....	207
	Bibliografia.....	214

1 Wstęp

1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu

Istnieje wiele powodów zainteresowania autora rozprawy tematem związanym z autobusami elektrycznymi oraz ich architekturą nadzorczo-sterującą. Architekturą nadzorczo-sterującą rozumianą jako zestaw wszystkich urządzeń wymieniających między sobą dane, wraz z oprogramowaniem uwzględniającym zależności występujące między nimi. Dane te są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania urządzeń. Służą nadzorowi procesów zachodzących w trakcie użytkowania pojazdu, jak również ich sterowaniu oraz parametryzacji. Opracowanie architektury obejmuje swoim zakresem określenie topologii (kształtowanie układu połączeń sieci komunikacyjnej), zaprojektowanie i zamodelowanie struktury zachodzących w niej procesów komunikacyjnych, wybór elementów strukturalnych oraz dobór interfejsów. Rozmieszczenie komponentów w pojeździe oraz optymalizację kosztową rozwiązania. Jak zostało określone przez Booch, Rumbaugh, Jacobson w „The Unified Modelling Language User Guide”, która to definicja idealnie pasuje do rozważanego problemu:

„Architektura to zbiór znaczących decyzji dotyczących:

- organizacji systemu komputerowego
- wyboru elementów strukturalnych i ich interfejsów, z których system jest zbudowany
- zachowania tych elementów opisanego w kooperacjach
- składania elementów strukturalnych i czynnościowych w coraz to większe podsystemy
- stylu architektonicznego, według którego tworzy się konstrukcję
- systemu, to znaczy charakterystycznych elementów statycznych i dynamicznych oraz ich interfejsów, kooperacji i składania.” [1]

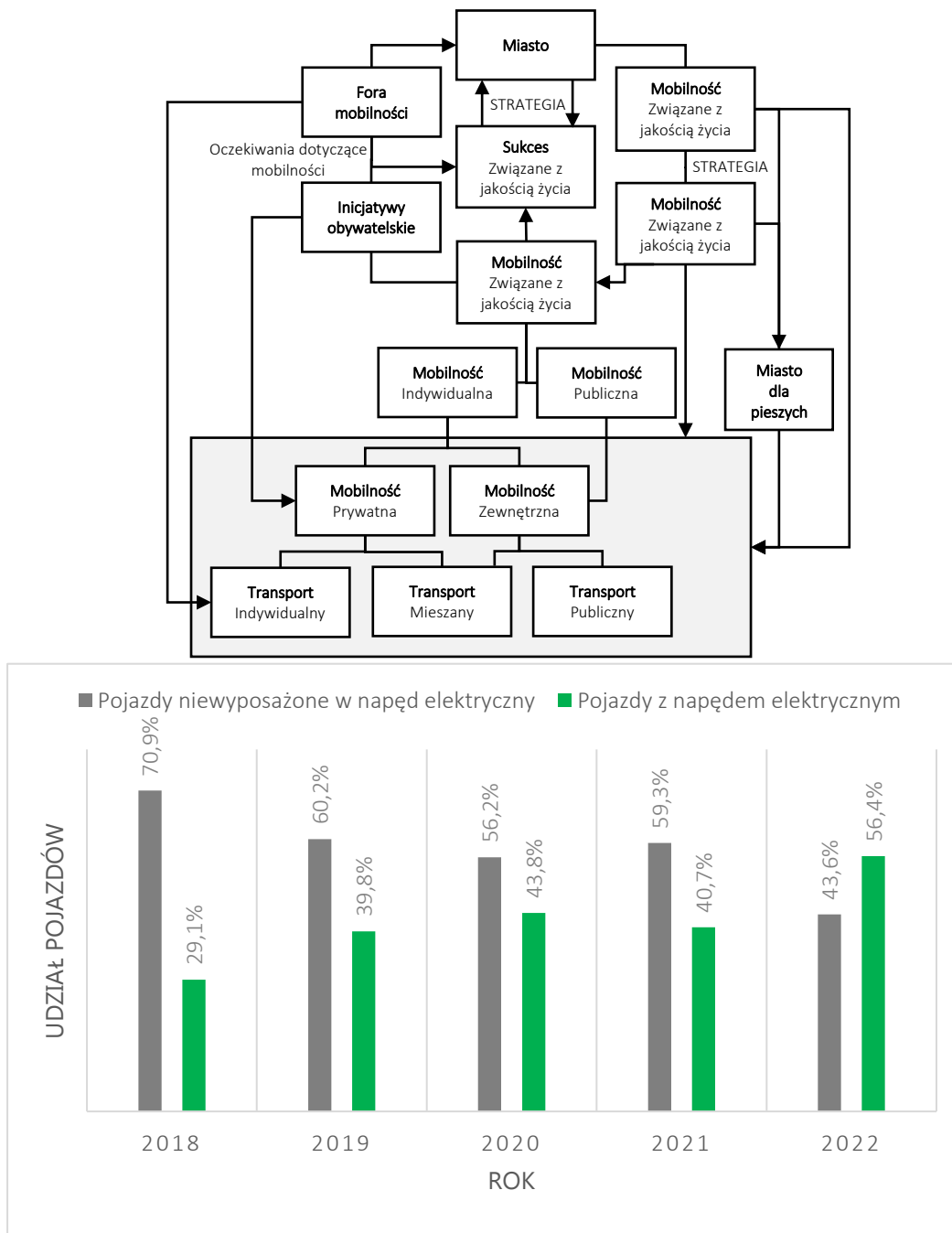
Autor rozprawy od 19 lat zajmuje się zawodowo tematyką projektowania pojazdów związanych z transportem miejskim. W tym zakresie prowadził analizy [2], [3], [4] oraz studia wykonalności [5], [6], uwzględniając pojawiające się w danym okresie technologie oraz nowe rozwiązania, [7], [8]. Brał czynny udział zarówno w ich projektowaniu [9] jak i wdrażaniu. Analizując rozwiązania i ich kierunki rozwoju doszedł do wniosku, że źródłem tego rozwoju są nie tylko aspekty związane z ekologią, ale również jest nim postępująca urbanizacja. To

właśnie urbanizacja wraz z rosnącym zatłoczeniem miast jest czynnikiem inicjującym proces poszukiwania rozwiązań poprawiających mobilność mieszkańców. Przy nieproporcjonalnym rozwoju infrastruktury w stosunku do rosnącej liczby mieszkańców dochodzi do zachwiania równowagi w jakości życia w mieście [10]. Mobilność nie może być jednak traktowana jako odrębne zadanie, ze względu na zależności występujące pomiędzy transportem publicznym a miastem (Rys.1.1.) W większości przypadków z uwagi na ograniczoną dostępność przestrzeni w centrach miast, niemożliwe jest wybudowanie nowych dróg. Jedynym sposobem na utrzymanie komfortowego poziomu jakości transportu, jest stopniowe przechodzenie z transportu indywidualnego na publiczny [11]. Taka zmiana powoduje ograniczenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery w przeliczeniu na pasażera, jak również obniżenie poziomu hałasu oraz wibracji („niskoczęstotliwościowych drgań akustycznych rozprzestrzeniających się w ośrodkach stałych i przekazywanych do organizmów” [12]) generowanych przez pojazdy, którymi poruszają się mieszkańcy. Spełnienie wymagań kolejnych norm emisji spalin przy zastosowaniu klasycznych technologii silników wysokoprężnych staje się technicznie i ekonomicznie nieuzasadnione. Powyższe zmiany przyspieszają więc powszechne stosowanie w pojazdach komunikacji miejskiej napędów elektrycznych.

W Polsce dodatkowym przyczynkiem do rozwoju napędów elektrycznych jest ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych [13] nakładająca wymagania dotyczące udziału procentowego pojazdów z napędem alternatywnym we flocie autobusów na terenie jednostki terytorialnej, której liczba mieszkańców przekracza pięćdziesiąt tysięcy. Na rysunku 1.2. przedstawiono udział pojazdów z napędem elektrycznym w produkcji firmy Solaris Bus & Coach sp. z o.o. (w dalszej części rozprawy zwanej Solaris). Pojazdy z napędem elektrycznym to pojazdy, które wykorzystują energię elektryczną jako główne źródło energii lub wykorzystują energię elektryczną w celu poprawy sprawności konwencjonalnych źródeł zasilania pojazdu [14]. Do pojazdów z napędem elektrycznym (oznaczone na rysunku 1.2. kolorem zielonym) zaliczane są autobusy elektryczne, autobusy wodorowe, trolejbusy oraz autobusy hybrydowe. Są one wyposażone w napęd elektryczny oraz baterie trakcyjne lub

kondensatory. Do napędów spalinowych oznaczonych na rysunku 1.2 kolorem szarym należą pojazdy wykorzystujące do napędu sprężony gaz ziemny (CNG) oraz olej napędowy.

Rys. 1.1. Miasto i mobilność - uwarunkowania i zależności [15]



Rys. 1.2. Udział pojazdów z różnym rodzajem napędu w produkcji firmy Solaris w latach 2018-2022 [16]

Ze względu na komfort pasażerów i dostępność pojazdu dla osób z ograniczeniami ruchowymi, coraz większą część floty transportu publicznego stanowią autobusy niskopodłogowe oraz niskowejsciowe, które są rozwiązaniami preferowanymi przez

operatorów transportu publicznego [17]. Autobusy niskopodłogowe to autobusy, których podłoga oraz wszystkie drzwi wejściowe nie zawierają stopni utrudniających wejście pasażerom z niepełnosprawnościami. Autobusy niskowejsściowe to rodzaj autobusów w którym tylko część podłogi pojazdu, wraz z co najmniej jednymi drzwiami wejściowymi, nie zawiera stopni [18]. Pomimo tego, że w części podłogi pojazdu znajdują się stopnie, płaski fragment podłogi pojazdu umożliwia łatwy dostęp dla osób o ograniczonej mobilności, takich jak osoby na wózkach inwalidzkich, osoby starsze czy osoby z wózkami dziecięcymi. Konieczność produkcji niskopodłogowych oraz niskowejsściowych pojazdów transportu publicznego, wymuszająca zabudowę komponentów napędowych i sterujących w ograniczonej przestrzeni. Stanowi to wyzwanie dla konstruktorów autobusów elektrycznych oraz powoduje konieczność dostosowania wymiarów i rozłożenia komponentów w tej trudnej konstrukcji. W związku z wymaganiami formalno-prawnymi związanymi z maksymalnym dopuszczalnym obciążeniem osi, inżynierowie stają przed wyzwaniem właściwego rozłożenia komponentów w pojeździe, które nie zawsze jest właściwe dla tworzonej architektury komunikacyjnej pomiędzy tymi urządzeniami. Decyzje dotyczące rozmieszczenia komponentów w pojeździe i odpowiedniego ich podłączenia do architektury komunikacyjnej podejmowane są zarówno na podstawie wcześniejszych doświadczeń i wiedzy konstruktorów jak i z użyciem metody wielokrotnego korygowania systemu, aż do otrzymania rozwiązania o satysfakcjonującym poziomie niezawodności. Aktualne wymagania rynku związane ze skróceniem trwałości produktu przy jednoczesnym zwiększeniu jego skomplikowania i obniżaniu kosztów wytworzenia pozostawiają konstruktorom coraz mniejszy możliwy margines błędu przy jego projektowaniu. Jednym z rozwiązań technicznych, które może spełnić wymagania związane z optymalną dystrybucją masy w pojeździe jest wprowadzenie modułowego elektrycznego układu napędowego w wersji rozproszonej [16]. Napęd rozproszony oznacza jednak większą liczbę urządzeń wykorzystywanych do komunikacji. Dodatkowo pojazdy wyposażane są w rosnącą liczbę systemów, również tych wymaganych przez prawo [19], które wspierają kierowcę (Zaawansowane systemy wspomaganie kierowcy ADAS - Advanced Driver Assistance System), jak i korygują jego działania w celu uniknięcia np. zdarzeń niebezpiecznych. Aby zapewnić odpowiednią jakość i niezawodność transportu publicznego, uwzględnić jego walory pod względem ekologicznym, jak i ekonomicznym, konieczne jest użycie między innymi wiedzy inżynierskiej związanej z teorią projektowania. Żądany efekt można zdefiniować ilościowo, określając dla niego kryteria oceny. Zależy on od zmiennych decyzyjnych przyjmujących wartości w granicach zbioru dopuszczalnych rozwiązań. Możliwe było więc podjęcie przez autora tematu optymalizacji [20] projektowanych rozwiązań. Mowa

tu nie tylko o użyciu metod związanych z optymalizacją samego napędu, ale przede wszystkim optymalizacji systemu nadzoru i sterowania całego pojazdu. W tym celu należało rozwinąć nowe metodyki projektowania układów nadzorczo-sterujących oraz podjąć kwestie związane z ich wielowymiarową optymalizacją.

1.2 Przegląd stanu wiedzy w zakresie rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej

Architektury bazujące na rozwiązaniach domenowych oraz strefowych (Tabela 1.1.) są kluczowymi koncepcjami architektury implementowanymi w pojazdach samochodowych kategorii M. Na rysunku 1.4. autor rozprawy przedstawił przykład rozlokowania podstawowych komponentów architektury strefowej w pojeździe w porównaniu z architekturą domenową.

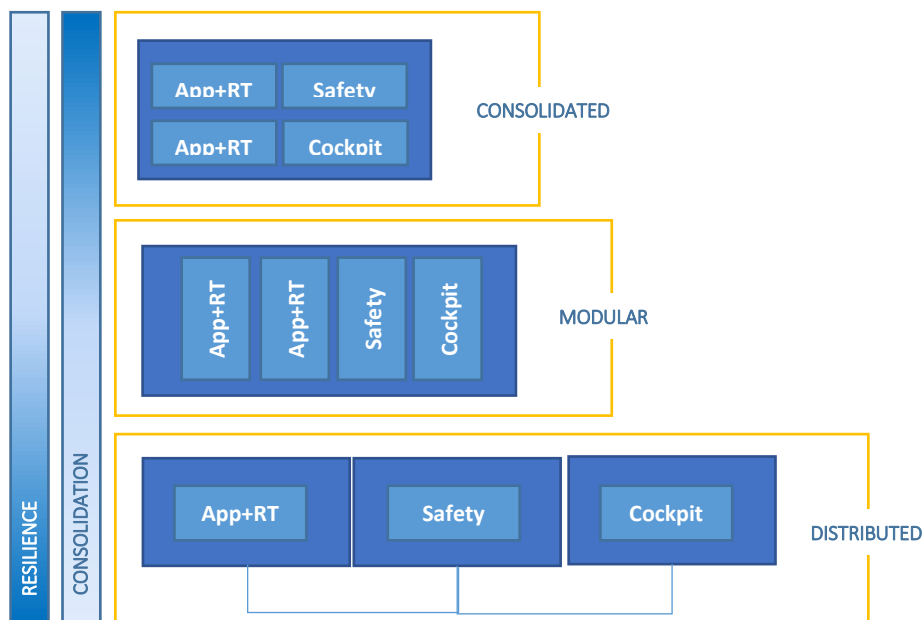
Charakterystyczną cechą architektury domenowej jest grupowanie urządzeń według określonych funkcji [21]. Wprowadzono podziały domen na przykład na układ napędowy, systemy komfortu, systemy bezpieczeństwa, systemy informacyjno-rozrywkowe, czy związane z ładowaniem pojazdów [22], [23]. W takim rozwiązaniu każdy obszar funkcjonalny ma swój własny dedykowany sterownik, który połączono z innymi sterownikami umożliwiając komunikację i zarządzanie funkcjami w całej sieci pojazdu [24]. Architektura domenowa jest preferowana przez tradycyjnych producentów pojazdów takich jak Daimler czy BMW ze względu na historię w której tworzyli sterowniki (ECU) dla specyficznych funkcji a nowe rozwiązania przez nich wdrażane polegały na agregacji sterowników funkcjonalnie powiązanych pod wspólnym sterownikiem domeny lub bramą. ECU do których podłączone są czujniki oraz urządzenia wykonawcze znajdujące się w jednym obszarze np. silnika, w sytuacji gdy obliczenia mogą być wykonywane lokalnie dobrze się sprawdzają. Niestety umieszczenie komponentów w innych obszarach pojazdu prowadzi do konieczności zastosowania dodatkowego okablowania oraz interfejsów w celu zapewnienia właściwej komunikacji [25]. Rozwiązania bazujące na domenach przyczyniają się między innymi do zwiększenia kosztów związanych z budową architektury nadzorczo-sterującej w pojazdach.

Architektura strefowa [21] eliminuje braki architektury domenowej dzięki łączeniu sterowników będących fizycznie blisko siebie pod jednym sterownikiem strefowym, co redukuje ilość okablowania, a tym samym jego wagę. Nowe systemy i rozwiązania coraz bardziej zbliżają branżę motoryzacyjną oraz informatyczną. Architektura strefowa tworzy

system sieciowy w całym pojeździe i może być łatwo skalowana co zapewnia dużą elastyczność w przypadku wprowadzania wariantowości w pojeździe [25]. Połączenia sieciowe w większości przypadków realizowane są za pomocą Ethernetu, dzięki któremu przepływ danych z czujników i urządzeń może następować do serwerów obliczeniowych znajdujących się w dowolnym miejscu w pojeździe w wymaganym czasie. Wadą architektury jest coraz bardziej rozbudowane i rozproszone oprogramowanie, w którym fragmenty kodu realizujące lub analizujące daną funkcjonalność mogą być rozlokowane w różnych jednostkach obliczeniowych [26]. Architektury strefowe występują w dwóch typach: skonsolidowanym oraz rozproszonym. Skonsolidowana architektura strefowa jest łatwa w tworzeniu i zarządzaniu. Wszystkie dane dostępne są w jednym centralnym klastrze obliczeniowym i to on koordynuje ich przepływ w architekturze. W takim rozwiązaniu synchronizacja danych jest prosta do realizacji. Architektura ma jednak poważne wady. Ze względu na konsolidację awaria w jednym punkcie może prowadzić do unieruchomienia całego pojazdu. Architektura strefowa rozproszona jest bardziej odporna na awarie. Wraz ze zwiększeniem liczby stref w niej występujących odporność wzrasta. Awaria w jednej strefie nie ma bezpośredniego wpływu na pozostałe niezależnie działające strefy. Pojazd wyposażony w architekturę strefową rozproszoną ma więc zwiększoną odporność na występujące awarie. Rozproszona architektura strefowa jest niestety bardziej złożona niż skonsolidowana, co wpływa na skomplikowanie procesu konfiguracji i zarządzania systemem. Ze względu na niezależne działanie stref, wymaga synchronizacji danych między nimi. Niezbędne jest więc przeprowadzenie dodatkowej analizy podczas projektowania i rozbudowy architektury, aby nie wprowadzać niedopuszczalnych opóźnień w transmisji danych pomiędzy strefami. W pojazdach w których implementowane są architektury strefowe rozproszone, strefy łączy się z lokalnymi bramami. Bramy te rozlokowane są w pojeździe w sąsiedztwie urządzeń, które są przez nie sterowane. Bramy strefowe połączone są z centralnym klastrem obliczeniowym [27]. Koszt implementacji architektury typu rozproszonego jest wyższy niż typu skonsolidowanego. Ewolucja architektury nie zakończyła się, a jej rozwój staje się coraz bardziej wymagający. Systemy jazdy autonomicznej wraz z coraz większymi wymaganiami integracji systemów IoT z pojazdem, w których szybkość i pewność przesyłania danych odgrywa kluczową rolę, prowadzą do kolejnych rozwiązań i modyfikacji architektury.

W związku ze zmianą przepisów prawa w Europie, wskazaną w rozdziale 3, coraz ważniejszą rolę pełnią systemy wspomagania kierowcy ADAS oraz zaawansowane systemy jazdy automatycznej a w przyszłości w pełni autonomicznej. W 2020 roku jeden z producentów

pojazdów podał do publicznej wiadomości, iż wspólnie z firmą z branży IT rozpoczął opracowywanie nowej architektury, która będzie definiowana programowo. Deklaracje wskazują na kierunek architektury centralnego przetwarzania. W takim rozwiązaniu istnieje jedno urządzenie z dużą mocą obliczeniową odpowiedzialne za większość obliczeń wykonywanych w pojeździe. Rozwiązania takie są preferowane przez producentów, którzy nie mają dostępu do starszych projektów, na których można się wzorować i z których można wykorzystywać urządzenia z gotowym kodem. Firmy preferujące architektury centralnego przetwarzania, chcą osiągnąć jak najszybciej jeden konkretny cel jakim jest na przykład piąty poziom jazdy autonomicznej i nie implementują nawet wszystkich funkcji pojazdu. Do tak zaprojektowanego rozwiązania konieczne będzie dopasowanie pozostałej części architektury istniejącej w pojeździe, stworzonej przez jego producenta [24], [25]. Centralne przetwarzanie zapewnia szybkość i łatwość aktualizacji oprogramowania, która pozwala na wprowadzanie i testowanie nowych funkcji, naprawę wykrytych błędów, w tym dotyczących bezpieczeństwa, w bardzo krótkim czasie. W takim rozwiązaniu jakiegokolwiek pojawiające się problemy z główną jednostką obliczeniową mają katastrofalne skutki dla pojazdu. Aby podnieść poziom niezawodności wprowadza się więc rozwiązania redundantne, które ponownie komplikują temat architektury. Wprowadzane są również rozwiązania serwerów modułowych składających się z zestawu kilku jednostek ECU o odpowiednich do wymagań mocach obliczeniowych. Na rysunku 1.3 przedstawiono możliwe konfiguracje serwera w powyższej architekturze.



Rys. 1.3. Konfiguracje serwera w pojeździe [28]

Tabela 1.1. Podstawowe typy architektury stosowane w branży samochodów osobowych cz.1.[27], [29]

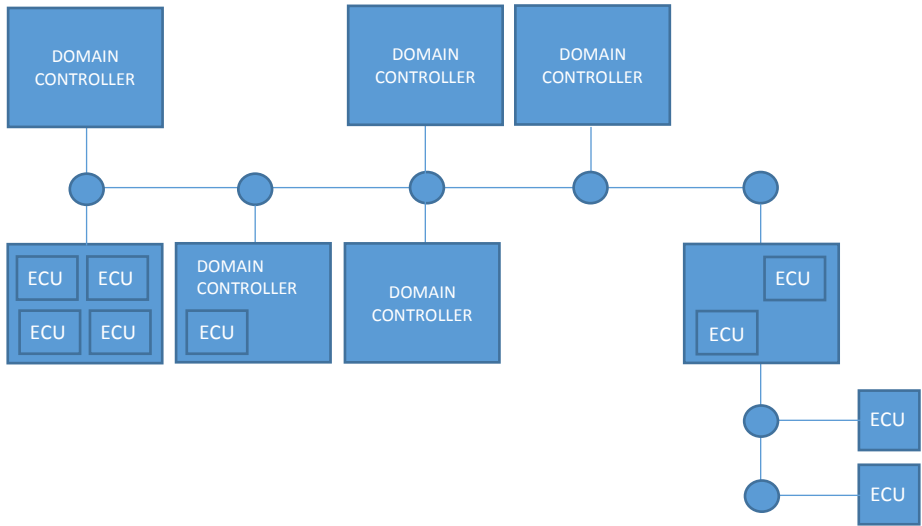
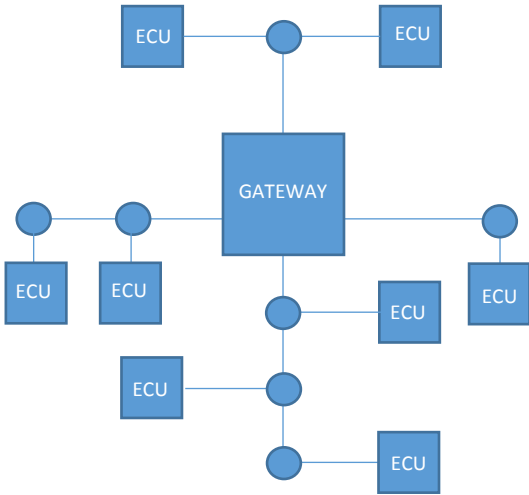
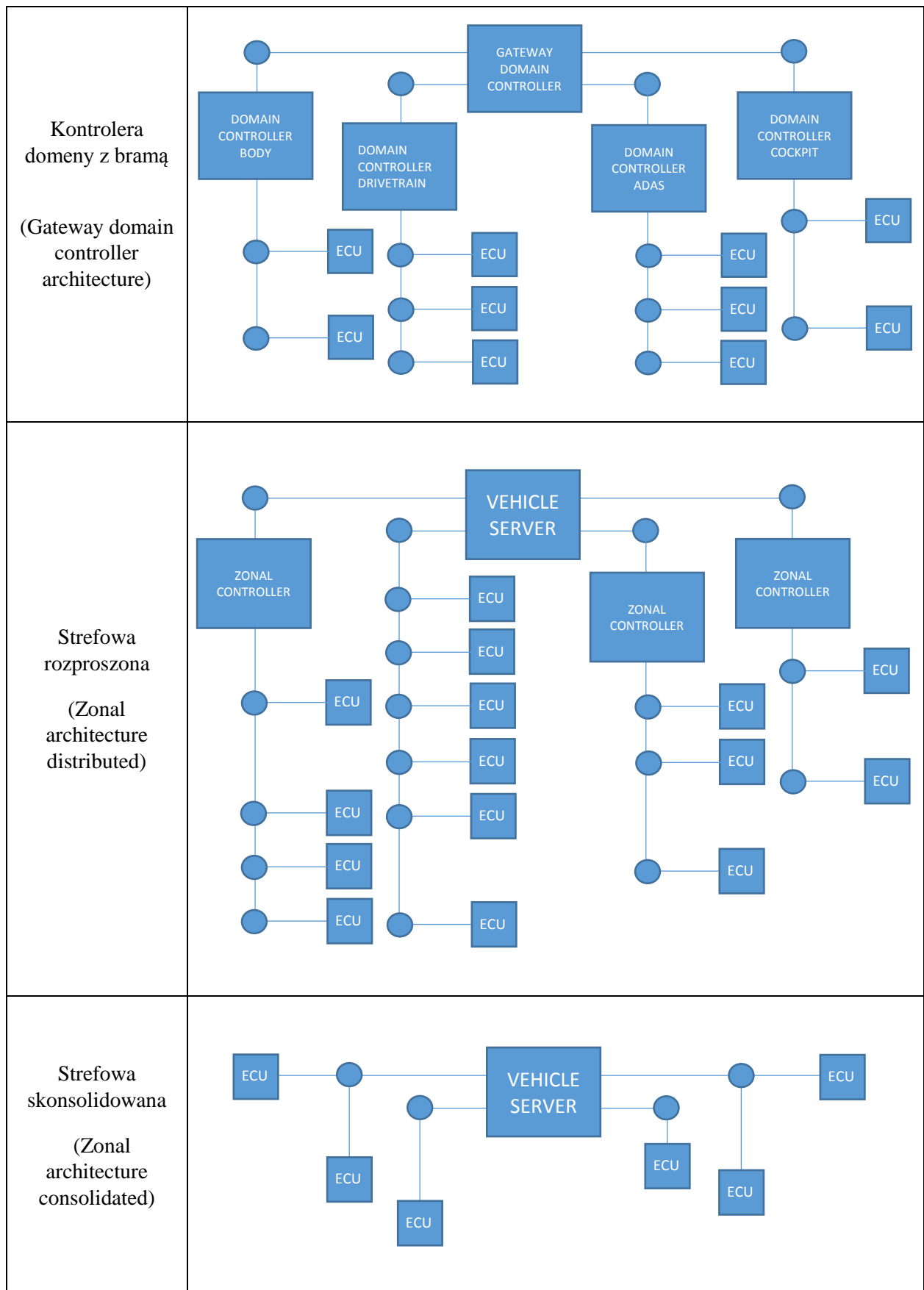
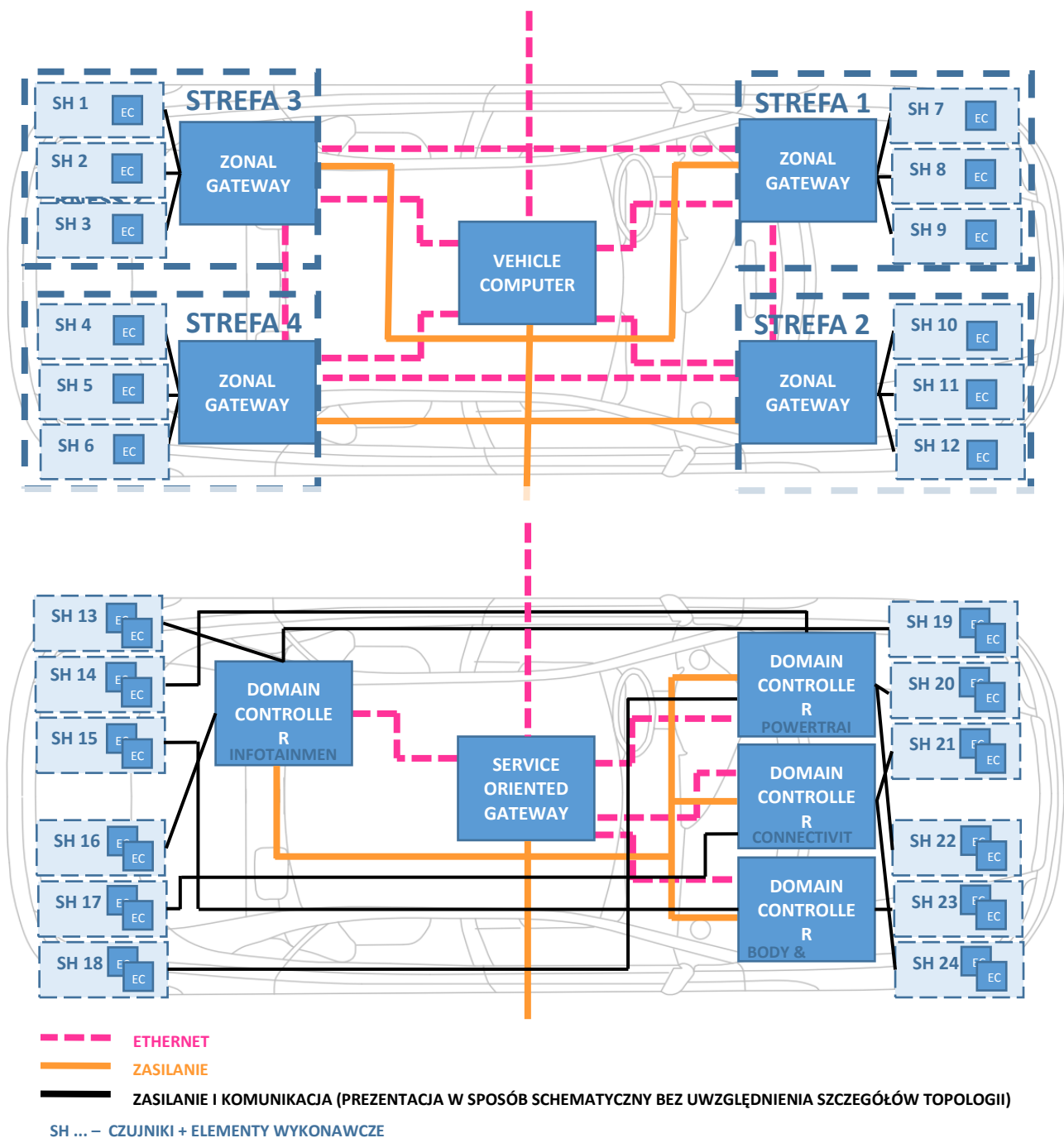
Architektura	Schemat
<p>Kontrolera domeny (Domain controller architecture)</p>	 <p>The diagram illustrates a domain controller architecture. At the top, three 'DOMAIN CONTROLLER' blocks are connected to a horizontal bus line. Below this bus, there are several components: a 2x2 grid of 'ECU' blocks, a 'DOMAIN CONTROLLER' block with an 'ECU' below it, another 'DOMAIN CONTROLLER' block, and a larger block containing two 'ECU' blocks. This larger block is connected to a vertical bus, which in turn connects to two more 'ECU' blocks.</p>
<p>Bramy głównej (Central gateway architecture)</p>	 <p>The diagram illustrates a central gateway architecture. A central 'GATEWAY' block is connected to a horizontal bus. This bus is connected to two 'ECU' blocks. Below the bus, there are two more 'ECU' blocks. To the right, another 'ECU' block is connected to the bus. Below the gateway, there is a vertical bus connected to two 'ECU' blocks. At the top, two 'ECU' blocks are connected to a horizontal bus that is also connected to the central gateway.</p>

Tabela 1.1. Podstawowe typy architektury stosowane w branży samochodów osobowych cz.2.[27], [29]





Rys. 1.4. Rozlokowanie podstawowych komponentów architektury strefowej w samochodzie osobowym w porównaniu z architekturą domenową [27], [29]

Wszystkie wymienione w rozdziale architektury powstały z różnych potrzeb producentów pojazdów jednak wielu analityków monitorujących rynek postrzega wariacje architektury scentralizowanej jako najbardziej zaawansowaną ewolucję architektury nadzorczo-sterującej [30] i uważają oni, że ten typ architektury będzie prawdopodobnie

dominować w przyszłych implementacjach [25]. Natomiast magistralą, wskazywaną jako główne medium transmisyjne pomiędzy serwerami, bramami domen oraz strefowymi w bazowej topologii systemu będzie Ethernet [31].

W autobusach oraz samochodach osobowych stosowane są takie same typy rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej. Architektura nadzorczo-sterująca instalowana w autobusach elektrycznych, między innymi ze względu na liczbę podróżujących pasażerów, wymaga jednak zastosowania bardziej złożonych układów elektrycznych i elektronicznych, niż jej wersje implementowane w samochodach osobowych. Musi spełniać specyficzne wymagania bezpieczeństwa, współpracować z rozbudowanymi systemami informacyjnymi oraz sterowania energią.

W samochodach osobowych na etapie projektowania znane są opcje systemów, w które dany pojazd może zostać wyposażony. W przypadku autobusów elektrycznych architektura nadzorczo-sterująca w trakcie ich eksploatacji jest rozbudowywana o kolejne urządzenia. Proces rozbudowy realizowany jest zarówno przez autoryzowane serwisy producentów, jak i bezpośrednio przez klientów. Kluczowym aspektem architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych jest więc możliwość dopasowania jej do różnych wymagań interesariuszy. Architektura musi być więc elastyczna. Elastyczność architektury nadzorczo-sterującej oznacza jej zdolność do adaptacji, modyfikacji i rozbudowywania rozwiązań w zależności od zmieniających się potrzeb. Taka architektura musi być odporna na zmiany, łatwa do utrzymania i skuteczna w realizacji swoich celów.

W architekturze nadzorczo-sterującej proces decyzyjny jest rozłożony pomiędzy dwie warstwy: warstwę sterującą i warstwę nadzorującą. Warstwa sterująca to warstwa wykonująca zadania, natomiast warstwa nadzorująca monitoruje i kontroluje całe procesy, wykorzystując informacje zebrane z pojedynczych układów i systemów.

1.3 Cele i teza rozprawy

Tezy rozprawy: Teza 1: Sformułowana w rozprawie **metodyka** umożliwia **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**.

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.

2 Architektury nadzorczo-sterujące w pojazdach.

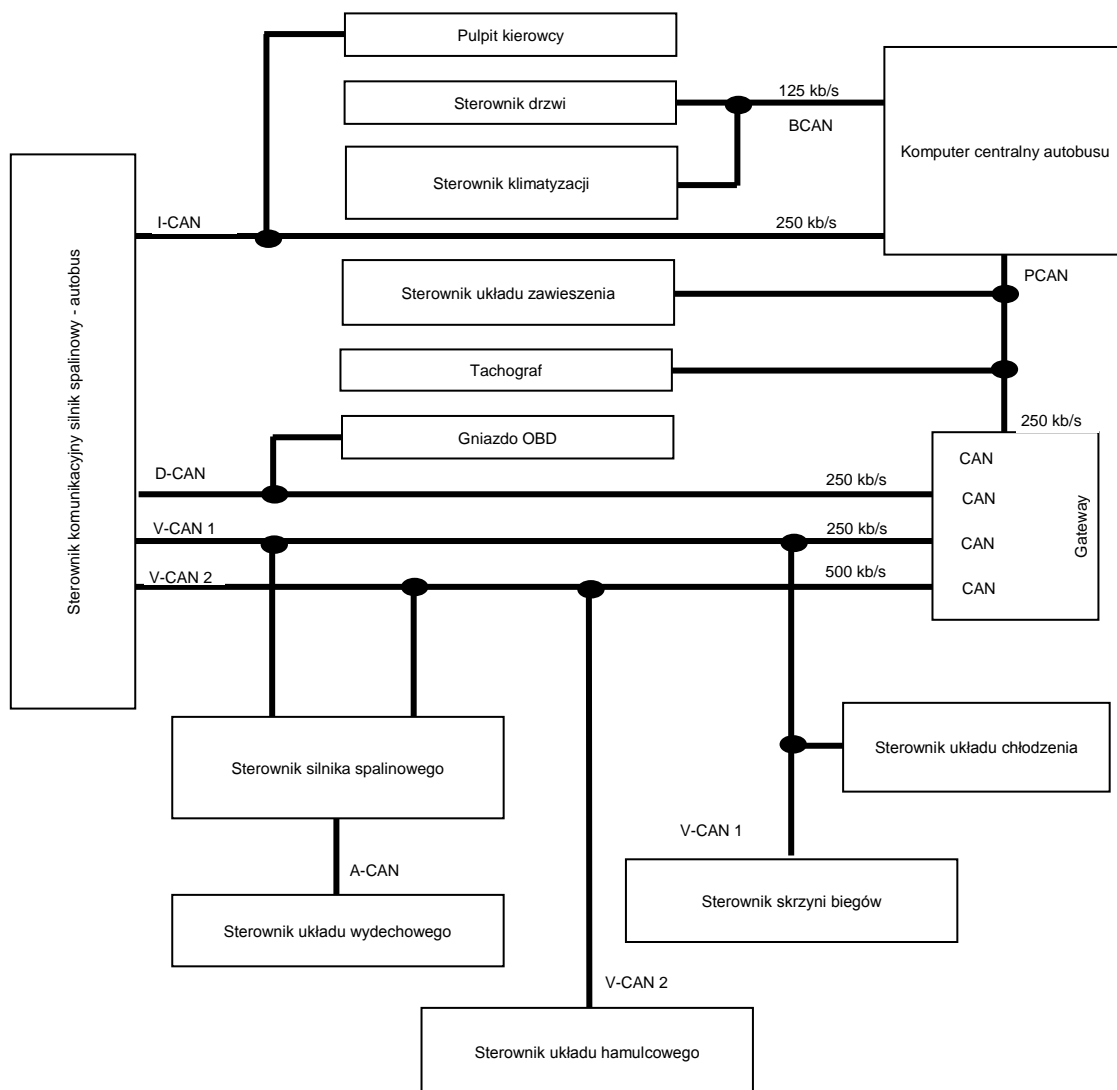
2.1 Wprowadzenie

Układy elektroniczne w pojazdach zagościły powszechnie w latach siedemdziesiątych XX wieku. Pierwszym układem elektronicznym był sterownik układu zapłonowego. Kolejne wprowadzone to ABS, wtrysk paliwa oraz sterownik automatycznej skrzyni biegów [32]. W miarę rozwoju pojazdów dochodziło do zwiększenia bezpieczeństwa oraz komfortu kierowcy i pasażerów powiązanego z wprowadzeniem coraz większej ich liczby. Wzajemne oddziaływania układów wymagane do prawidłowej pracy całego pojazdu, powodowały znaczną rozbudowę okablowania. Celem stała się redukcja okablowania. Możliwa była ona do osiągnięcia dzięki wprowadzeniu magistrali komunikacyjnych [33]. „Magistrala komunikacyjna to zespół linii przenoszących sygnały oraz układów wejścia-wyjścia służących do przesyłania sygnałów między połączonymi urządzeniami w systemach mikroprocesorowych” [34]. Pierwsza implementacja szeregowej magistrali danych CAN (Controller Area Network) [35] miała miejsce w 1991 roku w samochodzie osobowym firmy Mercedes-Benz. Od tego momentu zaczęto mówić o architekturze jako organizacji systemu komputerowego w pojazdach. W ramach rozwoju magistrali dołączano do niej kolejne sterowniki. Wiązało się to ze składaniem elementów strukturalnych i czynnościowych w coraz to większe podsystemy. Zwiększano liczbę fizycznych oddzielonych magistrali komunikacyjnych. Kolejni producenci samochodów dołączyli do tego trendu i obecnie wszyscy oni implementują wiele magistrali komunikacyjnych w różnych topologiach [36]. Nowe rozwiązania sprawiły, że dodanie funkcjonalności wymagających korelacji sygnałów z różnych urządzeń nie wpływa już na zwiększenie długości, masy oraz skomplikowania okablowania.

Na przykład sygnał prędkości wprowadzany na magistralę komunikacyjną przez tachograf lub symulator tachografu wykorzystywany jest między innymi do aktywacji działania różnych systemów, których tryby pracy zależą od prędkości. Do systemów tych należą: asystent pasa ruchu, wykrywanie osób przed pojazdem czy też aktywacja systemu zapobiegania kolizji i minimalizacji ich skutków (AEBS). Sygnał prędkości wykorzystywany jest również do automatycznej regulacji prędkości w przypadku inteligentnego tempomatu, czy też w systemie odpowiedzialnym za stabilizację toru jazdy (ESP). Sygnał prędkości wykorzystywany jest także w systemach informacji głosowej na przykład w celu automatycznego dostosowania głośności urządzeń do prędkości pojazdu.

Przykład topologii architektury komunikacyjnej współczesnego pojazdu zaprezentowano w literaturze [37]. We współczesnych samochodach osobowych występuje ponad 60 urządzeń sterujących a łączna długość przewodów elektrycznych to 3-5 km [32]. Zastosowanie magistrali komunikacyjnych i odpowiedniej topologii sieci pozwala jednak na oszczędności w tym zakresie. Optymalizacje przeprowadzone przez Mercedesa na przykład w klasie S spowodowały redukcję okablowania z 3,2 km przewodów o masie 56 kg do 2,2 km przewodów o masie 39 kg [38]. Autobusy jak wszystkie pojazdy rozwijano również dzięki postępowi technicznemu oraz technologicznemu. Pierwsze w Polskiej komunikacji miejskiej pojazdy niskopodłogowe, wjechały na ulice w Gdańsku w 1994 roku. Pierwszy polski autobus elektryczny firmy Solaris, którego autor rozprawy był głównym konstruktorem, zaprezentowano podczas Międzynarodowych Targów Transportu Zbiorowego Transexpo w Kielcach w 2011 roku. W ostatnich latach odnotowano, tak jak w przypadku samochodów osobowych, lawinowy rozwój specjalizowanych systemów stosowanych w autobusach. Sumaryczna liczba stosowanych urządzeń sterujących, które mają możliwość wymiany informacji po magistrali (z uwzględnieniem systemów informacji pasażerskiej) przekracza już 90. W tym urządzenia rozszerzające magistralę w pojeździe o możliwość komunikacji na zewnątrz. Komunikacja ze światem zewnętrznym odbywa się na przykład podczas ładowania za pomocą zewnętrznej ładowarki (np. zgodnie ze standardami opisanymi w normach IEC 61851, ISO 15118) lub zbierania danych dla systemów zarządzania flotą i systemów informacji pasażerskiej. Szczególnym przypadkiem komunikacji z autobusem jest zaprojektowany i użytkowany przez firmę Solaris system eSConnect, który jest wykorzystywany do zdalnej diagnostyki usterek pojazdu i gromadzenia danych eksploatacyjnych. Aktualnie w autobusach dwuosioowych - solo [39] w zależności od rodzaju napędu instalowanych jest od około 30 (autobus z napędem Diesla) do około 70 wiązek elektrycznych (autobus z napędem elektrycznym). Najbardziej rozbudowaną wiązką o największej sumarycznej długości przewodów w tych pojazdach jest wiązka PZ. Wiązka ta ma w sumie około 2 km przewodów. Autor rozprawy po przeprowadzeniu pomiarów wskazał, że łączna sumaryczna długość dla przewodów zarówno sterujących jak i mocy używanych w 12 metrowych autobusach elektrycznych osiąga 11 km, a w przypadku autobusów z napędem Diesla jest to 7 km. Miedź w przewodach zainstalowanych w tych autobusach waży odpowiednio 120 kg w przypadku autobusów z napędem Diesla i 220 kg w przypadku autobusów z napędem elektrycznym. Na powyższe wiązki składa się ponad 60 różnych typów przewodów o przekrojach od 0,14 mm² do 120 mm². Do najczęściej używanych należą następujące typy przewodów: FLRY-x, FLRYW-x, FLYWYW, FLY, LiYCY czy RADOX xGKW [16]. Typy użytych przewodów

komunikacyjnych zostaną szczegółowo opisane w rozdziale 9 niniejszej rozprawy dotyczącym implementacji architektury. Część zdobytej w ramach badań literaturowych wiedzy autor rozprawy opublikował na łamach czasopism naukowych [40] i branżowych [4]. W opracowaniu przedstawił aktualne rozwiązania (w zakresie urządzeń nadzorczo-sterujących wraz z zaimplementowanymi algorytmami oraz interfejsami komunikacyjnymi) stosowane w autobusach elektrycznych i porównanie ich do rozwiązań implementowanych w autobusach z napędem Diesla. Informacje te zostały również przedstawione podczas XXVIII Konferencji Naukowo-Technicznej PEMINE. Autobusy z napędem Diesla do prawidłowego funkcjonowania wymagają nie tylko samego silnika ale także akcesoriów pomocniczych, do których zaliczono alternatory, pompę wspomagania oraz kompresor powietrza. Akcesoria te napędzane są z silnika za pomocą paska klinowego (alternatory) lub przez koło zębate (pompa wspomagania oraz kompresor powietrza). Ważnym akcesorium, które nie jest niezbędne do funkcjonowania pojazdu ale w dzisiejszych czasach stało się standardowym rozwiązaniem jest klimatyzacja. W przypadku autobusu z napędem Diesla sprężarka klimatyzacji jest elementem napędzanym z pomocą paska klinowego z silnika z możliwością rozłączenia poprzez użycie elektro-sprzęgła. Na rysunku 2.1. zaprezentowano architekturę magistrali komunikacyjnej CAN systemu nadzorczo-sterującego autobusu z napędem Diesla. Funkcje realizowane przez akcesoria pomocnicze (ładowanie akumulatorów pokładowych przez alternatory, zapewnienie wspomagania układu kierowniczego przez pompę wspomagania, zapewnienie sprężonego powietrza dla układu hamulcowego oraz elektronicznie regulowanego pneumatycznego układu zawieszenia przez kompresor powietrza jak również działanie kompresora klimatyzacji) muszą być również realizowane w przypadku autobusów elektrycznych. Tam stanowią one jednak niezależne od silnika trakcyjnego komponenty, które mają swoje interfejsy komunikacyjne i wymagają stworzenia dla nich odpowiedniej strategii sterowania zapewniającej z jednej strony działanie w wymaganym okresie i na wymaganym poziomie z drugiej strony działanie zoptymalizowane pod kątem zużycia energii i wykorzystania mocy dostępnej w danym momencie z baterii trakcyjnych i pokładowych.



Rys. 2.1. Podstawowa architektura magistrali komunikacyjnej CAN systemu nadzorczo – sterującego autobusu Urbino z napędem konwencjonalnym [16]

Jednym z przykładów poruszonych przez autora rozprawy w artykule [4] jest przykład porównania pompy wspomagania w autobusie z napędem Diesla oraz autobusie elektrycznym. Akcesorium napędzane w przypadku silnika Diesla poprzez koło zębate o stałej wartości przełożenia było dobrane tak aby zapewnić wymagany dla układu wspomagania przepływ w zakresie 12-13 litrów na minutę już na biegu jałowym (550-700 obr/min w zależności od silnika). Podczas jazdy na poszczególnych biegach zwiększanie obrotów silnika powodowało zwiększanie przepływu do wartości 16 litrów (osiąganej przy około 1000 obr/min). Po osiągnięciu tej wartości działał zawór przelewowy – ogranicznik przepływu aby odczuwane przez kierowcę wspomaganie pozostawało na tym samym poziomie [16]. Sprawność rozwiązania była bardzo niska, gdyż energia była tracona na przepływ nadmiarowy. W autobusach elektrycznych Solaris pompa układu wspomagania została zaprojektowana

w sposób umożliwiający jej zasilanie nawet przy problemach instalacji trakcyjnej i niedoborach energii. Silnik pompy zasilany jest z akumulatorów pokładowych co oznacza, że zostanie aktywny w sytuacjach awaryjnych. Praca pompy wspomagania sterowana i nadzorowana jest z komputera pokładowego autobusu z wykorzystaniem komunikacji po magistrali CAN. Zastosowane rozwiązanie umożliwia implementację algorytmów zwiększających komfort prowadzenia pojazdu (regulacja wydajności pompy poprzez obniżanie siły wspomagania wraz ze wzrostem prędkości pojazdu) oraz redukcję zużycia energii (na przykład pompa wyłączana jest w trakcie postoju autobusu). Aby rozwiązanie działało prawidłowo wymagano ustawienia 58 parametrów. Sygnały sterujące wymagane do prawidłowej pracy układu wspomagania zależą od stanu autobusu i jego urządzeń oraz aktualnych parametrów jezdnych. Istnieje więc konieczność wymiany informacji z innymi systemami zainstalowanymi w autobusie. Sterownik układu wspomagania informuje również przy użyciu wiadomości wysyłanych na magistralę CAN pozostałe urządzenia o swoim stanie i realizowanych żądaniach. Sumarycznie komunikacja może odbywać się nawet z użyciem 7 wiadomości. Rozwiązanie wyposażone jest także w system autodiagnozy, która za pomocą wiadomości diagnostycznych DM1 informuje pozostałe systemy oraz dzięki przetworzeniu przez komputer wiadomości na postać graficzną wyświetlaną na pulpicie również kierowcę o awariach i usterkach urządzenia (wspomaganie błąd żółty-można kontynuować jazdę/wspomaganie błąd czerwony-należy zaprzestać jazdy i zatrzymać się w bezpiecznym miejscu). Wiadomości DM1 z urządzenia odbierane są również przez system zdalnej diagnozy zainstalowany w pojeździe i dzięki temu serwis obsługujący autobusy niezwłocznie może poznać przyczyny awarii a transmisja pozostałych parametrów pracy urządzenia może być wykorzystywana do predykcji jego zachowania i prognozowania możliwych do wystąpienia awarii. Autodiagnoza systemu wspomagania pozwala na identyfikację ponad 50 różnych błędów i dysfunkcji systemu. Przykładowe błędy to błąd wyjścia stycznika głównego, błąd zasilania enkodera, błąd stopnia mocy, błąd sterowania silnikiem czy też błąd magistrali CAN. Podczas przeprowadzanych na pojeździe testów pojawiła się sytuacja, w której pomiędzy 60 s a 190 s pomiaru doszło do przerwania komunikacji CAN ze sterownikiem (Rys. 2.2.). Ze względu na zaimplementowaną obsługę błędów (utrzymanie zadanych parametrów pracy sprzed wystąpienia błędu związanego z przerwaniem komunikacji po magistrali CAN), pompa kontynuowała pracę. Jednakże sytuacja ta wskazała jak ważne jest przeprowadzanie analiz związanych z bezpieczeństwem funkcjonalnym oraz wprowadzenie odpowiednich zabezpieczeń w oprogramowaniu.



Rys. 2.2. Przebieg wartości prądu inwertera, prędkości obrotowej pompy, prędkości pojazdu w funkcji czasu podczas testu jezdnego po Murowanej Goślinie, pierwsza oś obciążona jak przy dopuszczalnej masie całkowitej (DMC), zakres pracy pompy 1900/1500 obr/min

Powyższy przykład, przedstawiony przez autora w ramach niniejszej rozprawy, dotyczy tylko jednego z bardzo prostych urządzeń jakie aktualnie mają dostęp do magistrali systemowej w autobusach, lecz pokazuje jak skomplikowanym procesem jest stworzenie poprawnie działającej architektury dla całego autobusu elektrycznego. Aktualnie głównym czynnikiem wpływającym na rozbudowę architektury, jest zwiększenie zakresu bezpieczeństwa czynnego. Implementowane rozwiązania (zmodyfikowane algorytmy lub oprogramowane urządzeń nadzorczo – sterujących), wskazane w tabeli 2.1., mają za zadanie zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku lub kolizji. Występują między nimi zarówno logiczne i czasowe powiązania, którym muszą sprostać nowo projektowane rozwiązania komunikacyjne. Niewątpliwie bezpieczeństwo podróży jest ważne zarówno dla kierowców jak i innych użytkowników dróg, więc wszystkie te układy i rozwiązania muszą znaleźć swoje odpowiednie miejsce w architekturze.

Tabela 2.1. Przykłady algorytmów i urządzeń związanych z zakresem bezpieczeństwa czynnego (1/3) [41], [42], [43], [44]

Skrót	Nazwa	Opis
AAS	Auto Adjusting Suspension	Automatycznie regulujące się w zależności od prędkości zawieszenie.
ABC	Active Body Control	Aktywne zawieszenie poprawiające komfort jazdy oraz zmniejszające przechył nadwozia na zakrętach podczas jazdy z dużą prędkością.

Tabela 2.1. Przykłady algorytmów i urządzeń związanych z zakresem bezpieczeństwa czynnego (2/3) [41], [42], [43], [44]

ABS	Antilock Braking System	System zapobiegający blokadzie kół podczas hamowania.
ACC	Adaptive Cruise Control	Adaptacyjny system kontroli prędkości, którego zadaniem jest utrzymanie bezpiecznej odległości od pojazdu poprzedzającego.
ACS	Automatic Crash System	Automatyczny system kolizyjny odcinający dopływ paliwa, odblokowujący centralny zamek oraz uruchamiający oświetlenie awaryjne w przypadku wykrycia przez pojazd kolizji.
AEB	Autonomous Emergency Braking	Automatyczny system awaryjnego hamowania wykrywa przeszkody na drodze, ostrzega uruchamiając światła ostrzegawcze lub klakson i jeżeli jest to niezbędne rozpoczyna proces hamowania awaryjnego.
AFL	Adaptive Front Lighting System	Oświetlenie adaptacyjne. System dopasowujący oświetlenie do warunków jazdy i zachowania pojazdu.
AHR	Active Head Restraint	System aktywnych zagłówek. Przy uderzeniu od tyłu zagłówki w bardzo krótkim czasie przemieszczają się w kierunku głowy.
ASR	Acceleration Slip Regulation	System kontroli trakcji, pomaga w optymalizacji przyczepności podczas przyspieszania.
BAS	Brake Assist System	System wspomagania hamowania w sytuacjach awaryjnych działający we współpracy z ABS zwiększający ciśnienie w układzie hamulcowym, w celu uzyskania jak największej siły hamowania.
BLIS	Blind Spot Information System	System informujący kierowcę o samochodzie znajdującym się w tzw. „martwym polu”.
CBC	Cornering Brake Control	Odpowiednik układu EBD. System podczas nagłego hamowania w zakręcie, optymalnie rozdziela jego siłę.
CMBS	Collision Mitigation Brake System	System, który wspiera działanie tempomatu adaptacyjnego. Gdy kierowcy mimo ostrzeżeń w wystarczającym stopniu nie zredukuje ryzyka kolizji system inicjuje ostre hamowanie w celu zredukowania prędkości.
DAC	Downhill Assist Control	System pomagający w zapobieganiu poślizgom bocznym w stromych zjazdach.

Tabela 2.1. Przykłady algorytmów i urządzeń związanych z zakresem bezpieczeństwa czynnego (3/3) [41], [42], [43], [44]

Skrót	Nazwa	Opis
EBD	Electronic Brake Force Distribution	System elektronicznego rozdziału siły hamowania.
EPS „City”	Electrical Power Steering	Elektryczne wspomaganie układu kierowniczego wyposażone w opcję zmiennej siły wspomagania.
ESP	Electronic Stability Program	Program stabilizacji toru jazdy samochodu podczas pokonywania zakrętu.
HSA	Hill Start Assist (hill holder)	System ułatwiający ruszanie pod górę.
ICC	Intelligent Cruise Control	Inteligentny tempomat pomagający kierowcy w przyspieszaniu i zwalnianiu pilnujący bezpiecznej odległości od poprzedzającego pojazdu integrowany z systemem w którym samochód sam się zatrzymuje i rusza.
LDW	Lane Departure Warning	System informujący sygnałem dźwiękowym lub wibracją fotela o opuszczeniu właściwego pasa ruchu bez włączenia kierunkowskazu.
PRS	Pedal Release System	System automatycznego odłączania pedałów hamulca i sprzęgła w przypadku wystąpienia zderzenia czołowego w celu minimalizacji ryzyka urazów nóg kierowcy.
RDS	Rear Detect System	System wykrywający zagrożenia z tyłu.
TCS	Traction Control System	System nie dopuszcza do nadmiernego poślizgu kół pojazdu podczas przyspieszania wykorzystując czujniki systemu ABS zmniejsza przyspieszenie oraz podhamowuje.
TPMS	Tyre Pressure Monitoring System	System pomiaru ciśnienia w oponach.
SWS	Sway Warning System	System monitorowania stopnia zmęczenia kierowcy
V2V	Vehicle to Vehicle	System wzajemnej wymiany przez samochody danych dotyczących kierunku jazdy, prędkości, położenia oraz weryfikacji kolizyjnych torów jazdy

2.2 Wymiana danych pomiędzy urządzeniami zainstalowanymi w ramach architektury nadzorczo-sterującej

Architektura nadzorczo-sterująca rozumiana jako zestaw wszystkich urządzeń wymieniających między sobą dane, niezbędne do ich prawidłowego funkcjonowania, wymaga zaprojektowania i zamodelowania struktury zachodzących w niej procesów komunikacyjnych oraz doboru medium transmisyjnego. Uwzględniając wymagania związane z prędkością transferu danych urządzenia podłączone do magistrali podzielono na klasy: A,B,C,C+ oraz D przedstawione w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Klasy urządzeń podłączanych do magistrali [45]

Klasa	Opis
A	Urządzenia w tej klasie mają za zadanie eliminację klasycznej wiązki elektrycznej – połączenia aktorów i sensorów.
B	Urządzenia w tej klasie mają za zadanie eliminację nadmiarowości związanej z aktorami i sensorami wykonującymi pracę dla różnych systemów. Urządzenia działają głównie w zakresie układów zwiększających komfort jazdy zarówno dla kierowcy jak i pasażerów. Do układów tych zaliczono na przykład regulator prędkości jazdy (tempomat), elektroniczna regulacja ogrzewania czy też elektroniczne sterowanie klimatyzacji.
C	Urządzenia w tej klasie mają za zadanie utrzymanie komunikacji w czasie rzeczywistym i dotyczą głównie funkcji związanych z układem napędowym. Pojęcie komunikacji czasu rzeczywistego zdefiniowane jako przypadek komunikacji, gdzie istnieją wymagania jakości obsługi takie jak: maksymalne opóźnienie oraz maksymalna stratność [46].
C+	Urządzenia w tej klasie mają za zadanie utrzymanie komunikacji w czasie rzeczywistym wykorzystywane na przykład dla systemów bezpieczeństwa [47].
D	Urządzenia w tej klasie mają działają w zakresie układów telematyki i zastosowań multimedialnych.

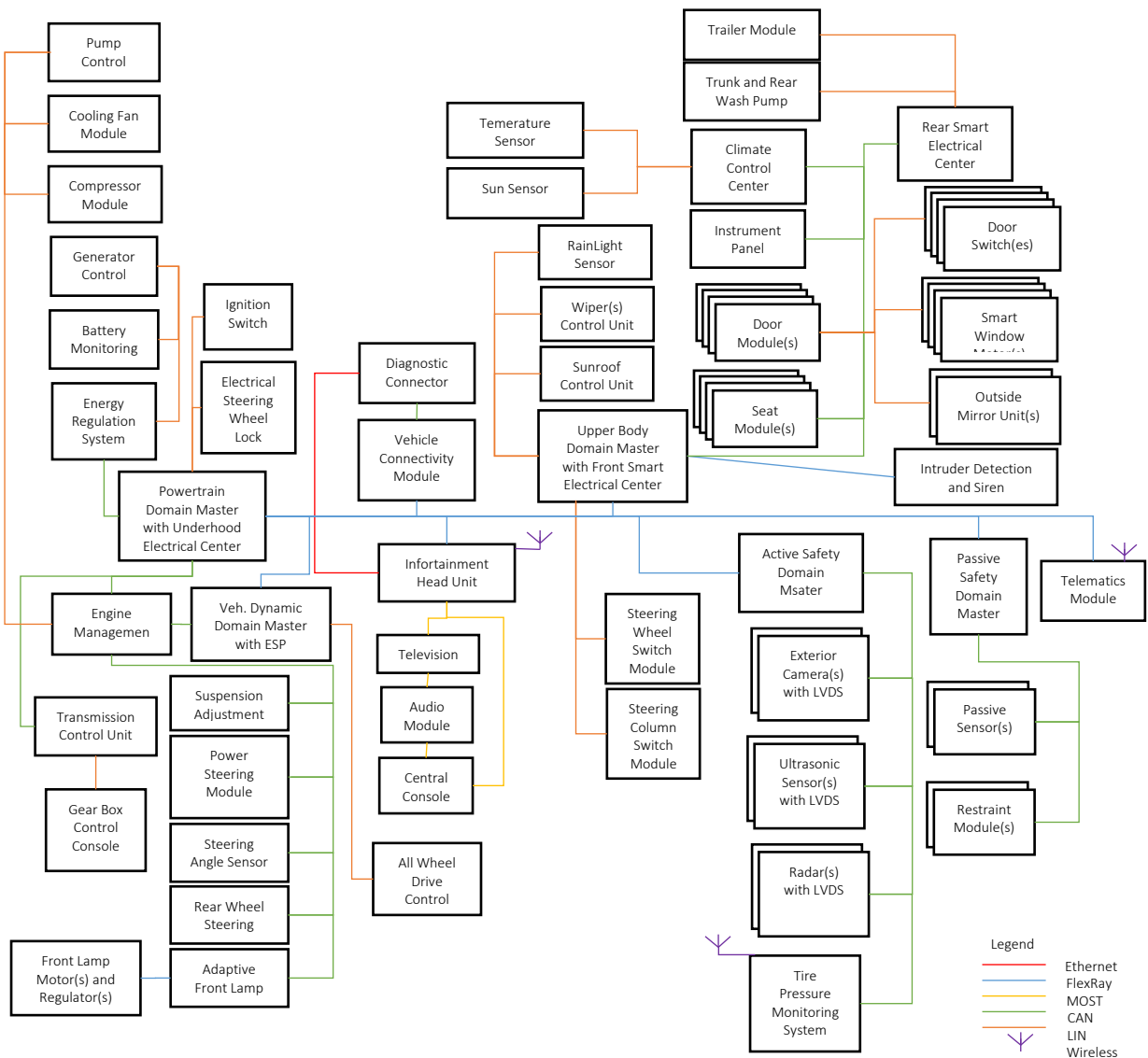
Medium transmisyjnym w przypadku pojazdów są magistrale komunikacyjne. Aktualnie wykorzystywane typy magistrali komunikacyjnych przedstawiono w tabeli 2.3. Magistrale zebrane i porównane w tabeli różnią się od siebie nie tylko prędkością transferu, ale również zakresem ich zastosowania. Magistrala CAN-C stosowana jest do sterowania i komunikacji pomiędzy urządzeniami związanymi z napędem, natomiast magistrala CAN-B

w głównej mierze do sterowania układami związanymi ze zwiększeniem komfortu jazdy dla kierowcy oraz pasażerów. Magistrala LIN wykorzystywana jest w rozwiązaniach z prostymi układami komfortu jazdy, takimi jak na przykład regulacja położenia fotela. TTP oraz FlexRay są magistralami sklasyfikowanymi przez SAE jako sterowanie Drive-by-Wire. Stosowane są one w przypadkach sieci ważnych dla bezpieczeństwa oraz w komunikacji układów, w których wyeliminowano połączenia mechaniczne (na przykład układ kierowniczy) a sieć ma zapewnić bezpieczeństwo. W przypadku danych multimedialnych związanych z pokładowym centrum rozrywki, przesyłaniem sygnałów audio i wideo wykorzystywane są magistrale MOST (połączenia przewodowe – światłowód), Bluetooth (połączenia bezprzewodowe – fale radiowe) lub D2B.

Tabela 2.3. Magistrale komunikacyjne w pojazdach [48]

Magistrala	Opis
CAN	klasa C (High-Speed Controller Area Network – transfer od 125 kbit/s do 1 Mbit/s, przy ograniczeniu maksymalnym do 10 węzłów) klasa B (Low-Speed Controller Area Network – transfer do 125 kbit/s, przy ograniczeniu maksymalnym do 24 węzłów)
LIN	klasa A (Local Interconnect Network – transfer do 20 kbit/s, przy ograniczeniu maksymalnym do 16 węzłów - moduł mastera LIN jest zazwyczaj równocześnie węzłem sieci CAN)
TTP	klasa C+ (Time-Triggered Protocol – w większości przypadków transfer na poziomie 10 Mbit/s)
MOST	klasa D (Media Oriented Systems Transport – transfer do 22,5 Mbit/s, przy ograniczeniu maksymalnym do 64 węzłów)
Bluetooth	wybrane wersje magistrali: 1.0 – transfer do 21 kbit/s; 2.0 + EDR – transfer do 2,1 Mbit/s; 3.0 + HS – transfer do 24 Mbit/s; 3.1 + HS – transfer do 40 Mbit/s; 4.0 + LE (low energy) – transfer na poziomie 1 Mbit/s - ograniczenie ilości zużywanej energii i zwiększenie zasięgu do ~100 m; 5.0 transfer na poziomie 2 Mb/s dla „wearables” oraz do 50 Mb/s do reszty urządzeń. zasięg w otwartej przestrzeni do 140 m [49], [50], [51]
FlexRay	klasa C+ (transfer 20 Mbit/s, zwykle 10 Mbit/s, przy ograniczeniu maksymalnym do 2048 węzłów)
D2B	klasa D - Domestic Digital Bus (transfer w wersji SMARTwireX - skrętka - 25 Mb/s, Mercedes-Benz światłowód - 44,8Mb/s. Możliwy transfer dla światłowodu do 5,6 MB/s)
Automotive Ethernet	100 Base-T1 (IEEE 802.3bw) - transfer 100 Mbps, 1000 Base-TX (IEEE 802.3bp) - transfer 1000 Mbps. Jedna para skrętki o sygnałach równych ale z przeciwnymi napięciami [52], [53]

Na rysunku 2.3 pokazano przykład koegzystencji magistrali o różnych parametrach i klasach w samochodzie osobowym. W przypadku autobusów miejskich używane przede wszystkim magistrale to CAN (Controller Area Network) oraz LIN (Local Interconnect Network). Coraz częściej pojawia się również w ograniczonym zakresie magistrala Ethernet, której aktualny zakres stosowania autor rozprawy opisał w rozdziałach 2.5.1. oraz 2.5.2.



Rys. 2.3. Koegzystencja magistrali o różnych prędkościach i klasach w samochodzie osobowym [54]

Magistrala CAN, użyta przez autora rozprawy do budowy architektury, będąca siecią multi-master bazuje na serii norm SAE J1939 oraz ISO 11898 opisujących szczegółowo warstwę transferową (protokół) i fizyczną magistrali komunikacyjnej. Urządzenia sterujące, które podłączono do magistrali nie dysponują swoimi indywidualnymi adresami, a więc przesłanie do urządzenia komunikatu musi odbywać się w inny sposób, niż ma to miejsce

w przypadku klasycznych sieci stosowanych w automatyce przemysłowej [55]. Zgodnie z normą J1939 pojedynczym rodzajom komunikatów zostały nadane identyfikatory (ID). Ich rozmiar to 11 bitów dla CAN2.0A oraz 29 bitów dla standardu CAN2.0B umożliwia wysłanie odpowiednio 2048 i 536 milionów różnych rodzajów wiadomości. Urządzenia, które są podłączone do danej magistrali w autobusie wysyłają komunikaty, które nie są adresowane do konkretnego odbiorcy. Wszystkie urządzenia podpięte do tej magistrali mają dostęp do tych komunikatów. Aby jednak poznać ich zawartość producent urządzenia musi potrafić je zdekodować. Dzięki takiemu rozwiązaniu modyfikacja architektury poprzez dodawanie kolejnych urządzeń jest możliwa bez modyfikacji oprogramowania w już do niej podłączonych. Urządzenia w uzyskaniu dostępu do magistrali wykorzystują metodę arbitrażu co powoduje, że czas oczekiwania na nadawanie dla wszystkich sygnałów jest niedeterministyczny, a więc i niepewność otrzymania komunikatu na który czeka odbiorca wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia magistrali. Urządzenia, których komunikaty mają niższe priorytety zmuszone są więc do kolejnych prób nadawania [56] natomiast urządzenie, które ma na danej magistrali najwyższy priorytet rozpocznie nadawanie zawsze jako pierwsze. Pojedyncze opóźnienie związane z brakiem możliwości nadawania wiąże się w praktyce z opóźnieniem na przykład 300 μ s (dla standardu CAN Low-Speed przy prędkości transmisji 500 kbit/s). Dlatego też zapewnienie odpowiedniego obciążenia magistrali kalkulowanego dla sytuacji awaryjnych jest jednym z kluczowych warunków przy budowaniu systemów.

Magistrala LIN będąca siecią Master - Slave, służy do łączenia prostych urządzeń sterujących układami mechatronicznymi. Szybkość transmisji dla magistrali ograniczoną do 20 kbit/s przy maksymalnej liczbie 16 węzłów ogranicza możliwości jej zastosowania. W sieci możliwa jest komunikacja pomiędzy urządzeniami Slave ale zawsze w takim przypadku inicjatorem i biorącym udział jest Master. Ta sieć, w przeciwieństwie do powyżej opisanej sieci CAN jest w pełni synchroniczna. Nie występuje w niej arbitraż, ponieważ każde z urządzeń ma przydzielone niezmiennie miejsce w ramce transmisyjnej, za synchronizację której odpowiedzialny jest Master. W LIN tak jak w CAN wykorzystywane jest adresowanie bazujące na zawartości komunikatu. Wykorzystywane do adresowania 6 bitów daje możliwość zidentyfikowania 64 rodzajów komunikatów [48]. Tolerancja odchylenia synchronizacji powoduje, że urządzenia LIN nie posiadają własnych oscylatorów kwarcowych. Aby zachować odchyłki mieszczące się w granicach +/- 2% do końca komunikatu wystarczające są proste układy RC [45]. Najczęstsze zastosowanie LIN jest związane ze sterowaniem ustawieniami foteli, lusterek oraz szyb. Wykorzystanie dodatkowych paneli przycisków skomunikowanych

po LIN umożliwia również sterowanie zamkami w pojeździe czy też na przykład klimatyzacją. W takich przypadkach urządzenie Master spełnia podwójną rolę będąc kontrolerem CAN jak i LIN. Urządzenia będące podległymi (ang. slave) są wtedy kontrolowane tylko poprzez magistralę LIN. LIN jest więc kompromisem dającym obniżenie kosztu rozwiązania przy redukcji jego elastyczności. W autobusach Solaris magistralę LIN wykorzystano na przykład do komunikacji z alternatorami czy też sterownikami oświetlenia.

2.3 Diagnostyka magistrali

Komunikacja w sieci CAN oprócz sygnałów monitorujących i sterujących poszczególne urządzenia zawiera również sygnały diagnostyczne. Zewnętrzna komunikacja diagnostyczna w samochodach osobowych oraz lekkich pojazdach użytkowych oparta jest o normy takie jak ISO 15031:2016 oraz ISO 15765-4:2021(en). ISO 15031:2016 [57], odwołuje się do publikacji SAE J1962. Pojazdy wyposażane są w znormalizowane złącze, dzięki któremu możliwy jest dostęp do informacji OBD, przy wykorzystaniu zewnętrznych urządzeń diagnostycznych. Normę ISO 15765-4:2021, opracowano w Komitecie Technicznym ISO/TC 22, Pojazdy drogowe, Podkomitet SC 31, Transmisja danych. W normie określono wymagania dla systemów diagnostycznych pojazdów wykorzystujących komunikację opartą na sieci CAN, między siecią pojazdu a złączem diagnostycznym pojazdu. W dokumencie nie podano wymagań związanych z architekturą sieci CAN [58].

Normy ISO nie mają swojego odpowiednika ISO używanego w autobusach i pojazdach ciężarowych. Diagnostyka w pojazdach ciężarowych oraz w autobusach odbywa się na bazie normy SAE J1939 a nomenklatura diagnostyki układów E/E bazuje na SAE J2403 z 3.08.2020 roku. Dokument ten w szczególności definiuje terminologię diagnostyczną oraz skróty i akronimy. Zapisy i definicje w normie nie blokują wprowadzania innych, będących w powszechnym użyciu, które po przeprowadzeniu odpowiedniej procedury zatwierdzającej mogą być wykorzystane do aktualizacji dokumentu [59].

W tabeli 2.4. autor rozprawy zestawiał podstawową terminologię związaną z diagnostyką magistrali CAN w autobusach. Aktualnie stosowana w autobusach sieć CAN umożliwia sprawne wykrywanie usterek poszczególnych urządzeń dzięki monitorowaniu przez nie swojej pracy oraz rejestrowaniu występujących usterek wraz z numerami identyfikującymi w pamięci urządzeń. Te informacje są następnie możliwe do odczytania dzięki na przykład wiadomościom DM1 wysyłanym przez urządzenia w CAN. Błędy odczytywane i zdekodowane

są klasycznie poprzez podłączenie fizycznego urządzenia diagnostycznego do złącza OBD [60] lub zdalnie dzięki wykorzystaniu rozwiązań zdalnej diagnozy takich jak eSConnect firmy Solaris.

OBD jest bezpośrednio związane z systemem kontroli emisji, wykrywania jego nieprawidłowego działania i przechowywania związanych z nim informacji w pamięci nieulotnej. Diagnostyka ta jest wymagana przez przepisy rządowe, ale jest również pomocna w identyfikacji i naprawie wadliwie działających układów. W czasie gdy system OBD wprowadzany był do produkcji kilka ważnych pozycji, nie zostało włączonych do norm OBD ze względu na ograniczenia techniczne. Od czasu wprowadzenia OBD nastąpiło kilka przełomów technicznych i następna generacja OBD2 jest już ściśle zorientowana na emisję [61]. Na rysunku 2.4.A przedstawiono umieszczenie złącza diagnostycznego OBD2 w autobusach firmy Solaris (numer 29). Na rysunku 2.5 przedstawiono przykładowe typy komunikacji urządzenia diagnostycznego z ECU.

W magistrali CAN może dochodzić do fizycznych usterek medium transmisyjnego, którym jest dwuprzewodowa skrętka zakończona terminatorami, zapobiegającymi zjawisku odbicia się fali elektromagnetycznej. Zastosowane rozwiązanie w którym dla bitów recesywnych na obydwu przewodach mamy ten sam potencjał 2,5 V a w przypadku bitu dominującego mamy różne poziomy potencjału 1,5 V oraz 3,5 V powoduje, że zakłócenia, które mogą działać na skrętkę będą się znosiły. Obserwując sygnały z magistrali na oscyloskopie, można analizując napięcia na poszczególnych przewodach transmisyjnych rozpoznać rodzaj usterek mechanicznej. Podstawowe usterek opisane są w normie ISO 11898. Nad poprawnością pracy magistrali czuwają również systemy wykrywania i korekcji błędów. Informacja dotycząca błędu przesyłana jest najpóźniej pod koniec komunikatu. Realizowane jest to w ten sposób ze względu na zapewnienie układom nadającym możliwości powtórzenia wysłanej ramki danych. Stosowane przykładowe metody detekcji błędów zebrano w tabeli 2.5.

Część komponentów i urządzeń nadzorczo-sterujących instalowanych w autobusie wyposażono w niezależne własne złącza diagnostyczne. Dzięki nim możliwe jest przy użyciu dedykowanego oprogramowania producenta dokonywanie szczegółowej diagnozy i testów działania oraz zmiana parametrów a nawet programu danego sterownika. Przykładem takiego urządzenia jest dotykowy pulpit kierowcy instalowany w autobusach elektrycznych firmy Solaris.

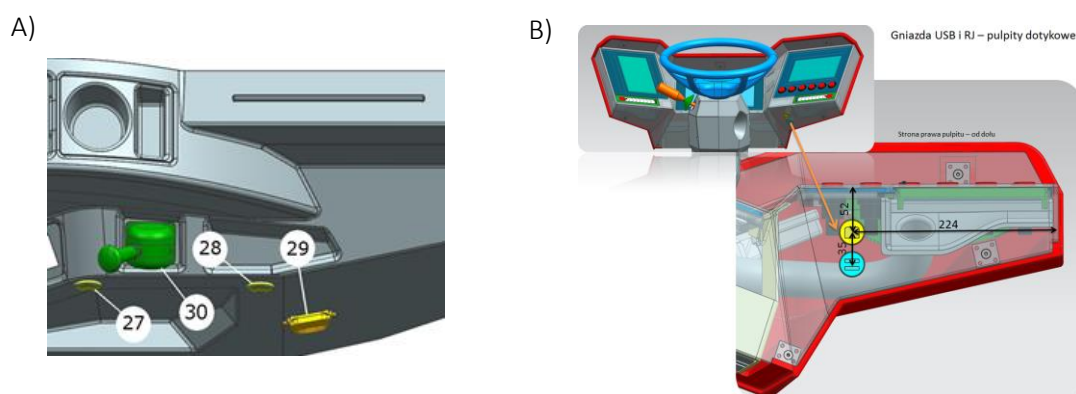
Tabela 2.4. Podstawowa terminologia związana z diagnostyką magistrali CAN (1/2) [62]

Skrót	Nazwa	Opis
ACL	Address Claiming	Żądanie adresu. ECU podłączone do magistrali musi posiadać przynajmniej jeden adres dla celów identyfikacji. 8-bitowy adres ECU jest wykorzystywany jako określenie źródła lub miejsce przeznaczenia dla wiadomości.
BAM	Broadcast Announce Message	Komunikat o nadawaniu. Komunikat pozwala wszystkim węzłom zainteresowanym komunikatem przygotować się do odbioru poprzez przydzielenie odpowiedniej ilości pamięci.
DM	Diagnostic Message	Komunikat diagnostyczny. J1939 zapewnia 19 różnych komunikatów diagnostycznych, które mogą być używane do monitorowania, testowania i czyszczenia informacji diagnostycznych w urządzeniach w sieci.
DP, EDP	Data Page, Extended Data Page	Dwa bity "Data Page" (DP) i "Extended Data Page" (EDP) są częścią PGN. Bit DP działa jako selektor strony dla następującego pola PDU (Protocol Data Unit) Format (PF).
DTC	Diagnostic Trouble Code	Diagnostyczny kod błędu zdefiniowany przez standard SAE J1939.
FMI	Failure Mode Identifier	Identyfikator trybu uszkodzenia. FMI jest używany wraz z SPN w celu dostarczenia informacji odnoszących się do kodu usterki diagnostycznej (DTC). FMI może wskazywać wykrycie problemu z obwodem elektronicznym lub komponentem elektronicznym oraz wykrycie nieprawidłowych warunków pracy.
NACK	Negative Acknowledgement	Nieznane żądania przychodzące są odbierane z negatywnym potwierdzeniem PG, jeśli są skierowane do określonego adresu docelowego.
PDU	Protocol Data Unit	Jednostki danych protokołu. Wiadomości J1939 są zorganizowane w jednostki danych protokołu (PDU), które składają się z identyfikatora i 8 bajtów danych. Dane numeryczne, które są większe niż pojedynczy bajt są wysyłane najpierw z najmniej znaczącym bajtem (LSB). J1939 używa CAN 2.0B z rozszerzonym (29 bitowym) identyfikatorem.

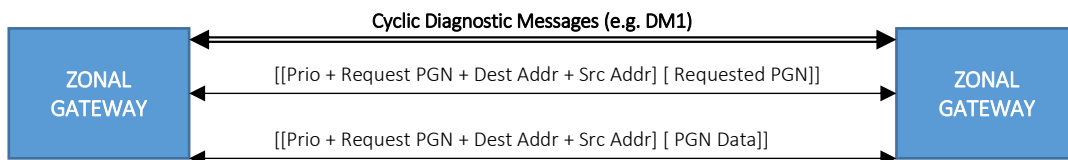
Tabela 2.4. Podstawowa terminologia związana z diagnostyką magistrali CAN (2/2) [62]

Skrót	Nazwa	Opis
PG	Parameter Group	J1939 definiuje specjalną grupę parametrów (PG) o nazwie Request (RQST, PGN = 0x0EA00), która może być używana do żądania transmisji każdej innej grupy parametrów. Grupa parametrów Request zawiera jedynie PGN żądanej grupy parametrów.
PGN	Parameter Group Number	Numer grupy parametrów. PGN służy jako unikalny identyfikator ramki w ramach standardu J1939.
SLOT	Scaling, limit, Offset & Transfer	SLOT określa Skalowanie, Limit, Offset i Funkcję Przeniesienia dla określonego SPN (Suspect Parameter Number).
SPN	Suspect Parameter Number	Podejrzany numer parametru. SPN jest identyfikatorem sygnału - liczbą określoną przez SAE, która została przypisana do konkretnych parametrów (obwodów komponentów lub układów). Może to być wartość fizyczna, status lub polecenie, z którymi związane są kody usterek diagnostycznych (DTC).

Dodatkowe złącze diagnostyczne pulpitu dotykowego zostało pokazane na rysunku 2.4.B. Punkty podłączenia zewnętrznych urządzeń diagnostycznych to nie tylko elementy architektury ułatwiające wykonywanie diagnozy, ale również potencjalne miejsca ataków hackerskich. Są więc punktami krytycznymi dla bezpieczeństwa cybernetycznego pojazdu. Zagadnienie związane z bezpieczeństwem cybernetycznym opisano w rozdziale 8 niniejszej rozprawy.



Rys. 2.4. A) Umieszczenie złącza OBD2 na boczku w kabinie kierowcy autobusu Solaris, B) Umieszczenie złącza diagnostycznego oraz serwisowego w pulpicie dotykowym [16]



Rys. 2.5. Komunikacja testera z ECU [62]

Tabela 2.5. Metody detekcji błędów w magistrali CAN [184]

Metoda detekcji	Opis
kontrola nadmiarowa CRC	Wykrywanie błędu poprzez porównanie sumy kontrolnej na końcu transmisji w układzie odbierającym komunikat z jej wartością początkową w układzie nadawczym.
sprawdzanie formatu ramki	Kontrola struktury komunikatu.
błąd potwierdzenia	Brak komunikatu zwrotnego od odbiorcy informującego nadawcę o poprawnym przebiegu transmisji.
błąd synchronizacji danych	Monitorowanie poprawności kodu ramki uwzględniając regułę maksymalnej liczby pięciu kolejnych bitów, które mogą mieć taką samą wartość logiczną.

2.4 Topologia sieci wymiany danych używanych w pojazdach

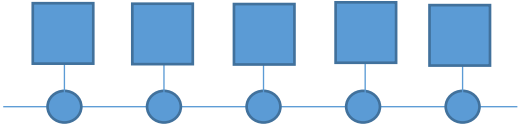
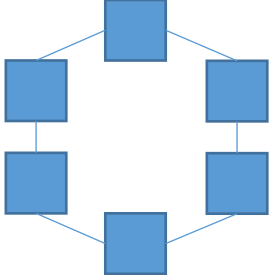
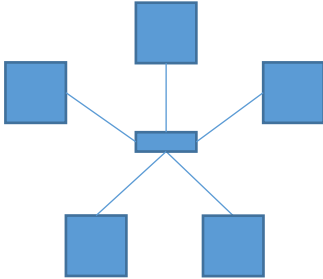
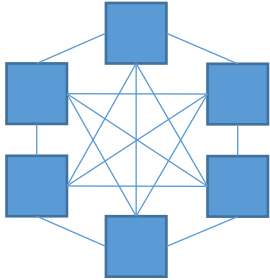
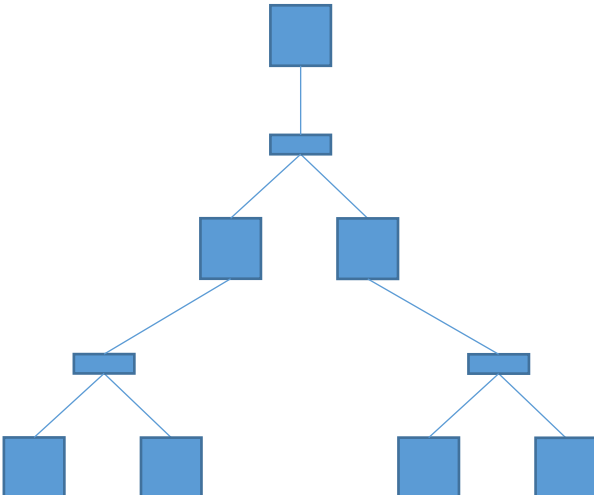
Stworzenie architektury nadzorczo – sterującej obejmuje swoim zakresem również określenie topologii a więc kształtowania układu połączeń sieci komunikacyjnej pomiędzy urządzeniami. Sieć komunikacyjna to sieć wymiany danych w której grupa elementów (urządzeń) wymienia między sobą informacje za pośrednictwem medium transmisyjnego. Urządzenia te oznacza się jako węzły a połączenia komunikacyjne pomiędzy nimi jako linie [45]. Pojęcie topologii oznacza strukturę węzłów i ich połączeń. Topologię podzielono na fizyczną opisującą jak wygląda struktura fizycznych połączeń węzłów z medium transmisyjnym i określono to medium wraz z parametrami oraz topologię logiczną opisującą poziom związania danymi pomiędzy poszczególnymi węzłami. Podział topologii wraz z przykładami zebrano i porównano w tabeli 2.6 (topologie logiczne) oraz w tabeli 2.7. (topologie fizyczne). Zaprojektowanie topologii poza główną funkcją jaką jest zapewnienie możliwości komunikacyjnych poszczególnym urządzeniom, pozwala ona na rozpoznanie

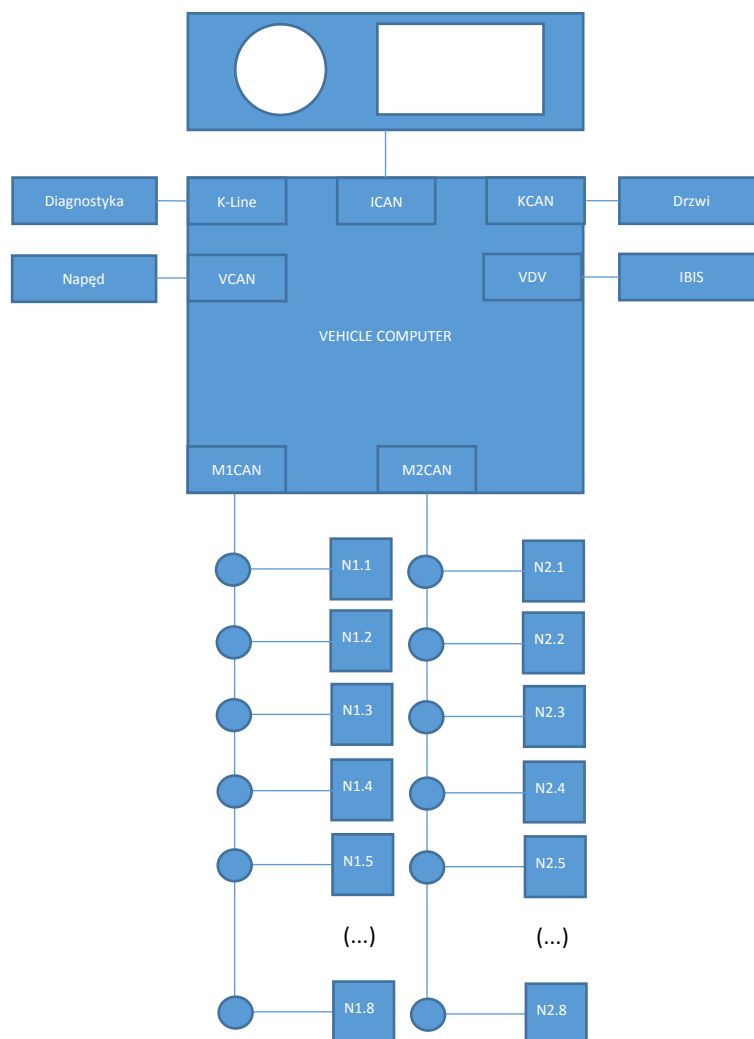
niedoskonałości projektowanego systemu jak i wykonywanie analiz modyfikacji systemu wraz z oceną ich skutków. Na jej podstawie autor rozprawy analizował zapewnienie bezpieczeństwa w projektowanej sieci. Wykładniczo rosnąca złożoność rozwiązań instalowanych w autobusach prowadzi do konieczności zwiększenia wymagań obliczeniowych dla systemów w nich instalowanych oraz modyfikacji i rozwoju rozwiązań komunikacyjnych. Coraz większe widoczne zaangażowanie branży informatycznej (IT) wpływa na zmianę bazowych koncepcji i rozwiązań, które to odzwierciedlają zmianę technologiczną jaka ma aktualnie miejsce. Topologie sieci implementowane w pierwszych autobusach elektrycznych polegały na funkcyjnym dopasowaniu węzłów sieci do poszczególnych jej gałęzi. Tworząc architekturę o topologii gwiazdowo-liniowej (Rysunek 2.6.), nie uwzględniano kwestii fizycznej lokalizacji urządzeń w autobusach, zależności komunikacyjnych pomiędzy urządzeniami generującymi obciążenie – topologii logicznej, kwestii zapewniających bezpieczeństwo funkcjonalne oraz cybernetyczne. Od powstania tej topologii w firmie Solaris minęło 10 lat, które przyniosły znaczne skomplikowanie systemów oraz dodatkowe wymagania. Zaprojektowana topologia dotarła do kresu swoich możliwości i dopuszczalnych obciążeń. Dodatkowe wymagania klientów, których spełnienie związane jest z koniecznością instalacji w standardzie urządzeń umożliwiających wymianę informacji z systemami zewnętrznymi, rozszerzyły funkcjonalności jakimi dysponują autobusy ale również wpłynęły na konieczność rozbudowy architektury oraz bezpieczeństwo użytkownika pojazdu.

Tabela 2.6. Topologie logiczne [63]

Topologia logiczna	Wykorzystanie
Punkt-punkt	Wykorzystywana na przykład razem z fizyczną topologią gwiazdy. W takim przypadku, komunikacja odbywa się pomiędzy węzłem centralnym a pozostałymi węzłami z wykorzystaniem oddzielnych linii.
Przekazywania żetonu	Wykorzystana na przykład razem z fizyczną topologią pierścienia. W takim przypadku, komunikacja odbywa się pomiędzy poszczególnymi urządzeniami. Urządzenie odbiera dane, weryfikuje czy są do niego kierowane i jeśli jest to wymagane lub kiedy dane nie są do niego adresowane przesyła je dalej.
Magistrali-wielodostępowa	Wykorzystywana na przykład z fizyczną topologią magistrali. W takim przypadku, każde urządzenie podłączone do sieci może próbować wprowadzić dane do niej w dowolnym momencie (istnieją reguły i mechanizmy porządkujące, na przykład mechanizm arbitrażu opisany w dalszej części rozprawy), a dane te są widoczne dla pozostałych urządzeń podłączonych do sieci. Dane te jednak mogą być zdekodowane i zinterpretowane jedynie przez urządzenia posiadające odpowiednią „wiedzę” - mające zaimplementowane rozwiązania interpretacyjne.

Tabela 2.7. Topologie fizyczne [48]

Topologia fizyczna	Schemat topologii
Magistrali - liniowa	
Pierścienia	
Gwiazdy	
Siatkowa	
Drzewa	



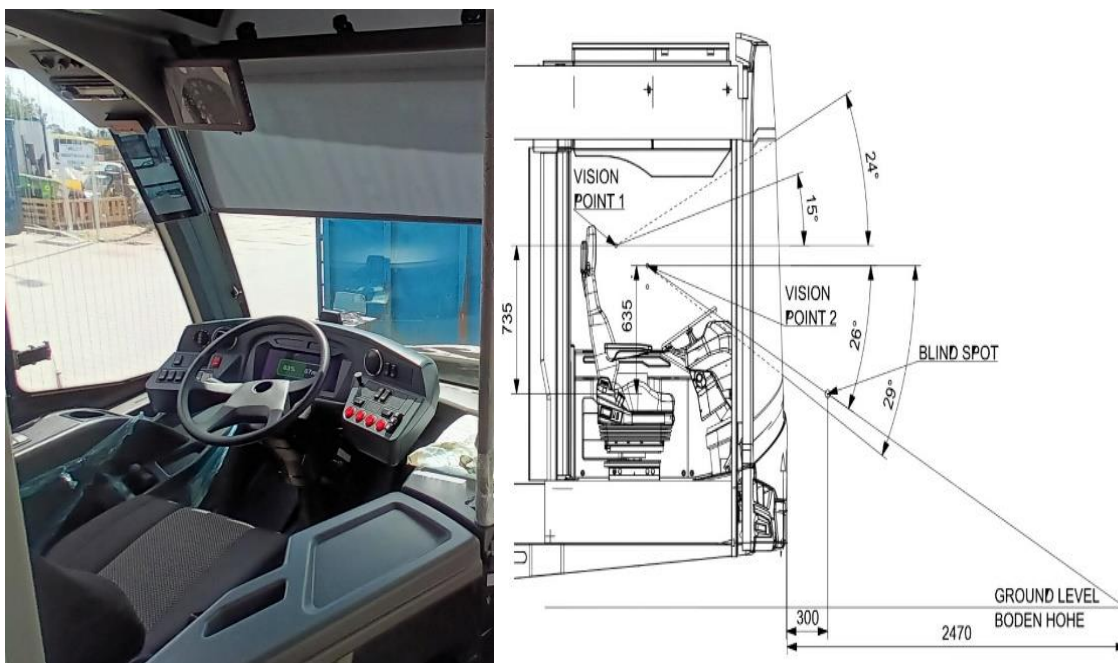
Rys. 2.6. Fizyczna topologia hybrydowa liniowo-gwiazdowa w autobusach Solaris [16]

2.5 Rozpoznanie potrzeb technicznych i biznesowych

2.5.1 Human-Machine Interface (HMI) jako interfejs architektury nadzorczo-sterującej

Architektura nadzorczo-sterująca to zbiór urządzeń, które mają na celu monitorowanie procesów zachodzących podczas użytkowania pojazdu, a także ich sterowanie i konfigurację. Proces tworzenia architektury obejmuje wybór odpowiednich elementów konstrukcyjnych oraz interfejsów. Human-Machine Interface (HMI) jest interfejsem, który służy jako łącznik między kierowcą a pojazdem. Wykorzystywany jest do dozoru stanu pracy pojazdu oraz zlecenia usług i nadzorowania ich przebiegu. Ewolucja HMI prowadziła od prostych kontrolki [64] do rozbudowanych, umożliwiających wyświetlenie większej ilości informacji ekranów. Dostrzeżono jednak, iż dodatkowe funkcjonalności i rozwiązania wpływają

na zmniejszenie koncentracji kierowcy podczas jazdy. W celu poprawy bezpieczeństwa, wprowadzono systemy monitorujące aktywność i koncentrację kierowcy i ostrzegające go w razie odchylenia od normy. Rozpoczęto również działania związane z upraszczaniem interfejsu wizualnego oraz redukcją liczby komponentów interaktywnych, wyświetlaczy i przycisków [65], a procesy oraz funkcjonalności, które wymagały inicjowania i nadzorowania przez kierowcę, są automatyzowane. Konstruktorzy w nowoczesnych pojazdach projektując interfejs użytkownika robią to w sposób umożliwiający kierowcom odbieranie ważnych informacji bez odrywania wzroku od drogi. W branży autobusów miejskich stosowane są wyświetlacze head-up (HUD) jak również haptyczne sprzężenia zwrotne [66]. Zdjęcie prezentujące wyświetlacz HUD podczas testów w autobusie Solaris przedstawiono na rysunku nr 2.9.



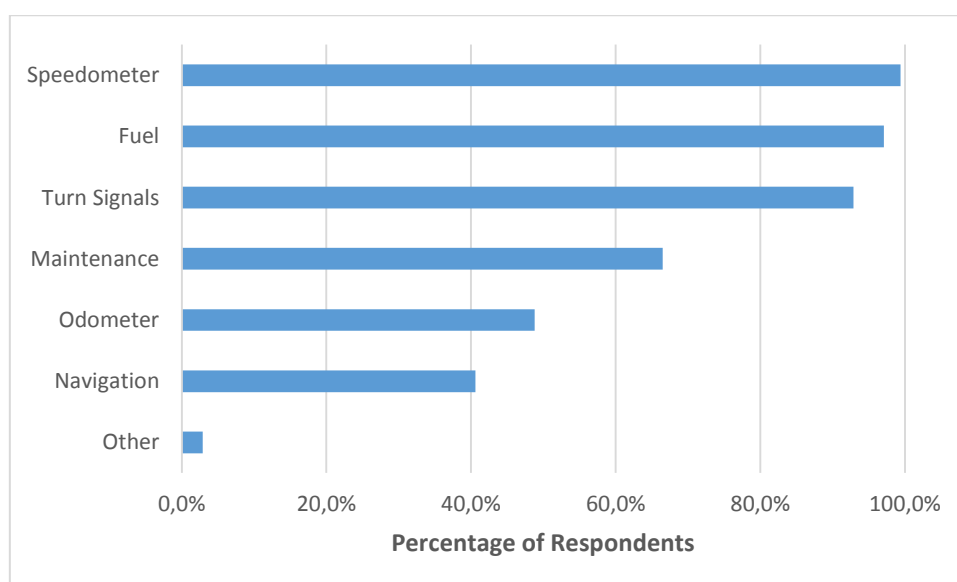
Rys. 2.7. Wyświetlacz HUD zainstalowany w autobusie miejskim [16]

Wszystkie komponenty interfejsu HMI obsługiwane są za pomocą urządzeń sterujących podłączonych do magistrali systemowych. Istnieje kilka cech charakteryzujących dobry interfejs HMI, które zebrano w tabeli numer 2.8.

Tabela 2.8. Cechy interfejsu człowiek maszyna (Human-Machine Interface) [67]

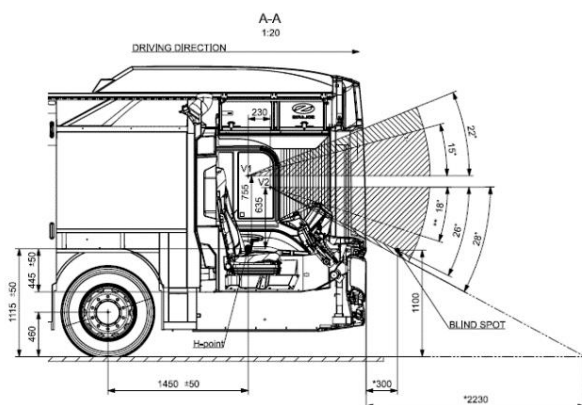
Cecha	Opis cechy
Obserwowalność	Czytelne i przejrzyste przedstawienie kierowcy informacji nt. aktualnie realizowanych lub nierealizowanych funkcji
Przewidywalność	Informowanie o zdolności oraz sposobie wykonania założonego manewru
Bezpośredniość	Umożliwienie sterowania funkcjami oraz przekazywanie poleceń kierowcy do systemu. W przypadku ryzyka wystąpienia sytuacji niebezpiecznej system może zignorować polecenie kierowcy
Aktualność	Zdolność do przekazywania oraz ostrzegania kierowcy z wyprzedzeniem umożliwiającym reakcję na sytuację drogową

Wyżej wymienione cechy mają kluczowy wpływ na kształt architektury i magistrali w pojeździe. Istnieją systemy, które przekazują kierowcy informacje i wymagają natychmiastowych reakcji. Nawet krótkie opóźnienia w przekazywaniu informacji może doprowadzić do wypadku czy awarii. Opóźnienie 500 ms w przekazaniu informacji przy prędkości 100 km/h oznacza przejazd dodatkowych 13,(8) metra. Dlatego ważne jest, aby przekazywać kierowcy podczas jazdy tylko niezbędne informacje. Na rysunku 2.10. przedstawiono wyniki ankiety przeprowadzonej wśród kierowców dotyczącej najbardziej istotnych informacji przekazywanych przez pojazd [65].



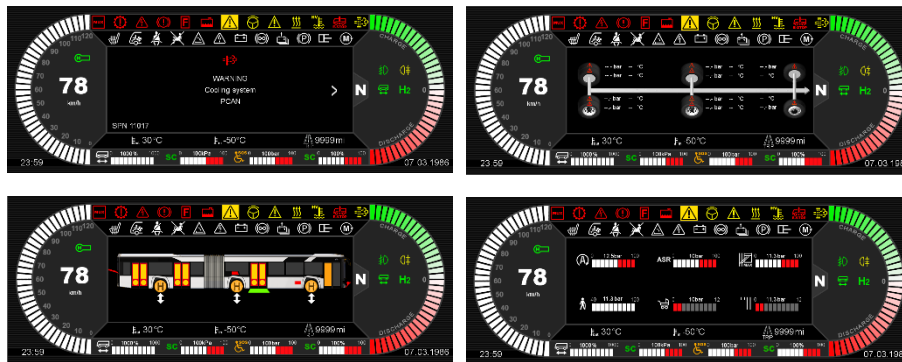
Rys. 2.8. Wyniki ankiety weryfikującej wśród kierowców jakie informacje są przez nich używane podczas jazdy [65]

Przeprowadzone badania literaturowe wskazują na potrzebę stworzenia prostych i łatwych w obsłudze rozwiązań. Unifikacja kontrolki informacyjnych i wskaźników pozwala kierowcom na automatyczną reakcję niezależnie od marki pojazdu. Aby uniknąć przypadkowego włączenia lub wyłączenia funkcjonalności, system HMI powinien wymagać użycia tzw. podwójnej czynności. Kierowca nie powinien mieć możliwości wyłączenia systemu w sytuacjach, gdy kontynuowanie jego działań zwiększa ryzyko wypadku. Informacje dla kierowcy o konieczności przejęcia kontroli nad funkcjonalnością w przypadkach, gdy system nie jest w stanie sobie poradzić, muszą być przekazywane z odpowiednim wyprzedzeniem. Kierowca w sytuacjach awaryjnych musi być skutecznie poinformowany nie tylko za pomocą piktogramów wyświetlanych na ekranie pulpitu, ale również za pomocą ostrzeżeń dźwiękowych czy też haptycznych [67]. W przypadku autobusów zakres czynności wykonywanych przez kierowcę jest dużo większy niż w przypadku samochodów osobowych. W miejscu pracy kierowcy znajdują się interfejsy do poszczególnych zainstalowanych w autobusie systemów wymagających interakcji z kierowcą. Wymagania konieczne do spełnienia dla miejsca pracy kierowcy opisano w ramach Regulaminu 121 EKG ONZ (niezbędnego do uzyskania homologacji pojazdu) oraz w normie ISO 16121. Na rysunku 2.9. wskazano wynik przeprowadzonej analizy widoczności zgodnie z normą ISO 16121-2 dla autobusu Urbino 12 firmy Solaris.



Rys. 2.9. Analiza widoczności kierowcy w autobusie miejskim [16]

Podstawowe komunikaty, informacje i wskaźniki wyświetlane są zawsze na środkowym panelu pulpitu kierowcy zastępującego deskę rozdzielczą znaną z samochodów osobowych. Przykładowe ekrany menu zaprojektowanych przez firmę Solaris przedstawiono na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Przykładowe ekrany menu w autobusie miejskim [16]

Dobór modeli pulpitu kierowcy zależy jest od preferencji operatora transportu publicznego. Na rysunku 2.11. zaprezentowano pulpit kierowcy, bazujący na panelach dotykowych, zaprojektowany w firmie Solaris. Cechą wspólną wszystkich rozwiązań jest konieczność spełnienia wymagań dotyczących ergonomii stanowiska pracy kierowcy w autobusach, zawartych w normie ISO 16121 oraz normy ISO 2575 opisującej wygląd piktogramów wyświetlanych na pulpicie. Dodatkowo na rynkach niemieckojęzycznych punktowane w przetargach jest spełnienie normy VDV 234 opisującej wymagania stawiane stanowisku pracy kierowcy. Rekomendacje opisane w normie VDV 234 w kwestii pulpitu i miejsca pracy kierowcy wydaje Związek Niemieckich Przedsiębiorstw Transportowych (VDV), który jest aktywnym stowarzyszeniem branżowym, prowadzącym dialog z polityką i gospodarką [68].



Rys. 2.11. Pulpit dotykowy firmy Solaris [16]

Podsumowując, nowoczesne autobusy miejskie, wyposażone są w szereg systemów elektronicznych zebranych przez autora i opisanych w tabeli nr 2.9., w których kierowca ma możliwość podglądu danych oraz sterowania. W niektóre z wymienionych systemów autobusy wyposażone będą przez przedsiębiorstwa komunikacyjne po zakupie. Czasami systemy są

systemami używanymi, demontowanymi z autobusów kończących swoją eksploatację. Projektowane architektury muszą zapewnić możliwość ich bezpiecznej integracji z pojazdem.

Tabela 2.9. Zestawienie systemów autobusu obsługiwanych przez kierowcę z miejsca pracy [16]

System	Funkcja
Monitoring	Monitorowanie i rejestracja pasażerów znajdujących się wewnątrz pojazdu
Zapowiedź głosowa	Informowanie głosowe pasażerów o zbliżających się przystankach oraz przekazywanie innych komunikatów głosowych.
Biletomaty i kasowniki	Możliwość zakupu biletów na przejazd, weryfikacja wykupienia opłaty za usługę korzystania z transportu zbiorowego.
Informacja pasażerska	Informowanie pasażerów o trasie pojazdu, szacowanym czasie jazdy oraz możliwych przesiadkach do innych linii komunikacji zbiorowej. Wyświetlanie reklam zależnych np. od pozycji pojazdu na trasie.
Tachograf	Rejestrowanie prędkości, drogi oraz czasu jazdy autobusu.
Komfort klimatyczny	Sterowanie temperaturą w kabinie kierowcy oraz przedziale pasażerskim autobusu.
Radiotelefon	Umożliwienie komunikacji z innymi osobami organizującymi transport zbiorowy na danych terenie.
Wsparcia kierowcy (m.in. ADAS)	Wsparcie kierowcy w obserwacji ruchu miejskiego oraz automatyzacja niektórych czynności wykonywanych przez kierowcę.
Zliczania pasażerów	Systemy zliczania pasażerów oparte zarówno o urządzenia wizyjne jak i pomiar ciśnienia w miechach, który przekładany jest na liczbę pasażerów.

Przykładowe widoki projektu kabiny kierowcy autobusu elektrycznego wyposażonego w pulpit dotykowy wraz z rozmieszczeniem podstawowych źródeł informacji wizualnej przedstawiono na rysunku 2.12.



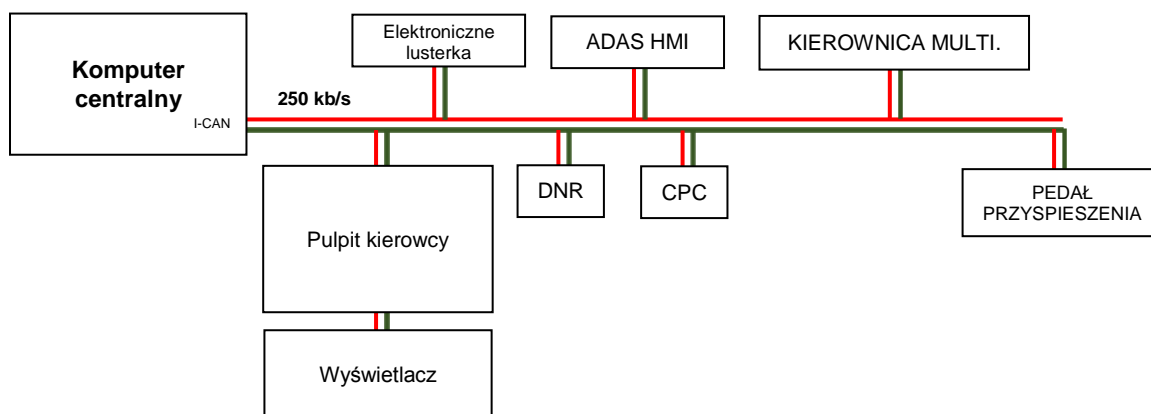
Rys. 2.12. Wizualizacje kabiny kierowcy z wyszczególnionymi lokalizacjami HMI [16]

Autor wykonując analizy i opisując je w niniejszej rozprawie, poświęcił wiele uwagi systemom HMI ze względu na ich kluczową rolę w przekazywaniu informacji kierowcy. Systemy związane z bezpośrednim prowadzeniem pojazdu, czy też systemy wsparcia kierowcy, wymagają szybkiej pętli zwrotnej. Kluczowe jest zatem ich odpowiednie usytuowanie w architekturze sterującej pojazdu, które umożliwi komunikację w zdefiniowanych reżimach czasowych.

Jak ważnym elementem w tych działaniach jest wybór odpowiedniej architektury, która zapewni komunikację w zdefiniowanych reżimach czasowych może świadczyć eksperyment wykonany przez autora rozprawy wraz z inżynierami firmy Solaris w ramach projektu „Zaawansowany system wsparcia precyzyjnych manewrów dla kierowców autobusów miejskich jednosegmentowych i przegubowych”. Projekt został zrealizowany z Politechniką Poznańską w ramach umowy o dofinansowaniu projektu działania 4.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego POIR.04.01.02-00-0081/17-00 [69]. Celem projektu było między innymi zaprojektowanie systemu wspomagania kierowaniem podczas dokowania autobusu elektrycznego pod pantografem. Zespół testujący w którego skład wchodził autor rozprawy, badał dwa warianty interfejsu HMI. Rozwiązanie bezpośrednie, niezintegrowane z pojazdem (komunikacja pomiędzy komputerem sterującym a wyświetlaczem za pomocą Ethernetu) oraz drugie w którym do wyświetlania informacji wykorzystano znajdujący się w pojeździe pulpit. Komputer centralny poprzez interfejs komunikacyjny CAN (dodatkowa linia magistrali przeznaczona do komunikacji zewnętrznej) z zewnętrznego komputera sterującego systemem pozycjonowania pobierał informacje, które następnie były przekazywane do linii ICAN do której podłączony był sterownik wyświetlacza pulpitu dotykowego. Rozwiązanie zintegrowane z pulpitem zostało w trakcie testów gorzej ocenione przez grupę kierowców testowych niż rozwiązanie niezależne. Przeprowadzone analizy wykazały, iż przyczyną niższej oceny były

aspekty związane z trudniejszą akomodacją oka w zakresie drogi oraz opóźnienie wyświetlania informacji. Opóźnienie wynosiło maksymalnie 200 ms i wynikało z metody przekazywania i obróbki danych poprzez sieć CAN. Przeprowadzony eksperyment wskazał na zastosowanie nieodpowiedniego miejsca alokacji urządzeń w architekturze nadzorczo-sterującej zaimplementowanej w pojeździe. Przy manewrowaniu z prędkością 15 km/h, 200ms oznacza przemieszczenie pojazdu o około 83 cm. Wymienione wyżej niedogodności powodowały mniejszą satysfakcję z działania systemu zintegrowanego w stosunku do systemu zewnętrznego. Na niekorzyść systemu zewnętrznego przemawiał fakt, że był on kolejnym elementem wymaganym do obserwacji przez kierowcę i odwracającym uwagę od otoczenia i głównego pulpitu. Analiza wyników ilościowych z przeprowadzonych testów wskazała, że w obu przypadkach uzyskano zbliżoną liczbę manewrów, ale lepsze wyniki pozycjonowania uzyskano dla systemu wykorzystującego zewnętrzny, niezintegrowany interfejs HMI. Szczegóły testów opublikowano w raporcie numer 5 do tego projektu [69].

W standardowych instalacjach autobusowych komponenty związane z interfejsem pojazdu komunikują się magistralą o przepustowości danych wynoszącą 250 kb/s w strefie, której bramą do dalszej części architektury jest komputer centralny autobusu. Zaletą tego rozwiązania jest pełna kontrola dochodzących do kierowcy treści i żądań sterowania pochodzących od kierowcy. Niestety, jak wykazano na przykładzie projektu „Zaawansowany system wsparcia precyzyjnych manewrów dla kierowców autobusów miejskich jednosegmentowych i przegubowych”, w takiej architekturze mogą występować nadmierne opóźnienia w przekazywaniu informacji gdy wejście informacji ADAS pochodzi z innej gałęzi komunikacyjnej. Bardzo ważnymi punktami w trakcie analiz związanych z nową architekturą jest więc dokonanie właściwej alokacji urządzeń w topologii architektury oraz analiza czasów opóźnień dla sygnałów jakie mogą wystąpić w eksploatacji. Opóźnienia w przekazywaniu informacji mogą znacząco wpłynąć na opóźnienia reakcji kierowcy. Na rysunku 2.13 autor przedstawił, zmienioną po testach topologię umożliwiającą zredukowanie opóźnień w analizowanym przypadku.



Rys. 2.13. Topologia linii ICAN w autobusie miejskim [16]

W celu przeprowadzenia badań obciążeń magistrali związanych z komunikacją z HMI, autor rozprawy opracował i zbudował stanowisko testowe przedstawione na rysunku 2.14. Stanowisko było wykorzystywane podczas weryfikacji obciążeń magistrali CAN przy opracowywaniu macierzy korelacji w rozdziale 7.



Rys. 2.14. Stanowisko testowe interfejsu HMI [16]

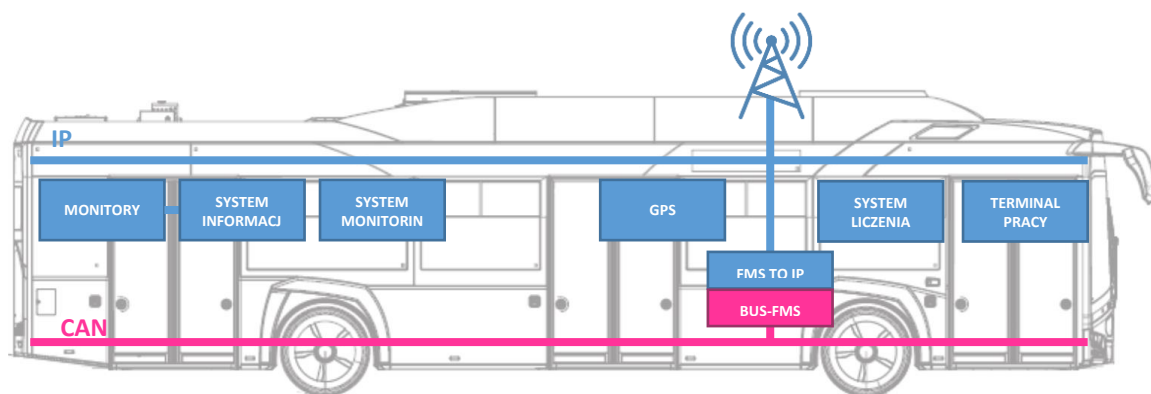
2.5.2 Technologia informacyjna dla transportu publicznego rozszerzająca architekturę komunikacyjną autobusów

W ramach zagadnienia doboru interfejsów architektury nadzorczo-sterującej opisano rozwiązanie mające ułatwić działania producentom podzespołów i rozwiązań instalowanych w autobusach. Działania realizowane w ramach inicjatywy stowarzyszenia non-profit ITxPT (Technologia Informacyjna dla Transportu Publicznego), w którego skład wchodzi zarówno Władze Transportu Publicznego (PTA), Operatorzy Transportu Publicznego (PTO), dostawcy ITS jak i producenci pojazdów (OEM), wspierają i umożliwiają tworzenie rozwiązań w ramach otwartej architektury, dostępności danych i interoperacyjności pomiędzy systemami IT instalowanymi w autobusach. Członkowie tego stowarzyszenia, w którym autor jest oficjalnym przedstawicielem firmy Solaris, wspólnie rozwijają architekturę IT wykorzystywaną

dla transportu publicznego i innych usług mobilności bazując na najlepszych praktykach oraz standardach. Określają protokoły komunikacyjne i interfejsy sprzętowe w celu zapewnienia pełnej interoperacyjności systemów w oparciu o otwarte technologie. ITxPT zaleca stosowanie systemów informatycznych zgodnych ze standardami Service Interface for Real Time Information (SIRI), do wymiany informacji w czasie rzeczywistym o usługach i pojazdach transportu publicznego oraz Network Exchange (NeTEx), do wymiany rozkładów jazdy transportu publicznego i powiązanych danych. Jednym z działań stowarzyszenia jest weryfikowanie na zgodność ze standardem IPxPT zaimplementowanych przez producentów sprzętu, oprogramowania oraz pojazdów rozwiązań i przydzielanie etykiet ITxPT potwierdzających tę zgodność. Przeprowadzane przez IPxPT testy weryfikują tylko zgodność techniczną bez dokonywania oceny wydajności funkcjonalnej. Stowarzyszenie ITxPT współpracuje również z grupami normalizacyjnymi CEN/CENELEC, takimi jak CEN/TC278/WG3 w zakresie doświadczeń z wdrożeń technicznych w terenie. W swoich początkach ITxPT wspierało wdrażanie systemów IT w ramach projektu EBSF (Europejski System Autobusowy Przyszłości) czy też wytycznych opracowanych w projekcie 3iBS (inteligentne, innowacyjne, zintegrowane systemy autobusowe).

IPxPT stworzyło i opublikowało wytyczne dotyczące urządzeń i implementowanej architektury. Urządzenia powinny być interoperacyjne a więc między innymi łatwe do zastąpienia przez inny typ sprzętu, niezawodne i dostępne. Architektura interoperacyjna opiera się na różnych technologiach i implementacjach w zakresie obszarów związanych z integralnością, bezpieczeństwem, niezawodnością, routinguem, schematami adresowania. Powszechnie stosowanym protokołem IP jest IPV6 [70]. Czasami trzeba uprościć implementowane rozwiązanie do stopnia umożliwiającego znalezienie większej liczby producentów, aby zredukować ryzyka związane z dostępnością produkcyjną rozwiązań. Wszystkie urządzenia architektury IT mogą wymagać komunikacji zewnętrznej. Zalecenia IPxPT mówią jednak aby unikać redundancji antenowych i wdrożyć Vehicule Communication Gateway – w Solarisie urządzenie to RCG19 pokazane na rysunkach 7.1 oraz 7.2. Zarządzanie dostępem do zasobów wraz z nadawaniem odpowiednich priorytetów w pojazdach jest tematem kluczowym. Media strumieniowe (np. przesyłające film reklamowy) nie mogą opóźniać przesłania danych związanych ze zmianą trasy pojazdu prezentowaną na tablicach kierunkowych i monitorach, czy też zablokowania komunikacji z biletomatem w którym płatności odbywają się za pomocą karty kredytowej. Powszechną praktyką w miastach jest łączenie kilku (najczęściej dwóch) autobusów w konwój w godzinach szczytu. W takiej sytuacji

autobusy, które są w konwoju widoczne są w systemie jako unikalne pojazdy ale informacje i dane przesyłane w ramach tych pojazdów muszą być połączone razem. Aby sieć IT mogła być w sposób prosty rozbudowywana i modyfikowana, urządzenia lub moduły programowe gdy są podłączane do systemu powinny w sposób automatyczny informować o swoich atrybutach sieciowych oraz obsługiwanych typach usług. W implementowanych rozwiązaniach ze względu na zapobieżenie instalacji niepożądanych modułów dopuszczono stosowanie dodatkowych mechanizmów uwierzytelniania i autoryzacji. Urządzenia oraz aplikacje instalowane w ramach architektury IT powinny być wyposażone w rozwiązania zapewniające monitorowanie ich stanu oraz rozwiązania służące do zapobiegania potencjalnym usterkom i awariom. Podsumowując, rozwiązania tworzone w ramach ITxPT obejmujące między innymi Sieci IP Onboard wbudowane w pojeździe oraz połączenia komunikacyjne pomiędzy biurem a pojazdami wykorzystują IP jako standardowy protokół komunikacji oraz protokół zabezpieczony, dzięki któremu możemy zapobiegać włamaniom do naszej sieci i utracie danych. Magistrale CAN używane w autobusach nie mają nic wspólnego z IP, ale połączenie z nimi z wykorzystaniem FMS jest niezbędne do uzyskania danych. W projektowanej architekturze autor uwzględnił interfejs FMS [71] (Rys. 2.15), który umożliwi integrację z ITxPT i innymi rozwiązaniami w zakresie systemów IT.



Rys. 2.15. Interfejs FMS [73]

W czerwcu 2022 wydano nową wersję Specyfikacji Technicznych. Aktualizacja 2.2.0. wydana przez społeczność IPxPT skutkuje poprawą interoperacyjności minimalizując swobodę interpretacji. W ramach aktualizacji dodane są również nowe funkcje [72].

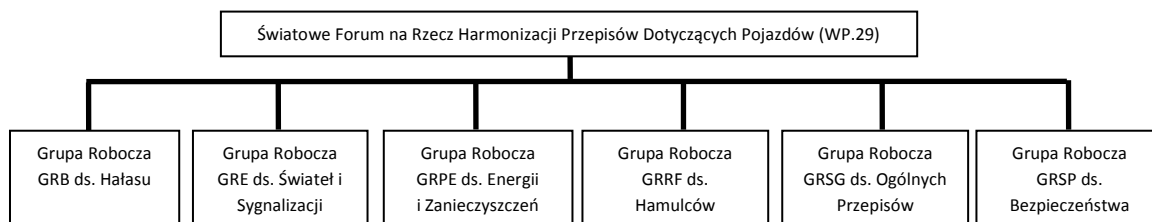
3 Uwarunkowania normatywne i prawne

Na rozwiązania projektowane i implementowane w autobusach elektrycznych, jak również na sam proces projektowania, mają wpływ przede wszystkim przepisy prawa, normy oraz wymagania klientów. Porównanie typów dokumentów analizowanych przez autora rozprawy wraz z zakresem obowiązywania przedstawiono w tabeli numer 3.1.

Tabela 3.1. Rodzaje dokumentów [74]

	Dyrektywy	Rozporządzenia (UE)	Regulaminy	Normy
Opis	Akty prawne Unii Europejskiej, na mocy których państwa członkowskie są zobowiązane do wprowadzenia określonych przepisów prawnych	Akty prawne Unii Europejskiej	Akty Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych	Dokumenty przyjęte w drodze konsensusu przez interesariuszy, wprowadzające dobre praktyki w oparciu o aktualny stan wiedzy
Korelacja z aplikacją autobusową	Pośrednio przez przepisy dotyczące homologacji typu.	Zastosowanie bezpośrednie.	Głównie obszary związane z bezpieczeństwem	Wszystkie obszary
Terytorialny zakres stosowania	Państwa członkowskie Unii Europejskiej	Państwa członkowskie Unii Europejskiej	Państwa członkowskie Unii Europejskiej + niektóre inne kraje (w zależności od umów)	Różnorodność - od firmy, przez region, kraj, po zasięg międzynarodowy
Obowiązywanie	Pośrednio obowiązkowe dla państwa członkowskiego Unii Europejskiej	Możliwość bezpośredniego zastosowania przez rząd i osoby prywatne	Fakultatywne, z wyjątkiem obszarów i stron objętych Porozumieniem z 1958 r	Nieobowiązkowe, z wyjątkiem norm wymaganych przez prawo krajowe lub międzynarodowe

Do najważniejszych dla branży autobusowej, ale nie jedynych przepisów prawa należą te tworzone przez Światowe Forum na rzecz Harmonizacji Przepisów Dotyczących Pojazdów, które jest grupą roboczą EKG ONZ [75]. Organizację i jej organy pomocnicze przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Organy pomocnicze Światowego Forum na rzecz Harmonizacji Przepisów Dotyczących Pojazdów

Na podstawie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858 wymagania zawarte w regulaminach EKG ONZ stanowią warunek prawny uzyskania homologacji europejskiej. Są one bardzo szczegółowo opisane zarówno pod kątem walidacji i weryfikacji jak również kryteriów akceptacji rozwiązań. W tabeli numer 3.2 wskazano pełną listę regulaminów przyjętych przez UE.

Tabela 3.2. Wykaz regulaminów ONZ [76] oraz regulaminów opublikowanych w Dzienniku Urzędowym - stan na 31.12.2020r. (1/2)

Reg.	Tytuł	Reg.	Tytuł	Reg.	Tytuł
0	Całopojazdowa międzynarodowa homologacja typu (IWVTA)	58	Tylne urządzenia zabezpieczające	112	Światła główne pojazdów silnikowych wyposażone w żarówki i/lub moduły LED i emitujące asymetryczne światło mijania i/lub światło drogowe
1	Światła główne samochodowe asymetryczne (R2 lub HS1)	59	Zamienniki tłumików wydechowych	113	Światła główne pojazdów silnikowych wyposażone w żarówki i/lub moduły LED i emitujące symetryczne światło mijania i/lub światło drogowe
3	Urządzenia odbłaskowe pojazdów	60	Sterowanie, obsługa, kontrolki (motocykle i motorowery)	114	Zamienniki poduszek powietrznych
4	Urządzenia do oświetlenia tylnych tablic rejestracyjnych	61	Pojazdy użytkowe w zakresie ich wystających elementów zewnętrznych znajdujących się przed tylną ścianą kabiny	115	Instalacja dodatkowa LPG-CNG
5	Światła główne typu "sealed beam"	62	Zabezpieczona przed kradzieżą (motocykle i motorowery)	116	Zabezpieczenie pojazdów samochodowych przed ich nieuprawnionym użyciem
6	Kierunkowskazy pojazdów o napędzie silnikowym	63	Emisja hałasu (motorowery)	117	Opony – emisja hałasu I przyczepność na nawierzchni mokrej
7	Przednie i tylne światła pozycyjne, stopu oraz obrysowe górne pojazdów o napędzie silnikowym i ich przyczep (M, N and O)	64	Ogumienie zastępcze, ogumienie koła zapasowego	118	Palność materiałów używanych w konstrukcji wnętrza niektórych pojazdów
8	Światła główne pojazdów samochodowych (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 i/lub H11)	66	Wytrzymałość konstrukcji autobusów	119	Urządzenia świetlne doświetlające zakręt
9	Hałas pojazdów trzykołowych	67	Układy LPG w pojazdach	120	Moc silnika spalinowego (ciągniki rolnicze i maszyny nie poruszające się po drogach)
10	Kompatybilność elektromagnetyczna	69	Tylne tablice pojazdów I przyczep o ograniczonej prędkości	121	Rozmieszczenie i oznaczenie ręcznych urządzeń sterujących, kontrolki i wskaźników
11	Zamki i elementy mocowania drzwi	70	Tylne tablice pojazdów długich pojazdów użytkowych	122	Układy ogrzewania
12	Ochrona kierowcy przed układem kierowniczym w przypadku uderzenia	71	Obszar widzenia, ciągniki rolnicze	123	Systemy adaptacyjne oświetlenia głównego (AFS) w pojazdach silnikowych
13	Układ hamulcowy (kategorie M, N and O)	72	Przednie światła (HS1) (motocykle)	124	Zastępcze koła zapasowe
13H	Układ hamulcowy (samochody osobowe)	73	Zabezpieczenia boczne pojazdów ciężarowych	125	Pole widoczności kierowcy w przód
14	Kotwiczenia pasów bezpieczeństwa, systemy kotwiczenia ISOFIX i kotwiczenia górnego paska mocującego ISOFIX	74	Montaż urządzeń oświetleniowych i sygnalizacji świetlnej (L1)	126	Przegrody wewnętrzne zabezpieczające pasażerów przed przemieszczaniem się bagażu
16	Pasy bezpieczeństwa, urządzenia przytrzymujące, urządzenia przytrzymujące dla dzieci oraz urządzenia przytrzymujące dla dzieci ISOFIX	75	Opony (motocykle i motorowery)	127	Bezpieczeństwo pieszych
17	Siedzenia, ich mocowania i zagłówki	77	Światła postojowe pojazdów o napędzie silnikowym	128	Diody LED jako źródło światła
18	Zabezpieczenie pojazdów samochodowych przed ich nieuprawnionym użyciem	78	Hamowanie (L)	129	Ulepszone urządzenia przytrzymujące dla dzieci (ECRS)
19	Przednie światła przeciwmgłowe pojazdów o napędzie silnikowym	79	Układ kierowniczy	130	System ostrzegania przed opuszczeniem pasa ruchu (LDWS)
20	Światła główne z asymetrycznymi światłami mijania lub drogowymi i żarówkami halogenowymi (żarówkami H4)	80	Wytrzymałość siedzeń z pasami (pojazdy użytkowe)		

Tabela 3.2. Wykaz regulaminów ONZ [76] oraz regulaminów opublikowanych w Dzienniku Urzędowym - stan na 31.12.2020r. (2/2)

Reg.	Tytuł	Reg.	Tytuł	Reg.	Tytuł
21	Wyposażenie wnętrza	81	Lusterka wsteczne (motocykle i motorowery)	131	Zawansowane systemy hamowania awaryjnego (AEBS)
23	Światła cofania pojazdów o napędzie silnikowym i ich przyczep	82	Przednie światła (HS2 motorowery)	132	Dodatkowe układy ograniczające emisję związków szkodliwych dla pojazdów użytkowych, ciągników rolniczych i maszyn nie poruszających się po drogach
24	Silniki Diesla. Emisja widocznych zanieczyszczeń	83	Emisja zanieczyszczeń w zależności od paliwa zasilającego silnik	133	Zdolność recyklingu pojazdów silnikowych
		85	Moc silników spalinowych i elektrycznych (M i N)	134	Pojazdy wodorowe (HFCV)
25	Zagłówki wbudowane lub niewbudowane w siedzenia pojazdów	86	Montaż urządzeń oświetleniowych i sygnalizacji świetlnej (ciągniki rolnicze)	135	Uderzenie boczne w słup (PSI)
26	Zewnętrzne elementy wystające	87	Światła jazdy dziennej	136	Pojazdy elektryczne kategorii L (EV-L)
27	Trójkąty ostrzegawcze	89	Ogranicznik prędkości	137	Zderzenie czołowe ze sprawdzeniem systemów przytrzymujących
28	Dźwiękowe urządzenia ostrzegawcze i sygnały dźwiękowe	90	Zamienne zespoły okładzin hamulcowych i zamienne okładziny hamulców bębnowych	138	Ciche pojazdy transportu drogowego (QRTV)(AVAS)
29	Ochrony osób przebywających w kabinie pojazdu użytkowego	91	Boczne światła obrysowe	139	Systemy wspomagające hamowanie (BAS)
30	Opony samochodów osobowych i ich przyczep	92	Nieoryginalne układy tłumienia wydechu (NORESS) dla motocykli	140	Elektroniczne układy kontroli stateczności (ESC)
31	Samochodowe halogenowe reflektory typu „sealed beam” z asymetrycznymi światłami mijania lub światłami drogowymi lub z obydwojoma tymi światłami	93	Urządzenia zabezpieczające przed wjechaniem pod przód pojazdu	141	Systemy monitorowania ciśnienia w ogumieniu (TPMS)
34	Zabezpieczenia przeciwpożarowe (zbiorniki paliwa ciekłego)	94	Ochrona osób przebywających w pojeździe w przypadku zderzenia czołowego	142	Instalacja opon
37	Żarówki stosowane w homologowanych reflektorach pojazdów samochodowych i ich przyczep	95	Ochrona użytkowników pojazdów w przypadku zderzenia bocznego	143	Dodatkowe układy dwupaliwowe dla pojazdów użytkowych (HDDF-ERS)
38	Tyłne światła przeciwmgłowe pojazdów samochodowych i ich przyczep	96	Emisję związków szkodliwych z silników (ciągników rolniczych)	144	eCall (AECS)
39	Prędkościomierz oraz jego montaż	97	Systemy alarmowe pojazdów	145	Systemy kotwiczenia ISOFIX
41	Hałas motocykli	98	Reflektory samochodowe wyposażone w gazowo-wyładowcze źródła światła	146	Pojazdy wodorowe I z ogniwami paliwowymi kategorii L
43	Materiały oszklenia bezpiecznego	99	Gazowo-wyładowcze źródła światła	147	Elementy mechanicznego sprzęgu dla ciągników rolniczych
44	Urządzenia przytrzymujące dla dzieci przebywających w pojazdach o napędzie silnikowym („urządzenia przytrzymujące dla dzieci”)	100	Bezpieczeństwo elektryczne	148	Urządzenia emitujące światło (LSD)
45	Urządzenia czyszczące przednie oświetlenie	101	Zużycie paliwa, emisja CO2 i zasięg pojazdów (M1 i N1)	149	Urządzenia oświetlające drogę (RID)
46	Urządzenia widzenia pośredniego	102	Krótki sprzęg	150	Urządzenia odbłaskowe (RRD)
48	Montaż urządzeń oświetleniowych i sygnalizacji świetlnej w pojazdach silnikowych (M, N i O)	103	Zamienniki katalizatorów	151	System informujący o martwym polu i ostrzeganiu przed możliwością zderzenia z pieszymi lub rowerzystami
49	Emisja związków szkodliwych (Diesel, NG i LPG)	104	Urządzenia odbłaskowe (długie pojazdy użytkowe)	152	Zawansowane systemy hamowania awaryjnego Systems (AEBS) dla kategorii M1 i N1
50	Przednie i tylne światła pozycyjne, światła hamowania, światła kierunku jazdy oraz oświetlenia tylnej tablicy rejestracyjnej (L)	105	Przewóz ładunków niebezpiecznych – konstrukcja pojazdów	153	Integralność układu paliwowego i bezpieczeństwo elektrycznego układu napędowego w przypadku kolizji w tył pojazdu
51	Poziomy hałasu (M i N)	106	Ogumienie (ciągniki rolnicze)	154	Kryteria emisji ZS, CO2 i/lub zużycie paliwa I zasięg pojazdu elektrycznego (WLTP)
53	Urządzenia świetlne i oświetlenie (L3)	107	Budowa autobusów	155	Cyberbezpieczeństwo
54	Opony (pojazdu użytkowe i ich przyczepy)	108	Bieżnikowane opony (pojazdy silnikowe i ich przyczepy)	156	Aktualizacja oprogramowania pojazdu
55	Mechaniczne części sprzęgające zespołów pojazdów	109	Bieżnikowane opony (pojazdy użytkowe i ich przyczepy)	157	Układ utrzymywania pojazdu w pasie ruchu
56	Reflektory (motorowery)	110	Układ CNG i LNG	158	Wykrywanie obiektów przy cofaniu
57	Reflektory (motocykle)	111	Stateczność poprzeczna pojazdów z cysternami (N i O)	159	System ostrzegania przed możliwością zderzenia z pieszymi lub rowerzystami przy ruszaniu pojazdu (MOIS)

Autor dokonał analizy zestawionych w tabeli 3.2 regulaminów, wynikiem której są powstałe zalecenia dotyczące konstrukcji architektury, użytych do jej budowy urządzeń oraz wytyczne dotyczące ich oprogramowania.

R100

Regulamin 100 dotyczy wymagań związanych z elektrycznym układem napędowym. Podczas procesu tworzenia architektury i doboru komponentów architektury nadzorczo-sterującej należy wziąć pod uwagę miejsce ich montażu oraz czynniki na jakie dane komponenty będą narażone w danej lokalizacji oraz jakie testy homologacyjne związane z regulaminem muszą zostać zrealizowane i zaakceptowane przez jednostkę homologacyjną. Zapisy w powyższym regulaminie nie odnoszą się wprost do architektury, ale mają na nią pośredni wpływ. Pierwsze połączenie związane jest z HMI. Zgodnie z regulaminem kierowca pojazdu musi otrzymać np. sygnały informujące o trybie aktywnej jazdy oraz ostrzegawcze optyczne lub dźwiękowe w momencie gdy opuszcza pojazd, który znajduje się w powyższym trybie. W przypadku baterii trakcyjnych (załącznik 8 UN/ECE R100) istnieją podwyższone wymagania związane między innymi z izolacją elektryczną. ECU umieszczane bezpośrednio w bateriach trakcyjnych musi wytrzymać testy wibracji, integralności mechanicznej oraz temperatury.

R118

Dobra praktyka jak i wymagania niektórych klientów wskazują na konieczność implementacji warstwy fizycznej architektury z uwzględnieniem regulaminu 118 EKG ONZ. Są to Jednolite przepisy techniczne dotyczące palności materiałów używanych w konstrukcji niektórych kategorii pojazdów samochodowych oraz ich odporności na działanie paliw lub smarów [77]. Regulamin musi być wzięty pod uwagę podczas doboru rozwiązań w warstwie fizycznej architektury.

R10

W procesie projektowania architektury nadzorczo-sterującej UN/ECE R10 [78] wymaga szczegółowej analizy. Jest to regulamin mówiący o zachowaniu kompatybilności elektromagnetycznej w przypadku pojazdów kategorii M [79]. Zgodnie z informacjami w nim zawartymi, instalowane w autobusach urządzenia muszą być odporne na zakłócenia pola elektromagnetycznego jak również nie mogą ich emitować [80], co powinno być potwierdzone

certyfikatem. Istnieje możliwość instalacji w autobusie urządzeń nie posiadających odpowiednich testów oraz certyfikatów ale w takiej sytuacji należy przeprowadzić badania na zgodność z regulaminem R10 całego autobusu. W przypadku posiadanych certyfikatów na każde z dodawanych urządzeń można dokonywać rozszerzeń homologacji cało-pojazdowej na podstawie dokumentów bez przeprowadzania testów na autobusie. Pierwsze rozwiązanie jest więc bezpieczniejsze, gdyż na początku weryfikujemy możliwości użycia danego komponentu. Doświadczenie autora rozprawy wskazuje, że zapewnienia producentów komponentów (nie poparte certyfikatami) mogą okazać się nieprawdziwe a wymiana ich na nowe rozwiązanie na autobusie poddawanych już testom homologacyjnym znacznie wydłuży cały proces i zwiększy koszty z nim związane.

R121

Dobierając komponenty i urządzenia sterujące związane z HMI należy wziąć pod uwagę, nie tylko ich aspekt komunikacyjny, ale również ich fizyczne rozmieszczenie w kabinie kierowcy oraz sposób i normy zgodnie z którymi powinny być oznaczone. Regulamin 121 EKG ONZ ma bezpośredni wpływ na kwestie rozmieszczenia i oznaczenia ręcznych urządzeń sterujących, kontrolki i wskaźników. Spełnienie regulaminu jest niezbędne do otrzymania homologacji pojazdu.

Pakiet GSR2: R159, R151, R158, R141, R155, EU 2021/1958, EU 2021/1341, ECE UN 48, R156, EN 50436:2016

Autor rozprawy wskazuje na konieczność nieustannego monitorowania rozporządzeń UE dotyczących Europejskiej homologacji typu, gdzie pojawiają się kolejne regulaminy wraz z terminami wdrożenia dla nowych rejestracji. Wymagania pojawiające się w tych regulaminach mają znaczący wpływ na kształt architektury nadzorczo – sterującej. Opisanie w nich rozwiązania wymagają instalacji dodatkowych systemów i sterowników oraz modyfikacji i tworzenia nowych fragmentów oprogramowania. Badania literaturowe prowadzone przez autora rozprawy wskazały, że do tej grupy należy między innymi zakres wymagań opisany w Rozporządzeniu w Sprawie Bezpieczeństwa Ogólnego 2 (General Safety Regulation 2 - GSR2) będącego Rozporządzeniem WE 2019/2144 znoszącym rozporządzenie WE 2018/858 w zakresie procedury, warunków i obowiązków uzyskiwania europejskiej homologacji typu. Główny nacisk położono w nim na zwiększenie bezpieczeństwa użytkowników ruchu drogowego. Zawiera on w sobie między innymi zestaw regulaminów

związany z zaawansowanymi systemami wspomagania kierowcy (Advanced Driver Assistance Systems – ADAS). GSR2 obejmuje: ECE UN R159 Ostrzeżenie przed możliwością zderzenia z pieszymi lub rowerzystami [81]. System ma informować o pieszych i rowerzystach w pobliżu przodu pojazdu, którzy mogą zostać zranieni w przypadku ruszenia autobusu lub poruszania z małą prędkością. System ma informować o ewentualnym zdarzeniu mając na względzie czas reakcji wynoszący 1.4 s. Ma działać do prędkości pojazdu 10 km/h i przy natężeniu światła dziennego powyżej 15 luksów. ECE UN R151 System informujący o martwym polu [82], ECE UN R158 Wykrywanie obiektów przy cofaniu [83], Pole bezpośredniej widoczności - w trakcie prac - brak podanego regulaminu, ECE UN R141 Monitorowanie ciśnienia w oponach w pojazdach ciężkich [84], ECE UN R155 [85] Ochrona pojazdu przed cyberatakami. Jako cyberbezpieczeństwo rozumie się stan, w którym pojazd i jego funkcje są zabezpieczone od zagrożeń cybernetycznych dla elektrycznych i elektronicznych komponentów, R EU 2021/1958 Inteligentny asystent kontroli prędkości [86]. Ma on za zadanie informować o ograniczeniu prędkości na danym odcinku drogi. Sygnalizować przekroczenie prędkości. Jednym z pomysłów jest także wprowadzenie automatycznego ogranicznika prędkości. Pojazd nie będzie mógł jechać z większą prędkością niż lokalne ograniczenie. Komisja ma przygotować analizę korzyści wprowadzenia takiego rozwiązania., R EU 2021/1341 Ostrzeżenie o senności i spadku poziomu uwagi kierowcy [87]. Projektowane systemy łączone są z zaawansowanymi systemami ostrzegania o rozproszeniu uwagi kierowcy, EN 50436:2016. Ułatwienia w zakresie montażu alkomatów blokujących zapłon [88]. I Autobusy mają być już w trakcie produkcji przygotowane pod późniejszy montaż alkomatu. W niektórych krajach takie urządzenia w komunikacji miejskiej są już montowane na standardzie. Wchodzący w skład GSR2, ECE UN R48 określa awaryjny sygnał stopu [89], ECE UN R156 modyfikację oprogramowania oraz zarządzanie systemami modyfikacji oprogramowania [90]. Podsumowując, w nowo tworzonej architekturze nadzorczo – sterującej należy wziąć pod uwagę i zaprojektować miejsca oraz sposób komunikacji dla systemów i rozwiązań z pakietu GSR2. W szczególności należy zwrócić uwagę na wymagane czasy reakcji oraz dostosowanie interfejsów HMI do potrzeb informowania o zaistniałych i przewidywanych zdarzeniach. Przekazywane za pomocą interfejsu HMI informacje mają być optyczne, akustyczne, haptyczne lub mają być kombinacją powyższych sygnałów.

R155, R156

Począwszy od 2024 roku w związku z wprowadzeniem nowego rozporządzenia bezpieczeństwo cybernetyczne staje się wymogiem prawnym. Firmy zobligowane są do wdrożenia systemu zarządzania bezpieczeństwem cybernetycznym, który będzie potwierdzony certyfikatem zgodności oraz uzyskać homologację na produkowane pojazdy z tego zakresu. Mowa tutaj o Regulaminie 155 EKG ONZ [85] dotyczącym cyberbezpieczeństwa oraz Regulaminie 156 dotyczącym aktualizacji oprogramowania [90]. Regulaminy występują w ramach pakietu GSR2. Wpisano je jednak osobno ze względu na bardzo duży nakład pracy potrzebny w całej organizacji do ich wdrożenia. Wymagają one przeprowadzenia dodatkowych analiz w tym analizy zagrożeń i ocena ryzyka (Threat Analysis & Risk Assessment – TARA), w celu odnalezienia w architekturze obszarów wysokiego ryzyka i podjęcia środków zmniejszających możliwości ataku przez hackerów. Dotyczy to nie tylko zdalnego dostępu do magistrali ale również innych możliwych źródeł ataku w tym połączeń przewodowych. W szczególności analizy i weryfikacje muszą być przeprowadzane podczas rozbudowy magistrali o nowe urządzenia nadzorczo-sterujące czy też modyfikacje oprogramowania.

Kolejnym, ale nie mniej ważnym niż regulaminy aspektem, który jest uwzględniany podczas projektowania autobusów elektrycznych są normy. Wytyczne oraz informacje, które są w nich zawierane umożliwiają bezpiecznie projektowanie autobusów elektrycznych oraz systemów. Korzystanie z norm, zarówno w Polsce (od momentu zniesienia norm obowiązkowych przez ustawę o normalizacji z 1 stycznia 2003 r. [91]), jak i w innych krajach Unii Europejskiej, jest dobrowolne, ale w przetargach autobusowych pojawiają się wymagania dotyczące konieczności ich spełnienia. Niektóre z norm są zharmonizowane, co oznacza, że są zgodne z prawodawstwem Unii Europejskiej wyrażonym w postaci dyrektyw i rozporządzeń. Organy takie jak Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) opracowują normy, które są wynikiem konsensusu między ekspertami z odpowiednich krajowych organów normalizacyjnych. Powstałe w ten sposób normy mogą być następnie przyjęte na poziomie krajowym lub międzynarodowym. W tabeli 3.3 autor rozprawy zestawiał normy brane pod uwagę przy projektowaniu instalacji elektrycznej w autobusach.

Tabela 3.3. Wykaz norm branych pod uwagę przy projektowaniu instalacji elektrycznej w autobusach elektrycznych [92], [93], [94], [95] (1/4)

Kategoria	Numer normy	Nazwa dokumentu
Osprzęt 24V	PN-S-76021:1998	Instalacja elektryczna pojazdów samochodowych - Wymagania i metody badań.
	PN-S-76021:1998/A z1:2001	Instalacja elektryczna pojazdów samochodowych. Wymagania i metody badań (Zmiana Az1)
	PN-ISO 7637-0:1997	Pojazdy drogowe - Zaburzenia elektryczne przenoszone przez przewodzenie oraz przez sprzężenia - Definicje i postanowienia ogólne
	PN-ISO 7637-2:1997	Pojazdy drogowe - Zaburzenia elektryczne przenoszone przez przewodzenie oraz przez sprzężenia - Samochody ciężarowe i autobusy z instalacją elektryczną o nominalnym napięciu zasilania 24 V - Przewodzenie elektrycznych przebiegów przejściowych wyłącznie wzdłuż przewodów zasilających
	PN-ISO 7638-1:2001	Pojazdy drogowe. Złącza elektryczne układów hamulcowych. Część 1: Złącza stosowane w instalacjach o napięciu znamionowym 24 V.
Osprzęt 24V + HV	PN-EN 50343:2003	Zastosowania kolejowe - Tabor - Zasady dotyczące instalacji sieci kablowych
Osprzęt HV	PN-HD 60364-4-41:2009	Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa - Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
	PN-E-08501:1988	Urządzenia elektryczne - Tablice i znaki bezpieczeństwa
	ISO 6722-1:2011	Road vehicles - 60 V and 600 V single-core cables - Part 1: Dimensions, test methods and requirements for copper conductor cables
	ISO 6722-1:2011/Cor 1:2012	Road vehicles - 60 V and 600 V single-core cables - Part 1: Dimensions, test methods and requirements for copper conductor cables TECHNICAL CORRIGENDUM 1
Symbole	ISO/TR 12343:1997	Road vehicles - Symbols for electrotechnical diagrams

Tabela 3.3. Wykaz norm branych pod uwagę przy projektowaniu instalacji elektrycznej w autobusach elektrycznych [92], [93], [94], [95] (2/4)

Kategoria	Numer normy	Nazwa dokumentu
Bezpieczeństwo	ISO 6469-1:2009	Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 1: On-board rechargeable energy storage system (RESS)
	ISO 6469-2:2009	Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 2: Vehicle operational safety means and protection against failures
	ISO 6469-3:2009	Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 3: Protection of persons against electric shock
	ISO 26262-1:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 1: Vocabulary
	ISO 26262-2:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 2: Management of functional safety
	ISO 26262-3:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 3: Concept phase
	ISO 26262-4:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 4: Product development at the system level
	ISO 26262-5:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 5: Product development at the hardware level
	ISO 26262-6:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 6: Product development at the software level
	ISO 26262-7:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 7: Production, operation, service and decommissioning
	ISO 26262-8:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 8: Supporting processes
	ISO 26262-9:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 9: Automotive safety integrity level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses
	ISO 26262-8:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 8: Supporting processes
	ISO 26262-9:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 9: Automotive safety integrity level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses
	ISO 26262-10:2018	Road vehicles - Functional safety - Part 10: Guidelines on ISO 26262
	ISO SAE 21434:2018	Road vehicles - Cybersecurity engineering
	PN-EN 61310-1:2009 - wersja polska	Bezpieczeństwo maszyn - Wskazywanie, oznaczanie i sterowanie - Część 1: Wymagania dotyczące sygnałów wizualnych, akustycznych i dotykowych
Ergonomia	ISO 16121:2011	Road vehicles - Ergonomic requirements for the driver's workplace in line-service buses

Tabela 3.3. Wykaz norm branych pod uwagę przy projektowaniu instalacji elektrycznej w autobusach elektrycznych [92], [93], [94], [95] (3/4)

Kategoria	Numer normy	Nazwa dokumentu
Ładowarki	PN-EN IEC 61851-1:2019-10	System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych - Część 1: Wymagania ogólne Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements (IEC 61851-1:2017)
	PN-EN 61851-21-1:2018-02/AC	System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych Część 21-1: Wymagania EMC dotyczące przyłącza przewodowego zasilania prądem przemiennym/prądem stałym pokładowych ładowarek pojazdów elektrycznych
	IEC 61851-22:2001	Electric vehicle conductive charging system - Part 22: AC electric vehicle charging station. Stacja ładowania prądu zmiennego
	PN-EN-61851-23_2014-11_AC_2016-08E	System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych Część 23: Stacja ładowania pojazdów elektrycznych prądu stałego
	PN-EN 61851-24:2014-11	System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych - Część 24: Cyfrowe przesyłanie danych pomiędzy stacją prądu stałego ładowania elektrycznych pojazdów drogowych i pojazdem elektrycznym w celu kontroli ładowania prądem stałym
	PN-EN ISO 15118-1:2019-07	Pojazdy drogowe - Interfejs komunikacji pomiędzy pojazdem a siecią - Część 1: Informacje ogólne oraz definicje przypadków użycia
	ISO15118-2-2014	Road vehicles - Vehicle-to-Grid Communication Interface - Part 2: Network and application protocol requirements. Zdefiniowane wymagania na poziomie usług i sygnałów.
	ISO 15118-3:2015	Road vehicles - Vehicle to grid communication interface - Part 3: Physical and data link layer requirements
	PN-EN 62196-1:2015-05	Wtyczki, gniazda wtyczkowe, złącza pojazdowe i wtyki pojazdowe - Przewodowe ładowanie pojazdów elektrycznych - Część 1: Wymagania ogólne
	PN-EN 62196-3:2015-02E	Wtyczki, gniazda wtyczkowe, złącza pojazdowe i wtyki pojazdowe - Przewodowe ładowanie pojazdów elektrycznych - Część 3: Wymagania dotyczące zgodności wymiarowej i zamienności złącz pojazdowych d.c. i a.c./d.c. z zestykami tulejkowo-kołkowymi
	DIN 70121-2014	Electromobility - Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging in the Combined Charging System;

Tabela 3.3. Wykaz norm branych pod uwagę przy projektowaniu instalacji elektrycznej w autobusach elektrycznych [92], [93], [94], [95] (4/4)

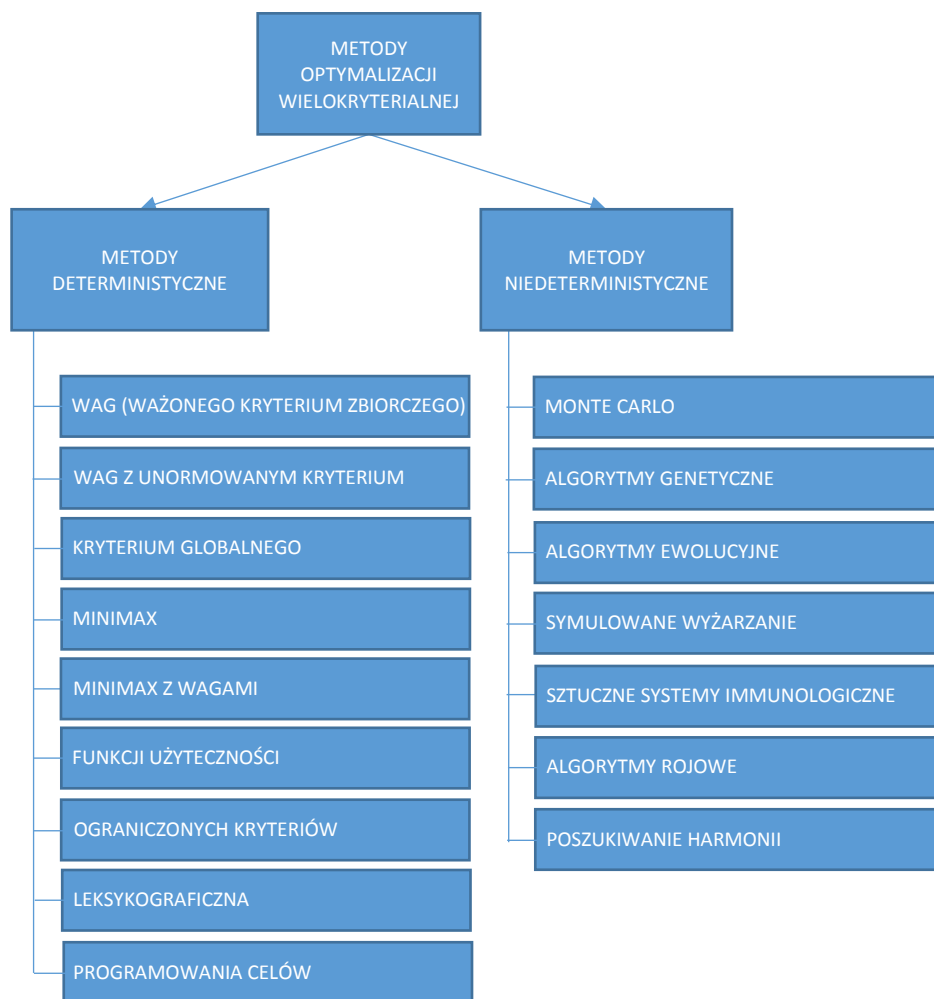
Komunikacja	ISO11898	Road vehicles — Controller area network
	SAE J1939-02	Agricultural and Forestry Off-Road Machinery Control and Communication Network
	SAE J1939-03	On Board Diagnostics Implementation Guide
	SAE J1939-11	Physical Layer – 250 kb/s, Twisted Shielded Pair
	SAE J1939-13	Off-Board Diagnostic Connector
	SAE J1939-15	Reduced Physical Layer, 250 kb/sec, Un-Shielded Twisted Pair (UTP)
	SAE J1939-21	Data Link Layer
	SAE J1939-31	Network Layer
	SAE J1939-71	Vehicle Application Layer
	SAE J1939-73	Application Layer - Diagnostics
	SAE J1939-74	Application - Configurable Messaging
	SAE J1939-81	Network Management
	SAE J1939-82	Compliance - Truck and Bus
	SAE J1939-84	OBD Communications Compliance Test Cases for Heavy Duty Components and Vehicles
	ISO 15765-4:2021	Road vehicles - Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN) - Part 4: Requirements for emissions-related systems
	ISO 15765-5:2021	Road vehicles - Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN) - Part 5: Specification for an in-vehicle network connected to the diagnostic link connector
	ISO 15031-3:2004	Road vehicles - Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics - Part 3: Diagnostic connector and related electrical circuits, specification and use
J1939_2018_08	Surface vehicle recommended practice	
J1939DA_OC T2020	J1939DA_OCT2020 - Digital Annex of serial control and communication heavy duty vehicle network data - october 2020	

Korzystanie z norm i wybieranie urządzeń, ma zapewnić kompatybilność instalowanych rozwiązań. Doświadczenia praktyczne zdobyte przez autora rozprawy podczas implementacji rozwiązań w autobusach Urbino electric, wskazują, że spełnienie przed dostawcą komponentu danej normy nie jest 100% gwarantem kompatybilności. W szczególności, gdy jest to pierwsze wydanie danej normy i pewne fragmenty w niej zawarte nie są jeszcze wystarczająco doprecyzowane. W takiej sytuacji dochodzi do różnej interpretacji danego zapisu przez firmy produkujące komponenty, co może wpłynąć na brak pełnej kompatybilności. Wady takie podczas przeprowadzanych testów ujawniały się na przykład w pierwszych wersjach norm związanych z komunikacją z ładowarką pojazdów elektrycznych. Rozwiązania sprzętowe nowo opracowywanej architektury oparto systemy multi-master bazujące na serii norm SAE J1939 oraz ISO 11898 opisujących szczegółowo warstwę transferową (protokół) i fizyczną magistrali komunikacyjnej. Powyższe normy są już bardzo

dojrzałe i pozbawione opisywanych wad. Przegląd literatury technicznej oraz przepisów prawa i norm przeprowadzony przez autora rozprawy wskazał, iż kluczowymi normami, wymagającymi uwzględnienia w fazie analizy i projektowania nowych rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej są normy związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym oraz cyberbezpieczeństwem. Norma ISO 26262 definiująca kwestie związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym w pojazdach drogowych od edycji 2 z 2018 roku uwzględniła wymagania odnoszące się do autobusów i trolejbusów. Bezpieczeństwo funkcjonalne zapewnia brak nieuzasadnionego ryzyka, które jest spowodowane błędami w działaniu systemów elektryczno-elektronicznych. Ryzyko wykryte na etapie analizy, zgodnie z normą łagodzone jest przez odpowiednie środki techniczne takie jak funkcje bezpieczeństwa, czy też przez dobór i zastosowanie odpowiednich komponentów. Systemy E/E są rozwijane według metodologii "V", gdzie każdy etap rozwoju jest odpowiednio weryfikowany. Kwestii związanej z analizami bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz bezpieczeństwa cybernetycznego wraz z ograniczeniami jakie one nakładają na projektowaną architekturę, poświęcono osobne rozdziały niniejszej rozprawy. Szczegóły dotyczące zakresu stosowania regulaminów oraz przykładowych norm do których regulaminy się odwołują, które muszą być spełnione w celu otrzymania homologacji pojazdu autor rozprawy zawarł w publikacjach [96], [97], które ukazały się na łamach Przeglądu Elektrotechnicznego.

4 Przegląd metod optymalizacji

W analizie funkcjonalności, ograniczeń i rozwiązań technicznych związanych z tworzeniem architektury nadzorczo-sterującej, autor rozprawy zauważył potrzebę stworzenia zbioru optymalnych rozwiązań, spośród których wybierane będzie rozwiązanie do implementacji w autobusie. Z uwagi na liczbę możliwych konfiguracji dopuszczalnych architektury oraz konieczność walidacji nowo opracowanych rozwiązań, autor wskazuje na potrzebę przeprowadzenia analizy rankingowej ilościowo-jakościowej, która pozwoli na klasyfikację rozwiązań pod kątem ich przydatności i spełnienia kryteriów implementacyjnych. Ranking ilościowy oznacza uwzględnienie kryteriów technicznych oraz biznesowych, natomiast jakościowy odnosi się do technologii oraz subiektywnego podejścia interesariuszy. W celu dokonania klasyfikacji analizowanych rozwiązań architektury nadzorczo-sterującej, autor zaproponował wykorzystanie metod optymalizacji wielokryterialnej. Umożliwią one w pierwszym etapie uzyskanie zbioru rozwiązań niezdominowanych przez żadne inne, a więc rozwiązań będących optymalnymi dla problemu optymalizacji wielokryterialnej. Z uzyskanych rozwiązań w drugim etapie minimalizując zbiór funkcji celu, z uwzględnieniem ograniczeń, zostanie wytypowane rozwiązanie do implementacji. W przypadku rozwiązywania problemów optymalizacji wielokryterialnej mogą być zastosowane zarówno metody niedeterministyczne jak i metody, w których do oceny wariantów zastosowano kryteria o charakterze deterministycznym. Podział metod wraz z wybranymi przykładami przedstawiono na rysunku 4.1. W tabeli numer 4.1. zestawiono deterministyczne metody optymalizacji wraz z kryterium oceny oraz opisem metody. Sprawne stosowanie metod deterministycznych, w szczególności tych, w których wykorzystywane są wagi, wiąże się z koniecznością posiadania wiedzy eksperckiej, która ma znaczny wpływ na otrzymane rozwiązanie. Tradycyjne metody optymalizacji wielokryterialnej sprawdzają się w znajdowaniu potencjalnych rozwiązań przy niewielkiej liczbie rozwiązań w sensie Pareto. Analiza większego zbioru z użyciem tradycyjnych metod powoduje w znacznym stopniu wzrost kosztu i czasu obliczeń. Jest to spowodowane koniecznością wielokrotnego wykonywania algorytmów. Wśród tradycyjnych metod optymalizacji wielokryterialnej są też takie, które są wrażliwe na kształt frontu Pareto-optymalnego. Do takich metod zaliczono na przykład metodę ważonego kryterium zbiorczego. W przypadku metod, które redukują problemy wielokryterialne do problemów z jednym kryterium występuje sytuacja, w której należy użyć dostosowania, nadmiernego uproszczenia rzeczywistego problemu, aby dopasować go do możliwości danej metody.



Rys. 4.1. Podział metod używanych do rozwiązywania problemów optymalizacji wielokryterialnej [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104]

Wyniki uzyskiwane za pomocą metod niedeterministycznych, zawierających losowe zmiany zachodzące w procesie obliczeniowym, na które nie ma bezpośredniego wpływu, charakteryzują się niższym kosztem i czasem obliczeń w stosunku do analizy takiego samego zbioru za pomocą metod tradycyjnych. Pozwalają na znalezienie minimum globalnego przy skomplikowanych funkcjach celu mających liczne minima lokalne. Podczas analizy niedeterministycznych metod optymalizacji skupiono się na algorytmach genetycznych oraz algorytmach ewolucyjnych. Mają one podobne mechanizmy działania i opierają się na ideach zaczerpniętych z biologii. W celu analizy rozwiązań bazujących na algorytmach genetycznych wprowadzono definicje najważniejszych pojęć (Tabela 4.2.). W trakcie wykonywania procedury (Rys. 4.2.) algorytm genetyczny tworząc nową populację wskazuje, że nowe osobniki wchodzące w jej skład są potomkami pary rodzicielskiej z populacji z poprzedniej iteracji. Potomkowie dziedziczą cechy rodziców z poprzedniej populacji i nabywają nowych

wskutek działania dodatkowego czynnika losowego. Liczebność populacji jest określana na początku obliczeń i pozostaje stała podczas całej procedury obliczeniowej.

Tabela 4.1. Deterministyczne metody optymalizacji wielokryterialnej [99], [98], [104] (1/3)

Nazwa metody	Kryterium optymalizacji	Opis metody	Uwagi
Wag	$k(a_i) = \sum_{j=1}^m w_j k_j(a_i) \quad (1)$ $w_j \geq 0; \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (2)$	Problem optymalizacji wielokryterialnej jest sprowadzony do optymalizacji jednokryterialnej dzięki utworzeniu kryterium zastępczego.	Wagi ustalane w sposób arbitralny z uwzględnieniem czynników subiektywnych.
Wag z unormowanym kryterium	$\tilde{k}_j(a_i) = \frac{k_j(a_i)}{k_j^o(a_i)} \quad (3)$	Problem optymalizacji wielokryterialnej jest sprowadzony do optymalizacji jednokryterialnej dzięki utworzeniu kryterium zastępczego.	Zastosowanie metody unika wpływu jednostek w których wyrażone są oceny poszczególnych kryteriów.
Kryterium globalnego	$k(a_i) = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\frac{[k_j^*(a_i) - k_j^o(a_i)]^p}{k_j^o(a_i)} \right] \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (4)$	Znajdujemy rozwiązanie idealne $\mathbf{k}(a_i)$, spełniające warunek minimum dla każdego kryterium $k_j(a_i)$ rozpatrywanego niezależnie. Formowane jest kryterium globalne. Celem jest uzyskanie minimalnej odległości pomiędzy punktami optymalnym a idealnym.	Jeżeli kryteria $k_j(a_i)$ mają różne wymiary, to mnoży się je przez współczynniki równe jedności, ale mające taki wymiar aby stworzyć wyrażenia bezwymiarowe. Jeżeli $P = 2$ to minimalizowana jest odległość między rozwiązaniem przybliżonym a optymalnym. Mówimy wtedy o metodzie funkcji odległości.
Minimax	$k(a_i) = \max_j \left[\frac{k_j(a_i) - k_j^o(a_i)}{k_j^o(a_i)} \right] \quad (5)$	W metoda zbliżona do metody kryterium globalnego, z tą różnicą, że minimalizuje się maksymalne odchylenia od rozwiązań idealnych.	Zapis uproszczony.

Tabela 4.1. Deterministyczne metody optymalizacji wielokryterialnej [99], [98], [104] (2/3)

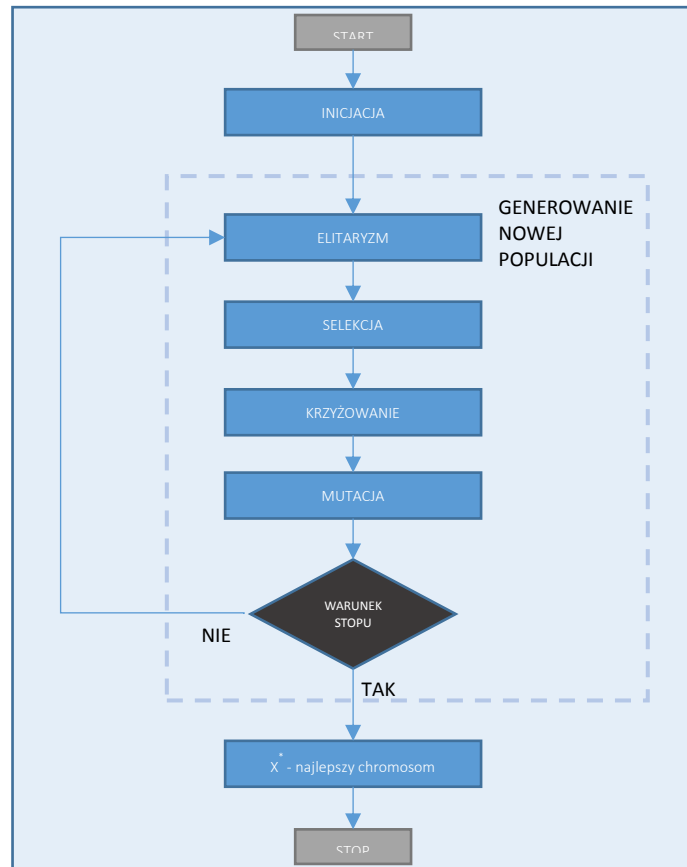
Nazwa metody	Kryterium optymalizacji	Opis metody	Uwagi
Minimax z wagami	$k(a_i) = \max_j \left[w_j \frac{[k_j(a_i) - k_j^o(a_i)]}{k_j^o(a_i)} \right] \quad (6)$	<p>W metoda zbliżona do metody kryterium globalnego, z tą różnicą, że minimalizuje się maksymalne odchylenia od rozwiązań idealnych, przy czym maksymalnym odchyleniom od rozwiązań idealnych przypisuje się wagi.</p>	<p>Wagi ustalane w sposób arbitralny z uwzględnieniem czynników subiektywnych. Wagi odnoszą się do odchyień względnych oddając bezpośrednio istotność poszczególnych kryteriów.</p>
Funkcji użyteczności	$U(k_1, k_2, \dots, k_m) = U_{extr} \quad (7)$ $U(k_1, \dots, k_m) = U_1(k_1) + \dots + U_m(k_m) \quad (8)$	<p>Metoda formułuje zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej jako znalezienie ekstremum funkcji użyteczności. Funkcja użyteczności musi być określona na podstawie analizy celów. Może mieć różną postać. Najczęściej ma postać addytywną względem kryteriów (8).</p>	<p>W szczególnym przypadku ustalane są w sposób arbitralny współczynniki wagowe w_j wskazujące hierarchię ważności kryteriów.</p>
Ograniczonych kryteriów	$\min_i k_r(a_i) \quad (9)$	<p>Metoda opiera się na założeniu, że znane jest najważniejsze kryterium. Znane są również górne i dolne ograniczenia pozostałych kryteriów. Polega ona na poszukiwaniu minimum funkcji $\min_i k_r(a_i)$, przy spełnieniu ograniczeń maksymalnych wartości pozostałych kryteriów $k_j(a_i) \leq \mu_j$</p>	<p>Konieczność wyboru jednego kryterium do minimalizacji podczas rozwiązywania zadania. Określenie ograniczeń, dzięki którym kryteria będą spełnione i zbiór rozwiązań będzie niepusty.</p>

Tabela 4.1. Deterministyczne metody optymalizacji wielokryterialnej [99], [98], [104] (3/3)

Nazwa metody	Kryterium optymalizacji	Opis metody	Uwagi
Leksykograficzna	$q_l(x) \rightarrow \min, \quad (10)$ <p>Przy ograniczeniach</p> $\begin{cases} g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, m \\ ql(x) = q_l^*, l = 1, \dots, l - 1. \end{cases}$	Metoda opiera się na uporządkowaniu kryteriów składowych w kolejności, która wynika z ich ważności $q_1(x), \dots, q_p(x)$. Następnie w sposób sekwencyjny rozwiązuje się zadanie programowania wielokryterialnego rozwiązując ciąg zadań jednokryterialnych dla wszystkich kryteriów uszeregowanych od najważniejszego do najmniej ważnego przy czym za rozwiązanie zadania wielokryterialnego przyjmuje się rozwiązanie ostatniego z zadań jednokryterialnych.	Metoda wymaga arbitralnego określenia ważności poszczególnych kryteriów co może czynić ją nieobiektywną.
Programowania celów	$\min_i \left[\sum_{j=1}^m (d_j^-(a_i) + d_j^+(a_i))^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (11)$ <p>gdzie: $p \geq 1$</p>	Metoda wymaga określenia wartości jakie powinny osiągnąć poszczególne kryteria. Wariant najlepszy to ten, który minimalizuje odchyłki od przyjętych wartości kryteriów.	d_j^-, d_j^+ są to odchyłki ujemne i dodatnie ustalonych, żądanych wartości kryteriów b_j . Na wartości kryteriów można narzucić warunki: większy lub równy, mniejszy lub równy, równy.

Tabela 4.2. Definicje podstawowych pojęć w algorytmach genetycznych [105]

Pojęcie	Definicja
Populacja	Zbiór chromosomów.
Osobnik	Zbiór parametrów zadania zakodowany w postaci chromosomów (search points).
Chromosom	Uporządkowany ciąg genów o określonej długości. Obiekt reprezentujący zmienne optymalizacji.
Gen	Nazywany też cechą, pojedynczy element chromosomu.
Allel	Wartość danego genu.
Locus	Pozycja danego genu w chromosomie.
Funkcja przystosowania (fitness function)	Wartości funkcji przystosowania pozwalają na liczbową ocenę przystosowania poszczególnych osobników w populacji. Powiązana z funkcją celu analizowanego zadania optymalizacji.



Rys. 4.2. Ogólny schemat działania algorytmów genetycznych [99]

Podsumowując, algorytmy genetyczne są metodami rozwiązywania problemów optymalizacyjnych opartymi na naśladowaniu ewolucji biologicznej bazując na procesie selekcji naturalnej. W trakcie iteracji wybierane są osobniki z danej populacji, które następnie dzięki krzyżowaniu tworzą następne pokolenie. Populacja ewoluuje w kierunku rozwiązania optymalnego. Ponieważ wybór kolejnej populacji odbywa się za pomocą obliczeń losowych algorytmy sprawdzają się lepiej na dużych zbiorach danych. Przy niskiej liczbie danych rozwiązania tradycyjne związane z deterministycznym obliczeniem dają równie dobre wyniki.

Algorytmy ewolucyjne należą również do grupy algorytmów niedeterministycznych i bazują jak algorytmy genetyczne na ideach zaczerpniętych z biologii. Jednym z podstawowych punktów różniących je od algorytmów genetycznych jest metoda tworzenia nowej populacji. W algorytmach genetycznych osobniki słabo przystosowane mogą trafić do nowej populacji natomiast w algorytmie ewolucyjnym metoda tworzenia nowej populacji wymusza odrzucenie najgorszych osobników [99]. W optymalizacji wielokryterialnej przy podejściu ewolucyjnym istnieje wiele rodzajów stosowanych algorytmów mających różny poziom akceptacji dla kształtu czy też ciągłości funkcji ale zwykle przestrzegane są dwie

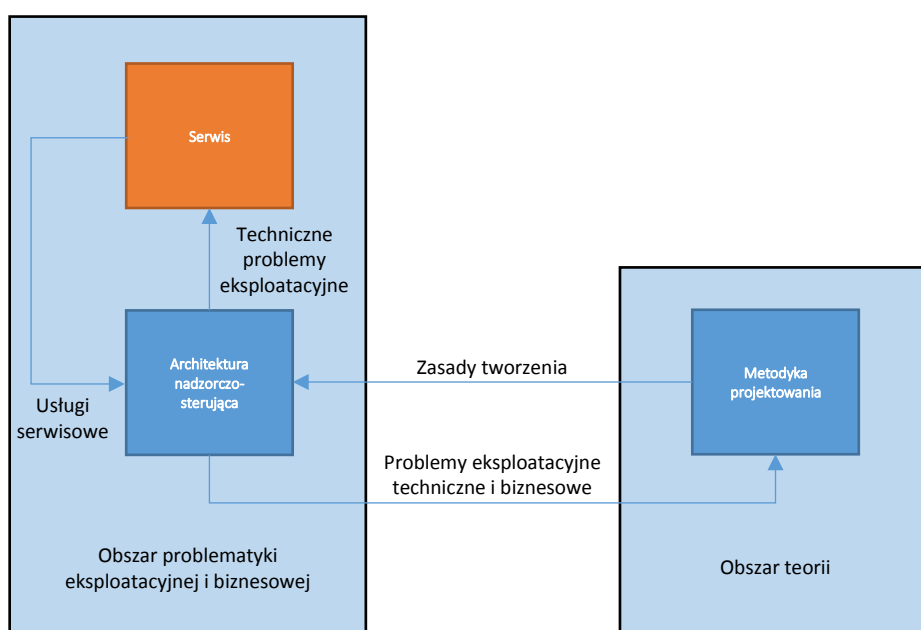
techniki jedna jest techniką rankingową, druga to technika utrzymania właściwej różnorodności. W większości tych algorytmów poszczególnym rozwiązaniom jest przypisywana waga, bazując na ich dominacji nad innymi rozwiązaniami oraz ze względu na optymalność w sensie Pareto. Analizowane algorytmy niedeterministyczne przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Algorytmy w podejściu ewolucyjnym

Algorytm	Opis
Multi-objective genetic algorithm (MOGA)	<p>Poszczególne osobniki S_p przyjmują ocenę $R=1$ plus liczba osobników dominujących nad S_p. W związku z powyższym ocena $R=1$ zostanie przypisana jedynie do osobników niezdominowanych. Z wykorzystaniem ocen R promowane są S_p, które są mniej zdominowane. W analizowanym przypadku R_{MAX} równa się rozmiarowi populacji. Różnorodność zapewniana jest przez niszczenie [106].</p>
Non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)	<p>Algorytm genetyczny, zaproponowany przez Deb et al. w 2002 r.</p> <p>W strukturze NSGA-II zdefiniowano i wykorzystano dwa wyspecjalizowane operatory i mechanizmy wieloprzedmiotowe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • populacja jest sortowana i dzielona na fronty (F1, F2, itd.), gdzie F1 (pierwszy front) oznacza przybliżony front Pareto • mechanizm szeregowania wśród członków frontu, którzy są wobec siebie dominujący lub zdominowani [107], [108].
VEGA –ang. Vector Evaluated Genetic Algorithm	<p>„Dla problemu z m celami w każdym pokoleniu wybiera się $1/m$ rodziców na podstawie każdego z kryteriów osobno. Zapewnia to przeżywanie osobników dobrych ze względu na jedno kryterium, osobników średnich ze względu na wszystkie kryteria</p> <p>Algorytm ma problemy związane z tworzeniem osobników doskonałych ze względu na różne kryteria. Można temu zapobiegać za pomocą krzyżowania nie losowego osobników z różnych gatunków” [109]</p>
Algorytm Fourmana	<p>„Podczas selekcji jest wybierane w sposób losowy jedno kryterium” [109]</p>

5 Koncepcja i założenia metodyki projektowania elastycznej architektury nadzorczo-sterującej

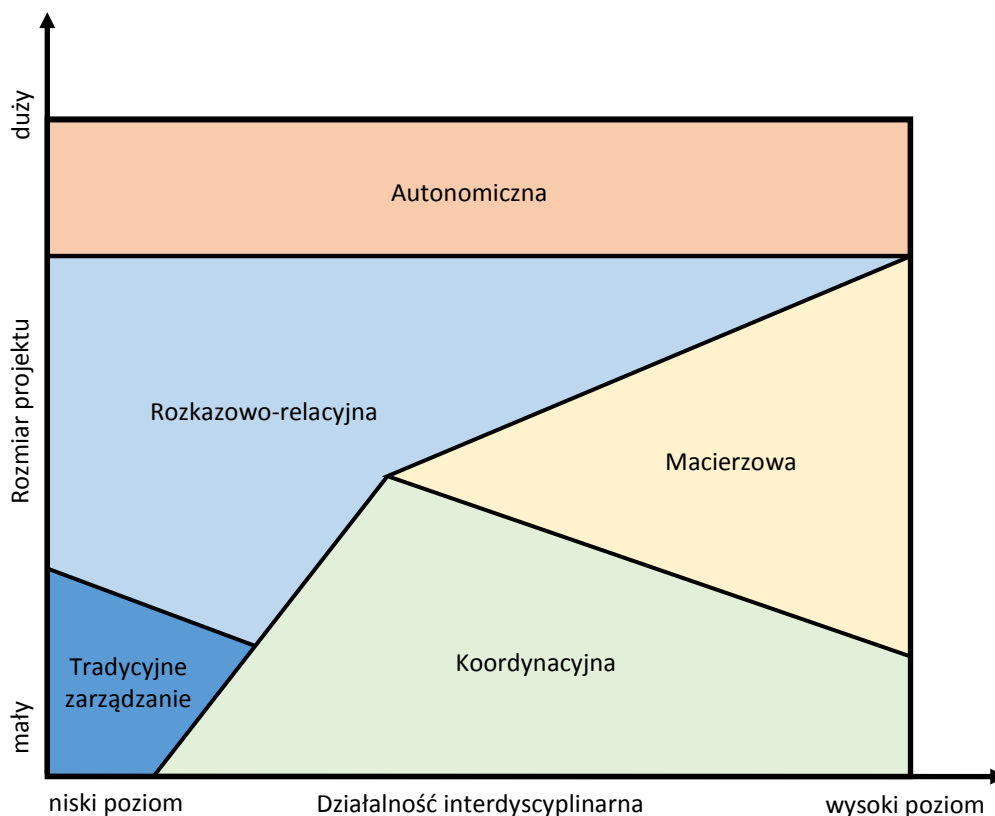
„Architektura to podstawowa organizacja systemu zawarta w jego komponentach, ich relacjach między sobą i z otoczeniem oraz zasadach kierujących jego projektowaniem i ewolucją” [110]. W praktyce architektura nadzorczo-sterująca przysparza wiele zróżnicowanych problemów związanych zarówno z jej eksploatacją, jak i rozbudową. Część z nich możliwa jest do pokonania z wykorzystaniem działań serwisowych, ale część wymaga przeprowadzenia analiz i rozwiązania opartego na teorii. Skuteczne rozwiązanie zidentyfikowanych problemów przez autora rozprawy, doprowadziło do opracowania praktycznych zasad postępowania (Rys. 5.1). Na podstawie tych zasad opracował on i wdrożył w firmie Solaris metodykę projektowania nowej elastycznej architektury nadzorczo-sterującej.



Rys. 5.1. Koncepcja tworzenia metodyki projektowania nowej elastycznej architektury nadzorczo-sterującej

Aby zaprojektować architekturę nadzorczo-sterującą dla autobusów, należy wziąć pod uwagę wiele czynników. Konieczne jest uwzględnienie specyfikacji technicznej pojazdu, zakresu funkcjonalnego, cyklu życia i warunków eksploatacji. Projektowanie musi być dopasowane do dostępnych technologii i urządzeń, przy uwzględnieniu specyfiki systemów produkcyjnych, w których autobusy będą produkowane. Oznacza to konieczność zaangażowania odpowiednio wykwalifikowanej grupy osób pracujących w różnych działach w firmie, które aby skrócić czas

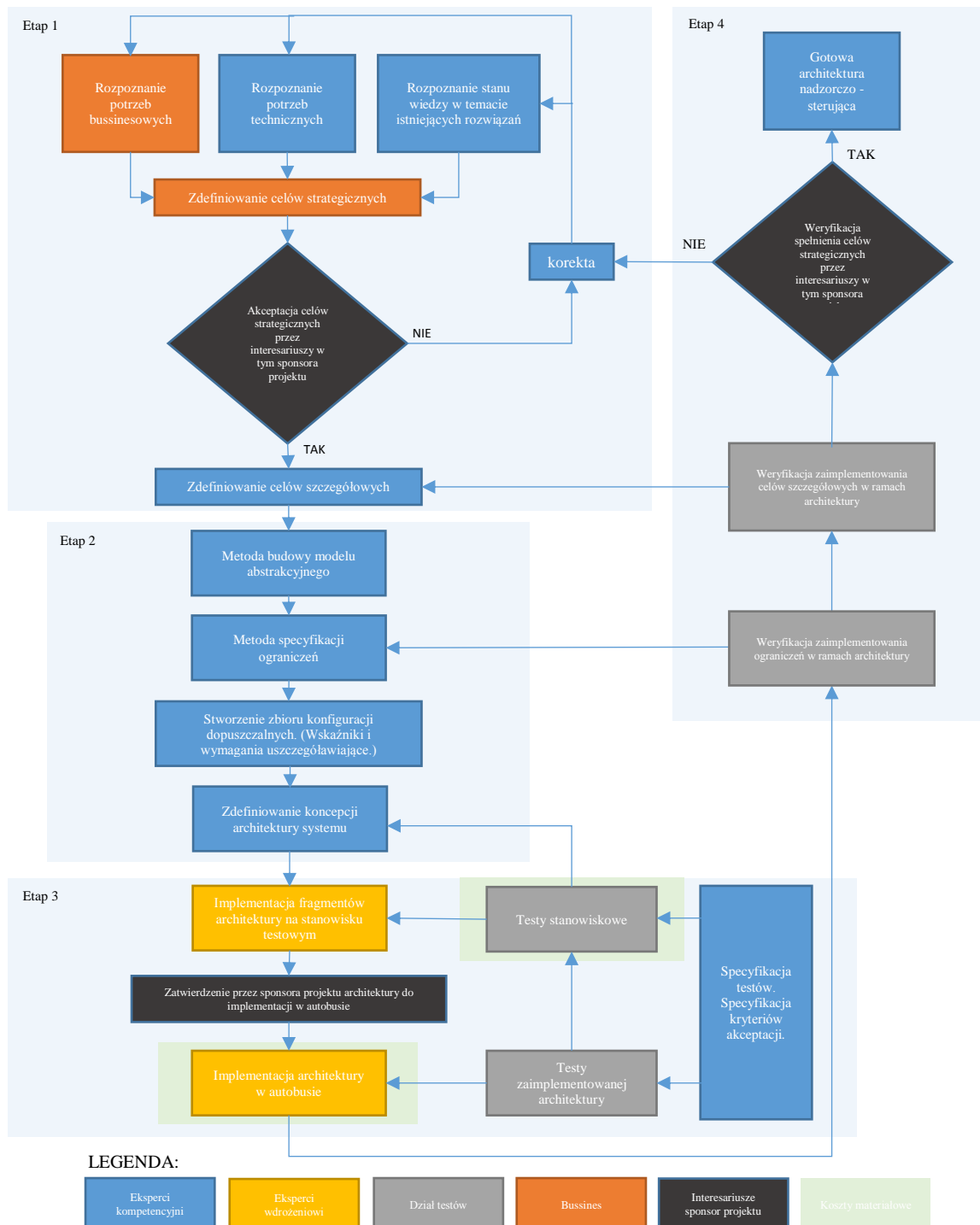
projektowania oraz usprawnić wymianę informacji będą musiały zostać zaangażowane w projekt w tym samym czasie. Nie jest to zadaniem łatwym. Zgodnie z prawem sformułowanym przez Melvin E. Conway: “Any organization that designs a system (defined more broadly here than just information systems) will inevitably produce a design whose structure is a copy of the organization's communication structure”, “Każda organizacja, która projektuje system (zdefiniowany tu szerzej niż tylko systemy informacyjne), nieuchronnie wytworzy projekt, którego struktura jest kopią struktury komunikacyjnej organizacji” [111]. Jeżeli temat budowy architektury zostanie rozdzielony w organizacji na pojedyncze działania, które przydzielone zostaną poszczególnym grupom zaczną się problemy związane z koordynacją ich działań. Duże firmy, w których są ustalone procesy związane z koordynacją wypracowują niezbyt elastyczne rozwiązania. Na przykład podział zespołów na podstawie funkcji technicznych (interfejsu użytkownika, programowania komputera centralnego w autobusie, parametryzacji urządzeń odpowiedzialnych za komfort klimatyczny itp.) tworzy silosy funkcjonalne. Zespoły są bardzo skuteczne w ramach realizacji swoich części projektu, ale w celu realizacji nowej funkcji biznesowej już niekoniecznie. Melvin E. Conway wskazał, że zawężenie zakresu obowiązków powoduje jednocześnie zmniejszenie alternatyw projektowych. Aby wypracować najlepsze rozwiązania, zespoły muszą być zbudowane w granicach usług jakie są w ramach organizacji tworzone, a nie jako oddzielne silosy. Zjawisko to nazywane jest odwróconym manewrem Conwaya (ang. Inverse Conway Maneuver) [112]. Dołączenie do takiego zespołu osób zajmujących się każdym aspektem architektury spowoduje wypracowanie rozwiązania zgodnego zarówno z celami biznesowymi jak i technicznymi [111]. Równoległa praca osób oznacza również, równoległe toczące się procesy projektowania, a więc projektowanie współbieżne. „Projektowanie współbieżne jest formą wielozadaniowej, interdyscyplinarnej i wielofunkcyjnej pracy zespołowej” [113]. Wybór sposobu działania w takich realizacjach zależy od wielkości i zasięgu projektu jak również od wymaganej wielkości współpracy pomiędzy poszczególnymi zaangażowanymi grupami ekspertów (dziedzinami nauki) (Rys.5.2). Projekt architektury nadzorczo-sterującej należy do grupy projektów dużych, o wysokim poziomie działalności interdyscyplinarnej, w której niezbędne jest wiedza z dziedziny prawa, homologacji, testów, elektrotechniki, inżynierii mechanicznej, informatyki, matematyki oraz biznesu. Podczas projektowania metodyki autor rozprawy uwzględnił złożoność naukową zagadnienia, w której potrzebna jest wiedza z tradycyjnych dziedzin projektowania, modelowania i estymacji parametrów, a także teoria eksperymentu i statystyki.



Rys. 5.2. Kryteria podziału form organizacyjnych projektowania [113]

Zgodnie z przedstawionym paradygmatem oraz przeprowadzonymi analizami autor rozprawy wskazał autonomiczny zespół ekspertów jako ten, który najlepiej rozwiąże powyższy problem projektowy. W tym podejściu wszyscy członkowie zespołu, którzy zostali zaproszeni do współpracy, mają wiedzę zarówno o swoich własnych zadaniach, jak i o zadaniach innych osób z zespołu. Zespół dysponuje więc aktualną wiedzą na temat stosowanych rozwiązań architektury, przepisów prawa jak również wymagań technicznych i biznesowych oraz wizji przyszłych potrzeb rynku i trendów technologicznych. Stworzony zespół rozpoczyna działania w etapie pierwszym modelu procesu projektowania architektury nadzorczo-sterującej (Rys.5.3.). Wprowadzając nową architekturę nadzorczo-sterującą należy posiadać wiedzę dotyczącą stanu bieżącego, dysponować koncepcją stanu docelowego, planem przejścia oraz ustalić terminy realizacji poszczególnych kamieni milowych projektu. Nowo tworzona architektura powinna być logicznie zaplanowana, a więc tak, aby istniał związek przyczynowo - skutkowy pomiędzy działaniami a ich efektami i było on oczywisty i prawdopodobny. Oznacza to, wykonanie analizy i rozwiązanie problemów uprzednio implementowanych wersji architektury oraz precyzyjne zdefiniowanie celów i strategii działań, które są niezbędne do ich osiągnięcia. Zidentyfikowane muszą zostać również obszary ryzyka związane zarówno z samą

architekturą jak i oddziaływaniami zewnętrznymi na nią. Ponieważ projektowanie architektury nadzorczo-sterującej wiąże się z podejmowaniem decyzji, które muszą być w odpowiedniej kolejności realizowane i dokumentowane, technicznie przy tworzeniu architektury należy użyć notacji, która uwzględni specyfikę związaną z punktem widzenia poszczególnych interesariuszy procesu oraz opisu wariantów rozwiązań, które nie zostały wybrane. Jest to ważnym aspektem edukacyjnym. Podczas budowy rozwiązań, w rzeczywistych procesach, autor rozprawy stworzył usystematyzowaną listę inicjatyw realizacyjnych dla poszczególnych grup konstruktorów, uczestniczących w procesach związanych z analizami podczas tworzenia architektury, jak również realizujących zaprojektowane rozwiązania. Całość działań podzielił na poszczególne fazy, w których część prac jest zrównoleglona, co przyspiesza realizację projektu. Zaproponowany przez autora rozprawy model procesu przedstawiono na rysunku 5.3. Szczegóły procesu, metody wspierające realizację wyznaczonych celów strategicznych autor rozprawy przedstawi w sposób ustrukturyzowany w kolejnych rozdziałach rozprawy. W metodyce projektowania architektury nadzorczo-sterującej, zaproponowanej przez autora rozprawy, będącej zestawem narzędzi i technik jest szereg etapów, które muszą być zrealizowane, aby uzyskać satysfakcjonujący dla firmy wynik. Inicjator oraz sponsor projektu widząc potrzebę jego realizacji wskazują pojedyncze cele strategiczne. Nie zawsze jest to jednak kompletna lista celów zapewniająca sukces techniczny i komercyjny. Zamysłem pierwszego etapu jest więc zdefiniowanie kompletnej listy celów strategicznych z uwzględnieniem celów podanych przez inicjatora i sponsora projektu, a następnie po ich akceptacji dekompozycja umożliwiająca zdefiniowanie celów szczegółowych. Aby tego dokonać należy rozpoznać potrzeby biznesowe, potrzeby techniczne oraz poszerzyć stan wiedzy w temacie istniejących rozwiązań. W ramach tego działania należy powołać grupę osób z wymaganych niezależnych dziedzin, która wypracowuje możliwe do implementacji cele. Zwyczajowo w takich sytuacjach wykorzystywane są różne techniki kreatywnego myślenia, które polegają na generowaniu jak największej liczby pomysłów, takich jak technika burzy mózgów. W technice tworzona jest atmosfera wolna od krytyki i oceniania, która pozwala na swobodne wypowiedzianie się.



Rys. 5.3. Model procesu projektowania architektury nadzorco – sterującej

Aby uzyskać zamkniętą listę celów po zakończeniu fazy generowania pomysłów, należy dokonać ich analizy oraz selekcji. Pomysły, które są generowane czasami stoją ze sobą w sprzeczności. Te generowane przez stronę techniczną mogą wykraczać poza wymagania klienta za które jest wstanie zapłacić, natomiast cele komercyjne, mogą być niemożliwe do implementacji w zakresie środków, które mają być na nie przeznaczone.

W takiej sytuacji w celu skrócenia i ustrukturyzowania procesu wyboru należy użyć metod wspomaganie decyzji. Pomagają one w sytuacjach, gdzie istnieją złożone warunki i brak jest konsensusu w zespole. Metody te pozwalają na podejmowanie bardziej świadomych i racjonalnych decyzji. W tabeli 5.1 zaproponowano metody wspomaganie decyzji, zarówno proste, jak i wymagające specjalistycznej wiedzy i umiejętności matematycznych wykorzystywane w pierwszym etapie niniejszej metodyki.

Tabela 5.1. Zestawienie metod wspomaganie decyzji (1/2)

Metoda	Opis
Drzew decyzyjnych	Tworzenie hierarchicznej struktury drzewa decyzyjnego. Węzeł odpowiada wyborowi pomiędzy alternatywami. Liście drzewa są końcowymi decyzjami. [114]
Analizy SWOT	Ocena sił, słabości, szans i zagrożeń. Identyfikacja czynników wpływających na decyzję. [115]
Analizy ryzyka	Umożliwia identyfikację, ocenę i zarządzanie ryzykiem w kontekście podejmowania decyzji. Wykorzystywane techniki: analiza wrażliwości, symulacja Monte Carlo, analiza scenariuszy. [116]
Programowania liniowego	Optymalizacja celów i zasobów. Metoda matematyczna. Podejmowanie decyzji na podstawie ograniczeń i założeń. [117]
Modelowania symulacyjnego	Symulacja modelu w celu zbadania skutków różnych decyzji. [118]
Analizy opłacalności	Oszacowanie opłacalności danej decyzji poprzez porównanie kosztów i korzyści. [119]
Delphi	Konsensus ekspertów. Decyzja na podstawie opinii i ocen ekspertów z różnych dziedzin. [120]

Tabela 5.1. Zestawienie metod wspomaganie decyzji (2/2)

Metoda	Opis
Analizy hierarchicznej (AHP)	Porównanie różnych kryteriów. Ocena ich znaczenia w kontekście problemu. Wykorzystuje matematyczne podejście do hierarchizowania kryteriów i alternatyw w celu osiągnięcia optymalnego wyniku. Do porównań wykorzystuje 9-stopniową skalę ocen, zwaną skalą Saaty'ego. [121]
Elektre	Wybór najlepszej alternatywy na podstawie porównania kryteriów i ich wag. Stosowana przy większej liczbie alternatyw. [122]
REMBRANDT	Skala Saaty'ego zastąpiona logarytmiczną. Struktura hierarchiczna obejmuje trzy poziomy: najwyższy - cel nadrzędny, środkowy - kryteria oceny, najniższy - rozpatrywane warianty. Ocena wariantów z wykorzystaniem reguły opartej na średniej geometrycznej. [107]
ZAPROS	Wykorzystuje werbalne skale porządkowe. Preferencja decydenta wpływa na konstruowaną wspólna skalę porządkową dla rozpatrywanego problemu decyzyjnego. Tworzony jest częściowy porządek na zbiorze wariantów decyzyjnych.[107]

Dobór metody zależy od dostępności informacji, liczby alternatyw, czasu jaki mamy na podjęcie decyzji czy też stopnia skomplikowania problemu. Ustalono w ramach zagadnienia tworzenia nowej architektury nadzorczo-sterującej cele zostały przedstawione i szczegółowo opisane przez autora rozprawy w rozdziale 6.

W ramach drugiego etapu zrealizowano budowę modelu abstrakcyjnego, wyspecyfikowano ograniczenia, stworzono zbiór konfiguracji dopuszczalnych oraz wybrano koncepcję architektury do implementacji. Budowę modelu abstrakcyjnego rozpoczęto od zebrania i zestawienia funkcjonalności jakie pojazd ma realizować. Następnie dokonano doboru urządzeń nadzorczo-sterujących je realizujących. Przeanalizowano interfejsy komunikacyjne urządzeń na podstawie których utworzono macierz interakcji wskazującą powiązania komunikacyjne pomiędzy nimi wraz z zakresem przesyłanych danych. Stworzono również tabelę obciążenia linii CAN dla poszczególnych częstotliwości ramki i prędkości magistrali używanych w autobusach wyspecyfikowanych w rozdziale 2. Wskazano notację strukturyzującą modelowanie architektury nadzorczo-sterującej stanowiącą platformę komunikacyjną interesariuszy uczestniczących w jej projektowaniu. W tym celu użyto grafów do reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury, połączeń logicznych w ramach analizy poziomu bezpieczeństwa, reprezentacji siatki możliwych tras kablowych w ramach optymalizacji wyboru miejsca instalacji urządzeń nadzorczo-sterujących oraz macierzy reprezentujących poszczególne konfiguracje architektury

(rozdział 9). Analizy przeprowadzono przy użyciu narzędzia MATLAB firmy MathWorks. Drugą fazą drugiego etapu jest specyfikacja ograniczeń rozumianych jako obostrzenia (np. normy, przepisy prawa, zarządzenia, możliwości techniczne, technologiczne czy też ekonomiczne) krępujące swobodę działania, opisane szczegółowo w rozdziale 8 niniejszej rozprawy. Najważniejsze 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. Po ustaleniu ograniczeń, kolejnym krokiem drugiego etapu jest opracowanie macierzy konfiguracji dopuszczalnych architektury M_{ZKD} . Architektury w niej zawarte tworzone są z uwzględnieniem ograniczeń na podstawie macierzy interakcji, bazowych koncepcji oraz celów. Jest to macierz reprezentująca rozwiązania możliwe do implementacji. Przeprowadzenie analizy celów prowadzi do wskazania pożądanego wektora zmiennych decyzyjnych M_{KDV} , dla którego wszystkie składniki będące najistotniejszymi parametrami charakteryzującymi architekturę osiągną wybrane ekstremum. Analizując zbiór rozwiązań dopuszczalnych zapisany w macierzy M_{ZKD} , przeprowadzono z uwzględnieniem wektora zmiennych decyzyjnych M_{KDV} klasyfikację rozwiązań w celu wybrania optymalnych. W celu wybrania rozwiązań optymalnych, użyto technik takich jak Diagram Hassego oraz podejścia zwanego rozwiązaniem optymalnym w sensie Pareto. Z uzyskanego w praktyce zbioru rozwiązań równie dobrych z punktu widzenia analizowanych kryteriów oceny wybrano jedną architekturę do implementacji. W rozdziale 4 przeanalizowano dostępne metody optymalizacji wielokryterialnej, z których wybrano dwie do wdrożenia. Obliczenia oparto na deterministycznych metodach optymalizacji wielokryterialnej: znormalizowanym kryterium zbiorczym oraz kryterium globalnym. Przeprowadzone analizy wskazały, iż metoda kryterium zbiorczego preferowała rozwiązania nieco tańsze i mniej bezpieczne, natomiast metoda kryterium globalnego wskazała rozwiązania nieco droższe ale bezpieczniejsze. Ostatecznie wybrano architekturę do implementacji (rozdział 10).

Implementacja oraz testowanie jest trzecim etapem w którym rozwiązanie wdrażane jest w życie (rozdziały 11 oraz 12). Należy w nim zadbać o poprawny projekt okablowania strukturalnego, mocowań urządzeń nadzorczo-sterujących, koncepcję instalacji, właściwą konfigurację oraz oprogramowanie. Wdrożenie pilotażowe opracowanej metodyki przeprowadzono podczas projektowania architektury dla autobusów elektrycznych długości 9, 15 oraz 12 metrów. W niniejszej rozprawie autor skoncentrował się na opisie rozwiązań zaimplementowanych w 12 metrowym autobusie elektrycznym ze względu na użycie w nim najnowszych rozwiązań centralnych komputerów sterujących. Powstała koncepcja stała się

standardem w firmie podczas tworzenia i implementacji rozwiązań dla nowych typów autobusów.

Ostatnim czwartym etapem modelu procesu projektowania architektury nadzorczo-sterującej wskazanego na rysunku 5.3. jest weryfikacja. W ramach niniejszej rozprawy przedstawiono dwuetapową weryfikację. Pierwszy etap stanowił porównanie stworzonej architektury z rozwiązaniami zaprezentowanymi w rozdziale 1 niniejszej rozprawy. Drugi etap to weryfikacja zaimplementowanej w autobusie Urbino 12 architektury i porównanie otrzymanych w ramach przeprowadzonych eksperymentów badawczych wyników z danymi na podstawie teoretycznych obliczeń realizowanych podczas tworzenia rozwiązania. Bardzo ważnym aspektem opisanym w rozdziale 12 jest metodyka walidacji. Na końcu czwartego etapu modelu procesu projektowania otrzymano gotową architekturę.

6 Metodyka projektowania: Definicja celów strategicznych i szczegółowych

Autor rozprawy przeprowadził analizy aktualnie implementowanych przez producentów pojazdów rozwiązań oraz zebrał z wykorzystaniem metody Delphi pomysły usprawniające, które zostały zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 5 ustrukturyzowane i zatwierdzone przez interesariuszy oraz sponsora projektu. Zdefiniowane zostały cele strategiczne, które wskazano w tabeli 6.1. Autor rozprawy dokonał również systematyzacji wymagań w macyry logicznej (Tabela 6.2), w której zestawiał i opracował w syntetycznej formie cele, związki przyczynowo - skutkowe oraz ryzyka wraz z punktami krytycznymi, które mogą wystąpić przy implementacji nowo tworzonej architektury.

Tabela 6.1. Cele strategiczne dla tworzonej w ramach badań nowej architektury nadzorczo-sterującej [16]

Zdefiniowane cele strategiczne zatwierdzone przez interesariuszy oraz sponsora projektu	
1.	Architektura zapewniająca możliwość rozbudowy przy zapewnieniu obciążeń na magistralach komunikacyjnych umożliwiających bezpieczne funkcjonowanie autobusu.
2.	Architektura zawierająca możliwość komunikacji z zewnętrznymi urządzeniami instalowanymi przez klientów bez ingerencji w jej strukturę przy zapewnieniu bezpieczeństwa pojazdu.
3.	Architektura uwzględniająca możliwość podłączenia urządzenia zdalnej diagnostyki eSConnect.
4.	Architektura dostosowana do wymagań normy ISO26262 w celu ułatwienia jej implementacji.
5.	Architektura umożliwiająca implementację wymagań związanych z bezpieczeństwem cybernetycznym.
6.	Architektura możliwa do zaimplementowania w rodzinie autobusów Urbino electric.

Tabela 6.2. Matryca logiczna dla nowej architektury nadzorczo-sterującej (1/6)

CELE DLA ARCHITEKTURY	RYZYKA WRAZ Z PUNKTAMI KRYTYCZNYMI	ZWIĄZKI PRZYCZYNOWO – SKUTKOWE
Powstała na podstawie celów strategicznych i je realizująca.	Niezrozumienie celów strategicznych przez zespół projektowy. Źle zdefiniowane techniczne aspekty odzwierciedlające cele strategiczne powodujące niezrealizowanie potrzeb klientów i użytkowników.	Pomimo przygotowania i zaprojektowania rozwiązania brak zgody na jego implementację, brak zainteresowania rozwiązaniem ze strony klientów i użytkowników.
Zgodna z aktualnym prawem, normami i dobrymi praktykami branżowymi.	Nieznajomość lub zła interpretacja przepisów prawa, norm branżowych może doprowadzić do stworzenia rozwiązania które nie spełni wymagań homologacyjnych i nie zostanie dopuszczone do eksploatacji.	Brak homologacji.
Rozwiązuje problemy, które zostały zidentyfikowane we wcześniejszych jej wersjach.	Niewłaściwe zidentyfikowanie i opisanie problemów występujących może wpłynąć na powstanie wad projektowych będących przeszkodą uniemożliwiającą wprowadzenie nowych rozwiązań i aplikacji oraz prawidłowe funkcjonowanie architektury.	Nieprawidłowe działanie pojazdu, brak możliwości implementacji nowych rozwiązań i aplikacji.
Interoperacyjna, skutecznie integruje się i współpracuje z innymi systemami.	Architektura powinna być otwarta na nowe rozwiązania techniczne oraz informatyczne. Ryzyko związane jest z pojawieniem się na rynku nowych rozwiązań i interfejsów komunikacyjnych niemożliwych do implementacji ze względu na ograniczenia sprzętowe.	Brak możliwości oferowania nowych funkcjonalności.
Stworzona z wyselekcjonowanych komponentów, dla których ustalono jasne kryteria brzegowe.	Użycie komponentów niespełniających wymagań biznesu lub technicznych. Nieodpowiedni wybór komponentów.	Stworzenie rozwiązań kompromisowych, które powodują na przykład uniwersalność i elastyczność ale również wpływają na wzrost kosztów realizacji.

Tabela 6.2. Matryca logiczna dla nowej architektury nadzorczo-sterującej (2/6)

CELE DLA ARCHITEKTURY	RYZYKA WRAZ Z PUNKTAMI KRYTYCZNYMI	ZWIĄZKI PRZYCZYNOWO – SKUTKOWE
<p>Adekwatna do aktualnie dostępnych technologii i rozwiązań branżowych, bazująca na wzajemnych powiązaniach komponentów realizujących funkcje wymagane do prawidłowej pracy i komunikacji pojazdów.</p>	<p>Bezkrytyczne wykorzystanie topologii oraz magistral zaprojektowanych dla samochodów osobowych bez uwzględnienia ograniczeń technicznych oraz związanych z dostępnością komponentów nadzorczo - sterujących do specyficznych funkcji autobusowych. Podejście projektowe nieuwzględniające powiązań komunikacyjnych komponentów może prowadzić do problemów w działaniu pojazdu.</p>	<p>Brak możliwości implementacji specyficznych funkcji autobusowych. Problemy w poprawnym działaniu pojazdu.</p>
<p>Spełnia cele biznesowe, zastosowane w niej rozwiązania są ekonomicznie uzasadnione (koszty nabycia, koszty eksploatacji). Dopuszcza się zwiększenie kosztów okablowania strukturalnego o 50% oraz instalację dodatkowych urządzeń niezbędnych do funkcjonowania architektury w kwocie nie przekraczającej 1500 zł.</p>	<p>Architektura "jest zbiorem minimum tego co jest potrzebne a nie maksimum tego co jest możliwe" [123]. Chęć wprowadzania nieuzasadnionych nowinek technologicznych zwiększających zarówno możliwości architektury nadzorczo-sterującej jak i jej koszt. Rozwiązania zastosowane w architekturze są nadmiarowe i nie mają mierzalnego wpływu na wskaźniki przyporządkowane do celów. Uzyskanie efektów nieadekwatnych do poniesionych nakładów. Zbyt wysokie koszty rozwiązania. Wzrost kosztów może pojawić się w trakcie realizacji projektu, ze względu na wzrost kosztu zakupu komponentów.</p>	<p>Zbyt wysokie koszty uniemożliwiają wygrywanie przetargów.</p>

Tabela 6.2. Matryca logiczna dla nowej architektury nadzorczo-sterującej (3/6)

CELE DLA ARCHITEKTURY	RYZYKA WRAZ Z PUNKTAMI KRYTYCZNYMI	ZWIĄZKI PRZYCZYNOWO – SKUTKOWE
<p>Zachowuje się zgodnie z oczekiwaniami (wydajność, przepustowość).</p>	<p>Niedostateczna wiedza przy tworzeniu reguł oraz wskazówek dotyczących budowy architektury wraz z nieprzemyślanymi rozwiązaniami mogą powodować konflikty komunikacyjne lub nadmierne obciążenie magistrali, które uniemożliwią dalszą jej rozbudowę. Rozwijane kolejne wersje komponentów systemowych zwiększają swoje możliwości zwiększając również generowane obciążenie komunikacyjne. Nie uwzględnienie tego faktu w momencie projektowania architektury może doprowadzić do problemów w działaniu pojazdu.</p>	<p>Brak możliwości oferowania nowych funkcjonalności.</p>
<p>Elastyczna – umożliwia opcjonalne instalowanie dodatkowych komponentów lub ich dezaktywację bez znaczącego wpływu na jej parametry pracy.</p>	<p>Zbytne uelastycznienie może powodować problemy związane z zapewnieniem bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz bezpieczeństwa cybernetycznego projektowanej architektury.</p>	<p>Uelastycznienie architektury powoduje komplikowanie systemów zabezpieczeń, co zwiększa koszt jej implementacji.</p>
<p>Łatwa i tania do utrzymania.</p>	<p>Stworzona architektura, może okazać się problematyczna w utrzymaniu. Brak skalowalności może doprowadzić do znacznych kosztów jej utrzymania przy konieczności wprowadzania zmian podyktowanych na przykład zmianami prawnymi (R155 [85]).</p>	<p>Wysokie koszty utrzymania i modyfikacji.</p>

Tabela 6.2. Matryca logiczna dla nowej architektury nadzorczo-sterującej (4/6)

CELE DLA ARCHITEKTURY	RYZYKA WRAZ Z PUNKTAMI KRYTYCZNYMI	ZWIĄZKI PRZYCZYNOWO – SKUTKOWE
<p>Łatwa do zarządzania i rozbudowy.</p>	<p>Architektura to tworzenie ładu w celu dostosowania go do zaspokojenia wielorakich potrzeb. Nie jest ona statyczna tylko podlega ciągłym zmianom. Musi być łatwa do wprowadzania kierunkowych modyfikacji oraz rozbudowy zgodnie z wytycznymi. Jeżeli dodamy kolejną usługę lub komponent i nie wskażemy w jasny i zrozumiały sposób gdzie i na jakiej podstawie ma on być dodany do naszej struktury, zostanie on dołożony przez konstruktora lub technika w najwygodniejszym dla niego miejscu.</p>	<p>Nieprzemyślane decyzje oraz brak jednoznacznych wskazówek dotyczących postępowania mogą spowodować problemy w działaniu całego pojazdu.</p>
<p>Łatwa do diagnozowania, testowalna.</p>	<p>Architektury o dużej złożoności struktury wydłużają czas potrzebny na diagnostykę w przypadku awarii magistrali. Tworzenie dedykowanych rozwiązań diagnostycznych w określonych środowiskach informatycznych może również w pewnym momencie uniemożliwić dalszy rozwój oprogramowana, gdyż stanie się ono niekompatybilne z nowym systemem operacyjnym. Łatwa diagnoza oznacza również zapewnienie dostępu fizycznego do okablowania strukturalnego i sterowników. Kompaktowa zabudowa może powodować utrudniony dostępem fizyczny w trakcie awarii, które muszą być naprawiane poprzez wymianę komponentów.</p>	<p>Utrudniona diagnostyka, utrudniony dostęp fizyczny do okablowania strukturalnego oraz komponentów.</p>

Tabela 6.2. Matryca logiczna dla nowej architektury nadzorczo-sterującej (5/6)

CELE DLA ARCHITEKTURY	RYZYKA WRAZ Z PUNKTAMI KRYTYCZNYMI	ZWIĄZKI PRZYCZYNOWO – SKUTKOWE
<p>Trwała, spełniająca wymagania dotyczące czasu życia. Dostępność odpowiednich urządzeń / zamienników w tym czasie.</p>	<p>Problemem może być użycie w projekcie rozwiązań ECU, które właśnie są wycofywane przez producenta i zastępowane nowszymi niekompatybilnymi wstecznie jednostkami. Zaniedbania związane z brakiem obliczeń dotyczących czasu życia komponentów oraz zabezpieczenia ich dostępności w umowach w formie pierwotnej oraz zamienników.</p>	<p>Brak możliwości naprawy / wymiany urządzenia. Wysokie koszty związane z modyfikacją architektury.</p>
<p>Spełniająca normy bezpieczeństwa funkcjonalnego, zdublikowana w punktach tego wymagających.</p>	<p>Osiągnięcie wymaganych poziomów ASIL może być zrealizowane dzięki użyciu urządzeń o danym poziomie ASIL lub dekompozycji na większą liczbę urządzeń o niższym poziomie ASIL, z których na przykład na jednym wykonywane są bazowe obliczenia a drugie jest zdublowanym urządzeniem weryfikującym (o różnym programie lub różnej architekturze sprzętowej spełniającej te same funkcje). Dekompozycje wykonuje się zazwyczaj w przypadkach gdy nie ma dostępnych komercyjnie sterowników spełniających wymagania. Ryzyko związane jest z niepoprawnie wykonaną analizą i niewłaściwym doбором komponentów.</p>	<p>Nieosiągnięcie wymaganego poziomu bezpieczeństwa funkcjonalnego.</p>

Tabela 6.2. Matryca logiczna dla nowej architektury (6/6)

CELE DLA ARCHITEKTURY	RYZYKA WRAZ Z PUNKTAMI KRYTYCZNYMI	ZWIĄZKI PRZYCZYNOWO – SKUTKOWE
Poziom spełnienia bezpieczeństwa cybernetycznego przynajmniej o 30% wyższy niż w aktualnych rozwiązaniach.	Brak odpowiednio zabezpieczonej architektury może doprowadzić do przejęcia i aktywowania funkcji pojazdu związanych z ruchem. Na przykład zwiększenie przyspieszenia lub gwałtowne hamowanie może przełożyć się bezpośrednio na bezpieczeństwo osób.	Możliwość nieintencjonalnego doprowadzenia do sytuacji niebezpiecznych na drodze, które mogą spowodować zagrożenie dla zdrowia i życia kierowcy, pasażerów oraz osób trzecich.
Minimalizująca potrzebę komunikacji i sterowania poprzez HMI– pozwalająca na automatyzację procesów nadzorczo-sterujących.	Nieodpowiednio zaprojektowany interfejs kierowcy, niezgodny z zasadami ergonomii z ręcznym uruchamianiem znaczącej ilości funkcjonalności, które mogłyby być zautomatyzowane może doprowadzić do zmniejszenia koncentracji oraz uwagi kierowcy na otoczeniu pojazdu.	Możliwość nieintencjonalnego doprowadzenia do sytuacji niebezpiecznych na drodze, które mogą spowodować zagrożenie dla zdrowia i życia kierowcy, pasażerów oraz osób trzecich.

Podsumowując, zebrane w tabeli 6.2 cele oraz przeprowadzone analizy ryzyka autor rozprawy wskazał na związki przyczynowo skutkowe, które mogą wpływać zarówno na brak możliwości implementacji, jak i rozwoju architektury ze względów technicznych (np. wydajność, przepustowość), biznesowych (np. koszt), czy też prawnych (np. brak homologacji). Wśród przeprowadzonych analiz znalazły się również krytyczne, dotyczące bezpieczeństwa pasażerów autobusu jak również osób postronnych znajdujących się na drodze. Zgodnie z tezą Donella H. Meadows: „Nie próbujemy definiować całokształtu architektury, wraz z rozwojem architektury potrzebujemy mechanizmów określających wpływ zmian na istotne parametry architektury oraz zapobiegających degradacji tych parametrów w czasie. Nie istnieją systemy odizolowane. (...) Granice wokół systemu są wyznaczane w kontekście celu dyskusji.” [124], nie należy wskazywać konkretnego zamkniętego rozwiązania tylko przekazać wskazówki jak je tworzyć, wtedy to rozwiązanie będzie mogło być dużej w eksploatacji. Ta teza nie może być jednak zastosowana w zakresach związanych z bezpieczeństwem, gdzie należy określić sztywne ramy działania i nie pozwalać na żadne ustępstwa. W wyniku analizy celów dla nowej architektury, autor w kolejnych rozdziałach rozprawy określił ograniczenia i wskaźniki niezbędne do skutecznego wdrożenia oraz oceny zaprojektowanego rozwiązania.

7 Metodyka projektowania: Model matrycy komunikacyjnej korelacji

Na początku procesu projektowania architektury nadzorczo-sterującej autor rozprawy przeprowadził analizę wymagań funkcjonalnych, a następnie zgrupował je w celu uzyskania spójnego zestawienia funkcjonalności jakie pojazd ma realizować. Uwzględnił niezbędne do ich realizacji urządzenia oraz zweryfikował czy dany sterownik do poprawnej pracy potrzebuje danych zewnętrznych jak również czy pozostałe sterowniki wymagają danych generowanych przez aktualnie weryfikowany. Podstawowy zestaw funkcjonalności wraz z urządzeniami do ich realizacji przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Zestawienie doboru urządzeń realizujących funkcje autobusu (1/5)

Numer funkcji	Funkcja	Funkcja szczegółowa	Urządzenie realizujące	Dane urządzenie kierunek komunikacji
1	Możliwość poruszania się	Sterowanie falownikiem napędu	Sterownik napędu	wysyła/ odbiera
2	Nastawa kierunku jazdy	Przekazywanie informacji dotyczącej żądanego kierunku jazdy	Elektronika nastawnika kierunku jazdy	wysyła
3	Regulacja prędkości jazdy	Przekazywanie informacji dotyczącej żądanej prędkości jazdy i przyspieszenia	Elektronika pedału przyspieszenia	wysyła
4	Możliwość hamowania i bezpiecznego zatrzymania pojazdu	Przekazanie informacji dotyczącej żądanej redukcji prędkości jazdy oraz żądanego opóźnienia	Elektronika układu hamulcowego EBS	wysyła/ odbiera
5	Kierowanie pojazdem	Umożliwienie komfortowego kierowania pojazdem bez wkładania nadmiernej siły	Sterownik pompy wspomagania	wysyła/ odbiera

Tabela 7.1. Zestawienie doboru urządzeń realizujących funkcje autobusu (2/5)

Numer funkcji	Funkcja	Funkcja szczegółowa	Urządzenie realizujące	Dane urządzenie kierunek komunikacji
6	Układ chłodzenia napędu	Utrzymywanie układu napędowego w temperaturze pracy zapewniającej jego maksymalne możliwości trakcyjne	Sterownik pompy płynu chłodzącego	wysyła/ odbiera
7	Magazyn energii trakcyjnej	Zarządzanie bezpieczną i trwałą eksploatacją magazynu energii	Główny sterownik baterii BMS	wysyła/ odbiera
8	Ładowanie baterii trakcyjnych	Zarządzanie ładowaniem magazynu energii w sposób bezpieczny	Sterownik modułu ładowania	wysyła/ odbiera
9	Układ chłodzenia/grzania baterii trakcyjnych	Zapewnienie utrzymania optymalnych z punktu widzenia możliwości energetycznych i trwałości warunków pracy baterii trakcyjnych	Sterownik systemu chłodzenia / grzania baterii trakcyjnych	wysyła/ odbiera
10	Dodatkowa generacja energii	Obniżenie zużycia energii	Sterownik paneli fotowoltaicznych	wysyła

Tabela 7.1. Zestawienie doboru urządzeń realizujących funkcje autobusu (3/5)

Numer funkcji	Funkcja	Funkcja szczegółowa	Urządzenie realizujące	Dane urządzenie kierunek komunikacji
11	Ładowanie baterii pokładowych	Utrzymanie naładowania baterii pokładowych na poziomie umożliwiającym uruchomienie elektronik w pojeździe przy żądaniu	Sterownik przetwornicy DC-DC	odbiera
12	Możliwość bezpiecznego otwierania i zamykania drzwi	Bezpieczne sterowanie drzwiami uwzględniające informacje z barier ochronnych, systemów rewersowania, statusu pojazdu itp...	Elektronika sterująca drzwi	wysyła/ odbiera
13	Interakcja kierowcy z pojazdem	Możliwość uruchamiania systemów w pojeździe oraz sterowania jego podstawowymi funkcjami związanymi z jazdą, informacja zwrotna dla kierowcy z systemów zainstalowanych w pojeździe	HMI: elektronika pulpitu dotykowego/sterownik kierownicy multifunkcyjna	wysyła/ odbiera
14	Pomiar parametrów ruchu. Monitorowanie	Pomiar prędkości, odległości i czasu. Monitorowanie czynności kierowcy - między innymi czas pracy. Monitorowanie prowadzenia pojazdu.	Tachograf / Symulator tachografu	wysyła/ odbiera

Tabela 7.1. Zestawienie doboru urządzeń realizujących funkcje autobusu (4/5)

Numer funkcji	Funkcja	Funkcja szczegółowa	Urządzenie realizujące	Dane urządzenie kierunek komunikacji
15.1	Wsparcie kierowcy	Kontrola ciśnienia w oponach	Sterownik kontroli ciśnienia	wysyła
15.2		Pomiar ilości pasażerów w celu weryfikacji czy pojazd nie jest przeciążony	Sterownik ECAS - funkcja ważenie	wysyła
15.3		Ostrzeżenie przechodniów o nadjeżdżającym pojeździe	Sterownik AVAS (Audible Vehicle Alert System)	odbiera
15.4		Wsparcie kierowcy w zakresie ekonomicznej energetycznie jazdy	Ekonomizer	wysyła/ odbiera
15.5		Wsparcie kierowcy w zakresie monitorowania obszaru wokół pojazdu	Sterownik Mobileye	wysyła/ odbiera
15.6		Zapewnienie kierowcy widoku obiektów znajdujących się wokół pojazdu wraz z dodatkowymi wskazaniem dotyczącymi bezpieczeństwa	Sterownik lusterek elektronicznych	odbiera
15.7		Utrzymanie zadanej prędkości jazdy z uwzględnieniem i jej redukcją do pojazdów poprzedzających	Sterownik ACC (Adaptive Cruise Control)	wysyła/ odbiera
16	Rejestracja danych wypadkowych	Rejestracja danych w trakcie wypadku	Wypadkowy rejestrator danych	odbiera

Tabela 7.1. Zestawienie doboru urządzeń realizujących funkcje autobusu (5/5)

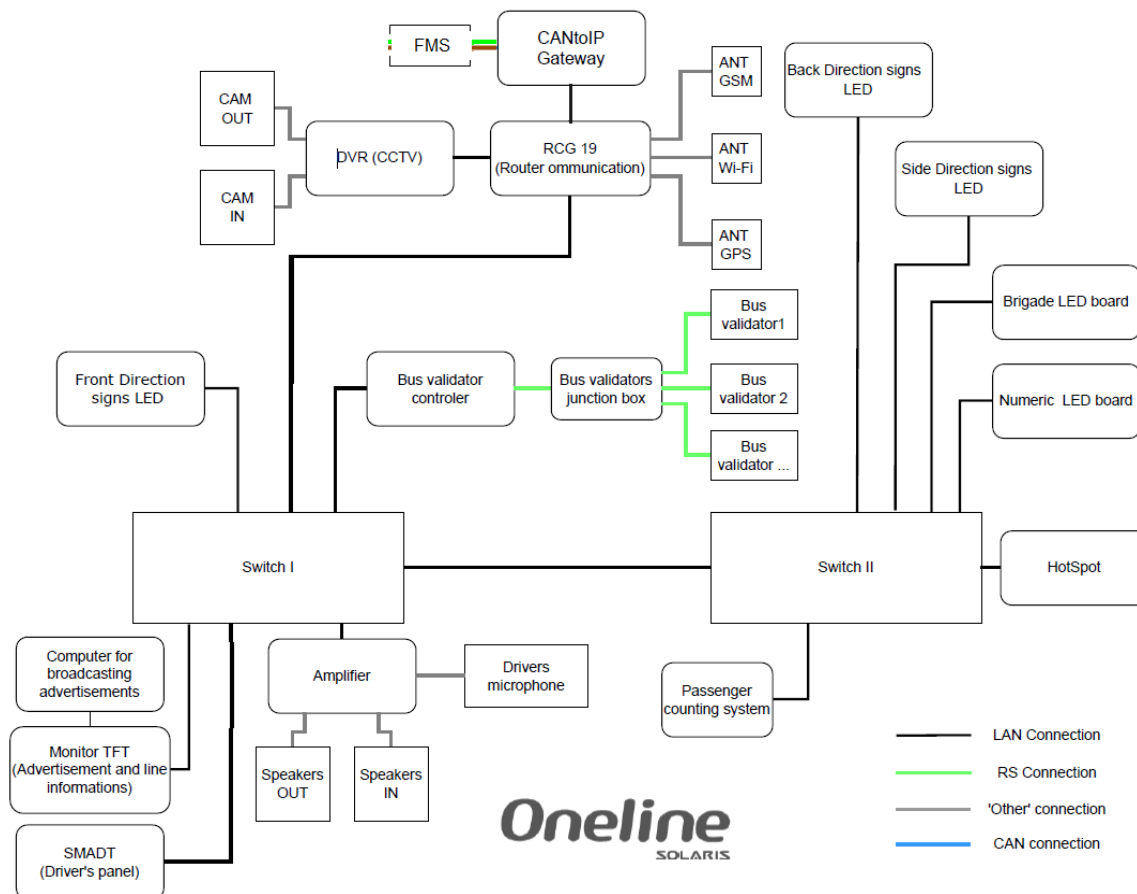
Numer funkcji	Funkcja	Funkcja szczegółowa	Urządzenie realizujące	Dane urządzenie kierunek komunikacji
17	Automatyczne sterowanie zachowaniem wagonów w pojazdach przegubowych	Redukcja momentu w układzie napędowym w sytuacjach zagrażających integralności pojazdu. Tłumienie ruchomości przegubu w trakcie jazdy	Elektronika przegubu	wysyła/ odbiera
18	Utrzymanie komfortu jazdy	Automatyczna regulacja zawieszenia pojazdu podczas jazdy oraz na postoju. Ułatwienie dla pasażerów podczas wchodzenia i wychodzenia z pojazdu - przyklęk.	Sterownik zawieszenia ECAS (Electronically Controlled Air Suspension)	wysyła/ odbiera
19	Utrzymanie komfortu klimatycznego	Automatyczne utrzymywanie temperatury wnętrza pojazdu w zależności od warunków atmosferycznych	Sterownik klimatyzacji	wysyła/ odbiera
20	Ułatwienia dla osób niepełnosprawnych	Automatyczne wsparcie w pokonywaniu barier architektonicznych dla osób niepełnosprawnych przy wymianie potoku pasażerskiego	Sterownik elektrycznej rampy inwalidy	wysyła/ odbiera
21	Zarządzanie pojazdem	Zarządzanie funkcjami i urządzeniami w pojeździe	Komputer centralny pojazdowy	wysyła/ odbiera
22	Zdalny monitoring pojazdu	Weryfikacja stanu pojazdu, wsparcie w diagnozie problemów i usterek	eSConnect	wysyła/ odbiera
(...)				
N	Informowanie pasażerów w pojeździe i poza nim o parametrach, pozycji i kierunku jazdy	Automatyczna wymiana danych pomiędzy pojazdem a systemami komunikacji i informacji pasażerskiej	FMS (Fleet Management Systems Interface)	wysyła/ odbiera

Analiza zakresu funkcji niezbędnych do implementacji w pojeździe, przeprowadzona przez autora rozprawy, wskazała na 3 podstawowe grupy urządzeń, wymagających możliwości zewnętrznej komunikacji.

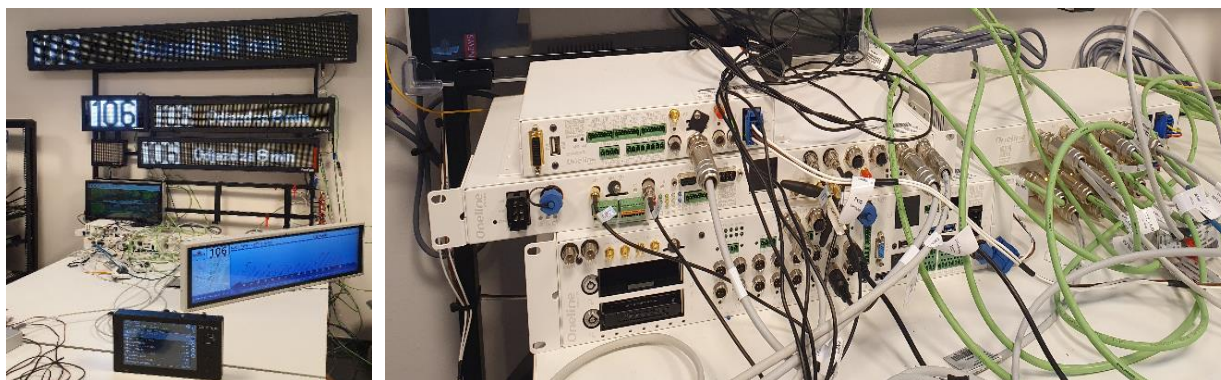
Są to systemy:

- Informacji pasażerskiej oraz zarządzania flotą wpływające na komfort pasażerów związany na przykład z szczegółowymi informacjami na temat pokonywanej trasy i czasów przyjazdu na określone przystanki
- Zdalnej diagnostyki (np. eSConnect), których instalacja jest niezbędna w celu obniżenia kosztów diagnostyki i serwisowania pojazdów.
- Komunikujące się ze stacjami ładowania (autobusy elektryczne) lub tankowania (autobusy wodorowe).

Na rysunkach 7.1. i 7.2. przedstawiono architekturę oraz stanowisko testowe autorskiego projektu systemu informacji pasażerskiej zaprojektowanego w firmie Solaris. Trafił on już do portfolio firmy i jest stosowany w autobusach. System ten sprzedawany pod marką Oneline. Łącznikiem pomiędzy systemem Oneline a resztą architektury jest interfejs FMS [73] o prędkości przesyłu wynoszącej 250 kb/s. Interfejs FMS działa jako zapora uniemożliwiająca wprowadzenie zakłóceń do pozostałej części architektury autobusu. Dodatkowo tłumaczy on zastrzeżone przez producenta pojazdu sygnały na sygnały w standardzie FMS oraz filtruje dane wybierając tylko te, przeznaczone do dalszego udostępniania. Producenci autobusów i autokarów, w ramach standardu FMS, zgodzili się udostępniać stronom trzecim dane o pojazdach. Producenci wspólnie zaprojektowali interfejs bazując na standardzie FMS dla samochodów ciężarowych i autobusów zgodnie z normą SAE J1939. Zaprojektowany interfejs nie jest obligatoryjnym rozwiązaniem a obsługiwane przez niego informacje są zależne od wyposażenia pojazdu [73]. Interfejs ten stanowi natomiast ułatwienie w procesie instalacji dodatkowych urządzeń i rozwiązań nie będących na standardowym wyposażeniu pojazdu. Przykładami takich urządzeń są dodatkowe akcesoria instalowane przez operatorów po zakupie pojazdu. Wykorzystanie tego interfejsu nie ingeruje w instalację autobusu, a więc nie powoduje przerwania obowiązującej gwarancji pojazdowej.



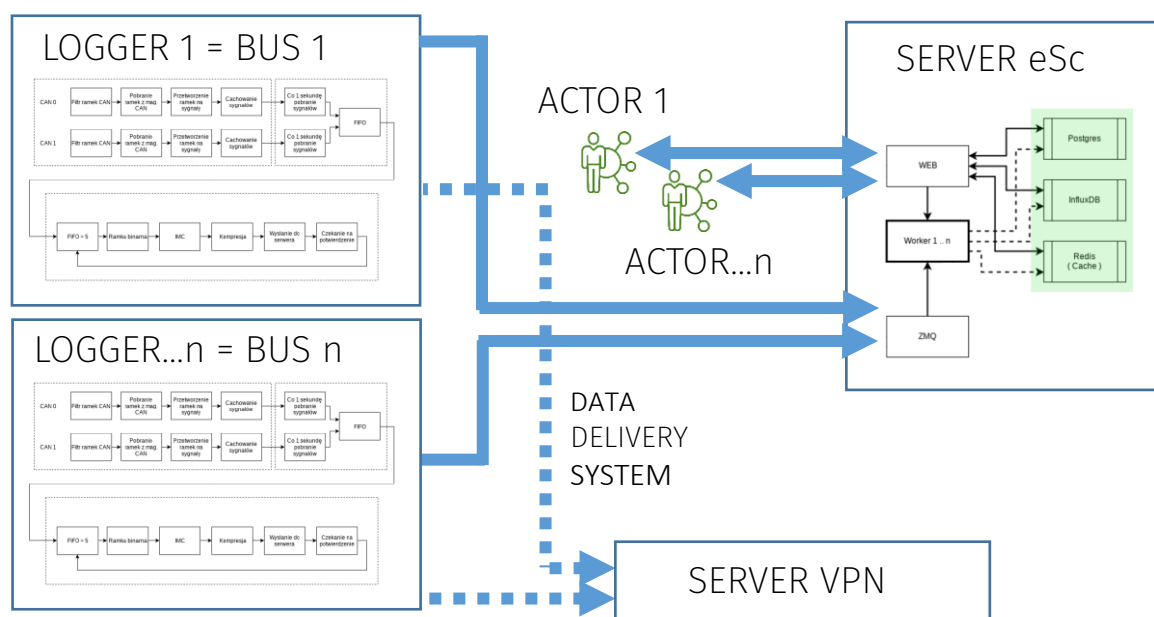
Rys. 7.1. System Oneline [16]



Rys. 7.2. Stanowisko testowe systemu Online [16]

Systemy IoT takie jak eSConnect pozwalają na wprowadzenie nowej jakości w diagnostyce autobusów. Pozwalają na przejście od rozwiązań post factum do rozwiązań predykcyjnych w których system poinformuje o prawdopodobieństwie i czasie możliwej awarii [125]. Szczegóły dotyczące eSConnect – rozwiązania stworzonego i zaimplementowanego przez firmę Solaris zostały przedstawione na joint Technical Meeting of Polish Chapters IEEE RAS and IEEE VTS: November 27 2020. Prezentacja „How to design IoT system for buses?”

Chełchowski Ł., Pikuła M., Sierszyński M., Automated and Intelligent Vehicles [9]. Aktualne korzyści z zastosowania systemu sprowadzają się w głównej mierze do redukcji czasu na przygotowanie warsztatu do naprawy, możliwości analizy danych historycznych w celu zwiększenia efektywności operacyjnej czy też unikania niepotrzebnych wizyt serwisu u klienta. Powyższe korzyści przekładają się bezpośrednio na wyższą dostępność floty oraz obniżenie kosztów eksploatacji autobusów. Zaimplementowane systemy zdalnej diagnozy generują jednak duże ilości danych, którymi należy w odpowiedni sposób zarządzać. Podsumowanie przedstawiające rozwiązanie implementowane w firmie Solaris dostępne jest w Raporcie 2021 cyfrowa nauka, gospodarka i społeczeństwo, red. Magdalena Baranowska-Szczepańska wydanym przez Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe str. 86–87. „Zarządzanie danymi w celu zwiększenia niezawodności eksploatacyjnej autobusów miejskich, Sierszyński M., Pril A., Białek R., Chełchowski Ł.” [125]. Rozwiązanie to zapewnia nie tylko możliwość przeprowadzenia zdalnej diagnozy stanów awaryjnych, które mogą wystąpić w autobusie ale również zapewnia zewnętrzny dostęp do danych w czasie rzeczywistym oraz możliwość ich archiwizacji w formie zagregowanej na serwerze. Architektura systemu została zaprezentowana na rysunku numer 2.8. Aktualnie ilość danych gromadzona w okresie jednego roku kalendarzowego w systemie eSconnect to 6 TB. Są to dane z 1500 autobusów. Aby móc wydobyć z zarejestrowanych danych interesujące autora informacje wymagane było użycie zaawansowanych zautomatyzowanych metod ich przygotowania, analizy i wizualizacji.



Rys. 7.3. Architektura eSConnect [9]

Kolejny proces w zaproponowanej metodyce dotyczy szczegółowej analizy interfejsów komunikacyjnych urządzeń nadzorczo-sterujących, na podstawie której autor rozprawy tworzy matrycę interakcji. Matryca wskazuje powiązania komunikacyjne wraz z zakresem przesyłanych danych. Komunikacja między poszczególnymi urządzeniami odbywa się za pomocą różnych metod dystrybucji wiadomości wskazanych w tabeli 7.2 oraz w różnych trybach transmisji danych wyszczególnionych w tabeli 7.3. Analiza odbywa się na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej (DTR) poszczególnych urządzeń oraz danych w formacie *.dbc (Database Container) uzyskanych do niektórych z urządzeń. Database Container jest prostym plikiem tekstowym, który zawiera definicje wiadomości, sygnałów, jednostek i innych parametrów wykorzystywanych w systemie CAN. Informacje te służą do dekodowania surowych danych magistrali CAN, co umożliwia ich interpretację i analizę. Plik jest tworzony przez producenta lub dostawcę systemu, a następnie udostępniany użytkownikom końcowym do integracji z ich narzędziami i systemami [126].

Tabela 7.2. Metody dystrybucji wiadomości [127]

Metoda dystrybucji wiadomości	Opis
Unicast	Nadawca komunikuje się wyłącznie z jednym adresatem
Broadcast	Rolę potencjalnych odbiorców pełnią wszystkie dołączone do magistrali węzły z uwzględnieniem nadawcy
Multicast	Węzeł nadający przesyła wiadomości do określonej grupy odbiorców

Tabela 7.3. Tryby transmisji danych [128]

Tryb transmisji danych	Opis
Simplex	Transmisja jednokierunkowa
Half-duplex	Transmisja dwukierunkowa naprzemienna
Full-duplex	Transmisja prowadzona jednocześnie w dwóch kierunkach

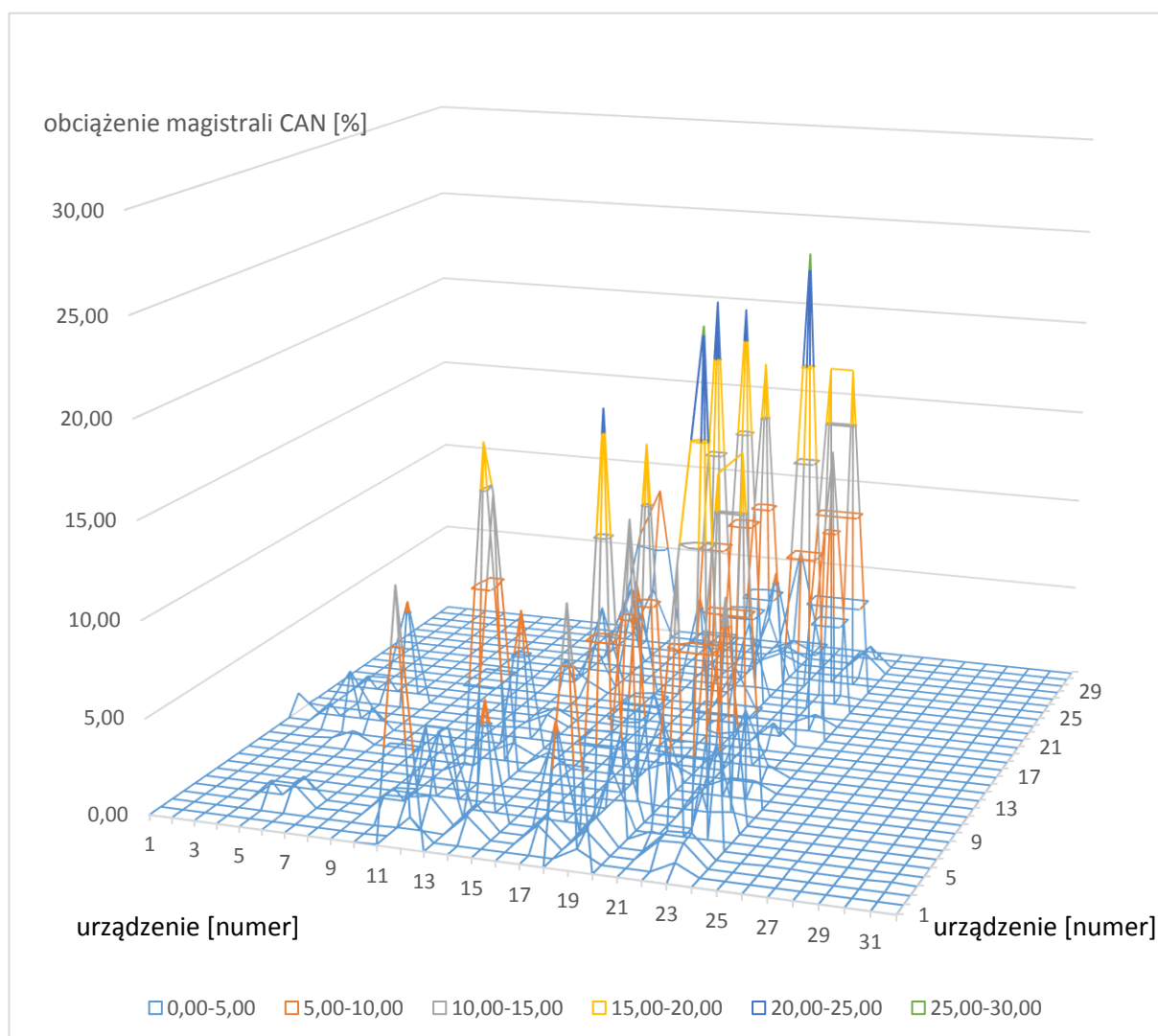
Autor rozprawy dobiera urządzenia a nie je projektuje, gdyż w przeciwieństwie do branży samochodów osobowych autobusy elektryczne produkowane są w wielokrotnie mniejszych ilościach (pojedyncze tysiące, a nie miliony sztuk rocznie). W takiej sytuacji nakłady związane z projektowaniem własnych komponentów nadzorczo-sterujących

lub zlecenie ich wykonania zgodnie z własnymi specyfikacjami, certyfikowanie ich oraz uzyskanie homologacji spowodowałoby zbyt wysoki koszt finalnego produktu. W branży autobusów elektrycznych wykorzystywane są więc dostępne na rynku programowalne lub parametryzowane urządzenia sterujące, które niestety determinują użycie jedynie zaimplementowanych w nich możliwości komunikacyjnych. W przypadku większości urządzeń aktualnie dostępnych na rynku jest to magistrala CAN, która umożliwia działanie w trybie half-duplex, a więc transmisję dwukierunkową naprzemienną.

Bazując na informacjach od producentów urządzeń nadzorczo-sterujących dotyczących ich interfejsów programowych i komunikacyjnych oraz danych z przeprowadzonych na stanowisku testowym (Rys. 2.14.) testów, autor rozprawy dokonał syntezy uzyskanych danych i informacji w formie tabeli przedstawiając wzajemne korelacje pomiędzy poszczególnymi urządzeniami. Wiersze w tabeli są pojedynczymi wiadomościami wysyłanymi i odbieranymi przez urządzenia. Ze względu na rzeczywisty rozmiar uzyskanej tabeli (kilkaset pozycji) oraz zastrzeżenia producentów dotyczące poufności danych w rozprawie możliwe jest wskazanie tylko jej uproszczonego fragmentu ilustrującego zagadnienie. Fragment macierzy korelacji przedstawiono w tabeli 7.4. Macierz zaimportowano do systemu obliczeniowego w postaci macierzy $M_{KORELACJI}$, której wiersze oraz kolumny odpowiadają poszczególnym urządzeniom, które mają być zaimplementowane w systemie. Na przecięciu kolumny i wiersza dla urządzeń komunikujących się ze sobą wysyłającego i odbierającego wiadomości obliczono sumaryczne maksymalne obciążenia magistrali generowane dla całkowitego transferu danych pomiędzy danymi urządzeniami przy założonej dla potrzeb analizy prędkości transmisji magistrali.

$$M_{KORELACJI} = [a_{i,j}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & a_{i,j} & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Gdzie $a_{i,j}$ wskazuje sumę wszystkich maksymalnych obciążeń komunikacyjnych generowanych pomiędzy danymi urządzeniami. Graficzna reprezentacja fragmentu macierzy dla rozpatrywanych urządzeń została zaprezentowana na rysunku 7.1. Ramki CAN o różnych częstotliwościach, zależnie od prędkości transmisji magistrali, w różny sposób ją obciążają. Fakt ten wzięto pod uwagę przy tworzeniu macierzy korelacji. Trzy ostatnie wiersze w macierzy są informacją dodatkową, stanowią o prędkości transmisji dla której obliczenia zostały wykonane.



Rys. 7.4. Obciążenie magistrali CAN generowane przy maksymalnej transmisji danych pomiędzy poszczególnymi urządzeniami przy prędkości transmisji 250kb/s

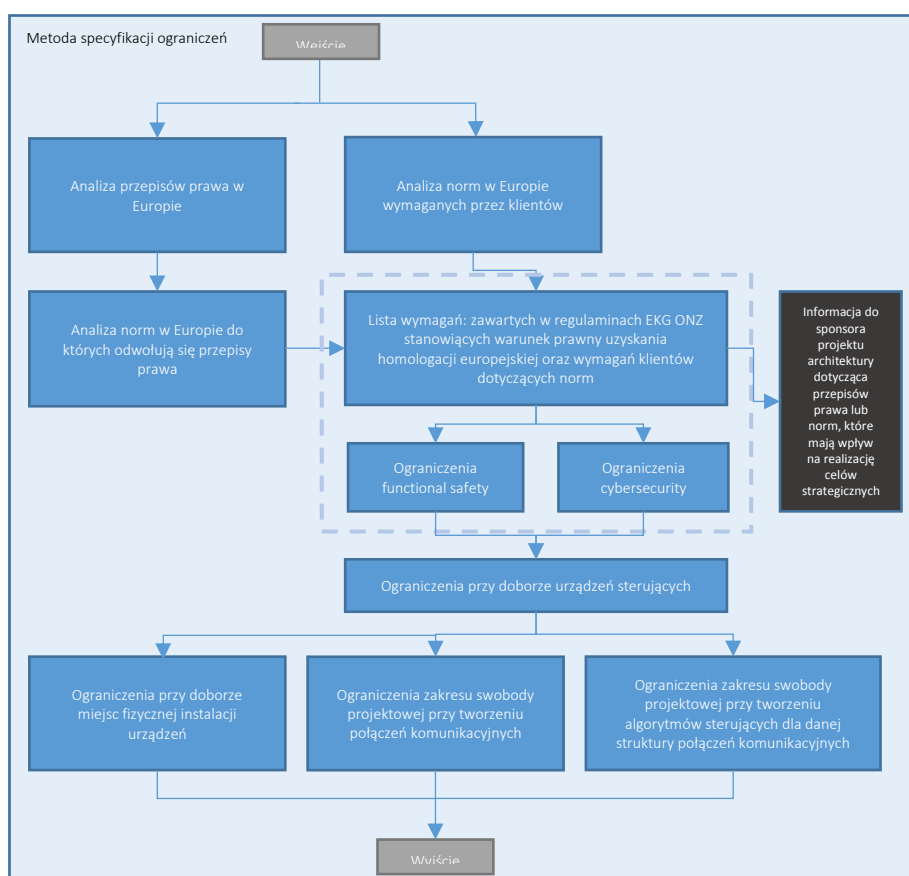
Tabela 7.5. obciążenia % linii CAN dla poszczególnych częstotliwości ramki i prędkości magistrali używanych w autobusach

Częstotliwość ramki [ms]	Obciążenie [%] dla prędkości CAN 125 kb/s	Obciążenie [%] dla prędkości CAN 250 kb/s	Obciążenie [%] dla prędkości CAN 500 kb/s
10	10,88	5,64	2,82
20	5,44	2,82	1,41
50	2,17	1,12	0,56
100	1,08	0,56	0,28
200	0,54	0,28	0,14
250	0,43	0,22	0,11
500	0,21	0,11	0,055
>1000	0,1	0,05	0,025

Skalkulowano sumaryczną ilość danych w macierzy korelacji. Na tej podstawie wykonując obliczenia dla najniższej prędkości transmisji występującej w implementowanych urządzeniach a więc 125kb/s, przy założeniu 50% rozbudowy architektury, wyliczono sumaryczne obciążenie, które zostałyby wygenerowane na pojedynczej wirtualnej magistrali. Wynosi ono 716%. Przy założeniu maksymalnego obciążenia pojedynczej magistrali w tworzonym modelu na poziomie 80%, oznacza to, iż nowa topologia architektury powinna zapewnić prawidłową transmisję danych w takich warunkach przy 9 pojedynczych magistralach. Przeprowadzając tożsamą analizę dla maksymalnej prędkości magistrali obsługiwanej przez niektóre urządzenia również 500kb/s autor uzyskał wynik 3 pojedynczych magistral. Na tej podstawie zdecydowano, iż wybrana architektura aby spełnić cele strategiczne musi bazować na koncepcji z wieloma magistralami komunikacyjnymi. Kolejnym aspektem przemawiającym za takim rozwiązaniem są ograniczenia prędkości transmisji niektórych sterowników. Część z nich umożliwia transmisję jedynie na poziomie 125 kb/s lub 250 kb/s. Muszą więc zostać umieszczone na odrębnych magistralach komunikacyjnych. W tworzonym rozwiązaniu ze względu na korelacje występujące pomiędzy poszczególnymi urządzeniami należy zapewnić komunikację pomiędzy magistralami. Jako bazowe zaproponowano skalowalne rozwiązanie, w którym magistrale, podłączone do komputerów pokładowych tworzą topologie gwiazdowe, a pomiędzy komputerami stworzony jest most komunikacyjny. Przeprowadzono analizy i symulacje stanowiskowe po których zdefiniowano innowacyjną koncepcję architektury nadzorczo – sterującej. Będzie ona oparta o dwie jednostki centralne, łączące w sobie wiele funkcji w tym funkcję gateway'ów.

8 Metodyka projektowania: Ograniczenia

Z przeprowadzonych analiz dotyczących przepisów prawa i norm, autor rozprawy wysunął wnioski, że tworząc metodykę projektowania architektury nadzorczo-sterującej dla autobusów elektrycznych kluczowym aspektem koniecznym do uwzględnienia są ograniczenia. Ograniczenia rozumiane jako obostrzenia (np. normy, przepisy prawa, zarządzenia, możliwości techniczne, technologiczne czy też ekonomiczne) ograniczające swobodę działania. W ramach tworzenia architektury analizowano ograniczenia natury prawnej, technicznej jak i komercyjnej (kosztowej i dostępności komponentów). W procesie projektowania nowych rozwiązań dla autobusów najważniejsze jest uwzględnienie ograniczeń wynikających z przepisów prawa oraz norm w nich zawartych, których umiejętne zastosowanie umożliwi otrzymanie homologacji dla pojazdu i wprowadzenie go na rynek. Nie można oczywiście umniejszać roli związanej z dobrymi praktykami dotyczącymi projektowania zagadnień technicznych oraz umiejętności negocjacyjnych w trakcie pozyskiwania sterowników i innych komponentów poza organizacją. Na rysunku 8.1. wskazano schemat, zaproponowanej przez autora rozprawy, metody specyfikacji ograniczeń, która wynika z przeprowadzonych przez niego analiz.



Rys. 8.1. Metoda specyfikacji ograniczeń

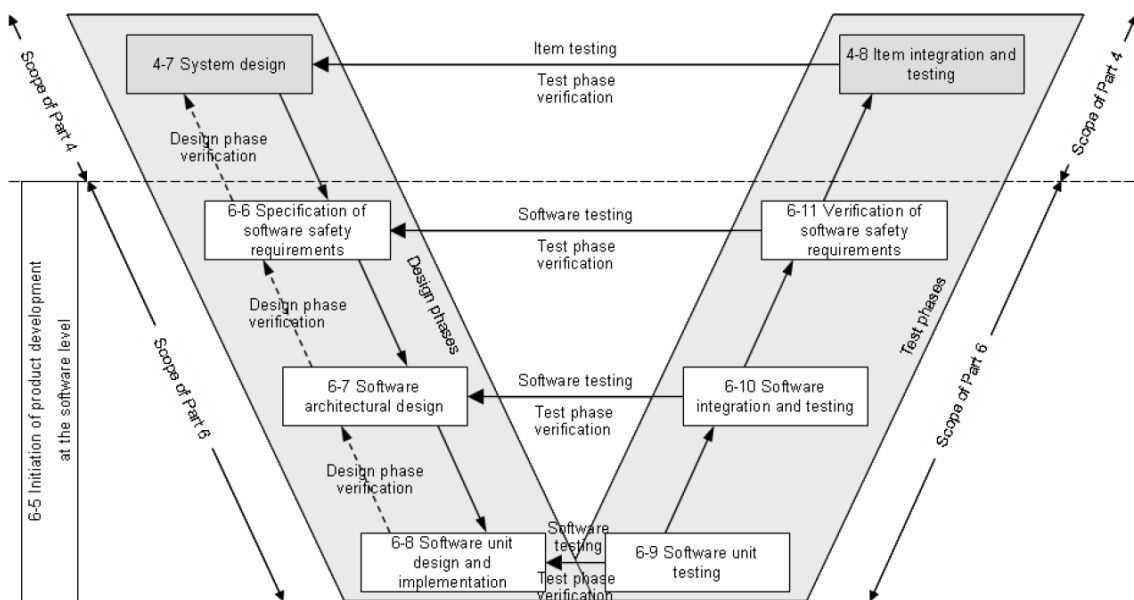
8.1 Ograniczenia wynikające z założeń functional safety

Decydującym o finalnym kształcie architektury nadzorczo-sterującej czynnikiem, wskazanym przez autora rozprawy jest bezpieczeństwo funkcjonalne. Bezpieczeństwo funkcjonalne jest to podejście przy tworzeniu produktów uwzględniające brak nieuzasadnionego ryzyka związanego z zagrożeniami spowodowanymi nieprawidłowym funkcjonowaniem i awariami systemów elektrycznych i elektronicznych [129]. Z punktu widzenia prawa Unia Europejska wprowadza dyrektywy takie jak na przykład Dyrektywa w Sprawie Ogólnego Bezpieczeństwa Produktów 2001/95/EC (General Product Safety Directive – GPSD) [130], które mają na celu zapewnienie wysokiego poziomu ochrony bezpieczeństwa i zdrowia konsumentów. Przepisy te dotyczą każdego produktu wprowadzanego na rynek. Powstało również wiele norm, opisujących należyte działanie w powyższym zakresie z uwzględnieniem wymagań i rozwiązań stosowanych w poszczególnych branżach przemysłu.

1. kolejowa IEC 62279 czy też EN 5012x używana w grupie CAF
2. maszynowa IEC 62061
3. medyczna IEC 60601
4. związana z maszynami dla rolnictwa ISO 25119
5. związana z maszynami używanymi do robót ziemnych ISO 15998
6. związana z przemysłem procesowym IEC 61511
7. związana z energetyką jądrową IEC 61513
8. stosowana w przypadku urządzeń gospodarstwa domowego IEC 60335
9. Lotnictwo – Mil-Hdbk-470A – Design and developing maintainable products and systems (Eurofighter Typhoon); MIL-STD-882D – Standard practice for system safety (Eurofighter Typhoon)

Wykonany przez autora rozprawy przegląd norm zidentyfikował korelacje pomiędzy poszczególnymi normami branżowymi dotyczącymi bezpieczeństwa a normą IEC 61508 (Bezpieczeństwo funkcjonalne elektrycznych/ elektronicznych/ programowalnych elektronicznych systemów bezpieczeństwa). Opublikowana przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną norma zawiera informacje na temat metod stosowania, projektowania, wdrażania i utrzymywania automatycznych systemów ochronnych zwanych w niej systemami bezpieczeństwa. Na jej bazie powstała również norma dotycząca systemów elektrycznych

i elektronicznych w pojazdach: ISO 26262. Od czasu powstania normy ISO 26262, norma IEC 61508 nie jest już używana w motoryzacji. W normie ISO 26262 zawarto szereg odwołań do innych norm związanych z bezpieczeństwem, których przykłady autor rozprawy przedstawił w artykule „Analiza wybranych przepisów i norm istotnych z punktu widzenia projektowania autobusów elektrycznych część 2” [97]. Systemy elektryczne i elektroniczne aby być zgodne z normą ISO 26262 powinny być opracowywane przy użyciu tak zwanej metodologii "V" [131]. Przykład zastosowania metodologii V na podstawie procesu tworzenia oprogramowania przedstawiono na rysunku 8.2. Użycie metodologii V, na której parta jest cała norma zapewnia, że każdy z poszczególnych etapów rozwoju jest w sposób wystarczający i odpowiedni weryfikowany. Chociaż norma przedstawia wymagania dotyczące całego cyklu życia produktu, co przedstawione zostało na rysunku numer 8.3., to patrząc na jej cały zakres tylko z punktu widzenia producenta autobusów najważniejsze jej fragmenty dotyczą etapów projektowania (w szczególności etapu koncepcji) i całościowej walidacji, zaś dla dostawcy, na etapie systemu, urządzeń i oprogramowania. System elektryczno-elektroniczny zamontowany w pojeździe może być uznany za bezpieczny, jeżeli spełnia on cele bezpieczeństwa, które zostały określone w fazie analizy zagrożeń i ocena ryzyka (Hazard Analysis and Risk Assessment -HARA) [129].



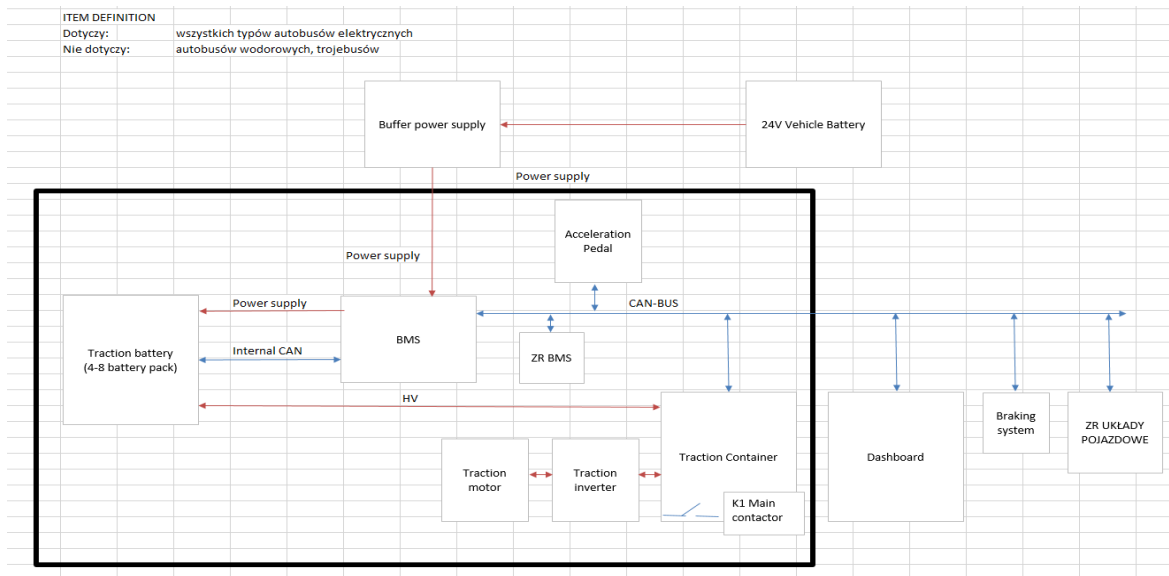
Rys. 8.2. Metodologia V [132]

analizie bazowe systemy i funkcje stosowane w autobusach oraz zidentyfikował funkcje, dla których istnieje możliwość zastosowania bezpieczeństwa funkcjonalnego zgodnie z ISO 26262. Przykładowe wybrane funkcje szczegółowe związane z układem napędowym, hamulcowym oraz zawieszenia zostały podane w tabeli 8.1. Analizę dwóch przedstawiono w ramach niniejszej rozprawy bardziej szczegółowo.

Tabela 8.1. Przykładowe wybrane funkcje szczegółowe dla układów napędowego, hamulcowego oraz zawieszenia dla których możliwe jest zastosowanie bezpieczeństwa funkcjonalnego

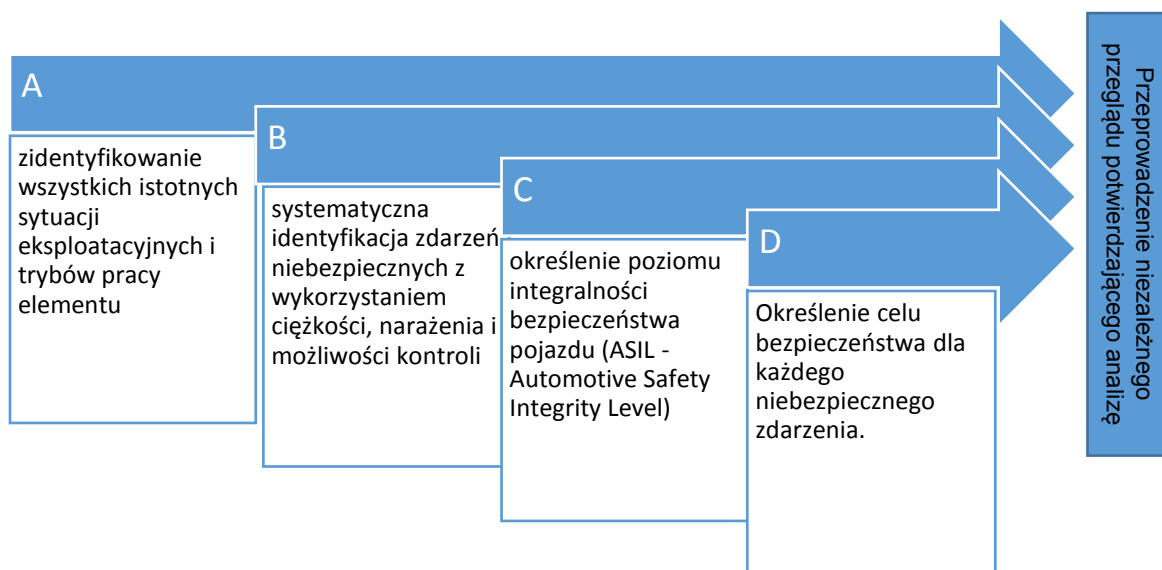
Układ	Funkcja	Wykorzystanie magistrali do przesyłania sterowania
Układ Napędowy	Załączenie napędu	TAK
	Zadawanie kierunku jazdy	TAK
	Żądanie momentu	TAK
	Redukcja momentu	TAK
	Ogranicznik prędkości max.	TAK
	Tempomat	TAK
	Rozłączenie awaryjne	NIE
	Blokada jazdy	TAK
Układ hamulcowy	Ładowanie/Rozładowanie baterii trakcyjnych	TAK
	Hamowanie elektrodynamiczne	TAK
	Hamulec przystankowy	TAK
	Awaryjne luzowanie hamulca przystankowego	TAK
	Awaryjne luzowanie hamulca ręcznego	TAK
	ABS	TAK
	ASR	TAK
	ESC	TAK
	Hill Holder (aktywacja/żądanie dezaktywacji)	TAK
	Hamowanie po CAN	TAK
Układ zawieszenia	Sterowanie kompresorem powietrza	TAK
	Żądanie przykłąku	TAK
	Żądanie poziomu wysokiego	TAK
	Żądanie poziomu niskiego	TAK
	Automatyczna regulacja	TAK

Po przygotowaniu planu bezpieczeństwa oraz identyfikacji funkcji dla których istnieje możliwość zastosowania bezpieczeństwa funkcjonalnego zgodnie z ISO 26262 autor kontynuował działania w zakresie przeprowadzania kolejnych analiz. Wynikiem pierwszej analizy było zdefiniowanie elementów „Item”. Zdefiniowany element „Item” opisano z uwzględnieniem jego zależności i interakcji ze środowiskiem oraz innymi elementami. W normie ISO 26262:2011 określono tylko jakie informacje powinny być zawarte w opisie elementu „Item” lecz nie podano, jak taki opis należy opracować. Na rysunku 8.4. autor rozprawy przedstawił swoją propozycję opisu na przykładzie „Itemu” dla systemu napędu.



Rys. 8.4. Zdefiniowany ITEM dla systemu napędu [16]

Następnym wymaganym przez normę krokiem w fazie koncepcyjnej jest przeprowadzenie analizy zagrożeń i ocena ryzyka HARA. Na rysunku 8.5 przedstawiono główne etapy analizy.



Rys. 8.5. Główne etapy analizy HARA [134]

Analizę HARA przeprowadzoną w ramach projektu przez autora, wpływającą na kształt topologii logicznej oraz fizycznej architektury nadzorczo-sterującej pokazano w tabeli 8.2. Przeprowadzona analiza pozwoliła na określenie i skategoryzowanie zagrożenia związanego z danym elementem „Item” oraz sformułowanie celów bezpieczeństwa.

Tabela 8.2. Analiza HARA z wynikiem ASIL C przeprowadzona z punktu widzenia systemu baterii trakcyjnej sterowanego z pomocą BMS oraz komputera centralnego (1/2)

Funkcja	Scenariusz wystąpienia błędu	Sytuacja drogowa	Zagrożenie	Łagodzenie / zabezpieczenie	OCENA (prawdop. / dotk. / kontrol.)			ASIL	Stan bezpieczny	Safety Goal	Dla jakiego systemu	Safety Goal
					E	S	C					
Rozładownie - Dostarczanie mocy do układu HV. (zdefiniowanego jako fálownik)	Zbyt duzo mocy [dotyczy napędu] - jest to przypadek, który nie może wystąpić w naszych autobusach z punktu widzenia baterii, ponieważ bateria nie może dać więcej prądu niż urządzenia która ją obciążają. Zabezpieczenia po stronie innych urządzeń i systemów.	Jazda	nieintencjonalne przyspieszanie	Pedal hamulca Moment hamulca pneumatycznego > momentu napędowego Zabezpieczenie w BMS Rozłączenie HV grzybkami Zdjęcie nogi z pedału przyspieszenia	E 4	S 3	C1	B	Zatrzymanie pojazdu	Rozpięcie styczników baterii następujące po wykryciu nieskontrolowanego przyspieszania	Bateria	C
		oczekiwanie przed przejazdem kolejowy + przejazd	nieintencjonalne przyspieszanie		E 3	S 3	C1	A	n/d			
		przyspieszanie	nieintencjonalne przyspieszanie		E 4	S 3	C1	B	Zatrzymanie pojazdu			
		Wyprzedzanie	nieintencjonalne przyspieszanie		E 2	S 3	C1	QM	n/d			
		jazda pod górkę >8% >100m	nieintencjonalne przyspieszanie		E 4	S 2	C1	A	Zatrzymanie pojazdu			
		jazda po autostradzie / ekspresowce	nieintencjonalne przyspieszanie		E 4	S 2	C1	A	Zatrzymanie pojazdu			
		Skrzyżowanie	nieintencjonalne przyspieszanie		E 3	S 3	C2	C				
		Pantografem na przystanku	nieintencjonalne przyspieszanie / uszkodzenie infrastruktury ładowania		E 4	S 3	C0	A	n/d			
		Plug-in przystanku	nieintencjonalne przyspieszanie / uszkodzenie infrastruktury ładowania		E 3	S 3	C0	QM	n/d			
		Pantografem na zajezdni	nieintencjonalne przyspieszanie / uszkodzenie infrastruktury ładowania		E 4	S 3	C0	A	Zatrzymanie pojazdu			
Plug-in na zajezdni	nieintencjonalne przyspieszanie / uszkodzenie infrastruktury ładowania	E 4	S 3	C0	A	Zatrzymanie pojazdu						
Zbyt mało mocy / brak mocy. Przyczyny: Brak komunikacji z BMS, bład BMS, nieprawidłowe obliczenia w ZR zakresu użytecznego SOC lub dynamicznego DOD dla stałego zasięgu wprowadzające tryb jazdy awaryjnej i redukcję mocy, inne	Jazda	brak zagrożenia - wolna jazda	Brak	E 4	S 1	C1	QM	n/d	BMS musi ciągle zapewniać wystarczającą moc, ZR musi podawać prawidłowe wartości ograniczeń aby napęd nie został wprowadzony w tryb awaryjny lub z ograniczeniami mocy.	Bateria i ZR	C	
	przejazd przez przejazd kolejowy	Zatrzymanie się na przejeździe kolejowym		E 2	S 3	C2	A	Kontynuacja jazdy				
	przejazd przez torowisko tramwajowe	Zatrzymanie się na przejeździe tramwajowym		E 3	S 3	C3	C	Kontynuacja jazdy				
	włączanie się do ruchu	Zbyt mało mocy - Zagrożenie kolizją z pojazdem nadjeżdżającym przy włączaniu się do ruchu		E 3	S 2	C2	A	Kontynuacja jazdy				
	wyprzedzanie	Ryzyko zderzenia czołowego		E 2	S 3	C3	B	Kontynuacja jazdy				
	jazda pod górkę >8% >100m	Zatrzymanie się na drodze - niewielkie ryzyko		E 4	S 1	C1	QM	n/d				
	jazda po autostradzie / drodze ekspresowej	Jazda ze zbyt małą prędkością		E 4	S 2	C2	B	Kontynuacja jazdy				
	Skrzyżowanie	uderzenie w bok pojazdu, gdy autobus jeszcze nie zdążył zjechać ze skrzyżowania		E 3	S 3	C3	C	Kontynuacja jazdy				

Tabela 8.2. Analiza HARA z wynikiem ASIL C przeprowadzona z punktu widzenia systemu baterii trakcyjnej sterowanego z pomocą BMS oraz komputera centralnego (2/2)

Funkcja	Scenariusz wystąpienia błędu	Sytuacja drogowa	Zagrożenie	Łagodzenie / zabezpieczenie	OCENA (prawdop. / dotk. / kontrol.)			ASIL	Stan bezpieczny	Safety Goal	Dla jakiego systemu	Safety Goal
					E	S	C					
Rekuperacja energii do baterii	Zbyt niska rekuperacja (również brak)	Hamowanie	brak zagrożenia	Hamulce Rezystor hamowania	E4	S1	C1	QM	n/d	Wyświetlić powiadomienie na pulpicie kierowcy o konieczności natychmiastowego zatrzymania pojazdu + sygnały dźwiękowe.	Pojazd - ZR lub pulpity	B
		jazda z góry >-8% >100m	Ryzyko przegrzania hamulców - spadek skuteczności hamowania		E4	S3	C1	B	Zatrzymanie pojazdu			
	Rekuperowanie większej ilości energii niż pozwala pojemność baterii	jazda z góry >-8% >100m (bardzo długi odcinek)	Ładowanie baterii powyżej 100% SOC grozi przegrzaniem i potencjalnie pożarem		E4	S2	C1	A	Zatrzymanie pojazdu			
	Rekuperowanie większej mocy niż pozwala bateria	Ostre Hamowanie (mało liczba packów bateryjnych)	Przegrzanie baterii - brak ryzyka dla człowieka		E1	S2	C3	QM	n/d			
Dostarczanie energii z urządzenia zewnętrznego do baterii	Zbyt dużo mocy		sytuacja niebezpieczne - np. prekondycjonowanie włączone + ładowanie. Osoba załącza / wyłącza odbiorniki a bateria jest naładowana / rozładowana. Możliwe przegrzanie i przeladowanie baterii	zabezpieczenia baterii przy 770 V załącza się rezystor (ZR) zabezpieczenie SOC 90-95%	E4	S2	C0	QM	Zasilanie 24V - należy uwzględnić brak zasilania	Pojazd - koncepcja zasilania 24V	B	
	Zbyt mało mocy		brak zagrożenia		E4	S0	C0	QM				

W tabeli 8.2. przedstawiono analizę HARA, której najwyższym wynikiem jest ASIL C. Oznacza to między innymi konieczność zastosowania w architekturze urządzeń nadzorczo-sterujących spełniających cel bezpieczeństwa na poziomie ASIL C. W tabeli 8.2 autor rozprawy zaproponował również wynikające z przeprowadzonej analizy przypadków cele bezpieczeństwa (safety goals) dla poszczególnych funkcji. Należy pamiętać, że analiza bezpieczeństwa powinna przedstawiać jasny, wyczerpujący i możliwy do obrony argument, że działanie systemu w danym kontekście jest akceptowalnie bezpieczne [135], [134]. W tabeli 8.3. autor rozprawy przedstawił analizę HARA dla funkcji Hill Holdera ulokowanej w układzie hamulcowym, której wynikiem jest QM. Oznacza to, iż do uzyskania bezpieczeństwa funkcjonalnego w powyższym zakresie wystarczy zastosowanie metod jakościowych QM.

Tabela 8.3. Analiza HARA z wynikiem QM

Funkcja	Scenariusz wystąpienia ryzyka	Sytuacja drogowa	Zagrożenie	OCENA (prawdop. / dotk. / kontrol.)				ASIL
Aktywacja Hill Holder	Hill Holder się nie włącza, pomimo że powinien	Jazda	nie dotyczy					
		ruszanie po postoju na wzniesieniu, na przystanku	możliwość potrącenia osoby na skutek stoczenia się pojazdu	E2	S1	C2	QM	
		ruszanie po postoju na wzniesieniu, na drodze (korek, światła)	możliwość stoczenia się na inny pojazd	E3	S1	C2	QM	
		ruszanie po postoju na wzniesieniu, na drodze (korek, światła)	możliwość stoczenia się na rowerzystę, motocyklistę	E3	S1	C2	QM	
		postój na płaskim	brak zagrożenia					
Żądanie dezaktywacji Hill Holder	Hill Holder nie został dezaktywowany, pomimo, że powinien	Jazda	brak zagrożenia					
		postój na wzniesieniu	brak zagrożenia					
		postój na płaskim	brak zagrożenia					
	Brak informacji na pulpicie o statusie Hill Holdera	Jazda	brak zagrożenia					
		ruszenie po postój na wzniesieniu	możliwość stoczenia się pojazdu	E3	S1	C2	QM	
		postój na płaskim	brak zagrożenia					

Podczas określania poszczególnych zagrożeń związanych z sytuacjami operacyjnymi ryzyko oceniono poprzez ocenę prawdopodobieństwa narażenia na sytuację operacyjną (E - Exposure), rozmiar potencjalnej szkody (S-Severity) oraz możliwość kontroli związanej z danym zagrożeniem poprzez kierowcę lub innych uczestników ruchu (C - Controllability).

W tabeli 8.4. wskazano użyte do oceny danego atrybutu narażenia (E - Exposure), szkodliwości (S - Severity) oraz możliwości kontroli (C - Controllability) poziomy.

Tabela 8.4. Poziomy używane do oceny atrybutów E, S, C [131]

E	S	C
E0 – Niewiarygodne	S0 - brak obrażeń	C0 - ogólnie możliwa do opanowania
E1 - bardzo małe prawdopodobieństwo	S1 - lekkie i umiarkowane obrażenia	C1 - łatwa kontrola
E2 - niskie prawdopodobieństwo	S2 - ciężkie i zagrażające życiu obrażenia (prawdopodobieństwo przeżycia)	C2 - zazwyczaj możliwe do opanowania
E3 - średnie prawdopodobieństwo	S3 - obrażenia zagrażające życiu (przeżycie niepewne), obrażenia śmiertelne	C3 - trudne do opanowania lub niekontrolowane
E4 - wysokie prawdopodobieństwo		

W trakcie przygotowywania analizy HARA autor wykorzystał dodatkowe narzędzia, którymi są analizy uszkodzeń. Wykorzystywane analizy uszkodzeń zestawiono w tabeli 8.2. W tabeli 8.3 przedstawiono fragment analizy FMEA przeprowadzonej dla baterii trakcyjnych. Poziom priorytetu ryzyka RPN wyliczono w niej jako iloczyn dotkliwości, częstości występowania oraz oceny wykrywalności. Im wyższą liczbę uzyskano, tym bardziej krytyczna jest awaria i tym bardziej potrzebne są monitorowanie i usprawnienia.

Weryfikacja priorytetu ryzyka RPN wskazała, iż do grupy krytycznych awarii zaliczają się awarie, które mogą nastąpić w urządzeniu nadzorczo-sterującym baterii (BMS) związane z błędem kodu oprogramowania. W związku z powyższym należy monitorować wskazane parametry z innego systemu aby w sytuacji nieprawidłowości w sterowniku BMS móc zareagować. W ramach projektu autor rozprawy, poza stałymi interfejsami komunikacyjnymi do baterii trakcyjnych, wprowadził rozwiązanie bazujące na scenariuszach gwarancyjnych baterii, które mają zapisane maksymalne wartości dopuszczalnych parametrów pracy. Są one weryfikowane zarówno po stronie BMS baterii jak i w komputerze centralnym pojazdu. Wprowadził również dodatkowe zabezpieczenie redukujące obciążenia znajduje się w sterowniku układu napędowego.

Tabela 8.5. Zestawienie analiz uszkodzeń (1/2)

Analiza	Opis
<p data-bbox="213 434 542 517">Analiza trybów awaryjnych i skutków FMEA</p> <p data-bbox="233 568 523 651">Failure Mode and Effect Analysis</p>	<p data-bbox="584 327 1394 763">FMEA stosowana do identyfikacji trybów awarii (przyczyn źródłowych) i skutków. Wynikiem tabela FMEA, wykorzystana do wyznaczenia najbardziej podatnego na uszkodzenia komponentu. Metoda ma kilka istotnych ograniczeń. Nie uwzględnia sytuacji, w których może wystąpić wiele awarii jednocześnie. Nie ma w niej powiązania między różnymi awariami. Jest czasochłonna - wymaga wyszczególnienia wszystkich potencjalnych trybów awarii a identyfikacja ich zależy od wiedzy fachowej personelu [136], [137].</p>
<p data-bbox="213 792 542 927">Analiza trybów awaryjnych i skutków oraz analiza diagnostyczna FMEDA</p> <p data-bbox="233 981 523 1064">Failure Mode Effect and Diagnostic Analysis</p>	<p data-bbox="584 837 1394 1025">FMEDA to rozszerzenie FMEA. Nie tylko identyfikuje tryby awaryjne i ich skutki ale także szczegółowy zakres diagnostyczny każdego z mechanizmów bezpieczeństwa dla każdego trybu awaryjnego [136],[137].</p>
<p data-bbox="213 1352 542 1391">Analiza drzewa błędów FTA</p> <p data-bbox="261 1442 494 1480">Fault Tree Analysis</p>	<p data-bbox="584 1122 1394 1711">FTA to analiza drzewa błędów. Umożliwia znajdowania pierwotnej przyczyny awarii oraz szacowanie awaryjności systemu na podstawie jego architektury (Probabilistyczna Ocena Ryzyka). Stosowana w przypadku bardziej złożonych awarii (Pozwala na wskazanie kilku ich przyczyn jednocześnie). Budowanie diagramu analizy drzewa błędów rozpoczyna się od samego uszkodzenia. Rozbudowywane jest przy zastosowaniu logiki Boole'a do oceny każdej potencjalnej przyczyny awarii. FTA działa w oparciu o system binarny, w którym albo coś jest przyczyną problemu, albo nie. Nie nadaje się do zidentyfikowania przypadków, w których rozpatrywana awaria została spowodowana innymi awariami częściowymi [136], [137].</p>

Tabela 8.2. Zestawienie analiz uszkodzeń (2/2)

Analiza	Opis
<p data-bbox="204 477 552 555">Analiza uszkodzeń zależnych DFA</p> <p data-bbox="212 611 544 645">Dependent Failure Analysis</p>	<p data-bbox="584 342 1394 779">DFA jest wykorzystywane do identyfikacji awarii i uszkodzeń o wspólnym źródle oraz sposobu ich propagacji w systemie. Analiza uszkodzeń zależnych ma na celu identyfikację uszkodzeń, które mogą utrudnić wymaganą niezależność lub brak zakłóceń między danymi elementami, co może ostatecznie doprowadzić do naruszenia wymagań lub celów bezpieczeństwa. Składa się ona z dwóch zasadniczych działań związanych z walidacją wolności od zakłóceń FFI - Freedom From Interference oraz walidacją niezależności między elementami [138].</p>
<p data-bbox="212 947 544 1025">Analiza uszkodzeń o wspólnej przyczynie CCFA</p> <p data-bbox="228 1081 528 1160">Common Cause Failures Analysis</p>	<p data-bbox="584 808 1394 1301">CCFA służy do identyfikacji i analizy potencjalnych awarii, które mogą wpłynąć na wiele podzespołów lub systemów w ramach większego systemu. CCFA bazuje na zasadzie, że awaria jednego z podzespołów lub systemów może potencjalnie prowadzić do awarii całego systemu. Wspólne przyczyny awarii mogą być spowodowane wadami projektowymi, defektami w produkcji, warunkami środowiskowymi i błędami ludzkimi. Identyfikacja i analiza potencjalnych wspólnych przyczyn awarii prowadzi do strategii dążącej do osiągnięcia poprawy niezawodności oraz bezpieczeństwa systemów [139].</p>

Tabela 8.6. Fragment analizy FMEA wykonany dla baterii (1/3)

LP.	Pozycja	Lista trybów awaryjnych	Skutki awarii	Dotkliwość (S)	Przyczyny źródłowe	Częstość występowania (O)	Kontrola aktualnego rozwiązania – zapobieganie	Kontrola aktualnego rozwiązania - detekcja	Ocena wykrywalności (D)	poziom priorytetu ryzyka (RPN)
1	Zabezpieczenie przed zwarciami	Funkcja zabezpieczenia przeciwzwarciowego systemu baterii jest nieprawidłowa	Pożar i wybuch	9	system baterijny jest gorący Po zwarciu MSD, wewnętrzny bezpiecznik nie reaguje na czas	3	Wybranie odpowiedniego MSD	Weryfikacja czy charakterystyka bezpiecznika spełnia wymagania projektowe poprzez test zwarcia	6	162
2		Funkcja zabezpieczenia przed zwarciami układu sterującego jest nieprawidłowa	System baterii ma zjawisko takie jak pożar i wybuch	9	Wewnętrzny bezpiecznik nie można przepalić w czasie zwarcia MSD.	3	Wybierz odpowiedni MSD	Weryfikacja czy charakterystyka bezpiecznika spełnia wymagania projektowe poprzez test zwarcia	6	162

Tabela 8.3. Fragment analizy FMEA wykonany dla baterii (2/3)

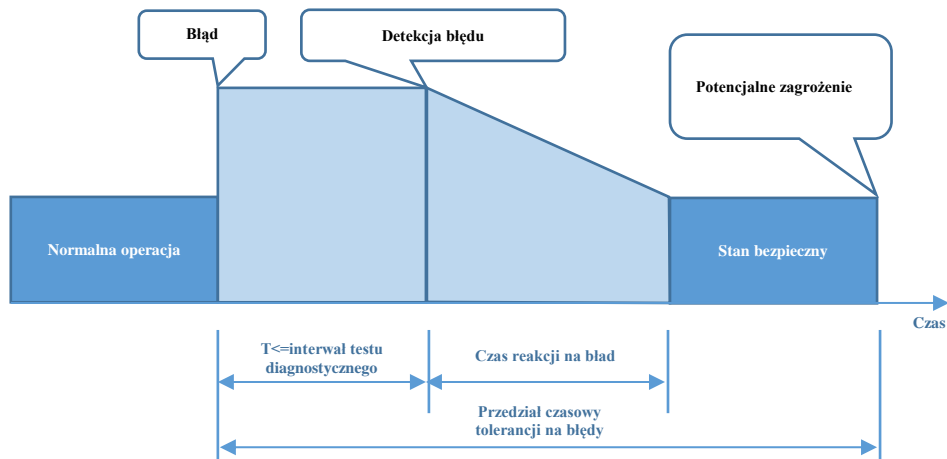
LP.	Pozycja	Lista trybów awaryjnych	Skutki awarii	Dotkliwość (S)	Przyczyny źródłowe	Częstość występowania (O)	Kontrola aktualnego rozwiązania – zapobieganie	Kontrola aktualnego rozwiązania - detekcja	Ocena wykrywalności (D)	poziom priorytetu ryzyka (RPN)	
3	Parametry elektryczne wiązki przewodów, spełniające napięcie robocze 750 VDC	Napięcie robocze >750V	Zbyt szybkie starzenie się wiązki przewodów	7	Błąd wyboru materiału	3	Zgodnie z wyborem specyfikacji wiązki przewodów	Test izolacji	2	42	
4	Projekt: Szynoprzewody wysokonapięciowe	Niewystarczająca obciążalność prądowa wysokonapięciowych szyn miedzianych lub linii energetycznych	System doświadcza wysokiej temperatury przy maksymalnym prądzie	6	Pole przekroju szynoprzewodu jest zbyt małe	2	Wyczerpanie dotyczące pola przekroju szynoprzewodu spełniają wymagania dla maksymalnego prądu obciążenia	Przegląd projektu, testy	6	72	
5	Projekt: MSD 1. Zapewnienie funkcji transmisji wysokiego napięcia przez MSD 2. Zapewnienie funkcji bezpieczeństwa przy zwarciu wysokiego napięcia 3. Połączenie przesyłowe wysokiego napięcia jest niezawodne 4. Osiągnięte wymagania dotyczące ochrony uszczelnienia IP6X	Skuteczność uszczelnienia MSD nie spełnia wymagań projektowych	Wydajność uszczelnienia systemu nie spełnia wymagań projektowych	7	Niewystarczająca konstrukcja poziomu uszczelnienia MSD	2	Należy wyraźnie zażądać spełnienia wymagań klasy uszczelnienia MSD i zażądać od dostawców dostarczenia raportu z testu szczelności	Test uszczelnienia	5	70	
6		Niewystarczająca zdolność nadprądowa MSD	System nie może spełnić wymagań projektowych dla prądu powyżej 500A	6	MSD niska obciążalność prądowa	2	Przy wyborze MSD wymagane jest przetężenie znamionowe 500A	Wykrywanie przetężenia	5	60	
7		Uszkodzenie bezpiecznika MSD	W przypadku zwarcia wysokiego napięcia nie może zostać odcięte w czasie, powodując uszkodzenie innych elementów układu wysokiego napięcia.	Bezpiecznik MSD przepala się zbyt długo	8	Bezpiecznik MSD przepala się zbyt długo	1	Jasne wymagania dotyczące prądu bezpiecznika i czasu bezpieczników w MSD	Wykrywanie przepalonego bezpiecznika	7	56
8			Bezpiecznik przepalony, gdy system jest przeciążony	Bezpiecznik przepalony, gdy system jest przeciążony	8	Zdolność nadprądowa bezpiecznika jest osłabiona ze względu na proces starzenia, co powoduje nieprawidłowości	1	Wymagania dotyczą żywotności i przeciążalności bezpieczników w MSD	Wykrywanie przepalonego bezpiecznika. Wykrywanie po krytycznych przeciążeniach długotrwałych	7	56
9	Układ dystrybucji mocy	Zdolność nadprądowa układu dystrybucji mocy jest niewystarczająca	Wzrost temperatury jest zbyt wysoki, żywotność skraca się, a szyna zbiorcza mocy jest zagrożona stopniem.	8	Przekrój szyn zbiorczych jest niewystarczający	2	Konstrukcja szyny zbiorczej odnosi się do konstrukcji szynoprzewodu - wymaga sprawdzenia możliwości przetężenia.	Przegląd projektu i przegląd rysunków, test wzrostu temperatury szynoprzewodu	4	64	

Tabela 8.3. Fragment analizy FMEA wykonany dla baterii (3/3)

LP.	Pozycja	Lista trybów awaryjnych	Skutki awarii	Dotkliwość (S)	Przyczyny źródłowe	Częstość występowania (O)	Kontrola aktualnego rozwiązania – zapobieganie	Kontrola aktualnego rozwiązania - detekcja	Ocena wykrywalności (D)	poziom priorytetu ryzyka (RFN)
10	System BMS - ochrona akumulatora	Nadprąd	Przyspieszone starzenie się komponentów elektrycznych	6	Błąd programowania kodu oprogramowania, powodujący brak ochrony, gdy prąd jest przeteżony	4	Przegląd projektu zgodnie z procedurami w aplikacji	Test stołowy i test HIL	3	72
11		Nadnapięcie pojedynczej celi	Brak możliwości ponownego użycia akumulatora	8	Błąd programowania kodu oprogramowania, BMS nadal umożliwia ładowanie, gdy ogniwo osiągnie napięcie odcięcia ładowania	2	Przegląd projektu zgodnie z procedurami w aplikacji	Test stołowy i test HIL	3	48
12		Akumulator działa w zbyt niskich temperaturach	Żywotność baterii jest zmniejszona, żywotność baterii jest niewystarczająca	6	Błąd programowania kodu oprogramowania, powodujący ładowanie i rozładowanie, gdy temperatura akumulatora jest niższa niż temperatura robocza	3	Przegląd projektu zgodnie z procedurami podanymi w parametrach „Aplikacja oprogramowania”	Test stołowy i test HIL	3	54
13		Akumulator działa w zbyt wysokich temperaturach	Żywotność baterii jest zmniejszona, żywotność baterii jest niewystarczająca	6	Błąd programowania kodu oprogramowania, powodujący ładowanie i rozładowanie, gdy temperatura akumulatora jest wyższa niż temperatura robocza	3	Przegląd projektu zgodnie z procedurami podanymi w parametrach „Aplikacja oprogramowania”	Test stołowy i test HIL	3	54

W kolejnym kroku na podstawie analizy HARA i wyznaczonych w niej poziomów integralności bezpieczeństwa ASIL, tworzono cele w zakresie bezpieczeństwa (Safety Goals). Następnym krokiem była koncepcja bezpieczeństwa (Functional Safety Concept), w ramach której ulokowano funkcjonalne wymagania związane z bezpieczeństwem w architekturze systemu. W ramach tej analizy cele w zakresie bezpieczeństwa mogą ulec doszczegółowieniu w ramach dodatkowego dokumentu zawierającego wymagania dotyczące bezpieczeństwa funkcjonalnego (Functional Safety Requirements [140]). Po wykonaniu analizy HARA zdefiniowano dla możliwych do wystąpienia zagrożeń interwały czasowe tolerancji na błędy zwane FTTI (Fault Tolerant Time Interval). FTTI jest czasem w którym usterka może być obecna w systemie, zanim wystąpi zagrożenie. Bezpieczeństwo systemu jest zagwarantowane, gdy czas od pojawienia się usterki do jej wykrycia plus interwał czasu reakcji na usterkę - Fault Reaction Time Interval (FRTI) jest krótszy niż FTTI podane

dla celu bezpieczeństwa. W celu zapewnienia bezpieczeństwa musi być więc spełnione $FTTI > \text{Diagnostic Test Interval (DTI)} + \text{Fault Reaction Time Interval (FRTI)}$. W architekturze tworzonej zgodnie z powyższymi zasadami diagnoza, reakcja i przejście w stan bezpieczny wystąpi zawsze przed wystąpieniem możliwego zagrożenia. Na rysunku 8.6 autor rozprawy wskazał składowe elementy FTTI.



Rys. 8.6. Interwał czasowy reakcji oraz tolerancji na błędy [141].

Sposób ustalania FTTI przedstawiono na przykładzie funkcji rozładownie - dostarczanie mocy do układu HV (zdefiniowanego jako falownik) przy scenariuszu wystąpienia błędu zbyt mało mocy / brak mocy, którego przyczyną jest brak komunikacji z BMS (Battery management system), błąd BMS, nieprawidłowe obliczenia w ZR zakresu użytecznego SOC lub dynamicznego DOD dla stałego zasięgu wprowadzające tryb jazdy awaryjnej czy też redukcję mocy oraz inne. Rozpatrywana sytuacja drogowa obejmuje przejazd przez przejazd tramwajowy. Zidentyfikowane zagrożenie dotyczy zatrzymania się autobusu na przejeździe tramwajowym. Łagodzenie i zabezpieczenie przed skutkami zdarzenia niebezpiecznego wiąże się z możliwością kontynuacji jazdy. BMS musi ciągle zapewniać z baterii wystarczającą moc, komputer centralny musi podawać prawidłowe wartości ograniczeń aby napęd nie został wprowadzony w tryb awaryjny lub z ograniczeniami mocy, uniemożliwiającymi ruszenie. BMS w zakresie swojej pracy zajmuje się komunikacją z autobusem oraz kontrolą i nadzorem sterowników akumulatorów trakcyjnych niższego poziomu. Zarządza on pracą podłączonych do niego podjednostek, które utrzymują ogniwa baterii w temperaturze i progach napięcia i prądu zdefiniowanych przez producenta. Do podstawowych sygnałów wysyłanych do autobusu przez BMS należą między innymi:

1. dynamiczny maksymalny prąd rozładowania DMDC (Dynamic Maximum Discharge Current)
2. dynamiczny maksymalny prąd ładowania DMCC (Dynamic Maximum Charge Current)
3. dynamiczny maksymalny prąd rekuperacji DMRC (Dynamic Maximum Regenerative Current)

Jednostka sterująca autobusu powinna reagować synchronicznie na zmiany wartości DMDC, DMCC, DMRC. BMS monitoruje wartości prądu oraz napięcia. Po ich przekroczeniu pojawia się błąd. BMS na podstawie danych z poszczególnych akumulatorów trakcyjnych połączonych równolegle pobiera wartości najgorszego przypadku i mnoży je przez liczbę podłączonych zestawów baterii wysyłając na magistralę autobusu. Wartość prądu do jakiej akumulator trakcyjny może zasilić inwerter jest ściśle uzależniona od pomiarów napięcia i temperatury baterii. Spadek tej wartości rozpoczyna się w momencie, gdy ogniwo o najniższym napięciu osiągnie poziom ostrzegawczy. Długotrwałe przekroczenie wartości (>1min.) może powodować trwałe uszkodzenie baterii. Pobór prądu nie większy niż określony w DMDC gwarantuje użytkowanie akumulatora trakcyjnego w pierwszym zakresie ochrony. Dodatkowo ustalono na podstawie norm oraz wiedzy eksperckiej i zaimplementowano w sterowniku akumulatora trakcyjnego maksymalną szybkość zmian wartości DMDC równą 100 A/s. Dotyczy ona zarówno spadku jak i wzrostu ograniczenia. Wartość prądu, który może być dostarczony do akumulatora przez ładowarkę oraz z falownika podczas hamowania regeneracyjnego nie jest analizowana w powyższym przypadku. BMS oblicza i wysyła informacje o rzeczywistych wartościach prądów, którymi można rozładować i naładować akumulator ale dopuszczalne są również przeciążenia krótkotrwałe i długotrwałe. Elektronika baterii niższego poziomu monitoruje rzeczywiste wartości prądu i porównuje je z dopuszczalnymi progami ostrzeżeń, alarmów i błędów. Dla każdej wartości krotności prądu rozładowania BMS oblicza programowo całkę z wartości prądu (I^2). Jeśli dopuszczalny czas przeciążenia zostanie przekroczony wartości są ograniczane. Ogniwa mogą być przeciążone prądami przez określony czas. Akumulator może być rozładowywany prądem przekraczającym wartość progu alarmu przez około 10 sekund. Po 7,5 sekundy wartość spadnie do połowy wartości. Jeżeli prąd płynący w układzie nie spadnie do czasu upływu 10 sekundy system zabezpieczy się otwierając styczniki. W przypadku wystąpienia braku komunikacji z BMS, znając jego ostatnie sygnały ograniczające prądy rozładowania istnieje możliwość za pomocą dodatkowego urządzenia na przykład komputera centralnego podtrzymać je przez określony z góry zdefiniowany czas. W komputerze centralnym zaimplementowano mechanizm wykrycia braku informacji, który realizuje dodatkowe funkcje w przypadku wystąpienia błędu komunikacji lub otrzymaniu nieprawidłowych ramek. Czas wykrycia błędu od jego pojawienia

się wraz z wysłaniem informacji do napędu wynosi w analizowanym przypadku <0,5s. Stan bezpieczny zdefiniowany jako czas, w którym autobus miarodajny dwuosioowy (przedstawiony w tabeli 8.7) zjedzie z torów tramwajowych w najgorszym przypadku wynosi ~4,4s a dla autobusu przegubowego ~5,2s. Jest to czas potrzebny na przejechanie odpowiednio 13,5m dla dwuosioowego oraz 18,75m dla autobusu przegubowego (długość autobusu) ze stanu zatrzymanego z przyspieszeniem <1,4 m/s². 1,4m/s² to maksymalne dopuszczalne przyspieszenie przy którym pasażerowie stojący będą w stanie utrzymać się na swoich pozycjach. Maksymalny czas reakcji złożonej kierowcy zgodnie z tabelą 8.8. wynosi 0,9s. Aby zaprojektowane rozwiązanie mogło być zaaprobowane, czas przejścia w stan bezpieczny musi być krótszy niż FTTI, które w rozważanym przypadku wynosi 7,5s (brak reakcji ze strony baterii).

$$FTTI > 0,5s (DTI) + 4,4s (FRTI) + 0,9s = 5,8s$$

$$FTTI > 0,5s (DTI) + 5,2s (FRTI) + 0,9s = 6,6s$$

W kolejnym opracowywanym przypadku przedstawiono sposób ustalania FTTI na przykładzie funkcji „rozładowanie - dostarczanie mocy do układu HV. (zdefiniowanego jako falownik)” przy scenariuszu wystąpienia błędu „Zbyt mało mocy / brak mocy” dla sytuacji drogowej „skrzyżowanie”. Założony scenariusz drogowy oparty o skrzyżowanie w formie skrzyżowania czterowłotowego o punktach kolizji („punktach w których następuje przecięcie, rozdzielenie lub połączenie osi torów ruchu pojazdów, co najmniej dwóch strumieni lub przecięcie, co najmniej dwóch strumieni należących do różnych grup użytkowników drogi.”) wskazanych na rysunku 8.7 Rozważane jest skrzyżowanie zwykle bez sygnalizacji świetlnej z ustaloną prędkością projektową 50 km/h dla pojazdu miarodajnego („pojazd, który został przyjęty do projektowania w uzgodnieniu z zarządcą drogi i po zasięgnięciu opinii organu zarządzającego ruchem” [39]) autobusu dwu osiowego o parametrach wskazanych w tabeli 8.7. Analiza oparta o sytuację drogową, w której system detekcji kolizji bocznej autobusu znajdującego się na skrzyżowaniu dwujezdniowym zauważa pojazd zmierzający z drogi prostopadłej na kurs kolizyjny z autobusem. Brak możliwości ruszenia autobusu spowoduje uderzenie pojazdu w jego bok. Prędkości pojazdów: Autobus 0 km/h. Samochód osobowy 50 km/h. Oddalenie samochodu osobowego od autobusu 30m [142]. Sucha nawierzchnia, dobry stan ogumienia, brak wiatru, brak innych pojazdów na skrzyżowaniu.

Tabela 8.7. Wymiary pojazdów miarodajnych stosowanych w projektowaniu skrzyżowań [39]

Lp.	Pojazd miarodajny	Długość pojazdu [m]	Szerokość pojazdu	Zewnętrzny promień korytarza wyjściowego o ruchu [m]	Minimalny zewnętrzny promień skrętu [m]	Wewnętrzny promień korytarza wyjściowego o ruchu [m]	Projektowy promień skrętu
1	Pojazd osobowy	5,1	1,85	7,75	7,35	4,85	6
2	Pojazd komunalny (śmieciarka)	9,9	2,5	10	9,15	5,75	8
3	Pojazd ciężarowy, ciągnik rolniczy, pojazd wolnobieżny z przyczepą	12	2,55	11,8	11	6	9
4	Pojazd członowy (np. ciągnik z naczepą)	16,5	2,5	12,5	12	6	10
5	Zespół złożony z pojazdu silnikowego i przyczepy	18,75	2,55	12,75	12,25	6,75	10
6	Autobus dwuosiowy	13,5	2,55	12	10,5	5	9
7	Autobus trzyosiowy	15	2,55	12	10,5	4,5	9
8	Autobus przegubowy	18,75	2,55	13,35	12	7	12
9	Zespół złożony z pojazdu wolnobieżnego lub ciągnika rolniczego i dwóch przyczep - 22m stosowany wyłącznie warunkowo w terenach rolniczych						
		22	2,5	7,5	7,25	-	9
10	Pojazd wojskowy - 23,30 m stosowany wyłącznie na drogach o znaczeniu obronnym						
		23	2,59	16,5	15,75	8	14

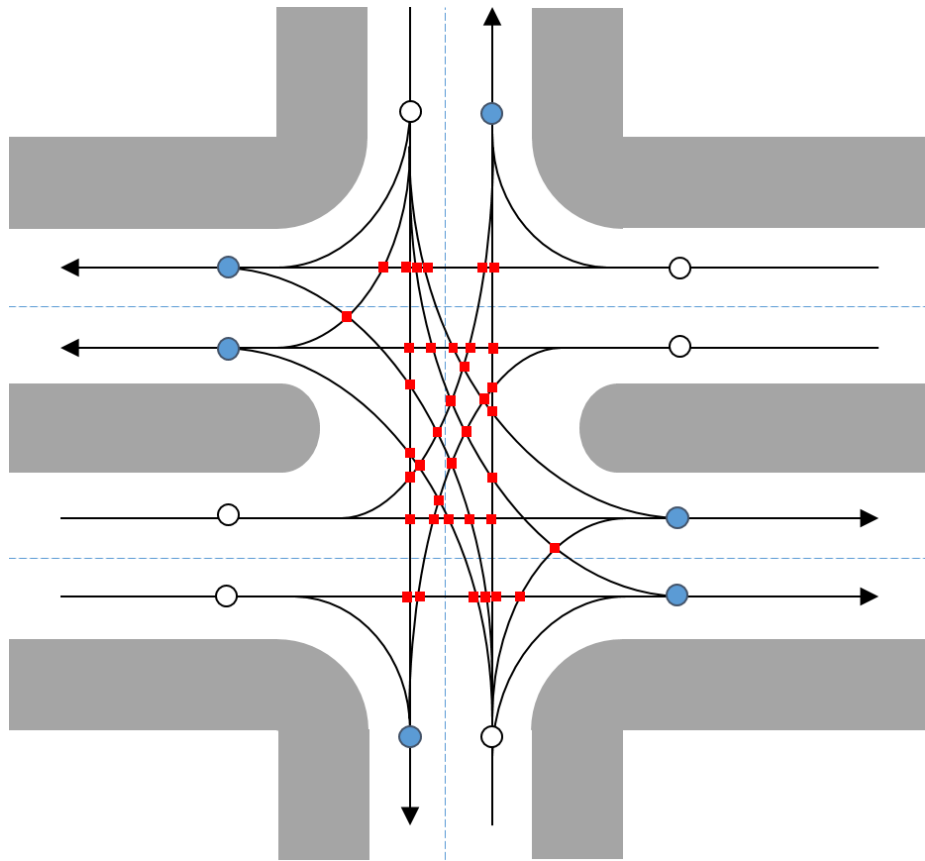
Tabela 8.8. Wybrane statystyki opisowe rozkładów czasów reakcji [143]

Metoda:	MCR		autoPW-T				Symulator		Tor	
	Prosta	Złożona	A	B	C	D	(scenariusz 1)		(scenariusz 1)	
Rodzaj badania, typ reakcji*	R	Z	K	H	Z	H	K	H	K	H
Średnia [s]	0,260	0,540	0,362	0,487	0,576	0,522	0,389	0,531	0,846	0,994
Mediana [s]	0,257	0,524	0,348	0,486	0,575	0,519	0,375	0,525	0,820	0,960
Odchyl. stand. [s]	0,037	0,097	0,079	0,065	0,101	0,071	0,134	0,129	0,366	0,275
Rozstęp [s]	0,237	0,498	0,695	0,381	0,527	0,331	1,35	1,15	3,43	3,10
Minimum [s]	0,202	0,378	0,262	0,32	0,374	0,391	0,15	0,20	0,17	0,20
Maksimum [s]	0,439	0,876	0,957	0,701	0,901	0,722	1,50	1,35	3,60	3,30
Skośność [-]	1,5	1,1	4,5	0,5	0,6	0,4	2,9	1,6	3,0	2,8
Kurtoza [-]	4,5	1,6	31	0,9	0,5	-0,4	17,3	7,2	15,7	17,0
Liczność [-]	5050	5050	2020	2020	2020	2020	970	846	614	467
Kwantyl 0.1 [s]	0,219	0,432	0,306	0,409	0,462	0,435	0,275	0,400	0,510	0,750
Kwantyl 0.9 [s]	0,310	0,661	0,429	0,569	0,698	0,620	0,500	0,650	1,057	1,264

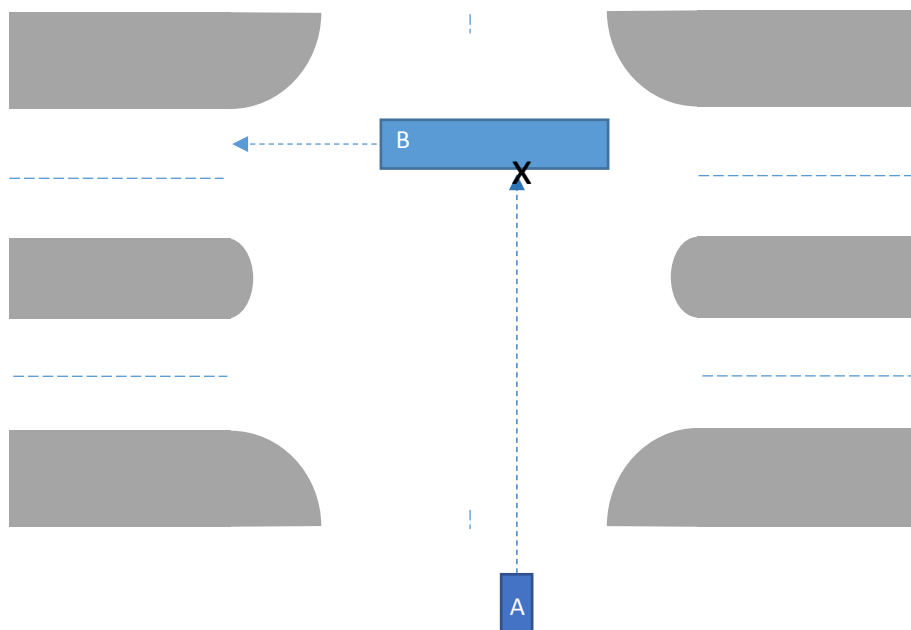
* typ reakcji: H – reakcja na pedale hamulca, K – reakcja na kole kierownicy, R - ręczna (MCR), Z – reakcja złożona

Sytuację drogową przedstawiono na rysunku 8.8. W przedstawionym punkcie zero autobus zatrzymał się ze względu na usterkę a system autobusu B oraz kierowca samochodu osobowego A rozpoznali sytuację niebezpieczną. W autobusie występuje usterka powodująca brak mocy ze względu na brak komunikacji z BMS. Samochód osobowy A poruszający się z prędkością 50km/h (13,88 m/s) przejeżdża w czasie reakcji kierowcy na pedale hamulca 13,797m. Rozpoczęcie hamowania z opóźnieniem $-2,5\text{m/s}^2$ oznacza kolejne 38,64 m przejechanej drogi do momentu zatrzymania. Jediną możliwością uniknięcia bezpośredniej kolizji i wbicia się samochodu osobowego w autobus jest przywrócenie możliwości jezdnych przez systemy w autobusie tak aby mógł kontynuować jazdę. Samochód osobowy przy założonej prędkości 50km/h pokonuje 30m w 2,16s, co jest najkrótszym czasem w którym autobus musi przemieścić się zapewniając miejsce przejazdu dla samochodu osobowego. Autobus ruszy po przywróceniu funkcji jazdy dzięki przekazaniu informacji o ostatnim stanie parametrów dynamicznych baterii przez komputer centralny przy uszkodzonym BMS. Aby nie doszło do zderzenia odległość równą szerokości pojedynczego pasa ruchu drogi zbiorczej Z [144] równą 3m [145] autobus musi przejechać w czasie krótszym niż 2,16s. Autobus przy początkowym przyspieszeniu wynoszącym 2m/s^2 przejeżdża 3m w czasie 1,73s. W związku z powyższym FTTI równe jest 430 ms. FTTI determinuje nie tylko wymagane czasy związane z detekcją usterki ale również czas reakcji. Czas reakcji jest w powyższym przykładzie równy jest czasowi identyfikacji wystąpienia usterki (brak wiadomości od BMS), wykonaniu niezbędnych obliczeń przez komputer centralny na podstawie uprzednio otrzymywanych wiadomości, czasu jaki od nich upłynął oraz przesłaniu nowej wiadomości CAN do napędu. Czasy komunikacyjne muszą więc być osiągnięte poprzez dobór odpowiednich priorytetów wiadomości, prędkości przesyłowej magistrali oraz interwału czasowego co który wiadomość jest wysyłana. W analizowanym przypadku maksymalny czas przejścia do stanu bezpiecznego wynosi poniżej 300ms co oznacza spełnienie wymagań. Powyższy przykład wskazuje wykorzystanie prostej kinematyki do określenia odstępów czasowych tolerancji na usterki.

Przy indywidualnym podejściu podczas analizowania tego samego przypadku różne grupy ekspertów mogą w inny sposób zaprojektować dane zdarzenie, przez co uzyskają różne oczekiwane FTTI dla tej samej sytuacji drogowej. W celu zapewnienia jednolitości w zakresie analizowanych w ramach normy ISO 26262 przypadków w branży samochodów ciężarowych wprowadzono metodę prognozy ryzyka (RT). Metoda została zaprezentowana w kwietniu 2021 na World Congress Experience Digital Summit organizowanym przez SAE (Society of Automotive Engineers).



Rys. 8.7. Skrzyżowanie ze wskazaniem punktów kolizji [39]



Rys. 8.8. Skrzyżowanie ze wskazaniem punktu kolizji oraz możliwego przebiegu ruchu pojazdów

Pomaga ona w wyjaśnieniu granicy pomiędzy ryzykiem akceptowalnym i nieracjonalnym. RT jest definiowana jako dopuszczalna odległość przejazdu spowodowana nieprawidłowym zachowaniem. W ramach metody realizowane są działania związane z wyborem nieprawidłowego zachowania i odpowiadającego mu niebezpiecznego zdarzenia z analizy zagrożeń i oceny ryzyka (HARA). Zaprojektowaniem eksperymentu na poziomie pojazdu, który symuluje zagrożenie. Określeniem RT, który określa ilościowo początek niebezpiecznego zdarzenia. Zastosowaniem równań kinematycznych z wykorzystaniem RT i danych eksperymentalnych do obliczenia FTTI. Autorzy wskazali jak zastosować powyższą metodę przy niezamierzonym przyspieszeniu, niezamierzonym ruchu, niezamierzonym kierunku jazdy oraz wydłużonej drodze hamowania. Metoda ta koreluje FTTI z wystąpieniem niebezpiecznego zdarzenia za pomocą obiektywnych i powtarzalnych pomiarów. Osiągnięcie konsensusu w sprawie RT daje odpowiedni FTTI [146].

Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy zgrupowano wymagane rozwiązania na elektronikę QM oraz elektronikę wyższej klasy. Analiza bezpieczeństwa dotycząca sterowania baterii trakcyjnych wskazała, iż tworząc architekturę należy uwzględnić urządzenia sterujące zgodne z ASIL C. Poziom ASIL wyznacza również priorytet dla sygnałów komunikacyjnych (sterujących oraz informacyjnych) wysyłanych przez urządzenia na magistralę. Dla wyższego ASIL stosowany jest wyższy priorytet wiadomości. Ma to szczególne znaczenie w przypadku magistrali komunikacyjnych o małej przepustowości.

Aby rozpocząć proces związany z projektowaniem, zarówno architektury, urządzeń nadzorczo-sterujących (lub ich wyboru) jak również oprogramowania dla nich, w którym uczestniczyć będą podmioty zewnętrzne, należy przygotować umowę dotyczącą rozwoju interfejsu DIA (Development interface agreement) [147] z tymi podmiotami. W dokumencie definiuje się odpowiedzialności każdej ze stron za stworzenie wymaganych w ramach normy dokumentów. Kolejnym kluczowym aspektem wymaganym przez normę ISO 26262 jest konieczność przeprowadzenia testów walidujących. Ostatnim ale najważniejszym etapem jest zebranie i spisanie wszystkich dokumentów powstałych w ramach projektu wraz z uzasadnieniami. Tak zwany przypadek bezpieczeństwa (Safety Case) jest podsumowaniem zawierającym jasne, kompleksowe i możliwe do obrony argumenty, przemawiające za tym, że działanie systemu w określonym kontekście jest akceptowalnie bezpieczne. Potwierdzają one również, że wymagania bezpieczeństwa dla danego elementu „Item” są kompletne i spełnione na podstawie dowodów uzyskanych z produktów prac związanych z działaniami w zakresie

bezpieczeństwa podczas opracowywania projektu. Kończąc analizę uzyskujemy więc jasne, wyczerpujące i wiarygodne argumenty, że system jest wolny od nieracjonalnego ryzyka, jeśli chodzi o jego funkcjonowanie w określonym kontekście.

Podsumowując, z przeprowadzonych z zakresu bezpieczeństwa funkcjonalnego analiz wynikają poziomy bezpieczeństwa ASIL, które muszą być realizowane przez urządzenia nadzorczo-sterujące, jak również czasy reakcji tych urządzeń oraz czasy przesyłu informacji pomiędzy urządzeniami, które są konieczne aby system zapewnił brak nieuzasadnionego ryzyka. Dokumentem podsumowującym działania jest tak zwany przypadek bezpieczeństwa.

8.2 Ograniczenia wynikające z założeń bezpieczeństwa cybernetycznego

W ostatnich latach kwestie związane z bezpieczeństwem cybernetycznym stały się jednym z najważniejszych tematów uwzględnianych przy tworzeniu architektury komunikacyjnej pojazdów [148]. Niestety przed laty, gdy tworzone założenia i projektowano sieć CAN aktualnie wykorzystywaną w autobusach nie zajmowano się zagadnieniami związanymi z możliwymi atakami cybernetycznymi, tylko skupiano się na odporności magistrali na błędy, jej niezawodności i przepustowości. Zwiększająca się liczba urządzeń, które nie tylko wymieniają między sobą sygnały sterujące, ale również mają kontakt z zewnętrznymi systemami udostępniającymi im dane lub do których dane są przesyłane naraża całą sieć komunikacyjną na potencjalne ataki, które mogą bezpośrednio wpłynąć na działanie pojazdu. Bezpieczeństwo cybernetyczne powinno być brane pod uwagę od początkowych faz projektowania architektury w pojeździe. Przestrzeganie zasad opisanych w regulaminie R155[85]/R156[90] oraz normach powiązanych (np. ISO 21434 [149]) sprawi, że kilka słabych punktów w projektowaniu architektury, które nie zostały by wychwycone podczas tradycyjnej procedury rozwoju produktu, zostanie wyeliminowanych. W normie ISO 21434 opisano między innymi wykorzystanie dodatkowych zabezpieczeń monitorujących ruch na magistralach komunikacyjnych jak również sposób oddzielenia ich od dostępu z zewnątrz polegający na zastosowaniu bram komunikacyjnych. W trakcie projektowania rozwiązania niezbędne jest wykonanie analizy wątków i oceny ryzyka zwanej TARA (Thread Analysis & Risk Assessment), w której analizowane są ryzyka związane z uszkodzeniem zdefiniowanych wcześniej aktywów. W przypadku, gdy wynikowe ryzyko przekracza ustalony poziom należy zastosować właściwe środki w celu złagodzenia zagrożeń. Postępowanie zgodne z procesami oraz tworzenie dokumentów wymaganych przez normę gwarantuje, że projektant dołożył

wszelkie starania, aby pojazd był odporny na cyberataki [96], [97]. W procesach oceny systemu, w tym oceny podatności, główną czynnością jest modelowanie zagrożeń. Do najczęściej stosowanych procedur modelowania zagrożeń należą STRIDE (Spoofing, Tampering, Repudiation, Information disclosure, Denial of Service, and Elevation of privilege) [150], model skoncentrowany na oprogramowaniu oraz TVRA (Threat Vulnerability and Risk Analysis) [151], który został wprowadzony przez ETSI w celu wsparcia procesów standaryzacji zorientowanych na bezpieczeństwo procesów normalizacyjnych. Połączenie wyżej wymienionych metodologii STRIDE i HARA jest metoda SAHARA (Safety aware hazard analysis and risk assessment) [152], która uwzględnia zasady współtworzenia bezpieczeństwa i ochrony w celu zwiększenia efektywności świadomego bezpieczeństwa rozwoju systemów cyberfizycznych. Oceniając bezpieczeństwo sieci komunikacyjnych należy więc rozważyć nie tylko kwestie związane z charakterystykami ochrony komponentów do nich podłączonych ale również topologię sieci. Bazując na koncepcji przygotowanej dla samochodów osobowych, przedstawionej przez Zsombor Petho, Intiyaz Khan, Árpád Torok w artykule Analysis of Security Vulnerability Levels of In-Vehicle Network Topologies Applying Graph Representations opublikowanym na łamach Journal of Electronic Testing (2021) 37:613–621 [153], autor rozprawy przeanalizował topologię sieci komunikacyjnych w autobusach elektrycznych produkowanych przez firmę Solaris. W koncepcji tej topologia sieci komunikacyjnej reprezentowana jest przez nieskierowane grafy ważone a głównym celem badań jest identyfikacja punktów podatnych na zagrożenia oraz połączeń komunikacyjnych w sieci. Kwestie podatności na zagrożenia szacowane są na podstawie specyficznych ich cech. W analizie grafów stosuje się opis poziomów ochrony wskazany w tabeli 8.9.

Tabela 8.9. Bezpieczeństwo cybernetyczne – poziomy ochrony [153]

Poziom ochrony	Opis
1	Pomiędzy połączonymi węzłami nie ma żadnej ochrony, brak jest szyfrowania danych, uwierzytelniania, bramy, HSM (Hardware Secure Module) lub IDS (Intrusion Detection System). W praktyce oznacza to, że poziom bezpieczeństwa połączenia między dwoma sterownikami ECU komunikującymi się ze sobą za pomocą tej samej magistrali wynosi 1.
2	W ocenianym łączu badane węzły znajdują się w oddzielnej podsieci - łącze komunikacyjne jest podłączone bezpośrednio do bramy, ale nie są stosowane żadne inne środki bezpieczeństwa (szyfrowanie, uwierzytelnianie).
3	Łącze jest chronione przez bramę działającą jako zaporę ogniową oraz jest chronione za pomocą dodatkowych środków bezpieczeństwa (np. uwierzytelnianie, IDS)

Analizując topologię bazową zastosowaną w autobusach elektrycznych firmy Solaris można zauważyć, że ochrona cybernetyczna bazowych magistrali CAN klasy B oraz C, podłączonych do komputera centralnego autobusu bazuje jedynie na prostych mechanizmach obronnych dotyczących pola sumy kontrolnej nadmiarowości cyklicznej (CRC), potwierdzeń (ACK) oraz informacji o końcu ramki (EOF). Dodatkowo zwiększenie bezpieczeństwa osiągnięte jest przez czasowe wyzwalanie CAN [154], [155]. Występująca w autobusach Solaris w pojedynczych przypadkach magistrala LIN klasy A stosowana w podsieci nie jest krytyczna ze względu na bezpieczeństwo. Stosowanie nawet najstarszych systemów komunikacyjnych wraz z kontrolerami domeny lub gateway`ami przy odpowiednio precyzyjnie zaprojektowanej topologii może zapewnić jednak wysoki poziom bezpieczeństwa [156], [157]. Oczywiście istnieją bardziej zaawansowane z punktu widzenia bezpieczeństwa rozwiązania komunikacyjne takie jak magistrala FlexRay. Magistrala pracując w trybie dwukanałowym umożliwia uwierzytelnianie danych na drugim kanale [156]. Rozwiązanie to niestety nie zyskało popularności wśród producentów komponentów sterujących dla autobusów i w związku z tym nie jest w nich powszechnie stosowane. Stosowanie segmentacji magistrali z połączeniami w formie ECU działającymi jako bramki tranzytowe pomiędzy segmentami również wzmacnia poziom bezpieczeństwa [158]. Wzmocnienie bezpieczeństwa cybernetycznego uzyskuje się także dzięki stosowaniu w segmentach różnych typów magistrali komunikacyjnych. Aby zidentyfikować wystąpienie ataku w ramach segmentu komunikacyjnego, czy też zapobieżenie atakowi proponowane jest instalowanie odpowiednio systemów IDS (Intrusion Detection System) oraz IPS (Intrusion Prevention System), które w bazowej architekturze autobusowej nie były jednak stosowane. Intrusion Detection System (IDS) to oprogramowanie lub urządzenie monitoruje sieć w celu wykrycia nieautoryzowanego dostępu, ataków lub działań podejrzanych [159], [160]. Intrusion Prevention System (IPS) działa na podobnej zasadzie jak IDS, przy czym może blokować niebezpieczne aktywności takie jak ataki złośliwego oprogramowania czy próby włamania [160].

W aplikacji autobusowej wyróżnia się dwa rodzaje ataków pasywne oraz aktywne. Ataki pasywne polegają na przechwyceniu (podśluchiwaniu lub monitorowaniu przesyłania) informacji sterujących i danych. Celem takiego ataku jest odkrycie treści komunikatu lub analiza przesyłu danych. W przypadku analizy przesyłu przyjmując, że przekazywane dane są zaszyfrowane i nie można ich rozkodować wartością dodaną dla atakującego będzie odkrycie tożsamości urządzeń wymieniających informacje, długość komunikatów oraz częstotliwości ich występowania. Ponieważ w tego typu atakach nie występuje modyfikacja danych są one

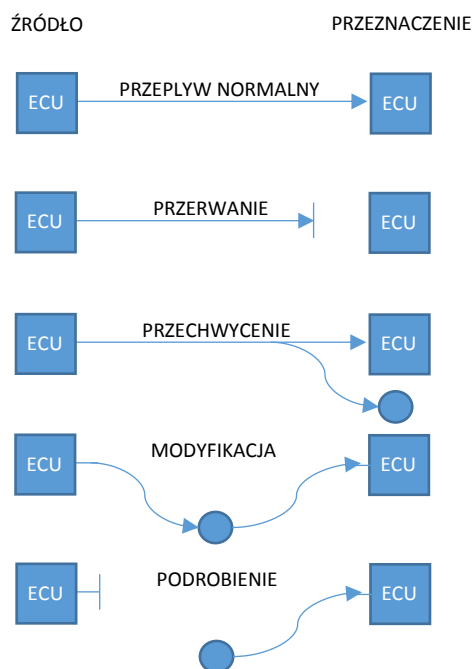
bardzo trudne do wykrycia. Tworząc architekturę sterującą należy skupić się na blokowaniu możliwości ich wystąpienia, a nie na ich wykrywaniu. Ataki aktywne to ataki polegające na realizacji modyfikacji strumieni danych czy też tworzeniu fałszywych danych. W ich przypadku odwrotnie niż w atakach pasywnych zapobieganie jest bardzo trudne, gdyż wymaga ciągłej fizycznej ochrony urządzeń oraz kanałów przesyłania informacji. W tworzeniu architektury należy więc skupić się na rozwiązaniach umożliwiających szybkie wykrywanie takich ataków, które wpłynę na przyspieszenie procesu likwidacji awarii i opóźnień przez nie spowodowanych [161]. W tabeli 8.10 autor rozprawy wskazał podstawowe typy ataków jakie występują w systemach wraz z ich krótkim opisem. Analizując działanie magistrali nadzorczo – sterującej pojazdu i wpływ ataków na jej prawidłowe funkcjonowanie autor rozprawy wziął pod uwagę wskazane na rysunku 8.9 działania spowodowane niepożądaną ingerencją w system związane z przerwaniem komunikacji, jej przechwyceniem, modyfikacją i podrobieniem. Aby móc poradzić sobie z powyżej zdefiniowanymi rodzajami ataków w architekturze komunikacyjnej niezbędne jest uwzględnienie ich jako zagrożeń podczas jej tworzenia.

Tabela 8.10. Bezpieczeństwo cybernetyczne – podstawowe typy ataków (1/2)

Typ ataku	Opis
Z kanału bocznego side-channel	<p>Jest to dowolny atak oparty na informacjach uzyskanych z implementacji systemu komputerowego, a nie bazujący na słabościach w samym zaimplementowanym algorytmie.</p> <p>Najczęściej spotykane ataki to:</p> <ul style="list-style-type: none"> - czasowy: Analizuje czas, jaki system spędza na wykonywaniu algorytmów kryptograficznych. - elektromagnetyczny (EM): Mierzy i przeprowadza analizę sygnału promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez urządzenie. - Prosta analiza mocy (SPA): Bezpośrednia obserwacja zmian mocy i promieniowania elektromagnetycznego (EM) systemu w czasie operacji. - Różnicowa analiza mocy (DPA): Uzyskuje i analizuje szczegółowe pomiary statystyczne dla wielu operacji. - Atak szablonowy: Odzyskuje klucze kryptograficzne poprzez wykorzystanie identycznego urządzenia "szablonowego" i porównanie danych z kanałów bocznych [162].
Podszywanie Spoofing	<p>Jest to podszywanie się urządzenia pod inne komponenty systemu wskazujące, że jest to znane i zaufane źródło.</p> <p>W przypadku magistrali nieuczciwy węzeł może wysłać autentyczne wiadomości do magistrali [163]. W takiej sytuacji może również dochodzić do modyfikacji komunikatów lub opóźniania ich przesyłu.</p>

Tabela 8.11. Bezpieczeństwo cybernetyczne – podstawowe typy ataków (2/2)

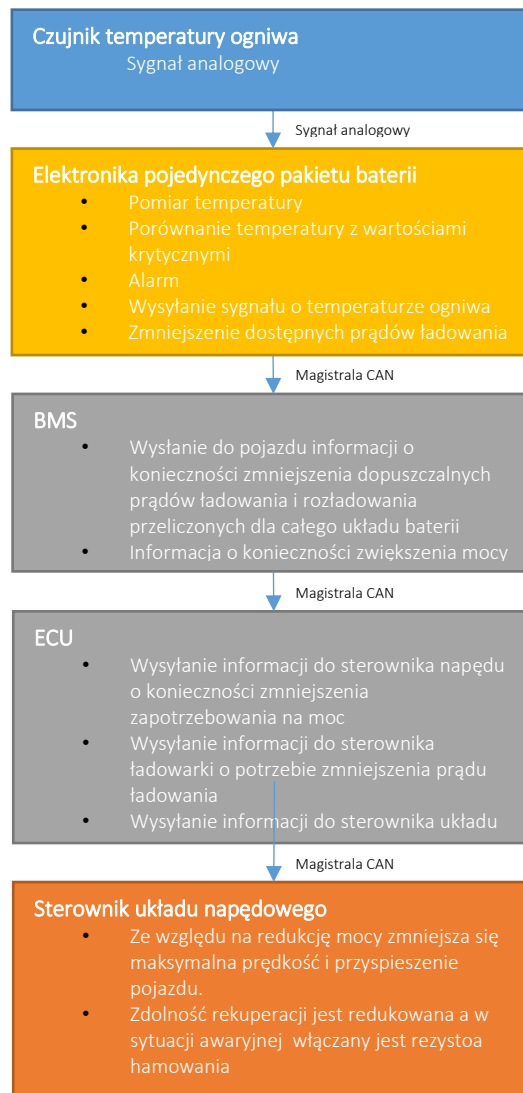
Typ ataku	Opis
Pasywny podsłuch	Jest to monitorowanie danych w celu zebrania informacji i dokonania analizy ruchu w sieci. W tym przypadku nie ma mowy o modyfikacji danych. Atak jest bardzo trudny do wykrycia [164].
Rozproszona odmowa usługi DoS (Denial of Service) / DDoS (Distributed Denial of Service)	Jest to rodzaj ataku sieciowego przeszkadzający w normalnej pracy magistrali, blokujący prawidłowe działanie poprzez wypełnienie jej nieprawidłowymi pakietami danych. W przypadku DoS atakuje jedna jednostka a w przypadku DDoS kilka robiąc to w sposób rozproszony [164]. W przypadku magistrali CAN w tego typu atakach wykorzystywany jest mechanizm arbitrażu. Magistrala „zalewana” jest wiadomościami o niskim ID, które są traktowane priorytetowo, co zakłóca cały proces komunikacji.
Powtórka Replay	Jest to wykorzystywanie wady konstrukcyjnej. Polega ono na pasywnym przechwyceniu porcji informacji i danych oraz dalszej ich retransmisji w celu otrzymania niedozwolonych rezultatów [149]. Główne zagrożenia wynikają z połączenia różnych systemów, gdzie w przypadku zagrożenia jednego węzła zagrożone są wszystkie pozostałe węzły.



Rys. 8.9. Rodzaje ataków [161]

Powstałe w ten sposób ograniczenia są jednymi z ważniejszych wpływającymi na bezpieczeństwo eksploatacji autobusów. Aby móc dobrze scharakteryzować ataki

na magistralę komunikacyjną, które mogą zakłócić działanie autobusu należy wziąć pod uwagę funkcje jakie ona spełnia. Magistrala jest między innymi odpowiedzialna za dystrybuowanie informacji pomiędzy ich źródłem a miejscami przeznaczenia. Na podstawie tych informacji poszczególne urządzenia sterujące w pojeździe zapewniają jego prawidłową pracę. Aby zapewnić prawidłową współpracę poszczególnych elementów układu napędowego, muszą one m.in. wymieniać między sobą informacje o aktualnych i dopuszczalnych w danym momencie parametrach pracy. Na rysunku 8.10 przedstawiono przykładowy algorytm komunikacji wraz z warunkami logicznymi ograniczania parametrów trakcyjnych pojazdu ze względu na zbyt wysoką temperaturę baterii trakcyjnej, która to może doprowadzić do sytuacji niebezpiecznych dla użytkowników i obsługi. Jak widać z poniższego przykładu, modyfikacja czy też podrobienie sygnału temperatury może doprowadzić do poważnych konsekwencji związanych na przykład z redukcją możliwości trakcyjnych autobusu co zgodnie z analizami przeprowadzonymi w rozdziale 8.1. dotyczącym bezpieczeństwa funkcjonalnego może doprowadzić do sytuacji niebezpiecznej. Ważne są więc zabezpieczenia procesu tworzenia urządzeń i komponentów do pojazdów oraz firm je produkujących w zakresie bezpieczeństwa cybernetycznego. W autobusie należy przede wszystkim zwrócić uwagę na wszelkiego rodzaju urządzenia, umożliwiające zewnętrzny dostęp do pojazdu czy to przez komunikację przewodową, jak ma to miejsce podczas ładowania autobusu ze złącza plug-in czy też bezprzewodowy dostęp do magistrali poprzez urządzenia służące do zdalnej diagnostyki czy komunikujące się w ramach systemów informacji pasażerskiej. Zewnętrzny dostęp powinien być zabezpieczony jeżeli tylko jest to możliwe ograniczeniem komunikacji jednokierunkowym np. dane diagnostyczne przesyłane tylko z pojazdu na serwer. Dodatkowo należy stosować różne metody uwierzytelniania takiej komunikacji. Uwierzytelnianie oprócz tego poświadcza, że jedynie prawidłowe sterowniki mogą komunikować się w ramach systemu i jego połączeń zewnętrznych. Wysłanie komunikatów wiąże się w takiej sytuacji z koniecznością posiadania certyfikatu składającego się z identyfikatora jednostki, klucza publicznego i autoryzacji kontrolera. Certyfikaty są weryfikowane przez producentów za pomocą tajnych kluczy. W przypadku komunikacji z zewnętrznymi systemami ładowania w autobusach bazowano na normie ISO 15118, która rozróżnia dwa tryby uwierzytelniania i autoryzacji.



Rys. 8.10. Algorytm komunikacji wraz z logiką ograniczania parametrów trakcyjnych pojazdu ze względu na zbyt wysoką temperaturę baterii

Pierwszy związany z użyciem zewnętrznych środków identyfikacji (External Identification Means - EIM), w których kierowca uwierzytelnia i autoryzuje się do sesji ładowania za pomocą NFC, RFID czy też SMS. Drugi tak zwany Plug-and-Charge (PnC), w którym to nie jest potrzebne żadne zewnętrzne medium. Pojazd podłączany jest do ładowarki i wszystkie aspekty uwierzytelniania, autoryzacji, kontroli obciążenia i rozliczeń są automatycznie realizowane bez potrzeby dalszej interakcji z użytkownikiem. Takie rozwiązanie realizowane jest poprzez zastosowanie i weryfikację podpisów oraz przekazywanie certyfikatów X.509. W autobusach ze względu na ładowanie w znanych zamkniętych miejscach stosowany jest system w którym ładowarka pozwala ładować się pojazdom jedynie o określonym MAC adres, który wcześniej jest spisywany z autobusów i wgrany do ładowarki.

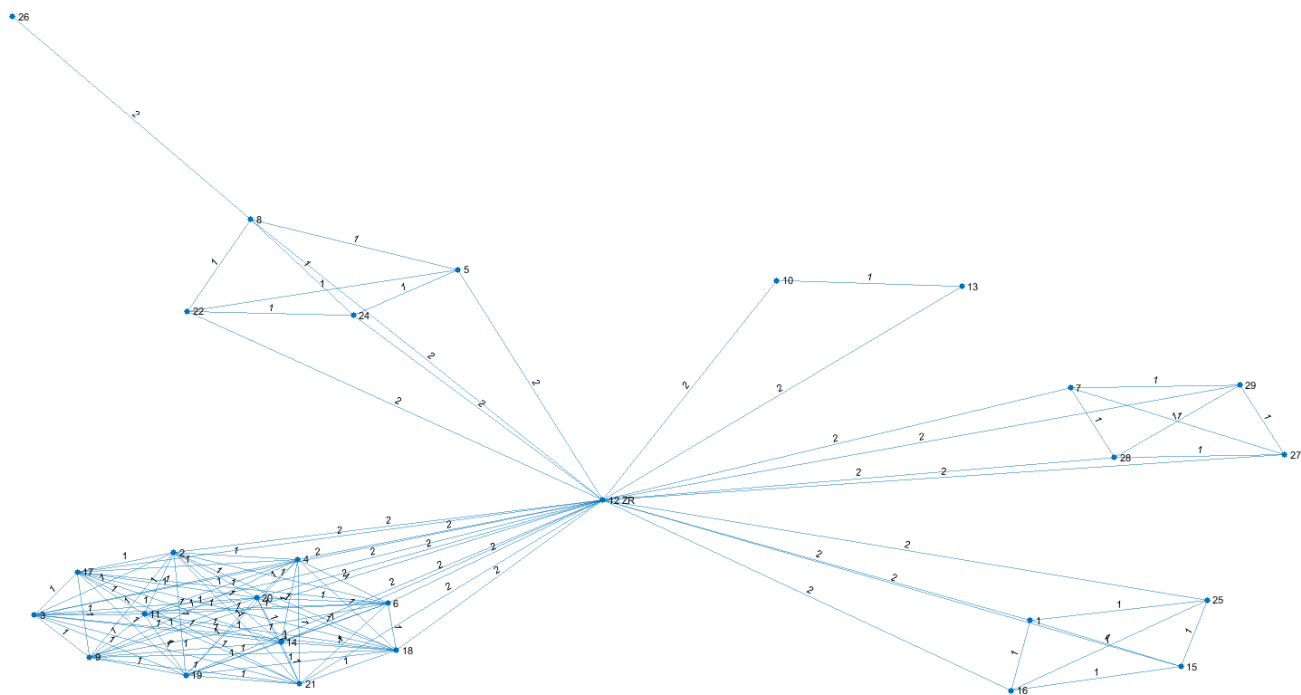
Rozwiązaniem, które wspiera i podwyższa bezpieczeństwo sieci komunikacyjnej w pojeździe jest więc zastosowanie odpowiednich uprawnień dostępu do urządzeń mogących przesyłać dane z sieci na zewnątrz, jak również ingerować w jej działanie poprzez wysyłanie wiadomości sterujących do urządzeń. W przypadku takich urządzeń powinno ograniczać się ilość informacji wraz z czasem w jakim mają do niej dostęp użytkownicy. Udostępnianie pełnych zasobów bez ograniczenia informacji przez nieograniczony czas zwiększa zagrożenie i ułatwia wykonanie zewnętrznych ataków cybernetycznych. Podczas projektowania architektury należy założyć jednak, że będą występowały naruszenia stworzonych przez nas zabezpieczeń, co zgodnie z Regulaminem R155 EKG ONZ musi być monitorowane. Do monitorowania zdarzeń mogą być użyte tak zwane systemy wykrywania włamań (np. IDS). Systemy takie nauczone normalnego ruchu na magistrali do której są podpięte i znające standardy komunikacji są w stanie wykryć i zraportować anomalia w niej występujące. W większości przypadków ze względu na koszt systemów nie obejmują one swoim działaniem wszystkich magistrali w autobusie tylko wybierane są miejscach w których ich obecność jest najbardziej uzasadniona. Tworząc architekturę należy pamiętać, że dodatkowym zabezpieczeniem będzie podzielenie sieci komunikacyjnej na segmenty oddzielone za pomocą gateway`ów, tak aby gdy już nastąpi nieautoryzowany dostęp, wyrządzone szkody były ograniczone. Najlepsze praktyki wskazują na konieczność oddzielenia dodatkowym gateway`em urządzeń umożliwiających dostęp zewnętrzny do autobusu od głównych magistrali komunikacyjnych, tak aby nie pobierały od nich informacji i nie miały bezpośredniego wpływu na ich działanie. Ataki mogą być realizowane też w ramach fizycznego podłączenia się do magistrali. W związku z powyższym instalując na przykład gniazdo OBD w autobusie należy odpowiednio utrudnić mechaniczny dostęp do niego osobom postronnym.

W początkowym stadium tworzenia architektury bardzo ważnym aspektem są więc kwestie związane ze zrozumieniem wymagań zarówno technicznych, dotyczących elementów krytycznych architektury, jak i biznesowych. Krytyczne urządzenia, sygnały czy też miejsca dostępu do sieci komunikacyjnych związane z bezpiecznym funkcjonowaniem autobusu po stworzeniu bazowych rozwiązań muszą być poddane szczegółowej analizie weryfikującej zaimplementowane w nich poziomy zabezpieczeń. Autor w ramach działań implementacyjnych zlecił niezależnym ekspertom wykonanie tak zwanych testów penetrujących zaimplementowanych rozwiązań, aby znaleźć i wyeliminować ich słabe ogniwa. W związku z koniecznością zachowania poufności w tym zakresie, dane dotyczące samych testów i ich wyniku nie zostaną upublicznione. W przypadku kwestii związanych z bezpieczeństwem

funkcjonalnym nie ma mowy o jednorazowym teście, gdyż ze względu na rozwój metod i możliwości hakerów rozwiązania implementowane w autobusach powinny być ciągle modyfikowane i ulepszone. Aby móc porównać w rozdziale 12 niniejszej rozprawy poziom zabezpieczeń nowo stworzonego rozwiązania, autor rozprawy przeprowadził również analizę poprzedniej generacji architektury. W tym celu stworzono graf nieskierowany połączeń logicznych pomiędzy urządzeniami nadzorczo-sterującymi na podstawie którego dokonano analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego. Na grafie przedstawionym na rysunku 8.11. węzły oznaczają urządzenia nadzorczo-sterujące zainstalowane w autobusie, krawędzie sieci oznaczają połączenia logiczne pomiędzy poszczególnymi węzłami magistrali, natomiast wagi oznaczają szacowany na podstawie tabeli 8.9. poziom bezpieczeństwa cybernetycznego dla danej krawędzi. Dla stworzonego grafu zdefiniowano parametr bezpieczeństwa architektury charakteryzujący jej poziom ochrony w postaci:

$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n SR_{ij} \quad (13)$$

We wzorze SR_{ij} to najkrótsza trasa pomiędzy węzłami i oraz j a n jest liczbą węzłów w grafie. Poziom ochrony sieci odzwierciedla więc zakres możliwych najkrótszych powiązań logicznych pomiędzy urządzeniami uwzględniając poziom zabezpieczeń występujący pomiędzy nimi. W analizowanym przypadku poziom ochrony sieci A jest równy 2488. W uproszonych metodach badane są jedynie konkretne wektory ataku, określające najkrótsze trasy pomiędzy urządzeniami krytycznymi a urządzeniami umożliwiającymi dostęp zewnętrznym do autobusu. Autor zdecydował o wykonaniu obliczeń metodą pełną, ponieważ każde z urządzeń podłączonych w analizowanej architekturze ma możliwość albo modyfikacji oprogramowania, parametrów albo bezpośredniej diagnozy. Oznacza to możliwy dostęp zewnętrzny do urządzenia, który może przyczynić się do zaburzenia działania autobusu poprzez dokonanie ataku cybernetycznego. W dalszej części rozprawy w rozdziale 9, dotyczącym zbioru konfiguracji dopuszczalnych, poziomy ochrony tworzonych rozwiązań określono za pomocą wyżej przedstawionej metody [153], [165].



Rys. 8.11. Graf powiązań logicznych dla zaimplementowanej w autobusach Solaris architektury

8.3 Ograniczenia techniczne i biznesowe

Budowa architektury nadzorco – sterującej rozumianej jako zestaw wszystkich urządzeń oraz oprogramowania z uwzględnieniem zależności występujących między nimi wymaga przeprowadzenia szczegółowych analiz zarówno technicznych jak i biznesowych. Dobór urządzeń mogących realizować założone funkcje i usługi jest równie ważny, jak koszty rozwiązania oraz jego implementacji. Aktualne ograniczenia wynikające z dostępności niektórych komponentów oraz ich kosztu w znaczący sposób mogą mieć wpływ na ostatecznie wybrane rozwiązania. W przypadku urządzeń nadzorco - sterujących umowy poufności podpisane z poszczególnymi dostawcami uniemożliwiają wskazanie szczegółowych porównań rozwiązań oraz cen przez nich oferowanych. W związku z powyższym w niniejszej rozprawie metodyka wyboru zostanie zademonstrowana z uwzględnieniem tylko kosztów budowy okablowania strukturalnego oraz urządzeń dodatkowych wymaganych do stworzenia danego rozwiązania. Okablowanie strukturalne w autobusach w porównaniu do samochodów osobowych generuje dużo wyższy koszt. Dzieje się tak ze względu na długość autobusu, która może wynosić nawet do 24m. Długość okablowania strukturalnego zależy wprost od miejsca instalacji urządzenia w autobusie oraz wyboru fizycznego miejsca podłączenia go do systemowej magistrali komunikacyjnej. Szczegóły dotyczące metody optymalizacji długości okablowania strukturalnego dla danego rozwiązania wskazano w rozdziale 8.3.2.

Podczas tworzenia zbioru konfiguracji dopuszczalnych architektury (rozdział 9) wzięto pod uwagę sytuację, w której jeden ze sterowników, który zgodnie z analizą bezpieczeństwa funkcjonalnego został wskazany jako sterownik wyższej klasy – wymagania ASIL C nie jest dostępny. W takiej sytuacji, jak również w sytuacji, gdy dostępne urządzenie sterujące spełniające wymagania określonego ASIL nie może być uwzględnione w architekturze z ekonomicznego punktu widzenia, dokonuje się tak zwanej dekompozycji. W ramach dekompozycji możliwe jest użycie dwóch elektronik niższej klasy. W takim rozwiązaniu jedna elektronika wykonuje obliczenia i zajmuje się sterowaniem a druga nadzorem. W tabeli 8.11 przedstawiono możliwości dekompozycji dopuszczonych w ramach normy ISO 26262.

Tabela 8.11. Zakres dopuszczalnych w ramach normy ISO 26262 dekompozycji ASIL

ASIL	Możliwa dekompozycja
D	ASIL D(D) + QM(D)
	ASIL C(D) + ASIL A(D)
	ASIL B(D) + ASIL B(D)
C	ASIL C(C) + QM(C)
	ASIL B(C) + ASIL A(C)
B	ASIL B(B) + QM(B)
	ASIL A(B) + ASIL A(B)
A	ASIL A(A) + QM(A)

W przypadku analizowanego rozwiązania takiej dekompozycji dokonano w zakresie komputera centralnego autobusu. W architekturze zostały użyte dwie jednostki, o takich samych parametrach. W dalszej części rozprawy jednostki te nazwano komputerem pokładowym oraz komputerem napędowym. W związku z umożliwieniem zamienności komponentów od dostawców w ramach działań związanych z wprowadzeniem nowych typów baterii na rynek przez firmę Solaris, stworzono stały interfejs komunikacyjny na linii bateria - napęd. Wprowadzenie stałych interfejsów komunikacyjnych umożliwia modułowe podejście do komponentów. Możliwa jest ich wymiana na najlepsze dostępne bez wpływu na zamiany w architekturze nadzorczo-sterującej. Niestety doprowadzenie do stworzenia rozwiązań kompatybilnych w zakresie całego życia produktów (aktualizacja oprogramowania, funkcje dodatkowe) przez konkurujące ze sobą firmy nie jest zadaniem prostym.

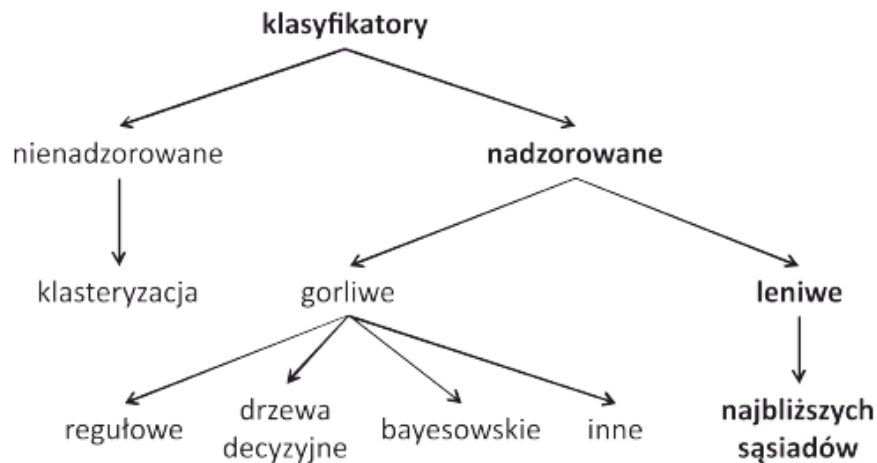
Instalacje autobusowe bazują na komponentach nadzorczo-sterujących pochodzących z dużych firm dostarczających komponenty dla przemysłu motoryzacyjnego. W tej sytuacji projektant nie ma większego wpływu na stworzone według norm i homologowane rozwiązania.

W branży motoryzacyjnej pojawiają się startupy, które wchodzą na rynek nieobciążone wypracowanymi przez lata klasycznymi rozwiązaniami, związanymi z urządzeniami, ich oprogramowaniem oraz możliwościami komunikacyjnymi. Niestety firmy te nie mają doświadczenia w zakresie zautomatyzowanej produkcji wielkoseryjnej. Nie są też w stanie zapewnić przynajmniej 10 letniej dostępności produktów i serwisu w granicach państw europejskich w których sprzedawane są autobusy Solaris. Stanowi to jedną z podstawowych barier do szybkiego wdrożenia na szeroką skalę na przykład nowych magistrali komunikacyjnych znacząco różniących się od klasycznych rozwiązań [16].

8.3.1 Tworzenie połączeń komunikacyjnych – ograniczenia sprzętowe

Mając do dyspozycji wybrane we wcześniejszych analizach urządzenia, bazując na stworzonej i opisanej w ramach rozdziału 7 macierzy $M_{KORELACJI}$ oraz liczbie wymaganych magistral rozpoczęto kolejny etap tworzenia architektury. Szkielet topologii oparto o dwie jednostki centralne, łączące w sobie wiele funkcji w tym funkcję gateway'ów. Podczas projektowania alternatywnych wersji architektury, autor rozprawy kierował się następującymi założeniami: Jeżeli suma generowanych przez urządzenia obciążeń na linii komunikacyjnej zgodnie z założeniami i dobrymi praktykami projektowania topologii magistrali przekracza 80% [166] (maksymalne obciążenie magistrali CAN umożliwiające bezpieczne wysłanie komunikatu diagnostycznego, komunikatów o błędach i przeciążeniach) lub na danej linii przekroczono maksymalną liczbę urządzeń równą 30 ECU [167], czy też długość linii przekroczyła 40 metrów [168], [169], [170], należy rozbudować topologię o kolejne gałęzie, aż do liczby maksymalnej możliwej do utworzenia liczby linii komunikacyjnych zdefiniowanych w analizowanym przypadku jako korelacja liczby kanałów komunikacyjnych wybranych urządzeń umożliwiających rozbudowę architektury. W przypadku dużej liczby urządzeń podłączonych do magistrali, brak szczegółowych analiz oraz ręczne przyporządkowywanie i tworzenie gałęzi z określonymi grupami komponentów sterujących prowadzi do wielu problemów eksploatacyjnych. W przypadku ręcznego przyporządkowania do danej gałęzi w większości przypadków bazuje się na wybranym modelu topologii, na przykład architektury strefowej czy funkcyjnej, które są odzwierciedleniem rozdziału ze względu na jedno kryterium. Podczas tworzenia architektury nadzorczo-sterującej musimy wziąć jednak pod uwagę wiele czynników i ograniczeń opisanych w niniejszej rozprawie. W odpowiedniej klasyfikacji może pomóc system wspomaganie podejmowania decyzji. System ten uwzględni ograniczenia sprzętowe urządzeń oraz wskaże odpowiednie ich rozmieszczenie w architekturze.

Aby go stworzyć należy wypracować dla każdego z analizowanych przypadków ograniczenia odpowiednie klasyfikatory. Klasyfikatory możemy traktować jako algorytmy, które analizując cechy danego obiektu (urządzenia) przypisują go do danej klasy, będącej w analizowanym przypadku odpowiednią linią komunikacyjną. Na rysunku numer 8.12 przedstawiono przykładowy podział algorytmów klasyfikacji.



Rys. 8.12. Systematyka algorytmów klasyfikacji [171]

Wybór klasyfikatora uzależniony jest od wiedzy osób pracujących nad problemem w zakresie jego modelowania matematycznego, dostępnych danych oraz dostępie do wzorców prawidłowych przyporządkowań. W przypadku analiz związanych podziałem danych zgromadzonych w macierzy $M_{KORELACJI}$, na klasy w których znajdują się urządzenia generujące największe obciążenie w komunikacji pomiędzy sobą, gdy dostępne są dane prawidłowo przyporządkowane, dobrze sprawdzą się algorytmy nadzorowane leniwe. W przypadku braku danych możliwe jest użycie klasyfikatorów nienadzorowanych oraz klasteryzacji. W tego typu algorytmach nie jest wymagane tworzenie modelu matematycznego. W przypadku klasyfikatorów leniwych występuje zbiór referencyjny, który jest stworzony jako dobre praktyki przez zespół ekspertów i przez niego w dowolnym momencie modyfikowany. Wada algorytmu, którą można przedstawić jako względnie czasochłonną klasyfikację, w przypadku zastosowania jego jedynie w momencie tworzenia architektury lub jej zmiany nie jest kluczowa. W tej sytuacji nie zależy nam na czasie tworzenia a na jakości uzyskanego rozwiązania. Przepływ danych w klasyfikatorze leniwym wskazuje rysunek 8.13.



Rys. 8.13. Przepływ danych w klasyfikatorze leniwym [171]

Podczas analiz autor rozprawy użył do klasyfikacji metody k-najbliższych sąsiadów. Urządzenie zaliczane jest w przypadku użycia tej metody do linii komunikacyjnej, w której znajdują się inne urządzenia najbardziej do niego podobne, a więc między innymi komunikujące się z największą liczbą tych samych urządzeń. Użycie metody nie wymaga stworzenia funkcji, które będą opisywały granice pomiędzy urządzeniami należącymi do różnych linii komunikacyjnych. Przed rozpoczęciem klasyfikacji zdefiniowano liczbę klas, będących w przypadku architektury liczbą nie większą od możliwych do zainstalowania linii magistrali. Do budowy architektury wybrano komputer ZR5-A wraz z systemem multiplekserów MUX5-B. Komputer ZR5-A wyposażony jest między innymi w 4 interfejsy, które można wykorzystać bezpośrednio przy tworzeniu architektury w oparciu o magistralę CAN. Może on służyć również jako Gateway w komunikacji pomiędzy nimi. Wynik analizy związanej z bezpieczeństwem funkcjonalnym oraz dostępnością podzespołów wskazał, iż muszą być użyte dwa takie urządzenia, co oznacza możliwość stworzenia 7 linii magistrali przy wykorzystaniu jednej z linii jako mostu komunikacyjnego pomiędzy obydwojema komputerami ZR5-A. Oczywiście na tej wspólnej linii komunikacyjnej mogą być również zainstalowane inne urządzenia. Z powyższej analizy wynika, iż maksymalną dopuszczalną liczbą klas w systemie bez użycia dodatkowych urządzeń gateway i rozbudowy go o kolejne komputery ZR5-A jest równa 7. Dodatkową funkcjonalnością ZR5-A, niedostępną w poprzednich wersjach komputera pokładowego jest możliwość przełączenia jednego z wyjść MCANJ z obsługi multiplekserów systemowych na komunikację z urządzeniami zgodnymi z CAN SAE J1939. Ponieważ przeprowadzone analizy wskazały, iż w naszym przypadku wystarczająca będzie jedna linia do podłączenia multiplekserów zyskujemy możliwość stworzenie dwóch dodatkowych magistral CAN w naszym systemie. W sumie może być więc ich 9. W niniejszym przypadku klasy obiektów, a więc przypisania do poszczególnych magistral są opisywane przez kolejne liczby naturalne. Autor rozprawy stworzył zamknięty zbiór identyfikatorów klas $C=\{1,2,\dots,L\}$, gdzie L oznacza liczbę klas równą 9. Rozpoznano, do której klasy należą predefiniowane obiekty, będące poszczególnymi urządzeniami (algorytmy klasyfikacji odwzorowują przestrzeń cech w przestrzeń klas). Każde urządzenie posiada zestaw cech $x^{(i)}, i=1,\dots,F$, który

jest wektorem w przestrzeni cech obrazującym klasyfikowany obiekt $X=[x^{(1)},x^{(2)},\dots,x^{(F)}]$. Cechami w analizowanym przypadku są między innymi powiązania komunikacyjne z poszczególnymi pozostałymi urządzeniami architektury rozszerzone o zakresy prędkości komunikacyjnych na jakich dane urządzenie może pracować. Wektory te rozpinają przestrzeń cech X_F , a cechy te mają możliwość przybierania wartości z różnych przestrzeni. Na potrzeby niniejszego zadania przyjęto, że dysponujemy dyskretyzowanymi parametrami reprezentowanymi ciągiem liczb będących skończonym zbiorem wartości cech obiektu.

W metodzie określamy klasę na podstawie zaobserwowanych w przeszłości danych uczących. Aby zapewnić poprawność działania klasyfikatora należy wziąć pod uwagę warunek, że każda z tworzonych klas musi być reprezentowana w zbiorze danych uczących, tworzonych przez zespół ekspertów. Przygotowanie danych referencyjnych jak również klasyfikowanych przed ich wykorzystaniem w algorytmie polega na przeprowadzeniu ich standaryzacji czy też normalizacji aby wszystkie wymiary przestrzeni danych miały tę samą wagność. W aktualnym przykładzie nie ma sterowników mniej i bardziej istotnych ponieważ z analizy wyłączono systemy informacyjne, a pozostawiono jedynie te, które mają bezpośredni, równie ważny wpływ na działanie autobusu. Przyjęto również, że wszystkie wiadomości przekazywane w ramach komunikacji pomiędzy sterownikami mają ten sam priorytet. W przypadku, gdy uwzględniono by priorytety wiadomości należałoby wprowadzić do metody dodatkowe wagi zwiększające wagność określonych cech. Aby użyć metody należy zdefiniować również liczbę k -najbliższych sąsiadów, którzy będą brani pod uwagę w klasyfikacji oraz miarę odległości, która zostanie zastosowana jako miara podobieństwa w trakcie klasyfikacji. Najczęściej wykorzystywane miary odległości przedstawiono w tabeli 8.12.

Tabela 8.12. Miary odległości wykorzystywane w metodzie k najbliższych sąsiadów

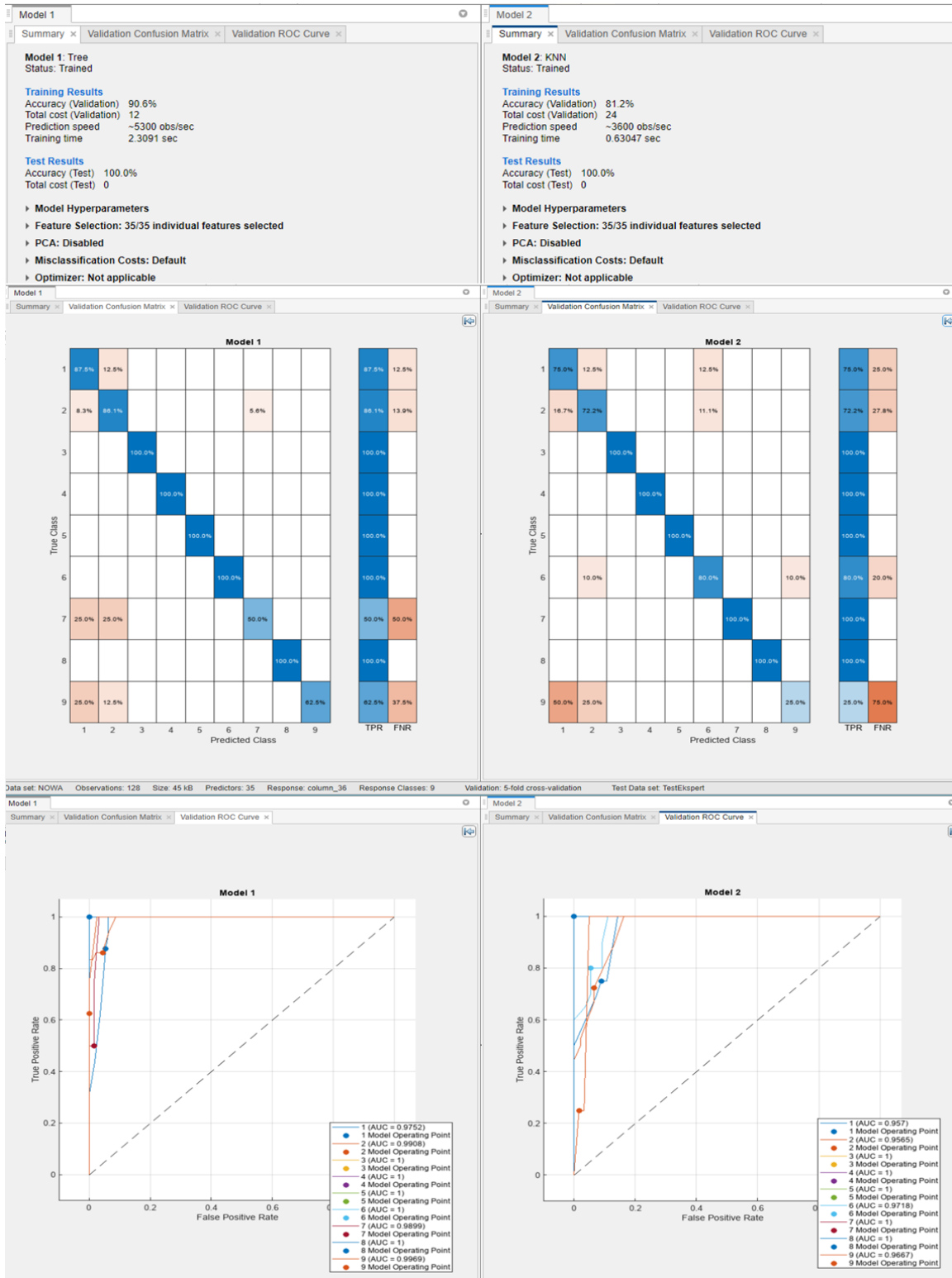
Opis	Miara odległości
Odległość euklidesowa	$\rho_e(x, y) = \sqrt{\sum_{f=1}^F (x^{(f)} - y^{(f)})^2}$ (14)
Odległość Manhattan	$\rho_m(x, y) = \sum_{f=1}^F x^{(f)} - y^{(f)} $ (15)
Odległość Czebyszewa	$\rho_c(x, y) = \max_{f=1, \dots, F} (x^{(f)} - y^{(f)})$ (16)

W analizowanym przypadku dysponowano urządzeniami, których producenci nie zapewniają pełnej konfigurowalności prędkości komunikacyjnych magistrali obsługiwanych przez te urządzenia. Aby zapobiec pomyłkom podczas tworzenia systemu należało przed rozpoczęciem klasyfikacji albo wyróżnić cechy związane z możliwymi prędkościami transmisji albo podzielić ręcznie urządzenia i rozpatrywać osobno jako grupy z transmisją 125 kb/s; 250kb/s oraz 500kb/s. W aktualnym przypadku autor użył automatycznej klasyfikacji i wyróżnił prędkości transmisji. Przeprowadzono naukę klasyfikatora dla kompletu danych zawierających wszystkie grupy transmisji. Obliczenia wykonano przy użyciu oprogramowania MATLAB. Obliczenia zostały wykonane dla $k=5$ sąsiadów. W ramach działań z wytypowano jeszcze jedną metodę klasyfikacji związaną z drzewami klasyfikacyjnymi. Wykorzystano ją również do wyznaczania przynależności obiektów do klas. Analiza drzew klasyfikacyjnych jest jedną z podstawowych technik wykorzystywanych w tzw. zgłębianiu danych (Data Mining). Aby przewidzieć odpowiedź, należy śledzić decyzje w drzewie od węzła głównego (początkowego) do węzła liścia. Węzeł liścia zawiera odpowiedź.

Wskazano jedynie te dwie metody klasyfikacji, ponieważ w tych dwóch przypadkach uzyskano najlepsze wyniki. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą powyższych metod przedstawiono na rysunku 8.14. W obu przypadkach polepszenie jakości wyników klasyfikacji można uzyskać przy zwiększaniu liczebnym i większej różnorodności przypadków uczących. W przypadku pierwszego klasyfikatora istnieją jednak dodatkowe ograniczenia w oprogramowaniu MATLAB – możliwość obsługi do 100 grup, które nie występuje w drugim przypadku. Z wykorzystaniem dwóch powyższych modeli klasyfikatorów przeprowadzono eksperyment walidacyjny polegający na klasyfikacji wcześniej nie wykorzystywanej elektroniki systemu wsparcia kierowcy przed kolizją, której główna komunikacja odbywa się z elektroniką układ hamulcowego EBS. Pełna macierz korelacji dla elektroniki jest następująca:

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

Przeprowadzono klasyfikację. Jako wynik otrzymano wektor, 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.



Rys. 8.14. Porównanie wyników nauki klasyfikatorów najbliższych sąsiadów oraz drzew klasyfikacyjnych

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.

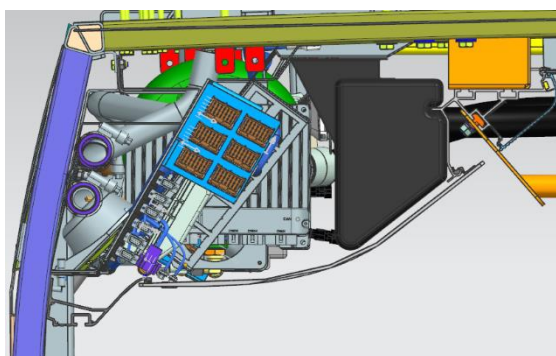
Do znalezienia naturalnych wzorców w danych wielowymiarowych, a więc wytyczenia grup cechujących się największym współczynnikiem korelacji może być wykorzystane również uczenie nienadzorowane. W uczeniu nienadzorowanym, w przeciwieństwie do uczenia nadzorowanego, nie ma zamierzonego wyniku lub celu do którego dopasowujemy dane wejściowe. W takim rozwiązaniu proces uczenia klasyfikatora jest zbędny. Klasyfikator sam ustala związki jakie występują w klasyfikowanych danych oraz dokonuje klasyfikacji. W zbiorze danych uczących nie zapisujemy również informacji na temat etykiety klasy do której należy dany wektor cech. Przy wykorzystaniu algorytmów nienadzorowanych ekspert musi natomiast zweryfikować otrzymane wyniki, nadając wydzielonym podzbiorom odpowiednie etykiety.

Po dokonaniu klasyfikacji konieczne jest przeprowadzenie oceny klastrów, w celu potwierdzenia właściwej ich liczby i dokonanego przyporządkowania dla danego algorytmu grupowania. W przypadku tworzenia topologii magistrali bazującej na dostępnych na rynku urządzeniach maksymalna liczba gałęzi w niej występująca zależy od liczby urządzeń mających większą niż 1 liczbę możliwych do podłączenia linii komunikacyjnych oraz ich zdolności do przesyłania danych pomiędzy poszczególnymi liniami. W opisywanym w rozprawie przykładzie, autor tworząc zbiór konfiguracji dopuszczanych użył różnych metod klasyfikacji.

8.3.2 Ograniczenia związane lokalizacją urządzeń nadzorczo-sterujących w autobusie

Rozmieszczenie urządzeń nadzorczo-sterujących podłączonych do magistrali komunikacyjnych w pojeździe to kolejny element ograniczający zakres swobody projektowej. Pomimo dość znacznych gabarytów autobusów, miejsc w których możliwa jest instalacja urządzeń jest niewiele. Aktualnie produkowane przez firmę Solaris autobusy to rozwiązania niskopodłogowe i niskowejściowe, w których wnętrzach maksymalizowano przestrzeń dla pasażerów. Wpłynęło to na redukcję miejsca na niezbędne instalacje i systemy. Obostrzenia które dotyczą tego obszaru zawarte są między innymi w regulaminie UNECE R 107 rev.7. [172]. Najbardziej wpływające na kształt wnętrza pojazdu ograniczenia dotyczą wolnej przestrzeni jaką trzeba zapewnić pasażerom siedzącym nad podłogą i siedziskiem. Szczegóły

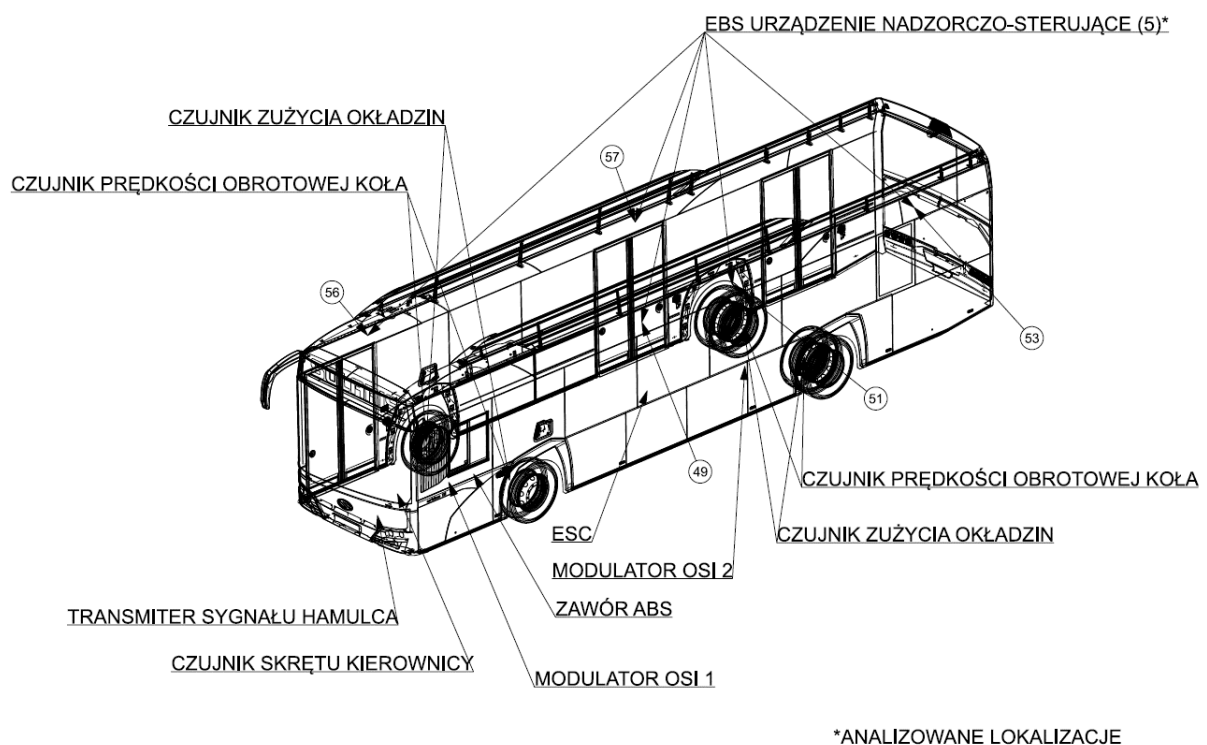
opisano między innymi w punkcie 7.7.8.6 regulaminu - Wolna przestrzeń nad miejscami siedzącymi. W regulaminie poza zwykłymi miejscami siedzącymi, opisano również wymogi dla tak zwanych miejsc siedzących specjalnych. Są one jeszcze bardziej restrykcyjne. Na przykład w autobusach klasy pierwszej nad każdym siedzeniem specjalnym konieczne jest stworzenie wolnej przestrzeni o wysokości nie mniejszej niż 1300 mm, mierzonej od najwyższego punktu nieobciążonej poduszki siedzenia. Przestrzeń ta rozciąga się ponad pionowym rzutem całego siedzenia oraz przynależnego mu miejsca na stopy. Wolna przestrzeń dla pasażerów stojących również podlega ograniczeniom. Jej wysokość to minimum 1900 mm [172]. W praktyce możliwości montażu komponentów elektrycznych i elektronicznych we wnętrzu autobusu ograniczone są do kanałów znajdujących się w narożnikach łączących ściany z sufitem. Instalowane są tam również inne urządzenia i komponenty związane między innymi z pneumatyką, sterowaniem drzwi czy też kanały klimatyzacji, co dodatkowo ogranicza dostępną przestrzeń. Przekrój zabudowy narożnika dachowego wraz z zainstalowanymi komponentami pokazano na rysunku 8.15. Ograniczenia nie występują jedynie ze strony wolnej przestrzeni nad pasażerami, ale również ze strony układu jezdnego, zawieszenia, rozmiaru kół, optymalnych prześwitów czy też kątów natarcia, zejścia czy rampowego, które definiują poziom podłogi. W podłodze instalowane są czujniki zawory, czy aktory. Ze względu na ograniczenia infrastrukturalne w poszczególnych miastach, w konstrukcji autobusów miejskich dąży się do jak najniższej pozycji dachu wraz z zamontowanymi na nim komponentami, przy jednoczesnym uwzględnieniu ograniczeń dotyczących całkowitej wysokości wnętrza pojazdu, co dalej redukuje ilość miejsca do instalacji komponentów i urządzeń.



Rys. 8.15. Przekrój zabudowy kanału dachowego w autobusie solo [16]

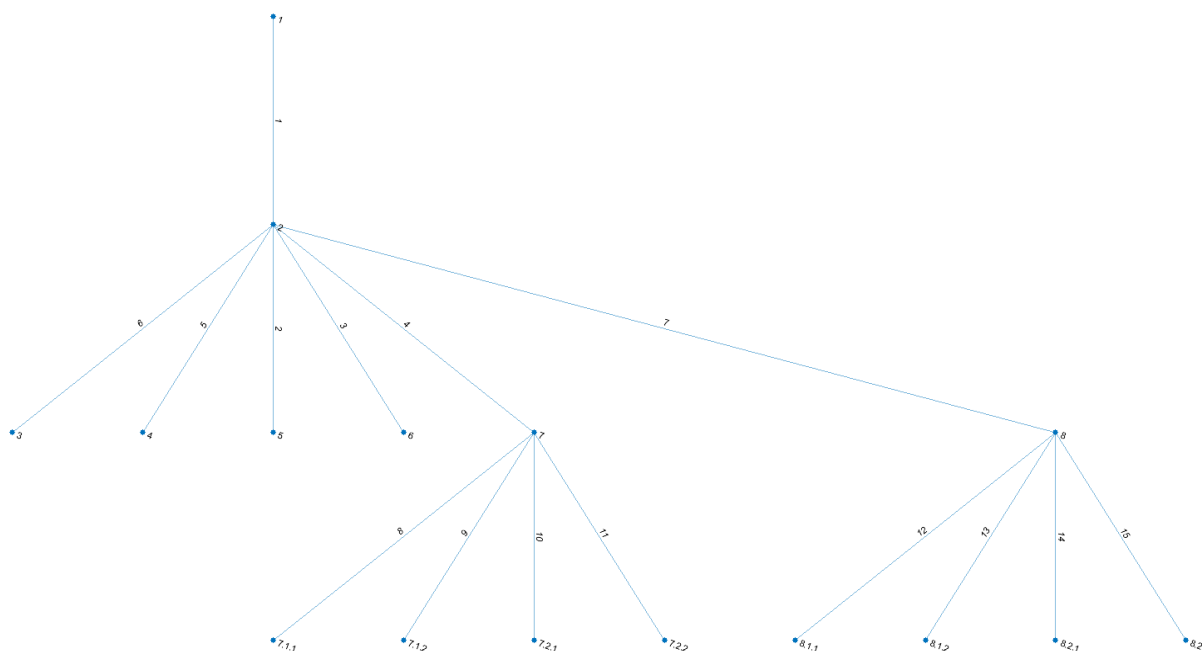
Ważnym aspektem, powiązanim z budową warstwy fizycznej architektury jest więc rozmieszczenie fizycznych komponentów w pojeździe. Miejsce rzeczywistej zabudowy w autobusie sterownika zależy od fizycznej dostępności i wielkości przestrzeni oraz jego

odległości od systemów, którymi steruje lub z których zbiera informacje. Miejsce preferowanej zabudowy musi być więc skonfrontowane z rzeczywistymi jej możliwościami. Dobór miejsca montażu autor rozprawy zaprezentował na podstawie układu nadzorczo-sterującego elektronicznego systemu hamulcowego EBS (Electronic Braking System). Na rysunku 8.16 przedstawiono podstawowe komponenty wymagające okablowania elektrycznego systemu EBS, do których należą: EBS urządzenie nadzorczo-sterujące, które jako jedyne wymaga podłączenia zewnętrznej pojazdowej magistrali komunikacyjnej, układ elektroniczny systemu kontroli stabilności ESC (Electronic stability control), modulator osi 1, modulator osi 2, czujnik skrętu kierownicy, transmiter sygnału hamulca, zawór systemu antyblokującego ABS (anti-lock braking system), czujniki zużycia okładzin oraz czujniki prędkości obrotowej koła.



Rys. 8.16. podstawowe komponenty wymagające okablowania elektrycznego systemu EBS

Topologię fizyczną połączeń w układzie EBS pomiędzy komponentami zaprezentowano na rysunku 8.17.



Rys. 8.17. Topologia połączeń w układzie EBS

Na rysunku oznaczono jako:

1. EBS urządzenie nadzorczo-sterujące
2. Punkt zbiorczy okablowania
3. ESC
4. Zawór ABS
5. Transmitter sygnału hamulca
6. Czujnik skrętu kierownicy
7. Modulator osi 1
 - 7.1.1 Czujnik zużycia okładzin oś 1 strona lewa
 - 7.1.2 Czujnik zużycia okładzin oś 1 strona prawa
 - 7.2.1 Czujnik prędkości obrotowej koła oś 1 strona lewa
 - 7.2.2 Czujnik prędkości obrotowej koła oś 1 strona prawa
8. Modulator osi 2
 - 8.1.1 Czujnik zużycia okładzin oś 2 strona lewa
 - 8.1.2 Czujnik zużycia okładzin oś 2 strona prawa
 - 8.2.1 Czujnik prędkości obrotowej koła oś 2 strona lewa
 - 8.2.2 Czujnik prędkości obrotowej koła oś 2 strona prawa

W analizowanym przypadku wybrany do instalacji układ nadzorczo-sterujący ma stopień ochrony IP30 (Ingress Protection) [173]. Stopień ochrony Oznacza to, że układ musi być zainstalowany w suchym miejscu wewnątrz pojazdu. Przedstawiono więc przypadek,

w którym należy znaleźć najbardziej optymalne pod względem długości okablowania pomiędzy urządzeniami miejsce instalacji elektroniki nadzorczo-sterującą EBS. Podczas analiz należy uwzględnić nie tylko długość okablowania, która wpływa na jego finalną cenę, ale również miejsce jego ułożenia. Ponieważ miejsce instalacji aktorów i sensorów układu podłączonych do układu elektronicznego nadzorczo-sterującego znajduje się w podwoziu, zdefiniowano również możliwe miejsca przepustów do wnętrza autobusu z podwozia oraz trasy kablowe którymi można poruszać się rozkładając okablowanie zarówno w podwoziu jak i we wnętrzu pojazdu. W rozwiązywanym problemie miejsca instalacji pozostałych (poza elektroniką nadzorczo-sterującą EBS) komponentów są zdefiniowane. Zostały one umieszczone zgodnie z wymaganiami ich producenta. Na przykład ESC w określonej przez producenta przestrzeni mierzonej od środka ciężkości pojazdu, co w przypadku autobusu niskopodłogowego definiuje jedno konkretne miejsce instalacji. Środek zarówno nieobciążonego, jak i obciążonego pojazdu wypada w jego wnętrzu, gdzie tego typu elementów nie można instalować. W analizach wskazano stałe miejsca instalacji komponentów, które nie ulegają zmianie podczas przeprowadzania optymalizacji. Na rysunku 8.16 wskazano natomiast rozpatrywane 5 możliwych do instalacji miejsc dla elektroniki nadzorczo-sterującej EBS. Aby przeprowadzić zadanie optymalizacyjne założono funkcję celu. W analizowanym przypadku cel, to minimalizacja sumy długości okablowania dla poszczególnych możliwych do implementacji pozycji montażu elektroniki EBS. W tym przypadku użyto deterministycznej metody optymalizacji bazującej na funkcji użyteczności. Jako kryterium do minimalizacji uznano sumę długości okablowania dla każdej zaproponowanej pozycji elektroniki EBS.

$$U_{i,extr}(k_1) = U_{1,extr}(k_1) + U_{2,extr}(k_1) + \dots + U_{n,extr}(k_1) \quad (17)$$

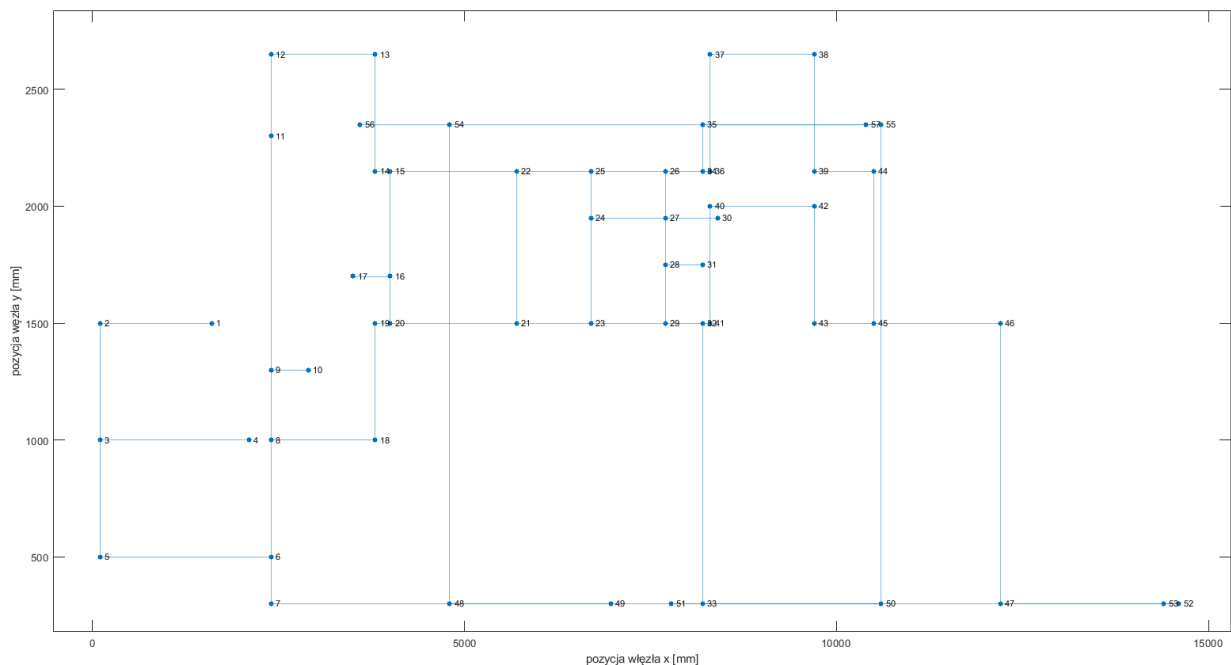
We wzorze $U_{m,extr}$ stanowi optymalną pod względem długości okablowania (k_1) ścieżkę pomiędzy wybraną i -tą lokalizacją elektroniki nadzorczo-sterującej EBS a n -tym komponentem systemu. Finalna lokalizacja elektroniki EBS zostanie wybrana na podstawie kryterium globalnego:

$$\min_{k_1} U_i(k_1) \quad (18)$$

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, złącz, kosztem roboczo godzinny instalacji w podwoziu (użycie dodatkowego sprzętu, podnośników, kanałów, urządzeń

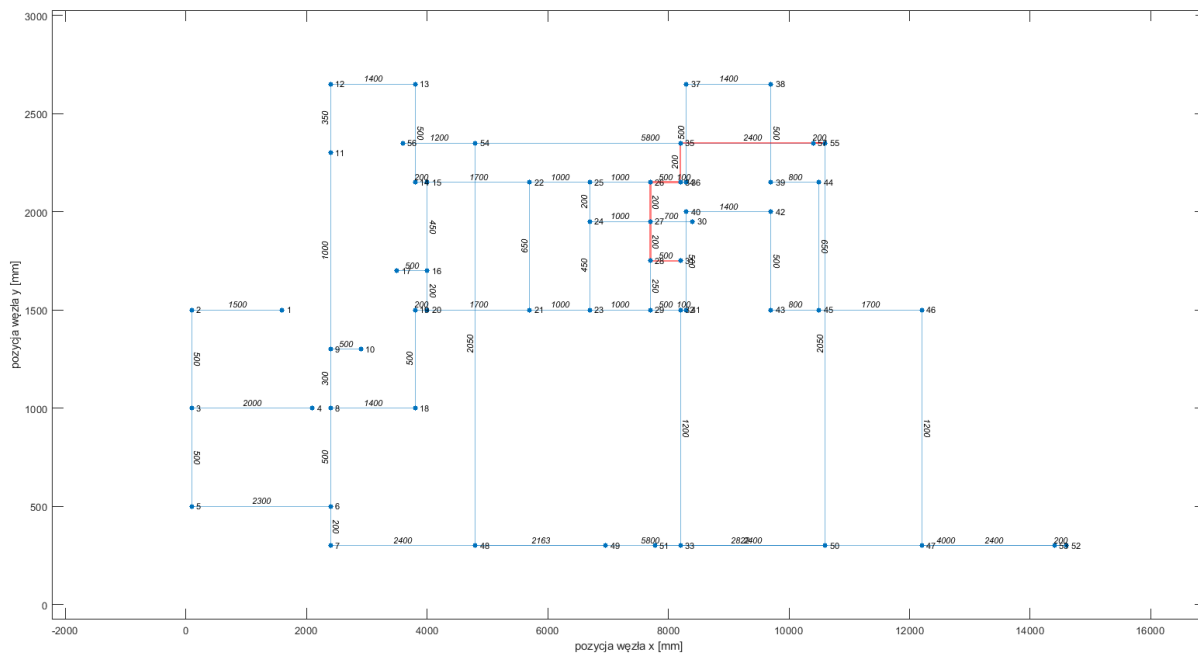
wspierających (koszty amortyzacji tychże urządzeń) oraz wewnątrz pojazdu, które są różne pojawi się możliwość optymalizacji rozwiązania ze względu na dodatkowe kryteria.

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 rzutowano z przesunięciem uwzględniającym różnicę w oddaleniu poszczególnych warstw siatki „tras kablowych” (z_2-z_1 , długość połączeń pomiędzy warstwami) w postaci płaskiego grafu nieskierowanego (rysunek 8.18).

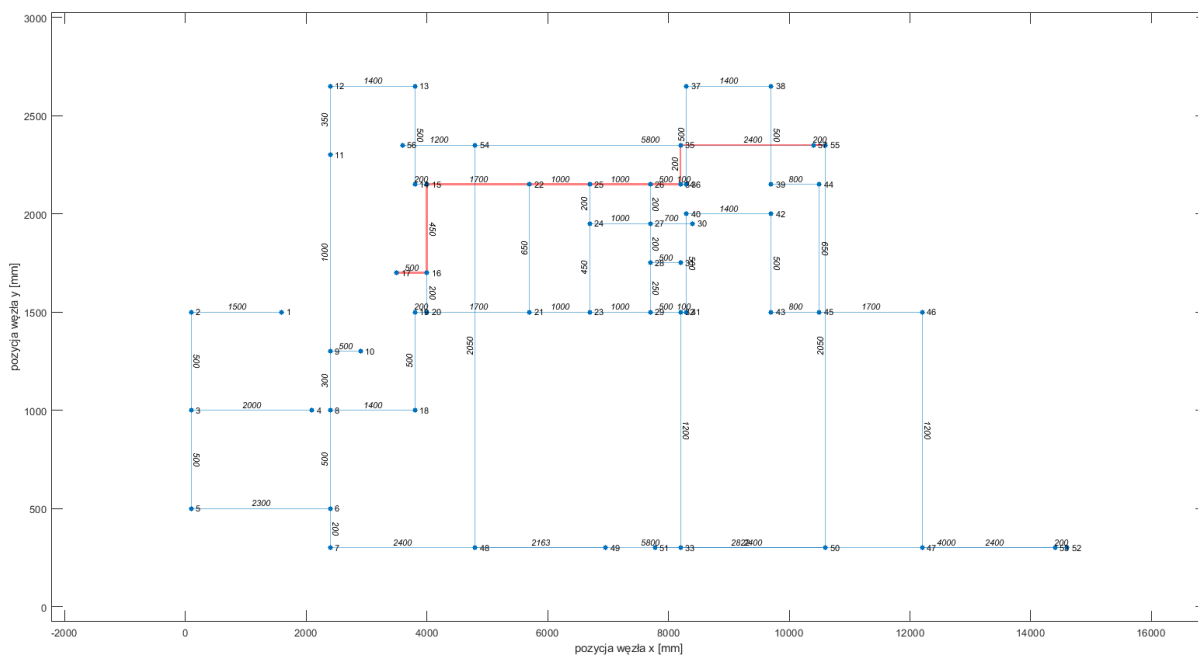


Rys. 8.18. Graf nieskierowany przedstawiający siatkę (topologię) tras kablowych w analizowanym pojeździe Urbino 12

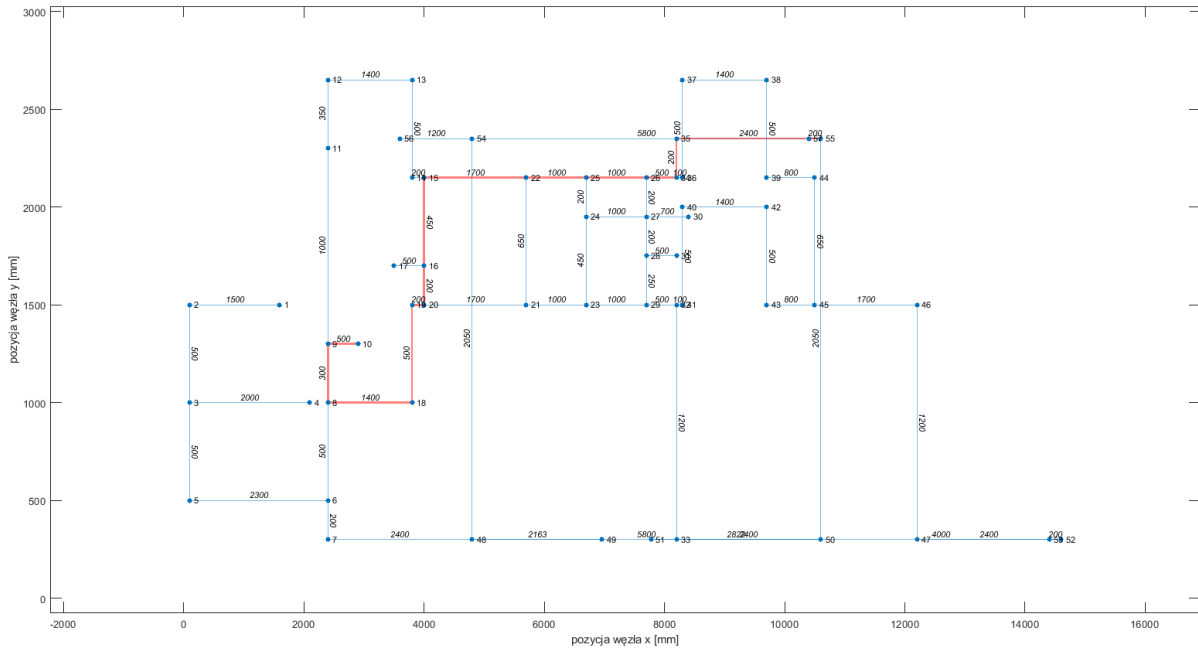
Ze względu na addytywną postać analizowanej funkcji użyteczności względem kryterium, optymalizację ścieżki połączeń dla każdego z urządzeń przeprowadzono osobno. Następnie wyniki dla każdej i -tej lokalizacji układu elektronicznego nadzorczo-sterującego EBS zostały zsumowane zgodnie ze wzorem 5. Na rysunkach 8.19.-8.24. pokazano wyniki poszczególnych analiz ścieżek dla lokalizacji układu EBS w węźle oznaczonym numerem 57, którego punktem zbiorczym okablowania jest węzeł 55.



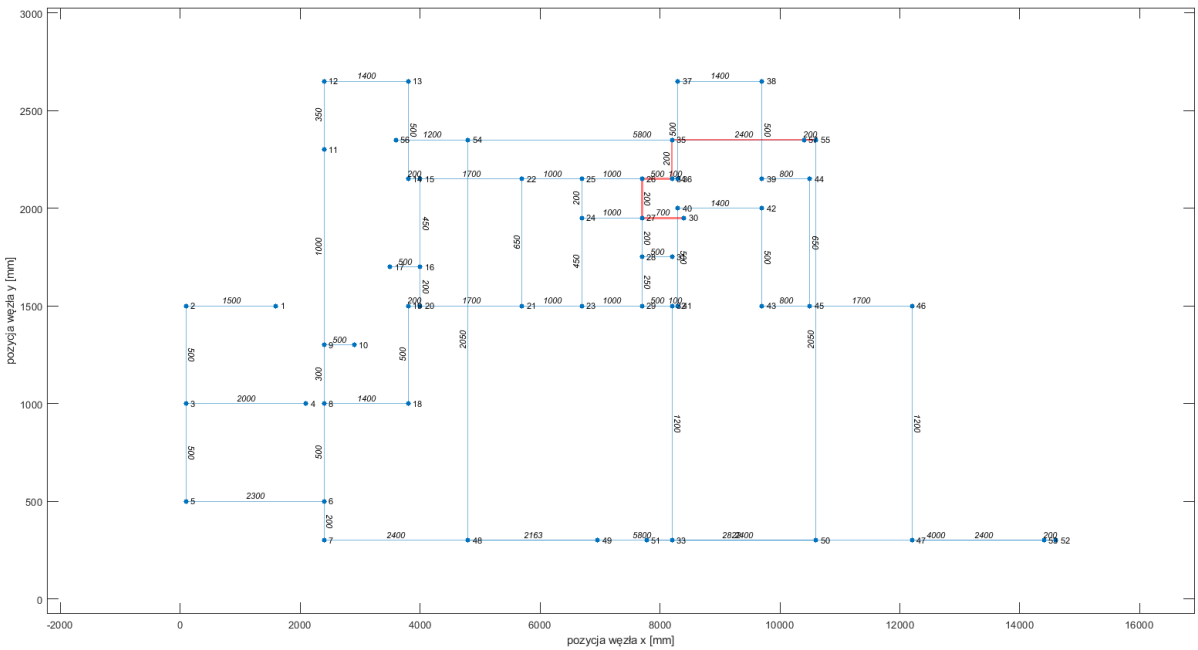
Rys. 8.19. Wyznaczona minimalna długość okablowania pomiędzy pozycją 57 (EBS) a 31 (ESC)



Rys. 8.20. Wyznaczona minimalna długość okablowania pomiędzy pozycją 57 (EBS) a 17 (Zawór ABS)



Rys. 8.23. Wyznaczona minimalna długość okablowania pomiędzy pozycją 57 (EBS) a 10 (Modulator osi 1)



Rys. 8.24. Wyznaczona minimalna długość okablowania pomiędzy pozycją 57 (EBS) a 30 (Modulator osi 2)

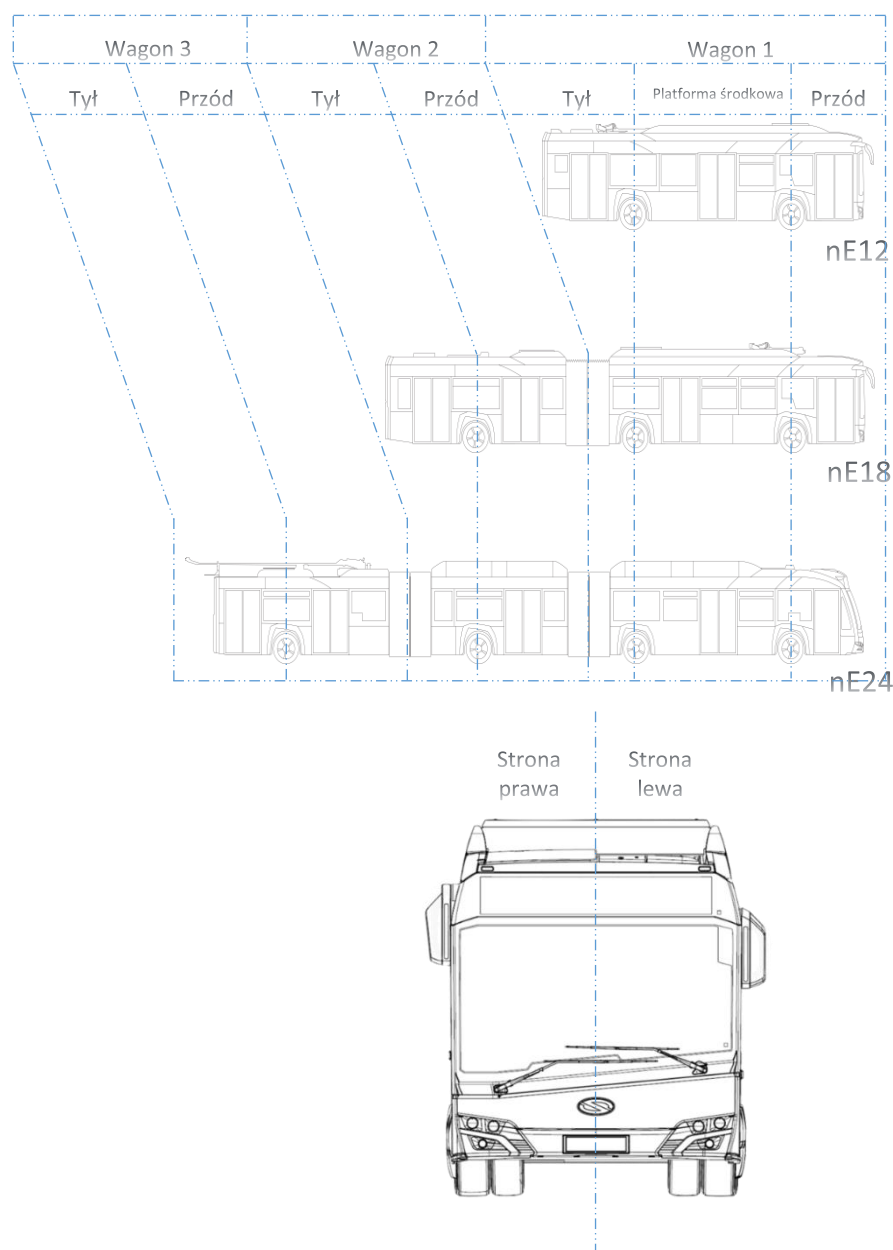
Wyniki analizy dla poszczególnych proponowanych miejsc lokalizacji elektroniki nadzorczo – sterującej EBS (49, 51, 53, 56, 57) zebrano w tabeli 8.13.

Tabela 8.13. 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	

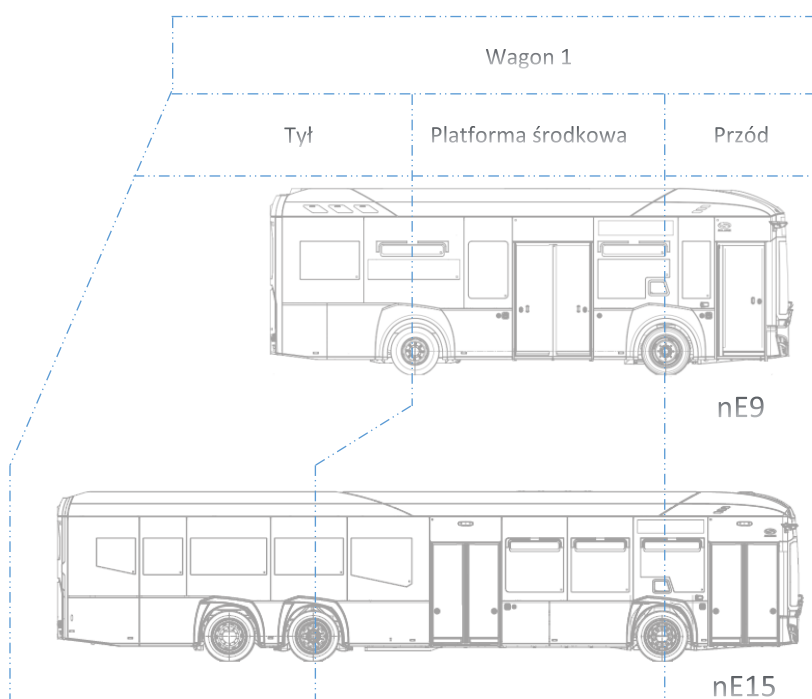
Najniższą długość okablowania osiągnięto w przypadku zlokalizowania sterownika EBS w wierzchołku 57, który odpowiada lokalizacji w platformie środkowej autobusu po prawej stronie. W ramach przedstawionego procesu wyznaczono miejsca lokalizacji poszczególnych pozostałych urządzeń nadzorczo-sterujących. Dane zapisano w macierzy *M_{POZYCJONOWANIA}* przedstawiającej miejsca montażu i pozycjonowanie urządzenia w autobusie w stosunku do pozostałych. *M_{POZYCJONOWANIA}* skonstruowana jest w następujący sposób: kolumny macierzy odpowiadają poszczególnym urządzeniom sterującym instalowanym w autobusie, wiersze odpowiadają strefom montażu, na które został podzielony autobus. Dodatkowo strefy podzielono na stronę prawą i lewą patrząc w kierunku jazdy. Na rysunku 8.25 przedstawiono podział na strefy dla autobusu SOLO, jedno oraz dwu przegubowego. W przypadku przedstawionych długości autobusów poszczególne strefy mają następujące długości. Strefa przednia wagonu pierwszego, czyli tak zwany zwis przedni mierzy 2700 mm. W przypadku autobusów w wersji MetroStyle (a więc z pochyloną przednią szybą) odległość ta wynosi 2800 mm jednakże dla uproszczenia obliczeń przyjęto we wszystkich typach tę samą odległość. Rozstaw osi pierwszego wagonu, a więc platforma środkowa, we wszystkich typach autobusów to 5900 mm. Zwis tylny (tył) w autobusie 12 m wynosi 3400 mm. Odległość od drugiej osi do połowy przegubu (tył w 18 metrowym oraz w 24 metrowym autobusie) to 1788 mm. Przód drugiego wagonu zarówno w autobusie 18 metrowym jak i w 24 metrowym ma 4212 mm, w tym przypadku jednak tył wagonów ma różną długość. Odpowiednio 3400 mm (zwis tylny) dla 18 metrowego autobusu oraz 2616 mm dla 24 metrowego.

Trzeci wagon występuje jedynie w 24 metrowym autobusie i ma od odpowiednio długość 4734 mm przód oraz 2750 mm tył. Szerokość wszystkich zaprezentowanych autobusów wynosi 2550 mm a wysokość w żadnym z przypadków nie przekracza 3350 mm. Powyższe informacje wraz z szczegółowymi wymiarami oraz umiejscowieniem przestrzeni będą niezbędne w dalszej części rozprawy związanej z pozycjonowaniem urządzeń nadzorczo-sterujących w pojeździe oraz obliczeniami związanymi z długością okablowania strukturalnego potrzebnego do ich komunikacji.



Rys. 8.25. Podział na strefy montażu urządzeń elektryczno – elektronicznych dla autobusu SOLO, jedno oraz dwu przegubowego [16]

W niniejszej rozprawie autor wskazuje przykład 12 m autobusu solo, ale pierwsze implementacje metodyki projektowania elastycznej architektury nadzorco-sterującej realizowane w ramach doktoratu wdrożeniowego miały miejsce na autobusach 9 i 15 metrowych. Na rysunku 8.26. wskazano podział na strefy montażu dla tych długości pojazdów. Szerokość autobusów 15 m i 9 metrowego jest różna. Autobus 15 metrowy jest standardowej szerokości 2550 mm, natomiast 9 metrowy jest pojazdem węższym i liczy sobie jedynie 2400 mm szerokości.



Rys. 8.26. Podział na strefy montażu urządzeń elektryczno – elektronicznych dla autobusu 9 i 15 metrowego

W tabeli 8.14. zaprezentowano matrycę $M_{POZYCJONOWANIA}$ stworzoną dla autobusu solo zawierającą urządzenia wybrane i przedstawione w niniejszej rozprawie. Przedstawiona matryca wskazuje na optymalne miejsca zabudowy dla tych urządzeń pod kątem ich odległości od sensorów i aktorów oraz innych urządzeń którymi sterują. Miejsca te zostały również zweryfikowane pod kątem fizycznej możliwości zabudowy urządzeń nadzorco-sterujących. W matrycy w miejscach oznaczonych jako „1” podawane są współrzędne montażu elektroniki (środek umiejscowienia złączy elektrycznych). Dane te są wykorzystywane następnie przy tworzeniu tras kablowych oraz modelu wirtualnego rozmieszczenia komponentów nadzorco sterujących w pojeździe. Na rysunku 8.27 wskazano wybrane obszary montażu urządzeń w autobusie SOLO.

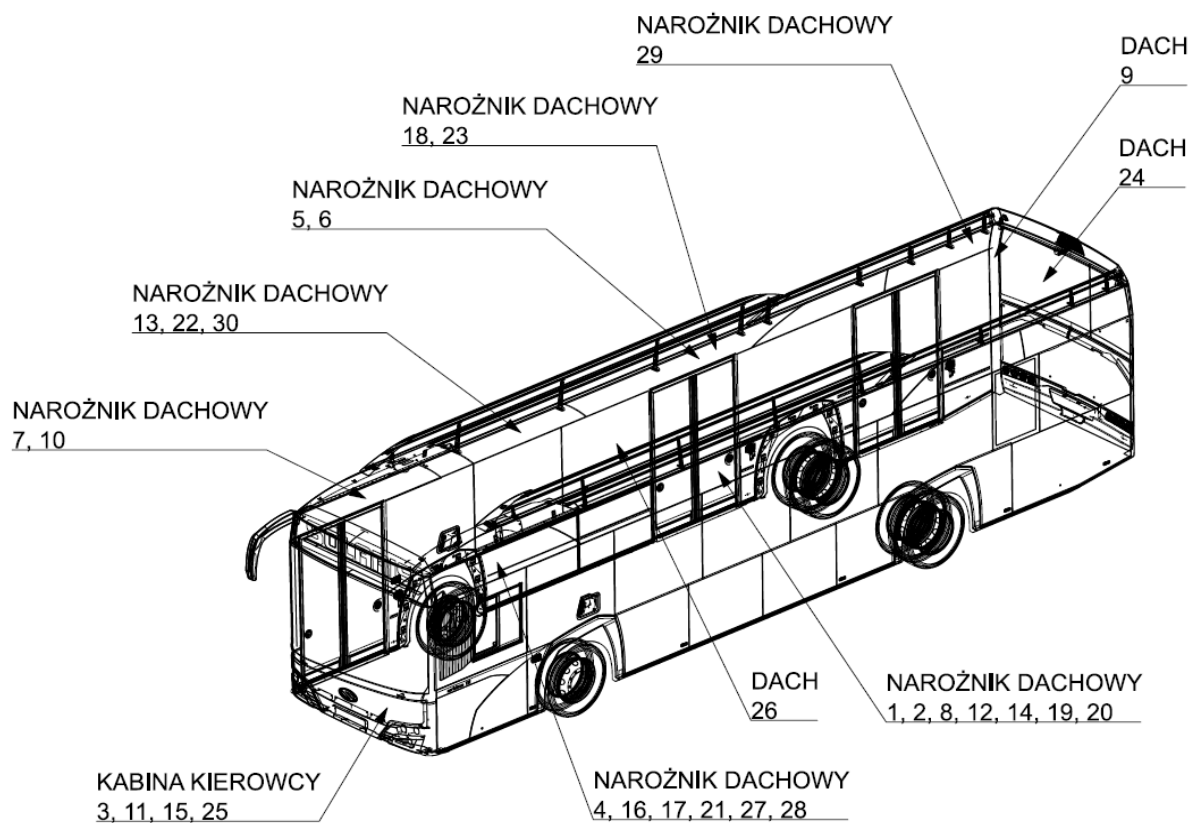
Tabela 8.14. Matryca pozycjonowania wskazująca przyporządkowanie do stref montażu urządzeń elektryczno – elektronicznych dla autobusu SOLO [16]

Urządzenie	Wagon 1				Wagon 2				Wagon 3					
	Przód lewy	Przód prawy	Platforma środkowa lewa	Platforma środkowa prawa	Tył lewy	Tył prawy	Przód lewy	Przód prawy	Tył lewy	Tył prawy	Przód lewy	Przód prawy	Tył lewy	Tył prawy
CPC	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sterownik pompy wspomagania	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedał Gazu	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tachograf	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EBS	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECAS	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M.pom prądu MPP	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MBS baterie	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sterownik systemu baterii trakcyjnych	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Przegub	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pulpit dotykowy	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ZR pojazdowy	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rampa	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FMS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kierownica multifunkcyjna	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sterownik lusterek elektronicznych	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wypadkowy rejestrator danych	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moduł ładowania	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
eSConnect	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Przetwornica DC-DC	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mobileye	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sterownik napędu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ZR napędowy	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pompa wody oś elektryczna	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektronika nastawnika kierunku jazdy	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektronika sterująca drzwiami	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sterownik klimatyzacji	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moduł mikrop. MOD_CAN_28OUT	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moduł przek. CANuPM-14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
drzwi CAD5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektronika sterująca drzwiami	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SBS baterie	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rozlokowując poszczególne urządzenia w pojeździe należy pamiętać nie tylko o konieczności weryfikacji możliwego miejsca ich instalacji ale również długości okablowania infrastrukturalnego za pomocą którego urządzenie będzie się komunikowało z innymi zainstalowanymi w pojeździe. Długość przewodów w magistrali ma bardzo duże znaczenie i będzie wpływała na jakość transmisji. Maksymalna długość magistrali I_{max} na etapie projektowania wyznaczana jest za pomocą zależności:

$$I_{max} = \frac{C_{Cu}}{V_t} \quad (19)$$

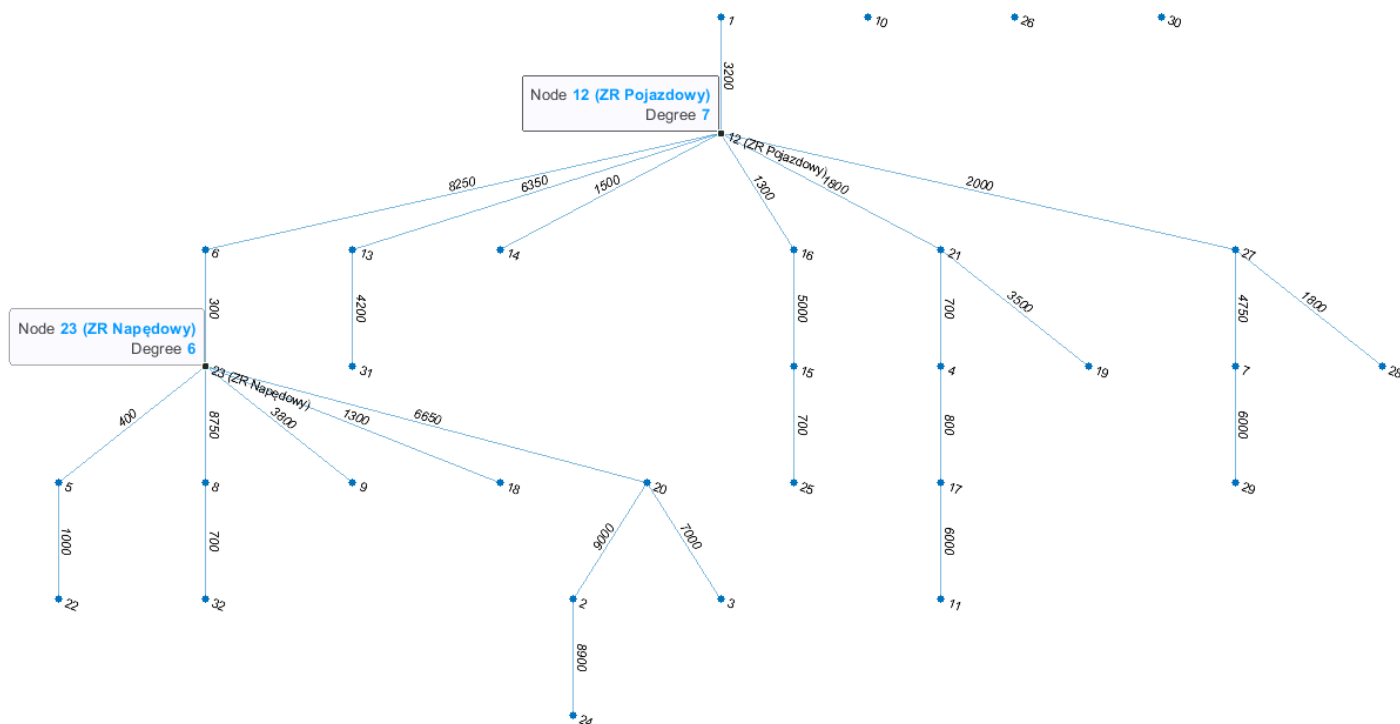
gdzie: V_t – to szybkość transmisji, C_{Cu} – to prędkość rozchodzenia się sygnału w miedzi ($C_{Cu} = 2 \cdot 10^8$ m/s) [174]



Rys. 8.27. Wybrane miejsca instalacji poszczególnych urządzeń nadzorco-sterujących w autobusie solo

Dodatkowo zgodnie z normą ISO 11898 zaleca się, aby długość magistrali nie przekraczała 40 m [168], [169], [170].

Kontynuując obliczenia w oprogramowaniu MATLAB stworzono zgodnie z wytycznymi graf nieskierowany (rysunek 8.28), bazując na połączeniach pomiędzy poszczególnymi węzłami magistrali wyodrębnionych z macierzy $M_{KORELACJI}$ z uwzględnieniem przypisania urządzeń do poszczególnych jej linii. Jako wagi poszczególnych połączeń obliczono długości okablowania strukturalnego pomiędzy węzłami wyrażone w [mm]. Obliczono również łączną długość okablowania strukturalnego, niezbędnego do implementacji danego rozwiązania, która będzie wykorzystywana w dalszych analizach kosztowych. Na rysunku 8.28 urządzenia o numerach 10, 26 oraz 30 nie zostały wykorzystane w bieżącym przykładzie aplikacji. Stanowią one opcje.



Rys. 8.28. Przykład grafu nieskierowany wskazujący zależności związane z okablowaniem strukturalnym architektury

8.3.3 Zakres swobody projektowej przy tworzeniu algorytmów sterujących

W dedykowanych dla poszczególnych systemów urządzeniach nadzorco-sterujących zaimplementowano algorytmy zarówno komunikacyjne jak i obliczeniowe wymagane do realizacji zadań. Dobór sterowników determinuje wybór algorytmów. W większości przypadków sterowniki mogą być jedynie parametryzowane. Należy więc zwrócić szczególną uwagę podczas wyboru urządzeń na udostępniane przez producentów informacje na temat zaimplementowanych algorytmów, czasów reakcji czy też zabezpieczeń uwzględnianych w oprogramowaniu. Zakres swobody projektowej dotyczącej oprogramowania w takich przypadkach jest ograniczony. W autobusach instalowane są również takie urządzenia nadzorco-sterujące, jak komputer centralny, którego celem jest integracja działania poszczególnych urządzeń oraz zapewnienie algorytmów realizujących określone funkcje w pojeździe. W przypadku tego typu urządzeń oprogramowanie tworzone jest przez producenta pojazdu. W wybranych do instalacji komputerach ZR5-A, istnieją ograniczenia związane są z ilością ramek CAN możliwych do wysłania lub odebrania w każdej z magistrali oraz ograniczenia związane z pamięcią dostępną dla programisty zainstalowaną w urządzeniu. W tabelach 8.15 oraz 8.16 wskazano zajętość pamięci ROM oraz RAM dla bazowego programu w komputerze pokładowym. W tabeli 8.18 zebrano dane dotyczące wykorzystania zasobów

związanych z generowaniem, odbieraniem i przekazywaniem wiadomości CAN dla tego programu. Na podstawie przeprowadzonej analizy wykorzystania zasobów (tabele 8.15, 8.16, 8.17) wykazano, że istnieje dalsza możliwość rozwoju architektury i oprogramowania.

Tabela 8.15. Analiza zajętości pamięci ROM dla bazowego programu w komputerze pokładowym ZR5A [16]

Typ	Użyte zasoby [%]	Użyte zasoby [Byte]	Dostępne zasoby [Byte]
Oprogramowanie aplikacyjne	11,9	312456	2621440
Oprogramowanie bazowe	55,5	800704	1441536

Tabela 8.16. Analiza zajętości pamięci RAM dla bazowego programu w komputerze pokładowym ZR5A [16]

Typ	Zadanie	Użyte sygnały	Użyte zasoby [%]	Użyte zasoby [Byte]	Dostępne zasoby [Byte]
Oprogramowanie aplikacyjne	-	-	36	8836	24576
Oprogramowanie aplikacyjne	OsAppModelTask1	-	39,5	25864	65536
Oprogramowanie aplikacyjne	OsAppModelTask2	-	34,1	22336	65536
Oprogramowanie aplikacyjne	OsAppModelTask3	-	0	0	65536
Oprogramowanie aplikacyjne	OsAppModelTask4	-	0	0	32768
Oprogramowanie bazowe	-	-	94,2	154124	163584
Warstwa zarządzania sygnałami - dostęp do odczytu	OsAppModelTask1 OsAppModelTask2 OsAppModelTask3 OsAppModelTask4	7393	6,1	1996	32768
Warstwa zarządzania sygnałami - dostęp do zapisu	OsAppModelTask1	4605	98,2	4024	4096
Warstwa zarządzania sygnałami - dostęp do zapisu	OsAppModelTask2	2788	63,9	2616	4096
Warstwa zarządzania sygnałami - dostęp do zapisu	OsAppModelTask3	0	0	0	4096
Warstwa zarządzania sygnałami - dostęp do zapisu	OsAppModelTask4	0	0	0	4096

Tabela 8.17. Analiza wykorzystania zasobów związanych z generowaniem i odbieraniem wiadomości CAN przez komputer pokładowy ZR5A dla bazowego programu [16]

Obiekt	Źródło	Instancje użytych	Instancje dostępnych
DEM Diagnostic Event Manager	DEM List	228	750
MCAN1 (MUX5-B)	MUX5-B	4	6
MCAN2 (MUX5-B)	MUX5-B	4	6
MCAN3 (Generic)	Generic Rx Message	11	50
	Generic Tx Message	9	20
	Generic Gateway Message	1	100
PCAN --> Generic DM1 Rx Message	Generic DTC Filter	1	250
PCAN	Generic Rx Message	44	75
	Generic Tx Message	30	75
	Generic Gateway Message	5	160
KCAN	Generic Rx Message	25	50
	Generic Tx Message	17	50
XCAN	Generic Tx Message	5	75
ICAN	Generic PG Tx Message	1	15
	Generic PG Rx Message	1	15
	Generic Rx Message	8	75
	Generic Tx Message	24	75
	Generic Gateway Message	2	160

9 Metodyka projektowania: Zbiór konfiguracji dopuszczalnych

Konfiguracja dopuszczalna architektury to zbiór parametrów określających daną architekturę. Konfiguracji dopuszczalnych może być wiele. Na konfiguracje dopuszczalne narzucone są ograniczenia wskazane w rozdziale 8 niniejszej rozprawy. Aby usystematyzować i umożliwić wykonywanie dalszych obliczeń zbiór konfiguracji dopuszczalnych architektury zapisano w postaci macierzy M_{ZKD} .

$$M_{ZKD} = \begin{bmatrix} M_{KD,1} \\ \vdots \\ M_{KD,n} \end{bmatrix} \quad (20)$$

gdzie: $M_{KD,(1...n)}$ stanowią poszczególne konfiguracje architektury.

$$M_{KD,(n)} = [M_{KDN,n} M_{MODA,n} M_{RODA,n} M_{KA,n} M_{KUDA,n} M_{KUDA2,n} M_{CSDA,n}] \quad (21)$$

gdzie: $M_{KDN,n}$ to numer macierzy konfiguracji architektury,

$M_{MODA,n}$ to obciążenie maksymalne linii CAN w procentach występujące w danej architekturze,

$M_{RODA,n}$ stanowi o zakresie obciążeń CAN w danej architekturze i obliczana jest jako różnica obciążeń maksymalnych występujących na najbardziej i najmniej obciążonych liniach w danej architekturze,

$M_{KA,n}$ wskazuje koszt okablowania strukturalnego danej konfiguracji architektury,

$M_{KUDA,n}$ zawiera sumaryczny koszt urządzeń dodatkowych niezbędnych w architekturze do podniesienia bezpieczeństwa (IDS),

$M_{KUDA2,n}$ zawiera sumaryczny koszt urządzeń dodatkowych niezbędnych w architekturze do realizacji danego jej typu (np. kontroler domeny),

$M_{CSDA,n}$ to poziom bezpieczeństwa cybernetycznego dla danej architektury.

Poszczególne architektury dopuszczalne autor rozprawy przedstawił jako macierze składające się z konfiguracji poszczególnych linii.

$$M_{KD,(1...n)} = \begin{bmatrix} M_{Li,1} & M_{KLi,1} & M_{OL,1} & M_{K,1} & M_{KUD,1} & M_{KUD2,1} & M_{CS,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{Li,n} & M_{KLi,n} & M_{OL,n} & M_{K,n} & M_{KUD,n} & M_{KUD2,n} & M_{CS,n} \end{bmatrix} \quad (22)$$

gdzie: $M_{Li,(1...n)}$ to numer rozpatrywanej linii CAN,

$M_{KLi,(1...n)}$ to numer macierzy konfiguracji linii,

$M_{OL,(1...n)}$ wskazuje obciążenie danej linii,

$M_{K,(1...n)}$ jest kosztem okablowania strukturalnego danej linii (suma długości okablowania strukturalnego w [mm] pomnożona przez koszt jednostkowy okablowania),

$M_{KUD(1...n)}$ przechowuje koszt urządzeń dodatkowych w danej linii niezbędnych w architekturze do podniesienia bezpieczeństwa,

$M_{KUD2(1...n)}$ przechowuje koszt urządzeń dodatkowych w danej linii niezbędnych w architekturze do realizacji danego jej typu,

$M_{CS(1...n)}$ przechowuje informacje o poziomie bezpieczeństwa cybernetycznego dla danej linii. Uwzględnia między innymi objęcie danej linii zabezpieczeniami IDS lub IPS czy też odległość i zastosowanie dodatkowych zabezpieczeń dla linii takich jak gateway separujący ją od sterowników mających dostęp do zewnętrznych źródeł wymiany danych,

Macierz konfiguracji linii $M_{KL,(1...n)}$ zawiera informacje dotyczące charakterystyki danej linii oraz urządzeń wchodzących w jej skład.

$$M_{KL,(1...n)} = \begin{bmatrix} U_{i,1} & M_{U,1} \\ \vdots & \vdots \\ U_{i,n} & M_{U,n} \end{bmatrix} \quad (23)$$

gdzie: $U_{i,(1...n)}$ to identyfikator urządzenia nadzorczo – sterującego,

$M_{U,(1...n)}$ to 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 zgodnie z opisem znajdującym się w tabeli 2.3 niniejszej rozprawy (1. CAN – klasa C, 2.CAN klasa B, 3.LIN klasa A).

Po zdefiniowaniu i ustrukturyzowaniu danych dotyczących urządzeń i macierzy komunikacyjnych wraz ze zbiorem dopuszczalnych konfiguracji i ograniczeń systemów autor rozprawy zbudował zbiór dopuszczalnych konfiguracji architektury. Ze względu na ograniczenia wynikające z analizy bezpieczeństwa funkcjonalnego, każda z zaproponowanych konfiguracji dopuszczalnych oparta jest o dwa komputery sterujące: komputer pojazdowy oraz napędowy. Ze względu na sumaryczne obciążenie sieci komunikacyjnej generowane przez urządzenia przekraczające dopuszczalne 80% obciążenia dla pojedynczej magistrali, wybrane dopuszczalne konfiguracje architektury bazują na koncepcji z wieloma magistralami komunikacyjnymi. Magistrale podłączone są do komputerów pokładowego i napędowego tworząc bazowo architektury gwiazdowo - liniowe wraz z mostem komunikacyjnym pomiędzy nimi. W analizowanych konfiguracjach funkcję gateway'ów pomiędzy poszczególnymi magistralami przejmują komputery sterujące. Stanowi to istotną redukcję kosztów architektury. Nowe rozwiązania zapewniają między innymi spadek obciążenia zajętości poszczególnych magistral, który wpływa na prawidłowość ich pracy w normalnym trybie jak również w sytuacji awaryjnej. Stworzona macierz M_{ZKD} (Tabela 9.1) przedstawia zatem możliwy do implementacji zbiór konfiguracji dopuszczalnych architektury opisany wielowymiarowym zestawem parametrów charakteryzujących poszczególne konfiguracje.

Tabela 9.1. Macierz M_{ZKD}

M_{KDN}	M_{ODA}	M_{RODA}	M_{KA}	M_{KUDA}	M_{KUDA2}	M_{CSDA}
1	0,4091	0,3715	512,01	0	650	3406
2	0,4091	0,3715	515,61	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
6	0,4994	0,4216	528,48	400	650	4854
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
10	0,4984	0,4196	474,14	0	650	3538

W ramach opracowania notacji strukturyzującej modelowanie architektury, poza przedstawieniem macierzowym rozwiązania zaproponowano użycie grafów nieskierowanych

jako platformę komunikacyjną interesariuszy uczestniczących w jej projektowaniu. Grafów użyto zarówno w zakresie reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury, jak również do reprezentacji połączeń logicznych w ramach linii podczas analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego dla danej architektury. W pierwszym przypadku informacje na krawędziach grafu stanowią o fizycznych długościach połączeń okablowania strukturalnego, natomiast w drugim przypadku krawędzie zawierają wagę obrazującą poziom ochrony danego połączenia zgodnie z tabelą 8.10. Grafy dla poszczególnych konfiguracji dopuszczalnych zostały przedstawione w tabeli 9.2.

Tabela 9.2. Grafy reprezentacji architektury (7/10)

<p>M_{KON}</p>	<p>Graf reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury</p>
<p>7</p>	
<p>7</p>	<p>Graf połączeń logicznych analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego</p>
<p>7</p>	

10 Metodyka projektowania: Wybór architektury

W poprzednim rozdziale autor rozprawy zaproponował użycie macierzy M_{ZKD} charakteryzującej zbiór dopuszczalnych konfiguracji architektury. Podczas tworzenia tych konfiguracji wzięto pod uwagę ograniczenia wynikające z analizy przepisów prawa oraz norm w Europie, ograniczenia techniczne i biznesowe. Kolejnym etapem jest wybór najlepszego rozwiązania do implementacji. Aby móc dokonać wyboru należy zestawić kryteria wyboru. Ze względu na większą liczbę kryteriów, zarówno technicznych jak i biznesowych, będących w większości przypadków ze sobą w sprzeczności, których nie da się wzajemnie przeliczyć, nie jest możliwe sprowadzenie zadania do pojedynczego kryterium skalarne. Dokonane analizy nie wskazały więc pojedynczej funkcji celu lecz ich wektor. Spowodowało to zwiększenie złożoności zadania. Zagadnienie sprowadza się więc do problemu optymalizacji wielokryterialnej, która polega na minimalizacji lub maksymalizacji wektora funkcji celów podlegającego ograniczeniom.

10.1 Sformułowanie celów dla optymalizacji

W niniejszym akapicie autor rozprawy zdefiniował szczegółowe cele optymalizacji wielokryterialnej, bazując na przeglądzie celów strategicznych. W tabeli numer 10.1 wskazano sposób realizacji poszczególnych celów oraz wyodrębniono te, z których powstaną kryteria optymalizacji.

Tabela 10.1. Realizacja celów dla architektury (1/4)

CELE DLA ARCHITEKTURY	REALIZACJA CELU
Powstała na podstawie celów strategicznych i je realizująca.	<p>Cele strategiczne związane z bezpieczeństwem projektowanego rozwiązania zostały uwzględnione w ramach analiz bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz bezpieczeństwa cybernetycznego przeprowadzanych podczas tworzenia architektury. Bezpieczeństwo to również zapewnienie obciążenia pojedynczej magistrali na poziomie nie przekraczającym 80%, co również zostało uwzględnione w procesie projektowania. Zaproponowane różne wersje architektury mają jednak odmienne poziomy maksymalnych obciążeń występujących na liniach komunikacyjnych, jak również równomierność obciążenia poszczególnych linii komunikacyjnych w ramach danej architektury jest różna. Ponieważ do implementacji musi być wskazany jeden rodzaj architektury, powyższe punkty staną się jednym z kryteriów jej doboru.</p> <p>Cel strategiczny związany z przygotowaniem architektury do instalacji w rodzinie autobusów Urbino electric został osiągnięty. Przygotowane wytyczne dotyczą implementacji rozwiązania w całej rodzinie autobusów. W rozdziale 8.3.2 wskazano np. podziały na strefy montażu dla różnej długości pojazdów. Tworząc macierz korelacji (rozdział 7) oraz zbiór danych uczących dla klasyfikatora w uczeniu nadzorowanym użyto również urządzeń sterujących dedykowanych dla autobusów przegubowych. Zaprojektowano i zaimplementowano nowo opracowane rozwiązanie również w autobusach 9 oraz 15 metrowym. Możliwe jest zatem użycie metodyki do stworzenia architektury dla całej rodziny autobusów Urbino electric.</p>
Zgodna z aktualnym prawem, normami i dobrymi praktykami branżowymi.	Rozpoznano przepisy prawa oraz normy branżowe. Wskazano na konieczność spełnienia przez nową architekturę wymagań związanych z bezpieczeństwem cybernetycznym oraz bezpieczeństwem funkcjonalnym. Przepisy dotyczące obowiązkowego stosowania regulaminów R155 oraz R156 dla nowych typów autobusów stały się wymogiem od 07.2022r. Począwszy od 07.2024 będą one wymogiem dla wszystkich pojazdów rejestrowanych pierwszy raz na terenie krajów UE.
Rozwiązuje problemy, które zostały zidentyfikowane we wcześniejszych jej wersjach.	Zognie z wykonanymi obliczeniami nowo opracowana architektura zredukowała zbyt duże obciążenia linii CAN przekraczające 80%.
Interoperacyjna, skutecznie integruje się i współpracuje z innymi systemami.	Nowa architektura nadzorczo-sterująca została zaprojektowana w sposób umożliwiający integrację z architekturą informacyjną przedstawioną w rozdziale 2.5.2. dzięki wykorzystaniu FMS [73]. Zapewnia również komunikację z systemem diagnostyki eSConnect.
Stworzona z wyselekcjonowanych komponentów, dla których ustalono jasne kryteria brzegowe.	Do budowy architektury użyto jedynie wyselekcjonowanych komponentów spełniających wymagania norm, mających certyfikację oraz wykonane badania na zgodność z homologacją autobusową (między innymi R100/R10).

Tabela 10.1. Realizacja celów dla architektury (2/4)

CELE DLA ARCHITEKTURY	REALIZACJA CELU
<p>Elastyczna, umożliwia opcjonalne instalowanie dodatkowych komponentów lub ich dezaktywację bez znaczącego wpływu na jej parametry pracy.</p>	<p>W tworzonych rozwiązaniach użyto stałego szkieletu topologii, który jednak umożliwia podłączenie nowych urządzeń dzięki łatwej możliwości weryfikacji poziomu obciążeń linii komunikacyjnych. Przygotowany jest również pod możliwość dołączenia kolejnych linii komunikacyjnych umożliwiających jej dalszy rozwój przy utrzymaniu poziomu bezpieczeństwa. Zbytne uelastycznienie może powodować problemy związane z zapewnieniem bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz bezpieczeństwa cybernetycznego projektowanej architektury dlatego pewne jej fragmenty muszą pozostać stałe.</p>
<p>Adekwatna do aktualnie dostępnych technologii i rozwiązań branżowych, bazująca na wzajemnych powiązaniach komponentów realizujących funkcje wymagane do prawidłowej pracy i komunikacji pojazdów.</p>	<p>Rozpoznano aktualnie dostępne technologie oraz rozwiązania związane z budową architektury nadzorczo–sterującej. Zaprezentowano je w rozdziale drugim niniejszej rozprawy. Zweryfikowano najnowsze rozwiązania prezentowane przez producentów urządzeń wybierając te, które realizowały wymagane funkcje, spełniały wymagania techniczne, przepisy prawa, normy oraz wymagania biznesowe. Stworzono model abstrakcyjny, którego wynikiem jest macierz korelacji wskazująca wzajemne powiązania komponentów realizujących funkcje wymagane do prawidłowej pracy i komunikacji.</p> $M_{KORELACJI} = [a_{i,j}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & a_{i,j} & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & 0 \end{bmatrix},$
<p>Spełnia cele biznesowe, zastosowane w niej rozwiązania są ekonomicznie uzasadnione (koszty nabycia, koszty eksploatacji). Dopuszcza się zwiększenie kosztów okablowania strukturalnego o 50% oraz instalację dodatkowych urządzeń niezbędnych do funkcjonowania architektury w kwocie nie przekraczającej 1500 zł.</p>	<p>Architektura "jest zbiorem minimum tego co jest potrzebne a nie maksimum tego co jest możliwe" [123]. Przygotowano rozwiązania spełniające postawione cele i wymagania. Kwestia biznesowa wskazana jako koszt zmienny architektury (koszt stały, związany z wybranym zestawem urządzeń obsługujących wymagane w architekturze funkcje, nie został opisany w niniejszej rozprawie, ze względu zakres umów o zachowaniu poufności z dostawcami komponentów), na który składają się okablowanie strukturalne oraz koszt urządzeń dodatkowych zwiększających bezpieczeństwo poszczególnych wersji architektury, ze względu na różne wartości dla poszczególnych rozwiązań otrzymane podczas analizy, stanie się jednym z kryteriów wyboru jednej wersji do implementacji. Funkcja kosztów zostanie uwzględniona więc w procesie optymalizacji. Przedstawiona w rozprawie metoda pozwala na dodanie pozostałych kosztów przy tworzeniu tej funkcji.</p>

Tabela 10.1. Realizacja celów dla architektury (3/4)

CELE DLA ARCHITEKTURY	REALIZACJA CELU
Zachowuje się zgodnie z oczekiwaniami (wydajność, przepustowość).	Zaprojektowane opcje architektury umożliwiają realizację założonej w analizie bezpieczeństwa funkcjonalnego wydajności. Rozwiązania realizują wymagane czasy FRTI (Fault Reaction Time Interval) i przejście w stan bezpieczny zachodzi poniżej zdefiniowanego dla celu bezpieczeństwa interwału czasowego tolerancji na błędy FTTI. (Fault Tolerant Time Interval). Projektowane rozwiązania uwzględniają linie o wymaganej przepustowości, a więc maksymalnej ilości danych, jaka może zostać przesłana za pomocą danego łącza w jednym momencie. Zaprojektowane architektury realizują również założone w fazie projektowej obciążenie pojedynczej linii komunikacyjnej na poziomie nie przewyższającym 80%. Zaproponowane różne wersje architektury mają jednak odmienne poziomy maksymalnych obciążeń występujących na liniach komunikacyjnych, powyższy punkt stanie się więc jednym z kryteriów wyboru jej wersji do implementacji.
Łatwa do zarządzania i rozbudowy.	Architektura nie jest statyczna tylko podlega ciągłym zmianom. Wymaga więc przy dodawaniu kolejnych usług lub komponentów sformułowania procedur postępowania wchodzących w skład metodyki oraz opracowania notacji strukturyzującej jej modelowanie, stanowiącej platformę komunikacyjną interesariuszy uczestniczących w jej projektowaniu i ocenie. Powyższe punkty zostały zrealizowane i opisane w ramach niniejszej rozprawy. W ramach działań związanych z rozbudową architektury przygotowano między innymi rozwiązanie bazujące na macierzy $M_{KORELACJI}$, która wskazuje pełen zakres wymaganych do poprawnej pracy powiązań komunikacyjnych dla analizowanych urządzeń. Przypisanie urządzenia do danej linii komunikacyjnej realizowane jest za pomocą klasyfikatorów, które można traktować jako algorytmy analizujące cechy danego urządzenia i przypisujące go do danej klasy. Przedstawiono metody wykorzystujące uczenie nadzorowane, w którym klasyfikator uczony był na podstawie danych przygotowanych przez ekspertów, jak również wskazano możliwości wykorzystania w tym celu uczenia nienadzorowanego.
Łatwa i tania do utrzymania.	Stworzone architektury spełniają wymagania zarówno techniczne jak i finansowe. Uwzględniają również możliwość dalszego ich utrzymania i rozwoju, dzięki zachowaniu nadmiarowości w zakresie umożliwiającej dodanie urządzeń do wykorzystywanych linii komunikacyjnych jak również rozbudowy o kolejne linie uwzględniające bazowe rozwiązania architektury. Architektura zachowuje więc skalowalność. Wprowadzenie metodyki oraz notacja strukturyzująca jej modelowanie wpływa na obniżenie kosztów jej modyfikacji i utrzymania w porównaniu do poprzedniej wersji architektury implementowanej w autobusach firmy Solaris.

Tabela 10.1. Realizacja celów dla architektury (4/4)

CELE DLA ARCHITEKTURY	REALIZACJA CELU
Łatwa do diagnozowania, testowalna.	Podczas projektowania rozwiązań uwzględniono czynnik związany z optymalnym pod względem miejsca instalacji rozmieszczeniem urządzeń nadzorczo-sterujących. Zostały one rozmieszczone w sposób zapewniający łatwy dostęp przy jednoczesnym minimalizowaniu długości okablowania pomiędzy ECU a jego czujnikami i aktorami obsługującymi oraz sterującymi określone urządzenia w pojeździe. Zaproponowane architektury zapewniają nie tylko łatwy dostęp do urządzeń, ale również do okablowania strukturalnego (stałe trasy kablowe), co skraca czas potrzebny do przeprowadzenia diagnozy w przypadku awarii magistrali. Zaprojektowane architektury uwzględniają również integrację urządzenia do zdalnej diagnozy eSConnect, co umożliwi nie tylko analizę zaistniałych w autobusie problemów, ale również ich predykcję dzięki monitorowaniu zmian zachodzących w systemach.
Trwała, spełniająca wymagania dotyczące czasu życia. Dostępność odpowiednich urządzeń / zamienników w tym czasie.	Podczas tworzenia architektury wzięto pod uwagę tylko najnowsze rozwiązania dostępne u producentów, weryfikując wymagane czasy życia urządzeń oraz dostępność serwisową rozwiązań. W większości przypadków dostępne są zamienniki rozwiązań, lecz nie dotyczą one samego sterownika tylko całego systemu. W ramach działań związanych z tworzeniem nowej architektury stworzono stały interfejs pomiędzy autobusem a bateriami trakcyjnymi, umożliwiający ich wymianę wraz ze sterownikiem, bez modyfikacji architektury. W podpisanych z dostawcami umowach zapewniono dostępność poszczególnych komponentów w wymaganym czasie.
Spełniająca normy bezpieczeństwa funkcjonalnego, zduplikowana w punktach tego wymagających.	W ramach tworzenia architektury do osiągnięcia wymaganego poziomu ASIL ze względu na brak dostępności urządzeń spełniających wymagania użyto mechanizmu dekompozycji. Zamiast pojedynczego komputera pokładowego ZR zaimplementowano dwa urządzenia o niższym poziomie ASIL.
Poziom spełnienia bezpieczeństwa cybernetycznego przynajmniej o 30% wyższy niż w aktualnych rozwiązaniach.	W ramach działań związanych z bezpieczeństwem, stworzono grafy nieskierowane obrazujące poziom powiązań logicznych dla każdej proponowanej wersji architektury oraz wykonano obliczenia związane z poziomem ich bezpieczeństwa cybernetycznego. Kwestia poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego jest jednym z aspektów, który przyjmuje różne wartości dla poszczególnych rozwiązań, stanie się więc jednym z kryteriów wyboru rozwiązania do implementacji.
Minimalizująca potrzebę komunikacji i sterowania poprzez HMI– pozwalająca na automatyzację procesów nadzorczo- sterujących.	Zadanie zostało wykonane dzięki modyfikacji rozwiązania sterowania procesem ładowania baterii trakcyjnych za pomocą pantografu. W autobusie podczas jazdy blokowane są również niektóre z funkcji aby nie odrywać uwagi kierowcy.

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

$$M_{KD,v} = [\min(M_{MODA,v}) \min(M_{RODA,v}) \min(M_{KA,v}) \min(M_{KUDA,v}) \max(M_{CSDA,v})] \quad (24)$$

Zgodnie z celami, które wskazano w tabeli 10.1. niniejszej rozprawy poziom spełnienia bezpieczeństwa cybernetycznego musi wzrosnąć o przynajmniej 30% w stosunku do aktualnie implementowanego rozwiązania architektury strefowej skonsolidowanej. Poziom bezpieczeństwa wyliczony zgodnie ze wzorem 1 niniejszej rozprawy wynosi 2488. Stąd wyliczono ograniczenie $M_{CSDA} > 3234,4$. We wzorze (24) nie uwzględniono ograniczenia $M_{KUDA2,v}$ ze względu na tę samą wartość parametru – 650 zł. Po odjęciu wartości od 1500 zł pozostałe akceptowalne koszty dla $M_{KUDA,v}$ kształtują się na poziomie 850 zł. Ograniczenie to zostało spełnione we wszystkich analizowanych wersjach architektury (tabela 9.1 Macierz M_{ZKD}). Zgodnie z celami, również koszt okablowania strukturalnego nie może wzrosnąć o więcej niż 50%. Koszt okablowania w architekturze bazowej to 414 zł, stąd ograniczono $M_{KA,v}$ do wartości poniżej 621 zł. Warunki ograniczeń dodatkowych:

$$\begin{aligned} M_{MODA,v} &< 80\% \\ M_{RODA,v} &< M_{MODA,v} - 3\% \\ M_{KA,v} &< 621 \text{ zł} \\ M_{KUDA,v} + M_{KUDA2,v} &< 1500 \text{ zł} \\ M_{CSDA} &> 3234,4 \end{aligned} \quad (25)$$

Autor rozprawy wskazał, iż w analizowanym przypadku należy użyć metod optymalizacji wielokryterialnej. Zaproponował zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej w dwóch etapach. W pierwszym wyznaczono zbiór konfiguracji kompromisowych a drugim wybrano z nich najlepsze optymalne rozwiązanie.

10.2 Przestrzeń rozwiązań optymalnych

Analizując zbiór rozwiązań dopuszczalnych zapisany w macierzy M_{ZKD} , możliwe będzie przeprowadzenie z uwzględnieniem wektora zmiennych decyzyjnych M_{KD} 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 przynajmniej dla jednego kryterium $M_{KDN,n}$ wskazuje przewagę nad $M_{KDN,m}$ a dla pozostałych kryteriów jest przynajmniej nie gorsza. W tabeli 10.2 pokazano wynik przeprowadzonej analizy.

Tabela 10.2. Analiza porównania architektur w aspekcie kryterium względem którego przynajmniej dla jednego kryterium $M_{KDN,n}$ jest lepsza od $M_{KDN,m}$ a dla pozostałych kryteriów przynajmniej nie gorsza.

Porównywane architektury n vs. m / m vs. n		Lepsza architektura
1	2	1
1	3	0
1	4	0
1	5	0
1	6	0
1	7	0
1	8	0
1	9	0
1	10	0
2	3	0
2	4	0
2	5	0
2	6	0
2	7	0
2	8	0
2	9	0
2	10	0
3	4	0
3	5	0
3	6	0
3	7	0
3	8	0
3	9	0
3	10	3
4	5	0
4	6	4
4	7	0
4	8	0
4	9	0
4	10	0
5	6	5
5	7	0
5	8	0
5	9	0
5	10	0
6	7	0
6	8	0
6	9	0
6	10	0
7	8	0
7	9	0
7	10	0
8	9	0
8	10	0
9	10	0

Wyniki uporządkowania zbioru konfiguracji dopuszczalnych zapisanych w macierzy M_{ZKD} według powyższej relacji mogą być przedstawione w postaci grafu skierowanego, który nazywany jest diagramem Hassego.

Digraf (directed graph - graf skierowany), jest grafem w którym krawędzie reprezentowane są przez pary uporządkowane wierzchołków i nazywane łukami. Digraf prosty, to taki, który nie zawiera pętli i łuków wielokrotnych. Szkielet digrafu stanowi graf nieskierowany powstały z zastąpienia każdego łuku krawędzią nieskierowaną [175].

Porządek częściowy:

$$P = (V, \leq) \quad (26)$$

jest parą składająca się ze zbioru elementów V i relacji binarnej na zbiorze V , która jest: zwrotna, antysymetryczna oraz przechodnia. Symbol „ \leq ” użyty jako uogólnienie porządku na dowolne relacje abstrakcyjne spełniające definicję [175].

Diagram Hassego danego porządku częściowego $P = (V, \leq)$ to rysunek grafu

$$G = (V, <) \quad (27)$$

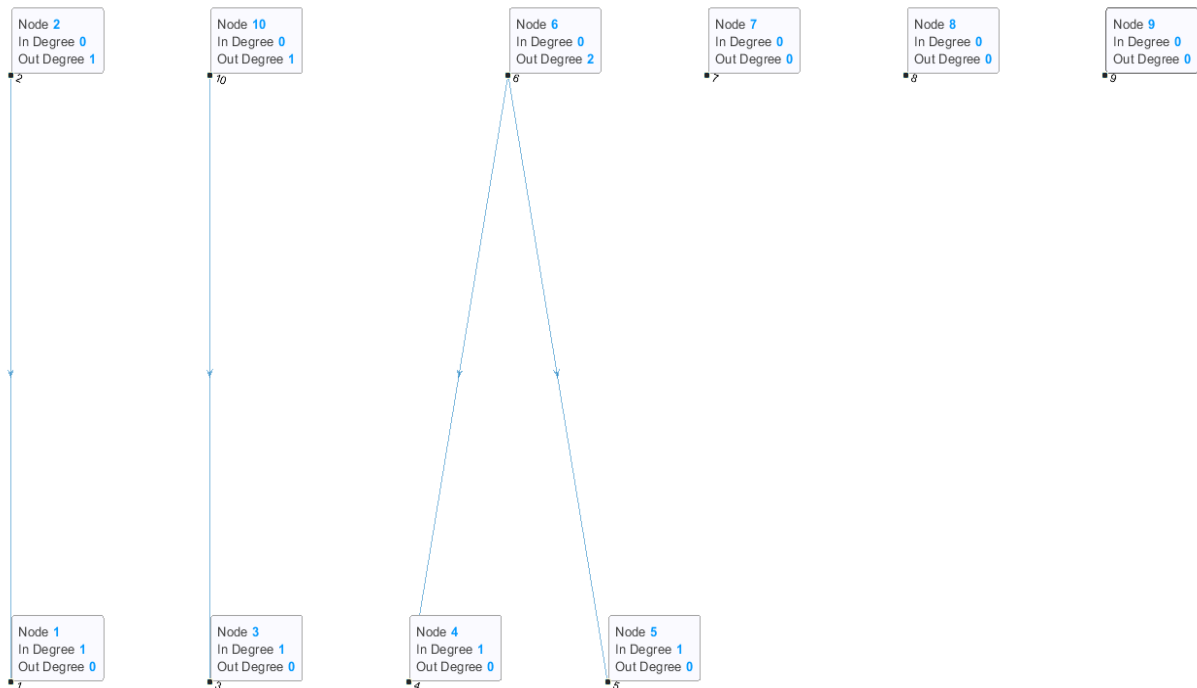
taki, że elementy maksymalne są na górze, i dla dowolnej pary wierzchołków takich, że $u < v$ wierzchołek u umieszczamy poniżej v [175].

Na rysunku numer 10.1 wskazano diagram Hassego dla analizowanych rozwiązań dopuszczalnych zapisanych w macierzy M_{ZKD} . Wierzchołki grafu stanowią rozważane poszczególne konfiguracje architektury $M_{KD,(1...n)}$. Natomiast łuki rysowane pomiędzy wierzchołkami wskazują relacje między nimi zachodzące. W analizowanym przypadku krawędź skierowana z wierzchołka u do wierzchołka v jest rysowana, gdy zmienne związane z tymi wierzchołkami spełniają relację:

$$u \succcurlyeq v \quad (28)$$

Aby mówić o jednej relacji i poszukiwaniu wartości minimalnych dla całej grupy parametrów macierz $M_{CSDA,v}$ w dalszych rozważaniach wzięto pod uwagę z minusem. Teraz można stwierdzić, że obniżenie każdego z rozpatrywanych kryteriów prowadzi będzie do lepszego wyboru. Do grupy optymalnych rozwiązań należeć będą te wierzchołki diagramu, które nie mają żadnych wychodzących krawędzi. Oznacza to, że na bazie przyjętych zasad jest to grupa najlepszych rozwiązań. Celem jest wybranie jednego rozwiązania. Diagram Hassego pozwala jedynie na identyfikację kandydatów na rozwiązanie optymalne. Ostateczny wybór

wykonywany jest z wskazanej grupy za pomocą jednego kryterium spośród analizowanych, porównania odchyłeń parametrów od średniej lub dodawanie kolejnego kryterium wraz z dodatkowymi parametrami wcześniej nie poddawanych analizie [176]. Wyłonienie finalnego rozwiązania zostanie wskazane w rozdziale 10.3.



Rys. 10.1. Diagram Hassego dla rozwiązań dopuszczalnych architektury z macierzy M_{KD}

Z powyższego diagramu odczytano optymalne rozwiązania (Tabela 10.3), będące wierzchołkami z których nie wychodzi żadna krawędź, a więc architektury o numerach 1,3,4,5,7,8,9.

Tabela 10.3. 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

Inną metodą rozwiązania problemu wielokryterialnego jest podejście zwane rozwiązaniem optymalnym w sensie Pareto. Rozwiązanie to tworzy w praktyce cały zbiór

rozwiązań równie dobrych z punktu widzenia analizowanych kryteriów oceny. Aby przeprowadzić rozważania w zakresie frontu Pareto, wprowadzono definicje rozwiązania zdominowanego, rozwiązania niezdominowanego, zbioru optymalnego w sensie Pareto oraz punktu utopijnego.

Rozwiązanie zdominowane – rozwiązanie z jest zdominowane, jeśli istnieje dopuszczalne rozwiązanie x , które jest co najmniej tak dobre jak z ze względu na wszystkie wymiary, tzn. dla każdego celu:

$$f_{i(i=1...m)}(x) \leq f_i(z) \quad (29)$$

dla wszystkich $1 \leq i \leq m$, jest ściśle lepsze od z , co najmniej ze względu na jeden cel i $f_i(x) \leq f_i(z)$ dla pewnego $1 \leq i \leq m$ [177]

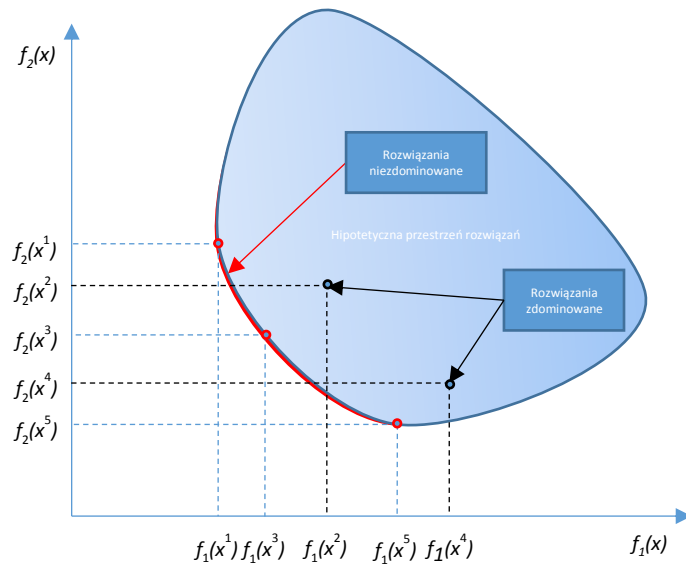
Rozwiązanie niezdominowane – rozwiązanie niezdominowane jest każdym, które nie jest zdominowane przez żadne inne rozwiązanie dopuszczalne [177].

Zbiór optymalny w sensie Pareto – jest to zbiór niezdominowanych rozwiązań z całej dopuszczalnej przestrzeni poszukiwań. Rozwiązania tworzą tzw. front Pareto. Rozwiązania z tego zbioru nie są zdominowane przez żadne inne, więc w tym sensie są one optymalnymi rozwiązaniami dla problemu optymalizacji wielokryterialnej [177].

Punkt utopijny – jest to wektor zmiennych decyzyjnych przy którym jednocześnie wszystkie funkcje kryterialne (wektor funkcji kryterialnych) osiągały by minimum. Taki wektor nadzwyczaj rzadko występuje w praktyce ponieważ zwykle każda z funkcji kryterialnych osiąga minimum przy innym wektorze zmiennych decyzyjnych [178]. Na rysunku numer 10.2 przedstawiono graficznie przykład dwóch rozwiązań niezdominowanego oraz zdominowanego dla założonego dwukryterialnego zadania zdefiniowanego przez funkcję celu:

$$F(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (30)$$

Można więc zauważyć, że rozwiązanie niezdominowane znajduje się na brzegu zbioru wartości F .



Rys. 10.2. Przykład rozwiązania zdominowanego oraz niezdominowanego dla zadania zdefiniowanego przez funkcję celu $F(x)=(f_1(x),f_2(x))$

W celu zastosowania przedstawionej metody rozpoczęto rozważania analityczne związane z przejściem problemu z przestrzeni parametrów opisujących poszczególne wersje architektury do przestrzeni kryteriów, w której współrzędnymi elementów są wartości poszczególnych kryteriów. Kryteria te związane są z funkcją jakości architektury (która wskazuje podatność architektury na zagrożenia) oraz jej kosztem. Przed rozpoczęciem optymalizacji uwzględniono funkcje ograniczeń technicznych, aby wykluczyć z analizy przypadki niemieszczące się w ustalonych zakresach. 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 użytkownika. Na rysunku 10.3 przedstawiono przejście z przestrzeni parametrów do przestrzeni kryteriów. Funkcje przyjęły następującą postać:

$$f_1(x_i) = \frac{x_{MKA,i}}{MAX(x_{MKA(i...n)})} + \frac{x_{MKUDA,i}}{MAX(x_{MKUDA(1...n)})} \quad (31)$$

$$f_2(x_i) = \frac{f_p(x_i)}{\text{MAX}(f_p(x_{(1...n)}))} \quad (32)$$

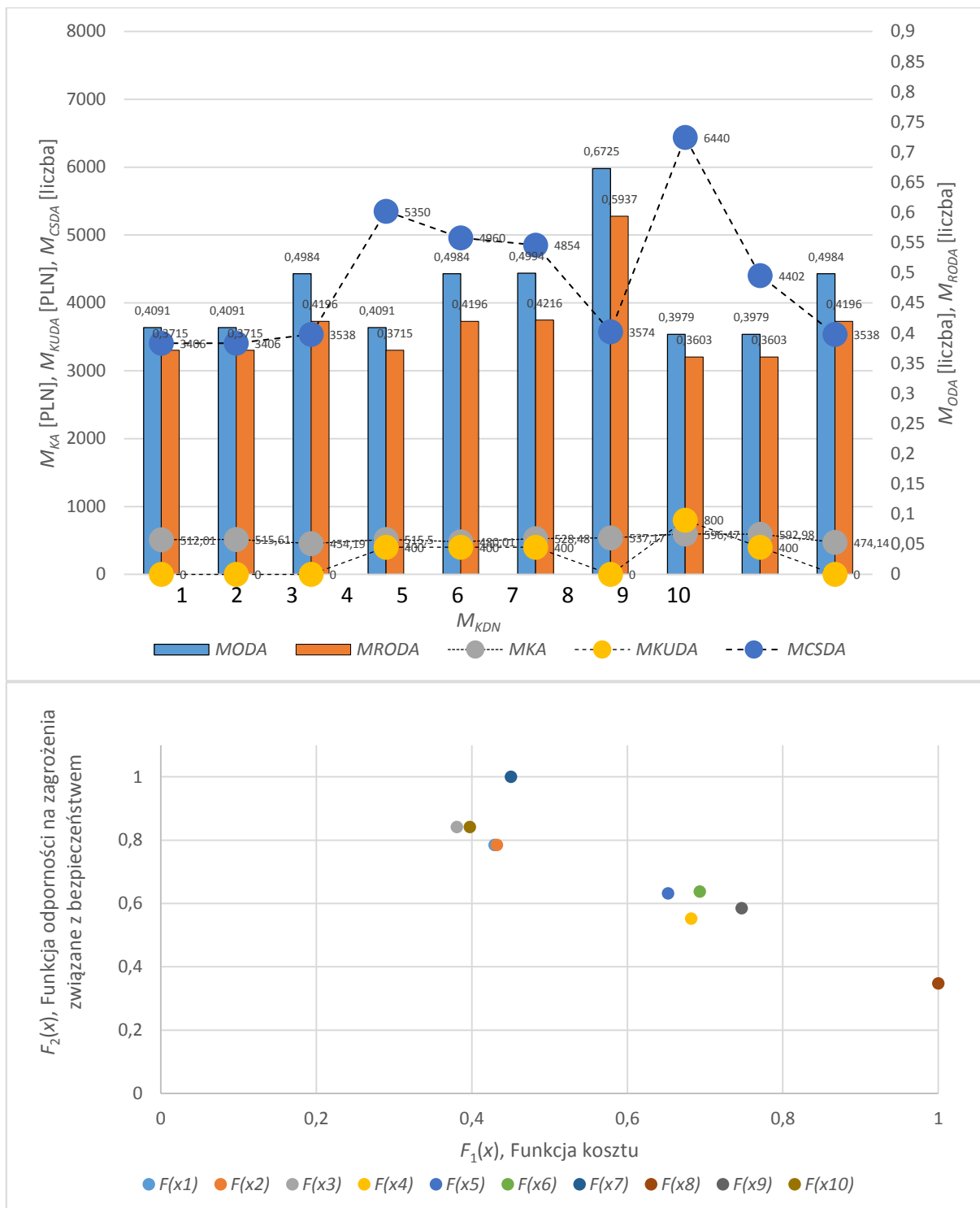
gdzie we wzorze (32) $f_p(x_i)$ oznacza:

$$f_p(x_i) = \frac{x_{MODA,i}}{\text{MAX}(x_{MODA(1...n)})} + \frac{x_{MRODA,i}}{\text{MAX}(x_{MRODA,i})} + \left(1 - \frac{x_{MKUDA,i}}{\text{MAX}(x_{MKUDA(1...n)})}\right) + \dots \\ \dots + \left(1 - \frac{x_{MCSDA,i}}{\text{MAX}(x_{MCSDA(1...n)})}\right) \quad (33)$$

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

W sytuacji gdy w tym samym momencie minimalizowane są koszty oraz narażenia na zagrożenia związane z bezpieczeństwem okazuje się, że minimalizując koszty (redukując budżet) redukowane są możliwości zakupu odpowiednich urządzeń zabezpieczających, co przekłada się bezpośrednio na obniżenie poziomu bezpieczeństwa. Natomiast zwiększenie poziomu bezpieczeństwa (zmniejszenie narażenia architektury na zagrożenia), wiąże się zawsze z podniesieniem sumarycznych kosztów implementowanych rozwiązań. Wymienione funkcje $f_1(x)$ oraz $f_2(x)$, są więc przeciwstawne i stanowią kryteria zadania optymalizacji wielokryterialnej. W odniesieniu do jednego celu możemy uznać określone rozwiązanie za optymalne, ale w odniesieniu do innego celu możemy znaleźć inne rozwiązanie, które również będzie optymalne. Aby uzyskać zbiór niezdominowanych rozwiązań z całej dopuszczalnej przestrzeni poszukiwań (tzw. front Pareto) należy wybrać punkty zbioru, odpowiadające rozwiązaniu niezdominowanemu $F(x^*)$. Aby to zrobić należy przesunąć układ współrzędnych do każdego z punktów i zbadać czy dla danego punktu w nowo utworzonym układzie współrzędnych brak jest innych punktów o ujemnych wartościach w obu współrzędnych wektora F lub o jednej z współrzędnych wektora równej 0 (rysunek 10.4.). Wyniki przeprowadzonej przez autora analizy ze wskazaniem rozwiązań niezdominowanych przedstawiono w tabeli 10.4. Ze zbioru konfiguracji dopuszczalnych M_{ZKD} definiując front Pareto wybrano 5 rozwiązań niezdominowanych - optymalnych pod kątem funkcji celu. Gdy w ramach działań wewnątrz firmowych zaangażowanych jest więcej zespołów konstrukcyjnych, które ze względu na poszczególne zakresy i ograniczenia mają różne sprzeczne wymagania i definiują większą liczbę parametrów technicznych, uzyskiwana w ramach analiz macierz przedstawiająca zbiór konfiguracji dopuszczalnych ma większe rozmiary. Im większe ograniczenia założone na początku realizacji zadania zaprojektowania

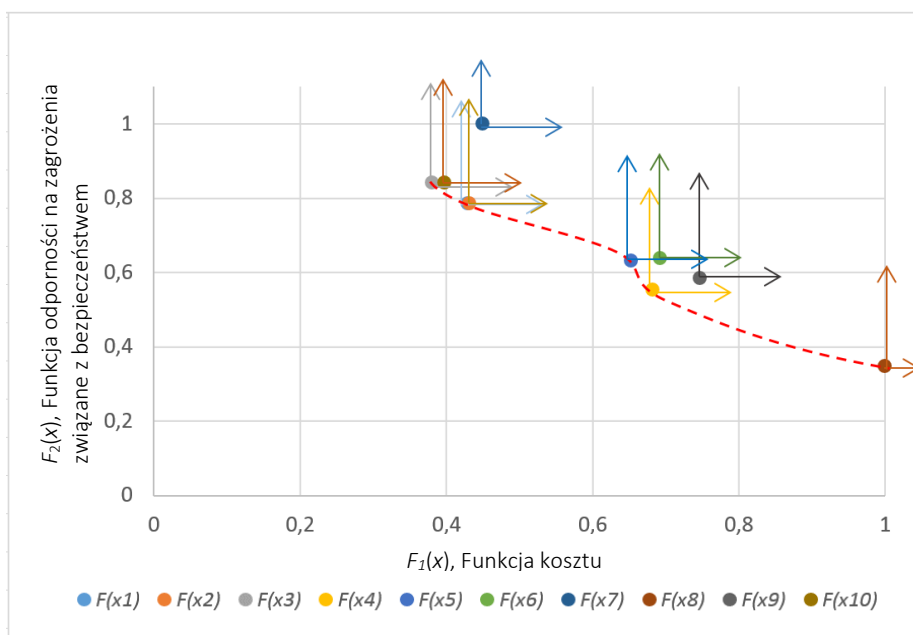
i implementacji architektury nadzorczo-sterującej tym zbiór możliwych do zaimplementowania rozwiązań będzie mniejszy.



Rys.10.3. Przejście z przestrzeni parametrów do przestrzeni kryteriów dla zbioru konfiguracji dopuszczalnych architektury

W przypadku dużego zbioru konfiguracji dopuszczalnych może być wymagane użycie innych metod i algorytmów obliczeniowych do wyznaczenia frontu Patero niż przedstawione

w niniejszej rozprawie. W praktyce, gdy zespoły odpowiedzialne za poszczególne ograniczenia i instalacje są otwarte na dialog, tworzą zredukowaną liczbę rozwiązań.



Rys. 10.4. Poszukiwanie rozwiązań niezdominowanych – front Pareto

Tabela 10.4. 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 10.5.

Tabela 10.5. Rozwiązania optymalne

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

Zastosowanie metody Pareto doprowadziło do eliminacji dwóch dodatkowych konfiguracji architektury w porównaniu z metodą diagramu Hassego, co pozwoliło na uzyskanie bardziej zoptymalizowanego zbioru konfiguracji dopuszczalnych. Są to konfiguracje $M_{KDN}=7$ oraz $M_{KDN}=9$. Najwyższe ze wszystkich analizowanych obciążenie pojedynczej linii komunikacyjnej zidentyfikowano w architekturze 7. Architektura 9 wskazywała na najniższy ze wszystkich konfiguracji architektury stosunek poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego M_{CSDA} do sumy kosztów dodatkowych poniesionych na jego realizację ($M_{KUDA}+M_{KUDA2}$). Przyrost poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego na jednostkowy koszt dodatkowy poniesiony na jego realizację w przypadku magistrali 9 wyniósł 4,192. Przy czym średnia dla wszystkich analizowanych architektur wynosi 4,948, a najlepsza pod tym względem jest na poziomie 5,498. 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. Metoda Pareto ma również mniej rozbudowany bazowy algorytm obliczeniowy niż metoda diagramu Hassego, przez co jest prostsza w implementacji przy analizie większej liczby przypadków zbioru konfiguracji dopuszczalnych.

10.3 Wybór architektury do implementacji

Wybór rozwiązania do implementacji wykonano bazując na dwóch metodach: znormalizowanego kryterium zbiorczego oraz kryterium globalnego. Otrzymane wyniki zestawiono, porównano i wybrano architekturę do implementacji. W przypadku metody znormalizowanego kryterium zbiorczego bazowano na zredukowanej macierzy konfiguracji dopuszczalnych M_{KD} powstałej za pomocą metody diagramu Hassego. Redukcja wartości parametrów charakteryzujących poszczególne konfiguracje architektury wskazanych w tabeli 10.3 prowadzi do korzystniejszych rozwiązań, za wyjątkiem parametru M_{CSDA} , dla którego korzystne jest zwiększenie wartości. Ze względu na sprowadzenie zadania wielokryterialnego do optymalizacji jednokryterialnej poszukującej minimum z użyciem kryterium zastępczego, parametr M_{CSDA} należy zastąpić jego parametrem przeciwnym ($-M_{CSDA}$). Dzięki temu obniżenie każdego z rozpatrywanych parametrów prowadzi do lepszego wyboru. W tabeli 10.6 wskazano uszeregowany wynik kryterium zbiorczego wraz z informacją o instalacji urządzenia IDS w danej architekturze. W trakcie realizowanego w ramach doktoratu wdrożenia nie obowiązywały jeszcze przepisy dotyczące obowiązkowego stosowania regulaminów R155 oraz R156 dla nowych typów autobusów, które wymagają stosowania dodatkowych środków służących detekcji takich jak IDS i raportowania ataków hackerskich. Stały się one dla nich wymogiem dopiero od 07.2022r. Wszystkie typy pojazdów na których implementowano architekturę uzyskały homologację typu przed powyższym terminem. Począwszy od 07.2024 obowiązek stosowania regulaminów stanie się wymogiem dla wszystkich pojazdów rejestrowanych pierwszy raz na terenie krajów UE. Najlepszy (minimalny) wynik zastępczego kryterium zbiorczego nie uwzględniając powyższych przepisów uzyskała architektura numer 1 (tabela 10.6). Kryterium zastępcze jest agregacją poszczególnych kryteriów oceny, sprowadzającą złożony problem optymalizacji wielokryterialnej do optymalizacji jednokryterialnej i umożliwiającą skorzystanie z szybkich algorytmów deterministycznych, które wyznaczają jedno kompromisowe rozwiązanie [179]. Przed agregacją autor rozprawy dokonał normowania następujących parametrów opisujących architektury: M_{ODA} , M_{RODA} , M_{KA} , M_{KUDA} , M_{CSDA} . W wyniku normowania można je ze sobą wiarygodnie porównywać. Optymalizację przeprowadzono przy użyciu metody funkcji użyteczności wzór (7). Uwzględniając jej postać addytywną względem kryteriów wzór (8). Utworzono ranking, za pomocą którego znaleziono ekstremum (minimum) funkcji użyteczności. W prezentowanym podejściu dzięki normalizacji wszystkie parametry wyrażone w różnych jednostkach i poziomach mają taki sam wpływ na rezultat obliczeń.

Po uwzględnieniu przepisów jako najlepszy wynik wskazano architekturę numer 4 zawierającą w swojej strukturze zaimplementowany IDS. Obydwie architektury oparte są o topologię bazującą na dwóch komputerach pokładowych, służących również jako Gateway. Pomiędzy komputerami występuje most komunikacyjny - główna szyna danych, a pozostałe magistrale komunikacyjne są do nich podłączone tworząc architektury gwiazdowo-liniowe. Architektury wyposażone są również w interfejsy do części związanej z systemami informacji pasażerskiej oraz eSconnect.

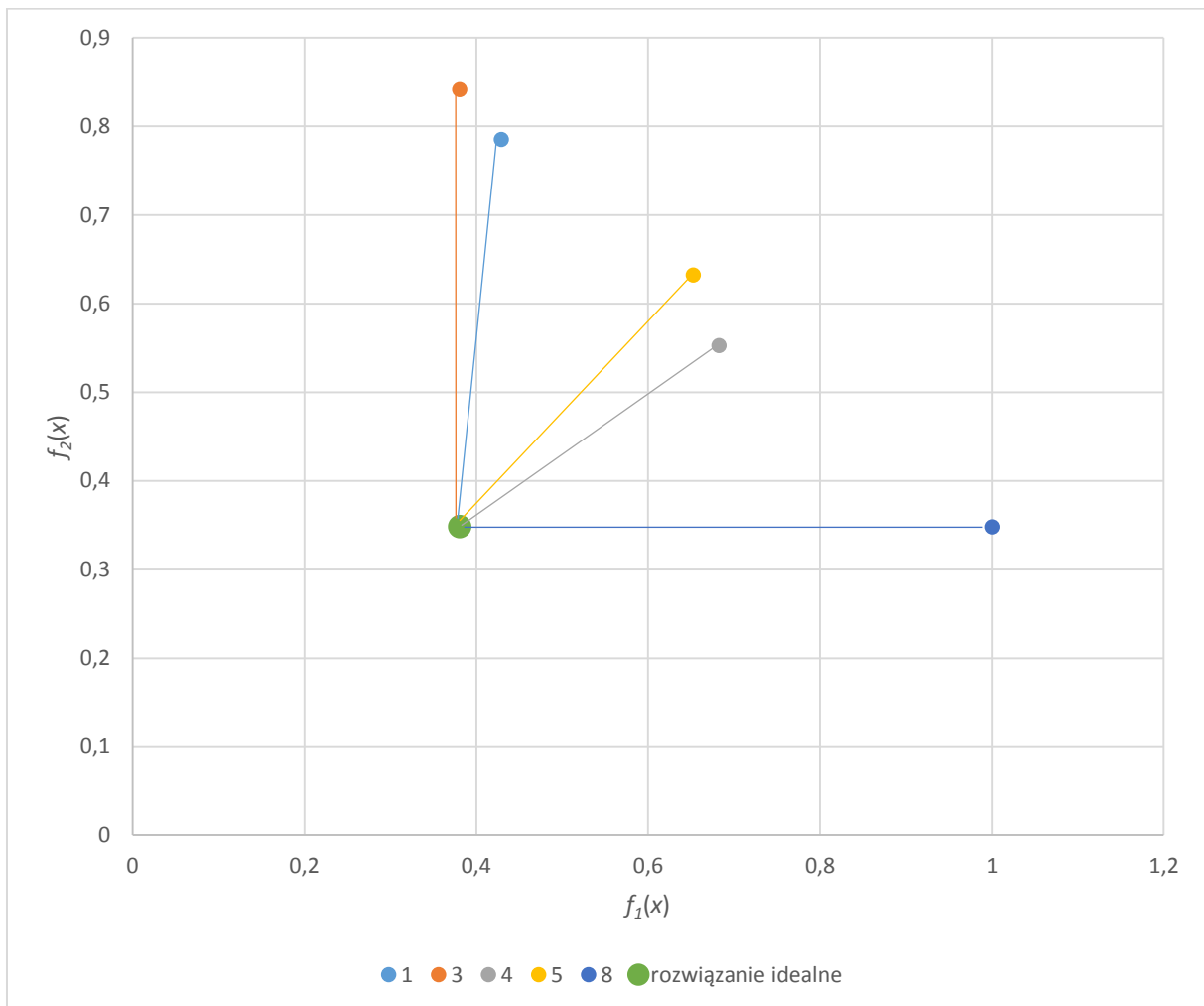
Tabela 10.6. Uszeregowany wynik zastępczego kryterium zbiorczego. Rozwiązania optymalne

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. To podejście jest szczególnie przydatne w przypadku problemów, w których istnieje wiele lokalnych maksimów lub minimów, a poszukiwanie rozwiązania tylko w ich pobliżu może prowadzić do uzyskania niewystarczająco dobrego wyniku. Obliczenia wykonano z pomocą wzoru (34).

$$k(a_i) = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\frac{[k_j^*(a_i) - k_j^o(a_i)]}{k_j^o(a_i)} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (34)$$

gdzie $k_j^*(a_i)$ to wartość j -tego kryterium punktu najbliższego rozwiązaniu idealnemu, obrazującego wariant należący do zbioru kompromisów, $k_j^o(a_i)$ to wartość j -tego kryterium dla rozwiązania idealnego. Założono $m=2$ oraz $p=2$, co oznacza, że minimalizowana będzie odległość między rozwiązaniem przybliżonym a optymalnym. Ponieważ uzyskane wartości funkcji są bezwymiarowe i znormalizowane, nie ma potrzeby wykonywania żadnych dodatkowych operacji przygotowania. Bazując na rozwiązaniach ze zbioru Pareto wskazanych na rysunku 10.5 wyznaczono rozwiązanie idealne $k(a_i)$, spełniające warunek minimum dla każdego kryterium $k_j(a_i)$ rozpatrywanego niezależnie (tabela 10.7).



Rys. 10.5. Zbiór rozwiązań Pareto optymalnych dla macierzy konfiguracji dopuszczalnych architektury M_{ZKD}

Rozwiązanie idealne: $k_1^o(a_i) = 0,380731638$; $k_2^o(a_i) = 0,347905433$.

Tabela 10.7. Obliczenia optymalizacji metodą kryterium globalnego

M_{KDN}	$\left[\frac{[k_1^*(a_i) - k_1^o(a_i)]}{k_1^o(a_i)} \right]^2$	$\left[\frac{[k_2^*(a_i) - k_2^o(a_i)]}{k_2^o(a_i)} \right]^2$	$\left\{ \sum_{j=1}^2 \left[\frac{[k_j^*(a_i) - k_j^o(a_i)]}{k_j^o(a_i)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$ (35)
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

W tabeli 10.8 przedstawiono uszeregowany wynik optymalizacji metodą kryterium globalnego. Najlepszym rozwiązaniem pod względem odległości do rozwiązania idealnego jest rozwiązanie 4. Jest to rozwiązanie zawierająca w swojej strukturze zaimplementowany IDS. Jeżeli rozpatrzmy wynik usuwając z rozwiązań te wyposażone w IDS (wdrożenie przed zmianą przepisów) to najlepszym okazuje się być rozwiązanie 1. Kolejne rozwiązanie w rankingu to rozwiązanie numer 5, również wyposażone jest w IDS. Uwzględniając przepisy i konieczność instalacji IDS potwierdzono wskazanie równych rozwiązań w obu weryfikowanych rodzajach optymalizacji.

Tabela 10.8. 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

Nie wprowadzając jednak żadnych 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.

11 Metodyka projektowania: Implementacja architektury

Wybrano wersję architektury do implementacji. Jest to architektura numer $M_{KDN} = 1$. Ostateczna decyzja została podjęta z uwagi na termin wdrożenia, który miał 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. Autobus w ramach testów sytuacji awaryjnych oraz wytrzymałości jeździł na torze TATRA TRUCKS a.s. w Kopřivnice w Republice Czeskiej. Zaktualizowana wersja tej architektury oraz oprogramowania sterującego trafiła również do Urbino 9LE electric, który występuje jedynie w wersji z napędem elektrycznym. Bazowa wersja architektury w obu opisywanych powyżej pojazdach powstała z uwzględnieniem nadmiarowości komunikacyjnej, co pozwoliło na doposażenie ich w dodatkowe systemy i utrzymanie wymaganych parametrów. W niniejszej rozprawie autor przedstawił analizę wykonaną dla kolejnego typu pojazdu nE12. 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 oprogramowaniem do tychże sterowników. Na rysunku numer 11.1 przedstawiono autobus podczas procesu ładowania przez złącze PLUG-IN.

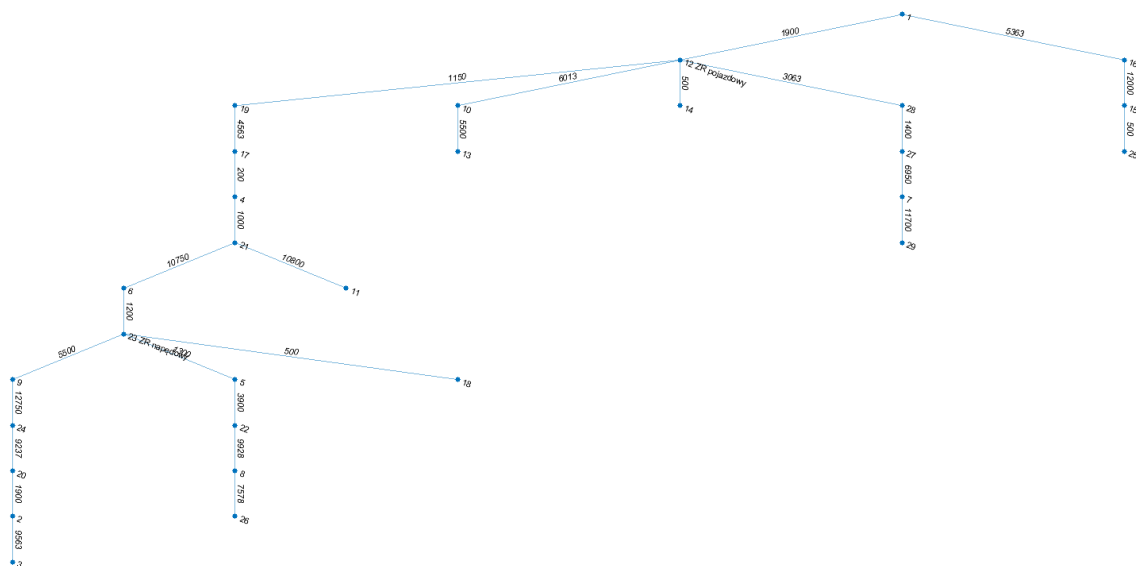


Rys. 11.1. Autobus nE12 Demo PL 2022

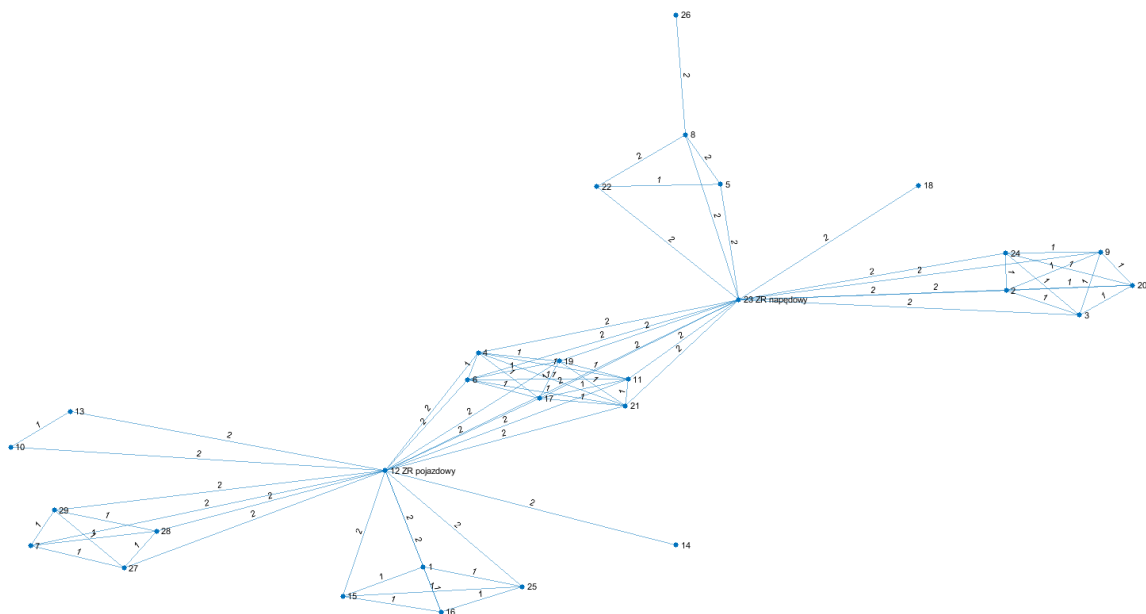
Autobus został wyposażony w bazową wersję architektury. Po przeprowadzeniu testów, ze względu na przeznaczenie autobusu jako pojazdu demonstracyjnego, architektura była uzupełniana zgodnie z przyjętą metodyką o kolejne urządzenia. Lista urządzeń bazowej wersji architektury została zamieszczona w rozdziale 7 rozprawy. Podstawowe parametry implementowanego rozwiązania autor przedstawił w tabeli numer 11.1., natomiast topologia połączeń fizycznych oraz logicznych związanych z analizą bezpieczeństwa zostały przedstawione na rysunku 11.2. oraz 11.3.

Tabela 11.1. 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. 11.2. Autobus nE12 Demo PL 2022/ Graf reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury - wersja bazowa



Rys. 11.3. Autobus nE12 Demo PL 2022/ Graf połączeń logicznych analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego - wersja bazowa

Fizyczne połączenia komunikacyjne w autobusach elektrycznych wykonywane są za pomocą różnego rodzaju okablowania. Dobór rodzaju okablowania zależy od miejsca instalacji. W różnych miejscach autobusu okablowanie jest narażone na różne czynniki zewnętrzne. Podstawowe kwestie związane z normami oraz aktami prawnymi oraz certyfikatami (w tym homologacyjnymi), jakie musi spełnić okablowanie infrastrukturalne przedstawiono w rozdziale 3 niniejszej rozprawy. Poza tymi formalnymi wymaganiami zebrano praktyczne informacje niezbędne podczas wyboru okablowania i złączy, które zostały przedstawione w tabeli 11.2.

Tabela 11.2. Wskazówki dotyczące doboru okablowania strukturalnego w zależności od miejsca instalacji w autobusie (1/2)

Miejsce instalacji okablowania strukturalnego	Wskazówki dotyczące doboru
Podwozie	Jest to miejsce trudno dostępne w trakcie normalnej eksploatacji autobusu. Należy unikać zbędnych połączeń i rozdzielaczy. W podwoziu należy używać okablowania odpornego na uderzenia np. drobnych kamieni podczas jazdy. Okablowanie musi być odporne na zanurzenie w wodzie ze względu na przejazd przez głębokie kałuże. Musi być również odporne na środki używane zimą przez służby oczyszczania miasta.

Tabela 11.2. Wskazówki dotyczące doboru okablowania strukturalnego w zależności od miejsca instalacji w autobusie (2/2)

Miejsce instalacji okablowania strukturalnego	Wskazówki dotyczące doboru
Dach	Okablowanie prowadzone na dachu autobusu musi być przede wszystkim odporne na promieniowanie UV oraz w przypadku eksploatacji pojazdów w miejscach, gdzie występuje wysoki poziom zasolenia np. miejscowości nadmorskie również na występującą tam sól. Niektóre miasta, również w Polsce definiują w przetargach dodatkowe wymagania w tym zakresie, które muszą być spełnione.
Miejsca narażone w sytuacjach awaryjnych na kontakt z płynami eksploatacyjnymi	Okablowanie instalowane w miejscach narażonych w sytuacjach awaryjnych na kontakt z płynami eksploatacyjnymi musi być zabezpieczone na ich działanie, na przykład na kontakt z olejem.
Miejsca narażone na podwyższoną temperaturę	Na przykład wiązki znajdujące się w okolicy pieca lub bojlera ogrzewającego autobus muszą być dodatkowo osłonięte materiałem odpornym oraz okablowanie musi mieć wyższą wytrzymałość temperaturową.
Wnętrze autobusu	Wewnątrz autobusu na przykład w kanałach dachowych wystarczającymi zabezpieczeniami dla okablowania strukturalnego są rozwiązania zabezpieczające je przed możliwymi mechanicznymi otarciami czyli na przykład dodatkowy opłot lub NW.

Powyższe wytyczne dotyczą również złącz. W celu weryfikacji wszystkich nowych typów okablowania autor zlecił wykonanie prób i testów danego okablowania w laboratoriach zewnętrznych. Próby te są powtarzane cyklicznie aby weryfikować utrzymanie wysokiej jakości okablowania przez dostawców. W ramach prób realizowane są badania wskazane w tabeli 11.3. Zdjęcia z testów okablowania w komorze w części roboczej suszarki oraz w komorze solnej przedstawiono na rysunku 11.4. W ramach projektowania nowej architektury autor wziął pod uwagę dostępne rodzaje okablowania strukturalnego (Tabela 11.4.) z których wybrał bazowe spełniające wymagania do zastosowań w autobusie miejskim. Po szczegółowej analizie parametrów technicznych, w której szczególną uwagę zwrócono

na miejsce zastosowania przewodu wybrano do instalacji w miejscach narażonych przewód RADOX Databus 120 Ohm 2x0.5 XM SW przypadku zastosowań w mniej wymagających obszarach kluczowymi czynnikami jest również niska cena oraz wysoka dostępność komponentów – w tym przypadku wykorzystywane są skrętki bazujące na przewodach MANEX FLRY-B o przekroju poprzecznym 2x 0,75 mm².

Tabela 11.3. Próby realizowane w ramach testów okablowania i złącz [16]

Parametr badany	Wg normy/dokumentacji
Badania korozyjne w sztucznych atmosferach. Badania w rozpylonej solance. Część 1: Ogólne wprowadzenia Część 2: Klasyfikacja środowisk Część 6: Laboratoryjne metody badań właściwości	PN-EN ISO 9227:2017 PN-EN 12944-1:2017 PN-EN 12944-2:2019 PN-EN 12944-6:2018
Badania wytrzymałości elektrycznej	PN-EN 61386-1:2012 p. 11.3 .1
Badania palności kabli i przewodów elektrycznych oraz światłowodowych	PN-EN 60332-1-2:2010, PN-EN 60332-1-2:2010/A1:2016-02, PN-EN 60332-1-2:2010/A11:2017-02, PN-EN 60332-1-2:2010/A12:2021-05.
Badanie odporności na promieniowanie UV. Przyspieszone starzenie: Tworzywa sztuczne - Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła - Część 2: Lampy ksenonowe łukowe	PN-EN ISO 4892-2:2013-06
Oznaczenie odporności na działanie cieczy: - badanie zmiany masy: I. Oznaczenie odporności w oleju	PN-ISO 1817:2001/Ap1:2002P



Rys. 11.4. Zdjęcie okablowania oraz złącz podczas testów

Okablowanie komunikacyjne w ramach układu EBS zaprojektowano w oparciu o przewody LEONI Adascar. Most komunikacyjny pomiędzy komputerem pokładowym oraz komputerem napędowym został zrealizowany w ramach implementowanej architektury za pomocą magistrali CAN 250kb/s. Po zakończeniu rozwoju oprogramowania sterowników przez dostawcę może być zastąpiony poprzez Ethernet BroadR-Reach® Standard 100Mbit/s. Interfejs

Ethernet został zaprojektowany zgodnie z ISO 11898-5 oraz SAE J1939-15. Komputer pokładowy oraz komputer napędowy zostały wyposażone w fizyczne złącza umożliwiające komunikację zgodnie z powyższymi normami. Dostawca planuje zakończenie działań aplikacyjnych w oprogramowaniu, umożliwiających użycie złącz na przestrzeni roku. Po uruchomieniu na to fizyczne połączenie zostanie skierowany ruch komunikacyjny pomiędzy komputerami.

Tabela 11.4. Przykłady okablowania strukturalnego wraz z opisem [16]

Przewód	Przekrój	Liczba żył	Ekran	Izolacja	Impedancja falowa	Rezystancja stałoprądowa	Temp. Pracy
G&G 2-FLRY 2x0.75-A / H = 16	2x 0,75 mm ²	2	Folia	5 kV	120 Ω ± 12 Ω	26,1 Ω / km	-40°C do 105°C
G&G 2-FLRY 2x0.5-A / H = 14	2x 0,5 mm ²	2	Folia	3 kV	120 Ω ± 12 Ω	35,4 Ω / km	-40°C do 105°C
Cheminax 2019D0309	2x 0,75 mm ²	2	Folia	1 kV	120 Ω ± 12 Ω	25,4 Ω / km	-55°C do 125°C
LEONI Adascar 125 GS 2x0,75 6,2	2x 0,75 mm ²	2	Folia	2 kV	120 Ω ± 12 Ω	bd.	-40°C do 125°C
HUBER+SUHNER RADOX Databus 120 Ohm 2x0.5 XM S	2x 0,5 mm ²	2	Oplot miedzi any	2 kV	120 Ω ± 12 Ω	40,1 Ω / km	-50°C do 90°C
MANEX FLRY-B 2x 0.75	2x 0,75 mm ²	2	Folia	bd.	120 Ω ± 12 Ω	24,7 Ω / km	-40°C do 105°C
Champlain RADXL CAN-bus 23-00013 1939/11	2x 0,5 mm ²	2	Folia	2 kV	120 Ω ± 12 Ω	bd.	-70°C do 160°C
Champlain RADXL CAN-bus 23-00033 1939/11	2x 0,5 mm ²	2	Folia	2 kV	120 Ω ± 12 Ω	bd.	-70°C do 160°C

12 Metodyka projektowania: Eksperyment walidacyjny

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 wskazanych w rozdziale 2 niniejszej rozprawy. Pierwsza z nich, architektura strefowa skonsolidowana ($M_{KPN}=1$) jest architekturą implementowaną w autobusach firmy Solaris przed wdrożeniem zmian. Kolejne stworzone na poczet eksperymentu weryfikacyjnego to architektura strefowa rozproszona ($M_{KPN}=2$), architektura kontrolera domeny ($M_{KPN}=3$) oraz kontrolera domeny z bramą ($M_{KPN}=4$). Parametry architektury charakteryzujące poszczególne konfiguracje zapisano w macierzy konfiguracji porównawczych M_{ZKP} . Macierz została zaprezentowana w tabeli 12.1. W tabeli macierz M_{KUDA2} wskazuje sumaryczny koszt urządzeń dodatkowych niezbędnych do realizacji danego typu architektury. Sumaryczny koszt urządzeń dodatkowych to różnica w kosztach danej architektury i architektury bazowej, która jest architekturą strefową skonsolidowaną. Stąd w tabeli dla $M_{KPN}=1$ koszt jest równy 0. W żadnej z analizowanych wersji architektury nie został wykorzystany IDS. Grafy reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury, jak również reprezentacji połączeń logicznych dla poszczególnych konfiguracji dopuszczalnych zostały przedstawione w tabeli 12.2. Z tabeli 12.1 wynika, iż najniższy koszt okablowania strukturalnego uzyskano w przypadku architektury strefowej rozproszonej ($M_{KPN}=2$) oraz strefowej skonsolidowanej ($M_{KPN}=1$). Jest to koncepcja, w której różne funkcje i systemy są podzielone na strefy z zainstalowanymi w danej strefie urządzeniami podłączonymi do kontrolera strefy. Poszczególne strefy mogą działać niezależnie lub komunikować się z strefami poprzez magistralę. Architektury typu strefowego mają możliwość prostego skalowania i rozbudowy. Celem aplikacji tego typu architektury jest między innymi uzyskanie jak najmniejszych kosztów związanych z okablowaniem, co zostało potwierdzone w powyższym przypadku. Jednak całkowite koszty implementacji dla architektury strefowej rozproszonej są najwyższe ze wszystkich badanych, ponieważ tego typu architektury wymagają największej liczby urządzeń dodatkowych do implementacji. Architektura strefowa skonsolidowana była rozwiązaniem

implementowanym w autobusach firmy Solaris przed zaproponowaną przez autora rozprawy nową architekturą. Jej głównymi wadami są wysokie obciążenia generowane na liniach komunikacyjnych oraz niski poziom bezpieczeństwa cybernetycznego. Problemy te związane są z bardzo dużą konsolidacją, w której istnieje tylko jedno urządzenie komputer centralny, które zabezpiecza komunikację pomiędzy poszczególnymi liniami. Liczba linii jest również ograniczona do technicznych możliwości – liczby interfejsów jakimi dysponuje komputer centralny.

Tabela 12.1. 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

W przypadku architektury kontrolera domeny ($M_{KPN}=3$) oraz kontrolera domeny z bramą ($M_{KPN}=4$) zauważono obniżenie obciążenia generowanego na poszczególnych liniach komunikacyjnych oraz wzrost w stosunku do architektur strefowych poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego. 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). Architektury kontrolera domeny skupiają się na połączeniu różnych systemów i modułów w jedną całość za pomocą kontrolerów domen, które działają jako pośrednicy pomiędzy różnymi sieciami i protokołami komunikacyjnymi. W ramach jednej domeny znajdują się urządzenia, które zgrupowane są funkcjonalnie. Bramy w takich rozwiązaniach stosowane są do izolowania całej sieci komunikacyjnej lub jej segmentów od innych sieci jak również do kontroli przepływu informacji pomiędzy nimi. Architektura kontrolera domeny z bramą jest trudniej skalowalna niż na przykład architektura strefowa rozproszona, ponieważ dodanie lub usunięcie systemu lub modułu powoduje zmiany w konfiguracji całego systemu. W przypadku systemów scentralizowanych, których podstawą działania jest komputer centralny pojazdu lub serwer z bramą niezawodność systemu jest niższa niż w rozwiązaniach rozproszonych. Awaria komputera centralnego czy bramy w systemach scentralizowanych prowadzi od razu do nieprawidłowej pracy całego systemu.

Tabela 12.2. Grafy reprezentacji architektur porównawczych M_{ZKP} (1/4)

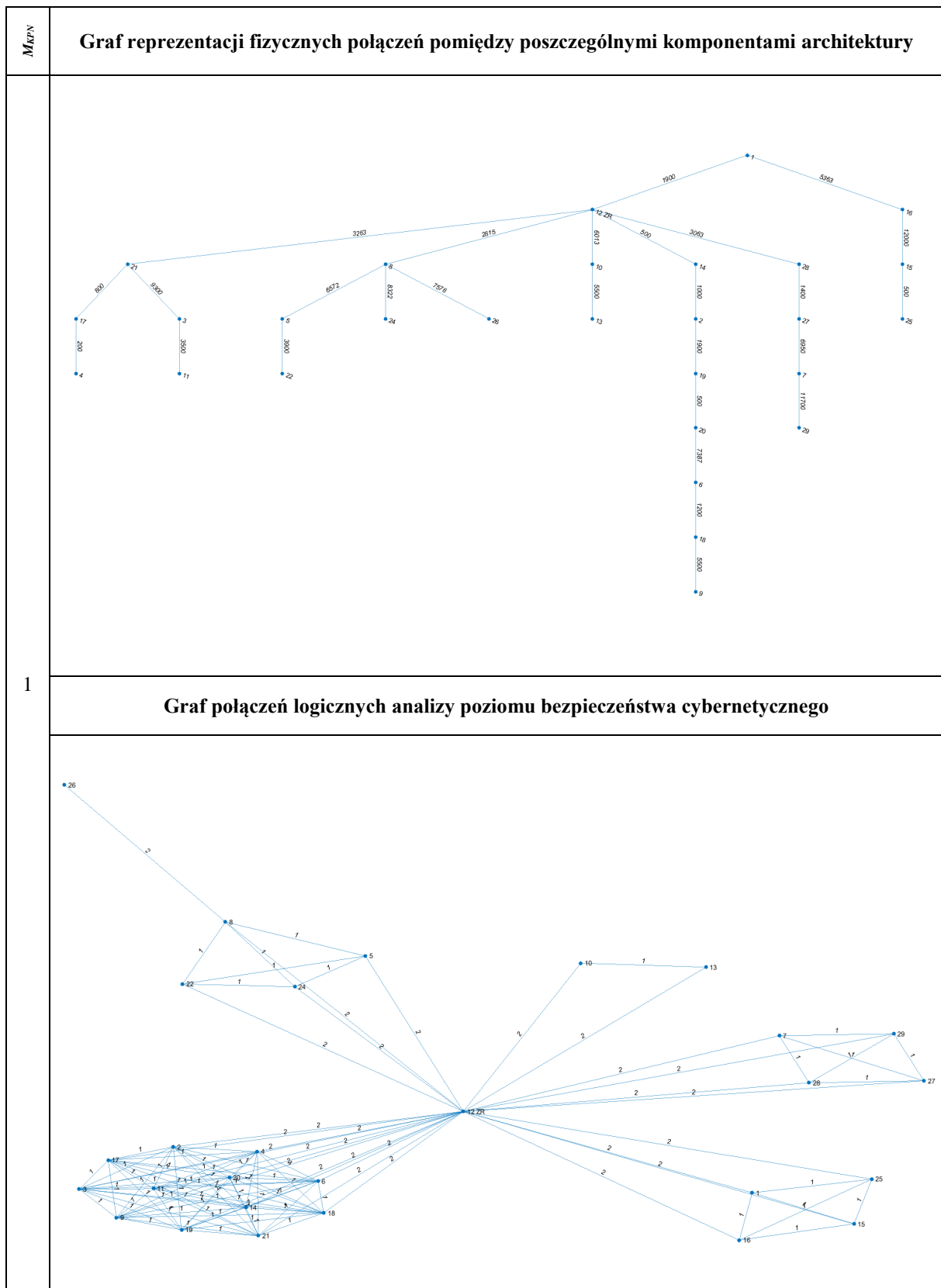


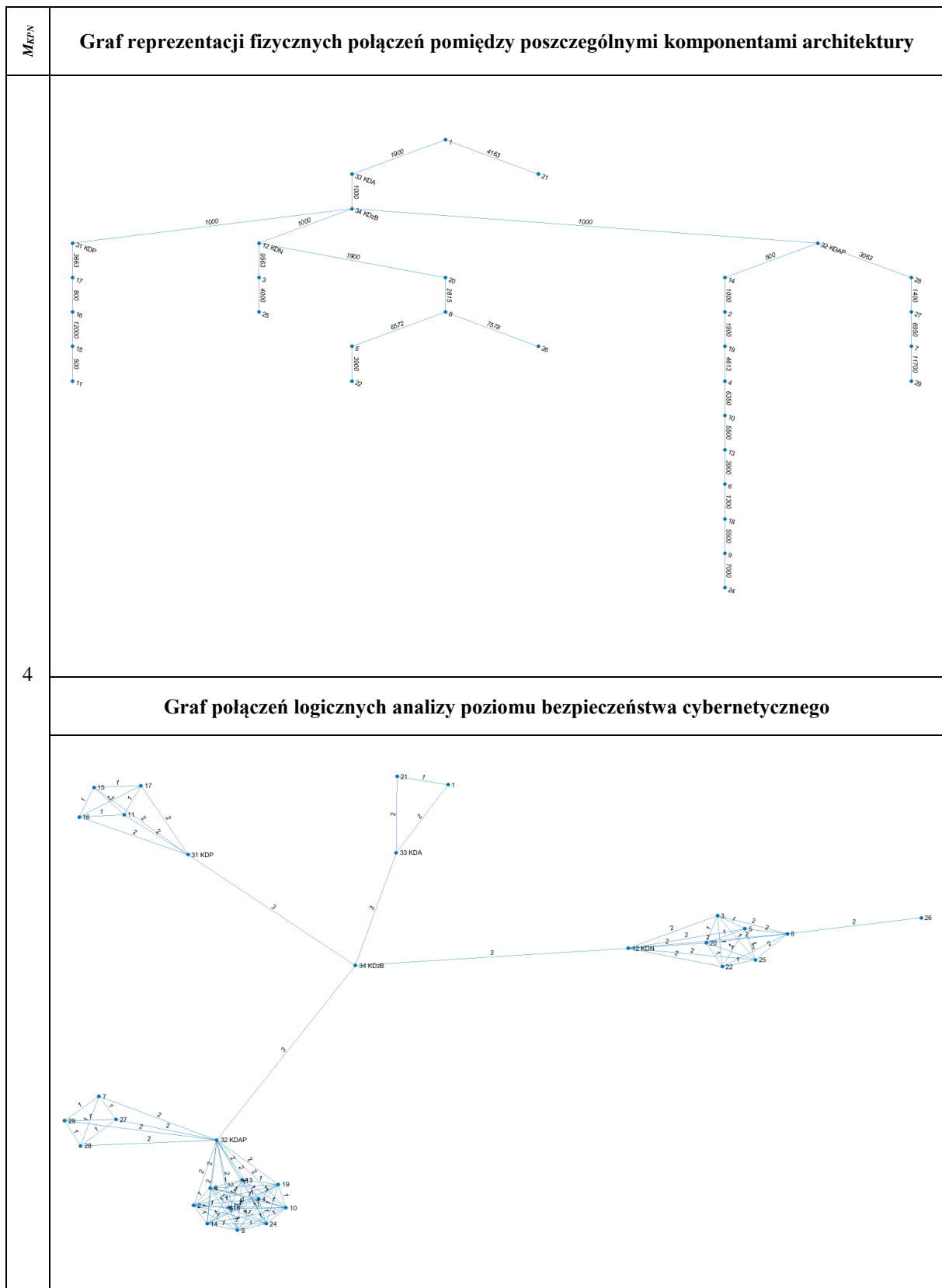
Tabela 12.2. Grafy reprezentacji architektur porównawczych M_{ZKP} (2/4)

M_{ZKP}	<p>Graf reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury</p>
2	
2	<p>Graf połączeń logicznych analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego</p>

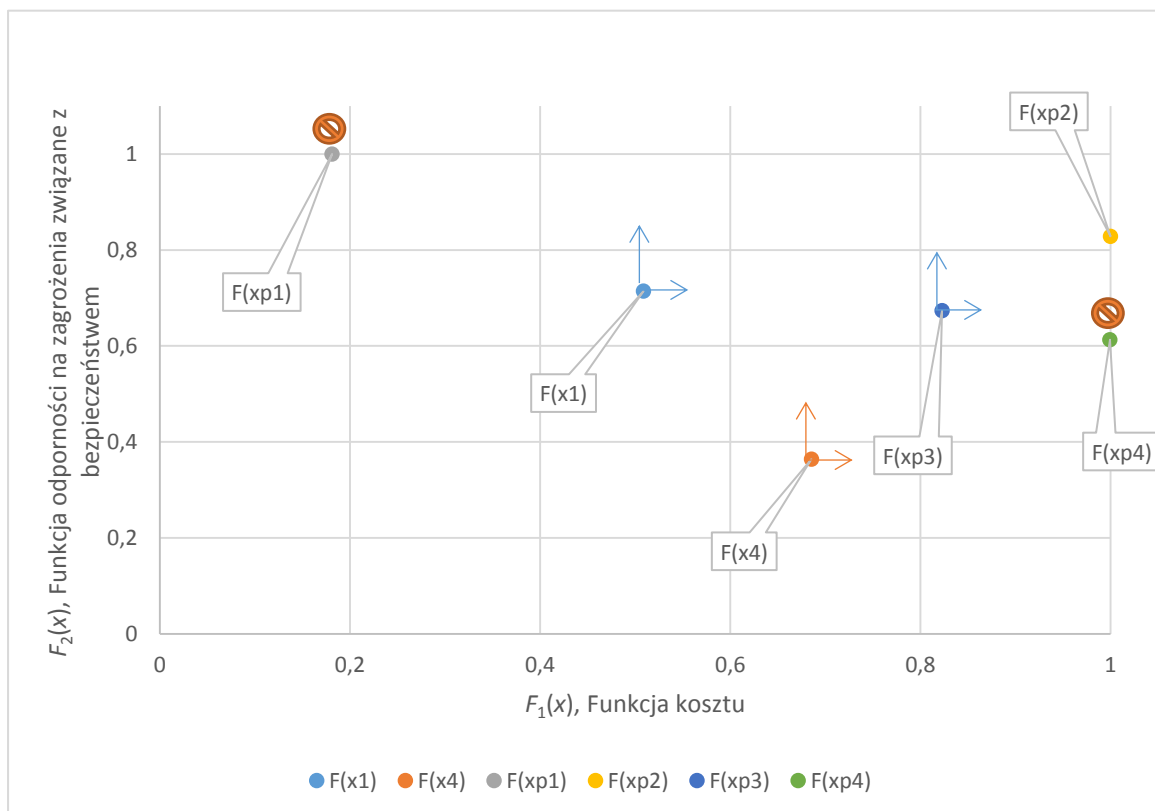
Tabela 12.2. Grafy reprezentacji architektur porównawczych M_{ZKP} (3/4)

<p>M_{ZKP}</p>	<p>Graf reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury</p>
<p>3</p>	
<p>3</p>	<p>Graf połączeń logicznych analizy poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego</p>
<p>3</p>	

Tabela 12.2. Grafy reprezentacji architektur porównawczych M_{ZKP} (4/4)



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. 12.1) oraz wykorzystaniu kryterium globalnego. Zastosowano te same kryteria oraz ograniczenia, które zostały zatwierdzone przez interesariuszy i sponsora projektu zapisane w rozdziale 10.1 wzór (25) niniejszej rozprawy. Architektura strefowa skonsolidowana reprezentowana na rysunku numer 12.1. jako $F(xp1)$ została wyeliminowana z dalszej analizy ze względu na ograniczenie związane z wymaganym poziomem bezpieczeństwa cybernetycznego. Architektura strefowa rozproszona $F(xp2)$ nie znajduje się na froncie Pareto i została zdominowana przez architekturę kontrolera domeny $F(xp3)$ oraz $F(xp4)$, więc również nie jest przedmiotem dalszych analiz. Architektura kontrolera domeny z bramą $F(xp4)$, jak również architektura $F(xp2)$ zostały wyeliminowane z dalszej analizy, ze względu na niespełnienie ograniczenia związanego z maksymalnym dopuszczalnym sumarycznym kosztem urządzeń dodatkowych, niezbędnych w architekturze do podniesienia bezpieczeństwa oraz realizacji wskazanego jej typu. Alternatywą dla wskazanego przez autora rozprawy rozwiązania staje się więc architektura kontrolera domeny.



Rys. 12.1. Analiza frontu Pareto

W tabeli 12.3. zestawiono rozwiązania wskazane przez autora $M_{KDN} = 1$ bez IDS, $M_{KDN} = 4$ z IDS oraz pozostałe alternatywne $M_{KPN} = 3$ (oznaczone jako $M_{KDN} P3$) wraz z wyliczonymi wartościami kryterium globalnego oraz rankingiem dla tych trzech rozwiązań.

Tabela 12.3. 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

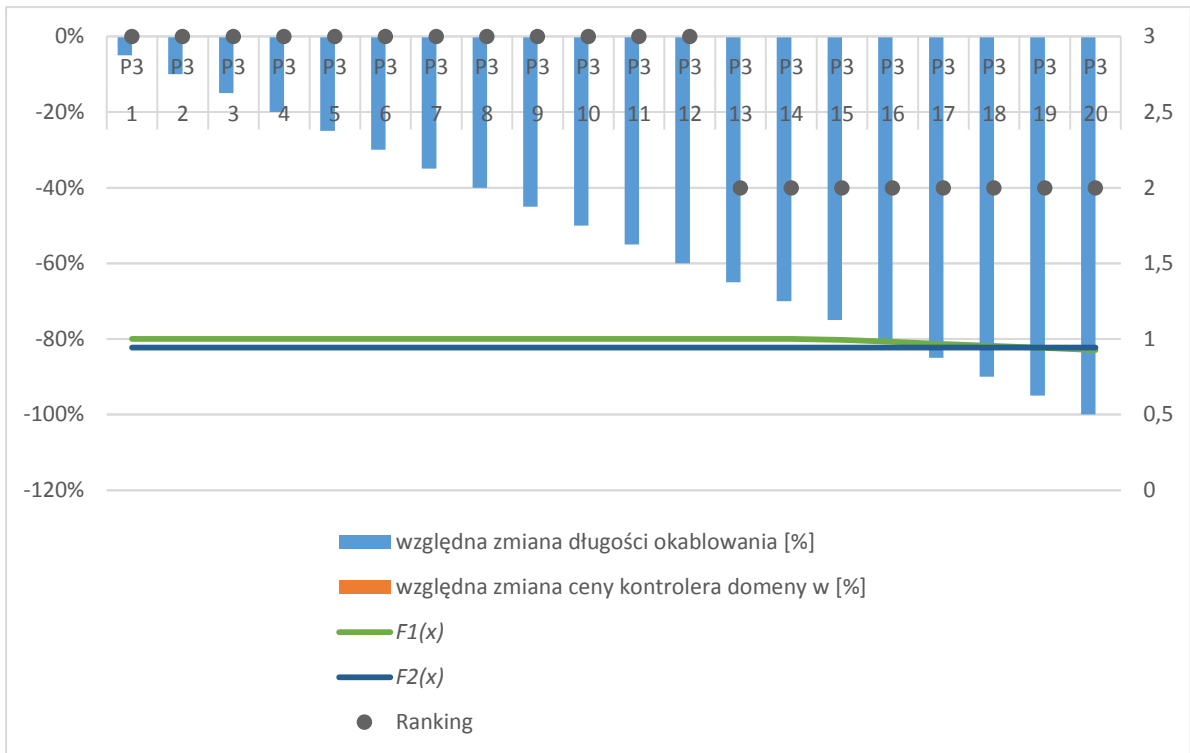
Z tabeli wynika, iż najlepszym rozwiązaniem jest rozwiązanie $M_{KDN} = 4$ z IDS, a w przypadku braku dostępności IDS rozwiązanie $M_{KDN} = 1$. Rozwiązanie $M_{KPN} = 3$, jest rozwiązaniem najlepszym pod względem poziomu bezpieczeństwa cybernetycznego, ale również jest rozwiązaniem najdroższym z analizowanych, 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.

Przy dynamicznie zmieniających się cenach zarówno okablowania strukturalnego jak i urządzeń elektronicznych należy zweryfikować, jaki wpływ mają one na ostateczny wybór architektury. Zakres zmian cen miedzi na przestrzeni lat 2018.02-2023.02 ulegał wahaniom w stosunku do aktualnej ceny w zakresie -50% do +20% [180] . Przyjęto następujący uproszczony podział kosztów wytworzenia okablowania strukturalnego: koszt miedzi stanowiący 50% kosztów, koszt polwinitu i pozostałych materiałów 30%, koszty poza materiałowe 20%. Powyższe wahania cen zakupu miedzi przekładały się więc na 10% wzrost ceny okablowania oraz 25% spadek w analizowanym okresie. Koszty komponentów elektronicznych w latach 2018-2023 również podlegały fluktuacjom. W latach 2018 i początek roku 2019 widoczny był spadek cen natomiast od 2020 roku ceny urządzeń elektronicznych nieustannie rosły. Pojawiły się problemy z łańcuchami dostaw, zwiększyły się koszty transportu. Do 2023 roku pojawiały się okresy gdy elektronika drożała kwartalnie nawet 5-40% [181], A[148].

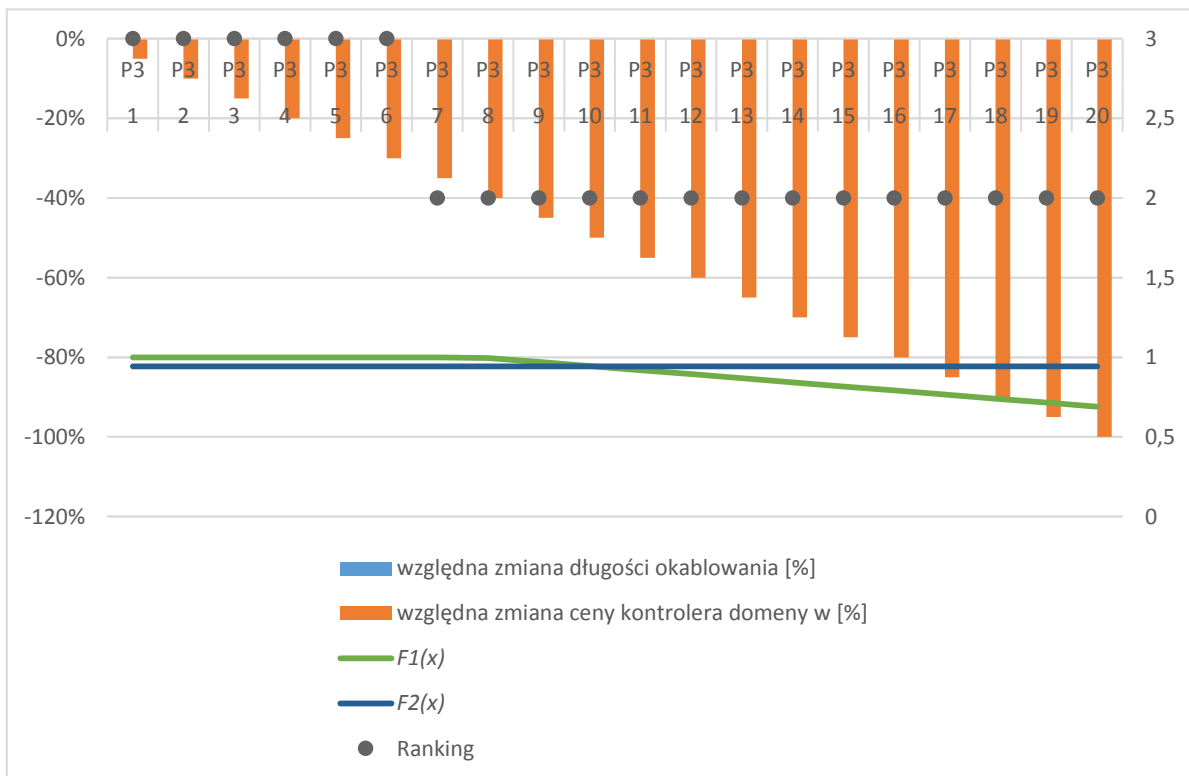
W celu określenia jaki wpływ mają poszczególne parametry architektury na jej wybór zaproponowano przeprowadzenie analizy wrażliwości. Analizę wrażliwości można przeprowadzić na różne sposoby. Jako analizę jednowymiarową, w której zmianie ulega tylko jeden parametr lub analizę wielowymiarową, obejmującą zmianę wielu parametrów jednocześnie. Można również dokonać analizy scenariuszowej, którą wybrał autor rozprawy. Zaproponowano stworzenie scenariuszy parametrów i weryfikowano ich wpływ na wyniki końcowe. W ramach analizy badano wpływ zmiany kosztów komponentów oraz okablowania strukturalnego. Zbadano również w jakim stopniu zmiana długości okablowania strukturalnego wpływa na wybór najlepszego rozwiązania. Porównano rozwiązania niewykluczone przedstawione w tabeli 12.3. Wyniki analiz przedstawiono na rysunkach 12.2 – 12.6. Analiza wrażliwości związana ze zmianą długości okablowania wskazała, iż redukcja okablowania w architekturze domeny o 65% spowoduje, że architektura stanie się lepszym pod względem kryterium globalnego wyborem niż nowo opracowana architektura $M_{KDN} = 1$ (bez IDS). W żadnym przypadku względem powyższego kryterium architektura nie będzie lepsza, niż rozwiązanie $M_{KDN} = 4$ z IDS (Rys. 12.2.). W przypadku redukcji ceny kontrolera domeny o 35% lepszym wyborem pod względem kryterium globalnego niż nowo opracowana architektura $M_{KDN} = 1$ (bez IDS) będzie architektura domeny. Jak w poprzedniej analizie w żadnym przypadku architektura domeny nie będzie lepsza niż rozwiązanie $M_{KDN} = 4$ z IDS (Rys. 12.3.). Przeprowadzono również analizę, tożsamego sumarycznego spadku procentowego cen okablowani oraz kontrolerów domeny (Rys. 12.4.). W powyższym przypadku przy spadku cen wynoszącym 25% dla obu zmiennych architektura domeny jest lepszym wyborem w stosunku do architektury $M_{KDN} = 1$ a przy spadku cen 80% staje się najlepszym względem kryterium globalnego rozwiązaniem.

Wykonano również analizy, w których zweryfikowano wpływ stałej 50% redukcji kosztów jednego z parametrów analizy (okablowanie lub urządzenia - kontrolery domeny) na wybór rozwiązania architektury domeny jako pierwszego do implementacji (Rys. 12.5. i Rys. 12.6.). Analizy wskazały, iż przy 50% stałej redukcji kosztów okablowania, 95% redukcja kosztów urządzeń powoduje wyłonienie do implementacji rozwiązania kontrolera domeny. Sytuacja odwrotna, czyli 50% stała redukcja kosztów urządzeń nie umożliwia w żadnym z przypadków, nawet przy całkowitej redukcji okablowania wyboru rozwiązania kontrolera domeny do implementacji. W związku z powyższym stwierdzono większą

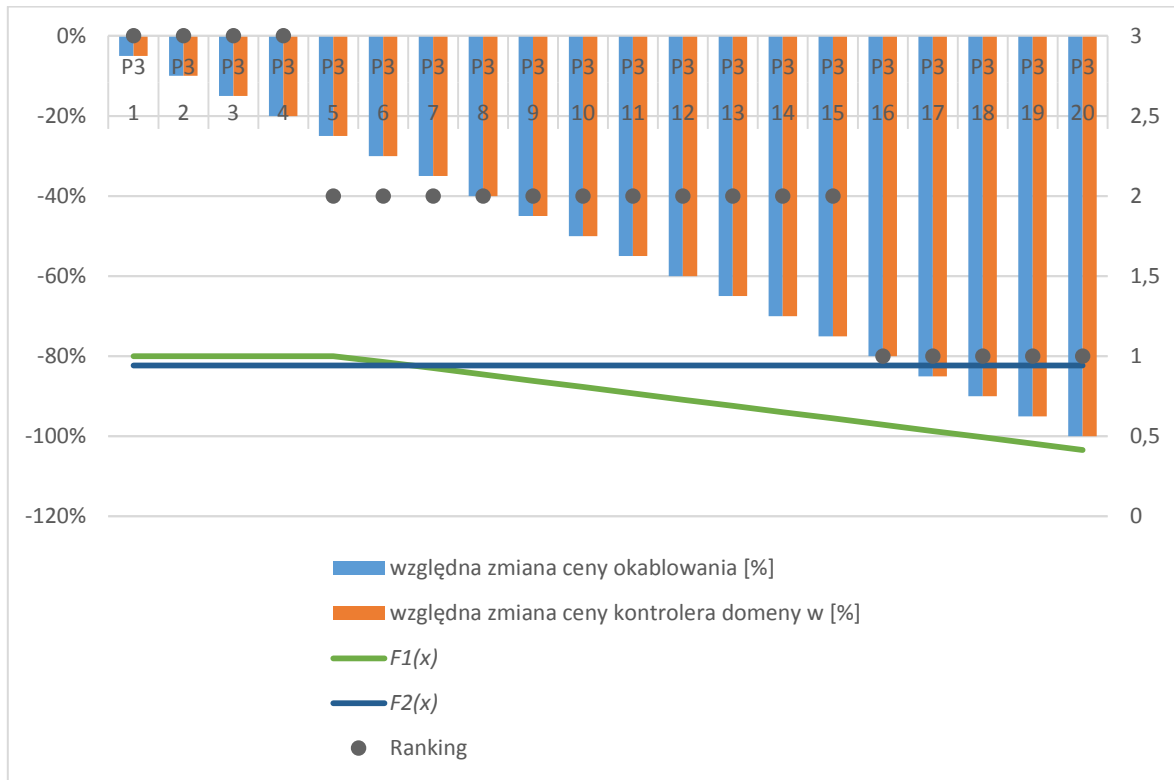
wrażliwość wyborów dokonanych za pomocą kryterium globalnego na wahania cen urządzeń, niż na skracanie fizyczne i redukcję kosztów związanych z okablowaniem strukturalnym.



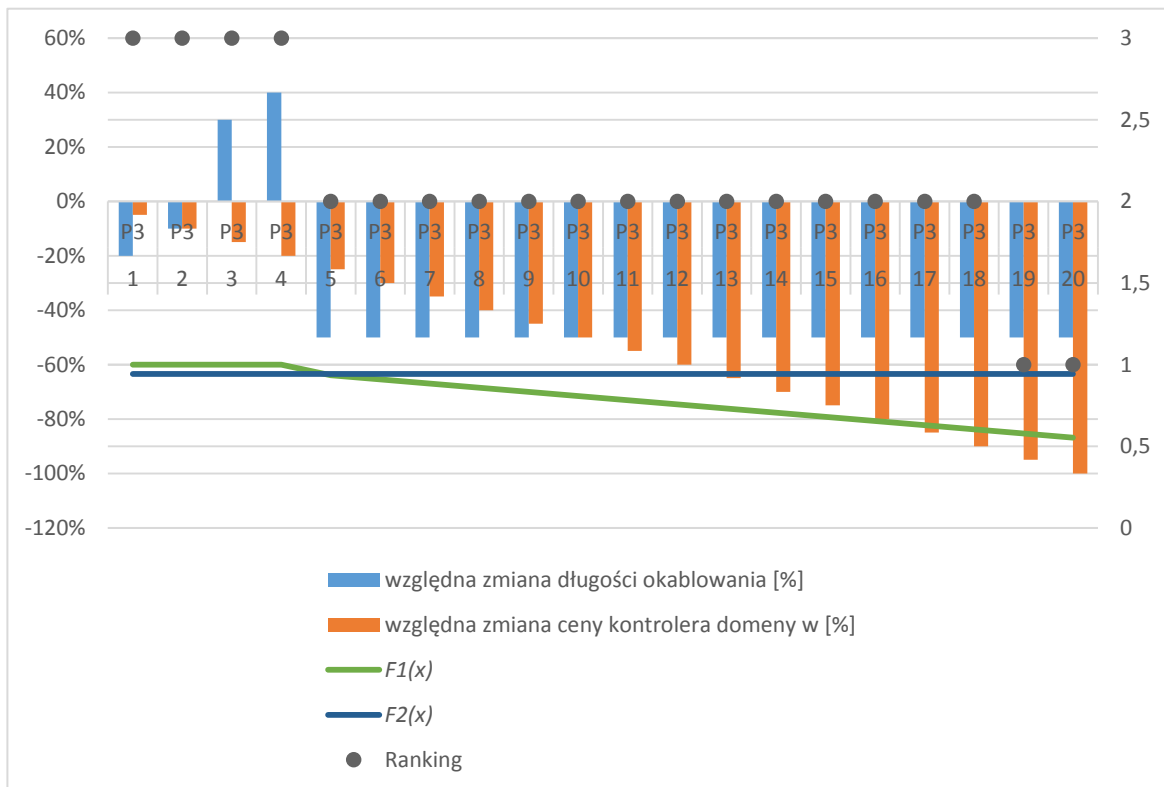
Rys. 12.2. Analiza wrażliwości dla zmiany długości okablowania



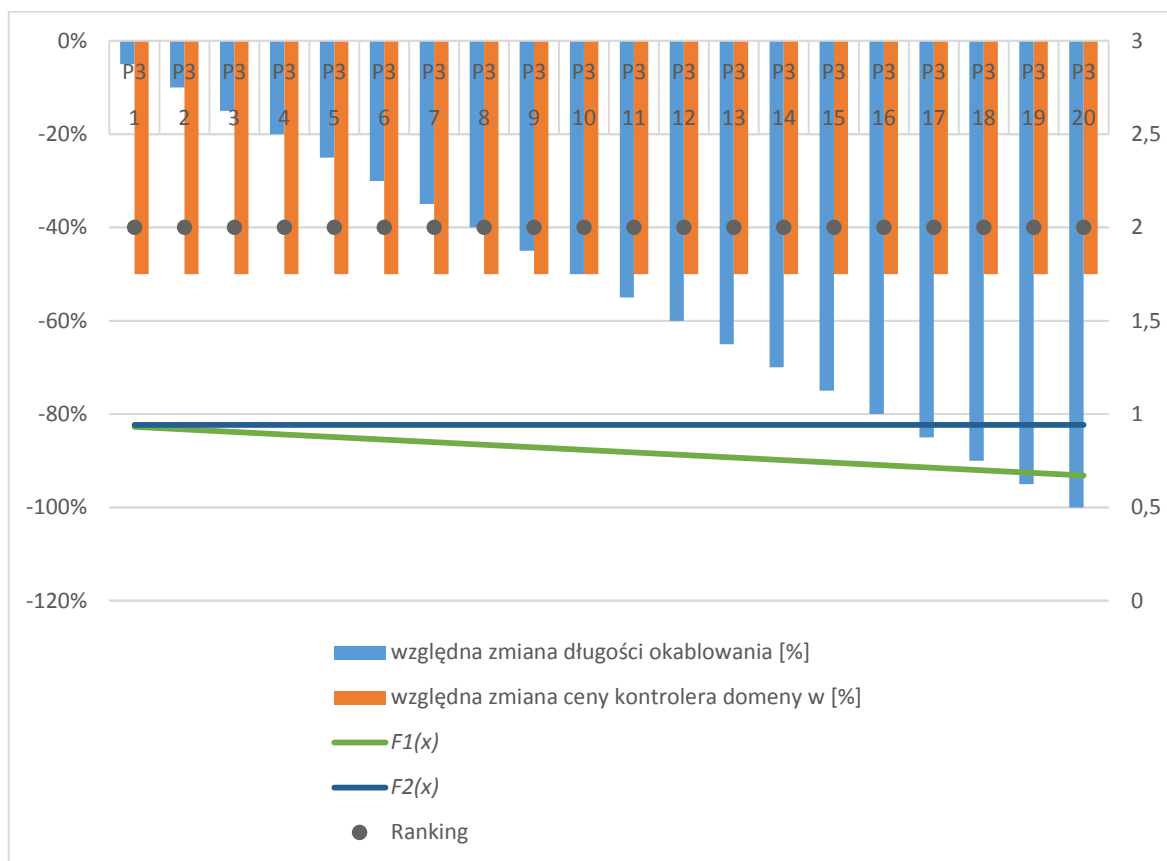
Rys. 12.3. Analiza wrażliwości dla zmiany cen kontrolerów domeny



Rys. 12.4. Analiza wrażliwości dla jednoczesnej zmiany cen kontrolerów domeny oraz okablowania



Rys. 12.5. Analiza wrażliwości dla zmiany cen kontrolerów domeny przy stałej zredukowanej cenie okablowania

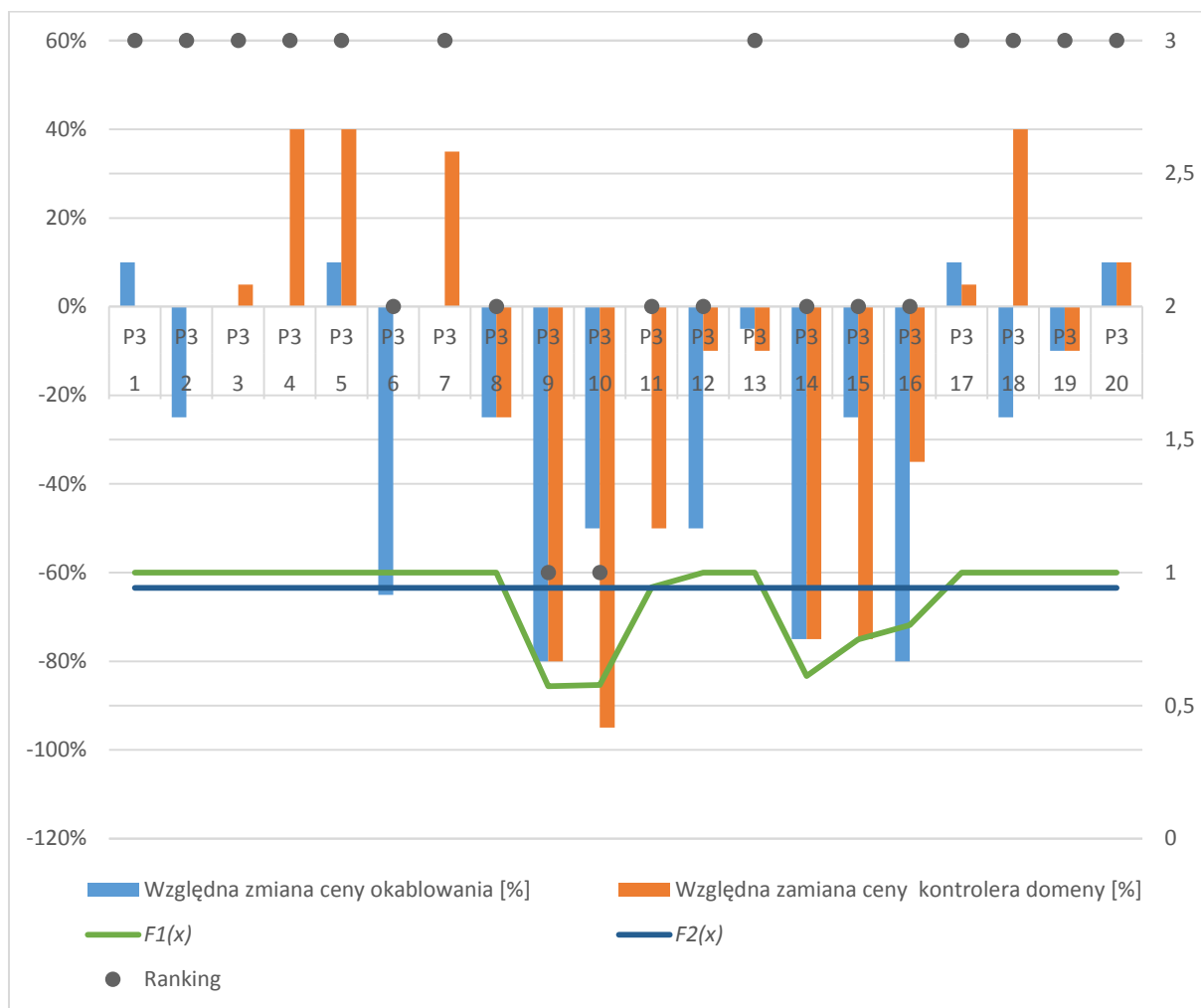


Rys. 12.6. Analiza wrażliwości dla zmiany cen okablowania przy stałej zredukowanej cenie kontrolerów domeny

Przeprowadzone kluczowe fragmenty analizy wrażliwości wskazujące na zmiany ranking, jak również ich brak określonych zakresach zebrano w tabeli numer 12.4. oraz na rysunku numer 12.7.

Tabela 12.4. Kluczowe fragmenty analizy wrażliwości

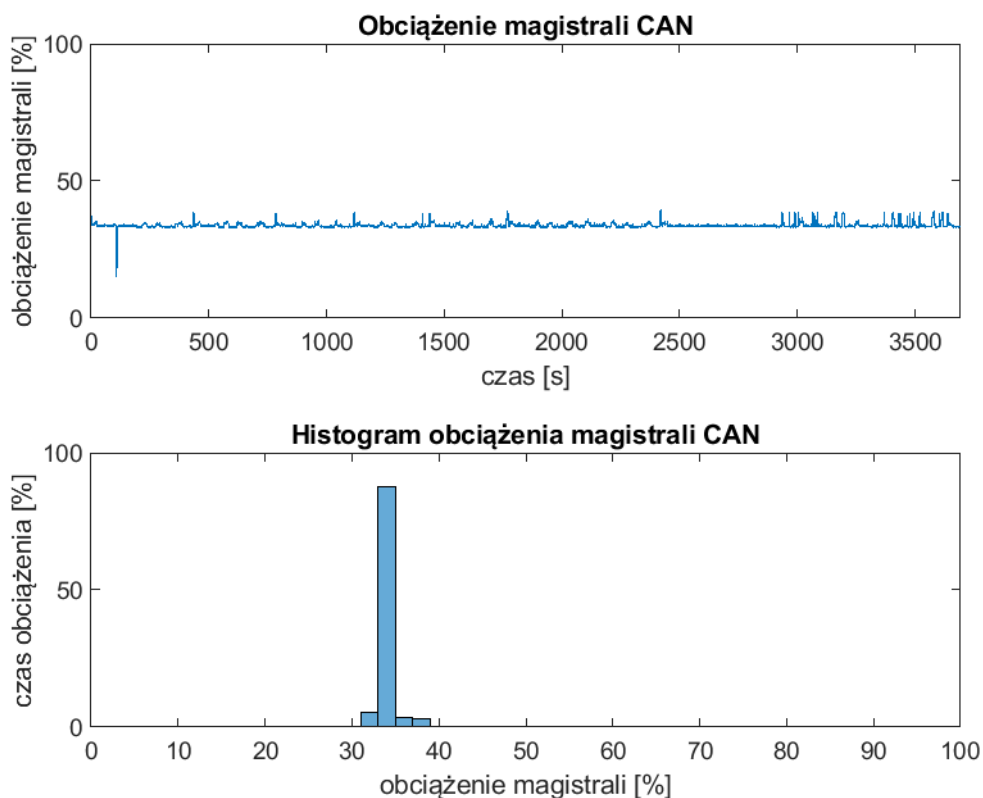
NO	MKDN	cena okablowania zmiana o %	cena kontrolera domeny zmiana o %	Zakres zmiany parametrów			F1(x)	F2(x)	kryterium globalne wynik	Ranking
				koszt IDS	koszt kontrolera domeny	długość okablowania strukturalnego				
1	1	10%	0%	0	650	146708	0,604	1	0,761188599	2
	4			400	650	147708	0,814	0,5678	0,347234533	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



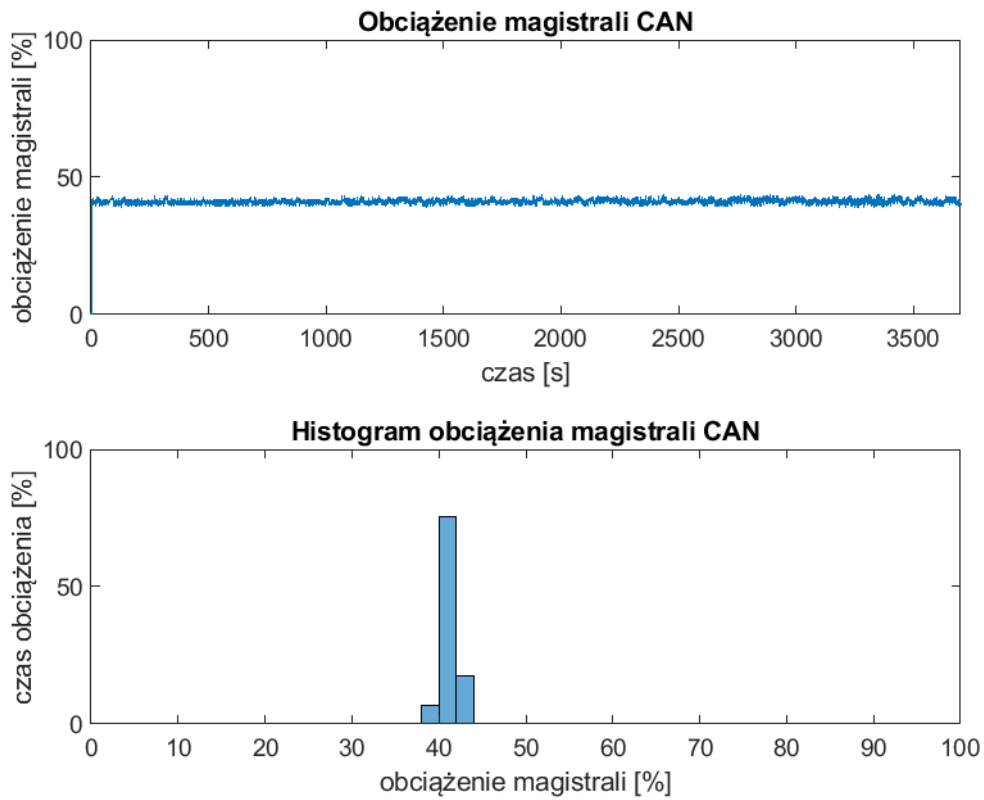
Rys. 12.7. Analiza wrażliwości kluczowe fragmenty

Przechodząc do drugiego etapu, po zakończeniu implementacji i uruchomieniu instalacji w autobusie nE12 Demo PL 2022 rozpoczęto proces weryfikacyjny zaimplementowanego rozwiązania. W tym celu 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. Obciążenie magistrali CAN jest wyrażone jako procent czasu, w którym magistrala jest zajęta przez transmisję danych w ciągu danego okresu. Zmienność obciążenia magistrali CAN, jak również typowy poziom obciążenia magistrali można przedstawić na wykresie, gdzie oś pozioma reprezentuje czas, a oś pionowa reprezentuje obciążenie magistrali w procentach. Na rysunkach 12.8. – 12.16. przedstawiono fragmenty wykresów obciążenia CAN z poszczególnych magistrali autobusu nE12 Demo PL 2022 wersja bazowa wraz z histogramami rozkładu obciążeń. Podczas analiz wykryto niewielkie różnice w poziomie maksymalnych obciążeń generowanych na poszczególnych magistralach w stosunku

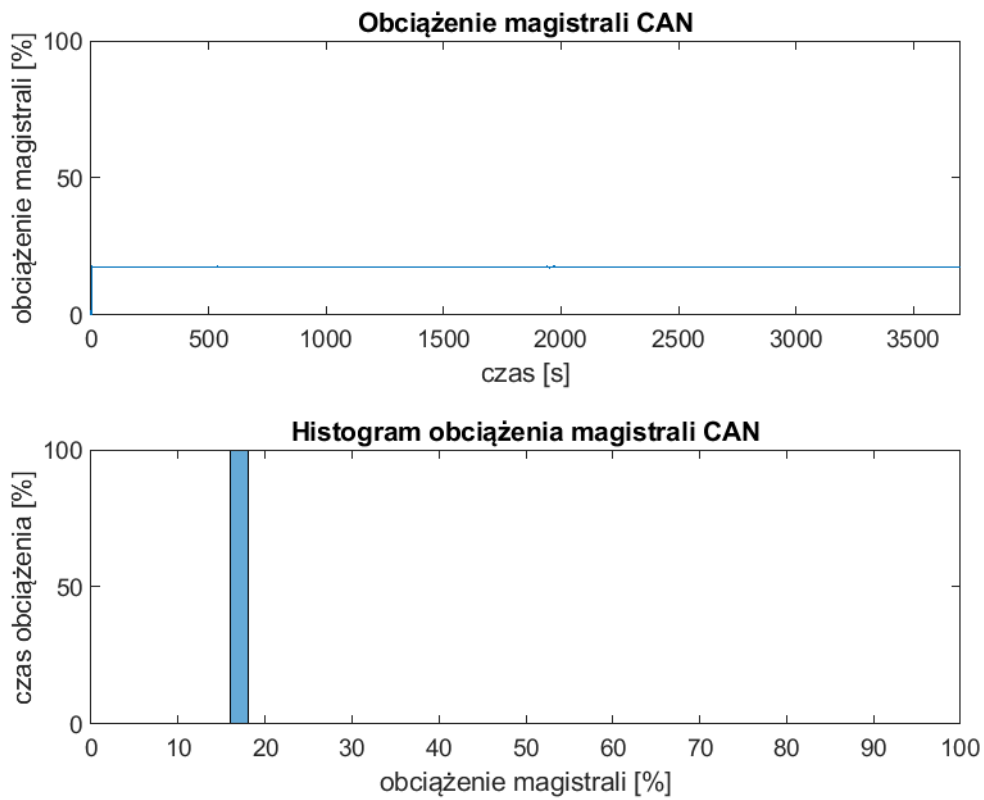
do wartości teoretycznych. Zidentyfikowaną przyczyną takiej sytuacji jest między innymi aktualizacja oprogramowania, która nie zawsze jest skorelowana z uzupełnieniem przez dostawców dokumentacji oraz plików dbc. Z tego powodu, jak również przez brak możliwości zasymulowania w pełni sytuacji awaryjnych, w których dochodzi do zwiększenia liczby wiadomości i częstotliwości ich wysyłania (np. zadziałanie EBS), wyniki otrzymane podczas badań urządzeń na stanowisku testowym mogą również odbiegać od rzeczywistych wyników uzyskiwanych na pojeździe. Taka sytuacja miała miejsce na przykład w zakresie magistrali numer 8. Obliczenia analityczne wskazały na obciążenie magistrali na poziomie 15,55%, testy laboratoryjne wskazały obciążenie na poziomie 16,13%, a sygnały zarejestrowane na pojeździe w trakcie jazd testowych wskazały wartość maksymalną obciążenia na poziomie 16,88%. Oznacza to na pierwszym etapie tworzenia architektury konieczność symulowania dodatkowego obciążenia.



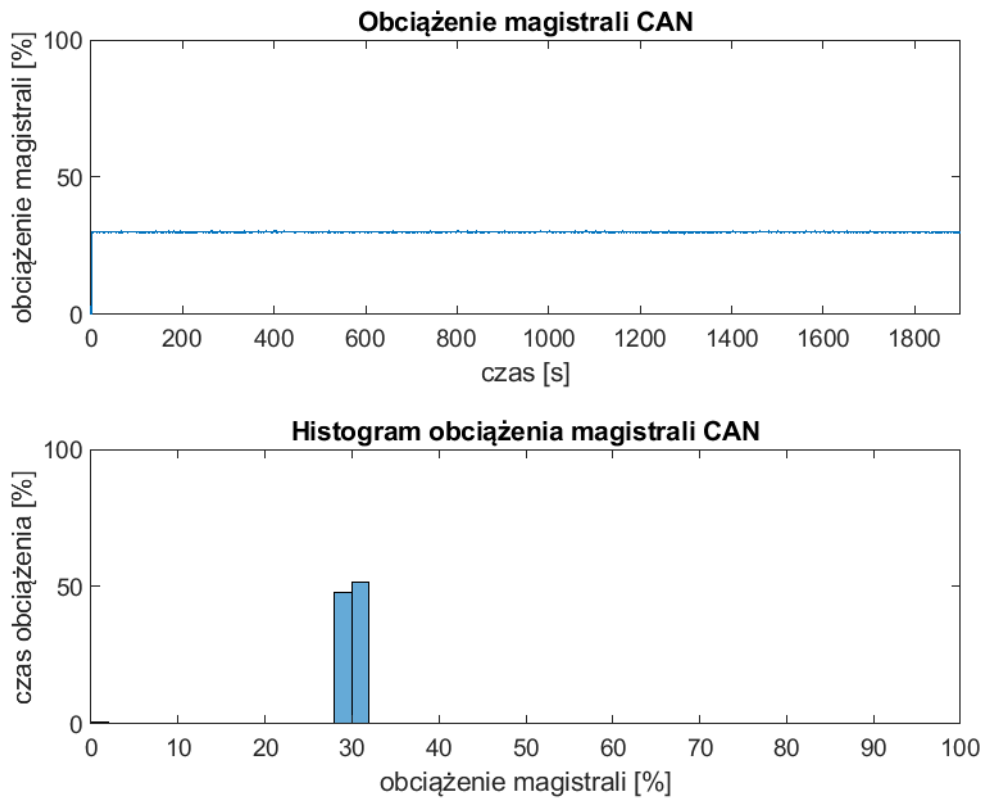
Rys. 12.8. Magistrala ICAN linia 5. Obciążenie bazowe 35.5%



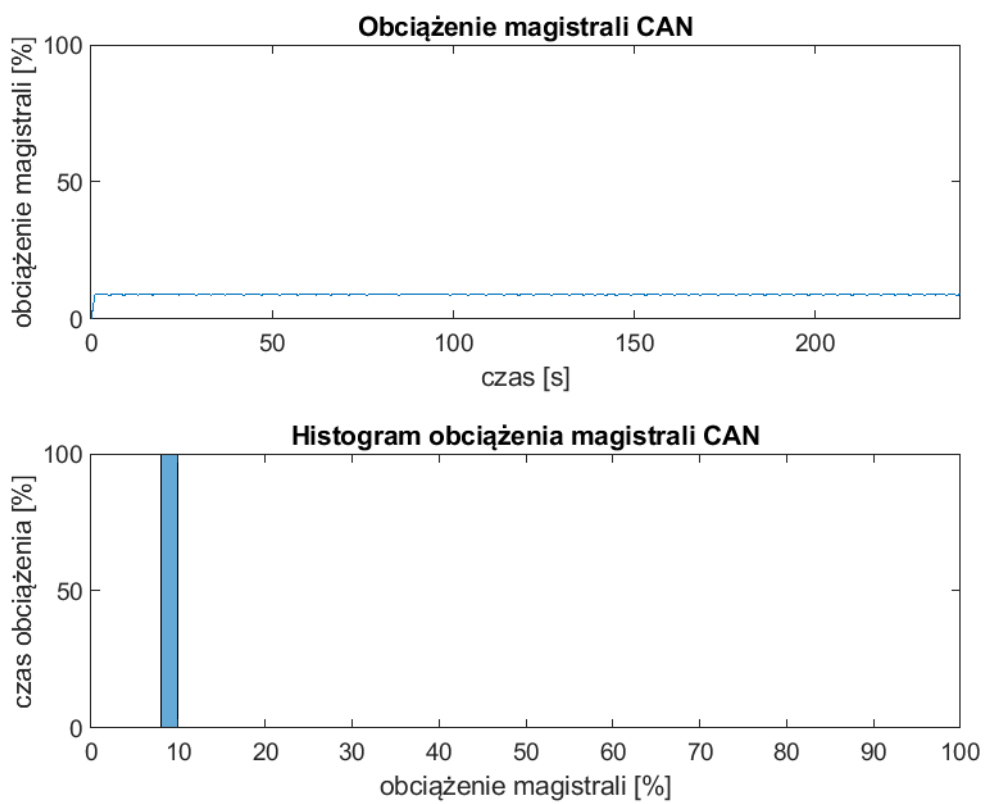
Rys. 12.9. Magistrala CAN linia 2. Obciążenie bazowe 40.91%



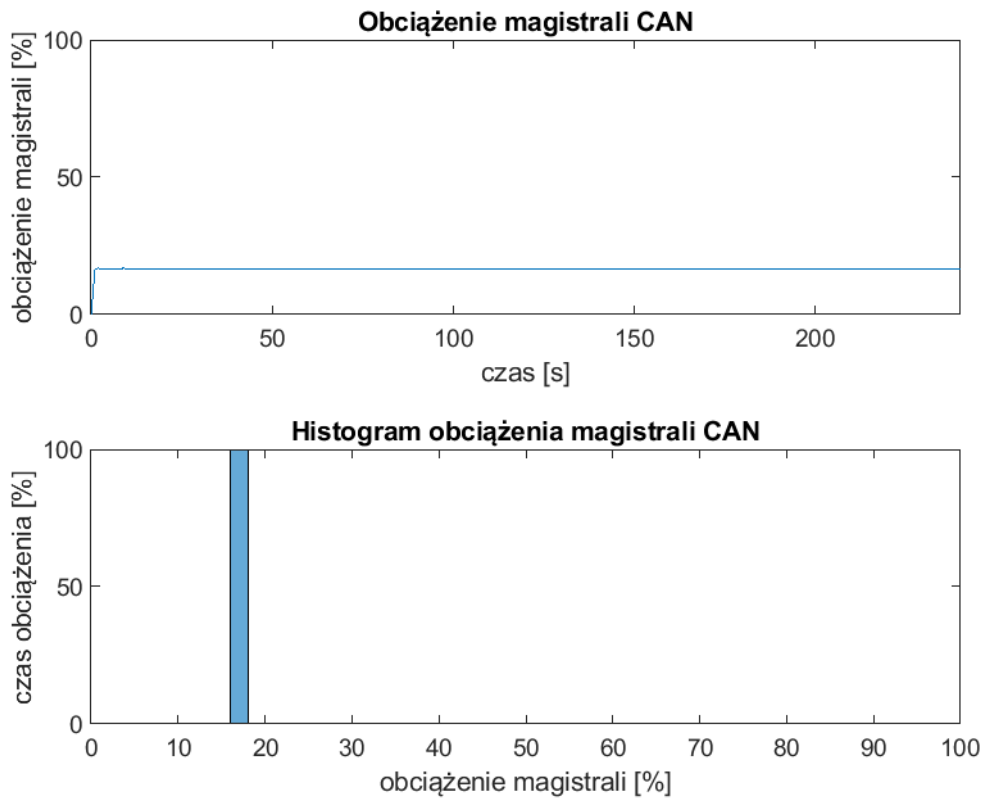
Rys. 12.10. Magistrala XCAN linia 4. Obciążenie bazowe 15,55%



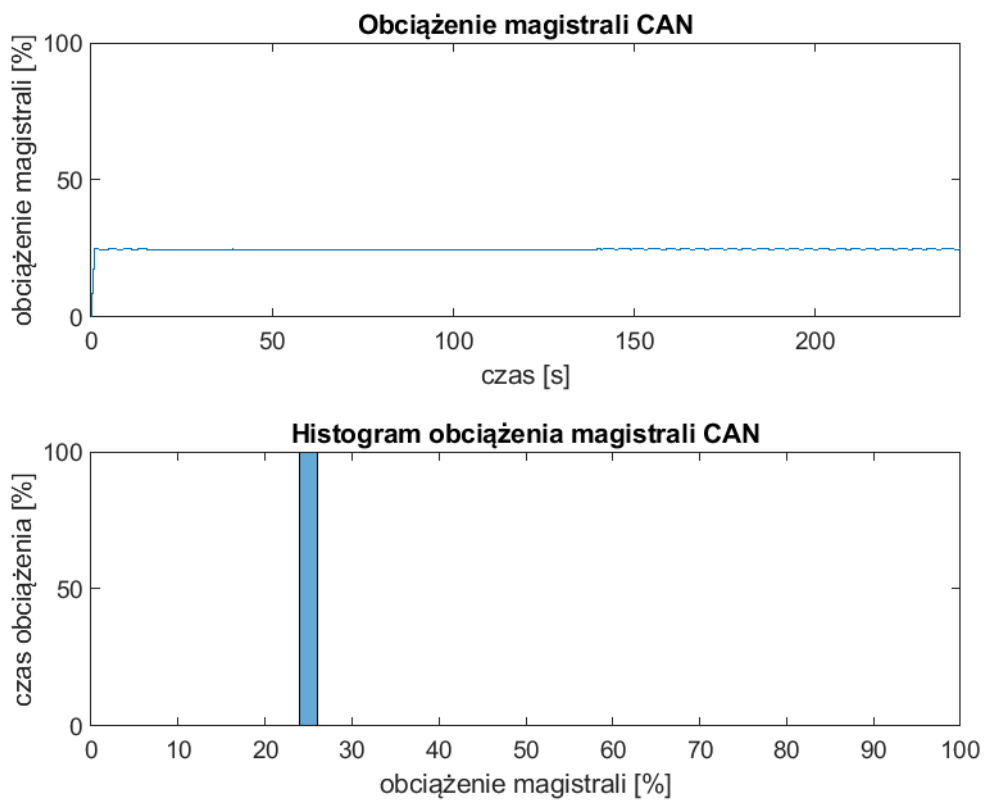
Rys. 12.11. Magistrala ICAN linia 1. Obciążenie bazowe 31,87%



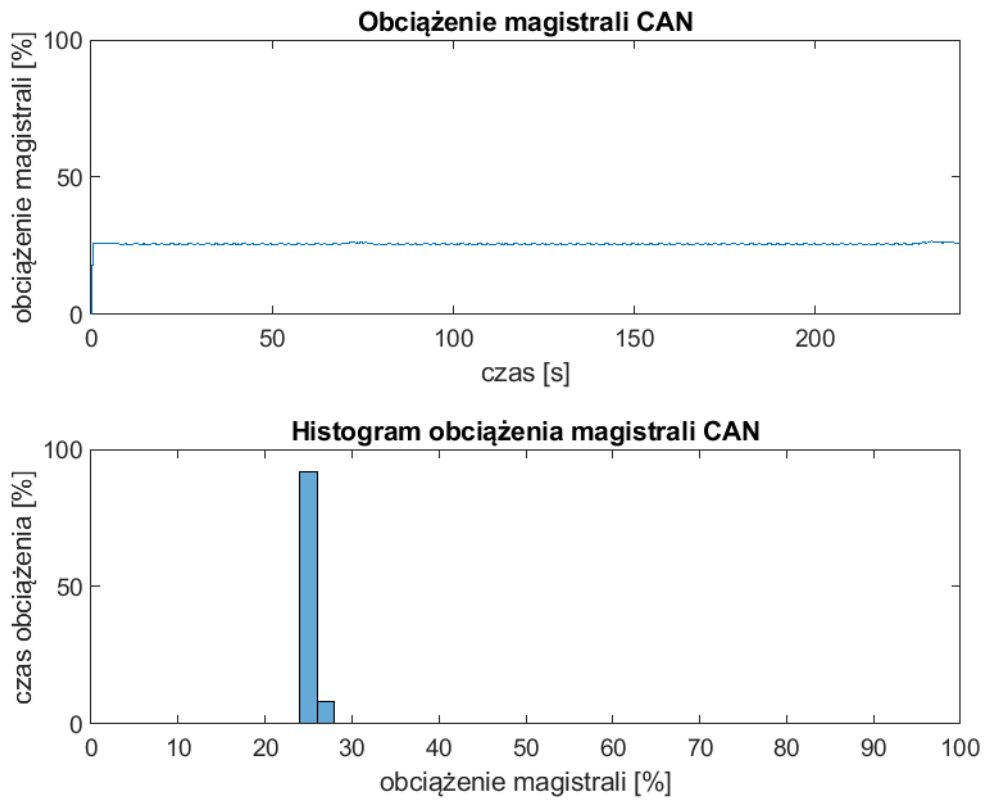
Rys. 12.12. Magistrala MCAN3 linia 9. Obciążenie bazowe 9,52%



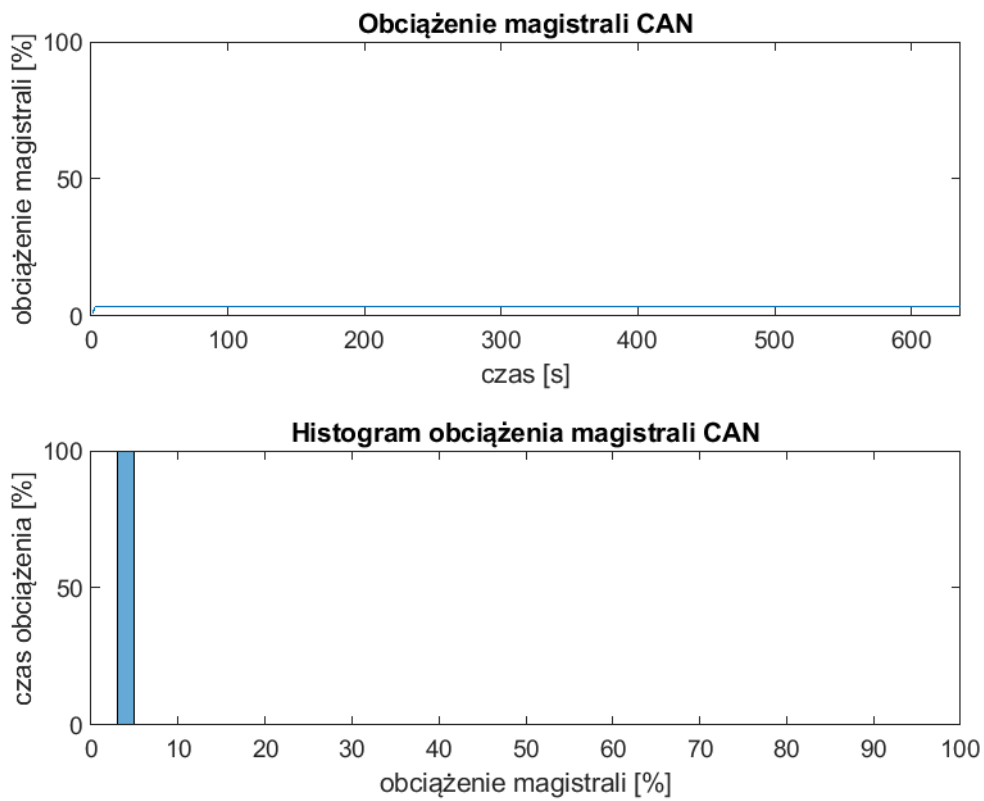
Rys. 12.13. Magistrala BATCAN linia 8. Obciążenie bazowe 15.55%



Rys. 12.14. Magistrala BCAN linia 3. Obciążenie bazowe 24.05%



Rys. 12.15. Magistrala XCAN linia 7. Obciążenie bazowe 25.85%

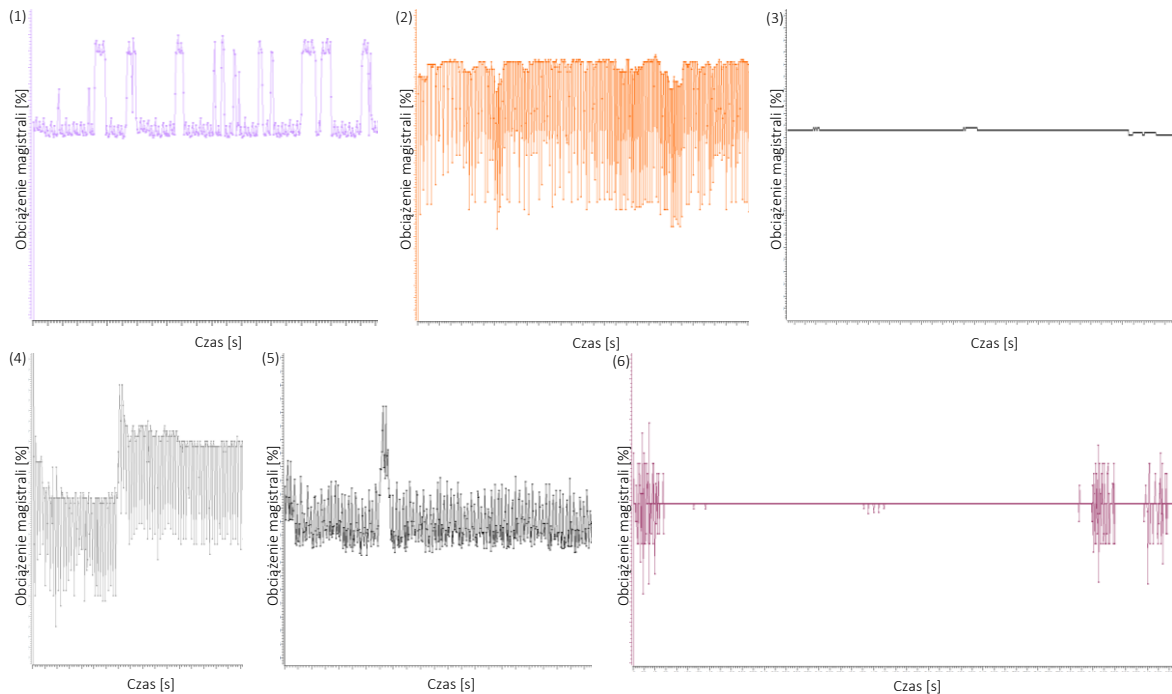


Rys. 12.16. Magistrala PCAN linia 6. Obciążenie bazowe 3.76%

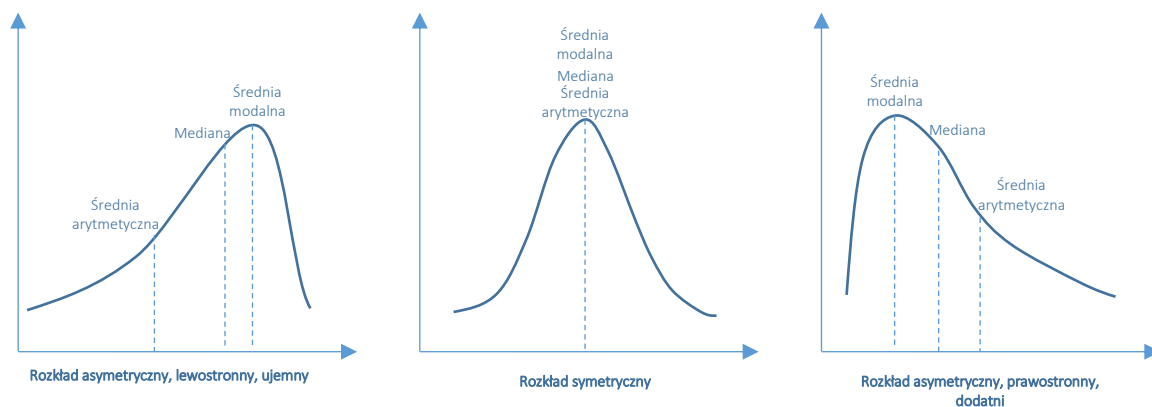
Przeprowadzając analizy związane z badaniem obciążenia poszczególnych magistrali CAN autor zauważył występowanie rozkładów obciążeń o różnym charakterze, które przedstawiono na rysunku 12.17. Na rysunku 12.17.(1) występuje stały niższy poziom obciążenia, pojawiają się natomiast momenty w których obciążenie wzrasta do wyższego poziomu, który jest stabilny w całym zakresie pomiarów. Na rysunku 12.17.(2) wskazano sytuację w której obciążenie z dużą częstością utrzymuje się na wyższym poziomie, natomiast notowane są regularne jego spadki. Rysunki 12.17.(3) oraz (6) wskazują stabilny poziom obciążenia magistrali, jednakże na rysunku 12.17.(6) zauważalne są czasowe zmiany obciążeń realizowane w sposób symetryczny (zarówno podwyższające jak i obniżające obciążenie bazowe). Rysunek 12.17.(4) prezentuje obciążenie jednostronne jak na rysunku 12.17.(2), z tą jednak różnicą, że bazowy jego poziom ulega zmianie. Na rysunku 12.17.(5) zmiana obciążeń przypomina wykres szumu oscylującego wokół wartości środkowej. Zmienność obciążeń zależy od częstotliwości wysyłania poszczególnych wiadomości na danej magistrali. Na wykresie obciążenia magistrali CAN zauważono, że jeżeli jedna wiadomość jest wysyłana z większą częstotliwością niż inne na danej magistrali, to poziom obciążenia magistrali jest wysoki w trakcie jej przesyłania, a następnie opada do niższego poziomu, po zakończonej transmisji. Pojawiające się na magistrali wiadomości wysyłane z małą częstotliwością powodują niski poziom obciążenia magistrali przez większą część czasu, a następnie gdy wiadomość jest przesyłana pojawiają się skoki (tzw. szpilki) do wyższego poziomu obciążenia. Stwierdzono, że im większa częstotliwość wysyłanych wiadomości na magistrali, tym większe obciążenie z którym wzrasta równolegle ryzyko wystąpienia kolizji. Długość okablowania magistrali, może również wpływać na jej obciążenie. Im dłuższy przewód, tym większe opory i pojemności, co wpływa nie tylko na kształt sygnału na magistrali, ale może również wpłynąć na jej poziom obciążenia. Kolejnymi aspektami mogącymi wpłynąć na obciążenie magistrali są impedancja linii transmisyjnej, która jest istotnym dla zachowania kształtu sygnału aspektem. Nie można też pominąć temperatury pracy magistrali, która może wpłynąć na zmianę impedancji linii transmisyjnej. Wzrost temperatury zmniejsza impedancję linii transmisyjnej, a więc prowadzi do pogorszenia jakości transmisji.

Po wykonaniu powyższych analiz stwierdzono, że obciążenia w rzeczywistych systemach realizują trzy typy asymetrii rozkładu przedstawione na rysunku 12.18., 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.



Rys. 12.17. Przykładowe zarejestrowane przebiegi obciążeń na magistralach komunikacyjnych w autobusach



Rys. 12.18. Podział rozkładów [185]

Aby zweryfikować powyższą hipotezę autor rozprawy wykonał obliczenia statystyczne (między innymi wartości średniej, mediany oraz najczęściej występujące wartości obciążenia) dla wybranych zarejestrowanych i analizowanych typów próbek. Aby zweryfikować symetryczność danych, rodzaj jak i kierunek asymetrii oraz wskaźnik skośności przeprowadzono obliczenia, których wynik został zaprezentowany w tabeli 12.5. W przypadku danych symetrycznych spełnione jest następujące równanie [183]:

$$\bar{x} = M_e = M_o. \quad (36)$$

Jeżeli

$$\bar{x} > M_e > M_o \quad (37)$$

mówimy o asymetrii prawostronnej, natomiast gdy:

$$\bar{x} < M_e < M_o \quad (38)$$

mówimy o asymetrii lewostronnej, gdzie \bar{x} to wartość średnia arytmetyczna, M_e to mediana a M_o to średnia modalna, czyli wartość, która pojawia się najczęściej. Wskaźnik skośności obliczony zostanie jako wielkość bezwzględna wyrażona w różnicy między średnią arytmetyczną a modalną:

$$\bar{x} - M_o \quad (39)$$

Tabela 12.5. Obciążenie magistrali dane statystyczne

Numer magistrali	Wartość maksymalna obciążenia [%]	Wartość minimalna obciążenia [%]	Wartość średnia obciążenia [%]	Wariancja	Odchylenie standardowe wyrażone w pp (punktach procentowych)	Wartość mediany obciążenia [%]	Wartość średniej modalnej obciążenia [%]
1	30.7750	27.6750	30.0152	0.0589	0.2426	30.0100	29.9300
2	44.0900	11.6785	41.2104	0.7530	0.8678	41.2100	41.1600
3	25.1800	24.4600	24.7540	0.0081	0.0900	24.7900	24.7900
4	18.4392	17.0864	17.5721	0.0034	0.0585	17.5728	17.5728
5	39.4700	15.0200	33.8107	1.1603	1.0772	33.5300	33.4300
6	3.7000	3.4400	3.5617	0.0001	0.0119	3.5600	3.5600
7	26.7200	25.4200	25.7293	0.0442	0.2103	25.6750	25.6400
8	16.8845	16.4350	16.6849	0.0006	0.0247	16.6861	16.6861
9	9.3800	8.6200	9.1077	0.0485	0.2202	9.2400	9.2500

Z powyższych obliczeń 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.

13 Podsumowanie i wnioski

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

Metodyka projektowania została zaprezentowana przez autora rozprawy w rozdziałach 5-12 (str. 63-185). Autor zaproponował koncepcję metodyki opracowania, wdrażania oraz walidacji architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych. Zagadnienie obejmujące:

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

zostało w pełni zrealizowane. Opracowana architektura, metodyki jej budowy oraz badań, zostały wdrożone w przedsiębiorstwie Solaris Bus & Coach sp. z o.o. Autor opracował oryginalne procedury postępowania jako integralną część swojej metodyki, którą podzielił na cztery etapy.

Pierwszy etap metodyki to zdefiniowanie celów szczegółowych. Autor zaproponował sposób definiowania celów z wykorzystaniem metod wspomagania 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. W ramach 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 wspomagania 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.

W ramach rozprawy zdefiniowano również cele szczegółowe:

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

Procedury zostały opisane przez autora rozprawy w formie schematów procesów projektowania. Schemat ogólny przedstawiający całościowy zarys procedury przedstawiono w rozdziale 5 (str. 67), natomiast schemat metody specyfikacji ograniczeń przedstawiono w rozdziale 8 (str. 92).

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

Notacja strukturyzująca modelowanie architektury nadzorczo-sterującej w zaproponowanej przez autora rozprawy formie macierzy, została opisana w rozdziale 9 (str. 147-149) wraz z techniką wizualizacji za pomocą grafów wskazaną w rozdziałach 8.2, gdzie zaprezentowano graf nieskierowany połączeń logicznych zaimplementowanej architektury (str. 122) oraz 8.3.2, gdzie zaprezentowano graf nieskierowany reprezentacji fizycznych połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami architektury (str. 144).

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

Przestrzeń rozwiązań optymalnych architektury wskazano w rozdziale 10.2 (str. 167-175).

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

Wdrożenie pilotażowe opracowanej metodyki zrealizowano na pojeździe Urbino 15LE electric. Autobus w ramach testów sytuacji awaryjnych oraz wytrzymałości jeździł na torze TATRA TRUCKS a.s. w Kopřivnice w Republice Czeskiej. Informacje na temat wdrożenia pilotażowego zawarto w rozdziale 11 niniejszej rozprawy (str. 180).

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 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 niniejszej 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. (Str. 180-207).

Na podstawie badań i analiz przeprowadzonych przez autora podczas 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 optymalizując 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. 500kbit/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, kontrolerek 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:

- Stworzenie 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 wskazaniem 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. Wykorzystanie metod związanych z wyszukiwaniem najkrótszej ścieżki do najoptymalniejszego pod względem długości ułożenia okablowania pomiędzy urządzeniami.
- Opracowanie i budowę stanowiska badawczego do weryfikacji obciążeń magistrali komunikacyjnych generowanych przez urządzenia nadzorczo-sterujące oraz interfejsu wizualnego HMI.

Podsumowując: Przedstawiona rozprawa ma kluczowe znaczenie w zakresie badań stosowanych i komercjalizacji rozwiązań projektowych oraz wdrożeniowych architektury nadzorczo-sterującej w autobusach elektrycznych. Rozprawa systematyzuje wiedzę z zakresu przepisów prawa i norm, w szczególności tych niezbędnych do uzyskania homologacji oraz dopuszczenia autobusów elektrycznych do ruchu drogowego. Rozprawa bierze 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.

Bibliografia

- [1] Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J., The Unified Modeling Language User Guide, , May 1, 2005, Addison-Wesley Professional, ISBN-10 0321267974
- [2] Golińska P., (red.) Ekologiczne i ekonomiczne aspekty logistyki, Rozdział 1 Proekologiczne rozwiązania w obszarze transportu – Rozwiązania hybrydowe w transporcie miejskim, Michał Sierszyński, Michał Piłkuła, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009, ISBN 798-83-7143-830-1
- [3] Sierszyński M., Chełchowski Ł., Etapy ewolucji napędów alternatywnych na przykładzie autobusów miejskich, AutoEvent 2021, Zawiercie, Polska Izba Motoryzacji., , https://pim.pl/uploads//2021/09/5.-Micha%C5%82-Sierszy%C5%84ski_%C5%81lukasz-Che%C5%82chowski-Solaris_-Etapy-Ewolucji-nap%C4%99d%C3%B3w-alternatywnych-na-przyk%C5%82adzie-autobus%C3%B3w-miejskich.pdf, [dostęp: 05.09.2021]
- [4] Sierszyński M., Chełchowski Ł., Piłkuła M., Michalak D., Sidorski F, Projektowanie i eksploatacja systemów przeznaczonych do autobusów z napędem alternatywnym, Napędy i Sterowanie ; ISSN 1507-7764. 2020 R. 22 nr 11, s. 85–91.
- [5] Sierszyński M., Adamczyk D., Górecki B., Kurzynka M., Wykorzystanie modeli zredukowanych przy tworzeniu studiów wykonalności dla autobusów z napędem elektrycznym, Konferencja motoryzacyjna 2021 r., Kraków, https://www.ont.com.pl/wp-content/uploads/2021/12/Solaris_automotive.pdf, [dostęp: 27.12.2021]
- [6] Piłkuła M., Piotrowski A, Sidorski F., Sierszyński M., Autobusy napędzane silnikiem elektrycznym w zeroemisyjnym transporcie publicznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Elektryka. — 2018 no. 95, s. 287–297. — Bibliogr. s. 296–297, http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2018/2035_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology_95/!287_27_Sidorski.pdf, [dostęp: 10.05.2020]
- [7] Patkowski P., Piotrowski A., Piłkuła M., Sierszyński M., Towards new challenges for the modern public transport - development of manoeuvre supporting systems for the e-buses, The 31st international Electric Vehicle Symposium & exhibition & international Electric Vehicle

Technology Conference 2018, leading a smart society with new mobility Kobe, Japan : Society of Automotive Engineers of Japan, cop. 2018. — S. [1–6] art. no. 20189153, <https://confit.atlas.jp/guide/event/evs31/subject/B4-01/advanced?eventCode=evs31>, [dostęp: 10.05.2020]

[8] eds. Kruszewski M., [et al.], Sierszyński M., [et al.], Trustonomy: building acceptance and trust in autonomous mobility, European Commission, [2019]., s. 111, s. 96–108, <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c91cb0e5&appId=PPGMS>, [dostęp: 04.01.2022]

[9] Chelchowski Ł., Piłkuła M., Sierszyński M., How to design IoT system for buses? Automated and Intelligent Vehicles: joint Technical Meeting of Polish Chapters IEEE RAS and IEEE VTS : November 27 2020, IEEE, [2020]. s. 1–21., https://r8.ieee.org/poland-ras/wp-content/uploads/sites/61/SBC_27_11_2020_IEEE.pdf, [dostęp: 22.02.2021]

[10] Zhao X., Mahendra A., Godfrey N., Dalkmann H., Rode P., Floater, G. Unlocking the power of urban transit systems for better growth and a better climate. Technical note. New Climate Economy, London and Washington, DC., <http://newclimateeconomy.report/misc/working-papers/>, https://newclimateeconomy.report/workingpapers/wp-content/uploads/sites/5/2016/04/Unlocking-the-power-of-urban-transport-systems_web.pdf, [dostęp: 07.07.2021]

[11] Gadziński J., Funkcjonowanie lokalnego systemu transportowego na tle współczesnych procesów urbanizacyjnych. Przykład aglomeracji poznańskiej. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2013. Studia i Prace z Geografii i Geologii, 38. ISBN 978-83-7986-004-0

[12] Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, <http://archiwum.ciop.pl/1351.html>, [dostęp: 22.01.2023]

[13] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych, Warszawa (2018),

[14] US Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Electric-Drive Vehicles, DOE/GO-102017-5045, 2017, <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/70026.pdf>, [dostęp: 12.01.2022]

[15] Kauf S., Szoltysek J., Wieczorek I., Transport zbiorowy w zaspokajaniu mobilności mieszkańców miast. Doświadczenia JST, Wydawnictwo Narodowego Instytutu Samorządu Terytorialnego, Łódź 2018, ISBN 978-83-947833-6-5.

[16] Opracowanie własne na podstawie danych Solaris Bus & Coach sp. z o.o.

[17] Antkiewicz B., Dostępność publicznego transportu zbiorowego dla osób niepełnosprawnych w miastach na prawach powiatu, NIK Informacja o wynikach kontroli LBY.430.001.00.2015, Nr ewid. 6/2016/P/15/069/LBY, Najwyższa Izba Kontroli, Warszawa, <https://www.nik.gov.pl/plik/id,12123,vp,14501.pdf>, [dostęp: 20.07.2021]

[18] Gładysz A., Czech P., Łazarz B., Matyja T., Juzek M., Warunkowania techniczne dotyczące pojazdów wykorzystywanych w regularnym przewozie osób na przykładzie Tyskich Linii Trolejbusowych, Autobusy 6/2016, s. 1689, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj61I26uvb8AhVN_SoKHR-cBs8QFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fyadda.icm.edu.pl%2Fbaztech%2Felement%2Fbwmeta1.element.baztech-bb1e605b-e83f-4350-8a7c-d1e324b583ed%2Ffc%2F07_O_GLADYSZ_CZECH_LAZARZ_MATYJA_JUZEK.pdf&usq=AOvVaw2kF1nobmaRdZlf7WwvhXRx, [dostęp: 27.11.2022]

[19] Seidl M., Edwards M., Guy I., Appleby J., General Safety Regulation - Technical study to assess and develop performance requirements and test protocols for various measures implementing the new General Safety Regulation, for accident avoidance and vehicle occupant, pedestrian and cyclist protection in case of collisions, Intelligent Speed Assistance (ISA): Second Interim Report – Detailed development of requirements and tests, June – 2020, European Commission Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs Directorate C — Industrial Transformation and Advanced Value Chains Unit C.4 — Automotive and Mobility Industries, European Commission Brussels, [https://circabc.europa.eu/sd/a/c1e5bf16-d7a7-46d4-9991-88134cd782d8/GSR5%20ISA%20second%20interim%20report%20FINAL%20\(clean\).pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/c1e5bf16-d7a7-46d4-9991-88134cd782d8/GSR5%20ISA%20second%20interim%20report%20FINAL%20(clean).pdf), [dostęp: 04.08.2021]

[20] Stadnicki J., Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji z przykładami zastosowań technicznych, Wydawnictwo WNT, Wydanie I – 1 dodruk (PWN), Warszawa 2020, ISBN 978-83-01-19589-2

[21] Frigerio A., Vermeulen B., Goossens K. G. W., Automotive Architecture Topologies: Analysis for Safety-Critical Autonomous Vehicle Applications, in IEEE Access, vol. 9, pp. 62837-62846, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074813., <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9410252>, [dostęp: 20.01.2023]

[22] Polanec K., Gross J.A., Brankovic B., Neureiter Ch., Evolution of the Automotive Reference Architecture Model towards a Domain-Specific Systems Engineering Approach, September 2022, DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921592, Conference: 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)At: Stuttgart, Germany, <https://www.en-trust.at/papers/Polanec22a.pdf> [dostęp: 03.05.2022]

[23] Draxler D., Neureiter Ch., Lastro G., Schwartzkopff T., Boumans M., A Domain Specific Systems Engineering Framework for modelling Electric Vehicle Architectures, Conference: 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), DOI: 10.1109/ITEC-AP.2019.8903596

[24] Reinhardt D., Kucera M., Domain Controlled Architecture, A new approach for Large Scale Software Integrated Automotive Systems, Third International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems (PECCS 2013). 2013., https://www.researchgate.net/profile/Dominik-Reinhardt/publication/259623365_Domain_Controlled_Architecture_-_A_New_Approach_for_Large_Scale_Software_Integrated_Automotive_Systems/links/54e5ab300cf22703d5c19a17/Domain-Controlled-Architecture-A-New-Approach-for-Large-Scale-Software-Integrated-Automotive-Systems.pdf, [dostęp: 29.09.2022]

[25] Kouthon T., Automotive Architectures: Domain, Zonal and the Rise of Central, 02.16.2022, EE Times, designLines, Automotive Designline, <https://www.eetimes.com/automotive-architectures-domain-zonal-and-the-rise-of-central/>, [dostęp: 29.09.2022]

[26] Wong W. G., Electronic Design What's the Difference Between Domain and Zonal Automotive Architectures? Zonal automotive architectures may be the wave of the future, but what exactly are they? June 21, 2021, <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21166567/electronic-design-whats-the-difference-between-domain-and-zonal-automotive-architectures>, [dostęp: 29.09.2022]

- [27] Schifferdecker U., Rätz, Ch., High-Performance Computing Platforms in the Automobile, Automobil Elektronik, 01-02, 2020, https://cdn.vector.com/cms/content/products/vconnect/docs/2020-02_Automobil-Elektronik_Mastering-Automotive-OTA.pdf, [dostęp: 02.07.2022]
- [28] Zonal architecture: The foundation for next-generation vehicles, https://f.hubspotusercontent30.net/hubfs/3474688/Whitepaper/Zonal%20Architecture%20Whitepaper/Zonal-Architecture-White-Paper.pdf?__hstc=68092110.4a9d1a27f1d4f0284e00e97105f51475.1655407613741.1655407613741.1655407613741.1&__hssc=68092110.1.1655407613741&__hsfp=978849810&hsCtaTracking=084ce89f-ba98-4716-ab35-0d30c6075bcb%7C7edb44ff-3801-431d-9895-820eeaf6417a, [dostęp: 20.01.2023]
- [29] Bandur V., Pantelic V., Dawson M., Schaap A., Wasacz B., Lawford M., A Domain-Centralized Automotive Powertrain E/E Architecture 2021., 10.4271/2021-01-0786, https://www.researchgate.net/publication/350972515_A_Domain-Centralized_Automotive_Powertrain_EE_Architecture, [dostęp: 02.07.2022]
- [30] Bandur V., Selim G., Pantelic V., Lawford M., Making the Case for Centralized Automotive E/E Architectures. IEEE Transactions on Vehicular Technology. PP. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3054934., 2021, https://www.researchgate.net/publication/348825146_Making_the_Case_for_Centralized_Automotive_EE_Architectures, [dostęp: 04.07.2022]
- [31] Bello L., Patti G., Leonardi L., A Perspective on Ethernet in Automotive Communications—Current Status and Future Trends. Applied Sciences. 13. 1278. 10.3390/app13031278., 2023, https://www.researchgate.net/publication/367239379_A_Perspective_on_Ethernet_in_Automotive_Communications-Current_Status_and_Future_Trends, [dostęp: 15.01.2023]
- [32] Herner A., Riehl H.J., Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o. Wydanie 14, Warszawa 2020, ISBN 978-83-206-1921-8, str.246.
- [33] Prochowski L., Żuchowski A., Samochody ciężarowe i autobusy, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa 2004, ISBN-83-206-1514-3, str.211

- [34] Maurizio D. P. E., Communication Bus. 10.1007/978-1-4614-4214-1_3, https://www.researchgate.net/publication/299812729_Communication_Bus, [dostęp 12.01.2020]
- [35] Siddhartha V., Kalappa N. & Yaji S., Comparison of CAN, LIN, FLEX RAY and MOST In-vehicle bus protocols, 2019, https://www.researchgate.net/publication/341311712_Comparison_of_CAN_LIN_FLEX_RAY_and_MOST_In-vehicle_bus_protocols, [dostęp: 13.03.2022]
- [36] Zeltwanger H., History of CAN technology, CAN Newsletter magazine, issue March 2011, <https://www.can-cia.org/can-knowledge/can/can-history/>, [dostęp: 3.05.2022]
- [37] Pelliccione P., Knauss E., Heldal R., Ågren M., Mallozzi P., Alminger A., Borgentun, D., Automotive Architecture Framework: The Experience of Volvo Cars. Journal of Systems Architecture (2017). 77. 10.1016/j.sysarc.2017.02.005. , https://www.researchgate.net/publication/314033799_Automotive_Architecture_Framework_The_Experience_of_Volvo_Cars, [dostęp: 20.01.2023]
- [38] Komputery i sieci - podstawy, Ośrodek Kształcenia na Odległość "OKNO" Politechniki Warszawskiej. Baza eSEZAM, repozytorium Otwartych Zasobów Edukacyjnych, <https://esezam.okno.pw.edu.pl/mod/book/view.php?id=41&chapterid=912>, [dostęp: 15.09.2022]
- [39] Wzorce i standardy WRD-31-1. Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych. Wymagania podstawowe, Rekomendował: Minister Infrastruktury II 2020 r., <http://www.gov.pl/attachment/12984200-f32d-4eb0-bda4-d0865c38921a>, [dostęp: 03.02.2023]
- [40] "Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 1/2019" w artykule pt. „Projektowanie i eksploatacja systemów przeznaczonych do autobusów z napędem alternatywnym”
- [41] Polkowski S., Układy bezpieczeństwa i komfortu jazdy. WKiŁ. Warszawa 2013.
- [42] Reński A., Bezpieczeństwo czynne samochodu. Zawieszenia oraz układy hamulcowe i kierownicze. Oficyna Wydawnicza Po-litechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.

- [43] Nowotyńska I., Systemy wspomagające bezpieczeństwo w transporcie drogowym. Autobusy. Technika, eksploatacja, systemy Transportowe. 3/2013. ISSN 1509-5678
- [44] Tutak W., Układy bezpieczeństwa czynnego w pojazdach samochodowych. https://ckz.swidnica.pl/wp-content/uploads/IV-KK-Uklady_bezpieczenstwa_czynnego_w_pojazdach.pdf
- [45] Bosch R.: Sieci wymiany danych w pojazdach samochodowych. WKiŁ, Warszawa 2008, ISBN: 978-83-206-1695-8
- [46] Paluszyński W., Komunikacja w systemach czasu rzeczywistego, Katedra Cybernetyki i Robotyki Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska, 2017, http://zpcir.ict.pwr.wroc.pl/~witold/sicr/sicr_rtcomm_s.pdf, [dostęp: 13.03.2022]
- [47] Olszowski S., Sztandke M., Komplikacje w innowacyjnych systemach stabilizacji i hamowania, Logistyka nr 3, 2011, Instytut Logistyki i Magazynowania, <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vilmqm7gUZMJ:https://docplayer.pl/53870781-Komplikacje-w-innowacyjnych-systemach-stabilizacji-i-hamowania.html+&cd=1&hl=pl&ct=clnk&gl=pl>, [dostęp: 15.09.2022]
- [48] Dietsche K. H., Reif K., 11th Edition, Automotive Handbook, January 2022, 1674-1714, ISBN 978-1-119-91190-6
- [49] Donation L., Mishra J., Bluetooth: A Technical Overview., https://www.researchgate.net/publication/2441308_Bluetooth_A_Technical_Overview, [dostęp: 20.10.2022]
- [50] Lyatuu, Andrew C., An analysis of bluetooth 5 in comparison to bluetooth 4.2: Uma análise do bluetooth 5 em comparação com o bluetooth 4.2. Europub Journal of Education Research, Portugal, v.3.n.1 p.112-120., 2022, DOI: 10.54745/ejerv3n1-008, ISSN: 2795-448X
- [51] Freund M., Dorsch R., Harth A., Applying the Web of Things Abstraction to Bluetooth Low Energy Communication.2022, 10.48550/arXiv.2211.12934.

- [52] Pannell D., Challenges & Solutions of Mixed Data Rate Ethernet Networks, IEEE Ethernet & IPTech Days - November 2021, [<https://standards.ieee.org/wp-content/uploads/import/documents/other/eipatd-presentations/2021/d1-12.pdf>], [dostęp: 21.12.2022]
- [53] From Standard Ethernet to Automotive Ethernet. What is the difference, really?, <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06530/flyers/5992-3742.pdf>, [dostęp: 21.12.2022]
- [54] Zeng W., Mohammed A. S. Khalid, Chowdhury S., Achievements and Challenges, Computer Science 2016, IEEE Communications Surveys & Tutorials [<https://www.semanticscholar.org/paper/In-Vehicle-Networks-Outlook%3A-Achievements-and-Zeng-Khalid/3282cebd3d7eea1271b6aa77c699430237a4d22d>], [dostęp: 21.12.2022]
- [55] Karbowniczek M., Sieci w przemyśle, Elektronika praktyczna 11/2013, EP ISSN 1230-3526 indeks 357677, <https://ep.com.pl/files/10448.pdf> s.117-s121., [dostęp: 10.01.2023]
- [56] Wawrzyński M., Evolution of data exchange in on-board vehicles systems, Journal of KONBiN 47(2018), ISSN 1895-8281, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu
- [57] ISO 15031-3:2016(en), Road vehicles — Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics — Part 3: Diagnostic connector and related electrical circuits: Specification and use
- [58] ISO 15765-4:2021(en), Road vehicles — Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN) — Part 4: Requirements for emissions-related systems
- [59] Medium/Heavy-Duty E/E Systems Diagnosis Nomenclature J2403_202008, 2020-08-03, https://www.sae.org/standards/content/j2403_202008/, [dostęp: 05.01.2023]
- [60] Frei M., Samochodowe magistrale danych w praktyce warsztatowej, Wydanie 1, WKŁ Warszawa 2010
- [61] Kasam A., O.Sai K., N.V.Yasasvi, IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 1, Issue 5, 2013 | ISSN (online): 2321-0613, OBD I & II (On Board

Diagnostic), <https://dokumen.tips/engineering/obd-i-ii-on-board-diagnostic.html?page=1>, [dostęp: 19.12.2022]

[62] Craig J., A Comparison of J1939 & ISO15031, SAE 2009 On-Board Diagnostic Symposium. Update on Light and Heavy Duty Vehicle, https://www.academia.edu/33326676/A_Comparison_of_J1939_and_ISO15031, [dostęp: 20.01.2023]

[63] Jianguo D., Advances in network management. CRC press, 2016. 10.1201/9781420064551. https://www.researchgate.net/publication/233814494_Advances_in_Network_Management, [dostęp: 02.05.2022]

[64] Knoll, P. M., Some pictures of the history of automotive instrumentation. *Jnl Soc Info Display*, 25: 44–52. doi: 10.1002/jsid.536., 2017, <https://sid.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsid.536>, [dostęp: 04.01.2022]

[65] Kindelsberger J., Fridman L., Glazer M., Reimer B., Designing Toward Minimalism in Vehicle HMI, , Massachusetts Institute of Technology, 2018, arXiv:1805.02787v1 [cs.HC] 8 May 2018, https://www.researchgate.net/publication/325034020_Designing_Toward_Minimalism_in_Vehicle_HMI/figures, [dostęp: 20.01.2023]

[66] Yoren G., Lécuyer A., The Use of Haptic and Tactile Information in the Car to Improve Driving Safety: A Review of Current Technologies. *Frontiers in ICT*. 2018, 5. 10.3389/fict.2018.00005., https://www.researchgate.net/publication/324013520_The_Use_of_Haptic_and_Tactile_Information_in_the_Car_to_Improve_Driving_Safety_A_Review_of_Current_Technologies, [dostęp: 20.01.2023]

[67] Carsten, O., Martens, M.H., How can humans understand their automated cars? HMI principles, problems and solutions. *Cogn Tech Work* 21, 3–20 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0484-0>, <https://rdcu.be/c7YDR>, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0484-0>, [dostęp: 20.01.2023]

[68] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen der Branchenverband für den öffentlichen Verkehr, https://www.vdv.de/english_2.aspx, [dostęp: 15.07.2022]

[69] POIR.04.01.02-00-0081/17 Projekt Zaawansowany system wsparcia precyzyjnych manewrów dla kierowców autobusów miejskich jednosegmentowych i przegubowych (akronim projektu: ADAS) dofinansowany w ramach Działania 4.2: „Sektorowe programy B+R” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

[70] Dokumentacja IBM 7.2, Porównanie protokołów IPv4 i IPv6, <https://www.ibm.com/docs/pl/i/7.2?topic=6-comparison-ipv4-ipv6>, [dostęp: 08.08.2022]

[71] Information Technology for Public Transport Brussels, Belgium, Documentation Center, https://wiki.itxpt.org/index.php/ITxPT_Related_Standards, [dostęp: 08.08.2022]

[72] Information Technology for Public Transport Brussels, Belgium, Documentation Center, ITxPT specifications version 2.2.0 released, <https://itxpt.org/news/itxpt-specifications-version-2-2-0-released/>, [dostęp: 08.08.2022]

[73] Tozzi M., Bus-FMS requirements & evolution for IT network, UITP – International Association of Public Transport, European Bus Systems for the Future 2, 2018, <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bbc2cab8&appId=PPGMS>, [dostęp: 21.07.2022]

[74] Types of legislation, https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_en, [dostęp: 12.09.2022]

[75] World Forum for the harmonization of vehicle regulations (WP.29), <https://unece.org/transport/vehicle-regulations>, [dostęp: 12.09.2022]

[76] UN Regulations (Addenda to the 1958 Agreement), <https://unece.org/un-regulations-addenda-1958-agreement>, [dostęp: 12.09.2022]

[77] Regulamin ONZ nr 118 - Jednolite przepisy techniczne dotyczące palności materiałów używanych w konstrukcji niektórych kategorii pojazdów samochodowych oraz ich odporności na działanie paliw lub smarów [2020/241]. Dz.U.U.E.L.2020.48.26

[78] Urząd Publikacji Unii Europejskiej, Regulamin nr 10 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów w odniesieniu do kompatybilności elektromagnetycznej,

<https://op.europa.eu/pl/publication-detail/-/publication/b0779df9-024e-11e2-8e28-01aa75ed71a1/language-pl>, [dostęp: 08.08.2022]

[79] Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. - Prawo o ruchu drogowym (Dz.U. 1997 nr 98 poz. 602)

[80] Yahyaoui W., Challenge of EMC conducted emission in ECE R10: Specifications concerning emission of radiofrequency conducted disturbances on AC power., https://www.researchgate.net/publication/346624621_Challenge_of_EMC_conducted_emission_in_ECE_R10_Specifications_concerning_emission_of_radiofrequency_conducted_disturbances_on_AC_power, [dostęp: 10.02.2022]

[81] UN Regulation No. 159 - Moving Off Information System (MOIS),

[82] UN Regulation No. 151 - Blind Spot Information System for the Detection of Bicycles,

[83] UN Regulation No. 158 - Devices for means of rear visibility or detection,

[84] Agreement, Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions, Revision 2, including the amendments which entered into force on 16 October 1995, Addendum 140 – Regulation No. 141, E/ECE/324/Rev.2/Add.140–E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.140, 30 January 2017, <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R141e.pdf>, [dostęp: 12.09.2022]

[85] UN Regulation No. 155 - Cyber security and cyber security management system,

[86] Regulations, commission delegated regulation (EU) 2021/1958 of 23 June 2021 supplementing Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council by laying down detailed rules concerning the specific test procedures and technical requirements for the type-approval of motor vehicles with regard to their intelligent speed assistance systems and for the type-approval of those systems as separate technical units and amending Annex II to that Regulation, Official Journal of the European Union, L 409/1, 17.11.2021

[87] Commission Delegated Regulation (EU) 2021/1341 of 23 April 2021 supplementing Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council by laying down detailed rules concerning the specific test procedures and technical requirements for the type-approval of motor vehicles with regard to their driver drowsiness and attention warning systems and amending Annex II to that Regulation, C/2021/2639

[88] EN 50436 Alcohol Interlock Standards Evolutions and future vision, Stefan Morley| Convenor CENELEC BTTF 116-2,

[89] Agreement, Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be fitted and/or be used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions, Revision 2, including the amendments that entered into force on 16 October 1995, Addendum 47: Regulation No. 48 Revision 12, <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R048r12e.pdf>, [dostęp: 12.09.2022]

[90] UN Regulation No. 156 - Software update and software update management system:

[91] Czy stosowanie norm jest obowiązkowe?, Polski Komitet Normalizacyjny, <https://www.pkn.pl/na-skroty/faq/czy-stosowanie-norm-jest-obowiazkowe>, [dostęp: 12.09.2022]

[92] Wykazy PN: <https://www.pkn.pl/polskie-normy/wykazy-pn>, [dostęp: 24.01.2023]

[93] ISO Online Browsing Platform (OBP): <https://www.iso.org/obp/ui>, [dostęp: 24.01.2023]

[94] SAE Standards: <https://www.sae.org/standards>, [dostęp: 24.01.2023]

[95] DIN SPEC 70121 Electromobility - Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging in the Combined Charging System:

[96] Sierszyński M., Chelchowski Ł., Kaczmarczyk B., Muszyński P., Michalak D. Analiza wybranych przepisów i norm istotnych z punktu widzenia projektowania autobusów cz.1, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097. — 2022 R. 98 nr 8, s. 158–162.

- [97] Sierszyński M., Chelchowski Ł., Kaczmarczyk B., Muszyński P., Michalak D. Analiza wybranych przepisów i norm istotnych z punktu widzenia projektowania autobusów cz.2, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097. — 2022 R. 98 nr 8, s. 163–167.
- [98] Płonka S., *Wielokryterialna optymalizacja procesów wytwarzania części maszyn*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2017 ISBN 978-83-01-19445-1
- [99] Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., *Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2009, ISBN 978-83-01-15961-0
- [100] Michalewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. WNT, Warszawa, 1999, ISBN: 8320428815
- [101] Wierzchoń S.T., *Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania*. Wydawnictwo EXIT, Warszawa, 2001.
- [102] Orantek P., *Zastosowanie algorytmów hybrydowych w zagadnieniach optymalizacji i identyfikacji dynamicznych układów mechanicznych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, KWMiMKM, Gliwice, 2002.
- [103] Arabas J., *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*. WNT, Warszawa, 2004, ISBN: 8320429706
- [104] Stadnicki J., *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2017, Wydanie I dodruk 2020. ISBN 978-83-01-19589-2
- [105] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, ISBN 83-01-12304-4
- [106] Cattani I. B., Itaipu P. T., Chaparro E. R., Barán B., *Multi-objective Evolutionary Algorithms for Power Distribution System Reconfiguration*. *Clei Electronic Journal*, 22(3) 2019.
- [107] Deb, K., Agrawal S., Pratap, A., Meyarivan, T., *A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II*. In: , et al. *Parallel Problem*

Solving from Nature PPSN VI. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science, vol 1917. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_83

[108] Schaffer J. D., Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms (artificial intelligence, optimization, adaptation, pattern recognition), Doctoral dissertation, Vanderbilt University.

[109] Bereta M., Algorytmy ewolucyjne, <https://silo.tips/download/algorytmy-ewolucyjne>, [dostęp:01.03.2022]

[110] IEEE Recommended Practice for Architectural Description for Software-Intensive Systems, in *IEEE Std 1471-2000*, vol., no., pp.1-30, 9 Oct. 2000, doi: 10.1109/IEEESTD.2000.91944.

[111] Conway M. E., How Do Committees Invent?, F. D. Thompson Publications, Inc., Reprinted by permission of Datamation magazine, where it appeared April, 1968, <https://www.melconway.com/research/committees.html>, [dostęp: 12.01.2023]

[112] Skelton M., Pais M., Team Topologies, organizing business and technology teams for fast flow, Portland 2019, ISBN: 978-1942788-812

[113] Baranowski B., Wprowadzenie do projektowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998, ISBN 83-01-12517-9

[114] Hehn T., Kooij J., Hamprecht F., End-to-End Learning of Decision Trees and Forests. International Journal of Computer Vision 202, 128. 10.1007/s11263-019-01237-6. https://www.researchgate.net/publication/336387004_End-to-End_Learning_of_Decision_Trees_and_Forests, [dostęp: 15.01.2023]

[115] Namugenyia Ch., Nimmagaddab S. L., Reinersc T., Design of a SWOT Analysis Model and its Evaluation in Diverse Digital Business Ecosystem Contexts, Procedia Computer Science 159 (2019) 1145–1154, <https://demo.dspacedirect.org/server/api/core/bitstreams/c5fcc52d-13fe-4a94-ae78-24f2a820a312/content>, [dostęp: 15.01.2023]

[116] Wykorzystanie symulacji Monte Carlo w analizie ryzyka projektów inwestycyjnych, Tomasz Wiśniewski, Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania nr

https://bazhum.muzhp.pl/media//files/Studia_i_Prace_Wydzialu_Nauk_Ekonomicznych_i_Zarzadzania/Studia_i_Prace_Wydzialu_Nauk_Ekonomicznych_i_Zarzadzania-r2013-t34-n2/Studia_i_Prace_Wydzialu_Nauk_Ekonomicznych_i_Zarzadzania-r2013-t34-n2-s65-80/Studia_i_Prace_Wydzialu_Nauk_Ekonomicznych_i_Zarzadzania-r2013-t34-n2-s65-80.pdf, [dostęp: 15.01.2023]

[117] Linear Programming, <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/linear-programming>, [dostęp; 10.02.2023]

[118] Trzaskalik T., Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań., Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 2014, Seria: Organizacja i zarządzanie z. 74 Nr kol. 1921, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-6c7b46fb-8687-459a-a7ef-9ff034166ba7>, [dostęp: 15.01.2023]

[119] Sylwestrzak P., Analiza opłacalności inwestycji lub projektu, https://www.pfp.com.pl/files/2478_Analiza_op%20C5%82acalno%20C5%9Bci_inwestycji_lub_projektu.pdf, [dostęp: 21.02.2023]

[120] Turoff M., The Delphi Method Techniques and Applications, , ISBN 0-201-04294-0, http://www.foresight.pl/assets/downloads/publications/Turoff_Linstone.pdf , [dostęp: 14.04.2021]

[121] Srdjevic B., Srdjevic Z., Blagojevic B., Suvocarev K, A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making, Applied Mathematical Modelling, Volume 37, Issues 10–11, 2013, Pages 6670-6682, ISSN 0307-904X, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.01.028>.,

[122] Nowak M., Metody Electre w deterministycznych i stochastycznych problemach decyzyjnych, Akademia Ekonomiczna w Katowicach, DECYZJE nr 2, grudzień 2004, ISSN: 1733-0092, https://journals.kozminski.edu.pl/pl/system/files/Nowak_0.pdf, [dostęp: 15.01.2023]

[123] McQueen B., McQueen J.: Intelligent transportation systems architectures, ARTECH HOUSE, Boston 1999, ISBN: 089006525X

[124] Ford N., Parsons R., Kua P., Building Evolutionary Architectures: Support Constant Change, ISBN-10 1491986360, O'Reilly Media, November 7, 2017

[125] Sierszyński M., Pril A., Białek R., Chełchowski Ł., Zarządzanie danymi w celu zwiększenia niezawodności eksploatacyjnej autobusów miejskich, s.90-91, Raport 2021 Cyfrowa nauka, gospodarka i społeczeństwo, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe afiliowane przy Instytucie Chemii Bioorganicznej Polskiej Akademii Nauk, Opracowanie Zespół PCSS pod redakcją: Magdaleny Baranowskiej-Szczepańskiej, Mateusza Barancewicza, Diany Krueger, Magdaleny Madaj, Macieja Rutkowskiego, Poznań, https://www.pcss.pl/files/2021/12/Raport_2021.pdf, [dostęp: 04.01.2022]

[126] Bi Z., Xu G., Chenyu W., Xu Gu., Zhang S., A Method for Translating Automotive Body-Related CAN Messages Based on Labeled Bits 2023, Applied Sciences. 13. 1942. 10.3390/app13031942., https://www.researchgate.net/publication/368235881_A_Method_for_Translating_Automotive_Body-Related_CAN_Messages_Based_on_Labeled_Bits, [dostęp: 10.03.2023]

[127] McKinley P. K., Xu H., Esfahanian A. H., Ni L. M., Unicast-based multicast communication in wormhole-routed networks, in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 5, no. 12, pp. 1252-1265, Dec. 1994, doi: 10.1109/71.334899

[128] Alani M. M., What are Computer Networks?, Guide to OSI and TCP/IP Models (2014): 1-4

[129] ISO 26262-10:2018 Road vehicles — Functional safety — Part 10: Guidelines on ISO 26262

[130] Dyrektywa 2001/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 3 grudnia 2001 r. w sprawie ogólnego bezpieczeństwa produktów (Dz.U. L 11 z 15.1.2002, str. 4), wraz ze zmianami

[131] ISO 26262-5:2018(en) Road vehicles — Functional safety — Part 5: Product development at the hardware level

- [132] Marchanka A., Analysis of ISO26262 standard application in development of steer-by-wire systems, , Chalmers University of Technology University of Gothenburg Department of Computer Science and Engineering Göteborg, Sweden, December 2012, <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/184469/184469.pdf>, [dostęp: 01.02.2023]
- [133] ISO 26262-9:2011(en), Road vehicles — Functional safety — Part 9: Automotive Safety Integrity Level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses
- [134] Khastgir S., Birrell S., Dhadyalla G., Sivencrona H., Jennings P., Safety Science, Towards increased reliability by objectification of Hazard Analysis and Risk Assessment (HARA) of automated automotive systems, Volume 99, Part B, 2017, Pages 166-177, ISSN 0925-7535, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.03.024>,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753517305763>, [dostęp: 16.12.2022]
- [135] Kelly T. P., Arguing Safety - A Systematic Approach to Managing Safety Cases, University of York, 1998: <https://www-users.cs.york.ac.uk/tpk/tpkthesis.pdf>, [dostęp: 21.12.2022]
- [136] Zhou Z., Nie H., Dong Ch., Zhang Q., Safety Analysis Model of DUCG Based on FMEA/FTA, Conference: the 2018 26th International Conference on Nuclear EngineeringAt: London, England; DOI: 10.1115/ICONE26-81484, https://www.researchgate.net/publication/326803752_Safety_Analysis_Model_of_DUCG_Based_on_FMEAFTA, [dostęp: 24.01.2023]
- [137] Cristea G., Constantinescu D.M., A comparative critical study between FMEA and FTA risk analysis methods 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 252 012046, https://www.researchgate.net/publication/320579551_A_comparative_critical_study_between_FMEA_and_FTA_risk_analysis_methods, [dostęp: 24.01.2023]
- [138] Prashanth Reddy G., Leburu, R., Matrix Approach to Perform Dependent Failure Analysis in Compliance with Functional Safety Standards, Advances in Intelligent Systems and Computing 2020, vol 1090. Springer, Singapore, ISBN 978-981-15-1479-1
- [139] Hokstad, P., Rausand, M., Common Cause Failure Modeling: Status and Trends. In: Misra, K.B. (eds) Handbook of Performability Engineering. Springer, London.

https://doi.org/10.1007/978-1-84800-131-2_39, Springer, London, ISBN978-1-84800-130-5, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84800-131-2_39, [dostęp: 12.02.2023]

[140] Nilsson J., Bergenhem, C., Jacobson J., Johansson R., Vinter J., Functional Safety for Cooperative Systems. SAE Technical Papers. 2. 10.4271/2013-01-0197., https://www.researchgate.net/figure/Allocation-of-functional-safety-requirements-to-the-preliminary-functional-architecture_fig4_258289530, [dostęp: 21.12.2022]

[141] Frese T., Leonhardt T., Hatebur D., Côté I., Aryus H. J., Heisel M., Fault Tolerance Time Interval: How to define and handle, 2020, 10.1007/978-3-658-29746-6_45, https://www.researchgate.net/publication/339959053_Fault_Tolerance_Time_Interval_How_to_define_and_handle, [dostęp: 03.02.2023]

[142] Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Dz. U. z 2018 r. poz. 2068, z późn. Zm, <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/a/3572/ustawa-o-drogach-publicznych>, [dostęp: 12.01.2023]

[143] Guzek M., Czas reakcji kierowcy samochodu w zależności od metody oceny, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej z. 112 Transport 2016, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu., <https://www.wt.pw.edu.pl/content/download/6311/35462/file/Marek%20Guzek.pdf>, [dostęp: 03.02.2023]

[144] Rodzaje dróg w Polsce, Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, Ministerstwo Infrastruktury, <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/rodzaje-drog-w-polsce>, [dostęp: 12.01.2023]

[145] Dz.U.2016.124, Wersja od: 30 sierpnia 2020 r., § 15. - [Szerokość pasów ruchu] - Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/warunki-techniczne-jakim-powinny-odpowiadac-drogi-publiczne-i-16835362/par-15>, [dostęp: 12.01.2023]

[146] Jones D. K., Awowede C., Ellinger M., Kretz A., Krishnamoorthy J., Leveraging Risk Tolerances and Simple Kinematics to Quantify Fault Tolerant Time Intervals for Commercial Trucks, Technical Paper 2021-01-0066, ISSN: 0148-7191, e-ISSN: 2688-3627, DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0066>, Published April 06, 2021 by SAE International in United States, <https://saemobilus.sae.org/content/2021-01-0066/>, [dostęp: 03.02.2023]

- [147] Schmittner Ch., Shaaban A., Štolfa S., Štolfa J., Plucar J., Spányik M., Salamun A., Messnarz R., Ekert D., Macher G., Much A., Automotive Cybersecurity - Training the Future. 10.1007/978-3-030-85521-5_14., 2021, https://www.researchgate.net/publication/354148293_Automotive_Cybersecurity_-_Training_the_Future, [dostęp: 21.12.2022]
- [148] NSC 800-207, Architektura bezpieczeństwa systemów informacyjnych w modelu „Zero zaufania” NSC-800-207_wer.1.0_Narodowy Standard Cyberbezpieczeństwa 7.09.2021 <https://www.gov.pl/web/baza-wiedzy/narodowe-standardy-cyberbezpieczenstwa> , [dostęp: 12.12.2022]
- [149] ISO/SAE 21434:2021 Road vehicles — Cybersecurity engineering:
- [150] Khan, Rafiullah & Mclaughlin, Kieran & Lavery, David & Sezer, Sakir. (2017). STRIDE-based threat modeling for cyber-physical systems. 1-6. 10.1109/ISGTEurope.2017.8260283, https://www.researchgate.net/publication/322585173_STRIDE-based_threat_modeling_for_cyber-physical_systems, [dostęp: 12.12.2023]
- [151] ETSI T (2017) 102 165-1 v5. 2.3 (2017-10) cyber; methods and protocols; part 1: Method and proforma for threat, vulnerability. Risk Analysis (TVRA) Standard, European Telecommunications Standards Institute (ETSI)
- [152] Macher G, Sporer H, Berlach R, Armengaud E, Kreiner C, Sahara: a security-aware hazard and risk analysis method, 2015, In: Proc. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, pp. 621–624
- [153] Zsombor P., Intiyaz K., Arpad T., Analysis of Security Vulnerability Levels of In-Vehicle Network Topologies Applying Graph Representations, Journal of Electronic Testing 37, 613–621 (2021), 10.01.2022 <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05973-x>, https://www.researchgate.net/journal/Journal-of-Electronic-Testing-1573-0727/publication/357715737_Analysis_of_Security_Vulnerability_Levels_of_In-Vehicle_Network_Topologies_Applying_Graph_Representations/links/61dc662e323a2268f99632d1/Analysis-of-Security-Vulnerability-Levels-of-In-Vehicle-Network-Topologies-Applying-Graph-Representations.pdf, [dostęp: 14.12.2022]

- [154] Bajpai P., Enbody R. Towards effective identification and rating of automotive vulnerabilities. In: Proceedings of the Second ACM Workshop on Automotive and Aerial Vehicle Security, pp. 37–44, 16.03.2020. <https://doi.org/10.1145/3375706.3380556>, <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3375706.3380556>, [dostęp: 20.05.2021]
- [155] Groza B., Murvay S., Efficient protocols for secure broadcast in controller area networks. IEEE Trans Industr Inf 9(4):2034–2042, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013 – 2013/1/10, vol. 9, no. 4, pp. 2034-2042, Nov. 2013, doi: 10.1109/TII.2013.2239301.
- [156] Hegde R., Kumar S., Gurumurthy K., The impact of network topologies on the performance of the in-vehicle network. Int JComput Theory Eng 5(3):405, International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 5, No. 3, June 2013, <http://ijcte.org/papers/719-A30609.pdf>, [dostęp: 15.08.2022]
- [157] Moritz R., Ulrich T., Thiele L., Evolutionary exploration of e/e-architectures in automotive design. In: Operations Research, Proceedings 2011, pp. 361–366. Springer
- [158] Neumann A., Mytych M.J., Wesemann D., Wisniewski L., Jasperneite J., Approaches for in-vehicle communication—an analysis and outlook. In: Proc. International Conference on Computer Networks, pp. 395–411. Springer
- [159] Kim S., Shrestha R., Automotive Cyber Security, Introduction, Challenges, and Standardization, SIT, YICT, Incheon Korea, Springer Nature Singapore 2020, ISBN 978-981-15-8055-0
- [160] Mahendiran A., Appusamy R., Karthik S., Intrusion Detection and Prevention System: Tchnologies and Challenges. International Journal of Applied Engineering Research. 10. 1 - 12., 2015, https://www.researchgate.net/publication/287208734_Intrusion_Detection_and_Prevention_System_Tchnologies_and_Challenges, [dostęp: 13.08.2022]
- [161] Aschenbruck N., Bauer J., Bieling, J., Bothe A., Schwamborn M., A security architecture and modular intrusion detection system for WSNs. 1-8. 10.1109/INSS.2012.6240521, 2012, https://www.researchgate.net/publication/261487078_A_security_architecture_and_modular_intrusion_detection_system_for_WSNs, [dostęp: 15.08.2022]

- [162] Prabu M., Shanmugalakshmi R., An Overview of Side Channel Attacks and Its Countermeasures using Elliptic Curve Cryptography. International Journal on Computer Science and Engineering. 2., https://www.researchgate.net/publication/49965122_An_Overview_of_Side_Channel_Attacks_and_Its_Countermeasures_using_Elliptic_Curve_Cryptography, [dostęp: 30.09.2022]
- [163] Pohoska K., Spoofing, 09.10.2021, <https://magazyn-ksp.policja.gov.pl/mag/poradniki/106090,Spoofing.html>, [dostęp: 30.09.2022]
- [164] Diao M., Shalaby M., Adel A., Kamel H., Ayman M., Undetectable Tapping Methods for Gigabit Passive Optical Network (GPON). 52-57. 10.1109/ICENCO.2018.8636110, https://www.researchgate.net/publication/330950479_Undetectable_Tapping_Methods_for_Gigabit_Passive_Optical_Network_GPON, [dostęp: 30.09.2022]
- [165] Guide to Automotive Connectivity and Cybersecurity, Trends, technologies, Innovations and Applications, Dietmar P.F Moeller, Roland E. Haas, Springer 2019, ISBN: 978-3-319-73512-2
- [166] Olsson H., Vehicle data acquisition using CAN, 8801 East Hampden Avenue Suite 210, Denver, Colorado, 80231 USA
- [167] SAE J1939/11 Physical Layer,
- [168] ISO 11898-1:2003 Road vehicle – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling
- [169] ISO 11898-2:2003 Road vehicle – Controller area network (CAN) – Part 2: High speed medium access unit
- [170] ISO 11898-1:2003 Road vehicle – Controller area network (CAN) – Part 3: Low speed, fault-tolerant, medium-dependent interface.
- [171] Orczyk T., Klasyfikacja danych niekompletnych w oparciu o komitet klasyfikatorów, Uniwersytet Śląski, Wydział informatyki i nauki o materiałach, Instytut informatyki, Rozprawa doktorska, Sosnowiec 2018, https://sbc.org.pl/Content/318222/doktorat4003_Tomasz_Orczyk.pdf, [dostęp: 23.11.2022]

- [172] UN Regulation No. 107 - Rev.7,
- [173] PN-EN 60529:2003 - Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (Kod IP)
- [174] Fryskowski B., Grzejszczyk E., Systemy transmisji danych, Wydanie 1 WKŁ, Warszawa 2010.
- [175] Boland J., Buckley F., Miller M., Eccentric digraphs, Discrete Mathematics, Volume 286, Issues 1–2, 6 September 2004, Pages 25-29, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012365X04002092>, [dostęp: 12.01.2023]
- [176] Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., Optymalizacja, Wydawnictwo naukowe PWN SA, ISBN 978-83-01-15961-0, Warszawa 2009
- [177] Whitley, D., Rana, S., Dzuberka, J., Mathias, K. E., Evaluating evolutionary algorithms. Artificial intelligence, 85(1-2), 245-276.
- [178] Lu L., Anderson-Cook Ch., Robinson T., Optimization of Designed Experiments Based on Multiple Criteria Utilizing a Pareto Frontier. Technometrics. 53. 353-365. 10.1198/TECH.2011.10087, https://www.researchgate.net/publication/261653951_Optimization_of_Designed_Experiments_Based_on_Multiple_Criteria_Utilizing_a_Pareto_Frontier, [dostęp: 07.12.2022]
- [179] Bura W., Rozprawa doktorska, Wielokryterialne, mrowiskowe algorytmy optymalizacji w nawigacji samochodowej, Sosnowiec, 2014 r., Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, Instytut Informatyki, <https://core.ac.uk/download/pdf/197751085.pdf>, [dostęp: 20.01.2023]
- [180] Miedź: <https://www.bankier.pl/inwestowanie/profile/quote.html?symbol=MIEDZ>, [dostęp: 20.03.2023]
- [181] Elektronika B2B, Ceny komponentów nadal rosna, Środa, 13 lipca 2022, <https://elektronikab2b.pl/biznes/54939-ceny-komponentow-nadal-rosna>, [dostęp: 20.09.2022]
- [182] Zogbi D., Passive Electronic Components Market and Materials July 2022, <https://passive-components.eu/passive-electronic-components-market-and-materials-july-2022/>, [dostęp: 14.11.2022]

[183] Kapadia A.S., Chan W., Moyé L. A., *Mathematical Statistics With Applications*, ISBN 9781032477893, 2023, CRC Press

[184] Jajczyk J., Matwiejczyk K., *Diagnostyka magistrali CAN w pojazdach*, Poznań University of Technology Academic Journals, No 79 Electrical Engineering 2014, http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2014/5_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology_79/!31_4_Jajczyk.pdf, [dostęp: 23.02.2023]

[185] Thomopoulos N. T., *Statistical Distributions*, Springer International Publishing AG, 2017, ISBN: 3319651110